

Analisis Kesesuaian Lokasi Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) di Kota Surabaya

The Location Suitability Analysis of Electrical Vehicle Charging Stations in Surabaya City

Muhammad Hidayatul Ummah^{*1}, Diyono²

¹Program Studi Magister Teknik Geomatika, Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 55281, Indonesia.

²Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 55281, Indonesia.

Korespondensi penulis: muhammadhidayatulummah@mail.ugm.ac.id

Diterima: 31072024; Diperbaiki: 18102024; Disetujui: 22102024; Dipublikasi: 22102024

Abstrak: Transisi penggunaan kendaraan bermotor berbahan bakar listrik menjadi salah satu solusi pengendalian polusi udara di kota-kota besar salah satunya Kota Surabaya. Untuk mewujudkan upaya tersebut, penyiapan infrastruktur pendukung kendaraan berbahan bakar listrik sangat diperlukan, salah satunya stasiun pengisian kendaraan listrik umum (SPKLU). Penelitian ini melakukan analisis tingkat kesesuaian lokasi SPKLU di Kota Surabaya menggunakan pendekatan *spatial multi-criteria evaluation* (SMCE) dengan menerapkan *analytical hierarchy process* (AHP) sebagai alat pendukung. Penelitian ini mempertimbangkan 4 kriteria yaitu faktor lingkungan, infrastruktur transportasi, ketersediaan energi, dan sosio-ekonomi. Berdasarkan perbandingan berpasangan menggunakan AHP, faktor infrastruktur transportasi memiliki bobot tertinggi dengan nilai 0,679. Nilai inkonsistensi pada semua perbandingan berpasangan yang dilakukan kurang dari 0,1, sehingga dapat diinterpretasikan perbandingan tersebut konsisten pada tingkat kepercayaan 90%. Analisis kesesuaian lokasi SPKLU Kota Surabaya menunjukkan bahwa area studi didominasi oleh tingkat kesesuaian sangat tinggi dengan luasan 141,620 km² (42,10%). Sebanyak 20 titik acak dalam wilayah dengan kelas kesesuaian sangat tinggi dipilih sebagai pilihan alternatif penentuan prioritas utama pembangunan SPKLU. Dari 20 titik tersebut A20 merupakan titik dengan prioritas tertinggi yaitu 5,6%. Berdasarkan analisis sensitivitas, alternatif tersebut merupakan alternatif yang paling stabil posisi urutannya pada simulasi penghilangan salah satu bobot. Dari model kesesuaian lokasi SPKLU, didapatkan evaluasi model dengan nilai AUC (*area under curve*) sebesar 0,959 yang termasuk kategori sangat baik. Penelitian ini dapat membantu pemegang kepentingan dalam penyediaan infrastruktur kendaraan berbahan bakar listrik di Kota Surabaya pada lokasi yang tepat. Dengan demikian, infrastruktur tersebut dapat dimanfaatkan sebaik-baiknya oleh masyarakat luas.

Copyright © 2024 Geoid. All rights reserved.

Abstract: The transition to the adoption of electrical vehicles becomes an important strategy to minimize air pollution in urban areas, such as Surabaya City. To realize this program, supporting infrastructure for electric vehicles must be prepared, one of which is a public electric vehicle charging station (SPKLU). This research analyzes the location suitability of SPKLU in Surabaya City using a *spatial multi-criteria evaluation* (SMCE) approach by applying the *analytical hierarchy process* (AHP) as a supporting tool. This research involved four criteria, namely environmental factors, transportation infrastructure, energy availability, and socio-economic factors. According to pairwise comparison using AHP, the transportation infrastructure factor has the highest weight with a value of 0.679. The inconsistency value in all pairwise comparisons conducted is less than 0.1, it can be identified that pairwise comparison was consistent with 90% level of confidence. Analysis of the SPKLU suitability locations in Surabaya City shows that the study area is dominated by a very high level of suitability, with an area of 141.620 km² (42.10% of the total area). 20 random points within the area with a very high suitability class were selected as alternative selections for determining the main priorities for SPKLU establishment. Of these 20 points, A20 is the one with the highest priority at 5.6%. Based on the sensitivity analysis, this alternative is the most stable alternative in the simulation of the removal of one of the weights. From the SPKLU location suitability model, the model evaluation is obtained with an AUC (*area under curve*) value of 0.959, which is in the excellent category. This research can support stakeholders in providing electrical vehicle infrastructure in Surabaya City in the appropriate location. Thus, the infrastructure can be optimally utilized by the public at large.

Kata kunci: *analytical hierarchy process*, kesesuaian lokasi, *sensitivity analysis*, *spatial multi-criteria evaluation*, dan stasiun pengisian kendaraan listrik umum.

Cara untuk sitasi: Ummah, M.H. & Diyono (2024). Analisis Kesesuaian Lokasi Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) di Kota Surabaya. *Geoid*, 19(3), 429 - 447.

Pendahuluan

Tingkat urbanisasi semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan memiliki implikasi signifikan pada berbagai sektor di wilayah perkotaan. Hal ini akan berdampak pada emisi gas karbon yang semakin tinggi akibat aktivitas mobilisasi tersebut. Menurut Ahmad dkk., 2022 hampir 30% gas rumah kaca disumbang oleh sektor transportasi. Untuk menekan emisi karbon karena faktor transportasi, banyak negara telah mengadopsi penggunaan kendaraan berkelanjutan yang ramah lingkungan. Kota Surabaya merupakan salah satu kota metropolitan terbesar kedua setelah Daerah Khusus Ibu Kota Jakarta. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Timur, terdapat 3.259.661 unit kendaraan bermotor di Kota Surabaya pada tahun 2020. Dari total tersebut, 79,743% nya merupakan kendaraan sepeda motor. Jumlah kendaraan bermotor tersebut meningkat 2,932% dari tahun sebelumnya (Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Timur, 2021). Berdasarkan laporan kajian inventarisasi gas rumah kaca (GRK) Pemerintah Kota Surabaya pada tahun 2022, terdapat emisi 1.588,02 Gg CO₂/tahun, 0,41 Gg CH₄/tahun, dan 0,15 Gg N₂O/tahun yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar pada sumber bergerak (Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya, 2022). Untuk mereduksi emisi karbon di Kota Surabaya, terdapat transisi penggunaan kendaraan umum berbahan bakar listrik yang beroperasi di Kota Surabaya, yaitu kendaraan bus. Bus Trans Semanggi Listrik dikenalkan oleh Pemerintah Kota Surabaya sebagai alternatif dalam mengurangi kemacetan dan menekan emisi karbon kendaraan (Rosyidah dkk., 2024). Selain itu, Pemerintah Kota Surabaya juga mencanangkan untuk mengganti kendaraan operasional kantor pemerintahan menjadi kendaraan berbahan bakar listrik (Badan Pengelolaan Keuangan dan Aset Daerah Kota Surabaya, 2023).

Kendaraan listrik memiliki potensi yang sangat besar untuk menjadi alat transportasi nol emisi jika energi listrik yang digunakan bersumber dari energi terbarukan seperti angin dan tenaga surya. Jika sumber energi yang digunakan oleh kendaraan listrik berasal dari energi batu bara, emisi dari pembangkit listrik tersebut masih menambah jejak emisi karbon yang dihasilkan oleh kendaraan listrik (Chellaswamy & Ramesh, 2017). Tantangan utama ketika terdapat transisi kendaraan berbahan bakar fosil ke kendaraan listrik adalah permintaan stasiun pengisian daya yang menggunakan energi bersih dan dapat diandalkan (Guler & Yomralioglu, 2020a). Lokasi ini lazim disebut dengan stasiun pengisian kendaraan listrik umum (SPKLU). Lokasi yang sesuai untuk penempatan SPKLU memiliki tantangan tersendiri. Pembangunan SPKLU yang aman, efisien, dan ekonomis sangat penting dalam mempercepat proses transisi penggunaan kendaraan listrik oleh konsumen. Hal ini akan mendorong pertumbuhan sektor transportasi listrik. Begitu sebaliknya, kurangnya fasilitas SPKLU dapat menghambat proses transisi ke penggunaan kendaraan listrik dan menyebabkan berkurangnya minat konsumen dalam menggunakan kendaraan tersebut (Liu dkk., 2022). Pemilihan lokasi dengan berbagai pertimbangan yang tepat untuk SPKLU sangat penting karena memiliki dampak signifikan pada kualitas layanan dan efisiensi operasional stasiun selama masa pemakaiannya (Pradhan dkk., 2022). Dalam melakukan analisis penentuan lokasi SPKLU, diperlukan analisis yang komprehensif dengan memperhatikan berbagai faktor seperti lingkungan, infrastruktur transportasi, ketersediaan energi, dan sosio-ekonomi. Dengan mempertimbangkan berbagai aspek, penentuan lokasi SPKLU dapat lebih efisien.

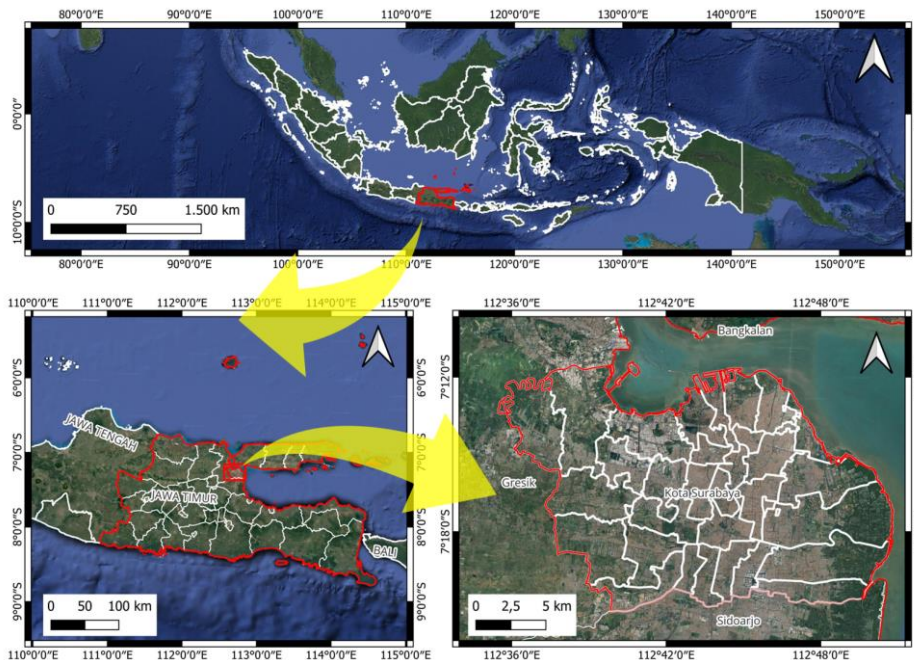
Mengingat pentingnya dalam mempertimbangkan berbagai faktor dalam pembangunan SPKLU, beberapa metode melalui penelitian berkembang untuk menentukan lokasi paling sesuai dalam pembangunan SPKLU. Integrasi *multi-criteria decision making* (MCDM) dengan sistem informasi geografis (SIG) atau lebih dikenal dengan *spatial multi-criteria evaluation* (SMCE) dapat membantu mengatasi tantangan dalam mengevaluasi kriteria kesesuaian lokasi SPKLU melalui analisis spasial (Wang dkk., 2023). SIG memungkinkan integrasi antar data spasial dalam memecahkan masalah, sementara MCDM melibatkan evaluasi, prioritas, dan desain keputusan alternatif menggunakan prosedur dalam pengambilan keputusan yang kompleks. MCDM

menyediakan kerangka kerja dalam menilai berbagai faktor yang mempengaruhi kesesuaian lokasi pembangunan SPKLU dan menghasilkan keputusan yang optimal (Halder dkk., 2022). Terdapat beberapa penelitian yang mengadopsi teknik SMCE untuk evaluasi kesesuaian pembangunan SPKLU. Rane dkk., 2023 mengintegrasikan SIG dengan *multi-criteria influencing factor* (MIF) dan *techiqque for order preference by similarity to ideal solution* (TOPSIS) untuk melakukan analisis kesesuaian lokasi SPKLU di Kota Mumbai, India. Teknik MIF pada penelitian tersebut dilakukan untuk menentukan bobot masing-masing kriteria dalam analisis spasial kesesuaian lokasi, sementara TOPSIS digunakan untuk memberikan peringkat beberapa alternatif yang didapatkan dari proses analisis spasial kesesuaian lokasi. Dari model yang dibuat tersebut, didapatkan nilai *area under curve* (AUC) sebesar 0,826. Penelitian lain yang dilakukan oleh Mhana & Awad, 2024 mengevaluasi kesesuaian lokasi pembangunan SPKLU di Baghdad (Irak) dan Riyadh (Arab Saudi) menggunakan SMCE dengan jenis MCDM yang digunakan adalah *analitichal hierarchy process* (AHP) dan *fuzzy AHP* (FAHP). Penelitian tersebut membandingkan kedua pendekatan tersebut untuk memecahkan permasalahan kesesuaian lokasi SPKLU. Dengan melihat potensi dari keandalan penggunaan SMCE tersebut dalam melakukan evaluasi menggunakan SMCE, maka teknik tersebut berpotensi untuk diterapkan di Indonesia khususnya di Kota Surabaya. Terdapat penelitian yang serupa terkait evaluasi kesesuaian lokasi SPKLU di Kota Surabaya. Penelitian yang dilakukan oleh Sugieanto, 2022 yang menerapkan AHP dan analisis spasial untuk evaluasi kesesuaian lokasi SPKLU di Kota Surabaya. Namun demikian, pada penelitian tersebut, hanya sampai pada gambaran kesesuaian lokasi saja, belum melakukan pemeringkatan alternatif yang didapatkan setelah analisis kesesuaian lokasi. Selain itu, pada penelitian tersebut juga belum melakukan analisis sensitivitas untuk melakukan pengujian model. Disisi lain, pemeringkatan alternatif dapat membantu pemangku kebijakan dalam menyimpulkan alternatif lokasi SPKLU paling sesuai dari beberapa alternatif yang berada pada kategori kesesuaian sangat tinggi. Sementara itu, analisis sensitivitas merupakan tahap penting dalam menentukan kekuatan dan ketepatan solusi prioritas alternatif (May dkk., 2013).

Dengan demikian, Meskipun penelitian sudah banyak berkembang terkait penggunaan SMCE untuk evaluasi kesesuaian lokasi SPKLU di berbagai negara beserta analisis sensitivitasnya, namun evaluasi yang sama untuk penerapan di Indonesia masih terbatas. Oleh karena itu, pada penelitian ini menerapkan teknik SMCE untuk evaluasi kesesuaian lokasi SPKLU di Kota Surabaya. Teknik MCDM dalam SMCE yang digunakan dalam penelitian ini adalah AHP. Pada penelitian ini memberi gambaran kesesuaian lokasi SPKLU secara umum di Kota Surabaya, serta mengevaluasi beberapa alternatif yang berpotensi menjadi lokasi pembangunan SPKLU melalui analisis sensitivitas. Melalui analisis ini, dapat meningkatkan ketepatan dan efisiensi dalam evaluasi kesesuaian lokasi pembangunan SPKLU di Kota Surabaya. Dengan adanya analisis ini, akan menambah informasi untuk meningkatkan kemungkinan membangun lokasi SPKLU yang sesuai dan efisien di Kota Surabaya. Reduksi emisi karbon karena sektor transportasi dapat tercapai dengan keberadaan infrastruktur ini. Melalui hal tersebut, pembangunan berkelanjutan dan *smart city* di Kota Surabaya dapat tercapai.

Data dan Metode

Penelitian ini dilakukan di Kota Surabaya, Provinsi Jawa Timur, Indonesia. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Kota Surabaya merupakan ibu kota Provinsi Jawa Timur, secara geografis terletak di 7° 11' 25,411" - 7° 21' 5,238" Lintang Selatan dan 112° 35' 29,177" - 112° 50' 48,602" Bujur Timur. Luas lokasi penelitian adalah 350,540 km². Kota Surabaya berbatasan dengan Selat Madura di sisi utara dan timur, Kabupaten Sidoarjo di sisi selatan, dan Kabupaten Gresik sisi sisi barat. Kota Surabaya pada tahun 2023 memiliki jumlah penduduk sebesar 3,01 juta jiwa. Jumlah penduduk tersebut meningkat sebesar 0,42% dari tahun 2022. Salah satu komponen sumber bergerak tersebut adalah kendaraan bermotor. Dengan melihat data peningkatan penggunaan kendaraan bermotor, tentunya nilai emisi polusi udara yang dihasilkan pada sektor transportasi di Kota Surabaya akan semakin meningkat. Oleh karena itu, transisi penggunaan kendaraan bermotor dengan tenaga listrik memiliki urgensitas yang cukup tinggi untuk mereduksi emisi polusi udara tersebut. Untuk menunjang program tersebut, dibutuhkan pembangunan SPKLU di lokasi-lokasi strategis di Kota Surabaya.



Gambar 1. Lokasi penelitian (adaptasi dari <https://tanahair.indonesia.go.id>)

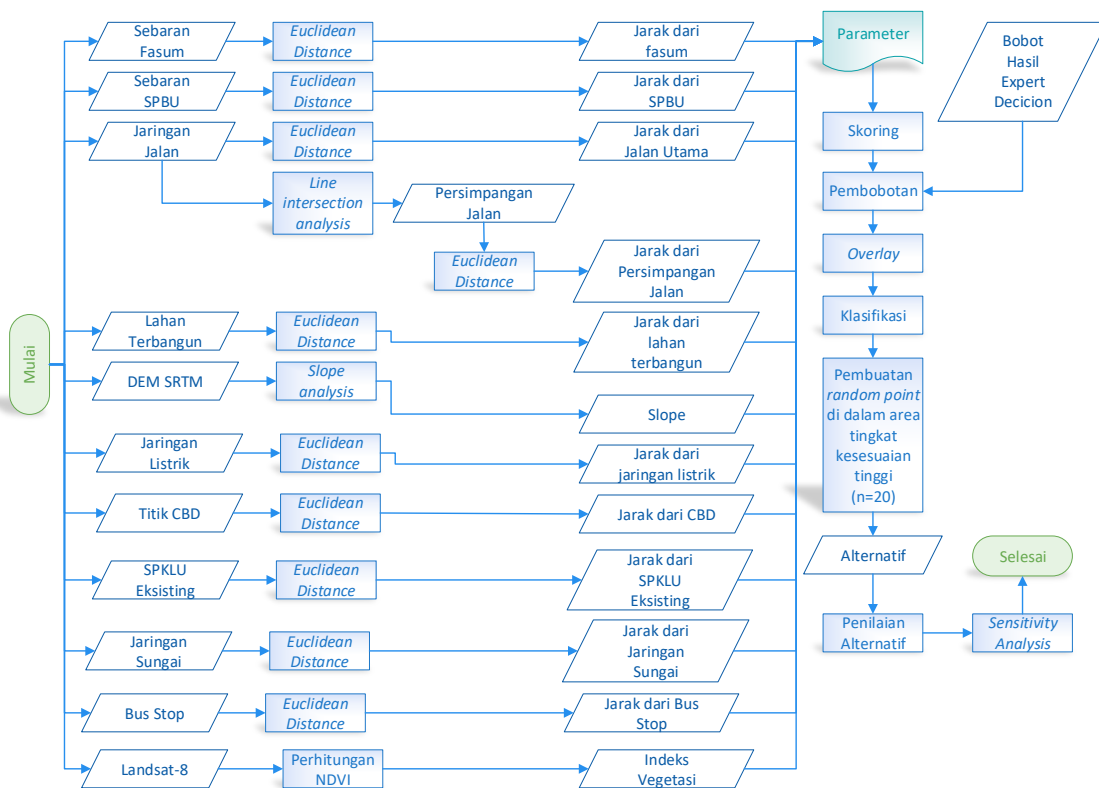
Penentuan lokasi yang sesuai untuk pembangunan SPKLU memerlukan beberapa parameter atau kriteria yang dapat merepresentasikan permasalahan dalam penempatan SPKLU. Dalam penelitian ini, parameter ditentukan dengan melakukan studi literatur pada beberapa penelitian terdahulu. Berdasarkan studi literatur yang sudah dilakukan, dirumuskan empat kriteria dalam penentuan kesesuaian lokasi SPKLU di Kota Surabaya. Empat faktor tersebut diantaranya faktor lingkungan, faktor infrastruktur transportasi, faktor ketersediaan energi, dan faktor ekonomi. Adapun setiap kriteria memiliki sub-kriteria. Pada kriteria faktor lingkungan, terdapat tiga sub-kriteria yaitu indeks vegetasi, jarak dari badan air, dan kemiringan lereng (*slope*). Pada kriteria faktor infrastruktur transportasi terdapat tiga sub-kriteria yaitu jarak dari jalan utama, jarak dari persimpangan jalan, dan jarak dari halte bus. Pada kriteria ketersediaan energi, terdapat sub-kriteria jarak dari SPBU, jarak dari SPKLU eksisting, dan jarak dari jaringan listrik. Pada kriteria faktor sosio ekonomi, terdapat tiga sub-kriteria yaitu jarak dari *central business district* (CBD), jarak dari fasilitas umum, dan jarak dari lahan terbangun. Untuk mendapatkan kriteria dan sub-kriteria pada analisis kesesuaian lokasi pembangunan SPKLU, dilakukan beberapa analisis spasial data mentah (*raw data*) dari berbagai sumber, format, dan skala/resolusi spasial. Untuk melakukan analisis tersebut, dibutuhkan alat berupa beberapa perangkat lunak. Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah perangkat lunak pengolah data spasial, perangkat lunak pengolah data penginderaan jauh berupa *google earth engine* (GEE), dan perangkat lunak pengolah kuisioner AHP yaitu Super Decisions. Adapun data yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data yang digunakan dalam penelitian

No.	Data	Tipe	Skala/Resolusi Spasial	Sumber
1	Sebaran fasilitas umum	Vektor (titik)	1:25.000	Peta Rupa Bumi Indonesia Kota Surabaya
2	Sebaran titik SPBU	Vektor (titik)	-	<i>Open Street Map</i>
3	Jaringan jalan	Vektor (garis)	1:25.000	Peta Rupa Bumi Indonesia Kota Surabaya
4	Data <i>normalized difference vegetation indeks</i> (NDVI)	Raster	30 m	Pengolahan Landsat-8 perekaman sepanjang tahun 2023, dengan meratakan nilai spektral tiap piksel di Kota Surabaya pada <i>platform</i> GEE
5	Tutupan lahan terbangun	Vektor (poligon)	1:25.000	<i>Open Street Map</i>

No.	Data	Tipe	Skala/Resolusi Spasial	Sumber
6	Digital elevation model (DEM)	Raster	30 m	Open Street Map
7	Sebaran titik jaringan listrik	Vektor (titik)	-	Open Street Map
8	Sebaran titik CBD	Vektor (titik)	-	Open Street Map
9	Sebaran SPKLU eksisting	Vektor (titik)	-	Identifikasi pada platform my maps dari Google.
10	Jaringan sungai	Vektor (garis)	1:25.000	Peta Rupa Bumi Indonesia Kota Surabaya
11	Sebaran pemberhentian bus	Vektor (titik)	-	Open Street Map

Teknik penentuan kesesuaian lokasi pembangunan SPKLU di Kota Surabaya pada penelitian ini adalah SMCE. Teknik MCDM yang digunakan dalam SMCE pada penelitian ini adalah AHP. Proses penelitian ini dapat dilihat dalam diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 2. Diagram alir metodologi penelitian

Secara garis besar, terdapat tiga tahap utama dalam penelitian ini yaitu pengolahan data sub-kriteria (parameter), pembobotan kriteria dan sub-kriteria menggunakan AHP, dan pengolahan SMCE dari bobot hasil AHP dan data parameter dalam analisis ini. Tahap pengolahan parameter dilakukan untuk memproduksi data parameter dalam analisis kesesuaian SPKLU. Terdapat tiga teknik yang digunakan untuk menghasilkan data parameter analisis dari data mentah. Untuk mendapatkan parameter jarak dari suatu fitur, dilakukan *euclidean distance analysis* (ED). ED merupakan ukuran jarak lurus dalam ruang dimensi n (Gao dkk., 2023). Beberapa parameter yang dilakukan analisis ini adalah jarak dari fasilitas umum (ED_{FU}), jarak dari SPBU (ED_{SP}), jarak dari jalan utama (ED_{JU}), jarak dari persimpangan jalan (ED_{PJ}), jarak dari lahan terbangun (ED_{LT}), jarak dari jaringan listrik (ED_{JL}), jarak dari CBD (ED_{CBD}), jarak dari SPKLU eksisting (ED_{SE}), jarak dari sungai (ED_{SU}), dan jarak dari pemberhentian bus (ED_{PB}). Prinsip perhitungan jarak dari suatu fitur menggunakan ED dalam ruang dua dimensi mengikuti persamaan 1. Dimana x_1, y_1 adalah koordinat dua dimensi fitur 1, dan x_2, y_2 adalah koordinat dua dimensi fitur 2 (Patel & Swathika, 2023).

$$ED(x, y) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

Teknik analisis lainnya untuk menghasilkan menjadi parameter adalah analisis NDVI. Parameter ini diolah dari data citra satelit Landsat-8 menjadi data indeks vegetasi. Analisis ini dilakukan menggunakan platform GEE. Nilai rata-rata spektral sepanjang perekaman tahun 2023 diturunkan menjadi indeks vegetasi. NDVI memberikan estimasi secara kuantitatif biomassa, kesehatan vegetasi, dan evaluasi status vegetasi dengan mengukur perbedaan antara bagian *near infra-red* (NIR/Zona pantul) dan kanal merah (R/Zona serap). NDVI memiliki rentang nilai -1 hingga +1. Semakin dekat nilainya dengan +1, semakin tinggi kerapatan vegetasi pada suatu wilayah (Amani & Shafizadeh-Moghadam, 2023). Penurunan data multi-spektral menjadi data NDVI mengikuti pada persamaan 2 (Pettorelli, 2013).

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (2)$$

Analisis kemiringan lereng (*slope*) dilakukan untuk menghasilkan parameter kemiringan lereng dari data DEM. Perhitungan dan pengolahan kemiringan lereng dari suatu DEM dengan satuan derajat dapat diperoleh menggunakan persamaan 3. Dimana x_1, y_1 adalah koordinat dua dimensi sentroid piksel 1, dan x_2, y_2 adalah koordinat dua dimensi sentroid piksel 2 .

$$\tan \theta = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \theta = \tan^{-1} \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3)$$

Tahap kedua adalah penilaian bobot prioritas masing-masing kriteria dan sub-kriteria menggunakan teknik AHP. Penilaian bobot prioritas dilakukan dengan membentuk matriks perbandingan berpasangan. Pembuatan matriks perbandingan berpasangan dilakukan dengan menggunakan sifat resiprokal, dimana jika perbandingan i terhadap j adalah a_{ij} , maka perbandingan j terhadap i adalah $1/a_{ij}$. Penilaian perbandingan berpasangan dilakukan dengan dua tahap yaitu penilaian berpasangan kriteria terhadap tujuan. Tujuan disini adalah penentuan kesesuaian lokasi SPKLU. Tahap kedua adalah penilaian berpasangan sub-kriteria terhadap masing-masing kriteria. Dengan demikian, terdapat 4 matriks perbandingan berpasangan. Adapun ukuran matriks perbandingan berpasangan yang diperoleh adalah 4×4 untuk matriks perbandingan kriteria terhadap tujuan, dan 3×3 untuk matriks penilaian sub-kriteria terhadap masing-masing kriteria. Penilaian ini dilakukan didasarkan pada sintesis dari beberapa literatur yang disesuaikan dengan karakteristik Kota Surabaya. Beberapa literatur utama yang menjadi rujukan dalam sintesis perbandingan berpasangan adalah Elomiya dkk., 2024; Guler & Yomralioglu, 2020b; Kaya dkk., 2022; Mhana & Awad, 2024; dan Rane dkk., 2023. Setelah didapatkan matriks perbandingan berpasangan, dilakukan normalisasi pada masing-masing kolom. Bobot masing-masing kriteria atau sub-kriteria didapatkan dengan menghitung rata-rata setiap baris matriks normalisasi. Kontrol kualitas AHP dilakukan dengan menggunakan parameter *consistency ratio* (CR). Untuk mendapatkan nilai CR, perlu dilakukan perhitungan nilai eigen maksimum (λ_{max}) dengan persamaan 4. Dimana W adalah matriks bobot, dan A adalah matriks perbandingan berpasangan.

$$[AW = \lambda_{max}W] \quad (4)$$

Setelah mendapatkan nilai λ_{max} , dilakukan perhitungan *consistency index* (CI). CI dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 5. Dimana n adalah jumlah kriteria atau sub-kriteria yang dipertimbangkan.

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (5)$$

Perhitungan CR dilakukan dengan menggunakan persamaan 6. *RI* adalah *random inconsistency index*. Nilai RI pada matriks 3×3 adalah 0,52 dan pada matriks 4×4 adalah 0,89. Hipotesis yang diterapkan dalam penilaian inkonsistensi ini adalah matriks perbandingan berpasangan konsisten pada tingkat kepercayaan 90%. Oleh karena itu, nilai maksimum CR agar bobot perhitungan hasil proses AHP dapat digunakan adalah 0,1.

$$CR = CI/RI \quad (6)$$

Tahap ketiga adalah pengolahan kesesuaian lokasi SPKLU menggunakan bobot hasil pemrosesan AHP. Basis analisis kesesuaian ini adalah pada data raster. Oleh karena itu, data parameter yang memiliki format data vektor, dilakukan proses konversi menjadi data raster. Data parameter dilakukan konversi menjadi nilai pada rentang 1 hingga 5. Hal ini diinterpretasikan nilai 1 merupakan nilai parameter sangat tidak sesuai, 2 : tidak sesuai, 3 : cukup sesuai, 4 : sesuai, dan 5 : sangat sesuai. Adapun tabel konversi nilai parameter menjadi rentang nilai 1-5 dapat dilihat pada Tabel 2. Setelah itu, dilakukan perhitungan nilai akhir dari setiap piksel menjadi tingkat kesesuaian pembangunan SPKLU berdasarkan bobot parameter hasil pengolahan AHP. Nilai akhir tersebut diklasifikasikan kembali menjadi tingkat kesesuaian sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi menggunakan *natural break* dengan jumlah kelas sebanyak 5. Pembuatan titik lokasi alternatif sebanyak 20 dilakukan dengan menyebar titik secara acak pada area dengan tingkat kesesuaian sangat tinggi yang disesuaikan dengan kondisi aksesibilitas lokasi. Lokasi alternatif tersebut dilakukan evaluasi untuk penentuan lokasi paling optimum sebagai prioritas utama pembangunan SPKLU dan analisis sensitivitas.

Evaluasi prioritas dan sensitivitas alternatif menggunakan parameter yang sama untuk evaluasi kesesuaian lokasi SPKLU. Teknik penilaian prioritas dilakukan dengan secara langsung menggunakan skor dalam rentang 1-5 yang dinormalisasi kembali pada rentang 0-1. Analisis sensitivitas dilakukan dengan simulasi menghilangkan salah satu parameter, kemudian melakukan normalisasi bobot setelah salah satu bobot dihilangkan. Setelah itu, dilakukan perhitungan indeks sensitivitas (*IS*) sebagaimana dapat dilihat pada persamaan 7. Dimana *ISP_{PKLU}* adalah indeks SPKLU sebelum penerapan simulasi bobot, *ISP_{PKLU}'* adalah indeks SPKLU setelah penerapan simulasi, *N* adalah jumlah keseluruhan parameter, *n* adalah jumlah bobot setelah salah satu bobot dihilangkan ($n = N - 1$) (Rane dkk., 2023).

$$IS = \frac{\left| \frac{ISP_{PKLU} - ISP_{PKLU}'}{N} - \frac{ISP_{PKLU}'}{n} \right|}{ISP_{PKLU}} \times 100 \quad (7)$$

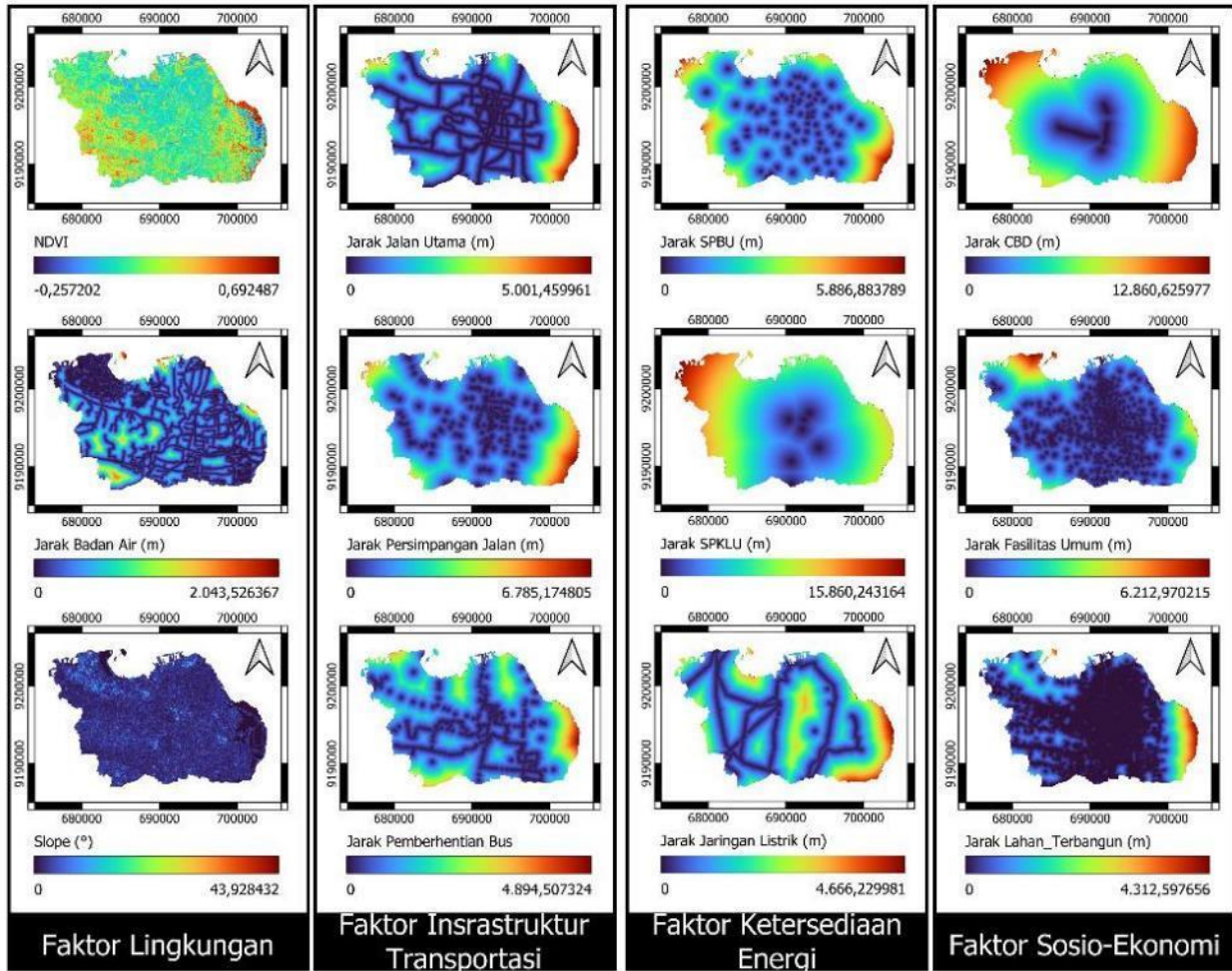
Selain perhitungan *IS*, analisis sensitivitas juga dilakukan dengan evaluasi stabilitas urutan prioritas pembangunan SPKLU ketika dilakukan simulasi bobot parameter. Setelah itu, dipilih lokasi terbaik berdasarkan analisis menggunakan evaluasi indeks kesesuaian lokasi SPKLU dan stabilitas urutan prioritas. Dengan demikian, dapat diputuskan satu lokasi prioritas pembangunan SPKLU di Kota Surabaya.

Hasil dan Pembahasan

Parameter analisis yang digunakan dalam penentuan lokasi SPKLU dapat dilihat pada Gambar 3. Kriteria faktor lingkungan terdiri dari sub-kriteria indeks vegetasi, jarak dari badan air, dan kemiringan lereng. Sub-kriteria indeks vegetasi memiliki nilai pada rentang -0,257 hingga 0,692. Nilai rata-rata NDVI adalah 0,163 dengan standar deviasi sebesar $\pm 0,144$. Pada sub-kriteria jarak dari badan air memiliki rentang nilai 0 hingga 2.040,221 m. Nilai rata-rata jarak dari badan air adalah 237,497 m dengan standar deviasi sebesar $\pm 259,813$ m. Nilai sub-kriteria kemiringan lereng memiliki rentang 0° hingga $43,928^\circ$. Nilai rata-rata kemiringan lereng adalah $2,007^\circ$ dengan standar deviasi sebesar $\pm 1,704^\circ$. Kriteria faktor infrastruktur transportasi terdiri dari jarak dari jalan utama, jarak dari persimpangan jalan, dan jarak dari pemberhentian bus. Sub-kriteria jarak dari jalan utama memiliki rentang nilai 0 hingga 5.001,460 m. Nilai rata-rata jarak dari jalan utama adalah 844,864 m dengan standar deviasi sebesar $\pm 970,298$ m. Nilai sub-kriteria jarak dari persimpangan jalan memiliki rentang nilai 0 – 6.785,175m dengan rata-rata 1.363,260 dan standar deviasi sebesar $\pm 1.250,610$ m. Sub-kriteria jarak dari pemberhentian bus memiliki rentang nilai 0 hingga 4.892,300 m. Nilai rata-rata jarak dari pemberhentian bus adalah 976,255 m dengan standar deviasi sebesar $\pm 816,297$ m. Pada kriteria faktor ketersediaan energi terdiri dari sub-kriteria jarak dari SPBU, jarak dari jaringan listrik, dan jarak dari SPKLU eksisting.

Pada sub-kriteria jarak dari SPBU memiliki rentang nilai 0 hingga 5.886,884 m, dengan nilai rata-rata sebesar 1.440,666m dan standar deviasi sebesar $\pm 1.091,335$ m. Sub-kriteria jarak dari SPKLU eksisting memiliki nilai pada rentang 0 hingga 15.846,420 m. Nilai rata-rata jarak dari SPKLU eksisting adalah 5.551,405 m dan

standar deviasi sebesar $\pm 3.348,893$ m. Sub-kriteria jarak dari jaringan listrik memiliki nilai pada rentang 0 hingga 4.660,923 m. Nilai rata-rata jarak dari jaringan listrik adalah 1.157,847 m dan standar deviasi sebesar $\pm 910,370$ m. Kriteria sosio-ekonomi terdiri dari sub-kriteria jarak dari CBD, jarak dari fasilitas umum, dan jarak dari lahan terbangun. Jarak dari CBD memiliki nilai pada rentang 0 hingga 12.855,450 m. Nilai rata-rata jarak dari CBD adalah 4.949,745 m dengan standar deviasi sebesar $\pm 2.925,522$ m. Nilai pada sub-kriteria jarak dari fasilitas umum memiliki nilai 0 hingga 6.212,970 m dengan rata-rata 853,738 m dan standar deviasi sebesar $\pm 979,343$ m. Sub-kriteria jarak dari lahan terbangun memiliki nilai pada rentang 0 hingga 4.306,855 m. Nilai rata-rata jarak dari lahan terbangun adalah 383,580 m dengan standar deviasi sebesar $\pm 708,534$ m.



Gambar 3. Data parameter pemodelan indeks kesesuaian lokasi SPKLU

Tabel 2 menunjukkan bobot masing-masing kriteria dan bobot kriteria hasil pengolahan dengan menggunakan teknik AHP. Berdasarkan hasil yang diperoleh, dari keempat kriteria yang dipertimbangkan terhadap tujuan utama, faktor infrastruktur transportasi memiliki bobot tertinggi dengan nilai 0,679. Sementara itu, kriteria yang memiliki bobot terendah adalah faktor sosio-ekonomi dengan nilai 0,064. Pada kriteria faktor lingkungan, sub-kriteria kemiringan lereng memiliki bobot tertinggi dengan nilai 0,626. Sementara itu, sub-kriteria indeks vegetasi memiliki nilai bobot terendah pada kriteria faktor lingkungan dengan nilai 0,136. Pada kriteria faktor infrastruktur transportasi, sub-kriteria dengan nilai bobot tertinggi adalah jarak dari jalan utama dengan nilai bobot 0,655. Sementara itu, sub-kriteria dengan nilai bobot terendah pada kriteria faktor infrastruktur transportasi adalah jarak dari persimpangan jalan utama dengan nilai 0,095. Untuk kriteria faktor ketersediaan energi, sub-kriteria jarak dari SPBU memiliki nilai bobot tertinggi dengan nilai 0,594. Sementara itu, bobot terendah pada kriteria ketersediaan energi adalah sub-kriteria jarak dari jaringan listrik dengan nilai 0,167.

Sub-kriteria jarak dari fasilitas umum memiliki bobot tertinggi pada kriteria faktor sosio-ekonomi dengan nilai 0,614. Sementara itu, sub-kriteria jarak dari lahan terbangun memiliki nilai bobot terendah dengan nilai 0,117. Bobot akhir diperoleh dengan mengalikan nilai bobot sub-kriteria dengan bobot kriteria. Dengan demikian, didapatkan bahwa parameter jarak dari jalan utama memiliki bobot tertinggi dibandingkan dengan 11 parameter lainnya dengan nilai 0,445. Sementara itu, parameter jarak dari lahan terbangun memiliki bobot akhir terendah dengan nilai 0,007.

Tabel 2. Kriteria dan sub-kriteria pemodelan beserta bobot hasil AHP (Modifikasi Rane dkk., 2023)

Kriteria	Sub-Kriteria	Keterangan	Kelas	Skor	Bobot Kriteria	Bobot Sub-kriteria	Bobot Akhir	
Faktor Lingkungan	Indeks Vegetasi	Vegetasi lebat dapat memberikan manfaat besar pada lingkungan sebagai promosi adopsi kendaraan bersih dan mereduksi polusi udara	0.261 - 0.398	5	0,165	0,136	0,022	
			0.146 - 0.260	4				
			0.052 - 0,145	3				
			-0,257 - 0,052	2				
			> 0,398	1				
	Jarak dari Sungai	Wilayah yang dekat dengan badan air kurang sesuai untuk SPKLU karena berpotensi banjir dan membahayakan infrastruktur pengisian daya	> 1,5 Km	5		0,238		0,039
			1 - 1,5 Km	4				
			0,5 - 1 Km	3				
			0,25 - 0,5 Km	2				
			0 - 0,25 Km	1				
	Kemiringan lereng	Kemiringan lereng yang landai mempermudah dalam pembangunan SPKLU	<5°	5		0,626		0,103
			5°-10°	4				
			10°-15°	3				
			15°-20°	2				
> 25°			1					
Faktor Infrastruktur Transportasi	Jarak dari jalan utama	Kedekatan terhadap jalan meningkatkan konektivitas dan aksesibilitas terhadap SPKLU	0 - 0,5 Km	5	0,679	0,655	0,445	
			0,5 - 1 Km	4				
			1 - 2 Km	3				
			2 - 5 Km	2				
			5 - 15 Km	1				
	Jarak dari Persimpangan Jalan Utama	SPKLU dekat dengan persimpangan jalan meningkatkan visibilitas dan aksesibilitas	0-0.5 km	5		0,095		0,065
			0.5-1 km	4				
			1-2 km	3				
			2-3 km	2				
			> 3 km	1				
	Jarak dari Pemberhentian Bus	Kedekatan dengan pemberhentian bus dapat meningkatkan aksesibilitas pada kendaraan umum berbahan bakar listrik	0-0.5 km	5		0,25		0,170
			0.5-1 km	4				
			1-2 km	3				
			2-3 km	2				
> 3 km			1					
Faktor Ketersediaan Energi	Jarak dari SPBU	Posisi SPKLU dan SPBU yang berdekatan memberikan kesempatan kendaraan berbahan bakar hybrid untuk mengisi bahan bakar cadangan	0 - 0,5 Km	5	0,092	0,594	0,055	
			0,5 - 1 Km	4				
			1 - 2 Km	3				
			2 - 5 Km	2				
			5 - 15 Km	1				

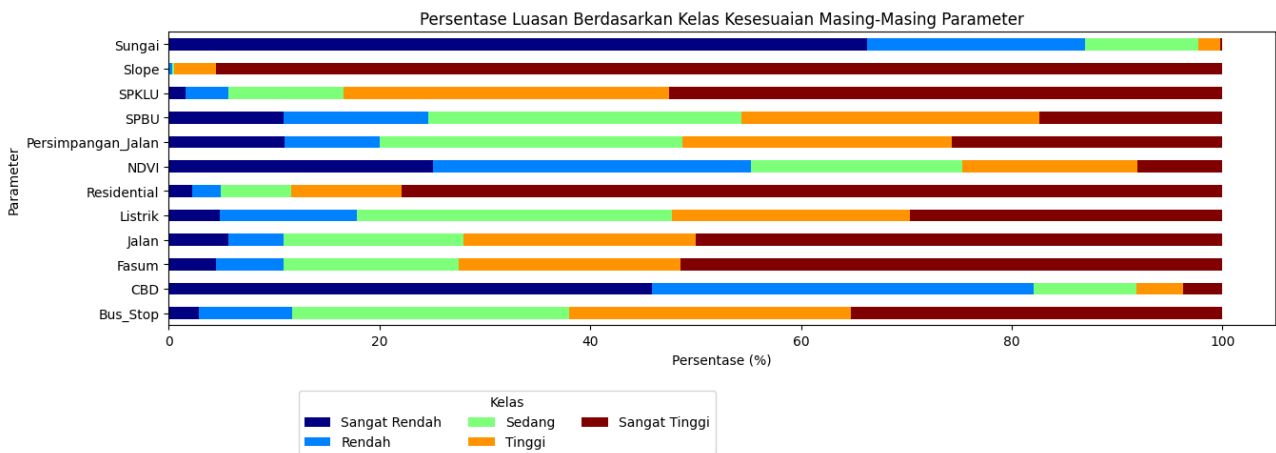
Kriteria	Sub-Kriteria	Keterangan	Kelas	Skor	Bobot Kriteria	Bobot Sub-kriteria	Bobot Akhir
		selama proses pengisian daya listrik					
	Jarak dari SPKLU Eksisting	Semakin jauh dari SPKLU eksisting dapat meningkatkan tingkat distribusi SPKLU	> 5 Km	5		0,249	0,023
			2 - 5 Km	4			
			1 - 2 Km	3			
			1 -2 Km	2			
			0,5 - 1 Km	1			
	Jarak dari Jaringan Listrik	Kedekatan dengan jaringan listrik dapat mengefisiensikan distribusi sumber daya	0-0.5 km	5		0,167	0,015
			0.5-1 km	4			
			1-2 km	3			
			2-3 km	2			
			> 3 km	1			
Faktor Sosio Ekonomi	Jarak dari CBD	Kedekatan SPKLU dengan area CBD memudahkan aksesibilitas pengguna kendaraan listrik dalam kegiatan bekerja sehari-hari	0 - 0,5 Km	5	0,064	0,268	0,017
			0,5 - 1 Km	4			
			1 - 2 Km	3			
			2 - 5 Km	2			
			> 5 Km	1			
	Jarak dari Fasilitas Umum	Kedekatan SPKLU dengan fasilitas umum memudahkan aksesibilitas pengguna kendaraan listrik ketika mengunjungi tempat-tempat fasilitas umum	0 - 0,5 Km	5		0,614	0,039
			0,5 - 1 Km	4			
			1 - 2 Km	3			
			2 - 3 Km	2			
			>3 Km	1			
	Jarak dari Lahan Terbangun	Kedekatan SPKLU dengan area lahan terbangun memudahkan aksesibilitas pengguna dari wilayah permukiman atau perumahan	0-0.5 km	5		0,117	0,007
			0.5-1 km	4			
			1-2 km	3			
			2-3 km	2			
			> 3 km	1			

Nilai inkonsistensi perbandingan berpasangan masing-masing sub-kriteria terhadap kriteria dan kriteria terhadap tujuan utama dapat divisualisasikan pada Tabel 3. Berdasarkan hasil yang didapatkan nilai inkonsistensi tertinggi adalah perbandingan berpasangan sub-kriteria terhadap kriteria sosio-ekonomi dengan nilai 0,070. Sementara itu, nilai inkonsistensi terendah adalah perbandingan berpasangan sub-kriteria terhadap kriteria infrastruktur transportasi dan lingkungan dengan masing-masing memiliki nilai 0,017. Nilai inkonsistensi pada kriteria terhadap tujuan utama adalah 0,037. Secara keseluruhan, inkonsistensi perbandingan berpasangan yang dilakukan memiliki nilai 0,032. Semua nilai inkonsistensi perbandingan berpasangan memiliki nilai kurang dari 0,1. Dengan demikian, perbandingan berpasangan dapat dianggap konsisten dalam tingkat kepercayaan 90%.

Tabel 3. Nilai inkonsistensi matriks perbandingan berpasangan AHP

Perbandingan Berpasangan	Nilai Inkonsistensi	Kesimpulan (tingkat kepercayaan 90%)
Tujuan : SPKLU	0,037	Konsisten
Kriteria Lingkungan	0,017	Konsisten
Kriteria Infrastruktur	0,017	Konsisten
Kriteria Energi	0,051	Konsisten
Kriteria Ekonomi	0,070	Konsisten
<i>Overall</i>	0,032	Konsisten

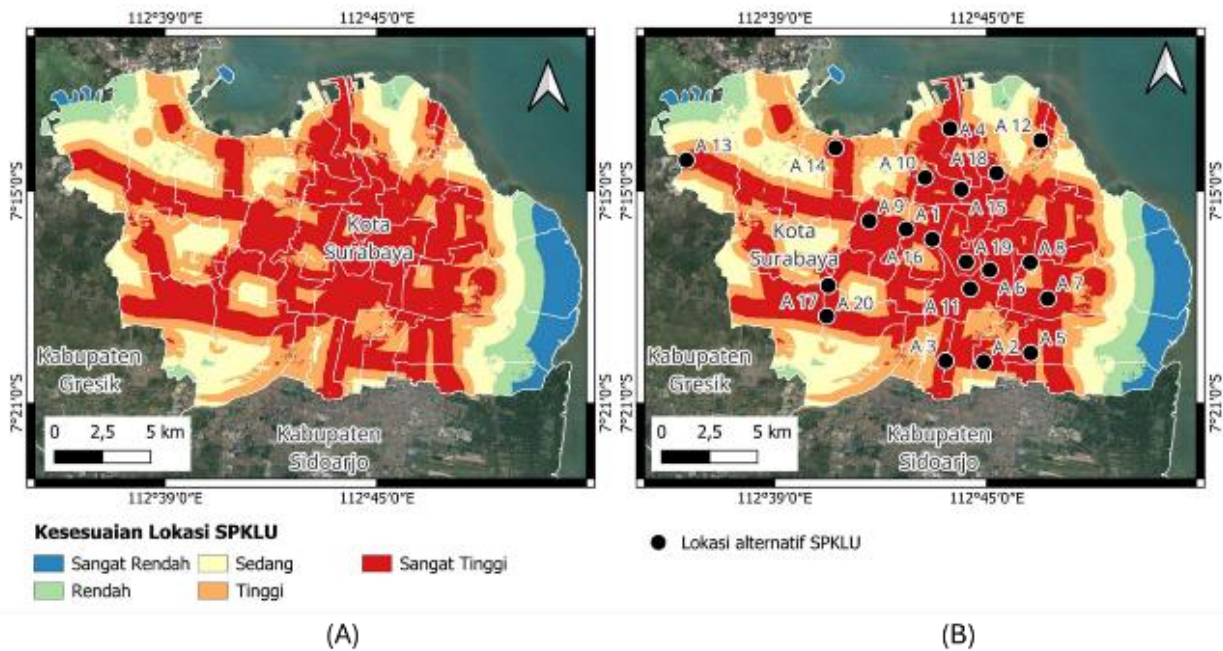
Hasil reklasifikasi dari data awal masing-masing parameter menjadi data dalam bentuk rentang nilai 1-5 sebagaimana mengacu pada Tabel 2. Berdasarkan hasil yang diperoleh, terdapat 6 parameter di wilayah studi didominasi oleh kesesuaian tinggi atau sangat tinggi. Enam parameter tersebut diantaranya adalah jarak terhadap pemberhentian bus, jarak dari fasilitas umum, jarak dari jalan utama, jarak dari lahan terbangun, jarak dari SPKLU eksisting, dan kemiringan lereng. Sementara itu, 3 parameter didominasi oleh kesesuaian rendah. Tiga parameter tersebut adalah jarak dari CBD, jarak dari sungai, dan indeks vegetasi. Terdapat 3 parameter yang mana wilayah studi didominasi oleh tingkat kesesuaian sedang atau cukup. Ketiga parameter tersebut adalah jarak dari jaringan listrik, jarak dari persimpangan jalan, dan jarak dari SPBU.



Gambar 4. Diagram luasan tiap kelas kesesuaian masing-masing parameter

Data parameter yang sudah dikelaskan dan dikonversi menjadi nilai dalam rentang 1-5, kemudian dilakukan pembobotan dengan menggunakan bobot akhir. Hasil akhir dari perhitungan indeks kesesuaian lokasi pembangunan SPKLU didapatkan nilai minimum indeks adalah 1,401. Sementara itu, nilai maksimum indeks kesesuaian SPKLU sebesar 4,944. Nilai rata-rata indeks kesesuaian lokasi SPKLU sebesar 3,857 dengan standar deviasi sebesar $\pm 0,791$. Nilai indeks kesesuaian lokasi tersebut diklasifikasikan kembali menjadi 5 kelas menggunakan *natural breaks*. Kelas tersebut terdiri dari kelas kesesuaian sangat rendah, rendah, cukup, tinggi, dan sangat tinggi. Hasil klasifikasi kesesuaian lokasi pembangunan SPKLU Kota Surabaya dapat dilihat pada Gambar 5 (A). Dari peta tersebut, divisualisasikan mulai dari biru hingga merah. Warna merah mengindikasikan kesesuaian lokasi yang sangat tinggi. Sementara itu, semakin biru warna pada peta tersebut mengindikasikan kesesuaian sangat rendah. Kesesuaian tinggi dan sangat tinggi tersebut hampir merata di seluruh bagian wilayah studi, terutama di wilayah pusat Kota Surabaya. Kesesuaian rendah dan sangat rendah kurang lebih didominasi oleh kawasan lindung yang merupakan wilayah pelabuhan dan hutan mangrove. Secara kuantitatif, wilayah studi didominasi oleh kesesuaian lokasi sangat tinggi dengan luasan sebesar 141,62 km²(42,1%). Sementara itu, luasan terendah adalah kelas kesesuaian sangat rendah dengan luas 17,29 km² (5,1%). Kelas kesesuaian lokasi rendah, cukup, dan tinggi masing-masing memiliki luasan sebesar 22,10 km² (6,6%), 64,42 km² (19,2%), dan 90,82 km² (27,0%).

Lokasi alternatif didapatkan dengan menyebar titik secara acak sebanyak 20 titik pada lokasi dengan tingkat kesesuaian sangat tinggi. Hasil dari penyebaran dua puluh titik alternatif dapat dilihat pada Gambar 5 (B). Pola persebaran dua puluh titik alternatif cukup menyebar. Semua bagian Kota Surabaya baik pada Surabaya Barat, Surabaya Timur, Surabaya Utara, Surabaya Selatan, dan Surabaya Pusat memiliki kandidat alternatif masing-masing. Jumlah titik alternatif tertinggi berada di Kota Surabaya Selatan dan Surabaya Timur dengan masing-masing memiliki 5 titik alternatif. Kota Surabaya Utara memiliki jumlah kandidat alternatif terendah yaitu 2 titik. Titik alternatif ini dilakukan untuk menentukan urutan prioritas dan analisis sensitivitas.



Gambar 5. Hasil pemodelan kesesuaian lokasi SPKLU Kota Surabaya metode SMCE; (A) Kelas kesesuaian lokasi SPKLU; (B) Sebaran alternatif pembangunan SPKLU

Analisis sensitivitas dilakukan dengan menghilangkan salah satu bobot dan menghitung ulang atau menormalisasi bobot baru. Pada penelitian ini dilakukan sebanyak 12 simulasi bobot yang mana sejumlah parameter yang digunakan dalam penelitian ini. Adapun simulasi bobot yang diterapkan dapat dilihat pada Tabel 4. *W_{Sn}* merepresentasikan bobot simulasi ke-n. Nilai bobot 0 pada salah satu parameter menunjukkan bahwa parameter tersebut dihilangkan dalam simulasi tersebut.

Hasil tingkat kesesuaian pembangunan SPKLU baru hasil dari dua belas simulasi dapat dilihat pada Gambar 6. Berdasarkan hasil yang diperoleh, didapatkan bahwa secara visual tidak ada perbedaan yang signifikan antar simulasi yang diterapkan kecuali pada simulasi ke-3. Simulasi ke-3 merupakan penghilangan bobot pada parameter jarak dari jalan. Pada hasil simulasi tersebut, tampak terdapat perbedaan warna merah yang lebih memudar pada area tengah wilayah studi dibandingkan dengan sebelas simulasi bobot lainnya. Meskipun secara visual perbedaan antar simulasi sulit dibedakan, dari segi nilai raster terdapat perbedaan antar simulasi yang diterapkan. Perbedaan tersebut kurang lebih pada fraksi satu sampai dua angka di belakang koma. Meskipun demikian, secara keseluruhan, dengan menerapkan dua belas simulasi, nilai raster tingkat kesesuaian lokasi memiliki nilai rentang lebih dari 1 (pada nilai minimum) dan lebih dari 4,9 (pada nilai maksimum).

Tingkat kesesuaian lokasi SPKLU masing-masing simulasi dilakukan pengindeksan dengan kesesuaian lokasi SPKLU awal yang menghasilkan indeks sensitivitas. Secara kuantitatif, nilai statistik deskriptif indeks sensitivitas pada masing-masing simulasi dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan data tersebut, didapatkan bahwa nilai rata-rata indeks sensitivitas terendah adalah ketika menghilangkan parameter kemiringan lereng dengan nilai 0,541. Sementara itu, nilai rata-rata indeks sensitivitas tertinggi adalah ketika menghilangkan

parameter jarak dari sungai dengan nilai 0,981. Jika ditinjau dari nilai minimum indeks sensitivitas, nilai minimum terendah adalah ketika menghilangkan parameter jarak dari jalan dengan nilai 0,00. Sementara itu, nilai minimum indeks sensitivitas tertinggi adalah ketika menghilangkan parameter jarak dari CBD dengan nilai 0,723. Sementara itu, ketika ditinjau dari nilai maksimum indeks sensitivitas, nilai tertinggi adalah ketika menghilangkan parameter jarak dari jalan dengan nilai 5,035. Nilai indeks sensitivitas maksimum terendah adalah jarak dari lahan terbangun dengan nilai 0,776. Peringkat parameter merepresentasikan tingkat parameter dalam mengubah nilai kesesuaian lokasi suatu grid atau wilayah ketika parameter tersebut dihilangkan. Peringkat tingkat sensitivitas didasarkan pada nilai indeks sensitivitas maksimum. Peringkat tertinggi terjadinya perubahan yang signifikan pada tingkat kesesuaian lokasi SPKLU adalah ketika menghilangkan bobot pada jarak dari jalan utama. Hal ini tentunya karena berdasarkan perhitungan AHP, parameter ini memiliki bobot relatif tertinggi dibandingkan dengan parameter lainnya. Kemudian, peringkat terbawah perubahan tingkat kesesuaian lokasi SPKLU adalah ketika jarak dari lahan terbangun dihilangkan. Hal ini karena parameter tersebut memiliki bobot parameter terendah. Oleh karena itu, jika parameter tersebut dihilangkan indeks kesesuaian lokasi SPKLU tidak mengalami perubahan secara signifikan.

Tabel 4. Bobot parameter ketika dilakukan simulasi penghilangan salah satu bobot

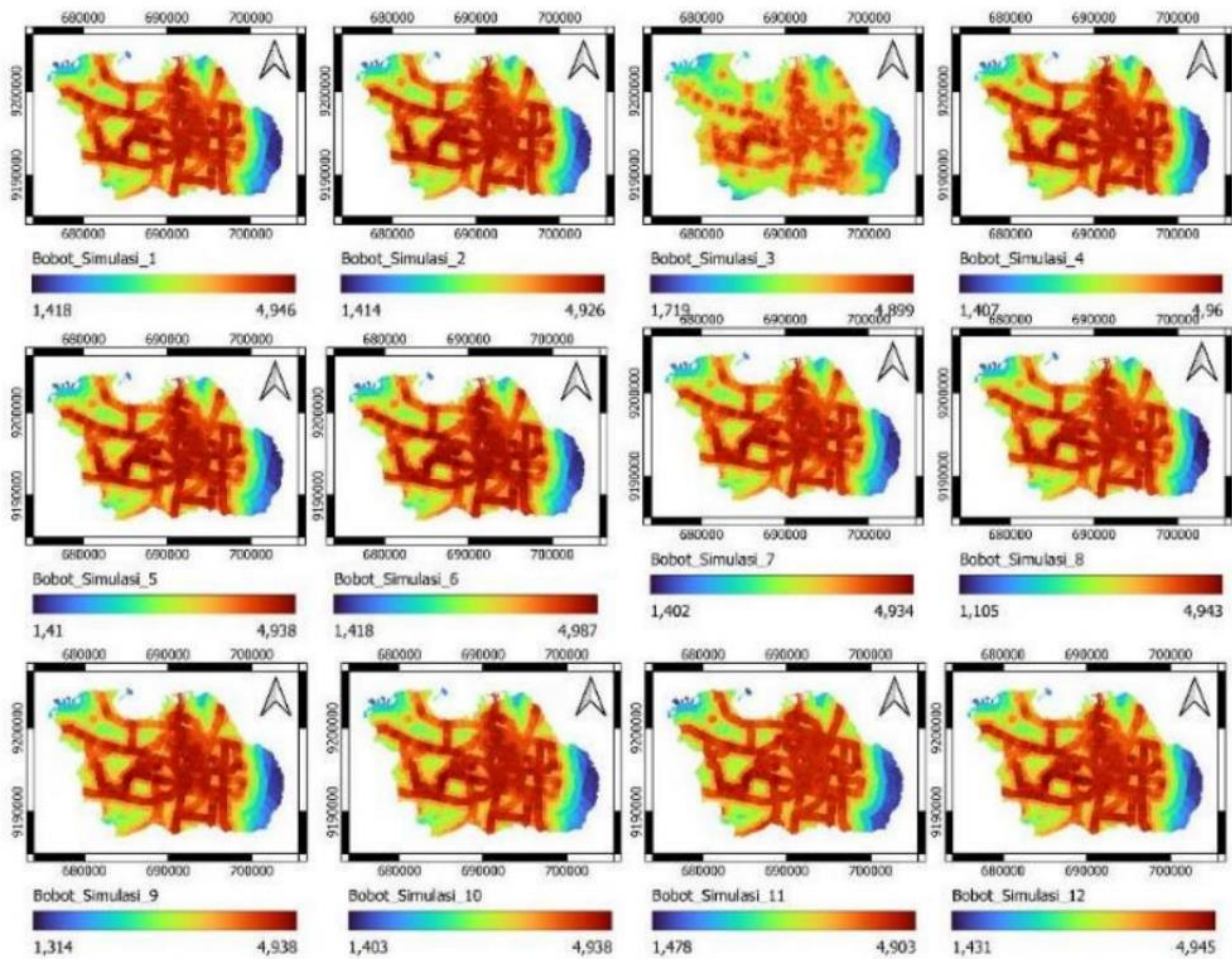
Parameter	Bobot	W S1	W S2	W S3	W S4	W S5	W S6	W S7	W S8	W S9	W S10	W S11	W S12
Jarak dari Fasilitas Umum	0,040	0,000	0,042	0,072	0,041	0,041	0,042	0,040	0,045	0,041	0,041	0,048	0,043
Jarak dari SPBU	0,055	0,057	0,000	0,099	0,056	0,056	0,057	0,055	0,061	0,056	0,056	0,066	0,059
Jarak dari jalan	0,444	0,463	0,470	0,000	0,452	0,454	0,462	0,447	0,495	0,454	0,450	0,535	0,475
Jarak dari CBD	0,017	0,018	0,018	0,031	0,000	0,017	0,018	0,017	0,019	0,017	0,017	0,020	0,018
Indeks vegetasi	0,023	0,024	0,024	0,041	0,023	0,000	0,024	0,023	0,026	0,024	0,023	0,028	0,025
Jarak dari Sungai	0,039	0,041	0,041	0,070	0,040	0,040	0,000	0,039	0,043	0,040	0,040	0,047	0,042
Jarak dari Lahan Terbangun	0,007	0,007	0,007	0,013	0,007	0,007	0,007	0,000	0,008	0,007	0,007	0,008	0,007
Kemiringan lereng	0,103	0,107	0,109	0,185	0,105	0,105	0,107	0,104	0,000	0,105	0,104	0,124	0,110
Jarak SPKLU Eksisting	0,023	0,024	0,024	0,041	0,023	0,024	0,024	0,023	0,026	0,000	0,023	0,028	0,025
Jarak dari Jaringan Listrik	0,014	0,015	0,015	0,025	0,014	0,014	0,015	0,014	0,016	0,014	0,000	0,017	0,015
Jarak Pemberhentian Bus	0,170	0,177	0,180	0,306	0,173	0,174	0,177	0,171	0,190	0,174	0,172	0,000	0,182
Jarak dari Persimpangan	0,065	0,068	0,069	0,117	0,066	0,067	0,068	0,065	0,072	0,067	0,066	0,078	0,000
Total	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabel 5. Statistik deskriptif raster indeks sensitivitas pada simulasi penghilangan salah satu bobot parameter

Parameter yang dihilangkan	Indeks Sensitivitas				Peringkat
	Rata-rata	Standar Deviasi	Min	Max	
Jarak dari Fasilitas Umum	0,736	0,103	0,013	1,058	7
Jarak dari SPBU	0,812	0,118	0,363	1,144	5
Jarak dari jalan	0,815	0,974	0,000	5,035	1
Jarak dari CBD	0,840	0,032	0,723	0,885	10
Indeks vegetasi	0,812	0,097	0,252	0,963	8
Jarak dari Sungai	0,981	0,099	0,075	1,059	6
Jarak dari Lahan Terbangun	0,730	0,014	0,641	0,776	12
Kemiringan lereng	0,541	0,248	0,000	1,654	3
Jarak SPKLU Eksisting	0,701	0,117	0,193	0,920	9
Jarak dari Jaringan Listrik	0,752	0,041	0,561	0,851	11
Jarak dari Pemberhentian Bus	0,750	0,353	0,000	2,107	2
Jarak dari Persimpangan Jalan Utama	0,846	0,139	0,515	1,241	4

Analisis sensitivitas selanjutnya adalah mengevaluasi stabilitas urutan prioritas dari 20 lokasi alternatif yang didapatkan sebelumnya ketika dilakukan simulasi bobot. Nilai kesesuaian lokasi masing-masing bobot

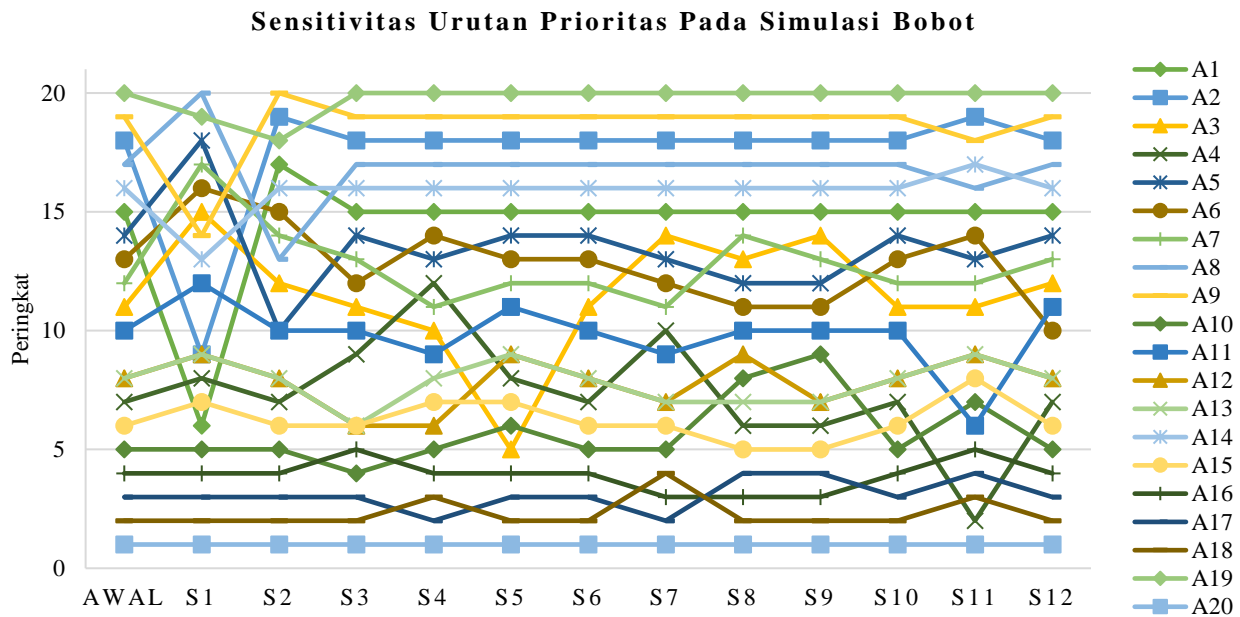
diekstrak ke 20 titik lokasi alternatif tersebut, kemudian diurutkan prioritas berdasarkan skor akhir dari masing-masing simulasi. Hasil dari evaluasi stabilitas urutan prioritas alternatif dapat dilihat pada Gambar 7. Berdasarkan data yang diperoleh, alternatif yang paling stabil adalah A20 dengan memiliki nilai standar deviasi peringkat $\pm 0,00$. Artinya, alternatif tersebut memiliki peringkat yang sama pada semua simulasi. Peringkat pada A20 adalah 1 pada semua simulasi. Dua alternatif yang lain dengan memiliki stabilitas relatif tinggi adalah A12 dan A4. Pada alternatif A12 memiliki standar deviasi peringkat sebesar $\pm 0,599$. Alternatif A12 memiliki peringkat 18,19, dan 20 pada simulasi bobot. Sebagian besar alternatif A12 memiliki peringkat 20 pada dua belas simulasi, Terdapat 10 simulasi yang menempatkan alternatif A12 pada peringkat 20. Pada alternatif A4, memiliki standar deviasi peringkat sebesar $\pm 0,630$. Pada alternatif A4 memiliki variasi pada peringkat 2,3, dan 4. Sebagian besar simulasi menempatkan alternatif A4 di urutan 2, yaitu sebanyak 10 simulasi.



Gambar 6. Indeks kesesuaian lokasi SPKLU masing-masing simulasi penghilangan bobot

Alternatif yang memiliki stabilitas prioritas terendah adalah A5 dengan nilai standar deviasi sebesar $\pm 2,602$. Alternatif tersebut, variasi peringkat prioritas pada urutan 6,17, dan 15. Alternatif ini didominasi dengan peringkat 15, yang mana ketika dilakukan penghapusan parameter jarak dari fasilitas umum, A5 menempati peringkat 6 (mengalami peningkatan yang signifikan). Dua alternatif dengan stabilitas terendah adalah A18 dan A19. Pada alternatif A18 memiliki nilai standar deviasi peringkat sebesar $\pm 2,569$. A18 memiliki variasi peringkat pada urutan 18,19 dan 9. Sebagian besar didominasi oleh urutan 18. Sama seperti A5, A18 urutan meningkat signifikan (menempati urutan 9) ketika parameter jarak dari fasilitas umum dihilangkan. Pada alternatif A19, memiliki standar deviasi urutan prioritas sebesar $\pm 2,470$. Alternatif ini memiliki variasi urutan

prioritas pada peringkat 5,10,11,12,13,14, dan 15. Alternatif ini memiliki urutan tertinggi, yaitu urutan 5 ketika parameter indeks vegetasi dihilangkan.



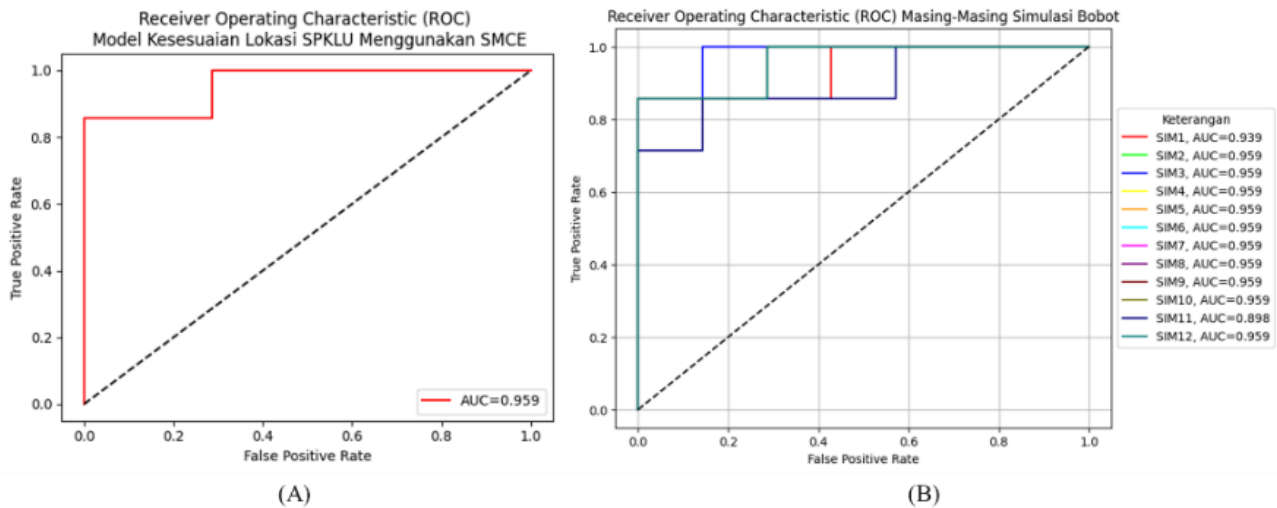
Urutan prioritas akhir alternatif pembangunan SPKLU menggunakan bobot yang didapatkan dari hasil AHP secara keseluruhan. Nilai prioritas masing-masing alternatif bervariasi mulai dari 0,045 (4,5%) hingga 0,056 (5,6%). Berdasarkan hasil yang didapatkan, lima prioritas utama dalam alternatif pembangunan SPKLU Kota Surabaya adalah A20, A19, A4, A11, dan A17. Urutan prioritas tertinggi adalah A20 dengan nilai 0,056 atau 5,6%. Sementara itu, untuk A19, A4, A11, dan A17 secara berurutan merupakan alternatif dengan peringkat prioritas 2, 3, 4, dan 5. Nilai dari prioritas pada A19, A4, A11, dan A17 secara berurutan adalah 0,054 (5,4%), 0,053 (5,3%), 0,052 (5,2%), dan 0,052 (5,2%). Sementara itu, urutan prioritas pembangunan SPKLU terendah adalah A12 dengan nilai 0,045 (4,5%). 4 alternatif terbawah lainnya adalah A14, A13, A10, dan A18. Urutan masing-masing pada keempat alternatif tersebut adalah 16, 17, 18, dan 19 dengan nilai prioritas masing-masing sebesar 0,049 (4,9%), 0,049 (4,9%), 0,047 (4,7%), 0,046 (4,6%), dan 0,046 (4,6%).

Lima alternatif pembangunan SPKLU Kota Surabaya dengan nilai prioritas tertinggi dilakukan validasi secara kualitatif dengan melihat *street view* pada masing-masing lokasi. Adapun *street view* pada masing-masing titik alternatif tersebut dapat dilihat pada Gambar 8. Alternatif 20 terletak di Jl. Mayjend. Jonosewojo AK1 Kelurahan Babatan, Kecamatan Wiyung. Sementara itu, Alternatif A19 terletak di Jl. Raya Darmo, Kelurahan Keputran, Kecamatan Tegalsari. Kemudian, alternatif A4 terletak di Jl. Perak Timur Kelurahan Perak Utara, Kecamatan Pabean Cantikan. Selanjutnya, pada alternatif A11 terletak di Jl. Ngagel, Kelurahan Ngagel, Kecamatan Wonokromo. Kemudian pada alternatif A17 terletak di Jl. Raya Menganti, Kelurahan Babatan, Kecamatan Wiyung. Berdasarkan identifikasi pada kelima titik alternatif dengan urutan prioritas tertinggi, didapatkan bahwa dari kelima titik prioritas tertinggi, A20 secara kualitatif memang titik yang paling sesuai menjadi prioritas utama pembangunan SPKLU di Kota Surabaya. Hal ini karena masih tersedia lahan kosong dan dekat dengan gardu listrik. Dengan demikian titik A20 menjadi prioritas utama untuk penempatan SPKLU di Kota Surabaya berdasarkan analisis pada penelitian ini. Penentuan lokasi pembangunan SPKLU tetap memerlukan analisis dan perencanaan lebih kompleks terkait dengan pengadaan lahan, regulasi, dan interaksi dengan masyarakat sekitar. Penelitian ini hanya menggambarkan penentuan lokasi yang sesuai untuk pembangunan SPKLU di Kota Surabaya dengan peninjauan aspek spasial.



Gambar 8. Validasi kualitatif masing-masing lima titik alternatif dengan urutan prioritas tertinggi menggunakan *street view*

Selain validasi secara kualitatif, pada penelitian ini juga dilakukan validasi secara kuantitatif menggunakan data lokasi SPKLU eksisting. Parameter validasi kuantitatif yang digunakan dalam penelitian ini adalah ROC-AUC. Evaluasi menggunakan ROC-AUC dilakukan pada indeks kesesuaian lokasi SPKLU menggunakan semua bobot dan masing-masing simulasi bobot. Hasil dari validasi kuantitatif menggunakan ROC-AUC dapat dilihat pada Gambar 9. Berdasarkan evaluasi ROC-AUC menggunakan semua bobot, didapatkan nilai AUC sebesar 0,959. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model memiliki performa sangat baik (Trifonova dkk., 2014). Jika ditinjau dari masing-masing simulasi bobot, simulasi 1 hingga simulasi 8 serta simulasi 11 memiliki nilai AUC tertinggi dengan nilai 0,959. Nilai tersebut, sama dengan nilai ROC-AUC ketika menggunakan semua bobot parameter. Sementara itu, dari dua belas simulasi, simulasi 11 yang mana menghilangkan bobot pada parameter jarak dari pemberhentian bus memiliki nilai AUC terendah dengan nilai 0,898. Secara keseluruhan, nilai AUC pada semua simulasi bobot berada pada kategori sangat baik.



Gambar 9. Validasi kuantitatif menggunakan ROC-AUC; (A) ROC-AUC menggunakan semua bobot parameter; (B) ROC-AUC simulai penghilangan bobot parameter

Kesimpulan

Penelitian ini menyajikan pemanfaatan SMCE dalam penentuan kesesuaian lokasi SPKLU di Kota Surabaya. Teknik MCDM dalam mendukung SMCE pada penelitian ini adalah AHP dengan mempertimbangkan 4 kriteria yaitu faktor lingkungan, infrastruktur transportasi, ketersediaan energi, dan sosio-ekonomi. Setiap kriteria memiliki 3 sub-kriteria masing-masing, sehingga pada penelitian ini mempertimbangkan 12 parameter untuk menentukan kesesuaian lokasi SPKLU di Kota Surabaya. Analisis sensitivitas digunakan untuk menguji stabilitas urutan prioritas alternatif dalam penelitian ini. Penelitian ini menyajikan validasi model indeks kesesuaian lokasi SPKLU secara kualitatif dan kuantitatif. Berdasarkan hasil dari penelitian ini, faktor infrastruktur transportasi memiliki bobot tertinggi dibandingkan dengan kriteria lain, yang memiliki nilai bobot sebesar 0,679. Pada kriteria tersebut, sub-kriteria dengan bobot tertinggi adalah jarak dari jalan utama dengan nilai bobot 0,655. Oleh karena itu, dari 12 parameter, jarak dari jalan utama memiliki bobot akhir tertinggi yaitu 0,445. Sementara itu, parameter dengan bobot akhir terendah adalah jarak dari lahan terbangun dengan nilai 0,007. Pemodelan kesesuaian lokasi SPKLU Kota Surabaya menunjukkan wilayah studi didominasi oleh kesesuaian lokasi sangat tinggi dengan luas 141,620 km² (42,10% luasan keseluruhan). Dari 20 titik alternatif yang disebar secara acak pada wilayah dengan tingkat kesesuaian sangat tinggi, A20 memiliki prioritas utama dengan nilai 5,6%. Berdasarkan analisis sensitivitas, alternatif A20 memiliki stabilitas yang tinggi dibandingkan alternatif yang lain. Secara kualitatif, kondisi lingkungan A20 juga sangat mendukung pembangunan SPKLU. Dengan demikian, titik A20 menjadi prioritas utama pembangunan SPKLU di Kota Surabaya. Dengan menggunakan lokasi SPKLU eksisting, didapatkan bahwa model kesesuaian lokasi SPKLU yang didapatkan memiliki nilai AUC 0,959 yang dapat diinterpretasikan sangat baik.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak penyedia data yang digunakan dalam penelitian ini seperti Badan Informasi Geospasial (BIG), komunitas *humanitarian open street map team*, dan *platform* berbasis google seperti GEE dan MyMaps. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Geodesi Universitas Gadjah Mada yang menyediakan fasilitas penunjang dalam pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Ahmad, I., Alqurashi, F., Abozinadah, E., & Mehmood, R. (2022). Deep journalism and DeepJournal V1. 0: a data-driven deep learning approach to discover parameters for transportation. *Sustainability*, *14*(9), 5711.
- Amani, S., & Shafizadeh-Moghadam, H. (2023). A review of machine learning models and influential factors for estimating evapotranspiration using remote sensing and ground-based data. *Agricultural Water Management*, *284*, 108324. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108324>
- Badan Pengelolaan Keuangan dan Aset Daerah Kota Surabaya. (2023). *Pemkot Surabaya gunakan kendaraan listrik untuk operasional mulai 2023*. <https://bpkad.surabaya.go.id/berita/pemkot-surabaya-gunakan-kendaraan-listrik-untuk-operasional-mulai-2023>
- Badan Pusat Statistik Kota Surabaya. (2023). *Kota Surabaya Dalam Angka 2023*.
- Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Timur. (2021). *Jumlah Kendaraan Bermotor yang Didaftarkan Menurut Kabupaten/Kota dan Jenis Kendaraan di Provinsi Jawa Timur (unit), 2018–2020*. <https://jatim.bps.go.id/statictable/2021/09/07/2253/jumlah-kendaraan-bermotor-yang-didaftarkan-menurut-kabupaten-kota-dan-jenis-kendaraan-di-provinsi-jawa-timur-unit-2018-2020.html>
- Chellaswamy, C., & Ramesh, R. (2017). Future renewable energy option for recharging full electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 824–838.
- Dinas Kependudukan dan Pencatatan Sipil Kota Surabaya. (2022). *Proyeksi Penduduk Kota Surabaya 2023-2032*.
- Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya. (2022). *Kajian Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) Kota Surabaya Tahun 2022*.
- Elomiya, A., Křupka, J., Jovčić, S., Simic, V., Švadlenka, L., & Pamucar, D. (2024). A hybrid suitability mapping model integrating GIS, machine learning, and multi-criteria decision analytics for optimizing service quality of electric vehicle charging stations. *Sustainable Cities and Society*, *106*, 105397.

- Gao, C. X., Dwyer, D., Zhu, Y., Smith, C. L., Du, L., Filia, K. M., Bayer, J., Menssink, J. M., Wang, T., Bergmeir, C., Wood, S., & Cotton, S. M. (2023). An overview of clustering methods with guidelines for application in mental health research. *Psychiatry Research*, 327, 115265. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psychres.2023.115265>
- Guler, D., & Yomralioglu, T. (2020a). Suitable location selection for the electric vehicle fast charging station with AHP and fuzzy AHP methods using GIS. *Annals of GIS*, 26(2), 169–189.
- Guler, D., & Yomralioglu, T. (2020b). Suitable location selection for the electric vehicle fast charging station with AHP and fuzzy AHP methods using GIS. *Annals of GIS*, 26(2), 169–189. <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1737226>
- Halder, B., Banik, P., Almohamad, H., Al Dughairi, A. A., Al-Mutiry, M., Al Shahrani, H. F., & Abdo, H. G. (2022). Land suitability investigation for solar power plant using GIS, AHP and multi-criteria decision approach: a case of megacity Kolkata, West Bengal, India. *Sustainability*, 14(18), 11276.
- Harju, M., Liesiö, J., & Virtanen, K. (2019). Spatial multi-attribute decision analysis: Axiomatic foundations and incomplete preference information. *European Journal of Operational Research*, 275(1), 167–181.
- Kaya, Ö., Alemdar, K. D., Atalay, A., Çodur, M. Y., & Tortum, A. (2022). Electric car sharing stations site selection from the perspective of sustainability: A GIS-based multi-criteria decision making approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102026.
- Ligmann-Zielinska, A., & Jankowski, P. (2012). Impact of proximity-adjusted preferences on rank-order stability in geographical multicriteria decision analysis. *Journal of Geographical Systems*, 14, 167–187.
- Liu, H., Li, Y., Zhang, C., Li, J., Li, X., & Zhao, Y. (2022). Electric vehicle charging station location model considering charging choice behavior and range anxiety. *Sustainability*, 14(7), 4213.
- Malczewski, J., & Jankowski, P. (2020). Emerging trends and research frontiers in spatial multicriteria analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(7), 1257–1282. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1712403>
- May, J. H., Shang, J., Tjader, Y. C., & Vargas, L. G. (2013). A new methodology for sensitivity and stability analysis of analytic network models. *European Journal of Operational Research*, 224(1), 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.07.035>
- Mhana, K. H., & Awad, H. A. (2024). An ideal location selection of electric vehicle charging stations: Employment of integrated analytical hierarchy process with geographical information system. *Sustainable Cities and Society*, 107, 105456. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105456>
- Patel, A., & Swathika, O. V. G. (2023). *Chapter Seventeen - Forecasting off-grid solar power generation using case-based reasoning algorithm for a small-scale system* (V. Basetti, C. K. Shiva, M. R. Ungarala, & S. S. B. T.-A. I. and M. L. in S. C. P. Rangarajan (eds.); pp. 257–266). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99503-0.00014-4>
- Peterseim, J. H., White, S., Tadros, A., & Hellwig, U. (2013). Concentrated solar power hybrid plants, which technologies are best suited for hybridisation? *Renewable Energy*, 57, 520–532. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.014>
- Pettorelli, N. (2013). *The normalized difference vegetation index*. Oxford University Press.
- Pradhan, P., Shabbiruddin, & Pradhan, S. (2022). Selection of electric vehicle using integrated Fuzzy-MCDM approach with analysis on challenges faced in hilly terrain. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(2), 2651–2673.
- Rane, N. L., Achari, A., Saha, A., Poddar, I., Rane, J., Pande, C. B., & Roy, R. (2023). An integrated GIS, MIF, and TOPSIS approach for appraising electric vehicle charging station suitability zones in Mumbai, India. *Sustainable Cities and Society*, 97, 104717.
- Rosyidah, L., Ascarya, P. G., Zakiyah, N., Setiyani, N. F., & Harmawan, B. N. (2024). Governance Network dalam Optimalisasi Transportasi Umum Bus Trans Semanggi Listrik (BTS) di Kota Surabaya. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 4(3), 16087–16098.
- Russo, R. de F. S. M., & Camanho, R. (2015). Criteria in AHP: A Systematic Review of Literature. *Procedia Computer Science*, 55, 1123–1132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.081>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.
- Sugieanto, A. M. (2022). *Penentuan Lokasi Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum Yang Optimum Dengan Menggunakan Analisis Spasial*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Trifonova, O., Lokhov, P., & Archakov, A. I. (2014). Metabolic profiling of human blood. *Biomeditsinskaya Khimiya*, 60, 281–294. <https://doi.org/10.18097/pbmc20146003281>

Wang, Z., Yang, Q., Wang, C., & Wang, L. (2023). Spatial Layout Analysis and Evaluation of Electric Vehicle Charging Infrastructure in Chongqing. *Land*, 12(4), 868.



This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).