

ABSTRAK

Isu perubahan iklim global telah mendorong transisi energi dari bahan bakar fosil menuju sumber energi yang lebih berkelanjutan, dengan sektor transportasi menjadi fokus utama karena kontribusinya yang signifikan terhadap emisi gas rumah kaca dunia. Dalam konteks nasional, Indonesia telah berkomitmen untuk mencapai target *Net Zero Emissions* pada tahun 2060, di mana adopsi kendaraan listrik menjadi salah satu strategi kunci untuk mengurangi emisi sektor transportasi. Namun, di tingkat lokal, khususnya Kota Banda Aceh, implementasi transisi ini menghadapi tantangan infrastruktur yang serius berupa keterbatasan ketersediaan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU). Meskipun data menunjukkan pertumbuhan jumlah pengguna kendaraan listrik yang positif di Banda Aceh, infrastruktur pendukung yang terbatas menjadi hambatan signifikan bagi adopsi yang lebih luas. Berdasarkan analisis awal, cakupan spasial stasiun pengisian yang ada hanya mencapai 66,04% dari total 53 titik permintaan yang tersebar di wilayah studi, meninggalkan 18 titik permintaan yang tidak terlayani dalam radius optimal 3,3 km. Kondisi ini menciptakan apa yang dikenal sebagai *range anxiety*, yaitu kekhawatiran pengguna akan kehabisan daya baterai sebelum mencapai stasiun pengisian, yang pada akhirnya menghambat niat masyarakat untuk beralih ke kendaraan listrik.

Untuk menyelesaikan permasalahan ini secara sistematis dan ilmiah, penelitian ini mengintegrasikan tiga metode optimasi lokasi yang canggih, yaitu *Improved Set Covering Location Model* (ISCLM), *Voronoi Graph*, dan *Minimum Covering Circle* (MCC). Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menentukan lokasi optimal dan jumlah stasiun pengisian baru yang dibutuhkan agar seluruh 100% titik permintaan di Kota Banda Aceh dapat terlayani. Pendekatan ISCLM dipilih dibandingkan metode konvensional seperti *Location Set Covering Problem* (LSCP) murni, *Maximum Covering Location Problem* (MCLP) murni, dan *P-Center* karena kemampuannya dalam meminimalkan jumlah fasilitas yang diperlukan sambil tetap memastikan cakupan penuh dari seluruh permintaan. ISCLM unggul dari LSCP murni yang memiliki keterbatasan dalam pembagian wilayah terhadap titik permintaan dalam segi kedekatan antara titik pembangunan fasilitas dengan titik permintaan serta penentuan radius minimum titik pembangunan fasilitas, lebih baik dari MCLP murni yang tidak menjamin cakupan 100% dan dapat meninggalkan area tidak terlayani, serta lebih bagus dibanding *P-Center* yang berfokus pada minimisasi jarak maksimum antara titik permintaan dan fasilitas terdekat tanpa mempertimbangkan aspek cakupan menyeluruh. ISCLM ini secara inheren sangat efisien dalam alokasi sumber daya dengan mempertimbangkan jarak. Selanjutnya, *Voronoi Graph* digunakan sebagai alat analisis spasial yang esensial untuk mempartisi area layanan secara efisien. Dengan membagi wilayah menjadi sel-sel Voronoi, setiap titik permintaan dapat secara unik dikaitkan dengan stasiun pengisian terdekat, sehingga memastikan bahwa cakupan layanan didasarkan pada kedekatan geografis yang paling optimal. Pendekatan ini mengatasi inefisiensi dari metode konvensional dan memberikan visualisasi yang jelas mengenai area yang terlayani dan yang tidak terlayani.

Selain itu, penelitian ini mengadopsi konsep *Minimum Covering Circle* (MCC). MCC berfungsi untuk menentukan radius cakupan optimal dari setiap stasiun

pengisian yang diusulkan. Dengan mengidentifikasi lingkaran terkecil yang dapat mencakup sejumlah titik permintaan tertentu, MCC membantu dalam menempatkan stasiun pengisian pada posisi yang paling strategis untuk memaksimalkan cakupan layanan dalam jarak tempuh yang efisien, yaitu 3,3 km. Implementasi dari seluruh model ini dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python, di mana algoritma ISCLM secara iteratif mencari lokasi terbaik untuk menempatkan stasiun pengisian baru, dimulai dengan inisialisasi titik acak dan secara progresif mengoptimalkan posisi tersebut hingga seluruh titik permintaan tercakup. Proses ini juga mempertimbangkan data-data penting, seperti lokasi kantor, universitas, rumah sakit, pusat perbelanjaan, tempat olahraga, hotel, pelabuhan, terminal, dan lain-lain.

Selain analisis spasial, penelitian ini juga dilengkapi dengan analisis finansial untuk mengevaluasi kelayakan pembangunan SPKLU yang diusulkan. Analisis finansial mencakup perhitungan *Capital Expenditure* (CAPEX) dan *Operational Expenditure* (OPEX), serta estimasi pendapatan berdasarkan beberapa skenario tingkat utilitas stasiun pengisian. Evaluasi dilakukan melalui analisis arus kas untuk memberikan gambaran mengenai keberlanjutan ekonomi dari pembangunan SPKLU dalam jangka panjang. Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa rekomendasi lokasi yang dihasilkan tidak hanya optimal secara spasial, tetapi juga realistis dan layak secara finansial untuk diimplementasikan.

Hasil pemodelan ISCLM menunjukkan bahwa dengan penambahan dua unit SPKLU baru pada koordinat (5.542240, 95.307468) dan (5.579886, 95.354833), seluruh 53 titik permintaan kendaraan listrik di Kota Banda Aceh dapat terlayani dengan cakupan spasial sebesar 100%. Visualisasi hasil menunjukkan bahwa lokasi SPKLU baru ditempatkan secara strategis untuk menutup kesenjangan cakupan yang sebelumnya tidak terlayani. Dari sisi finansial, hasil analisis menunjukkan bahwa pembangunan SPKLU memiliki potensi kelayakan yang baik, khususnya pada skenario tingkat utilitas menengah hingga tinggi, sehingga mendukung keberlanjutan operasional fasilitas. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa perencanaan infrastruktur kendaraan listrik yang optimal harus mengintegrasikan analisis spasial dan finansial secara bertahap. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar pengambilan keputusan bagi pemerintah daerah dan pemangku kepentingan dalam pengembangan SPKLU yang efektif, efisien, dan berkelanjutan di Kota Banda Aceh, sekaligus mendukung percepatan transisi energi bersih di Indonesia.

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