

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan teknologi transportasi semakin mengarah pada penggunaan energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Salah satu upaya yang banyak dilakukan adalah dengan mengembangkan kendaraan listrik sebagai alternatif pengganti kendaraan berbahan bakar fosil. Penggunaan kendaraan listrik dinilai mampu mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil serta menekan emisi gas buang yang berdampak terhadap lingkungan [1]. Selain itu, peningkatan kebutuhan mobilitas masyarakat juga mendorong pengembangan sistem kendaraan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Pada kendaraan listrik, baterai menjadi komponen utama yang berperan sebagai sumber energi untuk menggerakkan motor listrik dan sistem pendukung lainnya. Kinerja baterai secara langsung akan mempengaruhi performa kendaraan, baik dari sisi jarak tempuh, efisiensi energi, maupun keandalan sistem secara keseluruhan [2]. Oleh karena itu, pengelolaan dan pemantauan kondisi baterai menjadi hal yang sangat penting agar kendaraan listrik dapat beroperasi secara optimal dan aman dalam berbagai kondisi penggunaan. Salah satu jenis baterai yang banyak digunakan pada kendaraan listrik adalah baterai *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO_4). Baterai ini memiliki keunggulan dari segi umur siklus yang relatif panjang, stabilitas termal yang baik, serta tingkat keamanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis baterai lithium lainnya [3][4]. Karakteristik tersebut menjadikan LiFePO_4 cukup banyak dipilih untuk aplikasi kendaraan listrik skala kecil hingga menengah. Namun demikian, baterai tetap memiliki keterbatasan, di mana performanya akan menurun seiring dengan penggunaan. Proses pengisian dan pengosongan yang terjadi secara berulang menyebabkan degradasi yang ditandai dengan berkurangnya kapasitas serta meningkatnya resistansi internal baterai [5][6]. Kondisi ini pada akhirnya akan mempengaruhi kemampuan baterai dalam menyimpan dan menyalurkan energi.

Dalam sistem *Battery Management System* (BMS), salah satu parameter utama yang digunakan untuk mengetahui kondisi baterai adalah *State of Charge* (SoC). SoC menunjukkan tingkat energi yang tersisa di dalam baterai dan menjadi acuan dalam menentukan strategi penggunaan energi serta estimasi jarak tempuh kendaraan [7]. Namun, nilai SoC tidak dapat diukur secara langsung menggunakan sensor, sehingga diperlukan metode estimasi yang mampu memberikan hasil yang cukup akurat selama kondisi operasi berlangsung [8]. Ketidakakuratan dalam estimasi SoC dapat menyebabkan kesalahan dalam pengambilan keputusan, seperti kesalahan dalam menentukan waktu pengisian atau penggunaan energi baterai.

Beberapa metode estimasi SoC yang umum digunakan antara lain metode *Open Circuit Voltage* (OCV) dan *Coulomb Counting*. Metode OCV memanfaatkan hubungan antara tegangan tanpa beban dengan nilai SoC, sedangkan metode *Coulomb Counting* menghitung perubahan muatan berdasarkan arus yang mengalir selama proses pengisian dan pengosongan [9][10]. Meskipun cukup sederhana, masing-masing metode memiliki keterbatasan. Metode *Coulomb Counting* cenderung mengalami akumulasi kesalahan akibat *error* pengukuran arus yang terjadi secara terus-menerus, sedangkan metode OCV sulit diterapkan secara langsung ketika baterai berada dalam kondisi berbeban karena dipengaruhi oleh efek polarisasi [11]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang dapat menggabungkan kelebihan dari kedua metode tersebut, salah satunya melalui metode *Hybrid OCV – Coulomb Counting* untuk meningkatkan akurasi estimasi SoC [12].

Meskipun metode *Coulomb Counting* maupun OCV masing-masing memiliki kelebihan tersendiri, penggunaan secara tunggal menunjukkan keterbatasan yang signifikan pada kondisi operasional dinamis. Metode *Coulomb Counting* rentan terhadap akumulasi galat integratif (*drift error*) yang berkembang seiring bertambahnya waktu operasi, sedangkan metode OCV tidak dapat digunakan secara optimal saat baterai berada dalam kondisi berbeban karena dipengaruhi oleh efek polarisasi tegangan [13]. Kondisi ini mendorong perlunya pendekatan kombinasi yang mampu memanfaatkan keunggulan kedua metode secara komplementer, sehingga estimasi SoC yang dihasilkan lebih akurat dan stabil dalam berbagai kondisi operasi baterai pada kendaraan listrik..

Mu'minatul Afifah Nusatama melakukan penelitian mengenai pemodelan dan validasi model rangkaian ekuivalen baterai LiFePO_4 pada sistem penyimpanan energi 12 V dan 24 V. Penelitian tersebut berfokus pada karakterisasi baterai dan hubungan *Open Circuit Voltage* (OCV) terhadap *State of Charge* (SoC) untuk memperoleh model yang mampu merepresentasikan karakteristik baterai secara aktual. Selanjutnya, M. Yazid melakukan penelitian mengenai analisa perbandingan pemodelan dan pengujian *Battery Management System* pada mobil listrik berbasis tegangan dan arus. Penelitian tersebut berfokus pada pemodelan dan pengujian BMS dengan fitur *State Estimation*, *State of Health* (SoH), *cell balancing*, dan *fault detection* serta membandingkan hasil simulasi dengan pengujian aktual [14], [15].

Berdasarkan penelitian terdahulu, penelitian yang dilakukan masih berfokus pada pemodelan karakteristik baterai, validasi model *Battery Management System*, serta estimasi SOC menggunakan pendekatan berbasis tegangan. Selain itu, implementasi estimasi SoC secara *real-time* menggunakan metode *Hybrid* yang menggabungkan metode OCV dan *Coulomb Counting* serta integrasinya dengan sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) masih belum menjadi fokus utama penelitian sebelumnya. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan penelitian sebelumnya dengan mengimplementasikan metode *Hybrid OCV–Coulomb Counting* berbasis mikrokontroler STM32 Nucleo pada

baterai LiFePO₄ yang digunakan pada sepeda motor listrik sebagai media uji. Metode *Coulomb Counting* digunakan untuk melakukan estimasi SoC secara kontinu, sedangkan metode OCV digunakan sebagai referensi koreksi untuk mengurangi akumulasi galat yang terjadi selama proses integrasi arus sehingga diperoleh hasil estimasi yang lebih akurat dan stabil.

Selain itu, penelitian ini juga mengintegrasikan sistem monitoring berbasis IoT menggunakan modul ESP32 sehingga parameter baterai seperti tegangan, arus, daya, dan nilai *State of Charge* dapat dipantau secara *real-time* dari jarak jauh. Pengujian dilakukan secara aktual pada kondisi *charging* dan *discharging* baterai LiFePO₄ sehingga hasil estimasi yang diperoleh dapat merepresentasikan kondisi operasi yang sebenarnya. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem estimasi *State of Charge* yang lebih andal dan aplikatif pada kendaraan listrik skala kecil, khususnya sepeda motor listrik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem estimasi *State of Charge* (SoC) menggunakan metode *Hybrid Open Circuit Voltage* (OCV) dan *Coulomb Counting* berbasis mikrokontroler STM32 Nucleo pada baterai sepeda motor listrik?
2. Bagaimana tingkat akurasi estimasi SoC yang dihasilkan oleh metode *Hybrid OCV – Coulomb Counting* selama proses pengisian dan pengosongan baterai dalam kondisi operasional?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem estimasi *State of Charge* (SoC) menggunakan metode *Hybrid Open Circuit Voltage* (OCV) dan *Coulomb Counting* berbasis mikrokontroler STM32 Nucleo pada baterai sepeda motor listrik.
2. Menganalisis tingkat akurasi estimasi SoC yang dihasilkan oleh metode *Hybrid OCV – Coulomb Counting* selama proses pengisian dan pengosongan baterai dalam kondisi operasional.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Menghasilkan sistem estimasi *State of Charge* (SoC) berbasis mikrokontroler STM32 Nucleo yang dapat diterapkan pada sepeda motor listrik sebagai media uji.
2. Memberikan pendekatan metode *Hybrid OCV – Coulomb Counting* dalam meningkatkan akurasi estimasi SoC dibandingkan dengan metode tunggal.

3. Menyediakan hasil analisis akurasi estimasi SoC selama proses pengisian dan pengosongan baterai sebagai bahan evaluasi kinerja sistem.
4. Menyediakan sistem monitoring kondisi baterai berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu menampilkan parameter tegangan, arus, dan estimasi SoC secara *real-time* dari jarak jauh, sehingga dapat mendukung kemudahan pemantauan dan pengelolaan baterai pada kendaraan listrik skala kecil.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan Batasan masalah sebagai berikut :

1. Penelitian difokuskan pada estimasi *State of Charge* (SoC) menggunakan metode *Hybrid Open Circuit Voltage* (OCV) dan *Coulomb Counting*, tanpa mencakup fungsi proteksi aktif baterai seperti *overcharge* dan *overdischarge*.
2. Sistem diimplementasikan menggunakan mikrokontroler STM32 Nucleo sebagai unit pemrosesan utama, serta ESP32 sebagai modul komunikasi untuk monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT).
3. Pengujian dilakukan pada baterai *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO₄) yang digunakan pada sepeda motor listrik sebagai media uji, tanpa merancang sistem kendaraan secara keseluruhan.
4. Parameter yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi tegangan dan arus baterai sebagai data masukan sensor, serta *State of Charge* (SoC) sebagai parameter utama yang diestimasi dan dibandingkan menggunakan tiga metode, yaitu metode *Open Circuit Voltage* (OCV), *Coulomb Counting*, dan *Hybrid OCV–Coulomb Counting*.
5. Pengujian dilakukan pada kondisi pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) sebanyak 3 siklus tanpa mempertimbangkan pengaruh temperatur secara mendalam.

1.6 Sistematika Penulisan

Proposal Penelitian ini disusun dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, Batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori pendukung yang melandasi tugas akhir ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini terdiri dari tahapan penelitian dan langkah-langkah yang diperlukan dalam penelitian.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab ini menyajikan temuan penelitian yang diperoleh serta analisis mendalam terhadap data yang dikumpulkan, dengan mengacu pada teori yang telah dibahas dalam tinjauan Pustaka untuk memperkuat argument.

BAB V PENUTUP

Pada bab ini membahas tentang simpulan dan saran terhadap penelitian yang dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

