

Simulasi Sistem Estimasi SoC Baterai Lithium-Ion Dengan Metode Coulomb Counting Pada Kendaraan Listrik Menggunakan Matlab

Junihot Hutasoit¹, Muhammad Irwanto²

^{1,2} Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Prima Indonesia, Jl. Sampul No.3 Medan, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: April 02,26
Revised: April 23, 26
Available online: April 03, 26

KEYWORDS

Baterai, State of Charge (SOC), Coulomb Counting, MATLAB/Simulink, Estimasi Energi

CORRESPONDENCE

Phone : +62 822-6027-4205
E-mail: junihothutasoitjunihot@gmail.com

A B S T R A C T

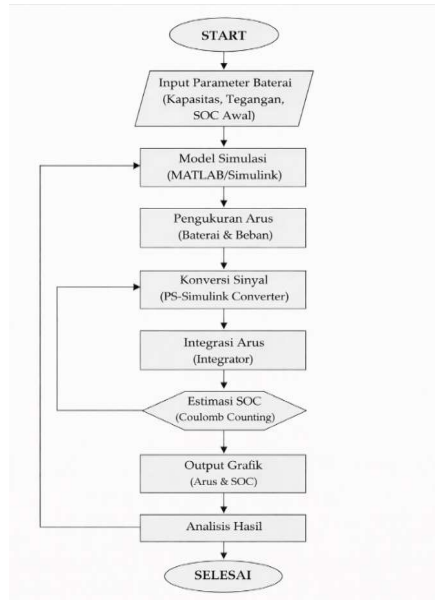
Penelitian ini mengeksplorasi kinerja sistem penentuan State of Charge (SoC) pada baterai 72 V 25 Ah dengan menerapkan teknik Coulomb Counting yang diolah menggunakan ATLAB/Simulink. Simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa metode ini mencapai tingkat akurasi yang memuaskan di dalam kondisi optimal. Dalam skenario pertama, ketika arus yang dialirkan 10 A selama satu jam, nilai SoC mengalami penurunan dari 100% menjadi 60%, menghasilkan penurunan sebesar 40%, yang sejalan dengan hasil penghitungan teoritik. Selain itu, grafik tegangan pada baterai menunjukkan penurunan 84 V hingga hampir mencapai tingkat batas cut off, dengan pola penurunan yang semakin tajam ketika kapasitas mendekati akhir. Pada skenario kedua, dimana arus yang di terima bervariasi antara 1 A hingga 10 A (dengan rata-rata 5,5 A), SoC berkurang sekitar 44% dalam jangka waktu 2 jam atau setara dengan 22% per jam. Dengan mempertimbangkan kondisi tersebut, perkiraan durasi penggunaan baterai sebelum SoC mencapai 0% adalah sekitar 4,55 jam. Temuan ini menunjukkan bahwa metode Coulomb Counting dapat memberikan estimasi SoC yang tetap konsisten dan linear meskipun arus beban berfluktuasi. Secara keseluruhan, model yang dihasilkan dapat dengan baik mencerminkan karakteristik pemakaian baterai secara dinamis, yang membuat metode ini cocok digunakan sebagai dasar untuk sistem manajemen baterai

PENDAHULUAN

Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi kendaraan listrik, baterai lithium-ion telah menjadi komponen kunci dalam sistem penyimpanan energi. Untuk menjaga agar sistem tetap berjalan dengan baik dan aman, penting untuk mengetahui jumlah energi yang tersisa di dalam baterai, yang dikenal sebagai *State of Charge* (SoC). SoC menunjukkan perbandingan antara energi yang tersisa dengan kapasitas maksimum baterai [1][2]. Informasi mengenai SoC sangat penting dalam pengoperasian kendaraan listrik karena menentukan jarak tempuh kendaraan sebelum dilakukan pengisian ulang. Perkiraan SoC yang tidak akurat dapat menyebabkan berbagai permasalahan, seperti kehabisan daya secara tiba-tiba (*range anxiety*), kerusakan baterai akibat pengisian atau pengosongan daya yang ekstrem, serta ketidakakuratan dalam sistem prediksi jarak tempuh kendaraan [3][4]. Baterai lithium-ion merupakan bagian penting dari kendaraan listrik karena memiliki kepadatan energi yang tinggi, efisiensi yang baik, serta bobot yang relatif ringan [2]. Namun, nilai SoC tidak dapat diukur secara langsung, sehingga perlu dilakukan estimasi berdasarkan parameter yang dapat diukur, seperti arus dan tegangan selama proses pengoperasian baterai [1][5]. Salah satu metode yang umum digunakan adalah metode *Coulomb Counting*, yang merupakan metode sederhana dan efisien untuk memperkirakan nilai SoC dengan menghitung akumulasi arus yang masuk dan keluar dari baterai selama periode waktu tertentu [5][6].

METODE PENELITIAN

Metode penelitian kuantitatif yang menggunakan simulasi, melibatkan pemanfaatan perangkat lunak MATLAB untuk simulasi angka. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menghitung dan menilai *State of Charge* (SoC) pada baterai lithium-ion di kendaraan listrik dengan menerapkan metode Coulomb Counting yang berdasarkan pada data arus listrik dari baterai [4][5][8].



Gambar 1. Diagram alir estimasi state of charge (SOC) baterai

2.1 United MX1200 Lithium-Ion

Baterai lithium-ion adalah elemen penting dalam kendaraan listrik, menyimpan dan menyediakan energi. Teknologi ini memiliki manfaat energi tinggi, efisiensi baik, dan umur panjang. Komponennya termasuk katoda, anoda, elektrolit, dan separator, namun juga rentan terhadap kerusakan dan memerlukan perlindungan.

2.2 Konfigurasi Sistem Baterai

Konfigurasi baterai lithium 72V dan 25Ah terdiri dari sambungan seri dan paralel. Setiap sel memiliki tegangan maksimum 4,2V dan minimum 3,0V, dengan tegangan nominal 3,6V. Terdapat 20 sel dalam susunan seri, cocok untuk kendaraan listrik dan penyimpanan energi. Sistem energi baterai dihitung menggunakan persamaan:

$$E = V \times Ah$$

$$E = 72 \times 25 \approx 1800 Wh$$

Dengan perhitungan yang didapat dari 20 per sel yaitu dari:

$$N = \frac{72}{3,6} \text{ yaitu hasil nya } N = 20 \text{ sel}$$

Tegangan maksimum didapatkan dari:

$$max = N \times V_{max_cell}$$

$$max = 20 \times 4,2 = 84 V$$

Dan tegangan minimum sebesar 60 V. Dari persamaan:

$$V_{min} = N \times V_{min_cell}$$

$$V_{min} = 20 \times 3,0 = 60$$

Tabel 1. Spesifikasi Baterai *Lithium-ion*

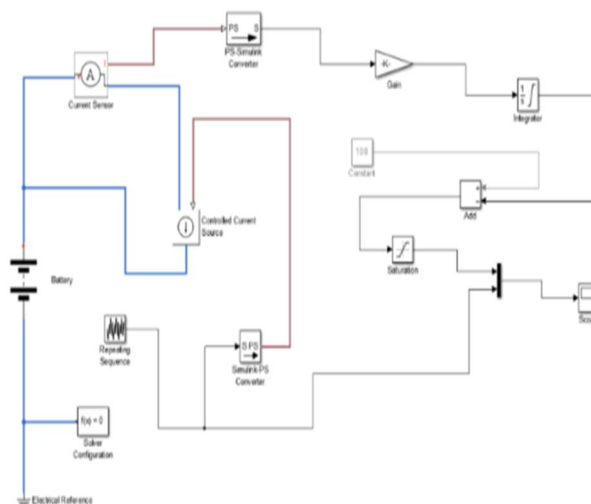
Parameter	Nilai
Model Motor	United MX1200 Lithium-ion
Kapasitas(A_h)	25
SOC State of Charge Maksimal (%)	100
Tegangan nominal (V)	72
Batas SOC minimum (%)	20
Tegangan Maksimum (V)	84
Tegangan Minimum (V)	60

2.3 Penyusunan Rangkaian Simulasi Estimasi SOC

Sistem simulasi ini menggambarkan proses pengosongan baterai dengan beban yang berubah-ubah dan memperkirakan State of Charge (SoC) menggunakan metode Coulomb Counting. Menggabungkan Simscape dan Simulink, model ini memiliki baterai, sensor arus, dan sumber arus terkendali. Variasi arus dibuat dan diteruskan ke domain fisik, serta hasil SoC ditampilkan melalui blok scope dengan multiplexer untuk visualisasi.

Hubungan matematis yang digunakan adalah:

$$SOC = SOC_{awal} - \frac{1}{C} \int I dt$$



Gambar 2. Rangkaian gambar di *simulink*

a. Konfigurasi Blok Simulink

Untuk melaksanakan perkiraan sesuai dengan spesifikasi baterai yang telah diuji, parameter pada diagram blok Simulink diatur sebagai berikut:

b. Blok Konstan (SOC Awal)

Memiliki nilai 100, yang menunjukkan bahwa baterai dalam keadaan terisi penuh pada awal pengujian.

c. Blok Integrator

Digunakan untuk menghitung total arus (A) sehubungan dengan waktu (s). Output dari blok ini mencerminkan jumlah total muatan yang dikeluarkan dalam Coulomb.

d. Blok Add/Subtract

Bertujuan untuk menurunkan nilai SOC awal (100%) dengan nilai daya yang telah diproses oleh blok Gain.

e. Blok Gain (Konversi Satuan)

Mengingat kapasitas baterai dinyatakan dalam Ampere-jam (Ah) sementara simulasi berlangsung dalam detik, diperlukan faktor konversi.

Nilai Gain dihitung dengan rumus:

$$Gain = \frac{100}{C_{Ah} \times 3600}$$

Kapasitas baterai 25 Ah, maka nilai Gain yang dimasukkan adalah:

$$Gain = \frac{100}{25 \times 3600} \approx 0,001111$$

f. Pengertian State of Charge (SoC)

State of Charge (SoC) adalah ukuran proporsi energi yang masih ada di baterai, dari 0% (habis) hingga 100% (penuh). Dalam kendaraan listrik, SoC penting untuk memantau baterai dan mengestimasi sisa energi. Data SoC juga digunakan oleh Sistem Manajemen Baterai (BMS) untuk kinerja dan keselamatan baterai. Nilai SoC ditentukan dengan rumus matematis tertentu.

g. Rumus dasar SoC Dihitung dengan persamaan:

$$SOC(t) = SOC_{initial} - \left(\frac{1}{C_{nom}} \int_{t_0}^t I(t) dt \right) \times 100\%$$

Dimana :

$SOC(t)$ = Nilai SOC pada waktu t (%).

$SOC_{initial}$ = Nilai SOC awal (100%).

$I(t)$ = Arus pengosongan baterai (Ampere).

C_n = Arus pengosongan baterai (Ampere).

t = Waktu simulasi (detik).

h. Metode Coulomb Counting

Metode Coulomb Counting adalah menghitung perubahan SoC. Dimana Metode Coulomb Counting digunakan untuk menentukan Status Pengisian baterai dengan menghitung integral arus yang mengalir baik keluar maupun masuk ke dalam baterai seiring waktu dan kemudian dinormalisasi terhadap kapasitas baterai. Metode ini dijelaskan dengan.

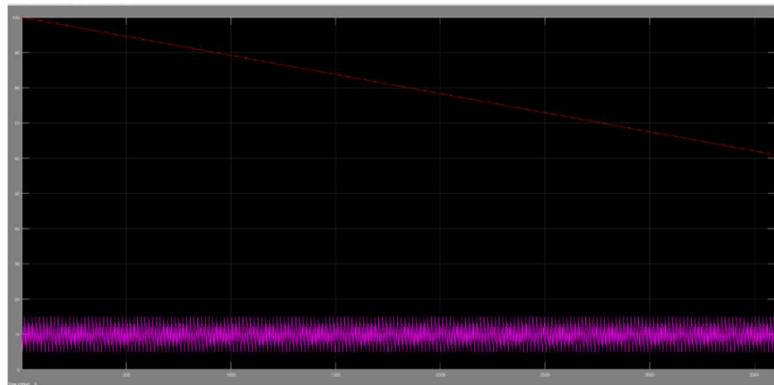
$$\text{Rumusnya: } SOC(t) = SOC(0) - \frac{1}{C} \int I(t)dt$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang terdapat dalam bagian ini adalah hasil pengamatan secara langsung dari grafik hasil pada blok Scope Simulink, yang mencakup parameter arus pelepasan dan persentase energi sisa baterai. Selain penyajian data secara visual, bagian ini juga akan menyertakan validasi matematis untuk membandingkan hasil simulasi dengan perhitungan teori untuk memastikan tingkat keakuratan model yang telah dibuat.

3.1 Hasil Keluaran SOC Baterai Dan Arus

Data yang terdapat dalam bagian ini adalah hasil pengamatan secara langsung dari grafik hasil pada blok Scope Simulink, yang mencakup parameter arus pelepasan dan persentase energi sisa baterai. Selain penyajian data secara visual, bagian ini juga akan menyertakan validasi matematis untuk membandingkan hasil simulasi dengan perhitungan teori untuk memastikan tingkat keakuratan model yang telah dibuat. Pada fase ini, pengujian dilakukan terhadap model estimasi State of Charge (SOC) dengan memanfaatkan metode Coulomb Counting yang telah direncanakan. Uji coba dilakukan dengan menerapkan beban arus dinamis selama waktu 3600 detik (1 jam) untuk menganalisis ketepatan pengurangan nilai kapasitas baterai sebesar 25 Ah. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada Gambar dibawah.

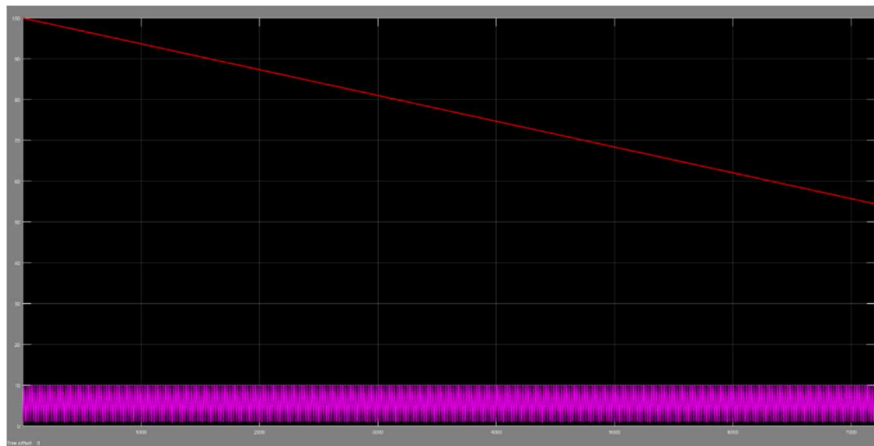


Gambar 3. Grafik hubungan SOC dan arus terhadap waktu dengan durasi 1 jam

Berdasarkan pada gambar 3 sumbu y (Vertikal) mencerminkan dua variabel secara bersamaan. State of Charge (SoC) dalam persentase (%), yang berkisar antara sekitar 60% hingga 100%. Sumbu X (Horizontal) menggambarkan durasi simulasi dalam detik (s). Rentang waktu yang ditampilkan pada grafik berkisar antara 0 hingga sekitar 3600 detik, yang menunjukkan bahwa simulasi berlangsung selama satu jam penggunaan kendaraan. Beban arus dinamis yang diterapkan menunjukkan nilai rata-rata sebesar 10 A. Dengan kapasitas baterai yang dinyatakan sebesar 25 Ah, secara teoritis baterai diharapkan dapat memberikan daya selama 2,5 jam hingga mencapai Total Discharge (SOC 0%). Grafik simulasi selama satu jam pertama (3600 detik) mengonfirmasi hal ini, di mana SOC menurun sebesar 40% (dari 100% menjadi 60%). Apabila penurunan ini berlangsung dengan konsisten sebesar 40% per jam, maka sisa kapasitas baterai yang menyisakan 60% akan habis dalam waktu 1,5 jam yang tersisa, sehingga total waktu penggunaan baterai adalah tepat 2,5 jam. Temuan ini menggaris bawahi bahwa model Coulomb Counting yang dikembangkan menunjukkan linieritas yang tinggi dalam memperkirakan daya tahan baterai. Dilihat dari sinyal magenta (arus), nilai tersebut berosilasi (naik-turun) di antara 5 A dan 15 A. Maka hasil perhitungannya

3.2 Hasil ke Dua Keluaran SOC Dan Arus

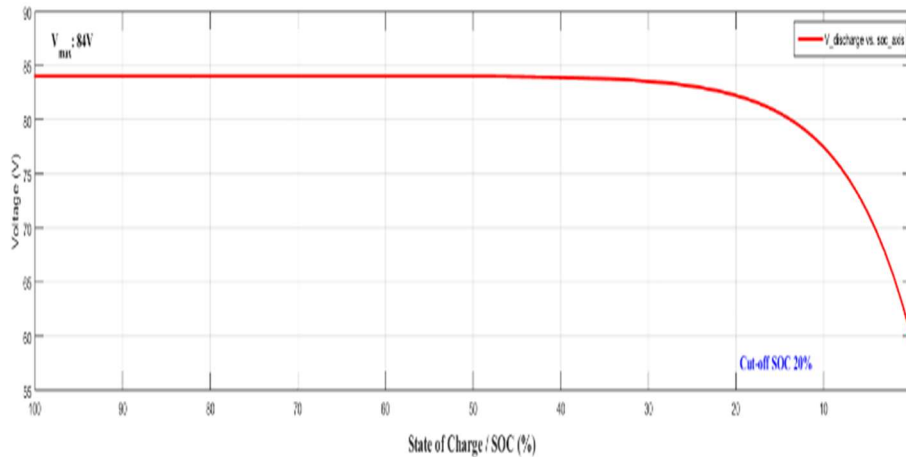
Berdasarkan Gambar 3 hasil uji coba dengan variasi arus beban antara 1 hingga 10 A (dengan rata-rata 5,5 A) menunjukkan sifat arus yang berubah-ubah dan mencerminkan kondisi pemakaian yang sesungguhnya. Meskipun ada variasi arus, sistem mampu memberikan respons yang baik melalui bagian integrator dalam menghitung perubahan beban baterai. Selama periode simulasi yang berlangsung selama 2 jam, kapasitas baterai mengalami penurunan sebanyak 44% atau sekitar 22% setiap jam. Berdasarkan pola yang ada, perkiraan durasi penggunaan baterai hingga keadaan SoC mencapai 0% adalah sekitar 4,55 jam (sekitar 4 jam 33 menit), yang berarti baterai masih dapat berfungsi lebih dari 4 jam dalam kondisi beban yang bervariasi. Analisis dari grafik memberikan informasi mengenai hubungan antara SoC dan arus seiring berjalannya waktu, di mana sumbu X menunjukkan waktu (0 hingga 7200 detik), sementara sumbu Y merepresentasikan nilai SoC (%) dan arus (A). Kurva SoC (berwarna merah) menunjukkan penurunan bertahap dari 100% menjadi sekitar 56% dengan pola yang cenderung linier, yang mengindikasikan proses pengurasan yang stabil. Di sisi lain, kurva arus (berwarna ungu) menunjukkan variasi dalam kisaran tertentu, namun tetap stabil secara keseluruhan



Gambar 4. Grafik hubungan SOC dan arus terhadap waktu dengan durasi 2 jam

3.3 Kurva Tegangan Terhadap SoC

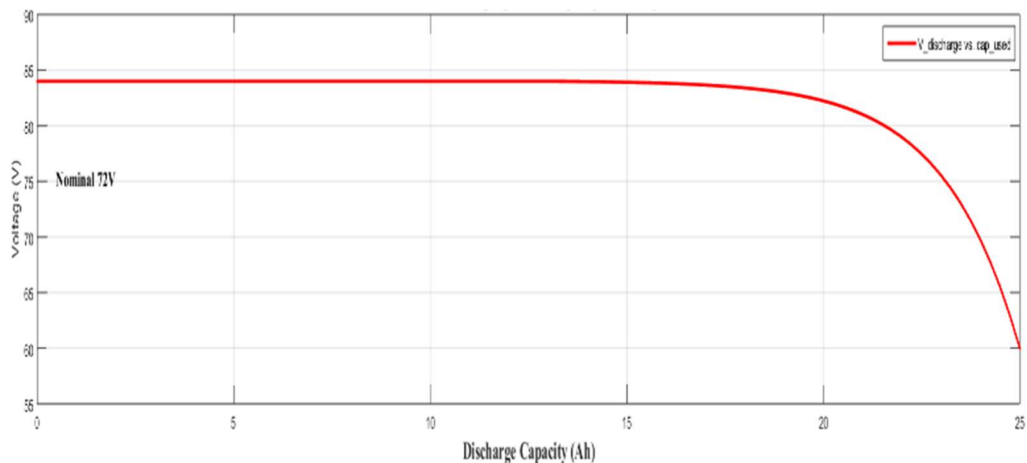
Berdasarkan Gambar 4 diperlihatkan hubungan antara tegangan baterai dengan State of Charge (SOC) saat proses pelepasan energi (discharge). Pada kondisi awal, ketika SOC mencapai 100%, tegangan baterai mencapai nilai puncak sebesar 84 V, yang sesuai dengan hasil kalkulasi tegangan maksimum dari konfigurasi 20 sel secara seri. Sejalan dengan menurunnya nilai SOC, tegangan baterai cenderung mengalami penurunan secara perlahan. Pada rentang SOC yang tinggi hingga menengah (sekitar 100% hingga 30%), penurunan tegangan berlangsung cukup datar. Ini menunjukkan ciri baterai lithium-ion yang memiliki stabilitas tegangan pada sebagian besar kapasitasnya. Akan tetapi, saat SOC mendekati batas bawah (di bawah 20%), terdapat penurunan tegangan yang cukup drastis (tajam). Kondisi ini menunjukkan bahwa baterai telah memasuki fase kritis dalam pelepasan energi, di mana tegangan turun dengan cepat hingga mencapai batas minimum sekitar 60 V. Oleh karena itu, pada sistem ini diterapkan batas cut-off SOC sebesar 20% untuk mencegah over discharge yang dapat merusak baterai.



Gambar 5. Kurva tegangan terhadap SOC

3.4 Kurva Tegangan Terhadap Kapasitas Terpakai

Pada Gambar 5, ditunjukkan hubungan antara tegangan baterai terhadap kapasitas yang telah digunakan (discharge capacity). Grafik menunjukkan bahwa pada awal penggunaan (0 Ah), tegangan berada pada kondisi maksimum sekitar 84 V, kemudian mengalami penurunan secara perlahan seiring bertambahnya kapasitas yang terpakai. Pada rentang kapasitas rendah hingga menengah (0–20 Ah), tegangan relatif stabil di sekitar tegangan nominal sistem, yaitu sekitar 72 V. Hal ini menunjukkan bahwa baterai mampu mempertahankan performa tegangan yang stabil selama sebagian besar siklus penggunaannya. Namun, ketika kapasitas yang digunakan mendekati nilai maksimum (sekitar 20–25 Ah), tegangan mengalami penurunan drastis hingga mendekati 60 V. Kondisi ini mengindikasikan bahwa energi yang tersisa dalam baterai sudah sangat sedikit dan sistem mendekati batas operasional minimum



Gambar 6. Kurva tegangan terhadap kapasitas terpakai

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan simulasi terhadap sistem estimasi State of Charge (SoC) baterai 72V 25Ah dengan menggunakan metode Coulomb Counting, ditemukan bahwa metode ini sangat akurat dalam kondisi ideal. Ini terlihat dari penurunan SoC sebesar 40% (dari 100% menjadi 60%) dalam satu jam pada arus 10 A, yang sesuai dengan perhitungan teoritis. Profil tegangan baterai juga menunjukkan penurunan dari 84 V hingga mendekati batas cut-off, dengan karakteristik penurunan yang semakin tajam ketika kapasitas mendekati habis. Dalam kondisi beban yang dinamis dengan arus antara 1–10 A (rata-rata 5,5 A), SoC turun sebesar 44% dalam dua jam atau sekitar 22% per jam, dengan estimasi waktu penggunaan hingga SoC mencapai 0% sekitar 4,55 jam. Temuan ini mengindikasikan bahwa metode Coulomb Counting dapat memberikan estimasi SoC yang konsisten meskipun terjadi fluktuasi arus. Secara keseluruhan, sistem yang telah dikembangkan dapat mewakili karakteristik baterai lithium-ion dengan baik dan sangat efektif untuk analisis kinerja baterai pada kendaraan listrik

REFERENSI

- [1] Zhang, Y., Wang, C., & Chen, Z. (2023). Estimasi *state of charge* baterai lithium-ion menggunakan metode pembelajaran mendalam dan penyaringan adaptif. *Journal of Energy Storage*, 58, 106303. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106303>
- [2] Chen, Z., Sun, F., & Moura, S. (2022). Estimasi kondisi baterai untuk kendaraan listrik: Tinjauan algoritma tingkat lanjut. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(2), 1502–1520. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3113145>
- [3] Hu, X., Jiang, J., Cao, D., & Egardt, B. (2021). Prediksi kesehatan baterai untuk kendaraan listrik menggunakan metode berbasis data. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(4), 2340–2351. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3113145>
- [4] Liu, K., Li, K., & Peng, Q. (2020). Tinjauan singkat tentang teknologi kunci dalam sistem manajemen baterai kendaraan listrik. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6, 719014. <https://doi.org/10.3389/fmech.2021.719014>
- [5] Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Hussain, A., & Mohamed, A. (2023). Tinjauan estimasi *state of charge* baterai lithium-ion dan sistem manajemennya dalam aplikasi kendaraan listrik. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113070. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113070>
- [7] Rahman, M. M., Anwar, S., & Izadian, A. (2022). Estimasi *state of charge* baterai lithium-ion secara *online* menggunakan pendekatan berbasis data. *Energies*, 15(3), 1023. <https://doi.org/10.3390/en15031023>
- [8] Xiong, R., Li, L., & Tian, J. (2020). Menuju sistem manajemen baterai yang lebih cerdas: Tinjauan kritis metode estimasi *state of charge*. *Journal of Power Sources*, 438, 226857. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226857>
- [9] Zhang, L., Wang, Z., & Chen, Y. (2021). Estimasi *state of charge* baterai lithium-ion menggunakan metode *Coulomb Counting* yang ditingkatkan. *Journal of Energy Storage*, 41, 102914. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102914>