

# 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)

1<sup>st</sup> Muhammad Furqan Prawira  
Fakultas Rekayasa Industri  
Telkom University  
Bandung, Indonesia  
furqanpra@student.telkomuniversity.ac.id

2<sup>nd</sup> Putu Giri Artha Kusuma  
Fakultas Rekayasa Industri  
Telkom University  
Bandung, Indonesia  
putugiriak@telkomuniversity.ac.id

3<sup>rd</sup> Prafajar Suksessanno Muttaqin  
Fakultas Rekayasa Industri  
Telkom University  
Bandung, Indonesia  
prafajars@telkomuniversity.ac.id

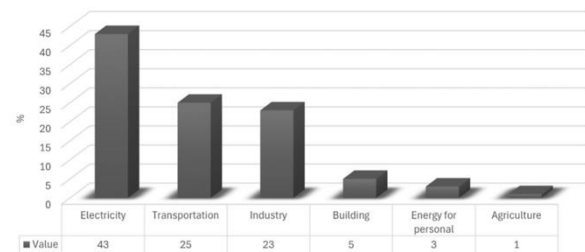
**Abstrak**— Peningkatan adopsi kendaraan listrik di Indonesia memerlukan dukungan infrastruktur Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) yang memadai, khususnya di tingkat kota. Di Kota Banda Aceh, keterbatasan jumlah dan jangkauan SPKLU menyebabkan sebagian titik permintaan belum terlayani 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

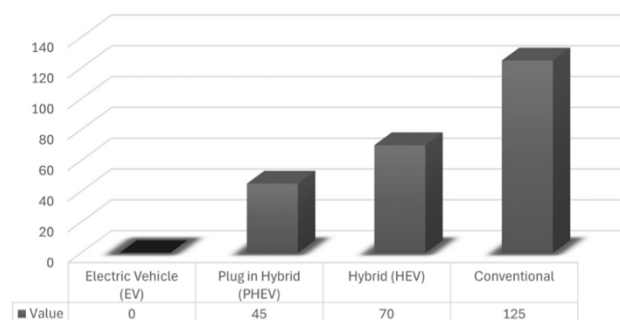
Seiring dengan meningkatnya perhatian global terhadap isu perubahan iklim, penggunaan kendaraan listrik menjadi salah satu solusi strategis untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Sektor transportasi menyumbang 25% dari total emisi CO<sub>2</sub> terkait energi di Indonesia, menjadikannya penyumbang terbesar 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 CO<sub>2</sub> dari target total 358 juta ton di sektor energi.



Gambar 1. Proporsi Kontribusi Emisi CO<sub>2</sub> Berdasarkan Sektor

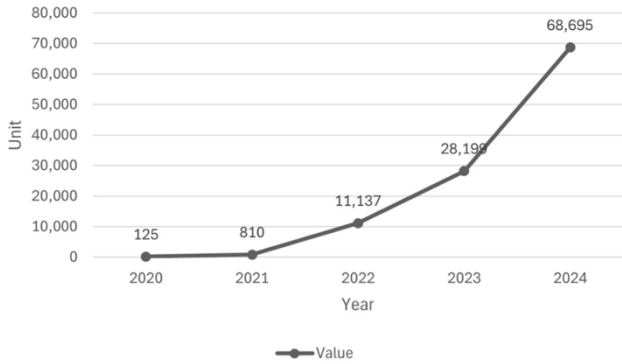
Grafik tersebut menunjukkan bahwa sektor listrik merupakan penyumbang terbesar emisi CO<sub>2</sub> dengan kontribusi 43%, diikuti oleh sektor transportasi sebesar 25%, dan industri sebesar 23%. Sektor bangunan, energi pribadi, dan pertanian masing-masing menyumbang emisi yang jauh lebih kecil dengan angka 5%, 3%, dan 1%.



Gambar 2. Perbandingan Emisi CO<sub>2</sub> Pada Mobil (g/km)

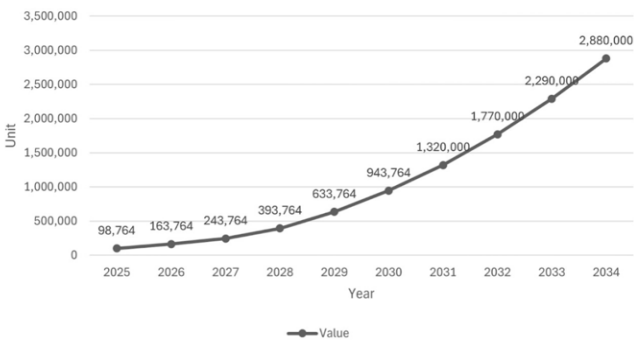
Kendaraan listrik menghasilkan emisi nol (0 g/km) saat beroperasi, jauh lebih rendah dibandingkan plug-in hybrid (45 g/km), hybrid (70 g/km), dan kendaraan konvensional yang menghasilkan 125 g/km. Hal ini menjadikan kendaraan listrik sebagai pilihan transportasi paling ramah lingkungan dalam mendukung 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.



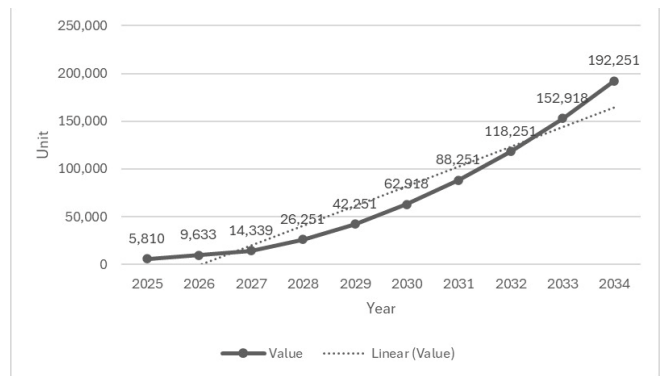
Gambar 3. Angka Pertumbuhan Mobil Listrik di Indonesia Periode 2020-2024

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.



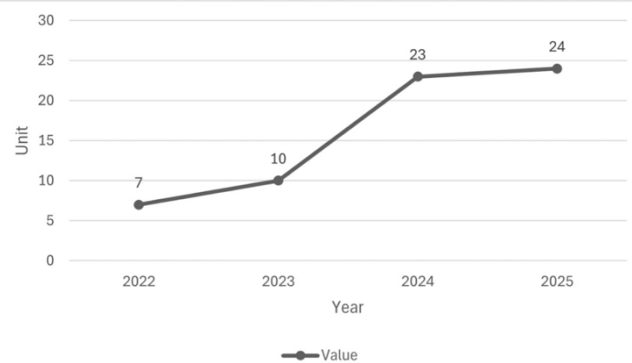
Gambar 4. Proyeksi Jumlah Mobil Listrik di Indonesia Periode 2025-2034

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.



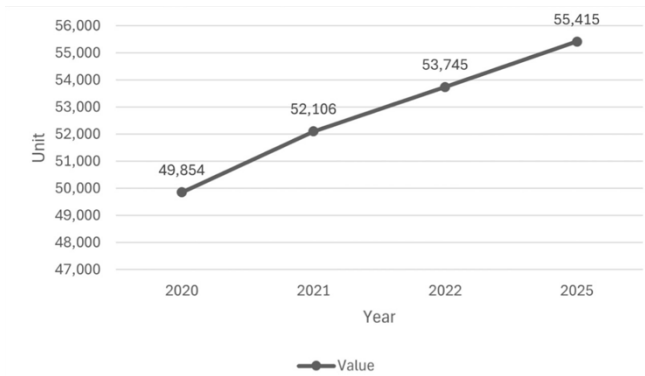
Gambar 5. Proyeksi Kebutuhan Stasiun Pengisian Daya Kendaraan Listrik (EV) di Indonesia Periode 2025-2034

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.



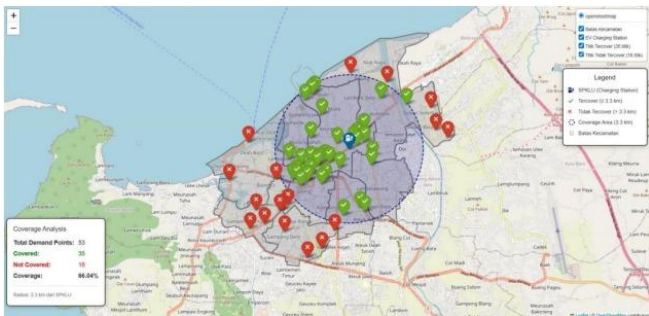
Gambar 6. Jumlah Pengguna Mobil Listrik di Banda Aceh Periode 2022-2025

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 (Abo-Khalil et al., 2022; Okika & Musonda, 2025).

## 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 (Wibowo et al., 2024; Dania, 2024).

## 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. (Nayeem, 2021).

## 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 perencana 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 tercapai atau memiliki akses terbatas. (Zhou et al., 2024; Celik & Ok, 2024).

## 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.

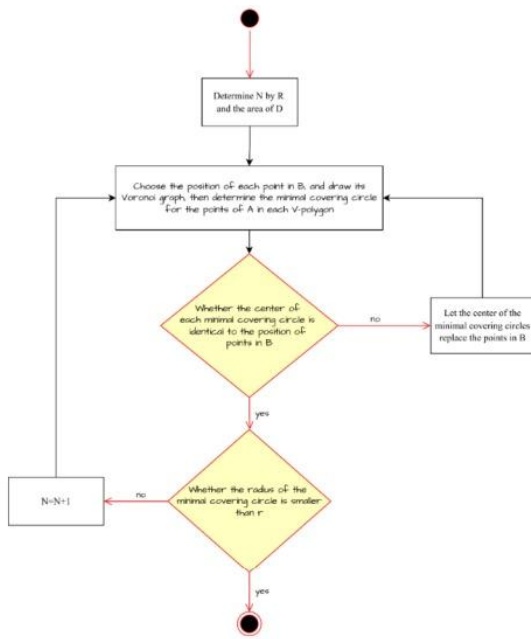
## F. Improved Set Covering Location Model (ISCLM)

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

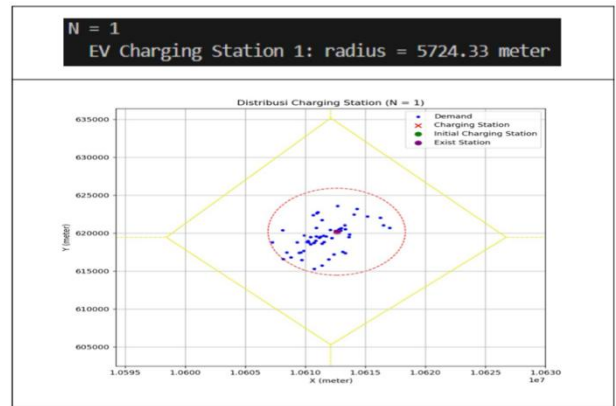
setiap titik dalam himpunan B sebagai calon lokasi stasiun dan membuat Voronoi Graph untuk membagi area D menjadi beberapa V-polygon yang masing-masing dilayani oleh satu stasiun.

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

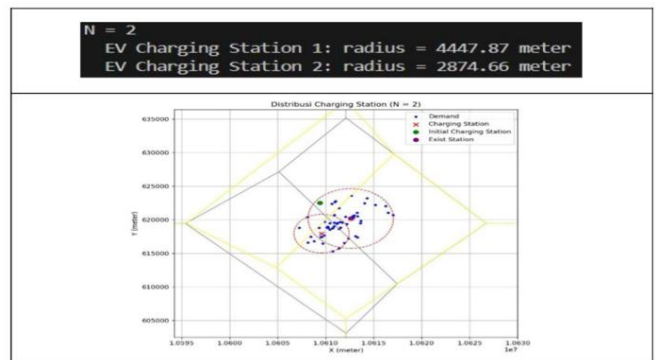
#### A. Validasi Hasil Rancangan

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.

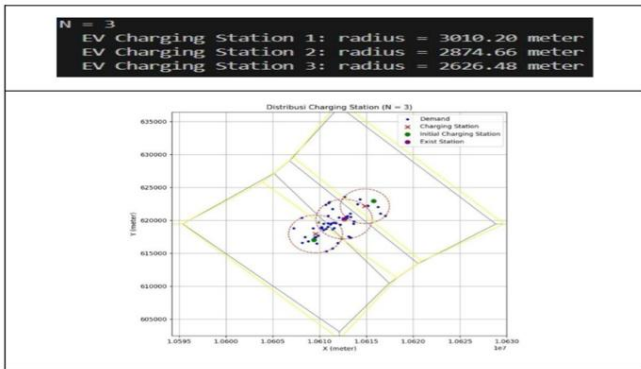
Tabel 3. Validasi N = 2



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.

Demand ID	Lokasi	Kategori	1 (m)	2 (m)	3 (m)	Nearest Station ID
1	Kantor Gubernur Aceh	Perkantoran	1108.64527	4848.908839	1984.649786	1
2	Kantor Walikota Banda Aceh	Perkantoran	2346.372482	1437.473831	5313.441593	2
3	BPK RI Perwakilan Provinsi Aceh	Perkantoran	1184.860892	4517.71915	2505.884716	1
4	UPM Banda Aceh	Perkantoran	1719.59386	2179.489999	4571.621156	1
5	Kantor DPRK Banda Aceh	Perkantoran	1886.486734	2698.366156	4049.584356	1
6	PT. Pertamina (Persero)	Perkantoran	1212.591488	2682.584637	4158.362285	2
7	PT. San Banda Aceh	Perkantoran	2741.112225	1817.467638	5495.432878	1
8	PT. Perusahaan Perdagangan Indonesia (Persero)	Perkantoran	377.380195	4135.192739	3012.336957	1
9	CV. Aceh Marine Service	Perkantoran	3414.658473	6447.388165	2626.484787	1
10	BPJS Kesehatan Banda Aceh	Perkantoran	5868.465157	1339.378918	8838.872399	2
11	LLDKITI Milayah XIII Aceh	Perkantoran	3449.818882	7873.418688	1171.983955	3
12	PT. Aceh Lampung Jaya Bahari	Perkantoran	2626.257267	4985.418213	3928.566319	1
13	PT. Aceh Samudra Bahari	Perkantoran	1978.738782	4199.322632	3492.460786	1
14	Kantor Wilayah Kementerian Agama	Perkantoran	2481.981198	1382.222667	5369.267914	2
15	Universitas Syiah Kuala (USK)	Universitas	3882.528629	7597.335643	1989.112566	3
16	Universitas Islam Negeri (UIN) Ar-Raniry	Universitas	4893.584215	7849.880824	1428.385585	1
17	Universitas Terbuka	Universitas	3575.688958	928.778759	6457.816213	3
18	Universitas Bina Bangsa Getsempena (UBG)	Universitas	3257.889959	7839.738832	342.553663	3
19	Universitas Muhammadiyah Aceh (UMMA)	Universitas	2994.128382	2874.658345	5538.388681	2
20	Universitas Sebelas Mئيhkan (USM)	Universitas	1995.288874	1935.278187	4852.281894	2
21	Suzuka Mall Tempat Perbelanjaan	Tempat Perbelanjaan	4158.253689	389.575418	7128.659593	2
22	Plaza Aceh Tempat Perbelanjaan	Tempat Perbelanjaan	951.286488	2958.872815	3872.548877	2
23	Barata Plaza Tempat Perbelanjaan	Tempat Perbelanjaan	2113.944351	1674.991953	5873.141887	2
24	Pasar Aceh Tempat Perbelanjaan	Tempat Perbelanjaan	2371.541447	1783.998955	5138.218497	2
25	Stadion Harapan Bangsa	Tempat Olahraga	4695.328751	2849.836612	7278.724496	2
26	Stadion H. Dimurthalia	Tempat Olahraga	757.195318	4529.115217	2251.892179	2
27	King Gym	Tempat Olahraga	1798.713734	3858.029144	4216.728525	2
28	Zeans Sport Center	Tempat Olahraga	8999.278138	1241.588895	7959.556772	2
29	Stadion USK	Tempat Olahraga	4447.874991	7965.284349	2638.484787	3
30	Lapangan Blang Padang	Tempat Olahraga	2738.422182	1185.179962	5675.857852	2
31	Hermes Palace Hotel	Hotel	1222.668578	4319.869877	2945.774896	1
32	Kyriad Maraya Hotel Aceh	Hotel	1578.781838	2284.235411	4458.943572	1
33	Grand Arabia Hotel	Hotel	2674.827732	1237.395175	5598.136887	2
34	Grand Nanggroe Hotel	Hotel	2897.356339	3788.267771	5811.758326	1
35	Ayani Hotel	Hotel	1822.451599	2116.563976	4787.876895	1
36	Hotel Mahkota Banda Aceh	Hotel	582.798142	4343.849273	2484.871489	1
37	Alhambra Hotel Banda Aceh	Hotel	1824.451262	2181.248899	4564.833698	1
38	Hotel Rasamala Indah	Hotel	4853.623489	479.383723	7023.828157	2
39	RSUD Meuraxa	Rumah Sakit	5234.938267	2874.658345	7988.874434	2
40	RSUD Dr. Zainoel Abidin	Rumah Sakit	345.862332	4124.655997	2636.859996	1
41	Rumah sakit Bhayangkara Pidada Aceh	Rumah Sakit	3729.328323	1549.871399	8929.859688	2
42	RS Ibu dan Anak	Rumah Sakit	2879.348738	1822.576588	5818.862889	2
43	RS Harapan Bunda	Rumah Sakit	3725.733887	384.276768	6695.941845	2
44	RS Cecepika Az-Zahra	Rumah Sakit	689.282238	3529.951848	3265.302976	2
45	Pelabuhan Penyelenggaraan Ulae Ulae	Pelabuhan	4311.328311	2874.658345	695.802446	1
46	Pangkalan PSDK Lampung	Pelabuhan	2953.485738	4566.871431	4214.354823	1
47	Museum Tsunami Aceh	Tempat Lainnya	2738.342944	1853.888717	5696.313488	2
48	STAI Nusantara Banda Aceh	Tempat Lainnya	2872.852373	6345.218844	866.418894	3
49	Aceh Seafood Restaurant	Tempat Lainnya	3872.181882	2284.235411	8329.959184	2
50	Yakin Pasifik Tuna- UPI Pabrik Pengolahan (YPT)	Tempat Lainnya	3810.282239	5839.538886	3844.846290	1
51	BPMW Banda Aceh	Tempat Lainnya	4728.932483	1473.848135	7668.541475	2
52	Terminal Botoh	Terminal	3701.388966	2757.318485	6387.866632	2
53	Terminal L-300	Terminal	2652.751861	3549.759388	4881.903631	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%

	GR15%, U 50%	GR15%, 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

- Haorui, J., Manhao, L., Bowen, Z., & Xin, Z. (2018, October). Improved Set Covering Location Model For Charging Facility Deployments. In *Iop Conference Series: Materials Science And Engineering* (Vol. 435, No. 1, P. 012019). Iop Publishing.
- Cai, Y., Mao, P., Zhang, W., & You, E. (2018). The Study On The Layout Of The Charging Station In Chengdu.
- Marlinda, S., Saleh, S. M., & Anggraini, R. (2017). Analisis Kinerja Jalan Dan Kecepatan Perjalanan Kendaraan Pada Jalan Pocut Baren Kota Banda Aceh. *Jurnal Teknik Sipil*, 1(1), 219–232.
- Pt Pln (Persero). (2025). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (Rupltl) 2025–2034. Keputusan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 188.K/TL.03/Mem.L/2025 Tanggal 26 Mei 2025. Jakarta: Kementerian Esdm.
- Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral. (2025). Keputusan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Nomor 24.K/TL.01/Mem.L/2025 Tentang Rencana Pengembangan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum Untuk Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai Tahun 2025 Sampai Dengan Tahun 2030.
- Pemerintah Aceh. (2025). Qanun Aceh Nomor 8 Tahun 2025 Tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Aceh (Rpjpa) Tahun 2025–2045. Banda Aceh: Pemerintah Aceh.
- Pemerintah Kota Banda Aceh. (2025). Qanun Kota Banda Aceh Nomor 1 Tahun 2025 Tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Daerah (Rpjpd) Kota Banda Aceh Tahun 2025–2045. Banda Aceh: Bappeda Kota Banda Aceh.
- Abo-Khalil, A. G., Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Maghrabie, H. M., Radwan, A., Rezk, H., & Olabi, A. G. (2022). Electric Vehicle Impact On Energy Industry, Policy, Technical Barriers, And Power Systems. *International Journal Of Thermofluids*, 13, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100134>
- Alanazi, F. (2023). Electric Vehicles: Benefits Challenges And Potential Solutions. *Journal Of Applied Scienc*, 13, 1–23.
- Amruddin, Priyanda, R., Agustina, T. S., Asriantini, N. S., & Alindar, D. A. (2022). Metodologi Penelitian Kuantitatif (1st Ed.). Cv. Pradina Pustaka Grup. [http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/red2017-eng-8ene.pdf?sequence=12&isallowed=y%0ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484\\_sistem\\_pembetulan\\_terpusat\\_strategi\\_mel\\_estari](http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/red2017-eng-8ene.pdf?sequence=12&isallowed=y%0ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_sistem_pembetulan_terpusat_strategi_mel_estari)

- Asa Bintang Kapiarsa, Silitonga, T., Afrianita, Y., Yasin Ramadhan, M. T., & Kurnia Novianty, S. (2022). Kajian Teori Lokasi Christaller Terhadap Jaringan Pelayanan Sarana Perdagangan Di Pulau Karimun Besar. *Jurnal Pelita Kota*, 3(1), 150–160. <https://doi.org/10.51742/Pelita.V3i1.469>
- Belva, C. D. Q., & Raspati, B. (2024). Pengembangan Teknologi Dalam Memanfaatkan Eenergi Terbarukan Di Ibu Kota Nusantara Dengan Program Smart City. *Journal Of Law, Administration, And Social Science*, 4(5), 906–919. <https://doi.org/10.54957/Jolas.V4i5.904>
- Çelik, S., & Ok, Ş. (2024). Electric Vehicle Charging Stations: Model, Algorithm, Simulation, Location, And Capacity Planning. *Heliyon*, 10(7). <https://doi.org/10.1016/J.Heliyon.2024.E29153>
- Chicco, D., & Jurman, G. (2023). The Matthews Correlation Coefficient (Mcc) Should Replace The Roc Auc As The Standard Metric For Assessing Binary Classification. *Biodata Mining*, 16(1), 1–24. <https://doi.org/10.1186/S13040-023-00322-4>
- Cornelis, A. J., & Romadoni, A. M. (2024). Analisis Efektivitas Infrastruktur Bangunan Spklu (Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum) Di Indonesia Menuju Program Nze (Net Zero Emission) Tahun 2060. *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, 9(2), 18–24. <https://doi.org/10.52447/Jktm.V9i2.8248>
- Dania, N. N. (2024). Narrative Review: Perancangan Sistem Pengisian Cepat Untuk Kendaraan Listrik Dengan Algoritma Kontrol Baterai. *Jupiter: Publikasi Ilmu Keteknikan Industri, Teknik Elektro Dan Informatika*, 2(6), 152–157. <https://doi.org/10.61132/Jupiter.V2i6.629>
- Ginting, M. A., Syarifuddin, H., & Muchlis, F. (2024). Analisis Kebijakan Dan Kepentingan Stakeholder Dalam Pengembangan Ekosistem Kendaraan Listrik Di Kota Jambi. *Jurnal Pembangunan Berkelanjutan*, 7(1), 96–106.
- Hardani, H. A., Ustiawaty, J., Utami, E. F., Istiqomah, R. R., Fardani, R. A., Sukmana, D. J., & Auliya, N. H. (2020). *Buku Metode Penelitian Kualitatif & Kuantitatif (1st Ed.)*. Cv. Pustaka Ilmu Group.
- Hermayandi, N. S., Ernawati, L. A., Witjaksono, R. S. L., & Suprpto, F. A. (2025). Kota Surabaya Menuju Net Zero Emission 2060: Studi Kolaborasi Percepatan Transisi Energi Pada Bis Listrik Trans Semanggi Suroboyo. *Bappenas Working Papers*, 8(1), 74–94. <https://doi.org/10.47266/Bwp.V8i1.381>
- Karolemeas, C., Tsigdinos, S., Tzouras, P. G., Nikitas, A., & Bakogiannis, E. (2021). Determining Electric Vehicle Charging Station Location Suitability: A Qualitative Study Of Greek Stakeholders Employing Thematic Analysis And Analytical Hierarchy Process. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–21. <https://doi.org/10.3390/Su13042298>
- Kurniawan, I., & Prasetyani, E. (2024). Peluang Dan Tantangan Implikasi Eco Green Dalam Industri Mobil Listrik Di Indonesia. *Seminar Nasional Stiami*, 11.
- Machali, I. (2021). *Metode Penelitian Kuantitatif (3rd Ed.)*. Fakultas Ilmu Tarbiyah Dan Keguruan.
- Mastoi, M. S., Zhuang, S., Munir, H. M., Haris, M., Hassan, M., Usman, M., Bukhari, S. S. H., & Ro, J. S. (2022). An In-Depth Analysis Of Electric Vehicle Charging Station Infrastructure, Policy Implications, And Future Trends. *Energy Reports*, 8, 11504–11529. <https://doi.org/10.1016/J.Egyr.2022.09.011>
- Nayeem, M. (2021). A Systematic Literature Review On Mathematical Models Of Humanitarian Logistics. *Symmetry*, 13(11), 1–35.
- Okika, M. C., & Musonda, I. (2025). A Review: Charging Infrastructure Optimisation To Support Widespread Adoption Of Electric Vehicles. *Energy Conversion And Management: X*, 27(April), 101069. <https://doi.org/10.1016/J.Ecmx.2025.101069>
- Rizky, L., Pratiwi, T. S., Wibawa, A., & Achdiyana, I. (2024). Peran Negara G20 Dalam Percepatan Transisi Energi Baru Terbarukan (Ebt) Untuk Mewujudkan Ketahanan Energi Nasional. *Jurnal Ketahanan Nasional*, 29(3), 271–290. <https://doi.org/10.22146/Jkn.88751>
- Siti Aprillia, I., Vianney Lourdes Sugara, M., Kheista, K., Abigael Rhemrev, E., Komala Sari, E., Christie Universitas Tarumanagara, M., & Author, C. (2024). Kebijakan Mobil Listrik Di Indonesia: Tantangan Dan Peluang Dalam Mewujudkan Mobilitas Ramah Lingkungan. *Jurnal Pendidikan Sejarah Dan Riset Sosial Humaniora*, 4 No. 3(3), 391–401.
- Sudjoko, C. (2021). Strategi Pemanfaatan Kendaraan Listrik Berkelanjutan Sebagai Solusi Untuk Mengurangi Emisi Karbon. *Jurnal Paradigma: Jurnal Multidisipliner Mahasiswa Pascasarjana Indonesia*, 2(2), 54–68.
- Veza, I., Asy'ari, M. Z., Idris, M., Epin, V., Rizwanul Fattah, I. M., & Spraggon, M. (2023). Electric Vehicle (Ev) And Driving Towards Sustainability: Comparison Between Ev, Hev, Phev, And Ice Vehicles To Achieve Net Zero Emissions By 2050 From Ev. *Alexandria Engineering Journal*, 82(April), 459–467. <https://doi.org/10.1016/J.Aej.2023.10.020>
- Wibowo, P., Satria, B., Dalimunte, M. E., & Alim Muflih. (2024). Pengembangan Charging System Untuk Kendaraan Listrik. *Universitas Pembangunan Panca Budi*, 1(1), 101–109.
- Zhao, X., Hu, H., Yuan, H., & Chu, X. (2023). How Does Adoption Of Electric Vehicles Reduce Carbon Emissions? Evidence From China. *Heliyon*, 9(9), E20296. <https://doi.org/10.1016/J.Heliyon.2023.E20296>
- Zhou, M., Li, J., Wang, C., Wang, J., & Wang, L. (2024). Applications Of Voronoi Diagrams In Multi-Robot Coverage: A Review. *Journal Of Marine Science And Engineering*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/Jmse12061022>
- Zola, G., Siska, ;, Nugraheni, D., Andhien, ;, Rosiana, A., Dzamar, ;, Pambudy, A., & Agustanta, N. (2023). Inovasi Kendaraan Listrik Sebagai Upaya Meningkatkan Kelestarian Lingkungan Dan Mendorong Pertumbuhan Ekonomi Hijau Di Indonesia. *Ekonomi Sumberdaya Dan Lingkungan*, 11(3), 2303–2320.