

Usulan Penempatan Lokasi EV Charging Station Wilayah Kota Banda Aceh Menggunakan Pendekatan *Improved Set Covering Location Model* (ISLCM) dengan *Voronoi Graph* dan *Minimum Covering Circle* (MCC)

1st Muhammad Furqan Prawira

Fakultas Rekayasa Industri
Telkom University
Bandung, Indonesia

furqanpra@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Putu Giri Artha Kusuma

Fakultas Rekayasa Industri
Telkom University
Bandung, Indonesia

putugiriak@telkomuniversity.ac.id

3rd Prafajar Suksessanno Muttaqin

Fakultas Rekayasa Industri
Telkom University
Bandung, Indonesia

prafajars@telkomuniversity.ac.id

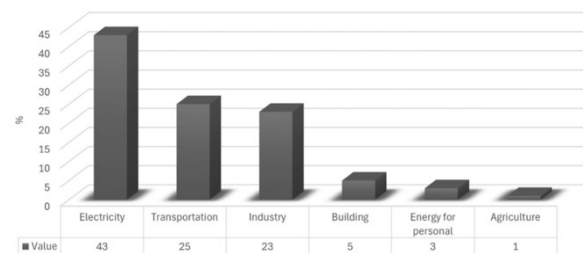
Abstrak— Peningkatan adopsi kendaraan listrik di Indonesia memerlukan dukungan infrastruktur Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) yang memadai, khususnya di tingkat kota. Di Kota Banda Aceh, keterbatasan jumlah dan jangkauan SPKLU menyebabkan sebagian titik permintaan belum terlayani secara optimal dan berpotensi menimbulkan *range anxiety*. Penelitian ini bertujuan menentukan jumlah minimum dan lokasi optimal SPKLU untuk mencapai cakupan 100% titik demand dengan mempertimbangkan batasan radius cakupan maksimum. Metode yang digunakan mengintegrasikan *Improved Set Covering Location Model* (ISLCM), *Voronoi Graph* untuk pembagian area pelayanan eksklusif, dan *Minimum Covering Circle* (MCC) untuk optimasi radius cakupan. Parameter teknis yang digunakan meliputi kecepatan rata-rata kendaraan 25,06 km/jam, waktu maksimum pencarian SPKLU 10 menit, dan faktor utilisasi 0,8 yang menghasilkan radius cakupan maksimum 3,3 km. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa solusi optimal dicapai dengan tiga SPKLU, terdiri dari satu stasiun eksisting dan dua stasiun baru, yang meningkatkan cakupan pelayanan dari 66,04% menjadi 100% terhadap 53 titik demand. Seluruh batasan model terpenuhi, termasuk minimisasi jumlah fasilitas dan pemenuhan radius cakupan. Selain itu, analisis finansial berbasis CAPEX, OPEX, dan arus kas menunjukkan bahwa pembangunan SPKLU layak secara ekonomi pada skenario tingkat utilitas menengah hingga tinggi. Penelitian ini memberikan dasar perencanaan SPKLU yang optimal secara spasial dan finansial untuk mendukung transisi energi bersih.

Kata kunci— Kendaraan Listrik, Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum, *Improved Set Covering Location Model*, *Voronoi Graph*, *Minimum Covering Circle*.

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya perhatian global terhadap isu perubahan iklim, penggunaan kendaraan listrik menjadi salah satu solusi strategis untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Sektor transportasi menyumbang 25% dari total emisi CO₂ terkait energi di Indonesia, menjadikannya penyumbang terbesar kedua setelah sektor listrik yang berkontribusi 43%. Transportasi darat sendiri bertanggung jawab atas 91% emisi dari sektor transportasi, mencerminkan ketergantungan tinggi terhadap kendaraan berbahan bakar fosil. Sejalan dengan

komitmen Indonesia untuk mencapai Net Zero Emissions pada tahun 2060, pemerintah telah menetapkan target pengurangan emisi melalui Enhanced Nationally Determined Contributions (ENDC) 2030, di mana kendaraan listrik ditargetkan menyumbang pengurangan sebesar 7,23 juta ton CO₂ dari target total 358 juta ton di sektor energi.



GAMBAR 1

Proporsi Kontribusi Emisi CO₂ Berdasarkan Sektor

Grafik tersebut menunjukkan bahwa sektor listrik merupakan penyumbang terbesar emisi CO₂ dengan kontribusi 43%, diikuti oleh sektor transportasi sebesar 25%, dan industri sebesar 23%. Sektor bangunan, energi pribadi, dan pertanian masing-masing menyumbang emisi yang jauh lebih kecil dengan angka 5%, 3%, dan 1%.

Kendaraan listrik menghasilkan emisi nol (0 g/km) saat beroperasi, jauh lebih rendah dibandingkan plug-in hybrid (45

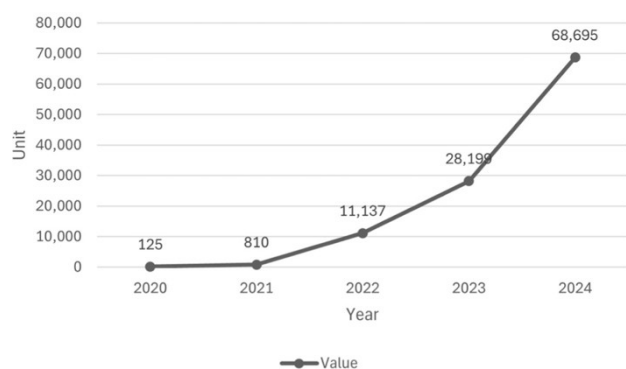


GAMBAR 2

Perbandingan Emisi CO₂ Pada Mobil (g/km)



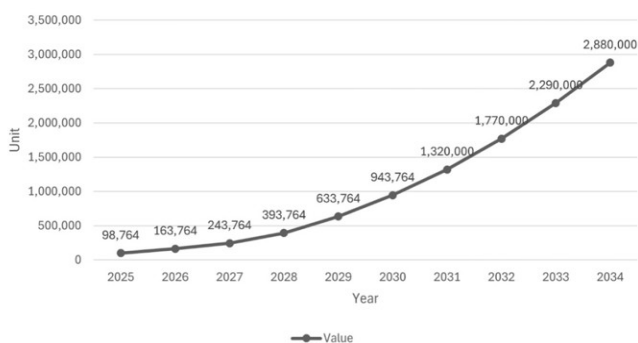
g/km), hybrid (70 g/km), dan kendaraan konvensional yang menghasilkan 125 g/km. Hal ini menjadikan kendaraan listrik sebagai pilihan transportasi paling ramah lingkungan dalam mendukung upaya pengurangan emisi gas rumah kaca yang berkontribusi pada perubahan iklim global. Adopsi kendaraan listrik di Indonesia menunjukkan tren pertumbuhan yang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir, yang mencerminkan perubahan paradigma masyarakat terhadap transportasi ramah lingkungan. Pertumbuhan ini didorong oleh berbagai kebijakan pemerintah yang mendukung pengembangan kendaraan listrik, termasuk insentif fiskal untuk pembelian kendaraan listrik, pengembangan infrastruktur pengisian daya yang lebih luas, serta pembentukan regulasi yang mendukung produksi dan distribusi kendaraan listrik domestik.



GAMBAR 3

Angka Pertumbuhan Mobil Listrik di Indonesia Periode 2020-2024

Jumlah mobil listrik yang hanya tercatat 125 unit pada tahun 2020 meningkat drastis menjadi 810 unit pada 2021, 11.137 unit pada 2022, 28.199 unit pada 2023, dengan proyeksi mencapai 68.695 unit pada tahun 2024. Tren ini menunjukkan pertumbuhan pesat penggunaan mobil listrik di Indonesia yang kemungkinan dipengaruhi oleh berbagai kebijakan pemerintah serta meningkatnya kesadaran akan pentingnya kendaraan ramah lingkungan dalam mengurangi emisi dan polusi udara.

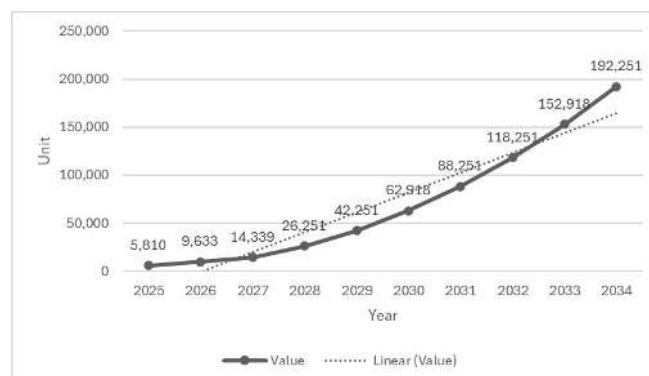


GAMBAR 4

Proyeksi Jumlah Mobil Listrik di Indonesia Periode 2025-2034

Proyeksi jangka panjang menunjukkan pertumbuhan yang semakin optimis, dengan estimasi jumlah mobil listrik mencapai 98.764 unit pada 2025, meningkat menjadi 943.764 unit pada 2029, dan diprediksi mencapai 2.880.000 unit pada

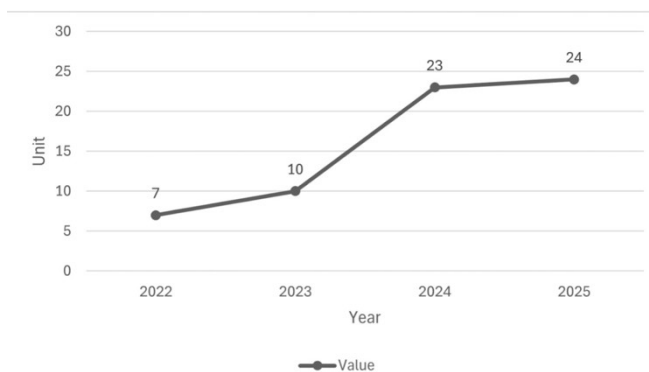
tahun 2034. Proyeksi ini menggambarkan tren yang sangat optimis terhadap adopsi kendaraan listrik di Indonesia.



GAMBAR 5

Proyeksi Kebutuhan Stasiun Pengisian Daya Kendaraan Listrik (EV) di Indonesia Periode 2025-2034

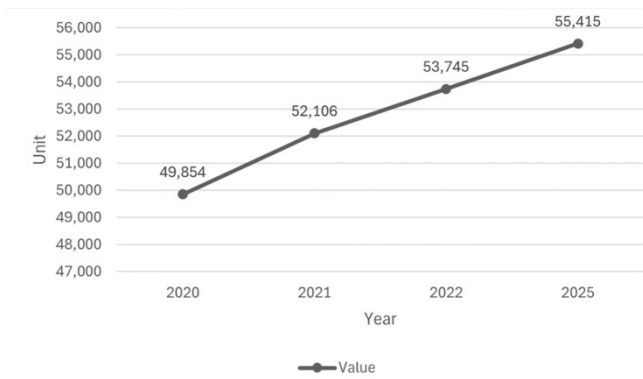
Proyeksi kebutuhan infrastruktur menunjukkan peningkatan signifikan dari 5.810 unit stasiun pengisian daya pada tahun 2025, meningkat menjadi 9.633 unit pada 2026, mencapai lebih dari 150.000 unit pada tahun 2032, dan diperkirakan mencapai 192.251 unit pada tahun 2034. Peningkatan ini menggambarkan pentingnya pengembangan infrastruktur pengisian daya yang merata dan memadai di seluruh Indonesia agar dapat mendukung percepatan adopsi kendaraan listrik dan mencapai target emisi nol pada tahun 2060. Di Kota Banda Aceh, sebagai ibu kota Provinsi Aceh, dinamika adopsi kendaraan listrik menghadapi tantangan yang kompleks dan unik. Sebagai kota yang sedang berkembang, Banda Aceh memiliki berbagai tantangan dalam merencanakan fasilitas umum, termasuk stasiun pengisian daya kendaraan listrik.



GAMBAR 6

Jumlah Pengguna Mobil Listrik di Banda Aceh Periode 2022-2025

Data menunjukkan bahwa jumlah pengguna mobil listrik di Kota Banda Aceh pada tahun 2022 hanya tercatat sebanyak 7 unit, meningkat menjadi 10 unit pada 2023, 23 unit pada 2024, dan proyeksi untuk tahun 2025 menunjukkan angka 24 unit. Meskipun ada pertumbuhan yang positif, jumlah pengguna mobil listrik di Banda Aceh masih relatif rendah dibandingkan dengan potensi pasar kendaraan listrik yang lebih besar, yang mencerminkan tantangan dalam pengadopsian kendaraan ramah lingkungan di tingkat lokal.



GAMBAR 7

Pertumbuhan Mobil Penumpang Konvensional di Kota Banda Aceh

Jumlah mobil penumpang konvensional meningkat dari 49.854 unit pada tahun 2020 menjadi 52.106 unit pada 2021, 53.745 unit pada 2022, dan mencapai 55.415 unit pada tahun 2025. Pertumbuhan jumlah kendaraan ini mencerminkan bahwa transportasi telah menjadi kebutuhan primer masyarakat, namun peningkatan yang terus berlanjut juga berdampak negatif seperti meningkatnya potensi kemacetan lalu lintas dan memburuknya kondisi lingkungan akibat polusi udara dan kebisingan, yang menjadi tantangan bagi pemerintah daerah dalam merumuskan kebijakan yang dapat menyeimbangkan kebutuhan mobilitas dengan upaya pelestarian lingkungan.



GAMBAR 8

Titik Koordinat Lokasi EVCS di Kota Banda Aceh

Permasalahan utama yang dihadapi dalam mendorong adopsi kendaraan listrik di Kota Banda Aceh adalah keterbatasan infrastruktur pengisian daya yang memadai. Tanpa adanya stasiun pengisian daya yang cukup dan tersebar secara strategis, pengguna kendaraan listrik akan menghadapi kesulitan dalam melakukan perjalanan jauh dan melakukan pengisian ulang daya kendaraan mereka, yang pada akhirnya mempengaruhi keputusan masyarakat dalam beralih ke kendaraan listrik.

Penelitian ini mengidentifikasi beberapa faktor utama yang mempengaruhi rendahnya cakupan spasial stasiun pengisian kendaraan listrik di Kota Banda Aceh, yang dapat dikategorikan ke dalam tiga elemen utama yaitu Environment dimana jarak menuju stasiun pengisian menjadi pertimbangan penting yang mempengaruhi aksesibilitas pengguna terhadap fasilitas charging, People dimana peningkatan jumlah

pengguna kendaraan listrik dari tahun ke tahun menciptakan kebutuhan yang semakin besar akan infrastruktur pengisian yang memadai, serta Method dimana hanya terdapat satu EVCS yang beroperasi di wilayah penelitian dan beberapa titik permintaan berada di luar radius 3,3 km dari stasiun pengisian yang ada. Kondisi ini berkontribusi terhadap masalah utama yaitu rendahnya cakupan spasial stasiun pengisian yang saat ini hanya mencapai 66,04% dalam memenuhi 100% cakupan di Kota Banda Aceh.

TABEL 1
Alternatif Solusi

No	Akar Permasalahan	Alternatif Solusi	Referensi
1	Beberapa titik permintaan berada di luar radius 3,3 km dari stasiun pengisian EV saat ini	Menentukan lokasi dan jumlah optimal untuk membangun Stasiun Pengisian EV	Ji, H., Liu, M., Zhang, B., & Zhang, X. (2018)
2	Mempertimbangkan jarak menuju stasiun pengisian EV	Menentukan radius awal	Cai, Y., Zhang, W., You, W., & Mao, P. (2018)

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan dua alternatif solusi utama yaitu menentukan lokasi dan jumlah optimal untuk membangun stasiun pengisian EV baru guna mengatasi kondisi dimana beberapa titik permintaan berada di luar radius 3,3 km dari stasiun pengisian yang ada saat ini, serta menentukan radius awal yang tepat sebagai parameter dalam analisis cakupan layanan untuk mempertimbangkan faktor jarak menuju stasiun pengisian secara lebih efektif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan menentukan lokasi optimal pembangunan stasiun pengisian kendaraan listrik di Kota Banda Aceh melalui pendekatan optimasi spasial yang mempertimbangkan faktor geografis, distribusi permintaan, dan aksesibilitas pengguna, sehingga dapat memberikan rekomendasi konkret kepada pemerintah daerah dalam merencanakan pengembangan infrastruktur pengisian daya yang lebih merata dan efisien.

II. KAJIAN TEORI

A. Kendaraan Listrik dan Infrastruktur Pengisian Daya

Kendaraan listrik (EV) merupakan jenis kendaraan yang sepenuhnya digerakkan oleh motor listrik dengan energi yang disalurkan dari baterai yang dapat diisi ulang. Keunggulan utama kendaraan listrik dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar fosil adalah efisiensi energi yang lebih tinggi dan minimnya emisi karbon yang dihasilkan, dimana kendaraan listrik menghasilkan emisi nol (0 g/km) saat beroperasi dibandingkan dengan kendaraan konvensional yang menghasilkan 125 g/km. Infrastruktur pengisian daya memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung adopsi kendaraan listrik secara luas, karena ketersediaan stasiun pengisian daya yang memadai dan tersebar secara strategis menjadi faktor krusial yang mempengaruhi keputusan masyarakat untuk beralih dari kendaraan berbahan bakar fosil. Pengembangan infrastruktur pengisian daya yang efisien tidak hanya meningkatkan kenyamanan pengguna tetapi juga mendorong pertumbuhan pasar kendaraan listrik, serta mendukung transisi energi yang lebih bersih dan ramah lingkungan dalam upaya mencapai target Net Zero Emissions [1], [2].

B. Jenis dan Teknologi Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik

Stasiun pengisian kendaraan listrik dapat dibedakan berdasarkan kecepatan pengisian dan fungsinya, yang umumnya dikategorikan menjadi Level 1, Level 2, dan Level 3. Level 1 menggunakan soket listrik rumah tangga standar dan membutuhkan waktu pengisian yang lama sehingga cocok untuk penggunaan di rumah, sementara Level 2 menggunakan listrik dengan kapasitas lebih tinggi dan umumnya ditemukan di tempat umum seperti pusat perbelanjaan atau tempat parkir dengan kemampuan pengisian yang lebih cepat. Level 3 atau DC Fast Charging dapat mengisi daya kendaraan listrik hingga 80% dalam waktu sekitar 30 menit dan biasanya digunakan di stasiun pengisian daya sepanjang jalan tol atau tempat-tempat yang mengutamakan perjalanan jarak jauh. Perkembangan teknologi pengisian daya terus mengalami inovasi, termasuk pengisian nirkabel (*wireless charging*) yang memungkinkan kendaraan listrik mengisi daya tanpa menyambungkan kabel melalui induksi elektromagnetik, serta integrasi energi terbarukan seperti tenaga surya atau angin yang dapat mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik berbasis bahan bakar fosil [3], [4].

C. Location Set Covering Problem (LSCP)

Location Set Covering Problem (LSCP) adalah model optimasi yang digunakan untuk menentukan lokasi optimal suatu fasilitas dengan tujuan memilih subset lokasi fasilitas sedemikian rupa sehingga setiap titik permintaan terlayani dengan jumlah fasilitas yang minimal. Model ini melibatkan dua elemen utama yaitu titik permintaan yang mewakili lokasi-lokasi dimana layanan diperlukan dan titik fasilitas yang merupakan lokasi yang akan dibangun untuk menyediakan layanan tersebut. Secara matematis, LSCP berfokus pada pemilihan lokasi-lokasi stasiun pengisian daya yang akan melayani seluruh titik permintaan dengan memastikan bahwa biaya total termasuk pembangunan dan operasi diminimalkan, sementara cakupan layanan tetap optimal. Dalam penerapannya untuk penempatan stasiun pengisian daya kendaraan listrik, LSCP mempertimbangkan jangkauan yang ditentukan oleh jarak maksimum atau waktu perjalanan yang wajar bagi pengguna untuk mencapai stasiun pengisian daya, sehingga model ini tidak hanya memperhitungkan kedekatan geografis tetapi juga faktor efisiensi biaya yang terkait dengan pembangunan dan pengoperasian stasiun [5].

D. Grafik Voronoi dalam Analisis Spasial

Grafik Voronoi adalah pembagian ruang dua dimensi atau lebih berdasarkan jarak terdekat ke titik-titik tertentu yang disebut poin situs, dimana setiap titik dalam ruang akan ditempatkan pada wilayah yang lebih dekat ke satu titik situs daripada titik situs lainnya. Dalam konteks pengisian daya kendaraan listrik, setiap titik situs dapat mewakili lokasi stasiun pengisian daya dan sel Voronoi akan menggambarkan area yang paling mudah dijangkau oleh setiap stasiun pengisian, sehingga diagram ini membantu mengidentifikasi area yang akan dijangkau oleh masing-masing stasiun berdasarkan jarak terdekat. Penerapan grafik Voronoi dalam penempatan stasiun pengisian daya memungkinkan perencanaan untuk melakukan analisis spasial yang efisien dengan membagi area menjadi beberapa wilayah berdasarkan kedekatannya dengan stasiun yang ada, sehingga dapat

mengidentifikasi daerah-daerah yang belum tercakup atau memiliki akses terbatas [6], [7].

E. Cakupan Minimum Lingkaran (Minimum Covering Circle)

Cakupan Minimum Lingkaran (Minimum Covering Circle, MCC) adalah metode dalam teori optimasi yang digunakan untuk menemukan pusat lingkaran dengan radius terkecil yang dapat mencakup seluruh titik lokasi dalam suatu wilayah tertentu, dengan tujuan meminimalkan radius lingkaran yang diperlukan untuk mencakup semua titik yang ingin dicapai. Secara prinsip, MCC bertujuan untuk memastikan cakupan yang efisien dan terjangkau dengan memanfaatkan satu lokasi pusat, sehingga mengurangi biaya operasional serta memastikan bahwa area yang ditargetkan dapat dijangkau dengan jarak atau waktu tempuh yang minimal. Penentuan pusat lingkaran dan radius dalam MCC melibatkan dua variabel utama yaitu pusat lingkaran dan jangkauan radius yang optimal, yang dapat ditentukan dengan pendekatan geometris seperti titik tengah atau melalui algoritma seperti Algoritma Welzl yang bekerja secara iteratif untuk mencari pusat lingkaran dan radius terkecil.

Dalam penerapannya untuk penentuan lokasi stasiun pengisian kendaraan listrik, MCC digunakan untuk mencari pusat lokasi yang dapat mencakup seluruh area target dengan memperhitungkan distribusi titik-titik permintaan seperti area pemukiman, pusat perbelanjaan, atau pusat bisnis yang memiliki potensi besar untuk digunakan oleh kendaraan listrik.

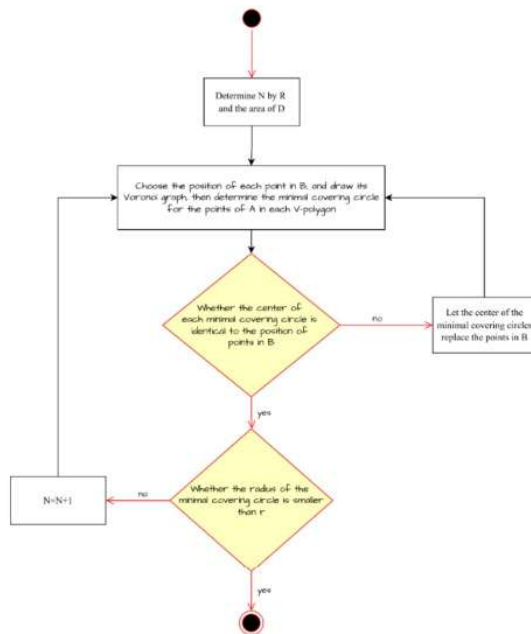
F. Improved Set Covering Location Model (ISCLM)

Improved Set Covering Location Model (ISCLM) adalah pendekatan dalam teori optimasi yang digunakan untuk menentukan lokasi optimal suatu fasilitas dengan mempertimbangkan cakupan area yang lebih luas dengan efisiensi yang lebih tinggi daripada model set covering klasik, dimana ISCLM menggabungkan konsep dasar dari model set covering dengan peningkatan dalam hal pengurangan jumlah fasilitas yang dibutuhkan serta pengoptimalan biaya yang terkait dengan pembangunan dan pengoperasian fasilitas. Berbeda dengan model set covering klasik yang hanya fokus pada cakupan tanpa mempertimbangkan optimasi lainnya, ISCLM mengintegrasikan pendekatan yang lebih baik untuk menangani beberapa kendala seperti biaya infrastruktur, keterbatasan jumlah lokasi, dan kebutuhan untuk cakupan yang merata dengan menggunakan berbagai teknik optimasi untuk memilih lokasi fasilitas yang paling strategis. Prinsip dasar ISCLM meliputi identifikasi titik permintaan, pemilihan lokasi fasilitas berdasarkan biaya pembangunan dan operasional serta jarak antara fasilitas dan titik permintaan, pengoptimalan cakupan dengan mempertimbangkan biaya dan efisiensi, serta minimisasi biaya terkait pembangunan dan pengoperasian fasilitas.

III. METODE

Penelitian dimulai dengan tahap persiapan yang meliputi studi pendahuluan untuk memahami kondisi infrastruktur pengisian kendaraan listrik di Kota Banda Aceh, studi literatur untuk mengkaji penelitian terdahulu terkait optimasi penempatan stasiun pengisian daya, serta studi lapangan untuk mengumpulkan data primer. Setelah merumuskan

masalah penelitian dan menentukan batasan serta tujuan, dilakukan pengumpulan data melalui dua sumber utama yaitu data primer yang diperoleh dari survei mengenai radius layanan stasiun pengisian kendaraan listrik, dan data sekunder yang mencakup titik permintaan kendaraan listrik serta lokasi stasiun pengisian yang sudah ada di Kota Banda Aceh. Tahap pemrosesan data meliputi transformasi koordinat untuk menyelaraskan sistem koordinat yang seragam, penentuan radius cakupan EVCS, serta identifikasi dan integrasi EVCS yang ada untuk memastikan akurasi dalam analisis.



GAMBAR 9
Proses Algoritma ISCLM

Berdasarkan data yang telah diproses tersebut, tahap desain sistem menggunakan pendekatan optimasi spasial dengan menerapkan model Improved Set Covering Location Model (ISCLM) yang dikombinasikan dengan analisis Grafik Voronoi dan Minimum Covering Circle (MCC) untuk menentukan lokasi dan jumlah optimal stasiun pengisian daya baru yang dapat memaksimalkan cakupan wilayah dengan meminimalkan biaya pembangunan. Proses algoritma ISCLM yang diterapkan dimulai dengan penentuan nilai N (jumlah stasiun pengisian), R (radius cakupan), dan area D (wilayah yang akan dianalisis), kemudian memilih posisi setiap titik dalam himpunan B sebagai calon lokasi stasiun dan membuat Voronoi Graph untuk membagi area D menjadi beberapa V-polygon yang masing-masing dilayani oleh satu stasiun.

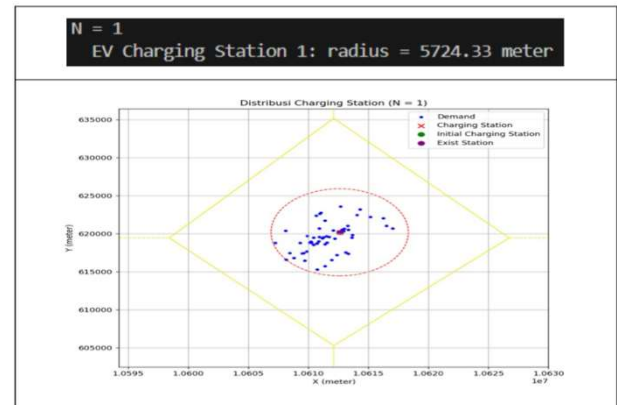
Setelah itu, ditentukan Minimum Covering Circle (MCC) untuk titik-titik permintaan dalam setiap V-polygon, dan dilakukan pengecekan apakah pusat MCC sesuai dengan posisi titik di B, jika ya maka posisi titik diganti dengan pusat MCC untuk mengoptimalkan cakupan area. Jika tidak sesuai, dilakukan pengecekan lanjutan apakah radius MCC lebih kecil dari R, dan jika radius MCC lebih besar dari R maka jumlah stasiun akan ditambah satu ($N=N+1$) dan proses kembali ke langkah awal, namun jika radius MCC lebih kecil dari R maka posisi titik di B diganti dengan pusat MCC

sebagai keputusan final untuk menentukan posisi stasiun pengisian yang optimal dengan cakupan wilayah sesuai kriteria yang telah ditetapkan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

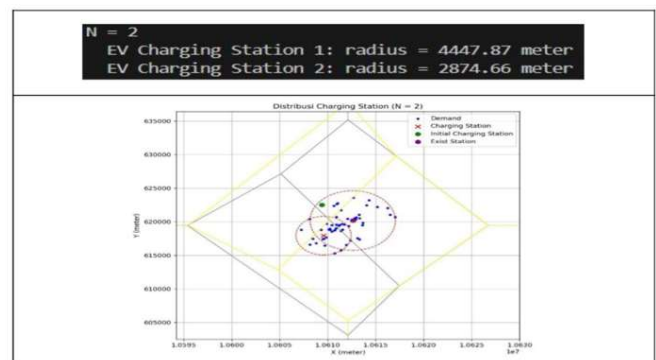
A. Validasi Hasil Rancangan

TABEL 2
Validasi N = 1



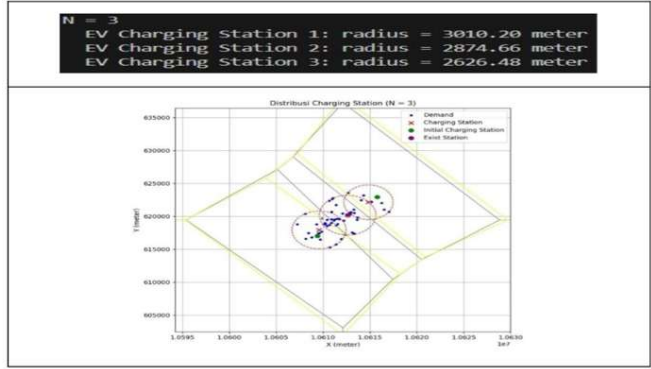
Berdasarkan keterangan dan gambar diatas dapat diketahui bahwa disaat SPKLU hanya satu yaitu yang aktual dapat mencakupi semua demand dengan radius 5724,33 m dimana itu melebihi dari persyaratan awal radius maksimal itu 3300 m.

TABEL 3
Validasi N = 2



Berdasarkan keterangan dan gambar diatas dapat diketahui bahwa disaat SPKLU ada dua unit yaitu yang aktual dan yang baru dapat mencakupi semua demand dengan radius 4447,87 m dan 2874,66 dimana itu masih ada SPKLU yang melebihi radius awal 3300 m.

TABEL 4
Validasi N = 3



Berdasarkan keterangan dan gambar diatas dapat diketahui bahwa disaat SPKLU ada tiga unit yaitu yang aktual dan yang baru dapat mencakupi semua demand dengan radius 3010,20 m, 2874,66, dan 2626,48 dimana itu sudah memenuhi syarat radius awal 3300 m untuk ke keseluruhan SPKLU

B. Analisis Jarak Titik Permintaan ke Setiap SPKLU

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diperoleh data jarak dari setiap titik permintaan menuju setiap Electric Vehicle Charging Station (EVCS) yang tersebar di wilayah studi.

TABEL JARAK DEMAND POINT KE STASIUN:				
Demand ID	Lokasi	1 (m)	2 (m)	3 (m)
1	Kantor Gubernur Aceh	Perkantoran 1308.645277 4848.908839	1304.640796	1
2	Kantor Walikota Banda Aceh	Perkantoran 2346.372482 1437.473811	5313.441593	1
3	BPK RI Perwakilan Provinsi Aceh	Perkantoran 1384.669892 4517.717915	2585.004716	1
4	BPPI Banda Aceh	Perkantoran 1719.590366 2178.468999	4672.421156	1
5	Kantor DPRD Banda Aceh	Perkantoran 1886.466782 2536.361545	4962.584356	1
6	PT. Pertamina (Persero)	Perkantoran 1212.591488 2082.586637	4158.362285	1
7	PT. San Banda Aceh	Perkantoran 2243.112225 1817.467638	5495.432878	1
8	PT. Perusahaan Perdagangan Indonesia (Persero)	Perkantoran 377.380135 4135.195579	2612.363657	1
9	CK. Aceh Marine Service	Perkantoran 3454.648273 6447.388155	2536.465787	1
10	BPJS Kesehatan Banda Aceh	Perkantoran 5668.465157 1339.378918	9838.872399	2
11	LLDKTI Wilayah XIII Aceh	Perkantoran 3449.818862 7873.410698	1171.983955	3
12	PT. Aceh Lampung Jaya Bahari	Perkantoran 2965.252787 4885.418231	3938.566319	1
13	PT. Aceh Samudra Bahari	Perkantoran 3978.728782 4189.322632	3482.469786	1
14	Kantor Wilayah Kementerian Agama	Perkantoran 2443.981190 1382.222667	5369.387934	2
15	Universitas Syiah Kuala (USK)	Universitas 3982.528629 7597.335643	1989.112566	1
16	Universitas Islam Negeri (UIN) Ar-Raniry	Universitas 4093.584215 7849.080254	1429.183545	3
17	Universitas Terbuka	Universitas 5572.688950 180.728799	6407.816213	2
18	Universitas Bina Bangsa Getsempena (UBB)	Universitas 3257.089595 7839.738032	342.553663	1
19	Universitas Muhammadiyah Aceh (UPMA)	Universitas 2994.128362 2874.658345	5538.388681	2
20	Universitas Serambi Mekkah (USM)	Universitas 3995.286874 1935.278387	4845.291894	2
21	Sonaya Pall	Tempat Perbelanjaan 4358.223699 589.572418	7128.859983	2
22	Plaza Aceh	Tempat Perbelanjaan 951.286488 2958.872153	3872.548877	1
23	Barata Plaza	Tempat Perbelanjaan 2113.984351 1674.991953	5873.141687	1
24	Pasar aceh	Tempat Perbelanjaan 2277.541447 1783.988955	5138.118487	1
25	Stadion Harapan Bangsa	Tempat Olahraga 4686.325743 2849.435613	7238.124486	1
26	Stadion n. Dimaudhalla	Tempat Olahraga 757.195318 4529.115217	2251.489219	1
27	King Gym	Tempat Olahraga 1798.711374 3858.825144	4216.728525	1
28	Zenith Sport Center	Tempat Olahraga 4099.278135 1341.588095	7958.556772	2
29	Stadion USC	Tempat Olahraga 4442.874891 7855.254349	3526.461787	1
30	Lapangan Bhang Padang	Tempat Olahraga 2738.422182 1185.179962	5675.867852	1
31	Hermes Palace Hotel	Hotel 1222.668578 4319.868677	2945.774886	1
32	Kyriad Muraya Hotel Aceh	Hotel 1529.781638 2384.235411	4458.943572	1
33	Grand Aravia Hotel	Hotel 2674.820772 1217.359735	5596.124848	1
34	Grand Hanggoro Hotel	Hotel 2897.356339 3788.267771	5811.758326	1
35	Ayani Hotel	Hotel 1822.451599 2116.563978	4787.876895	1
36	Hotel Mekkah Banda Aceh	Hotel 582.794142 4343.449573	2484.871499	1
37	Alhambra Hotel Banda Aceh	Hotel 1822.451599 2116.563978	4787.876895	1
38	Hotel Nazamila Indah	Hotel 4853.623488 479.383723	7823.828157	2
39	RSUD Meuraxa	Rumah Sakit 5234.938267 2874.658345	7888.974434	2
40	RSUD Dr. Zainoel Abidin	Rumah Sakit 345.805232 4124.655697	2636.959996	1
41	Rumah sakit Bhayangkara Polda Aceh	Rumah Sakit 5724.288742 1947.871889	8592.658488	2
42	RS Dsa dr dmas	Rumah Sakit 2879.348798 1822.576588	5818.862889	1
43	RS Harapan Bunda	Rumah Sakit 3725.733887 384.276768	6695.941845	1
44	RS Compaq Az-Zahra	Rumah Sakit 689.262238 3529.951848	3285.362976	1
45	Pelabuhan Penyeterangan Ulee Lheue	Pelabuhan 4511.325817 2074.658345	4955.492446	1
46	Pengaluan PKPPT Lempulo	Pelabuhan 2951.460778 4566.471431	4214.354823	1
47	Museum Tsunami Aceh	Tempat Lainya 2738.342944 1853.088717	5686.313488	2
48	STAI Nusantara Banda Aceh	Tempat Lainya 2672.652733 6345.218844	866.418884	3
49	Aceh Seafood Restaurant	Tempat Lainya 5572.180882 2384.282124	8329.958384	1
50	Yakin Pasifik Tuna: UPT Patrik Pengaluan (YPT)	Tempat Lainya 3856.282228 5839.538888	384.484296	2
51	BPPI Banda Aceh	Tempat Lainya 4728.932483 1473.048135	7688.541475	2
52	Terminal Batoh	Terminal 3781.389966 2757.318485	6387.866632	2
53	Terminal L-380	Terminal 2963.721851 3549.759788	4981.863631	1

GAMBAR 10
Jarak Titik Permintaan ke Setiap SPKLU

Hasil menunjukkan adanya variasi jarak yang signifikan antara demand point dengan EVCS terdekat. Beberapa demand point memiliki akses yang sangat baik dengan jarak kurang dari 1 km, sementara demand point lainnya memerlukan perjalanan yang lebih jauh untuk mencapai EVCS terdekat namun seluruh titik permintaan ke SPKLU

terdekatnya $\leq 3,3$ Km (3300 m) dimana memenuhi syarat awal.

C. Hasil Analisis Finansial Growth Rate 5% Utilitas SPKLU 50%, 75%, 90% (2025-2045)

Berdasarkan hasil analisis dapat dilihat penulis menggunakan suku bunga 10% dengan tujuan apabila dengan suku bunga tinggi saja sudah masuk kategori layak maka di lapangan cenderung masuk apabila suku bunga dibawah tersebut, untuk skenario Growth Rate 5% Utilitas SPKLU 50%, 75%, 90% ini menghasilkan payback period yang berbeda-beda yaitu 17,99, 5,80, dan 4,17 tahun dengan Net Present Value (NPV) sebesar -Rp 588.099.290, Rp 1.662.260.038, dan Rp 2.787.439.702 dimana ada yang kurang dari 0 dan lebih dari 0 dan Internal Rate of return (IRR) 1%, 17%, dan 24% dimana ada yang kurang dan lebih dari Minimum Attractive Rate of Return 15%, ini menunjukkan hasil berdampak pada utilitas SPKLU.

TABEL 5
Analisis Finansial Growth Rate 5%

	GR 5%, U 50%	GR 5%, U 75%	GR 5%, U 90%
Interest Rate	10%	10%	10%
Payback Period	17.99	5.80	4.17
NPV	-Rp588,099,290	Rp1,662,260,038	Rp2,787,439,702
IRR	1%	17%	24%
BCR	1.22	4.21	5.70
PI	0.22	3.21	4.70
MARR	15%	15%	15%
	Tidak Layak	Layak	Layak

D. Hasil Analisis Finansial Growth Rate 10% Utilitas SPKLU 50%, 75%, 90% (2025-2045)

Berdasarkan hasil analisis dapat dilihat penulis menggunakan suku bunga 10% dengan tujuan apabila dengan suku bunga tinggi saja sudah masuk kategori layak maka di lapangan cenderung masuk apabila suku bunga dibawah tersebut, untuk skenario Growth Rate 10% Utilitas SPKLU 50%, 75%, 90% ini menghasilkan payback period yang berbeda-beda yaitu 11,08, 4,83, dan 3,71 tahun dengan Net Present Value (NPV) sebesar Rp 1.381.581.460, Rp 4.759.664.369, dan Rp 6.448.705.824 dimana lebih dari 0 dan Internal Rate of return (IRR) 9%, 24%, dan 31% dimana ada yang kurang dan lebih dari Minimum Attractive Rate of Return 15%, ini menunjukkan hasil berdampak pada utilitas SPKLU.

TABEL 6
Analisis Finansial Growth Rate 10%

	GR 10%, U 50%	GR 10%, U 75%	GR 10%, U 90%
Interest Rate	10%	10%	10%
Payback Period	11.08	4.83	3.71
NPV	Rp1,381,581,460	Rp4,759,664,369	Rp6,448,705,824
IRR	9%	24%	31%
BCR	3.84	8.32	10.57
PI	2.84	7.32	9.57
MARR	15%	15%	15%
	Tidak Layak	Layak	Layak

E. Hasil Analisis Finansial Growth Rate 15% Utilitas SPKLU 50%, 75%, 90% (2025-2045)

Berdasarkan hasil analisis dapat dilihat penulis menggunakan suku bunga 10% dengan tujuan apabila dengan suku bunga tinggi saja sudah masuk kategori layak maka di lapangan cenderung masuk apabila suku bunga dibawah tersebut, untuk skenario Growth Rate 15% Utilitas SPKLU 50%, 75%, 90% ini menghasilkan payback period yang berbeda-beda yaitu 8,63, 4,97, dan 3,39 tahun dengan Net Present Value (NPV) sebesar Rp 4.902.043.626, Rp 10.226.103.780, dan Rp 12.888.133.857 dimana lebih dari 0 dan Internal Rate of return (IRR) 16%, 30%, dan 37% dimana lebih dari Minimum Attractive Rate of Return 15%, ini menunjukkan hasil berdampak pada utilitas SPKLU.

TABEL 7
Analisis Finansial Growth Rate 15%

	GR 15%, U 50%	GR 15%, U 75%	GR 15%, U 90%
Interest Rate	10%	10%	10%
Payback Period	8.63	4.97	3.39
NPV	Rp4,902,043,626	Rp10,226,103,780	Rp12,888,133,857
IRR	16%	30%	37%
BCR	8.51	15.58	19.12
PI	7.51	14.58	18.12
MARR	15%	15%	15%
	Layak	Layak	Layak

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mencapai tujuan utamanya yaitu menentukan jumlah minimum Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) yang diperlukan untuk melayani 100% titik demand di Kota Banda Aceh dengan mempertimbangkan batasan radius cakupan maksimum. Solusi optimal yang diperoleh terdiri dari tiga SPKLU, yaitu satu stasiun yang sudah ada di Kuta Alam dan dua stasiun baru yang perlu dibangun. Cakupan pelayanan mengalami peningkatan yang signifikan dari kondisi awal yang hanya melayani 35 dari 53 titik demand (66,04%) menjadi cakupan penuh terhadap seluruh 53 titik (100%).

Validasi model mengkonfirmasi bahwa semua batasan (constraint) telah dipenuhi, yaitu fungsi tujuan untuk meminimalisasi jumlah stasiun tercapai dengan $N = 3$, setiap titik demand dilayani oleh minimal satu SPKLU, dan radius cakupan setiap SPKLU tidak melebihi maksimum 3,3 km. Hasil implementasi menunjukkan bahwa SPKLU yang sudah ada (radius: 3.010,20 m) melayani 22 titik, SPKLU kedua pada koordinat (5.542240, 95.307468) dengan radius 2.874,66 m melayani 24 titik, dan SPKLU ketiga pada koordinat (5.579886, 95.354833) dengan radius 2.626,48 m melayani 7 titik. Metodologi yang digunakan terbukti efektif dengan mengintegrasikan Improved Set Covering Location Model (ISCLM), Voronoi Graph untuk pembagian area pelayanan eksklusif, dan Minimum Covering Circle (MCC) untuk optimasi radius cakupan. Parameter teknis kunci seperti kecepatan rata-rata (25,06 km/jam), waktu maksimal untuk menemukan tempat EV Charging Station (10 menit), dan faktor utilisasi (0,8) menghasilkan radius maksimum 3,3 km yang realistis dan sesuai untuk Kota Banda Aceh.

Selain itu, analisis finansial yang mencakup perhitungan CAPEX, OPEX, dan evaluasi arus kas menunjukkan bahwa

pembangunan SPKLU memiliki potensi kelayakan ekonomi yang baik, terutama pada skenario tingkat utilitas menengah hingga tinggi. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam perencanaan infrastruktur SPKLU yang optimal secara spasial dan layak secara finansial, serta dapat menjadi dasar pengambilan keputusan bagi pemerintah daerah dan pemangku kepentingan dalam mendukung percepatan transisi energi bersih di Indonesia.

REFERENSI

- [1] A. G. Abo-Khalil, M. A. Abdelkareem, E. T. Sayed, H. M. Maghrabie, A. Radwan, H. Rezk, and A. G. Olabi, "Electric vehicle impact on energy industry, policy, technical barriers, and power systems," *International Journal of Thermofluids*, vol. 13, p. 100134, 2022.
- [2] M. C. Okika and I. Musonda, "A review: Charging infrastructure optimisation to support widespread adoption of electric vehicles," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 27, p. 101069, 2025.
- [3] P. Wibowo, B. Satria, M. E. Dalimunte, and A. Muflih, "Pengembangan charging system untuk kendaraan listrik," *Universitas Pembangunan Panca Budi*, vol. 1, no. 1, pp. 101–109, 2024.
- [4] N. N. Dania, "Narrative review: Perancangan sistem pengisian cepat untuk kendaraan listrik dengan algoritma kontrol baterai," *Jupiter: Publikasi Ilmu Keteknikan Industri, Teknik Elektro dan Informatika*, vol. 2, no. 6, pp. 152–157, 2024.
- [5] M. Nayeem, "A systematic literature review on mathematical models of humanitarian logistics," *Symmetry*, vol. 13, no. 11, pp. 1–35, 2021.
- [6] M. Zhou, J. Li, C. Wang, J. Wang, and L. Wang, "Applications of Voronoi diagrams in multi-robot coverage: A review," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 6, 2024.
- [7] S. Çelik and Ş. Ok, "Electric vehicle charging stations: Model, algorithm, simulation, location, and capacity planning," *Heliyon*, vol. 10, no. 7, 2024.
- [8] Wibowo, P., Satria, B., Dalimunte, M. E., & Alim Muflih. (2024). Pengembangan Charging System Untuk Kendaraan Listrik. Universitas Pembangunan Panca Budi, 1(1), 101–109.