

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, analisis, dan komparasi dengan penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa metode *Equivalent Circuit Model* (ECM) berhasil digunakan dalam melakukan estimasi *State of Charge* (SoC) berdasarkan penurunan kapasitas baterai yang dipengaruhi oleh konsumsi daya per detik. Selain sebagai metode estimasi, ECM juga berfungsi sebagai sistem monitoring yang mampu mendeteksi secara dini penurunan SoC yang tidak normal akibat degradasi baterai. Dengan mempertimbangkan parameter tegangan *Open Circuit Voltage* (OCV), tegangan terminal, tegangan transien, arus, resistansi internal, resistansi polarisasi, kapasitas polarisasi, suhu, dan waktu, model ECM mampu menggambarkan pola penurunan SoC secara dinamis dalam kurun waktu 600 detik maupun 3600 detik..

Selain itu, optimasi hasil estimasi *State of Charge* (SoC) menggunakan metode *Grey Wolf Optimizer* (GWO) terbukti mampu meningkatkan akurasi estimasi sehingga mendekati penurunan kapasitas baterai yang ideal. Melalui proses optimasi terhadap parameter arus dan suhu, hasil estimasi SoC yang sebelumnya mengalami penyimpangan akibat pengaruh faktor internal dan gangguan operasional dapat dikoreksi, sehingga lebih mencerminkan kondisi ideal yang diharapkan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa model *Equivalent Circuit Model* (ECM) yang telah dioptimasi dengan GWO mampu mereduksi efek gangguan internal pada baterai dengan cara mengarahkan estimasi menuju nilai SoC aktual atau ideal, serta mempertahankannya dalam rentang waktu yang ditentukan. Dengan demikian, tingkat galat (*error*) yang dihasilkan menjadi jauh lebih kecil dibandingkan estimasi tanpa optimasi. Nilai *error* yang rendah ini secara langsung meningkatkan tingkat akurasi estimasi. Peningkatan akurasi tersebut berkontribusi terhadap optimalisasi sistem manajemen baterai dalam mengatur distribusi energi, yang pada akhirnya membantu menjaga stabilitas dan efisiensi kerja baterai kendaraan listrik dalam jangka panjang.

Evaluasi akurasi estimasi *State of Charge* (SoC) telah dilakukan dengan membandingkan hasil estimasi terhadap SoC aktual menggunakan metrik evaluasi seperti RMSE, MAE, *Relative Error*, dan *R-Squared*. Hasilnya menunjukkan bahwa model *Equivalent Circuit Model* (ECM) yang dioptimasi menggunakan algoritma *Grey Wolf Optimizer* (GWO) mampu menghasilkan estimasi SoC dengan akurasi yang sangat tinggi. Pada simulasi penurunan kapasitas baterai selama 600 detik, nilai kesalahan mendekati 0% dengan tingkat akurasi mencapai 100%, jauh lebih baik dibandingkan estimasi tanpa optimasi yang hanya mencapai 93%. Sementara itu, pada durasi 3600 detik (1 jam), model menghasilkan kesalahan hanya sebesar 0,04% dengan akurasi sebesar 99,95%, juga secara signifikan lebih baik dibandingkan tanpa optimasi yang hanya memiliki akurasi 63,77%. Pencapaian ini menunjukkan bahwa ECM, selain berfungsi sebagai metode estimasi, juga efektif digunakan sebagai sistem monitoring yang mampu mendeteksi penurunan SoC secara dini dan dinamis berdasarkan parameter-parameter kelistrikan serta konsumsi daya aktual per detik. Jika terjadi penurunan SoC yang menyimpang akibat degradasi umur pakai baterai, ECM dapat mengidentifikasinya secara *real time* untuk kemudian dikoreksi melalui optimasi GWO agar kembali mendekati kondisi ideal. Selain itu, dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang hanya melaporkan tingkat kesalahan dalam rentang <1% hingga 1,84% tanpa menyajikan nilai akurasi secara spesifik, hasil penelitian ini terbukti jauh lebih presisi. Oleh karena itu, kombinasi ECM dan GWO dalam penelitian ini dapat diklaim berkontribusi signifikan dalam meningkatkan keandalan *Battery Management System* (BMS) melalui estimasi SoC yang lebih akurat, presisi, dan adaptif, sehingga mampu menjaga stabilitas, efisiensi, serta memperpanjang usia pakai baterai kendaraan listrik secara optimal.

## 5.2 Saran

Peneliti memahami dengan betul terkait kekurangan – kekurangan yang ada pada penelitian ini. Oleh karena itu, peneliti berharap nantinya di penelitian selanjutnya, baik itu dilanjutkan oleh peneliti itu sendiri atau dilanjutkan oleh

peneliti – peneliti yang lain dapat melihat dan memperhatikan aspek – aspek kekurangan dari penelitian ini. Adapun aspek – aspek tersebut, yakni:

- 1) Model estimasi SoC berbasis ECM dan GWO sebaiknya diterapkan langsung pada BMS kendaraan listrik atau diuji melalui simulasi *real-time* agar dapat mengetahui secara langsung manfaatnya dalam meningkatkan stabilitas, efisiensi, dan keamanan baterai dalam jangka panjang.
- 2) Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji model estimasi SoC ini pada berbagai kondisi operasional, seperti perubahan suhu ekstrem, variasi beban, dan siklus pengisian daya, guna memastikan keandalan metode dalam berbagai skenario penggunaan.
- 3) Penggunaan metode optimasi lain, seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) atau *Genetic Algorithm* (GA), dapat dieksplorasi untuk membandingkan performa dengan GWO dan meningkatkan akurasi serta efisiensi estimasi SoC lebih lanjut..

