

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tren penggunaan kendaraan listrik terus mengalami peningkatan secara global maupun nasional. Berdasarkan *International Energy Agency* (IEA), penjualan kendaraan listrik global mencapai hampir 14 juta unit pada tahun 2023, atau sekitar 18% dari total penjualan mobil baru dunia [1]. Di Indonesia, percepatan adopsi kendaraan listrik didukung melalui Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019, yang mendorong peningkatan penjualan kendaraan listrik dari kurang dari 1.000 unit pada tahun 2021 menjadi sekitar 17.000 unit pada tahun 2023 [2]. Pemerintah juga menargetkan 2 juta mobil listrik dan 12 juta sepeda motor listrik pada tahun 2030 sebagai bagian dari upaya transisi energi nasional. Perkembangan tersebut terus berlanjut, dimana *Global EV Outlook 2026* melaporkan bahwa penjualan kendaraan listrik global telah melampaui 21 juta unit pada tahun 2025 dan diproyeksikan mencapai sekitar 23 juta unit pada tahun 2026, atau mendekati 30% dari total penjualan mobil baru dunia, yang menunjukkan bahwa kendaraan listrik semakin menjadi teknologi utama dalam sektor transportasi [3].

Perkembangan teknologi transportasi berkelanjutan saat ini menuntut adanya inovasi kendaraan yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga efisien untuk mobilitas jarak pendek. Pada konteks kawasan perkotaan yang padat, area perkantoran, maupun lingkungan pendidikan, kendaraan listrik skala kecil menjadi solusi transportasi yang sangat relevan [4]. Kendaraan jenis ini dikonsep untuk menjawab kebutuhan mobilisasi dengan konsumsi energi yang minim, biaya operasional rendah, serta mendukung target pengurangan emisi karbon. Namun, tantangan utama dalam pengembangan kendaraan mikro ini terletak pada manajemen energi yang sangat terbatas, sehingga efisiensi sistem tenaga menjadi parameter kritis yang harus diperhatikan [5].

Sebagai upaya menjawab tantangan pengembangan teknologi kendaraan listrik di tingkat nasional, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) mengembangkan prototipe *Micro Electric Vehicle* (MEVi) sejak tahun 2019 sebagai bagian dari agenda riset strategis nasional di bidang kendaraan listrik [6]. Pengembangan MEVi juga diarahkan sebagai kendaraan listrik otonom yang dipersiapkan untuk

mendukung sistem transportasi di Ibu Kota Nusantara (IKN), dengan kemampuan beroperasi tanpa pengemudi (*autonomous driving*) pada lingkungan yang terkontrol [7]. Prototipe awal MEVi dirancang dengan fokus pada efisiensi energi serta pengembangan teknologi kendaraan otonom. Oleh karena itu, mengingat kendaraan ini diproyeksikan untuk beroperasi secara berkelanjutan pada berbagai kondisi operasi, pemahaman mengenai karakteristik pembebanan motor BLDC selama proses akselerasi dan pengereman menjadi aspek yang sangat penting untuk menjamin keandalan sistem serta mendukung pengembangan kendaraan sebelum diimplementasikan secara lebih luas [6].

Tingkat Efisiensi kendaraan MEVi ini sangat bergantung pada rancangan *elektrical* dan *mechanical*, salah satunya sistem penggunaan motor penggeraknya dan pengaturan pada distribusi daya dan efisiensi penggunaan baterai yang digunakan. Beban daya yang terdapat dalam kendaraan listrik ini tidak hanya berasal dari motor penggerak utama berupa motor *brushless direct current* (BLDC), penggunaannya dinilai efektif karena memiliki efisiensi tinggi pada penggunaannya, torsi besar pada kecepatan rendah, serta respon yang baik pada pembebanan dinamis terhadap perubahan akselerasi dan pengereman [8]. Selain itu terdapat komponen pendukung yang mempengaruhi konsumsi daya yaitu sistem pengereman atau *brake system*. Motor BLDC menjadi salah satu beban utama yang menghabiskan daya paling tinggi karena menghasilkan torsi yang besar, sehingga efisiensinya harus sangat tinggi [6]. Namun konsumsi daya pada motor BLDC ini dapat berubah secara signifikan bergantung pada variasi kecepatan, beban mekanik dan medan yang dilaluinya. Pada kendaraan, sistem kemudi listrik yang digunakan juga menjadi salah satu beban yang mengkonsumsi cukup besar daya diantara penggunaannya dapat mengonsumsi antara 100-300 Watt dengan bergantung pada kondisi jalan dan gaya dari pengemudi [9]. Sementara itu sistem pengereman atau *break system* juga membuat konsumsi daya yang berpengaruh pada konsumsi baterai karena terjadinya lonjakan saat pengeraman dilakukan akan mempengaruhi efisiensi penggunaan baterai pada kendaraan [10].

Pada penggunaannya, performa aktual motor BLDC pada kondisi dinamis seperti akselerasi dan pengereman akan mengalami perubahan arus yang signifikan

ketika terjadi perubahan kecepatan [11]. Pada saat akselerasi, kebutuhan torsi meningkat sehingga motor menarik arus lebih besar. Selain itu pada proses pengereman konvensional dapat muncul arus *transien* akibat perubahan mendadak pada beban walaupun normalnya pada proses pengereman biasa. Fenomena ini akan menyebabkan profil arus dan daya motor BLDC bersifat tidak linear dan sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi kendaraan [12]. Jika profil arus dan daya ini tidak dipetakan secara kuantitatif untuk diketahui karakteristiknya, maka batas aman arus puncak, pola konsumsi daya, serta efisiensi sistem tenaga MEVi sulit untuk diprediksi, sehingga berpotensi menurunkan performa kendaraan maupun mempercepat degradasi baterai [8].

Selain itu, variasi beban angkut dan kondisi medan seperti tanjakan maupun permukaan jalan yang tidak rata juga memberikan pengaruh besar terhadap konsumsi energi [5]. Peningkatan beban akan meningkatkan torsi yang dibutuhkan, yang secara langsung menaikkan arus motor dan demikian pula medan menanjak akan menambah komponen gaya gravitasi yang diatasi motor [12]. Rasio kenaikan arus terhadap beban maupun medan pada MEVi saat ini belum diketahui secara komprehensif karena belum adanya eksperimen yang memadai. Kondisi ini dapat menimbulkan kesalahan dalam penentuan kapasitas baterai, rating pada setting *Battery Management System* (BMS), serta perancangan sistem tenaga secara keseluruhan apabila tidak dilakukan analisis karakteristik pembebanannya terlebih dahulu [13]. Selain itu pada kondisi terkini atau pengembangan sebelumnya tidak terdapat BMS dan controller yang memadai pada MEVi, sehingga diperlukan rekonstruksi pada baterai, controller dan *topspeed* [8].

Berhubungan dengan hal tersebut, diperlukan analisis pembebanan dinamis pada MEVi di bawah kondisi operasi yang bervariasi seperti akselerasi, pengereman, kecepatan, beban, dan kemiringan medan. Hasil analisis ini penting sebagai dasar untuk mengetahui profil konsumsi daya kendaraan pada berbagai kondisi operasi dan menentukan desain sistem tenaga yang optimal pada MEVi. Pada penelitian ini, pembebanan dinamis merepresentasikan perubahan kebutuhan arus, daya, dan konsumsi energi kendaraan akibat variasi kondisi operasi selama akselerasi maupun pengereman. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada

analisis optimasi pembebanan dinamis pada *Micro Electric Vehicle* (MEVi) menggunakan pendekatan *Response Surface Methodology* (RSM), dengan memanfaatkan data konsumsi energi dari masing-masing komponen beban yang diujikan. Analisis yang dihasilkan penelitian ini diharapkan menjadi data acuan dan landasan dalam membangun sistem kendaraan listrik serupa sehingga efisien dan optimal dari segi kebutuhan daya serta kapasitas baterai yang tepat, sehingga menjadi salah satu riset pendukung dalam pengembangan MEVi.

1.2 Kajian Terdahulu

Penelitian mengenai sistem kelistrikan dan distribusi daya pada kendaraan listrik telah banyak dilakukan, baik dalam lingkup optimasi baterai maupun efisiensi sistem penggerak. Namun, sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada analisis motor BLDC atau optimasi kapasitas baterai secara umum, tanpa meninjau beban pada kendaraan listrik berskala mikro seperti *Micro Electric Vehicle* (MEVi). Untuk perbandingan kajian terdahulu di tunjukan pada Tabel 1.1.

Tabel 1. 1 Kajian terdahulu yang relevan.

Judul	Peneliti	Tahun
Analisis Sistem Penggerak Motor BLDC Pada Mobil Listrik Ponocar	Dwi Harjono, Wahyu Widodo	2021
Analisis Performa dan Daya Konsumsi <i>Brushless direct current Motor</i> 1000-Watt pada Mobil Listrik <i>Hykorasaki</i>	Muhammad Afdhal Izzati, Novi Gusnita	2022
Karakteristik Kendaraan Konversi Sepeda Motor Listrik Motor BLDC 2000 Watt <i>Type Hub Drive</i>	Hendy Yoga Prastya, Belly Yan Dewantara, dan Dr. Iradiratu Diah	2025
Performance Analysis of Battery Endurance in a Bldc Motor-Based Mini <i>Electric Vehicle</i> : a Case Study at the Electrical Engineering Laboratory, Universitas Pembangunan Panca Budi	Denny Syahputra, Parlin Siagian, Beni Satria	2025

Judul	Peneliti	Tahun
Analysis of Power Consumption for Electrical Motor on Automatic <i>Micro Electric Vehicle</i> (MEVi)	Adi Waskito, Bright Cristian, Rendra Dwi Firmasnyah, Muhammad Arifin, Taufik Ibnu Salim, Mulia Pratama, Arifin Nur, Dikdik Krisnandi, Bambang Wahono, Ahmad Dimyani, Yanuandri Putrasari, Budi Prawara, Amir Tjolleng, Muhammad Khristamto, Aditya Wardana	2023
Research of Load Impact on Energy Consumption in an Electric Delivery Vehicle Based on Real Driving Conditions Guidance for Electrification of Light-Duty Vehicle Fleet	Wojciech Cieslik, Weronika Antczak	2023

Penelitian sebelumnya telah meletakkan dasar yang kuat mengenai analisis konsumsi energi dan performa kendaraan listrik yang menggunakan motor BLDC. Studi oleh penelitian [14] serta penelitian [5] secara konsisten menunjukkan bahwa penambahan beban penumpang atau kargo secara langsung meningkatkan konsumsi arus dan daya. Namun, kedua studi tersebut juga mencatat bahwa penambahan beban ini berdampak negatif pada efisiensi motor dan memperpendek masa pakai baterai. [15] memperdalam analisis beban ini pada kendaraan pengiriman dalam kondisi berkendara nyata. Mereka menemukan bahwa dampak beban terbesar (peningkatan konsumsi energi 14-20%) terjadi pada kondisi *urban driving* (perkotaan) akibat seringnya akselerasi. Menariknya, penelitian [15] juga mencatat bahwa beban yang lebih berat sedikit meningkatkan pemulihan energi saat pengereman, meskipun tidak cukup untuk mengimbangi tingginya konsumsi akselerasi.

Selain beban, pengaruh variasi kecepatan dan siklus mengemudi juga telah diteliti secara ekstensif. Penelitian [16] mengidentifikasi bahwa kecepatan dan daya yang dibutuhkan oleh BLDC pada kendaraan listrik mempengaruhi konsumsi daya yang besar dan mempengaruhi waktu performa dari baterai, sehingga efisiensi sangat menjadi hal vital. Serupa dengan itu, pada penelitian [8], yang juga meneliti *platform* MEVi, menemukan perbedaan efisiensi yang drastis antara kondisi tanpa beban (efisiensi 70%) dan berbeban di lintasan (efisiensi 15%), yang

mengindikasikan adanya kerugian mekanis dan elektris yang tinggi pada kondisi berbeban. Sementara itu, pada penelitian [17] berhasil memetakan karakteristik pembebanan dengan melakukan analisis konsumsi daya sepeda listrik pada kecepatan maksimum, mengonfirmasi bahwa kecepatan tinggi menguras tegangan baterai lebih cepat dibandingkan kecepatan rendah. Penelitian [17] menjadi relevan dengan penelitian ini karena mengkaji karakteristik beban, namun berbeda dalam media kendaraannya.

Berdasarkan kajian terdahulu tersebut, terlihat adanya celah penelitian (*research gap*) yang signifikan. Meskipun pada penelitian [15] dan [16] telah mengidentifikasi akselerasi dan pengereman sebagai faktor utama tingginya konsumsi energi di siklus perkotaan, analisisnya cenderung berfokus pada total konsumsi energi akibat beban statis atau siklus berkendara secara keseluruhan. Penelitian ini akan berfokus lebih dalam pada karakteristik pembebanan dinamis motor BLDC. Secara spesifik, celah penelitian yang akan diisi adalah:

1. Belum adanya studi yang menganalisis dampak langsung dari laju perubahan akselerasi dan proses pengereman terhadap respons sistem MEVi, khususnya arus, daya, dan konsumsi energi, pada berbagai kondisi operasi.
2. Penelitian [8] telah menguji MEVi dan menemukan efisiensi yang sangat rendah (15%) dan juga menggunakan *controller* yang berbeda yaitu Kelly, bukan Votol EM100 di lintasan, namun belum mengidentifikasi kondisi operasi optimum. Penelitian ini akan melanjutkan analisis pada platform MEVi tersebut untuk menemukan tingkat pembebanan optimum dan memberikan rekomendasi teknis yang lebih detail berdasarkan pendekatan optimasi menggunakan RSM.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi kondisi operasi terhadap pembebanan dinamis pada *Micro Electric Vehicle* (MEVi) saat akselerasi dan pengereman.

2. Bagaimana kondisi operasi optimum dan rekomendasi teknis kapasitas baterai pada *Micro Electric Vehicle* (MEVi) berdasarkan pendekatan *Response Surface Methodology* (RSM).

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Untuk menganalisis pengaruh variasi kondisi operasi terhadap pembebanan dinamis pada *Micro Electric Vehicle* (MEVi) saat akselerasi dan pengereman.
2. Untuk menentukan kondisi operasi optimum serta merumuskan rekomendasi teknis kapasitas baterai pada *Micro Electric Vehicle* (MEVi) berdasarkan pendekatan *Response Surface Methodology* (RSM).

1.4.2 Manfaat

Pada penelitian ini terdapat dua manfaat yang ingin dicapai yaitu:

1. Manfaat Akademis

Secara akademis, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dan memperkaya literatur di bidang teknik tenaga listrik pada topik mesin listrik terutama motor BLDC khususnya mengenai karakteristik pembebanan dinamis pada aplikasi kendaraan listrik MEVi. (*voltage drop*) yang menyebabkan pengaruh pada optimalisasi daya baterai. Hasil analisis ini dapat menjadi referensi akademis untuk pengembangan perancangan kendaraan listrik mikro yang memiliki efisiensi energi yang tinggi kedepannya. Menambah karya tulis ilmiah nasional maupun internasional terkait pengembangan MEVi di BRIN.

2. Manfaat Praktis

Secara praktis, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan dan penyempurnaan desain *Micro Electric Vehicle* (MEVi). Data empiris mengenai pembebanan dinamis dan konsumsi energi dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam menentukan kapasitas baterai (*battery*

sizing) yang lebih tepat sesuai kebutuhan operasional kendaraan. Dengan demikian, sistem MEVi diharapkan mampu beroperasi secara lebih efisien, memiliki keandalan operasional yang lebih baik, serta meminimalkan risiko kekurangan energi selama penggunaan. Selain itu, hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai pedoman dalam menetapkan kondisi pengoperasian yang optimal untuk meningkatkan efisiensi energi pada penggunaan MEVi.

1.5 Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus penelitian, maka batasan masalah dalam penelitian ini ditetapkan sebagai berikut:

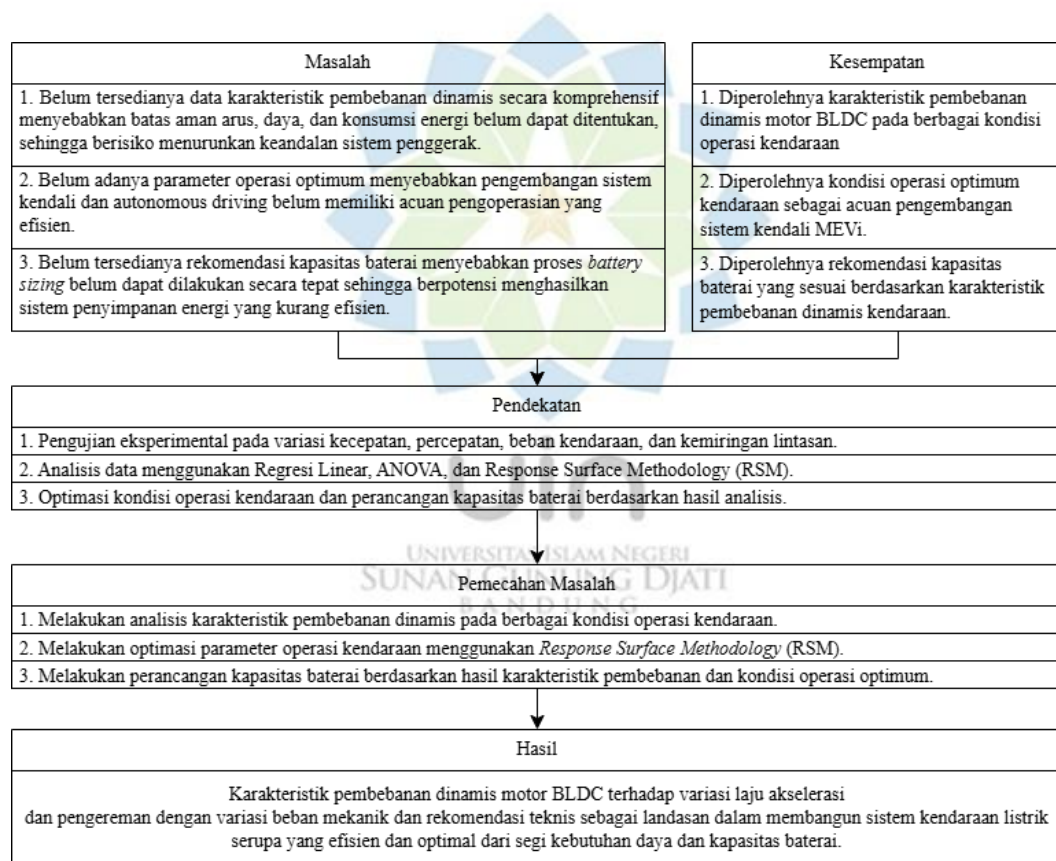
1. Objek penelitian difokuskan pada sistem kelistrikan *Micro Electric Vehicle* (MEVi) yang dikembangkan oleh BRIN.
2. Berat *cover* kendaraan dianggap konstan sehingga tidak dianalisis sebagai variabel yang memengaruhi karakteristik pembebanan.
3. Suhu motor BLDC dan suhu lingkungan tidak dijadikan variabel penelitian, dengan asumsi seluruh pengujian dilakukan pada kondisi suhu ruang.
4. Tekanan ban dianggap konstan dan tidak dianalisis sebagai parameter pengujian.
5. Pengujian dilakukan pada lintasan dengan permukaan kering dan stabil, tanpa mempertimbangkan pengaruh kondisi jalan seperti basah, licin, atau kasar.
6. Jarak tempuh kendaraan tidak dianalisis sebagai parameter penelitian. Pengambilan data hanya didasarkan pada variasi kecepatan, percepatan, beban, kemiringan lintasan, dan kondisi pengereman.
7. Seluruh pengujian dilakukan pada kondisi kendaraan bergerak lurus, sehingga pengaruh manuver atau *steering* tidak dianalisis.
8. Sistem pengereman yang digunakan adalah pengereman konvensional (*non-regenerative braking*).
9. Pengujian dilakukan pada area terbatas yang merepresentasikan kondisi operasional kendaraan.
10. Analisis kapasitas baterai terbatas pada penyusunan rekomendasi *battery sizing* berdasarkan karakteristik pembebanan dan konsumsi energi hasil

pengujian, tanpa implementasi maupun pengujian konfigurasi baterai yang diusulkan.

11. Perancangan kapasitas baterai tidak mencakup analisis *battery life cycle*, degradasi kapasitas, karakteristik termal, maupun estimasi *State of Health* (SOH).

1.6 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir merupakan alur sistematis dari proses penyelesaian permasalahan yang telah dirumuskan. Untuk menggambarkan hal tersebut, kerangka berpikir penelitian ini dijabarkan lebih luas pada Gambar 1.1.



Gambar 1. 1 Kerangka berpikir.

1.7 Sistematika Penulisan

Supaya pembahasan dalam laporan tugas akhir ini tersusun secara sistematis maka penulisan disusun dalam beberapa bab dengan uraian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang penelitian, kajian penelitian terdahulu, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, kerangka berpikir, serta sistematika penulisan sebagai dasar pelaksanaan penelitian.

BAB II TEORI DASAR

Bab ini memuat teori-teori yang mendukung penelitian, meliputi konsep kendaraan listrik, motor BLDC, baterai dan *battery sizing*, sistem pengereman, karakteristik pembebanan, metode regresi linear, ANOVA, *Response Surface Methodology* (RSM), serta penelitian terdahulu yang relevan.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metodologi penelitian yang meliputi tahapan penelitian, spesifikasi objek penelitian, instrumen pengujian, prosedur pengambilan data, perancangan eksperimen, serta metode analisis data yang digunakan.

BAB IV PENGUJIAN KENDARAAN

Bab ini menjelaskan proses dan skenario pengujian kendaraan listrik MEVi, meliputi variasi kecepatan, akselerasi, pengereman, beban kendaraan, dan kemiringan lintasan yang digunakan dalam penelitian.

BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengujian serta analisis karakteristik pembebanan motor BLDC menggunakan metode regresi linear, ANOVA, dan RSM. Selain itu, bab ini juga membahas optimasi kondisi operasi kendaraan dan rekomendasi kapasitas baterai.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian serta saran yang dapat digunakan untuk pengembangan penelitian dan sistem kendaraan listrik MEVi di masa mendatang.