

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Di Indonesia, emisi gas rumah kaca dan polutan telah meningkat sebagai akibat dari pertumbuhan populasi dan urbanisasi yang pesat, serta konsumsi energi kendaraan berbahan bakar fosil [1]. Data dari *Emissions Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR) menunjukkan emisi GRK Indonesia mengalami peningkatan sebesar 58,5% dari 853,12 Mt CO₂eq pada 2015 menjadi 1.323,78 Mt CO₂eq pada 2024 [2]. Peningkatan ini sebagian besar disebabkan oleh aktivitas transportasi bahan bakar fosil, yang menyumbang cukup besar emisi karbon di daerah perkotaan. Lebih dari 61% konsumsi minyak bumi di dunia disebabkan oleh sektor transportasi, salah satunya transportasi darat yang menyumbang sekitar 49% dari total tersebut [2].

Kebutuhan pengurangan emisi gas rumah kaca, mendorong perubahan mendasar di sektor transportasi. *Electric Vehicle* (EV) memanfaatkan dekarbonisasi grid listrik untuk mencapai emisi operasional mendekati nol, sehingga memiliki efisiensi energi 3-4 kali lebih tinggi dari kendaraan berbahan bakar fosil [3]. Seiring dengan meningkatnya kesadaran akan dampak lingkungan dari sektor transportasi, penerapan EV pun semakin berkembang, khususnya di negara-negara berkembang yang mengalami urbanisasi pesat dan tingginya emisi gas rumah kaca.

Perkembangan EV di dunia dan Indonesia mengalami peningkatan yang sangat pesat dalam dekade terakhir. Menurut *International Energy Agency* (IEA) dalam laporan *State of Global EV Outlook 2025*, penjualan kendaraan listrik global pada tahun 2024 melebihi 17 juta unit, dan diproyeksikan mencapai lebih 20 juta unit pada 2025 [4]. Di Indonesia sendiri, Peraturan Presiden No. 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB) menargetkan 2,1 juta unit sepeda motor listrik dan 400 ribu unit mobil listrik hingga tahun 2030. Tren ini menunjukkan bahwa Indonesia sedang berada pada fase transisi energi secara besar-besaran di sektor transportasi.

Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) menjadi pilihan utama pada hampir semua kendaraan listrik karena efisiensi tinggi, masa pakai lebih panjang, serta kebutuhan perawatan yang minim dibandingkan motor *brushed* DC maupun motor induksi [5]. Keunggulan ini membuat motor BLDC sangat cocok untuk diaplikasikan pada kendaraan listrik yang menuntut mengatasi masalah polusi udara

karena ketergantungan pada bahan bakar fosil. Namun, kinerja motor BLDC sangat dipengaruhi oleh kondisi lintasan dinamis yang menjadi karakteristik dalam penggunaan kendaraan di jalan raya.

Analisis kinerja motor BLDC pada kondisi lintasan dinamis menjadi krusial, karena kinerja dan daya tahan baterai kendaraan listrik sangat bergantung pada seberapa optimal motor dapat beradaptasi terhadap variasi kecepatan dan beban EV. Kondisi operasi pada lintasan dinamis dapat menyebabkan penurunan kinerja sistem penggerak dan baterai. Penurunan kinerja ini berpengaruh langsung dengan berkurangnya jarak tempuh kendaraan listrik [6]. Kondisi medan jalan yang bervariasi, mulai dari medan datar dan miring membuat variasi kecepatan dan beban menjadi lebih kompleks.

Beberapa penelitian terdahulu telah menganalisis performa dan memodelkan kinerja dari motor BLDC, namun mayoritas dilakukan pada kondisi beban konstan melalui simulasi atau pengujian laboratorium. Penelitian Izzati dan Gusnita (2022) mengukur performa dan konsumsi daya motor BLDC 1000 W pada kondisi pengujian statis dan semi dinamis yaitu kondisi tanpa beban dan beban 300 kg [7]. Penelitian Waskito dkk (2023) pada prototipe MEVi BRIN mengidentifikasi konsumsi daya rata-rata motor BLDC 750 W serta faktor-faktor seperti kecepatan, medan dan pola akselerasi yang mempengaruhinya menggunakan kontrol **Kelly** pada MEVi [8]. Penelitian Abouseda dkk (2025) telah melakukan pemodelan dan analisis kinerja motor BLDC menggunakan teknik identifikasi sistem, namun pengujian beban dengan dinamometer di validasi melalui eksperimental model motor BLDC menggunakan MATLAB dan uji laboratorium [9].

Kesenjangan yang terlihat dari penelitian sebelumnya adalah belum tersedianya data empiris kinerja motor BLDC pada kendaraan MEVi ketika dihadapkan pada lintasan dinamis di jalan raya sesungguhnya (*on-road*) [8]. Belum ada penelitian yang secara khusus melakukan pengujian *on-road* pada MEVi untuk mengukur dan menganalisis hubungan kuantitatif antara variabel beban, kecepatan, kondisi medan, dengan parameter kinerja motor BLDC, khususnya konsumsi energi, dan jarak tempuh efektif pada medan beton.

Penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut melalui pengujian *on-road* pada lintasan nyata yang representatif di wilayah Indonesia. Pengujian mencakup variasi kondisi medan nyata, meliputi kemiringan jalan, variasi beban kendaraan, serta variasi kecepatan. Kondisi dinamis akan menurunkan

efisiensi motor BLDC karena peningkatan beban torsi yang memerlukan arus lebih besar [8]. Kondisi dinamis memiliki kemungkinan mempengaruhi motor BLDC karena gaya grafitasi dan inersia meningkatkan resistansi yang tidak terdapat di pengujian statis [10]. Sehingga analisis dari data lapangan akan lebih akurat, relevan dan dapat diandalkan untuk pengembangan serta optimalisasi MEVi.

Secara teoritis, penelitian ini menghasilkan analisis berbasis data lapangan nyata berupa peta dan kurva konsumsi energi motor BLDC pada MEVi terhadap variasi kemiringan jalan, beban kendaraan, dan pola berkendara dinamis. Analisis data ini menjadi referensi baru yang lebih representatif dibandingkan data dyno atau referensi luar negeri, sekaligus memberikan titik operasi optimal (*sweet spot*) yang dapat digunakan sebagai dasar algoritma pada pengembangan menjadi kendaraan otonom.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi beban dan kecepatan di lintasan dinamis terhadap kinerja motor BLDC pada MEVi melalui pengujian langsung di lintasan beton BRIN Samaun Samadikun. Penelitian ini menghasilkan peta konsumsi energi sistem dan titik operasi optimal serta analisis penurunan kapasitas baterai, sehingga dapat mengatur tingkat efisiensi energi secara signifikan dan memperpanjang jarak tempuh nyata kendaraan listrik MEVi.

1.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan pernyataan yang menegaskan keaslian sebuah karya ilmiah, disusun untuk memastikan akuntabilitas dan mencegah plagiarisme, yaitu peniruan terhadap karya orang lain. Bagian ini juga menguraikan sejauh mana penelitian terdahulu telah dilakukan terkait topik tertentu, sekaligus menjadi acuan penting dalam pengembangan penelitian baru yang akan dilaksanakan. Untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai kontribusi dan kekurangan penelitian terdahulu, disajikan Tabel 1.1 yang merupakan penelitian terdahulu terkait motor BLDC pada kendaraan listrik.

Tabel 1.1 Penelitian terdahulu.

No	Judul	Peneliti	Tahun
1	Analisis Performa dan Daya Konsumsi <i>Brushless Direct Current</i> Motor 1000-Watt pada Mobil Listrik Hykorasaki	Muhammad Afdhal Izzati, Novi Gusnita	2022
2	<i>Analysis of Power Consumption for Electrical Motor on Automatic Micro Electric Vehicle (MEVi)</i>	Adi Waskito, Bright Christian, Rendra Dwi Firmansyah, Muhammad Arifin, Taufik Ibnu Salim	2023
3	Efisiensi Penggunaan Motor BLDC Terhadap Beban dan Kecepatan Sepeda Motor Listrik	Devco Castono Putro, Eka Samsul Ma'arif	2024
4	Analisis Perbandingan Pengukuran Konsumsi Daya Motor BLDC 350W Melalui Pengukuran <i>Dynamometer</i> dan Pengujian <i>On-Road</i>	Satroyo Budi Utomo, Triwahju Hardianto, Achmad Zainul Arifin	2025
5	<i>Modeling, Dynamic Characterization, and Performance Analysis of a 2.2 kW BLDC Motor Under Fixed Load Torque Levels and Variable Speed Inputs: An Experimental Study</i>	Ayman Ibrahim Abouseda, Resat Doruk, Ali Emin, Ozgur Akdeniz	2025

Studi pada Tabel 1.1 tentang kendaraan listrik, menunjukkan bahwa dalam kondisi lintasan dinamis model motor BLDC sangat penting. Studi ini berfokus pada efisiensi energi dan bagaimana motor dapat mengakomodasi variasi beban, kecepatan, dan medan jalan. Meskipun sebagian besar penelitian ini terbatas pada pengujian laboratorium atau kondisi terkendali, penelitian ini memberikan data empiris untuk memahami titik operasi optimal dan bagaimana faktor dinamis memengaruhi kinerja motor BLDC.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Afdhal Izzati, Novi Gusnita (2022) yang berjudul "Analisis Performa dan Daya Konsumsi Motor *Brushless Direct Current* 1000-Watt pada Mobil Listrik Hykorasaki", motor BLDC

48V-1000W diuji pada kendaraan listrik. Motor mencapai kecepatan maksimum 45 km/jam tanpa beban dengan konsumsi daya 674,289 Watt, sementara kecepatan turun menjadi 41 km/jam dengan beban 300 kg dan konsumsi daya 541,044 Watt. Meskipun pengujian masih berfokus pada kondisi statis daripada lintasan dinamis yang kompleks, temuan ini menunjukkan pengaruh besar beban terhadap efisiensi, dan keuntungan seperti kebisingan rendah dan karakteristik torsi yang baik, mendukung penerapan motor BLDC untuk mobilitas listrik berkelanjutan [7].

Studi yang dilakukan oleh Adi Waskito, Bright Christian, Rendra Dwi Firmansyah, Muhammad Arifin, Taufik Ibnu Salim (2023) dalam "*Analysis of Power Consumption for Electrical Motor on Automatic Micro Electric Vehicle (MEVi)*" melihat prototipe MEVi yang memiliki motor BLDC 750W dan baterai 48V. Konsumsi daya meningkat dari 72-119 Watt tanpa beban menjadi 182-414 Watt dengan beban, dan efisiensi rata-rata 70% tanpa beban dan hanya 15% pada uji jalan berbeban. Studi ini menekankan pengaruh pola akselerasi, medan, dan kecepatan terhadap penggunaan energi, dan menekankan bahwa strategi kontrol untuk optimasi diperlukan, yang relevan dengan kondisi dinamis lintasan urban pada MEVi [8].

Studi oleh Devco Castono Putro, Eka Samsul Ma'arif (2024), "Efisiensi Penggunaan Motor BLDC Terhadap Beban dan Kecepatan Sepeda Motor Listrik" menganalisis motor BLDC 3000 Watt pada sepeda motor listrik dengan beban 76–155 kg dan kecepatan 10-30 km/jam. Hasil menunjukkan efisiensi antara 14,6% dan 84,24%, dan pada beban rendah, konsumsi arus minimal 8,34 A. Menunjukkan peningkatan efisiensi pada beban dan kecepatan tinggi, meskipun operasi efektif selama akselerasi hanya 38,56% dari arus nominal. Ini menunjukkan potensi motor BLDC untuk kendaraan listrik ringan meskipun belum sepenuhnya menangani variabilitas lintasan dinamis [11].

Dalam karya Satroyo Budi Utomo, Triwahju Hardianto, Achmad Zainul Arifin (2025), "Analisis Perbandingan Pengukuran Konsumsi Daya Motor BLDC 350W Melalui Pengukuran *Dynamometer* dan Pengujian *On-Road*", dynamometer menunjukkan efisiensi konsumsi energi 99,26 km/kWh di jalan dan 104,49 km/kWh pada dynamometer, dengan kesalahan rata-rata 5,88% dan kesalahan maksimum 7,58%. Studi ini menunjukkan bahwa dynamometer memiliki kemampuan untuk mewakili kondisi kehidupan nyata, seperti variasi PWM. Hal ini berguna untuk menganalisis konsumsi daya motor BLDC pada lintasan dinamis MEVi [12].

Studi yang dilakukan oleh Ayman Ibrahim Abouseda, Resat Doruk, Ali Emin, Ozgur Akdeniz (2025) dalam "*Modeling, Dynamic Characterization, and Performance Analysis of a 2.2 kW BLDC Motor Under Fixed Load Torque Levels and Variable Speed Inputs: An Experimental Study*" melihat motor BLDC 2.2 kW dengan baterai Li-ion. Konsumsi daya dan efisiensi sistem dihitung pada *load torque* tetap dengan kecepatan variabel menggunakan *dynamometer* AVL, dengan efisiensi maksimum 90% pada kondisi optimal, dan SOC baterai diestimasi menggunakan coulomb counting yang menunjukkan penurunan performa saat SOC rendah. Studi ini menekankan pengaruh *load* dinamis terhadap efisiensi dan respons kecepatan, serta pentingnya analisis data untuk kontrol *robust*, yang relevan dengan kondisi dinamis lintasan [9].

Meskipun penelitian tersebut telah memberikan informasi tentang motor BLDC di bawah beban dan kecepatan variabel, sebagian besar masih terbatas pada pengujian laboratorium, dynamometer, atau kondisi terkendali. Namun, belum ada analisis empiris kondisi dinamis lintasan kompleks dengan variasi beban, kecepatan dan medan pada MEVi. Dengan berfokus pada motor BLDC secara langsung terhadap dinamika lintasan, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekurangan tersebut serta menghasilkan peta efisiensi sistem dan titik operasi optimal dalam mendukung optimalisasi efisiensi energi kendaraan listrik MEVi.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, disusun rumusan masalah penelitian sebagai berikut.

1. Bagaimana respons kontrol motor BLDC terhadap kondisi lintasan dinamis?
2. Bagaimana pengaruh lintasan dinamis terhadap kinerja motor BLDC pada MEVi?
3. Bagaimana titik operasi optimal pada MEVi terhadap lintasan dinamis?

1.4 Tujuan

Dari latar belakang dan rumusan masalah maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis hasil respons kontrol kecepatan motor terhadap kondisi dinamis pada kendaraan MEVi.
2. Menganalisis pengaruh kondisi lintasan dinamis terhadap kinerja motor BLDC pada MEVi menggunakan ANOVA.

3. Menentukan titik operasi optimal pada MEVi berdasarkan konsumsi energi motor BLDC.

1.5 Manfaat

Penelitian mengenai analisis kinerja BLDC terhadap kondisi lintasan dinamis pada MEVi memberikan manfaat secara akademis dan praktis, mendukung pengembangan kendaraan listrik dan efisiensi energi.

1. Manfaat Akademis

Penelitian ini menghasilkan data empiris lapangan nyata di Indonesia mengenai kinerja motor BLDC pada kondisi dinamis lintasan. Hasil berupa analisis kinerja BLDC berupa grafik konsumsi energi sistem dan titik operasi optimal yang lebih akurat dibandingkan pengujian statis atau *dynamometer* sebelumnya, sehingga mengisi kesenjangan literatur yang selama ini didominasi simulasi. Penelitian ini menjadi referensi baru bagi pengembangan ilmu motor kendaraan listrik, dinamika kendaraan, dan optimasi energi pada MEVi.

2. Manfaat Aplikatif

Secara aplikatif, hasil penelitian berupa analisis kinerja motor BLDC berkontribusi kepada produsen lokal. Rekomendasi praktis dalam mengatur batas akselerasi, kecepatan, dan *sizing* baterai yang paling efektif untuk kendaraan listrik. Dengan penerapan rekomendasi ini, efisiensi energi dapat meningkat dan jarak tempuh nyata bertambah efisien tanpa tambah baterai mahal. Secara nasional, penelitian ini mendukung target 2,4 juta unit motor listrik pada 2025 dan penurunan emisi transportasi 29–41% pada 2030 melalui solusi yang murah, terukur, dan langsung bisa diterapkan di lapangan.

1.6 Batasan Masalah

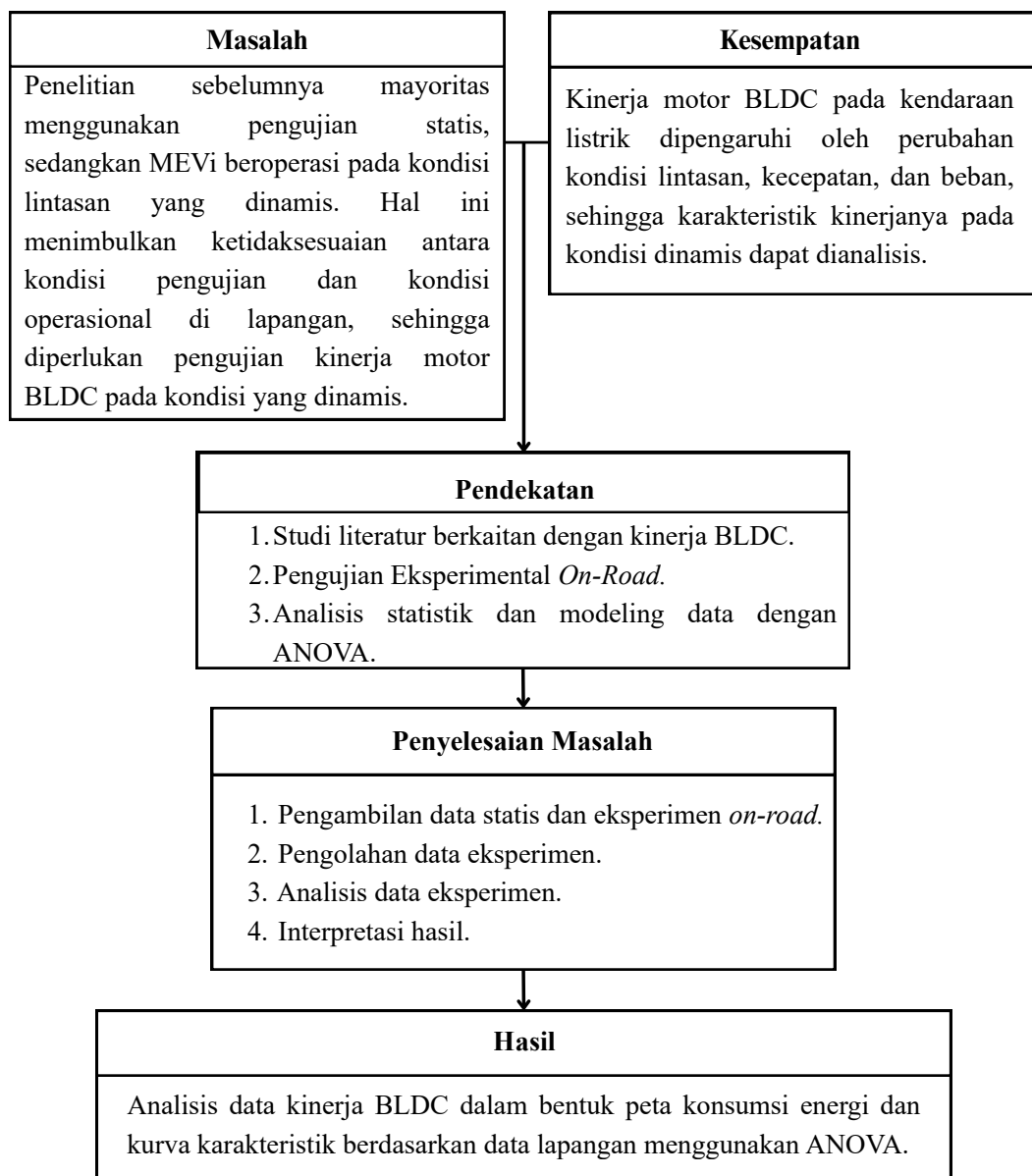
Batasan masalah ditetapkan untuk menjaga fokus dan keterjangkauan penelitian mengenai "Analisis Kinerja Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) terhadap Kondisi Lintasan Dinamis pada *Micro Electric Vehicle* (MEVi)". Adapun Batasan masalah penelitian ini sebagai berikut:

1. Pengujian dilakukan terbatas pada lintasan beton kering di Kawasan BRIN Samaun Samadikun, Bandung, dengan variasi kemiringan 0 hingga 3 derajat. Penelitian tidak meninjau jalan raya umum, permukaan aspal kasar, tanah, maupun kondisi jalan basah.

2. Pengukuran suhu udara serta suhu pada motor, inverter, maupun baterai tidak dilakukan selama pengujian, sehingga pengaruh perubahan resistansi akibat fluktuasi suhu diabaikan (tidak dikoreksi).
3. Kendaraan diuji tanpa *body cover*, sehingga pengaruh hambatan aerodinamis akibat bentuk dan pemasangan penutup bodi tidak dianalisis.
4. Tekanan ban dipertahankan konstan pada 32 PSI di seluruh roda, dan variasi tekanan ban tidak dijadikan sebagai variabel independen dalam penelitian ini.
5. Pengukuran jarak tempuh tidak dilakukan secara langsung di lapangan menggunakan alat ukur jarak fisik. Perhitungan konsumsi energi spesifik (Wh/km) didasarkan pada integrasi data waktu saat kecepatan kendaraan berada dalam kondisi konstan.
6. Nilai torsi tidak diukur secara langsung menggunakan sensor torsi pada poros motor maupun roda. Evaluasi torsi dilakukan melalui pendekatan teoritis berdasarkan kebutuhan gaya dorong kendaraan untuk mengatasi hambatan lintasan dinamis serta hubungan antara daya input baterai dan kecepatan putar roda, dengan mengasumsikan efisiensi transmisi tertentu.
7. Pengujian hanya dilakukan pada kendaraan MEVi dengan spesifikasi komponen utama berupa motor BLDC model BM1418HQF, baterai nominal 48V, controller Votol, serta batas beban pengujian maksimum sebesar 80 kg.
8. Variabel independen yang dianalisis dalam metode statistik *Three-Way ANOVA* dibatasi hanya pada 3 faktor utama, yaitu: variasi kecepatan (6, 9, 13 dan 18 km/jam), variasi beban (50, 65, 80 kg), dan variasi kondisi lintasan (datar, menanjak, menurun).
9. Pengambilan data parameter kinerja motor BLDC (arus, tegangan, efisiensi, dan konsumsi energi) hanya dilakukan pada fase kecepatan konstan, sedangkan lonjakan arus awal saat akselerasi dari posisi diam diabaikan.
10. Penentuan konsumsi energi kendaraan dilakukan melalui metode proyeksi linier, di mana daya elektrik rata-rata dihitung berdasarkan data riil pada fase kecepatan konstan respons PID, yang kemudian dikalkulasikan untuk mengestimasi total kebutuhan energi pada jarak tempuh target sepanjang 30 meter.
11. Pengaruh kelembapan udara, getaran mekanis ekstrem akibat ketidakrataan jalan, serta perubahan viskositas oli transmisi akibat suhu tidak diperhitungkan dalam analisis kinerja motor.

1.7 Kerangka Berpikir

Proses analisis kinerja motor BLDC pada MEVi adalah contoh dari alur logis pemikiran dalam kerangka berpikir. Gambar 1.1 mengilustrasikan kerangka berpikir penelitian yang menggabungkan perumusan masalah, metode pengujian *on-road*, analisis data empiris, hingga menentukan titik operasi optimal.



Gambar 1.1 Kerangka berpikir.

1.8 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan diterapkan untuk membentuk struktur penyusunan yang sistematis, rapi, dan sesuai dengan kaidah akademik. Penulisan ini disusun dengan kerangka dan sistematika yang memenuhi standar yang telah ditetapkan. Penulisan ini mengikuti sistematika yang terdiri dari:

BAB I PENDAHULUAN

Bab pertama menguraikan dasar-dasar dan landasan awal penelitian yang akan dilaksanakan. Bagian ini mencakup latar belakang, penelitian terdahulu, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah dan kerangka berpikir.

BAB II TEORI DASAR

Bab kedua menyajikan landasan teoretis yang menjadi fondasi penelitian ini. Pembahasan mencakup pengantar kendaraan listrik, jenis-jenis kendaraan listrik, prinsip kerja serta karakteristik motor BLDC, konsep baterai, dan metode analisis varian (ANOVA) untuk pengujian hipotesis serta perbandingan data. Teori-teori tersebut digunakan sebagai dasar untuk menganalisis kinerja motor BLDC pada MEVi ketika dihadapkan pada variasi beban, kemiringan jalan, kondisi lintasan dinamis, dan variasi kecepatan dalam pengujian lapangan nyata, sehingga hasil penelitian dapat menghasilkan analisis data yang akurat.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ketiga menjelaskan metodologi yang digunakan dalam penelitian ini secara terperinci. Bagian ini mencakup studi literatur, rumusan masalah, analisis kebutuhan, perencanaan, pengujian, pengolahan data dan analisis data.

BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Bab ini memaparkan proses perancangan dan implementasi sistem kendali kecepatan motor BLDC pada MEVi yang mencakup integrasi komponen perangkat keras dan pengembangan perangkat lunak berbasis kontrol PID. Proses ini dimulai dari perancangan hardware dengan konfigurasi *closed-loop feedback*, diikuti dengan perancangan sistem software menggunakan metode Ziegler-Nichols untuk penentuan parameter awal, hingga tahap implementasi dan fine-tuning manual yang menghasilkan nilai parameter PID optimal guna memastikan analisis kinerja penggerak MEVi yang akurat, stabil, dan responsif.

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini menyajikan hasil pengujian dan analisis mendalam terhadap kinerja motor

BLDC pada MEVi melalui serangkaian eksperimen di lintasan dinamis. Bab ini menguraikan validasi respons kontrol PID di lapangan, diikuti dengan penyajian data empiris hasil pengujian pada kondisi dan variasi variabel. Analisis teknis dilakukan secara komprehensif terhadap parameter kinerja motor pada berbagai medan lintasan. Sebagai tahap akhir, bab ini memaparkan analisis konsumsi energi spesifik dan uji statistik ANOVA untuk membuktikan signifikansi pengaruh variabel independen serta menetapkan titik operasi optimal.

BAB VI PENUTUP

Bab ini menjelaskan tentang kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan, serta disebutkan saran yang dapat digunakan untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

