

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan terhadap sistem estimasi *State of Charge* (SoC) baterai LiFePO₄ menggunakan metode *Hybrid Open Circuit Voltage* (OCV)–*Coulomb Counting* berbasis mikrokontroler STM32 Nucleo dengan integrasi pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT), maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem estimasi SoC berbasis metode *Hybrid OCV - Coulomb Counting* berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan mikrokontroler STM32 Nucleo dengan sensor PZEM-017 sebagai akuisisi data tegangan dan arus baterai. Sistem mampu melakukan estimasi SoC secara *real-time* pada kondisi *charging* maupun *discharging*, serta mengirimkan data hasil monitoring ke platform IoT melalui modul ESP32.
2. Pada kondisi *charging*, metode *Coulomb Counting* dan *Hybrid* menghasilkan profil kenaikan SoC yang hampir *linear* hingga mencapai 100%. Sementara itu, metode OCV menunjukkan kenaikan SoC yang lebih lambat dan sangat dipengaruhi oleh karakteristik tegangan baterai. Setelah baterai memasuki fase relaksasi, metode OCV mengalami perubahan nilai SoC akibat perubahan tegangan terminal, sedangkan metode *Hybrid* hanya mengalami perubahan kecil karena OCV digunakan sebagai koreksi terhadap estimasi utama dari *Coulomb Counting*.
3. Pada kondisi *discharging*, metode OCV menunjukkan penurunan SoC yang lebih lambat dibandingkan metode *Coulomb Counting* dan *Hybrid* akibat karakteristik *voltage plateau* baterai LiFePO₄. Setelah beban dilepas, fase relaksasi menyebabkan tegangan baterai meningkat sehingga nilai SoC hasil metode OCV ikut meningkat, sedangkan metode *Coulomb Counting* tetap konstan karena tidak terjadi lagi integrasi arus. Metode *Hybrid* mampu mengakomodasi fenomena tersebut melalui mekanisme koreksi sehingga menghasilkan estimasi yang lebih stabil.
4. Metode *Hybrid OCV - Coulomb Counting* memberikan performa estimasi SoC yang lebih baik dibandingkan metode OCV maupun *Coulomb Counting* secara terpisah. Kombinasi kedua metode mampu mengurangi *drift error* pada *Coulomb Counting* sekaligus mengurangi pengaruh perubahan tegangan akibat fase relaksasi pada metode OCV, sehingga estimasi SoC menjadi lebih representatif terhadap kondisi baterai selama proses pengisian maupun pengosongan.
5. Implementasi sistem monitoring berbasis IoT menggunakan ESP32 berhasil menampilkan parameter baterai berupa tegangan, arus, dan nilai estimasi SoC *Hybrid* secara *real-time* pada platform *Blynk* dengan interval pengiriman data

setiap 10 detik. Hasil monitoring menunjukkan bahwa komunikasi antara STM32 Nucleo dan ESP32 berjalan dengan baik tanpa kehilangan data yang berarti sehingga memudahkan proses pemantauan kondisi baterai dari jarak jauh.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan kualitas dan keberlanjutan penelitian serupa di masa mendatang, antara lain sebagai berikut.

1. Mengembangkan metode estimasi SoC dengan algoritma yang lebih adaptif, seperti *Extended Kalman Filter* (EKF) atau *Unscented Kalman Filter* (UKF), untuk meningkatkan akurasi estimasi pada kondisi operasi yang lebih dinamis.
2. Menambahkan sensor temperatur dan mempertimbangkan pengaruh suhu terhadap karakteristik baterai LiFePO₄ agar estimasi SoC menjadi lebih akurat pada berbagai kondisi lingkungan.
3. Menggunakan metode pembaruan kapasitas baterai (*capacity update*) secara adaptif sehingga estimasi *Coulomb Counting* tetap akurat meskipun terjadi penurunan kapasitas akibat proses penuaan baterai.
4. Menggunakan sensor arus dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi untuk mengurangi kesalahan pengukuran yang dapat menyebabkan *drift error* pada metode *Coulomb Counting*.
5. Mengembangkan sistem monitoring IoT dengan penambahan fitur penyimpanan data historis, notifikasi kondisi baterai, serta antarmuka pengguna yang lebih interaktif untuk mendukung implementasi pada sistem *Battery Management System* (BMS).

