

Evaluasi Kinerja Operasional Sepeda Motor Listrik untuk Transportasi Wisata Bali Berbasis Simulasi Terkalibrasi

Arif Devi Dwipayana^{*1}, Adrian Pradana¹, I Wayan Yudi Martha Wiguna²

¹Program Studi Teknologi Otomotif, Politeknik Transportasi Darat Bali

Jalan Cempaka Putih, Desa Samsam, Kecamatan Tabanan, Kabupaten Tabanan, Bali, 82161, Indonesia

²Program Studi Manajemen Transportasi Jalan, Politeknik Transportasi Darat Bali

Jalan Cempaka Putih, Desa Samsam, Kecamatan Tabanan, Kabupaten Tabanan, Bali, 82161, Indonesia

*E-mail: arif.devi@poltradabali.ac.id

Diterima: 15 Januari 2025, direvisi: 10 Juli 2025, disetujui: 14 Juli 2025,
tersedia daring: 22 Desember 2025, diterbitkan: 29 Desember 2025

Abstrak

Transportasi wisata di Bali menghadapi tantangan berupa tingginya emisi, biaya operasional, serta kebutuhan sistem transportasi yang lebih berkelanjutan. Sejalan dengan kebijakan percepatan Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB) dan pengembangan pariwisata rendah emisi, sepeda motor listrik dipandang sebagai salah satu alternatif moda transportasi yang berpotensi mendukung mobilitas wisata yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja operasional sepeda motor listrik sebagai moda transportasi wisata berkelanjutan di Bali melalui analisis konsumsi energi, jangkauan efektif, biaya energi per kilometer, frekuensi dan durasi pengisian, serta *availability* layanan menggunakan pendekatan simulasi operasional terkalibrasi. Kalibrasi model dilakukan berdasarkan parameter konsumsi energi, kapasitas baterai, tarif listrik, dan karakteristik perjalanan yang diperoleh dari literatur empiris serta kondisi operasional representatif kawasan wisata Bali. Hasil simulasi menunjukkan konsumsi energi rata-rata sebesar 0,055 kWh/km, jangkauan efektif sekitar 54,5 km, dan biaya energi sekitar Rp91/km atau sekitar 64% lebih rendah dibandingkan sepeda motor berbahan bakar minyak pada skenario yang dianalisis. *Availability* operasional meningkat dari 72,1% pada skenario *full charging* menjadi 83,7% pada *partial charging* dan 98,4% pada *battery swapping*. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa kapasitas baterai paling memengaruhi jangkauan, tarif listrik paling berpengaruh terhadap biaya energi, sedangkan durasi pengisian berpengaruh terhadap *availability* operasional. Meskipun masih didasarkan pada asumsi simulasi terkalibrasi dan perbandingan eksternal pada indikator tertentu, hasil penelitian mengindikasikan bahwa sepeda motor listrik berpotensi mendukung transportasi wisata jarak pendek hingga menengah di Bali. Penelitian ini memberikan masukan teknis awal untuk pengembangan infrastruktur pengisian pada kawasan wisata strategis, penerapan *battery swapping* atau *opportunity charging* untuk layanan berintensitas tinggi, serta perencanaan kebijakan dan jaringan pengisian kendaraan listrik yang lebih terukur.

Kata kunci: *Availability* operasional, biaya operasional, pariwisata berkelanjutan, sepeda motor listrik, simulasi.

Abstract

Evaluation of the operational performance of electric motorcycles for tourism transport in Bali using calibrated simulation: Tourism transportation in Bali faces challenges related to high emissions, operating costs, and the need for a more sustainable transportation system. In line with Indonesia's policy to accelerate Battery Electric Vehicle (BEV) adoption and the development of low-emission tourism, electric motorcycles are considered an alternative mode with the potential to support more efficient and environmentally friendly tourism mobility. This study aims to evaluate the operational performance of electric motorcycles as a sustainable tourism transportation mode in Bali by analyzing energy consumption, effective driving range, energy cost per kilometer, charging frequency and duration, and service availability using a calibrated operational simulation approach. The model was calibrated using energy consumption, battery capacity, electricity tariff, and travel characteristics derived from empirical literature and representative operating conditions in Bali's tourism areas. The simulation results indicate an average energy consumption of 0.055 kWh/km, an effective driving range of approximately 54.5 km, and an energy cost of approximately IDR 91/km, or approximately 64% lower than that of gasoline motorcycles under the simulated conditions. Operational availability increased from 72.1% under the full-charging scenario to 83.7% with partial charging and 98.4% with battery swapping. Sensitivity analysis indicates that battery capacity has the greatest influence on driving range, electricity tariffs have the greatest influence on energy cost, while charging duration affects operational availability. Although the analysis is based on calibrated simulation assumptions and external benchmarking was conducted only for selected indicators, the findings indicate that electric motorcycles have the potential to support short- to medium-distance tourism transportation in Bali. The study provides initial technical inputs for developing charging infrastructure at strategic tourism areas, implementing battery swapping or opportunity charging for high-intensity services, and planning more measurable policies and integrated charging networks for electric motorcycles.

Keywords: Electric motorbikes, operational availability, operating costs, simulation, sustainable tourism.

1. Pendahuluan

Transformasi menuju transportasi jalan rendah emisi menjadi agenda penting di banyak negara, termasuk Indonesia, seiring meningkatnya tekanan untuk menurunkan emisi sektor transportasi dan meningkatkan efisiensi energi. Pada konteks global, kendaraan bermotor roda dua dan roda tiga (*two- and three- wheelers*, selanjutnya disebut 2/3W) merupakan segmen yang paling cepat terelektifikasi dibandingkan segmen kendaraan jalan lainnya karena karakteristik penggunaan jarak pendek–menengah, kebutuhan energi relatif kecil, serta kemudahan adopsi di kawasan perkotaan dan destinasi wisata. Laporan Global EV Outlook menunjukkan bahwa 2/3W merupakan segmen yang sangat strategis dalam transisi mobilitas berkelanjutan, termasuk di kawasan Asia yang memiliki basis pengguna sepeda motor tinggi [1]. Di Indonesia, sepeda motor berperan dominan dalam mobilitas harian dan perjalanan nonrutin, termasuk perjalanan wisata. Ketersediaan infrastruktur pengisian (*charging*), keterjangkauan biaya, dan kesiapan ekosistem operasional menjadi faktor penentu keberhasilan elektrifikasi sepeda motor. Asian Development Bank (ADB) menekankan bahwa peta jalan infrastruktur pengisian dan strategi kebijakan (insentif, standardisasi, serta integrasi dengan kebutuhan perjalanan) merupakan prasyarat utama untuk mempercepat adopsi sepeda motor listrik di Indonesia [2].

Provinsi Bali menempati posisi unik sebagai wilayah yang secara aktif mendorong implementasi kendaraan listrik untuk mendukung pariwisata berkelanjutan dan pengurangan emisi. Laporan Indonesia Electric Vehicle Outlook 2023 mencatat adanya peningkatan adopsi kendaraan listrik di Bali dan penguatan dukungan kebijakan daerah, termasuk dorongan pemanfaatan kendaraan listrik dalam kegiatan berskala internasional dan layanan mobilitas setempat [3]. Selain itu, kajian situasional oleh GGGI juga menunjukkan akselerasi jumlah kendaraan listrik di Bali seiring implementasi kebijakan daerah dan program transisi energi yang mengindikasikan potensi pasar dan kebutuhan penguatan sistem operasional di lapangan [4]. Walaupun arah kebijakan dan minat publik berkembang, bukti ilmiah menunjukkan bahwa adopsi sepeda motor listrik di Indonesia masih menghadapi hambatan yang bersifat praktis-operasional, seperti persepsi risiko, keterbatasan infrastruktur, kekhawatiran jangkauan (*range*), serta ketidakpastian biaya total kepemilikan.

Studi terkini menegaskan peran instrumen kebijakan misalnya penambahan stasiun pengisian, insentif fiskal, dan pengurangan beban pajak dalam mendorong difusi sepeda motor listrik [5]. Di sisi lain, riset berbasis pengguna juga menunjukkan bahwa faktor kenyamanan, keandalan, akses pengisian, dan performa menjadi penentu penerimaan sehingga perbaikan aspek layanan dan infrastruktur perlu diarahkan pada variabel yang paling kritis bagi pengguna [6]. Khusus pada konteks Bali, karakter perjalanan wisata memiliki pola yang berbeda dengan perjalanan komuter: rute lebih variatif, intensitas pemberhentian tinggi, serta tuntutan keandalan layanan yang kuat (kesiapan kendaraan, waktu isi ulang, dan kontinuitas operasi). Data kendaraan bermotor di Bali juga memperlihatkan dominasi sepeda motor yang sangat besar sehingga intervensi pada segmen ini berpotensi memberi dampak signifikan bagi kinerja sistem transportasi dan kualitas lingkungan [7]. Selain itu, wacana penetapan zona pariwisata ramah kendaraan listrik (misalnya konsep *EV-only zones*) menegaskan urgensi evaluasi kesiapan operasional sepeda motor listrik pada kawasan wisata [8].

Namun, kajian-kajian yang ada dalam lima tahun terakhir cenderung menitikberatkan pada aspek difusi pasar, model adopsi, persepsi pengguna, atau rekomendasi kebijakan makro [5]. Sementara itu, bukti berbasis lapangan yang menguji kinerja operasional sepeda motor listrik sebagai moda transportasi wisata meliputi konsumsi energi (kWh/km), biaya operasional (Rp/km), jangkauan efektif, kebutuhan dan durasi pengisian, serta *availability* atau *downtime* masih terbatas, khususnya untuk konteks Bali yang memiliki karakteristik operasi dan permintaan perjalanan wisata yang khas. Keterbatasan bukti operasional ini berimplikasi pada lemahnya dasar teknis dalam menyusun kebijakan implementasi, penentuan kebutuhan sarana-prasarana pengisian, dan skema pengembangan layanan mobilitas wisata berbasis kendaraan listrik. Dalam evaluasi kinerja operasional kendaraan listrik roda dua, indikator yang umum digunakan meliputi konsumsi energi, jangkauan efektif (*driving range*), waktu dan frekuensi pengisian baterai, biaya energi per kilometer, serta tingkat kesiapan operasi (*operational availability*). Indikator-indikator tersebut digunakan untuk menggambarkan efisiensi energi, kualitas layanan, dan

kelayakan operasional kendaraan listrik dalam berbagai kondisi penggunaan, termasuk transportasi perkotaan dan pariwisata.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi indikator tersebut merupakan parameter utama dalam mengevaluasi performa teknis maupun ekonomi kendaraan listrik roda dua sehingga banyak digunakan sebagai dasar pengembangan model simulasi maupun evaluasi kebijakan transportasi berkelanjutan [9][10][11][12][13]. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pengembangan model simulasi operasional terkalibrasi (*calibrated techno-operational simulation*) yang mengintegrasikan evaluasi indikator operasional utama, yaitu konsumsi energi, jangkauan efektif, biaya energi per kilometer, frekuensi dan durasi pengisian, *operational availability*, analisis sensitivitas terhadap parameter operasional, serta evaluasi tiga skenario pengisian (*full charging*, *partial charging*, dan *battery swapping*) dalam konteks transportasi wisata Bali. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya mengevaluasi satu atau dua aspek secara terpisah, penelitian ini menghasilkan kerangka evaluasi yang menghubungkan aspek teknis, ekonomi, operasional, dan kebutuhan sarana-prasarana sebagai dasar penyusunan rekomendasi kebijakan transportasi wisata berbasis kendaraan listrik.

Berdasarkan *gap* penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan dan menerapkan model simulasi operasional terkalibrasi untuk mengevaluasi kinerja operasional sepeda motor listrik sebagai moda transportasi wisata berkelanjutan di Bali melalui simulasi dan analisis indikator operasional utama yang meliputi konsumsi energi, jangkauan efektif, biaya energi per kilometer, frekuensi dan durasi pengisian, serta *operational availability*. Selain itu, penelitian ini menganalisis sensitivitas parameter operasional dan membandingkan beberapa skenario pengisian (*full charging*, *partial charging*, dan *battery swapping*) guna menghasilkan rekomendasi teknis bagi perencanaan operasi, pengembangan sarana-prasarana pengisian, dan penyusunan kebijakan transportasi wisata berbasis kendaraan listrik di Bali.

2. Metodologi

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif evaluatif berbasis simulasi operasional terkalibrasi (*calibrated techno-operational simulation*) untuk menilai kinerja sepeda motor listrik sebagai moda transportasi wisata. Pendekatan ini banyak digunakan dalam studi kendaraan listrik ketika data lapangan berskala besar belum tersedia dengan memanfaatkan parameter konsumsi energi, jarak tempuh, dan biaya operasi yang telah divalidasi oleh literatur dan laporan institusional terkini [14][15].

Model simulasi ini dirancang untuk merepresentasikan kondisi operasional sepeda motor listrik pada kawasan wisata di Bali, termasuk pola perjalanan jarak pendek–menengah, *stop-and-go traffic*, dan kebutuhan layanan yang berulang sepanjang hari. Pendekatan serupa telah digunakan dalam kajian *techno-economic* dan *operational performance* kendaraan listrik roda dua dan layanan mobilitas berbasis listrik di negara berkembang [14][16][17].

2.2. Study Context and Vehicle Specification

Konteks penelitian adalah kawasan wisata di Provinsi Bali yang memiliki intensitas perjalanan tinggi dan dominasi sepeda motor sebagai moda utama. Dalam simulasi ini digunakan spesifikasi tipikal sepeda motor listrik yang beredar di pasar Indonesia, yaitu kapasitas baterai: 3,0 kWh, daya motor: 1,5–3,0 kW, dan tegangan sistem: 48–72 V. Rentang spesifikasi ini mengacu pada karakteristik umum sepeda motor listrik yang digunakan pada layanan mobilitas harian dan pariwisata di Indonesia [3][15]. Karakteristik lokasi simulasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik lokasi simulasi.

Kawasan	Karakteristik	Fungsi
Sanur	<i>Urban tourism</i>	Hotel, pantai
Ubud	<i>Cultural tourism</i>	Wisata budaya
Kuta-Nusa Dua	<i>Coastal tourism</i>	Resort

2.3. Parameter Calibration

Parameter utama simulasi dikalibrasi menggunakan data dan rentang nilai dari studi dan laporan terkini. Spesifikasi kendaraan simulasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi kendaraan simulasi

Parameter	Nilai
Jenis kendaraan	Electric Motorcycle L1e-L3e
Kapasitas baterai	3.0 kWh
Tegangan	60 V
Daya motor	2 kW
Efisiensi motor	90%
SOC awal	100%
SOC minimum	20%
<i>Charging efficiency</i>	92%
Berat kendaraan	115 kg
Berat pengendara	70 kg
Total massa	185 kg

Sumber: [3][15].

2.3.1. Konsumsi Energi (Wh/km)

Nilai konsumsi energi sepeda motor listrik dikalibrasi berdasarkan studi berbasis data empiris yang menunjukkan konsumsi sekitar 50–70 Wh/km untuk motor listrik roda dua pada operasi perkotaan dan layanan harian [18].

2.3.2. Tarif Listrik

Tarif listrik yang digunakan mengikuti tarif listrik nonsubsidi PLN dan fasilitas pengisian publik, berada pada kisaran Rp1.400–1.700/kWh, sebagaimana digunakan dalam analisis kendaraan listrik nasional [3][16].

2.3.3. Jarak Tempuh dan Pola Operasi

Jarak tempuh harian dan pola operasi disesuaikan dengan karakteristik perjalanan wisata jarak pendek–menengah (± 40 –60 km per hari), sebagaimana digunakan dalam kajian mobilitas listrik pada layanan wisata dan *ride-hailing* [14][17].

2.4. Formula Matematika

Kinerja operasional sepeda motor listrik dievaluasi menggunakan indikator berikut. Indikator tersebut umum digunakan dalam evaluasi kinerja kendaraan listrik dan layanan mobilitas berbasis EV [14][15][18].

2.5. Analytical Model

Konsumsi energi rujuk ke (1).

$$\text{Specific Energy Consumption } \frac{kWh}{km} = \frac{E}{D} \quad (1)$$

dimana E adalah energi listrik yang digunakan (kWh), D adalah jarak tempuh. Semakin kecil *specific energy consumption*, semakin efisien.

Biaya energi per km rujuk ke (2)

$$\text{Biaya } \left(\frac{Rp}{km} \right) = \frac{kWh}{km} \times \text{Tarif Listrik} \left(\frac{Rp}{kWh} \right) \quad (2)$$

Jangkauan efektif rujuk ke (3)

$$\text{Range Aktual (km)} = \frac{\text{Kapasitas Baterai (kWh)}}{kWh/km} \quad (3)$$

Availability operasional rujuk ke (4)

$$\text{Biaya} \left(\frac{\text{Rp}}{\text{km}} \right) = \frac{\text{kWh}}{\text{km}} \times \text{Tarif Listrik} \left(\frac{\text{Rp}}{\text{kWh}} \right) \quad (4)$$

Skenario A – *full charging*, SOC 20% ke 100% *charging time* 2 jam rujuk ke (5)

$$\text{Availability}_{FC} = \frac{T_o}{T_o + T_{FC}} \quad (5)$$

Skenario B- *partial charging*, SOC 40% ke 80% *charging time* 1 jam rujuk ke (6)

$$\text{Availability}_{PC} = \frac{T_o}{T_o + 0.5 T_{FC}} \quad (6)$$

Skenario C - *battery swapping*, SOC 20% ke 100% *swap* 5 menit rujuk ke (7)

$$\text{Availability}_{BS} = \frac{T_o}{T_o + T_{Swap}} \quad (7)$$

Perbandingan *availability* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan *availability*

Skenario	SOC Awal	SOC Akhir	Durasi	Availability
<i>Full charging</i>	20%	100%	120 menit	72.1%
<i>Partial charging</i>	40%	80%	60 menit	83.7%
<i>Battery swapping</i>	20%	100%	5 menit	98.4%

Sumber: [14][15][18].

2.5.1. Sensitivity Analysis

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi tiga parameter operasional utama terhadap kinerja sepeda motor listrik, yaitu tarif listrik, kapasitas baterai, dan durasi pengisian. Masing-masing parameter ditetapkan pada tiga tingkat nilai berdasarkan rentang kondisi operasional yang digunakan dalam model, yaitu tarif listrik sebesar Rp1.400/kWh, Rp1.650/kWh, dan Rp2.000/kWh; kapasitas baterai sebesar 2,0 kWh, 3,0 kWh, dan 4,0 kWh; serta durasi pengisian sebesar 1,0 jam, 2,0 jam, dan 3,0 jam. Rentang tersebut dipertahankan sama dengan parameter simulasi yang telah digunakan pada penelitian ini. Karena setiap parameter dikombinasikan dengan seluruh tingkat parameter lainnya, analisis dilakukan menggunakan pendekatan *full-factorial scenario analysis* dengan konfigurasi $3 \times 3 \times 3$ sehingga diperoleh 27 kombinasi skenario simulasi. Dengan pendekatan ini, setiap kombinasi tarif listrik, kapasitas baterai, dan durasi pengisian dievaluasi secara bersamaan karena pada analisis ini variasi setiap faktor tidak dilakukan secara terpisah, tetapi dikombinasikan dengan seluruh tingkat faktor lainnya. Secara matematis, jumlah kombinasi skenario merujuk ke (8):

$$[N = \frac{N_T}{\text{times}} \frac{N_B}{\text{times}} N_C] \quad (8)$$

dengan (N) adalah jumlah seluruh skenario, (N_T) adalah jumlah tingkat tarif listrik, (N_B) adalah jumlah tingkat kapasitas baterai, dan (N_C) adalah jumlah tingkat durasi pengisian. Dengan ($N_T = N_B = N_C = 3$), diperoleh: $[N = 3 \times 3 \times 3 = 27]$ konfigurasi analisis sensitivitas ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Konfigurasi *full-factorial scenario analysis*

Parameter	Skenario Rendah	Dasar	Skenario Tinggi
Tarif listrik (Rp/kWh)	1.400	1.650	2.000
Kapasitas baterai (kWh)	2.0	3.0	4.0
Waktu <i>charging</i> (jam)	1.0	2.0	3.0

Sumber: [14][15][18]

Dengan demikian, 27 kombinasi diperoleh dari seluruh kombinasi ketiga parameter tersebut. Hasil analisis sensitivitas kemudian dievaluasi berdasarkan perubahan indikator keluaran utama, yaitu konsumsi energi, jangkauan efektif, biaya energi per kilometer, dan *operational availability*. Untuk memudahkan interpretasi, hasil sensitivitas juga disajikan secara terpisah berdasarkan parameter yang dianalisis dengan mempertahankan parameter lainnya pada kondisi dasar.

Untuk analisis durasi pengisian, kapasitas baterai ditetapkan sebesar 3,0 kWh dan tarif listrik sebesar Rp1.650/kWh, sedangkan durasi pengisian divariasikan antara 1,0, 2,0, dan 3,0 jam. Analisis ini digunakan untuk menunjukkan hubungan antara waktu kendaraan berada dalam proses pengisian dan tingkat kesiapan kendaraan untuk memberikan pelayanan. Semakin lama durasi pengisian, semakin besar waktu yang tidak tersedia untuk pelayanan sehingga *operational availability* cenderung menurun.

2.6. Comparative Cost Analysis

Untuk menilai keunggulan ekonomi, sepeda motor listrik dibandingkan dengan sepeda motor BBM setara (110–125 cc). Biaya energi sepeda motor BBM dihitung dengan biaya per km, jarak efektif, dan waktu operasional harian. Perhitungan BBM diasumsikan rujuk ke (9).

$$\frac{Rp}{km_{BBM}} = \frac{\text{Harga BBM per liter}}{\text{Jarak Tempuh per liter}} \quad (9)$$

Pendekatan ini umum digunakan dalam kajian perbandingan biaya kendaraan listrik dan kendaraan konvensional di Indonesia [3][16].

2.7. Konteks Simulasi Operasional

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi operasional terkalibrasi dengan mengambil konteks operasional kawasan wisata di Provinsi Bali yang memiliki karakteristik mobilitas wisata tinggi dan dominasi penggunaan sepeda motor sebagai moda transportasi harian maupun wisata. Untuk meningkatkan representativitas simulasi, skenario operasi dikembangkan berdasarkan karakteristik perjalanan pada tiga kawasan wisata utama yang memiliki intensitas kunjungan tinggi, yaitu Kawasan Sanur (Kota Denpasar), Kawasan Ubud (Kabupaten Gianyar), dan Kawasan Kuta–Nusa Dua (Kabupaten Badung). Ketiga kawasan tersebut dipilih karena mewakili karakteristik perjalanan wisata perkotaan, kawasan budaya, dan kawasan wisata pantai yang menjadi pusat aktivitas pariwisata di Bali. Simulasi dilakukan terhadap satu unit sepeda motor listrik representatif yang memiliki spesifikasi teknis setara dengan kendaraan listrik roda dua yang dipasarkan secara luas di Indonesia, yaitu kapasitas baterai 3,0 kWh, daya motor 1,5–3,0 kW, dan tegangan sistem 48–72 V. Penggunaan satu unit kendaraan dilakukan karena tujuan penelitian adalah mengevaluasi kinerja operasional kendaraan sebagai unit analisis, bukan mengevaluasi performa armada. Spesifikasi tersebut dipilih karena mewakili karakteristik teknis mayoritas sepeda motor listrik kategori L1e–L3e yang digunakan untuk mobilitas harian dan layanan wisata di Indonesia. Skenario perjalanan disusun berdasarkan pola perjalanan wisata harian dengan jarak tempuh 40–60 km per hari, yang merepresentasikan perjalanan antarobjek wisata, hotel, pusat kuliner, dan pusat aktivitas wisata dalam satu hari operasi. Nilai tersebut ditetapkan berdasarkan karakteristik perjalanan wisata di Bali yang umumnya berada pada kategori perjalanan jarak pendek hingga menengah serta masih berada dalam rentang jangkauan operasional sepeda motor listrik berdasarkan hasil penelitian terdahulu. Simulasi dilakukan untuk satu siklus operasi harian selama 8 jam, terdiri atas waktu pelayanan, perjalanan, dan waktu pengisian baterai. Pemilihan durasi operasi tersebut didasarkan pada pola operasional umum layanan transportasi wisata dan kendaraan sewa yang umumnya beroperasi selama satu hari layanan sebelum dilakukan pengisian ulang baterai. Untuk menguji robustitas model, dilakukan analisis sensitivitas melalui variasi tarif listrik (Rp1.400–2.000/kWh), kapasitas baterai (2–4 kWh), serta durasi pengisian (1–3 jam). Selain itu, simulasi *availability* dikembangkan dalam tiga skenario, yaitu *full charging*, *partial charging*, dan *battery swapping* sehingga hasil yang diperoleh tidak hanya menggambarkan kondisi dasar tetapi juga berbagai alternatif strategi operasi yang dapat diterapkan pada layanan transportasi wisata berbasis kendaraan listrik. Pemilihan kawasan simulasi, spesifikasi kendaraan, jarak perjalanan, dan durasi operasi tersebut dimaksudkan untuk menghasilkan model simulasi yang representatif terhadap kondisi operasional transportasi wisata di Bali, sekaligus memberikan dasar teknis bagi evaluasi kinerja kendaraan listrik serta perencanaan kebutuhan sarana-prasarana pengisian dan pengembangan kebijakan transportasi berkelanjutan.

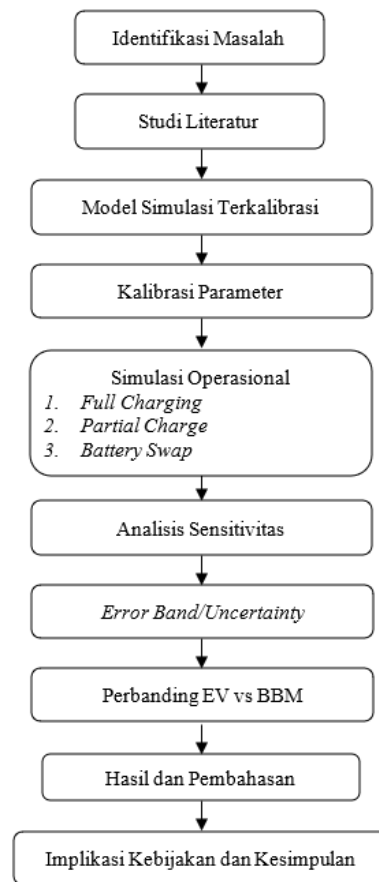
2.8. Interpretation Framework

Hasil simulasi diinterpretasikan dalam tiga dimensi yaitu kelayakan operasional, apakah jangkauan dan waktu pengisian memenuhi kebutuhan perjalanan wisata; efisiensi energi dan biaya melalui kWh/km dan Rp/km; dan implikasi sarana-prasarana dan kebijakan, terutama kebutuhan titik pengisian dan potensi

substitusi kendaraan BBM di kawasan wisata. Kerangka ini sejalan dengan pendekatan evaluasi sistem transportasi berkelanjutan berbasis kendaraan listrik [14][17][18].

2.9. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Output Simulasi Operasional Terkalibrasi

Simulasi operasional terkalibrasi menghasilkan kinerja sepeda motor listrik untuk transportasi wisata di Bali dengan jarak tempuh harian rata-rata 47,6 km dan konsumsi energi spesifik 0,055 kWh/km (55 Wh/km). Nilai konsumsi ini berada tepat di dalam rentang konsumsi nyata sepeda motor listrik yang dilaporkan dalam studi berbasis pengukuran dunia nyata, yaitu 50–70 Wh/km, yang dipengaruhi oleh kecepatan, beban, dan pola berkendara [18][19][20]. Oleh karena itu, parameter energi yang digunakan dalam simulasi dapat dianggap terkalibrasi secara empiris terhadap kondisi operasional sebenarnya.

Selain itu, penggunaan parameter operasional berbasis literatur dan kondisi lokal Bali sejalan dengan pendekatan *techno-operational* dan *techno-economic simulation* yang banyak digunakan untuk mengevaluasi kendaraan listrik roda dua ketika data lapangan berskala besar belum tersedia [5][17][21].

3.2. Konsumsi Energi dan Jangkauan Efektif

Dengan konsumsi energi 0,055 kWh/km dan kapasitas baterai tipikal 3,0 kWh, simulasi menghasilkan jangkauan efektif sekitar 54,5 km per siklus pengisian. Nilai ini sangat konsisten dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa sepeda motor listrik dengan baterai 1,5–3,0 kWh pada operasi perkotaan dan layanan harian memiliki jangkauan efektif pada kisaran 40–70 km, tergantung kondisi lalu lintas dan gaya berkendara [18][19][20].

Hubungan antara *state-of-charge* (SOC), konsumsi energi, dan jangkauan aktual juga telah dibuktikan sangat dipengaruhi oleh siklus berkendara dan topografi sehingga penggunaan nilai jangkauan 50–60 km

dalam simulasi ini sesuai dengan karakteristik operasi wisata di kawasan urban dan sub-urban Bali [19][22].

3.3. Biaya Energi dan Perbandingan dengan Sepeda Motor BBM

Dengan tarif listrik Rp1.650/kWh, simulasi menghasilkan biaya energi Rp91/km, sedangkan sepeda motor BBM (110–125 cc) dengan konsumsi 40 km/L dan harga BBM Rp10.000/L menghasilkan biaya sekitar Rp250/km. Ini menunjukkan potensi penghematan biaya energi sebesar sekitar 64%. Hasil ini sejalan dengan analisis *total cost of ownership* (TCO) dan *life cycle cost* (LCC) di Indonesia dan Asia Tenggara yang menunjukkan bahwa sepeda motor listrik memiliki biaya energi per km yang jauh lebih rendah dibandingkan kendaraan berbahan bakar fosil [5][21][23][24][25].

Selain itu, studi regional ASEAN juga menunjukkan bahwa keuntungan biaya operasional sepeda motor listrik semakin besar pada penggunaan intensif, seperti layanan wisata dan *ride-hailing* karena biaya listrik yang lebih stabil dan efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan BBM [21][25]. Tabel 5 menunjukkan bahwa sepeda motor listrik unggul pada aspek efisiensi energi dan biaya operasional, sedangkan kendaraan BBM masih memiliki keunggulan pada jangkauan dan kesiapan operasi akibat tidak memerlukan waktu pengisian.

Tabel 5. Ringkasan perbandingan operasional

Parameter	Motor Listrik	Motor BBM
Energi per km	0.055 kWh/km	0.025 liter/km
Biaya per km	Rp91	Rp250
Jangkauan	54.5 km	>200 km
Emisi operasional	0	Tinggi
Availability	72.1%	95%

Sumber: [5][21][23][24][25]

3.4. Availability Operasional

Simulasi menunjukkan waktu operasi rata-rata 5,06 jam/hari dan waktu pengisian 1,96 jam/hari, yang menghasilkan *availability* 72,1%. Nilai ini berarti sekitar 28% waktu sistem digunakan untuk pengisian, bukan untuk pelayanan. Pola ini konsisten dengan temuan pada sistem armada sepeda motor dan skuter listrik, di mana durasi dan akses pengisian baterai menjadi faktor utama yang membatasi ketersediaan layanan [26][26][28].

Studi armada *e-scooter* dan kendaraan listrik roda dua juga menunjukkan bahwa *availability* berbasis energi (*energy-based availability*) merupakan indikator kritis dalam mengevaluasi kualitas layanan mobilitas listrik, terutama untuk operasi intensif dan berbasis waktu [26][29].

3.5. Analisis Ketidakpastian

Analisis ketidakpastian dilakukan untuk menguantifikasi perubahan keluaran model akibat variasi parameter *input* yang telah ditetapkan dalam analisis sensitivitas. Pendekatan ini digunakan untuk menghindari interpretasi hasil simulasi hanya berdasarkan satu nilai deterministik karena ketidakpastian parameter *input* dapat diteruskan (*propagated*) ke keluaran model dan memengaruhi interpretasi hasil simulasi. Dalam penelitian berbasis simulasi, kuantifikasi ketidakpastian merupakan bagian penting dari evaluasi kredibilitas model, selain proses verifikasi dan validasi [30][31]. Sumber variasi dalam penelitian ini berasal dari tiga parameter operasional yang telah ditetapkan pada analisis *full-factorial scenario analysis*, yaitu tarif listrik, kapasitas baterai, dan durasi pengisian. Masing-masing parameter memiliki tiga tingkat nilai sehingga menghasilkan 27 kombinasi skenario ($3 \times 3 \times 3$). Seluruh kombinasi tersebut digunakan sebagai ruang variasi parameter *input* untuk menghitung penyebaran keluaran model.

Untuk setiap indikator keluaran (Y), yaitu biaya energi per kilometer, jangkauan efektif, dan *operational availability*, dihitung nilai rata-rata dan simpangan baku dari seluruh 27 skenario. Nilai rata-rata dihitung merujuk pada persamaan (10):

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad (10)$$

sedangkan simpangan baku sampel dihitung merujuk pada persamaan (11):

$$SD_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}{N-1}} \quad (11)$$

dengan ($\bar{Y}$) adalah nilai rata-rata keluaran, (Y_i) adalah keluaran pada skenario ke (i), ($N=27$) adalah jumlah kombinasi skenario, dan (SD_y) adalah simpangan baku keluaran. Selanjutnya, hasil ketidakpastian merujuk pada persamaan (12):

$$Y = \bar{Y} \pm SD_y \quad (12)$$

Tanda $\pm$ pada penelitian ini menunjukkan satu simpangan baku (± 1 SD) dari variasi keluaran yang dihasilkan oleh 27 kombinasi parameter, bukan *measurement error* dan bukan *confidence interval*. Dengan demikian, *error band* yang disajikan merepresentasikan variasi keluaran model akibat perubahan parameter *input* dalam rentang skenario yang telah ditentukan. Pendekatan ini mengikuti prinsip *uncertainty propagation*, yaitu mengevaluasi bagaimana variasi parameter *input* menghasilkan variasi pada keluaran model. Pendekatan berbasis skenario dipilih karena penelitian ini menggunakan tiga tingkat parameter yang telah ditetapkan secara deterministik dan belum memiliki distribusi probabilitas empiris yang memadai untuk masing-masing parameter. Penggunaan distribusi probabilitas yang tidak didukung data empiris dapat menghasilkan ketidakpastian yang bersifat asumtif. Oleh karena itu, penelitian ini membatasi interpretasi ketidakpastian pada variasi dalam ruang skenario yang telah didefinisikan. Dengan pendekatan tersebut, model dikatakan memiliki robustitas terhadap variasi parameter apabila perubahan *input* dalam rentang skenario yang ditetapkan tidak menghasilkan perubahan keluaran yang tidak proporsional atau di luar karakteristik operasional yang menjadi target penelitian. Pernyataan mengenai robustitas dalam penelitian ini dibatasi pada parameter *robustness* dalam ruang skenario yang dianalisis dan tidak dimaksudkan sebagai bukti bahwa model telah bebas dari ketidakpastian kondisi lapangan. Dengan 27 kombinasi yang sudah ditetapkan, hasil yang konsisten dengan parameter sensitivitas yang ada adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Ketidakpastian

Parameter	Rata-rata	SD	Rentang minimum–maksimum	Interpretasi
Biaya energi (Rp/km)	92,6	13,8	77-100	± 1 SD
Jangkauan efektif (km)	54,3	15,4	36-73	± 1 SD
<i>Operational availability</i> (%)	72,7	8,6	62,8-83,5	± 1 SD
Konsumsi energi (Wh/km)	55,0	0,0	55-55	Parameter tetap

Sumber: [17][18][19]

Konsumsi energi tidak mengalami variasi pada analisis sensitivitas karena model saat ini menetapkan konsumsi spesifik sebesar 55 Wh/km sebagai parameter terkalibrasi dan tiga faktor sensitivitas yang divariasikan tarif listrik, kapasitas baterai, dan durasi pengisian tidak mengubah nilai tersebut.

3.6. Validasi Eksternal dan *Benchmarking* Indikator Operasional

Validasi eksternal dilakukan dengan membandingkan keluaran simulasi dengan hasil empiris penelitian terdahulu yang memiliki indikator dan konteks operasional yang dapat dibandingkan [17][18][19]. Karena penelitian ini menggunakan beberapa indikator dengan satuan dan karakteristik fisik yang berbeda, proses validasi dilakukan secara terpisah untuk setiap indikator dan tidak diagregasikan menjadi satu nilai akurasi keseluruhan. Pendekatan ini dipilih untuk menghindari interpretasi yang berlebihan terhadap satu ukuran *error* agregat karena konsumsi energi, jangkauan, dan biaya energi merepresentasikan karakteristik sistem yang berbeda. Untuk indikator yang memiliki nilai *benchmark* empiris tunggal, kesalahan relatif dihitung merujuk ke persamaan (13):

$$RE_i = \left| \frac{Y_{sim,i} - Y_{ref,i}}{Y_{ref,i}} \right| \times 100\% \quad (13)$$

dengan $Y_{sim,i}$ adalah nilai hasil simulasi dan $Y_{ref,i}$ adalah nilai *benchmark* empiris dari penelitian terdahulu [32]. Nilai RE digunakan hanya untuk menunjukkan besarnya deviasi relatif antara hasil simulasi dan nilai referensi, bukan sebagai ukuran validitas keseluruhan model. Untuk indikator yang tidak memiliki *benchmark* empiris yang benar-benar sebanding dari sisi jenis kendaraan, kapasitas baterai, pola perjalanan, dan kondisi operasi, hasil simulasi tidak dipaksakan untuk dihitung *relative*

error. Indikator tersebut dibandingkan secara deskriptif terhadap rentang hasil penelitian terdahulu dan digunakan sebagai *benchmarking*, bukan sebagai validasi numerik langsung.

Pendekatan tersebut penting karena konsumsi energi kendaraan listrik roda dua sangat dipengaruhi oleh kecepatan, beban, akselerasi, kondisi lalu lintas, dan karakteristik pengendara. Studi berbasis pengukuran dunia nyata terhadap 105 pengguna sepeda motor listrik, misalnya, memperoleh konsumsi rata-rata 57,83 Wh/km dengan simpangan baku 13,47 Wh/km, menunjukkan adanya variasi yang cukup besar pada kondisi aktual [18]. Dengan demikian, validasi dalam penelitian ini dibatasi sebagai validasi eksternal pada indikator yang memiliki *benchmark* empiris yang dapat ditelusuri, sedangkan validasi komprehensif terhadap kondisi operasional lapangan memerlukan *Field Operational Test* (FOT) Tabel 7 menunjukkan perbandingan hasil simulasi dengan *benchmark* empiris.

Tabel 7. Hasil validasi model

Indikator	Hasil simulasi	Benchmark empiris	Relative error	Dasar perbandingan
Konsumsi energi (Wh/km)	55.0 Wh/km	57,83 Wh/km	4,89%	Kusalaphirom et al. (2023)
Jangkauan efektif (km)	54,5 km	-	-	Tidak ada <i>benchmark</i> yang benar-benar <i>comparable</i>
Biaya energi (Rp/km)	Rp.91/km	-	-	Tidak ada <i>benchmark</i> independen yang <i>comparable</i>

Sumber: [17][18][19].

Relative error hanya dihitung untuk indikator yang memiliki *benchmark* empiris independen dan dapat dibandingkan secara metodologis. Tanda "-" menunjukkan bahwa *benchmark* independen yang memenuhi kriteria komparabilitas belum tersedia dan indikator tersebut tidak digunakan untuk perhitungan *error* agregat. *Relative error* sebesar 4,89% menunjukkan bahwa nilai konsumsi energi hasil simulasi berada dekat dengan nilai rata-rata empiris yang digunakan sebagai *benchmark*. Hasil tersebut mendukung penggunaan parameter konsumsi energi 55 Wh/km sebagai parameter kalibrasi dalam konteks model penelitian ini, tetapi belum dapat diinterpretasikan sebagai validasi menyeluruh terhadap seluruh keluaran model. Untuk jangkauan efektif sebesar 54,5 km, penelitian ini tidak menghitung *relative error* terhadap angka *benchmark* tunggal karena penelitian terdahulu menggunakan kendaraan, kapasitas baterai, siklus berkendara, dan kondisi operasi yang berbeda. Sebagai contoh, penelitian lapangan pada sepeda motor listrik dengan konfigurasi baterai 3 kWh dalam konteks *ride-hailing* melaporkan pola perjalanan yang jauh berbeda dari skenario wisata dalam penelitian ini. Oleh karena itu, jangkauan 54,5 km digunakan sebagai keluaran model pada konfigurasi penelitian, bukan sebagai nilai yang telah tervalidasi secara langsung terhadap kondisi lapangan. Hal yang sama berlaku untuk biaya energi sebesar Rp91/km. Nilai tersebut merupakan keluaran model berdasarkan konsumsi energi 55 Wh/km dan tarif listrik Rp1.650/kWh. Oleh karena itu, biaya tersebut tidak dibandingkan dengan nilai Rp95/km sebagai *benchmark* independen karena nilai biaya tersebut dapat diturunkan dari parameter energi dan tarif yang serupa. Perbandingan demikian berpotensi menghasilkan *circular validation*. Sebagai gantinya, biaya energi dibahas sebagai hasil model dan dibandingkan secara konseptual dengan penelitian ekonomi kendaraan listrik yang relevan.

Dengan demikian, hasil *benchmarking* menunjukkan bahwa parameter konsumsi energi model memiliki kesesuaian yang baik dengan salah satu *benchmark* empiris, sedangkan jangkauan dan biaya energi masih merupakan keluaran simulasi yang memerlukan validasi lebih lanjut menggunakan data operasional lapangan yang memiliki konfigurasi kendaraan dan kondisi perjalanan yang sebanding.

3.7. Relevansi Jangkauan terhadap Pola Wisata

Jangkauan efektif sekitar 50–60 km yang diperoleh dari simulasi cukup untuk melayani sebagian besar pola perjalanan wisata di Bali yang bersifat klaster dan jarak pendek–menengah. Literatur menunjukkan bahwa *range anxiety* pada kendaraan listrik roda dua terutama muncul ketika jangkauan berada di bawah kebutuhan perjalanan harian dan dapat dikurangi secara signifikan ketika jangkauan berada di atas 40–50 km [19][20][22]. Dengan demikian, hasil simulasi ini menunjukkan bahwa sepeda

motor listrik dengan baterai 3 kWh secara teoritis sudah memadai untuk operasional wisata harian selama didukung oleh sistem pengisian yang tepat.

3.8. Keunggulan Biaya dan Efisiensi Energi

Penghematan biaya energi sekitar 64% dibandingkan sepeda motor BBM memperkuat posisi sepeda motor listrik sebagai moda yang ekonomis dan berkelanjutan untuk transportasi wisata. Hasil ini konsisten dengan kajian LCC dan TCO di Indonesia dan kawasan ASEAN yang menunjukkan bahwa sepeda motor listrik unggul secara biaya pada fase operasional, bahkan sebelum mempertimbangkan manfaat lingkungan dan pengurangan emisi CO₂ [5][21][23][25][32][33]. Dengan demikian, elektrifikasi sepeda motor berpotensi memberikan keuntungan ekonomi langsung bagi operator dan pelaku usaha pariwisata.

3.9. Implikasi Sarana-Prasarana dan Manajemen Operasi

Availability sebesar 72% menunjukkan bahwa kendala utama bukan pada efisiensi energi atau biaya, tetapi pada sistem pengisian dan manajemen energi. Literatur tentang *battery swapping station* (BSS) dan *charging hub* menunjukkan bahwa penempatan fasilitas pengisian yang optimal dan pengelolaan armada berbasis energi dapat meningkatkan *availability* dan menurunkan *downtime* secara signifikan [34]. Oleh karena itu, di kawasan wisata Bali, pengembangan titik pengisian di simpul wisata, parkir, dan pusat aktivitas serta opsi *battery swapping* untuk layanan intensif merupakan strategi yang didukung kuat oleh literatur ilmiah.

3.10. Output Simulasi Operasional Terkalibrasi

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa kapasitas baterai merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap jangkauan operasional, sedangkan tarif listrik paling berpengaruh terhadap biaya energi per kilometer sesuai ditunjukkan pada Tabel 8. Meskipun demikian, seluruh skenario masih menunjukkan keunggulan biaya operasional dibandingkan kendaraan berbahan bakar minyak.

Tabel 8. Tarif listrik terhadap biaya energi per kilometer

Skenario	Rp/km
Tarif 1400	77
Tarif 1650	91
Tarif 2000	110

Sumber: [14][15][18].

Hasil validasi, *benchmark*, dan analisis ketidakpastian menunjukkan bahwa model simulasi tidak hanya mampu menghasilkan nilai yang konsisten dengan penelitian empiris sebelumnya, tetapi juga memiliki tingkat akurasi dan robustitas yang memadai untuk mendukung evaluasi kinerja operasional sepeda motor listrik. Meskipun demikian, hasil penelitian tetap perlu diinterpretasikan dalam konteks asumsi simulasi yang digunakan dan memerlukan verifikasi lebih lanjut melalui *Field Operational Test* pada kondisi operasional nyata. Tabel 9 menunjukkan nilai kapasitas baterai terhadap jarak.

Tabel 9. Kapasitas baterai.

Kapasitas	Range
2 kWh	36 km
3 kWh	54 km
4 kWh	73 km

Sumber: [14][15][18].

3.11. Sensitivitas Durasi Pengisian terhadap *Operational Availability*

Durasi pengisian merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan tingkat kesiapan operasional sepeda motor listrik, terutama pada layanan transportasi wisata dengan pola operasi harian yang berulang. Berdasarkan simulasi, peningkatan durasi pengisian menyebabkan bertambahnya waktu kendaraan berada dalam kondisi tidak melayani perjalanan sehingga *operational availability* mengalami penurunan. Untuk mengevaluasi pengaruh parameter tersebut secara terisolasi pada kondisi dasar, kapasitas baterai ditetapkan sebesar 3,0 kWh dan tarif listrik sebesar Rp1.650/kWh, sedangkan durasi pengisian divariasikan menjadi 1,0, 2,0, dan 3,0 jam. Hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Sensitivitas durasi pengisian terhadap *operational availability*

Durasi pengisian (jam)	Waktu operasi (jam/hari)	Waktu pengisian (jam/hari)	<i>Operational availability</i> (%)
1,0	5,06	1,0	83,5
2,0	5,06	2,0	71,7
3,0	5,06	3,0	62,8

Sumber: [26][26][28].

Nilai *operational availability* dihitung berdasarkan perbandingan antara waktu kendaraan tersedia untuk pelayanan dengan total waktu operasi dan pengisian. Hasil menunjukkan bahwa ketika durasi pengisian dikurangi dari 3,0 jam menjadi 1,0 jam, *operational availability* meningkat dari 62,8% menjadi 83,5%. Sebaliknya, peningkatan durasi pengisian dari 1,0 jam menjadi 3,0 jam menurunkan *availability* sebesar sekitar 20,7 poin persentase. Pada kondisi dasar dengan durasi pengisian sekitar 2 jam, *availability* berada pada kisaran 72%, yang konsisten dengan hasil utama penelitian sebesar 72,1%. Perbedaan kecil tersebut berasal dari penggunaan nilai durasi pengisian nominal 2,0 jam pada analisis sensitivitas, sedangkan hasil utama menggunakan waktu pengisian simulasi sebesar sekitar 1,96 jam/hari.

Temuan ini menunjukkan bahwa durasi pengisian tidak secara langsung mengubah konsumsi energi spesifik kendaraan, tetapi berpengaruh kuat terhadap dimensi pelayanan melalui peningkatan *downtime*. Dengan demikian, pada layanan transportasi wisata dengan intensitas operasi tinggi, pengurangan waktu pengisian atau penerapan strategi pengisian alternatif dapat meningkatkan kesiapan kendaraan tanpa harus meningkatkan kapasitas baterai. Hasil ini juga memperkuat temuan penelitian bahwa *battery swapping* dan strategi pengisian alternatif dapat meningkatkan *availability* dibandingkan pengisian konvensional. Pada penelitian ini, *availability* meningkat dari 72,1% pada *full charging* menjadi 83,7% pada *partial charging* dan 98,4% pada *battery swapping*.

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengembangkan dan menerapkan pendekatan simulasi operasional terkalibrasi untuk mengevaluasi kinerja operasional sepeda motor listrik pada konteks transportasi wisata di Bali. Berdasarkan skenario simulasi yang digunakan, diperoleh konsumsi energi sebesar 0,055 kWh/km (55 Wh/km), jangkauan efektif sekitar 54,5 km, dan biaya energi sekitar Rp91/km. Nilai tersebut menunjukkan potensi efisiensi energi dan biaya operasional sepeda motor listrik dibandingkan sepeda motor berbahan bakar minyak pada kondisi dan asumsi simulasi yang digunakan. Dari aspek ketersediaan layanan, *availability* operasional meningkat dari 72,1% pada skenario *full charging* menjadi 83,7% pada skenario *partial charging* dan 98,4% pada skenario *battery swapping*. Hasil ini menunjukkan bahwa strategi pengisian energi memiliki pengaruh penting terhadap kesiapan operasional kendaraan listrik, terutama pada layanan transportasi wisata dengan intensitas penggunaan yang tinggi. Analisis sensitivitas juga menunjukkan bahwa kapasitas baterai merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap jangkauan operasional, sedangkan tarif listrik memberikan pengaruh terbesar terhadap biaya energi per kilometer. Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa sepeda motor listrik memiliki potensi untuk mendukung layanan transportasi wisata jarak pendek hingga menengah di Bali apabila didukung oleh strategi pengisian energi yang sesuai dan ketersediaan infrastruktur yang memadai. Berdasarkan hasil simulasi tersebut, penelitian ini memberikan masukan teknis awal mengenai pentingnya pengembangan infrastruktur pengisian di kawasan wisata, penerapan *battery swapping* atau *opportunity charging* pada layanan dengan intensitas operasi tinggi, serta perencanaan jaringan pengisian yang terintegrasi. Rekomendasi tersebut masih bersifat indikatif dan perlu dikaji lebih lanjut melalui evaluasi teknis, ekonomi, dan operasional berbasis data lapangan sebelum digunakan sebagai dasar kebijakan atau implementasi berskala luas. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, seluruh analisis dilakukan menggunakan pendekatan simulasi operasional terkalibrasi sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan variasi perilaku pengendara, kondisi lalu lintas, topografi, dan faktor lingkungan pada operasi nyata. Kedua, model menggunakan asumsi terhadap kapasitas baterai, tarif listrik, dan pola perjalanan sehingga belum mempertimbangkan dinamika perubahan kondisi operasional maupun degradasi baterai dalam jangka panjang. Selain itu, perbandingan eksternal dilakukan secara spesifik

pada indikator yang memiliki *benchmark* empiris yang dapat dibandingkan sehingga belum dapat dianggap sebagai validasi menyeluruh terhadap seluruh keluaran model. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan melakukan *Field Operational Test* pada kawasan wisata di Bali untuk mengevaluasi dan memvalidasi keluaran simulasi pada kondisi operasional nyata, mengembangkan model simulasi dinamis berbasis data aktual, serta mengevaluasi aspek ekonomi, keandalan layanan, degradasi baterai, dan kebutuhan infrastruktur pengisian secara lebih komprehensif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Transportasi Darat Bali atas dukungan akademik dan fasilitasi dalam pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada pihak-pihak yang memberikan masukan teknis dan diskusi ilmiah yang berkontribusi dalam penyempurnaan perancangan model dan analisis penelitian. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada mitra dan pemangku kepentingan di sektor transportasi dan pariwisata yang telah memberikan informasi dan perspektif praktis mengenai operasional sepeda motor listrik di kawasan wisata. Seluruh pandangan, analisis, dan kesimpulan yang disajikan dalam artikel ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis.

Daftar Pustaka

- [1] International Energy Agency, "Global EV outlook 2024: Trends in other light-duty electric vehicles," Jakarta, 2024. Accessed: Jan. 15, 2026. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a9e3544b-0b12-4e15-b407-65f5c8ce1b5f/GlobalEVOutlook2024.pdf>
- [2] Asian Development Bank, "Electric motorcycle charging infrastructure road map for Indonesia," Jakarta, Oct. 2022. Accessed: Jan. 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/830831/electric-motorcycle-charging-infrastructure-indonesia.pdf>
- [3] F. A. Padhilah, P. Aji, and I. R. F. Surya, "Indonesia electric vehicle outlook 2023," Jakarta, 2023. Accessed: Jan. 15, 2026. [Online]. Available: <https://iesr.or.id/en/pustaka/indonesia-electric-vehicle-outlook-2023/>
- [4] Global Green Growth Institute, "Piloting electric vehicle systems and developing a green transportation investment roadmap for Bali, Indonesia: Market and policy assessment of investment needs, barriers, and opportunities," Jeng-gu, 2024.
- [5] Y. Yuniaristanto, W. Sutopo, M. Hisjam, and H. Wicaksono, "Estimating the market share of electric motorcycles: A system dynamics approach with the policy mix and sustainable life cycle costs," *Energy Policy*, vol. 195, p. 114345, 2024, doi: 10.1016/j.enpol.2024.114345.
- [6] S. N. Aqmarina, R. Nurcahyo, and S. Sumaedi, "Accelerating electric motorcycle adoption: Comparison between users and non-users perspectives in Jakarta, Indonesia," *TEM Journal*, vol. 13, pp. 1633–1644, 2024, doi: 10.18421/TEM132-76.
- [7] O. Stefen, Q. Sholihah, E. Pangestuti, T. Osawa, and R. Prasetyo, "Assessing the public perception and targeted implementation of electric motorcycles in Denpasar city related to emission reduction," *Ecotrophic: Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 18, no. 2, pp. 267–285, doi: 10.24843/EJES.2024.v18.i02.p10.
- [8] Antara News, "Bali to Designate EV-only Zones at Tourist Attractions in 2023," 2022.
- [9] Pestel, E. Considerations about the quality assessment of travel time and travel distance distributions in transport modelling: a proposal for a standardized methodology. *Transportation* 48, 1285–1309 (2021), doi: 10.1007/s11116-020-10095-y
- [10] J. Zhao, J. Wu, S. Fotedar, Z. Li, and P. Liu, "Fleet availability analysis and prediction for shared e-scooters: An energy perspective," *Transp. Res. D Transp. Environ.*, vol. 136, p. 104425, 2024, doi: 10.1016/j.trd.2024.104425.
- [11] T. Silveira-Santos, T. Rangel, J. Gomez, and J. M. Vassallo, "Forecasting moped scooter-sharing travel demand using a machine learning approach," *Sustainability*, vol. 16, no. 13, p. 5305, 2024, doi: 10.3390/su16135305.
- [12] D. Q. Nguyen-Phuoc, T. M. Truong, M. H. Nguyen, H.-G. Pham, Z.-C. Li, and O. Oviedo-Trespalacios, "What factors influence the intention to use electric motorcycles in motorcycle-dominated countries? An empirical study in Vietnam," *Transp. Policy (Oxf.)*, vol. 146, pp. 193–204, 2024, doi: 10.1016/j.tranpol.2023.11.013.
- [13] M. N. Kirana, F. Farizal, and R. Nurcahyo, "Factors affecting the user acceptance of electric motorcycle in Indonesia using unified theory of acceptance and use of technology 2 (UTAUT2)," in *Proceedings of the North American Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Michigan, USA: IEOM Society International, 2023, pp. 262–273. doi: 10.46254/NA8.20230075.
- [14] Institute for Transportation and Development Policy, "Two-wheeler electrification and service-based electric mobility in Indonesia," Jakarta, 2025.
- [15] Asian Development Bank, "Electric mobility in Indonesia: Infrastructure and operational considerations," Jakarta, 2022. doi: 10.22617/TCS220426.
- [16] International Energy Agency, "Global EV outlook 2024 – Trends in two-and three-wheelers," Paris, 2024. Accessed: Jan. 15, 2026. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a9e3544b-0b12-4e15-b407-65f5c8ce1b5f/GlobalEVOutlook2024.pdf>
- [17] P. Suwignjo *et al.*, "Benefits of Electric Motorcycle in Improving Personal Sustainable Economy: A View from Indonesia Online Ride-Hailing Rider," *International Journal of Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 38–53, 2023, doi: 10.14716/ijtech.v14i1.5454.
- [18] T. Kusalaphirom, T. Satiennam, and W. Satiennam, "Factors influencing the real-world electricity consumption of electric motorcycles," *Energies (Basel)*, vol. 16, p. 6369, 2023, doi: 10.3390/en16176369.
- [19] L. Prasad, S. Shana, and G. Abhishek, "An Effective Range Estimation and State-of-Charge to mitigate range anxiety in Electric Vehicles," *Heliyon*, vol. 11, p. e41494, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41494.
- [20] S. F. Chaniago, W. Sutopo, and A. Ma'aram, "Battery capacity or charging infrastructure? Cost modeling study to evaluate investments of electric motorcycles and supporting infrastructure in Malaysia," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, no. 2, p. 93, 2025, doi: 10.3390/wevj16020093.
- [21] M. I. Al Irsyad *et al.*, "Comparative total cost assessments of electric and conventional vehicles in ASEAN: Commercial vehicles and

- motorcycle conversion,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 85, p. 101599, 2025, doi: 10.1016/j.esd.2024.101599.
- [22] R. Agustina, Y. Yuniaristanto, and W. Sutopo, “Factors influencing electric motorcycle adoption in Indonesia: Comprehensive psychological, situational, and contextual perspectives,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, no. 2, p. 106, 2025, doi: 10.3390/wevj16020106.
- [23] S. M. Afraah, Y. Yuniaristanto, W. Sutopo, and M. Hisjam, “Comparing total cost of ownership of electric and conventional motorcycles in Indonesia,” *Jurnal Teknik Industri*, vol. 22, no. 2, pp. 196–210, 2021, doi: 10.22219/JTIUMM.Vol22.No2.196-210.
- [24] Y. Yuniaristanto, L. A. Hafidza, W. Sutopo, and M. Hisjam, “Evaluation of driving comparative life cycle cost assessment of conventional and electric motorcycles in Indonesia: Monte carlo analysis,” *Jurnal Optimasi Sistem Industri*, vol. 21, no. 2, pp. 55–65, 2022, doi: 10.25077/josi.v21.n2.p55-65.2022.
- [25] M. I. al Irsyad *et al.*, “Research trends in the total cost of ownership for electric vehicles: A systematic literature review,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 87, p. 101746, 2025, doi: 10.1016/j.esd.2025.101746.
- [26] F. Zhang, H. Lv, and C. Kuai, “Integrating user preferences and demand uncertainty in electric micro-mobility battery-swapping station planning: A data-driven three-stage model,” *Applied Energy*, vol. 389, 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.125713.
- [27] J. Osorio and Y. Ouyang, “Optimal rebalancing and charging of shared electric scooters using charging hubs,” *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.*, vol. 196, no. 1, p. 104018, 2025, doi: 10.1016/j.tre.2025.104018.
- [28] Y. Ünal, İ. Sarıççek, S. B. Keser, and A. Yazıcı, “Electric vehicle routing with time windows and charging stations from the perspective of customer satisfaction,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 9, p. 4703, 2025, doi: 10.3390/app15094703.
- [29] M. Giordano and J. Y. J. Chow, “An e-scooter service region and fleet allocation design problem with elastic demand,” *Transp. Res. D Transp. Environ.*, vol. 130, no. 1, p. 104153, 2024, doi: 10.1016/j.trd.2024.104153.
- [30] B. Cao and C. Chu, “A review: Location of charging and/or battery swapping stations for electrical vehicles,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 63, pp. 1–44, 2025, doi: 10.1080/00207543.2025.2554949.
- [31] Y. Guo, K. Yan, X. Qian, X. Li, Y. Hu, and N. Wang, “A robust optimal battery swapping station location model for commercial electric vehicles under demand uncertainty,” *Energy*, vol. 333, no. 1, p. 137466, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.137466.
- [32] P. Charoen-amornkitt, K. Nantasaksiri, K. Ruangjirakit, and Y. Laoonual, “Energy consumption and carbon emission assessment of battery swapping systems for electric motorcycle,” *Heliyon*, vol. 9, no. 1, p. e22887, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22887.
- [33] T. Yuwono *et al.*, “Energy consumption, CO₂, and cost analysis of hybrid and battery electric motorcycle,” *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 126–137, 2024, doi: 10.55981/j.mev.2024.989.
- [34] M. Maghfiroh and C. Kavirathna, “Location selection of battery swap station using fuzzy MCDM method: A case study in Indonesia,” *Jurnal Teknik Industri*, vol. 24, no. 2, pp. 81–94, 2023, doi: 10.22219/JTIUMM.Vol24.No2.81-94.