

Implementasi Algoritma *Coulomb Counting* sebagai Estimasi SoC dan Sistem Proteksi pada Baterai *Lead-Acid*

Muhammad Ryan Candriansyah¹, Toto Tohir²,
Sofyan Muhammad Ilman^{3*}, Febi Ariefka Septian Putra⁴

^{1,2,3,4}Politeknik Negeri Bandung

Jalan Geger Kalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kab. Bandung Barat 40559, Indonesia
sofyan.muhammad@polban.ac.id

Abstrak

Baterai *Lead-Acid* merupakan pilihan umum di berbagai sektor karena biayanya yang ekonomis dan kemampuannya untuk menyediakan arus tinggi, meskipun memiliki kelemahan berupa kerentanan terhadap kerusakan akibat pengisian daya yang berlebihan (*Overcharging*) atau pengosongan daya yang terlalu rendah (*Overdischarging*). Sistem dikembangkan yang mana penelitian bertujuan untuk medesain serta mengaplikasikan sistem manajemen baterai *Lead-Acid* melalui pendekatan estimasi *State of Charge* (SOC) berbasis *Coulomb Counting*. Metode ini mengakumulasi arus masuk dan keluar yang berasal dari baterai seiring waktu. Sistem ini juga dilengkapi *Battery Management System* (BMS) dikembangkan pada penelitian ini mampu memonitoring parameter penting seperti arus, tegangan, dan suhu baterai. Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil menjalankan fungsi proteksi dengan baik, yaitu menghentikan proses pengisian saat tegangan melebihi 14,5 V, memutus proses pengosongan saat tegangan turun di bawah 11,5 V, serta menghentikan operasi saat suhu baterai melebihi 40°C. Selain fungsi proteksi, sistem ini juga dilengkapi dengan algoritma SoC berbasis *Coulomb Counting*. Hasil estimasi SoC dari sistem ini menghasilkan akurasi sebesar 95% yang dibandingkan dengan alat *Coulomb Meter* sebagai referensi, dengan rata-rata *error* kurang dari 5%. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya mampu meningkatkan perlindungan dan memperpanjang umur baterai, tetapi juga memberikan solusi pemantauan baterai yang andal dan aplikatif, baik untuk kendaraan listrik, sistem penyimpanan energi, maupun perangkat cadangan daya di Indonesia.

Kata kunci: Baterai *Lead-Acid*, *Coulomb Counting*, *State of Charge*, *Battery Management System*.

Abstract

Lead-acid batteries are widely used across various sectors due to their cost-effectiveness and ability to deliver high current, despite their susceptibility to degradation caused by overcharging or excessive discharging (overdischarging). This study aims to design and implement a lead-acid battery management system using a State of Charge (SoC) estimation approach based on the Coulomb Counting method. This method estimates SoC by accumulating the charging and discharging currents of the battery over time. The developed system incorporates a Battery Management System (BMS) capable of monitoring critical parameters, including battery current, voltage, and temperature. Based on experimental results, the system successfully performs protection functions by terminating the charging process when the voltage exceeds 14.5 V, disconnecting the discharging process when the voltage drops below 11.5 V, and shutting down operation when the battery temperature exceeds 40°C. In addition to the protection features, the system integrates a Coulomb Counting-based SoC estimation algorithm. The SoC estimation results demonstrate an accuracy of 95% when compared with a Coulomb meter used as a reference, with an average error of less than 5%. Therefore, the proposed system not only enhances battery protection and extends battery lifespan but also provides a reliable and practical battery monitoring solution for electric vehicles, energy storage systems, and backup power applications in Indonesia.

Keywords: *Lead-Acid battery, Coulomb Counting, State of Charge, Battery Management System.*

I. PENDAHULUAN

Dalam perkembangan teknologi penyimpanan energi, baterai telah menjadi komponen penting di

berbagai sektor, seperti kendaraan bermotor, sistem cadangan daya (UPS), hingga pembangkit energi terbarukan [1]. Baterai berfungsi sebagai sumber daya utama maupun cadangan untuk memastikan sistem tetap berjalan saat suplai listrik utama terganggu. Salah satu jenis baterai yang paling umum digunakan adalah baterai *Lead-Acid*. Keunggulannya terletak dari biaya yang relatif murah, ketersediaannya yang melimpah, dan kemampuannya untuk menyediakan arus tinggi[2]. Selain itu, teknologi baterai ini telah berkembang sehingga tetap relevan untuk aplikasi modern meskipun usianya sudah lebih dari satu abad. Namun, yang menjadi masalah dan tantangan pada pengaplikasian baterai *lead acid* adalah kerusakan yang diakibatkan oleh pengisian daya berlebih (*Overcharging*) atau pengosongan daya berlebih (*OverDischarging*) [3],[4]. Jika tidak dikendalikan, proses pengisian daya yang tidak terkontrol dapat memperpendek umur baterai, mengurangi kapasitas penyimpanan energi, dan bahkan menyebabkan kerusakan permanen.

Kondisi tersebut menunjukkan perlunya solusi berbasis teknologi untuk memantau dan mengelola kondisi baterai secara optimal. Untuk mengatasi masalah tersebut, diperlukan sistem monitoring berbasis teknologi yang dapat memantau kondisi baterai secara akurat. Salah satu parameter kunci yang perlu dimonitor adalah *State of Charge*(SOC) [5],[6], yaitu indikator yang menggambarkan tingkat pengisian baterai relatif terhadap kapasitas maksimumnya [7]. Status pengisian baterai *Lead-Acid* perlu dipantau secara akurat untuk mencegah kerusakan selama proses pengisian. Pemantauan ini membutuhkan sensor arus dan tegangan dengan tingkat akurasi tinggi guna mencegah kerusakan sistem, *Overcharge* dan *Overdischarge* mengakibatkan kerusakan pada baterai [8]. SoC juga memberikan informasi mengenai kondisi baterai persentase pengisian, sehingga proses pengisian dan pengosongan baterai berlangsung pada tingkat yang sesuai untuk menjaga kinerja baterai tetap stabil dan tahan lama [9],[10]. Selain itu, penting juga diterapkannya *Battery Managemen System* (BMS) pada baterai, yang berfungsi untuk manajemen sel baterai melalui pengamatan terhadap tegangan, suhu, dan arus [11],[12]. Tanpa estimasi SOC, pengguna tidak dapat mengetahui kondisi internal baterai dengan baik, yang berpotensi menyebabkan keputusan pengisian atau pengosongan daya yang salah. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa pemantauan SOC secara akurat. Salah satu metode yang dianggap aplikatif dan mudah diimplementasikan pendekatan Coulomb Counting dilakukan dengan menghitung total muatan listrik yang mengalir masuk maupun keluar dari baterai

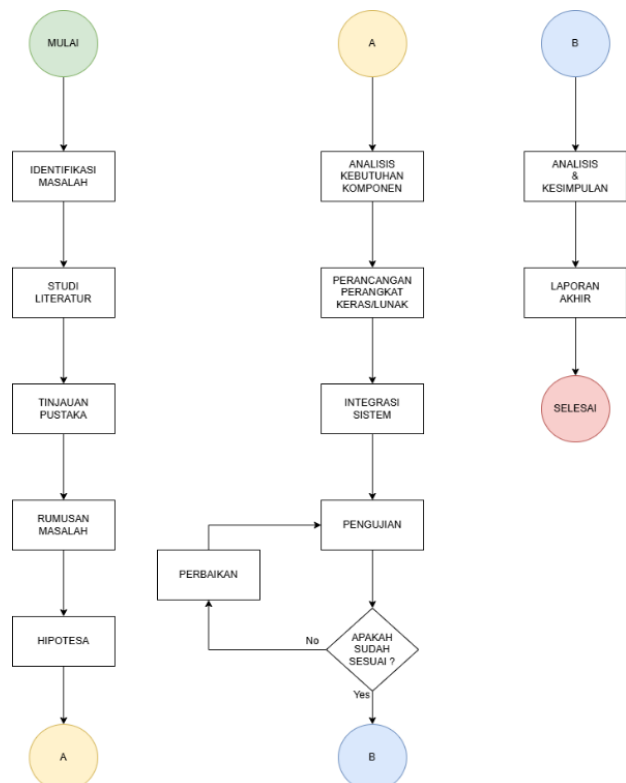
sebagai dasar penentuan SoC. [13], [14]. Dengan pendekatan ini, pengguna dapat memantau kapasitas baterai dengan lebih efisien dan mengurangi risiko kerusakan akibat pengelolaan daya yang tidak terkontrol. Selain kemudahan implementasinya, metode ini juga menawarkan tingkat akurasi yang memadai, menjadikannya pilihan yang ideal untuk berbagai aplikasi, termasuk kendaraan bermotor, sistem penyimpanan energi, dan perangkat cadangan daya [15].

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan algoritma *Coulomb Counting* sebagai metode estimasi SoC pada baterai *Lead-Acid* dan adanya Sistem Proteksi pada Baterai untuk mencegah kerusakan. Target akurasi estimasi ditetapkan minimal 95%, yang kemudian dibandingkan dengan pembacaan dari *Coulomb Meter* sebagai alat referensi. Sistem yang dirancang diharapkan mampu memantau kapasitas baterai secara akurat, menghindari kerusakan akibat pengisian daya yang tidak terkontrol, meningkatkan efisiensi pengelolaan energi baterai, dan sistem proteksi pada baterai jenis *Lead-Acid*. Estimasi SoC akan ditampilkan secara *real time* pada *Organic Light-Emitting Diode* (OLED).

II. METODE PENELITIAN

A. Tahapan Perencanaan

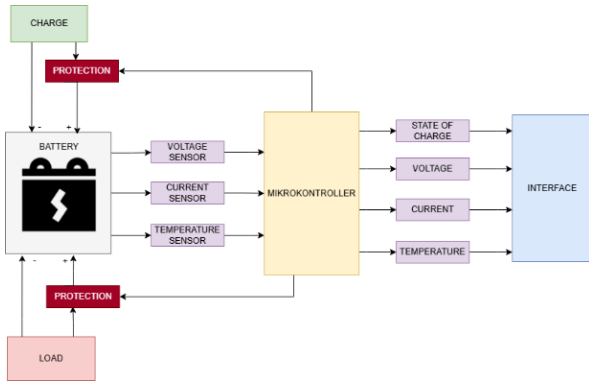
Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan mencakup Identifikasi Masalah dan Studi Literatur hingga terbentuknya Penelitian.



Gambar 1. Tahapan Perencanaan

B. Deskripsi Kerja Sistem

Pada penelitian ini, merupakan deskripsi kerja sistem secara keseluruhan.



Gambar 2. Arsitektur Sistem Keseluruhan

Sistem yang terdapat pada Gambar 2 terdiri dari beberapa komponen yaitu, sensor, mikrokontroler, proteksi, dan antarmuka tampilan. Sensor arus, tegangan, dan suhu digunakan untuk memonitoring status baterai secara *real-time*. Data dari sensor dikirim ke mikrokontroler untuk menghitung nilai SoC menggunakan metode *Coulomb Counting*. Jika terdeteksi kondisi tidak normal seperti tegangan melebihi 14,5 V, tegangan turun di bawah 11,5 V, atau suhu melebihi 40°C, maka sistem proteksi akan aktif dan memutuskan arus dari *charger* atau beban. Seluruh data seperti SoC, tegangan, arus, dan suhu ditampilkan melalui layar TFT 1,8 inci agar mudah dipantau oleh pengguna.

C. Spesifikasi Sistem

Berikut merupakan spesifikasi dari BMS yang ditampilkan pada Tabel 1. Spesifikasi ini meliputi Mikrokontroler, sensor, serta komponen-komponen lain yang digunakan.

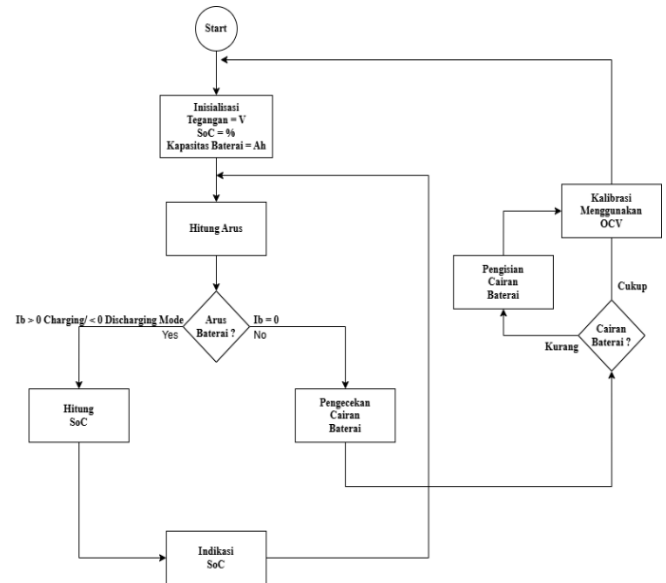
Tabel 1. Spesifikasi Sistem

No	Komponen & Software	Keterangan
1	Arduino Nano	Mikrokontroler berfungsi untuk mengolah data dari sensor, estimasi SoC dengan metode <i>Coulomb Counting</i> , Sistem Proteksi, serta memberikan logika kontrol[17].
2	Modul INA 219	Modul yang digunakan untuk membaca tegangan dan arus. Tegangan input maksimum : 26V Arus Maksimum : ±3,2A
3	Baterai	Jenis : <i>Lead-Acid</i> Tegangan Maksimum Charging : 14,50 V

		Tegangan Maksimum setelah Charging : 12,8 V Tegangan Minimum : 11,50 V
4	NTC Thermistor	Sensor yang digunakan untuk mendeteksi suhu pada baterai.
5	Fitur Proteksi	- <i>Overcharge</i> - <i>Overdischarge</i> - <i>Overheating</i>
6	Interface	TFT 1,8inch
7	Dummyload	Beban dengan spesifikasi 120Watt, 6 Ω.

D. Coulomb Counting

Berikut merupakan flowchart dari sistem estimasi SoC dengan metode *Coulomb Counting*.



Gambar 3. Proses Estimasi SoC Metode *Coulomb Counting*

Pada gambar 3 menunjukkan bahwa estimasi SoC dengan metode *Coulomb Counting* diawali dengan inisialisasi parameter, yaitu tegangan baterai, kapasitas dalam ampere-jam (Ah), dan persentase awal SoC. Selanjutnya, sistem mengukur arus yang masuk dan keluar dari baterai [18].

a. Proses *Charging*

$$SoC(t) = SoC(t - 1) + \int_0^t \frac{-I * dt}{Cnom} * 100\% \quad (1)$$

b. Proses *Discharging*

$$SoC(t) = SoC(t - 1) + \int_0^t \frac{I * dt}{Cnom} * 100\% \quad (2)$$

c. Estimasi SoC per detik

$$\Delta SoC = \frac{I * dt}{Cnom} * 100\% \quad (3)$$

Dimana:

SoC(t) = SoC saat ini (%)

SoC(t-1) = SoC sebelumnya (%)

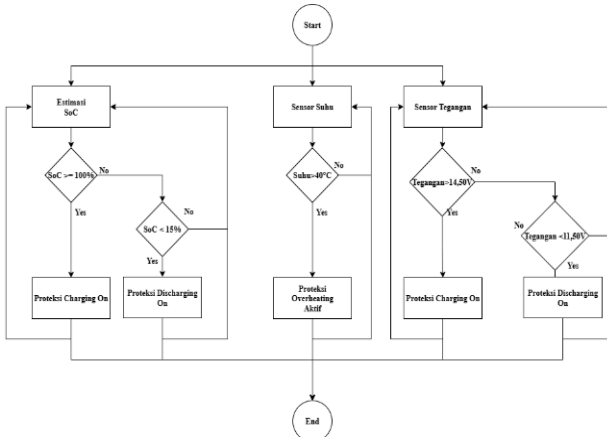
- I = Arus listrik terukur yang masuk atau keluar pada baterai (A)
- Jika I bernilai positif, maka baterai sedang diisi (*charging*)
- Jika I bernilai negatif, maka baterai sedang digunakan (*discharging*)

Cnom = Kapasitas nominal baterai (Ah)

Ketidakesuaian nilai kapasitas nominal baterai (Cnom) dengan kapasitas aktual dapat menyebabkan estimasi *State of Charge*(SOC) menjadi tidak akurat [19],[20].

E. Desain Algoritma Proteksi

Berikut merupakan flowchart dari desain Algoritma Proteksi.



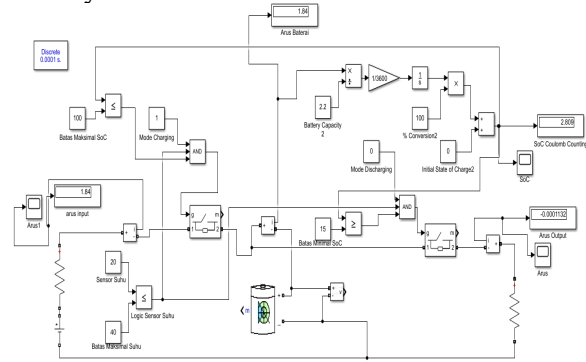
Gambar 4. Sistem Proteksi

Pada Gambar 4 menunjukkan Sistem proteksi dirancang untuk menjaga keamanan baterai dengan mencegah kondisi seperti *Overcharge*, *overdischarge*, dan *Overheating*. Mikrokontroler mengontrol MOSFET sebagai saklar otomatis untuk memutus atau menghubungkan arus sesuai kondisi baterai [21]. Jika SoC turun di bawah 15%, proteksi *Overdischarge* akan aktif. Saat SoC mencapai 100%, sistem akan mencegah pengisian lebih lanjut. Jika suhu melebihi 40°C, proteksi pengisian dan pengosongan diaktifkan bersamaan guna mencegah kerusakan. Sistem ini juga dapat diintegrasikan dengan algoritma pemantauan agar efisiensi dan umur baterai lebih optimal.

F. Perancangan Sistem Keseluruhan pada Simulasi Matlab

Simulasi kerja sistem menggunakan MATLAB dilakukan dalam penelitian ini, dengan tujuan untuk

memverifikasi logika sistem sebelum diterapkan secara nyata.



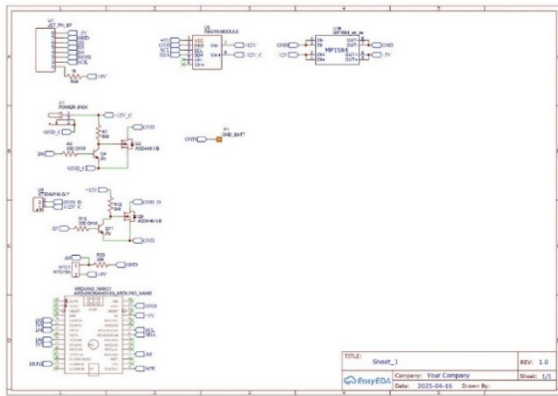
Gambar 5. Simulasi Matlab

Pada Gambar 5 menunjukkan Simulasi sistem BMS. Perangkat lunak MATLAB Simulink digunakan dalam penelitian ini untuk mendukung analisis dan simulasi sistem yang dikembangkan, yang mana berfungsi untuk memverifikasi logika kontrol sebelum diterapkan ke perangkat keras [22]. Model simulasi mencakup fungsi utama seperti Penentuan nilai *State of Charge* (SoC) dilakukan melalui metode *Coulomb Counting* serta penerapan proteksi terhadap kondisi ekstrem. Simulasi dimulai dengan menetapkan parameter awal berupa tegangan, kapasitas baterai dalam satuan ampere-jam, dan persentase SoC. Nilai arus kemudian diintegrasikan terhadap waktu guna menghitung SoC secara waktu nyata.

Logika proteksi dibagi menjadi dua mode utama yaitu saat proses pengisian dan saat proses pengosongan. Proteksi pengisian akan aktif apabila SoC mencapai seratus persen, tegangan menyentuh nilai maksimum sebesar 14,50 volt, atau suhu baterai melebihi 40 derajat Celcius. Jika salah satu kondisi terpenuhi maka sistem secara otomatis menghentikan pengisian untuk mencegah *Overcharge* dan *Overheating*. Sementara itu proteksi pengosongan akan aktif ketika SoC berada di bawah 15 persen, tegangan turun hingga 11,50 volt, atau suhu melebihi ambang batas yang sama. Proteksi ini bertujuan menjaga baterai dari kerusakan akibat pengosongan berlebih dan suhu tinggi.

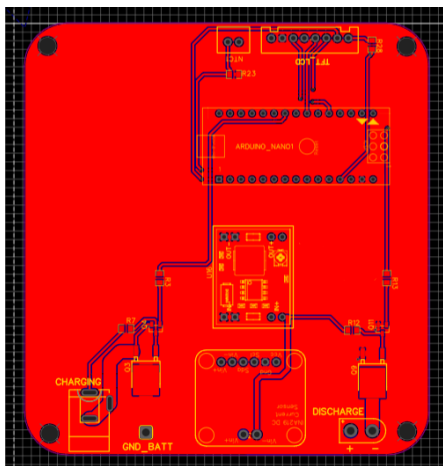
G. Perancangan Skematik Keseluruhan Sistem

Skematik sistem yang dirancang dalam penelitian ini disajikan sebagai tahap awal sebelum diimplementasikan secara nyata.



Gambar 6. Skematik

Gambar 6 menunjukkan skematik rangkaian dari sistem manajemen baterai yang dirancang. Gambar 7 merupakan tata letak PCB (*Printed Circuit Board*) dari skematik pada Gambar 6. Desain PCB ini dibuat untuk mengintegrasikan seluruh komponen dalam bentuk fisik yang lebih rapi dan efisien.



Gambar 7. PCB BMS

Untuk mendukung penelitian yang efisien, terorganisir, dan bernilai estetika tinggi, seluruh sistem dirancang dalam satu kesatuan menggunakan *Printed Circuit Board* atau PCB. Penggunaan papan sirkuit ini tidak hanya merapikan tata letak komponen, tetapi juga memudahkan proses perakitan, pengujian, dan perawatan. Dengan komponen yang saling terhubung dalam satu papan, koneksi menjadi lebih stabil, risiko kesalahan sambungan menurun, dan keandalan sistem meningkat. Desain PCB yang ringkas dan sistematis turut menghemat ruang serta memberi kesan profesional, sehingga meningkatkan kualitas keseluruhan proyek.



Gambar 8. Hardware

Pada Gambar 8 menunjukkan konfigurasi sistem yang terdiri dari baterai *Lead-Acid*, beban, *charger*, dan BMS. Baterai menyuplai daya ke beban, sedangkan *charger* mengisi ulang energi. BMS memantau tegangan, suhu, dan arus, serta mengestimasi SoC yang dipantau secara waktu nyata untuk menjaga kinerja dan keamanan baterai.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

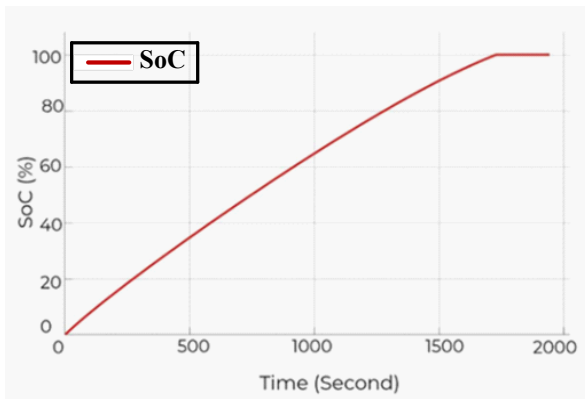
III.1. Simulasi MATLAB

III.1.1. Pengujian SoC *Coulomb Counting*

Simulasi menggunakan MATLAB digunakan untuk memodelkan proses pengisian dan pengosongan baterai guna mengevaluasi estimasi *State of Charge* (SoC) dengan metode *Coulomb Counting* [23]. Selama pengisian, SoC meningkat seiring masuknya arus, hingga mencapai kapasitas maksimum dan sistem menghentikan pengisian untuk mencegah *Overcharge*. Sebaliknya, saat pengosongan, SoC menurun secara bertahap hingga menyentuh batas minimum, memicu proteksi untuk mencegah *overdischarge* [24]. Hasil simulasi menunjukkan metode ini mampu menggambarkan dinamika SoC secara akurat dalam dua kondisi kerja, serta menunjukkan respon proteksi yang efektif. Visualisasi MATLAB memberikan gambaran realistis sebelum implementasi ke perangkat keras [25].

- Saat *Charging*

Simulasi pengisian baterai dilakukan menggunakan MATLAB untuk mengamati bagaimana metode *Coulomb Counting* menghitung estimasi SoC secara bertahap saat arus masuk diterapkan ke sistem.

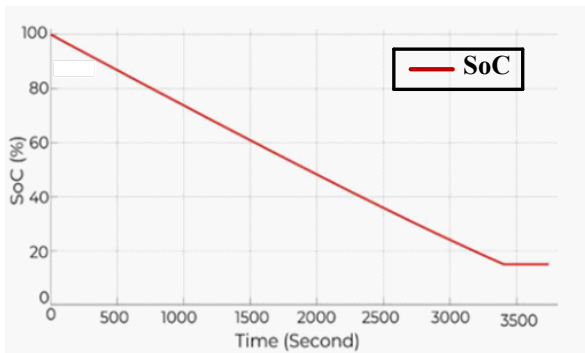


Gambar 9. SoC Charging MATLAB

Pada Gambar 9 menunjukkan Hasil simulasi pengisian menunjukkan bahwa SoC meningkat secara bertahap hingga mencapai 100%, di mana sistem secara otomatis menghentikan pengisian. Hal ini mengindikasikan bahwa logika proteksi *Overcharge* berfungsi dengan baik. Mekanisme ini krusial dalam menjaga keamanan dan memperpanjang umur baterai. Keselarasan antara grafik dan kontrol sistem menegaskan bahwa model MATLAB mampu merepresentasikan perilaku pengisian baterai secara akurat.

- Saat *Discharging*

Simulasi proses pengosongan baterai dilakukan menggunakan MATLAB untuk menguji efektivitas metode *Coulomb Counting* dalam memperkirakan penurunan SoC saat arus keluar mengalir menuju beban.



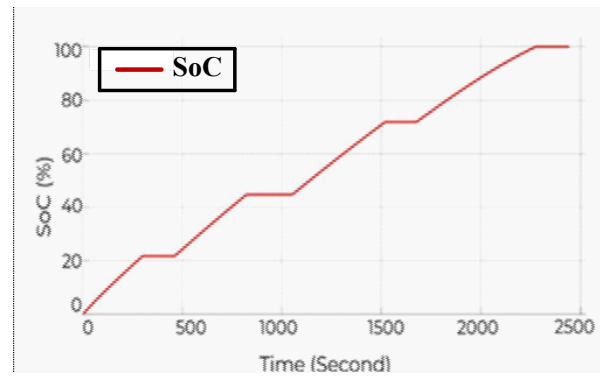
Gambar 10. SoC Discharging MATLAB

Pada Gambar 10 yaitu simulasi proses pengosongan yang menunjukkan bahwa sistem berhasil menghentikan *discharge* saat SoC mencapai 15%, menandakan proteksi *Overdischarge* bekerja sesuai desain. Respon otomatis ini penting untuk menjaga keandalan dan mencegah kerusakan permanen pada baterai. Keselarasan antara grafik penurunan SoC dan aktivasi proteksi mengonfirmasi bahwa metode *Coulomb Counting* dapat diintegrasikan secara efektif dengan sistem kontrol. Simulasi ini membuktikan bahwa pemantauan dan

proteksi bekerja selaras dalam menjaga kondisi baterai saat *discharge*.

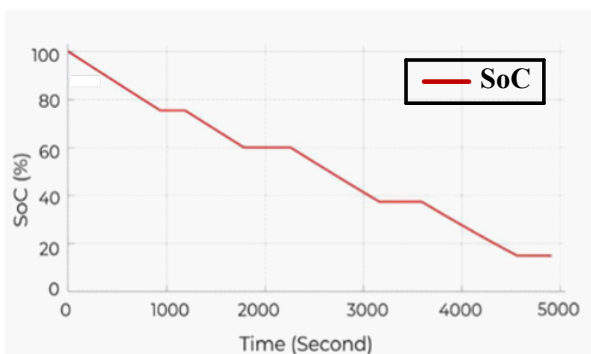
III.1.2. Pengujian Sistem Proteksi

Pengujian sistem proteksi dilakukan melalui simulasi MATLAB untuk memastikan bahwa manajemen baterai tidak hanya memantau SoC, tetapi juga merespon kondisi abnormal seperti suhu berlebih (*Overtemperature*). Logika proteksi dirancang untuk memutuskan arus saat suhu melebihi batas aman, sebagai upaya mencegah kerusakan akibat pemanasan berlebih. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi suhu tinggi secara *real-time* dan menghentikan proses pengisian/pengosongan secara otomatis. Hal ini membuktikan bahwa algoritma kontrol telah terintegrasi dengan baik dan memberikan proteksi komprehensif terhadap tegangan, arus, kapasitas, dan suhu, sehingga meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.



Gambar 11. Simulasi Sistem Proteksi Charging

Pada gambar 11 yaitu hasil simulasi yang menunjukkan bahwa proteksi suhu berfungsi efektif selama proses pengisian. Saat suhu melebihi batas aman, sistem otomatis menghentikan pengisian dan melanjutkannya kembali setelah suhu normal. Respon adaptif ini membuktikan bahwa logika proteksi dirancang untuk menjaga keamanan tanpa mengganggu kontinuitas operasi baterai.



Gambar 12. Simulasi Sistem Proteksi Discharging

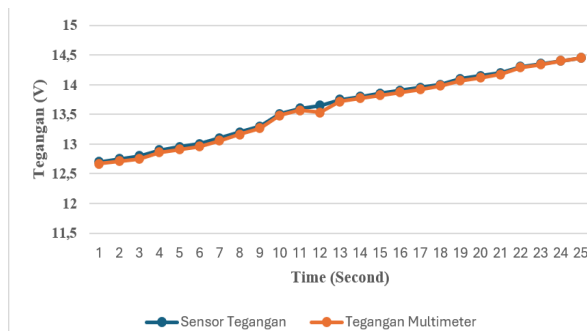
Pada Gambar 12 yaitu hasil simulasi yang menunjukkan bahwa proteksi suhu berfungsi efektif

saat proses pengosongan. Ketika suhu melebihi ambang batas, sistem otomatis menghentikan *Discharging* dan melanjutkannya kembali setelah suhu normal. Respon ini menunjukkan kemampuan sistem dalam mengendalikan kondisi termal secara real-time, sehingga menjaga keamanan baterai selama pemakaian.

III.2. Pengujian Alat

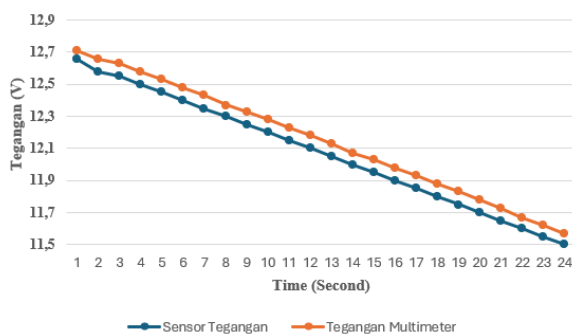
III.2.1. Pengujian Sensor Tegangan

Evaluasi sensor tegangan dilakukan guna mengkaji ketelitian modul INA219 dalam membaca nilai tegangan pada sistem pemantauan baterai.



Gambar 13. Grafik Tegangan Charging

Pada Gambar 13 menunjukkan bahwa nilai tegangan yang terbaca oleh Modul INA219 cukup mendekati nilai tegangan sebenarnya yang diukur oleh multimeter. Selisih *error* terbesar pada tegangan yaitu 0,05V, dengan nilai *error* tertinggi sebesar 0,39 % terjadi saat sensor menunjukkan 12,80 V sedangkan multimeter menunjukkan 12,75 V. Nilai *error* ini masih tergolong kecil dan dapat diterima dalam sistem monitoring tegangan baterai.



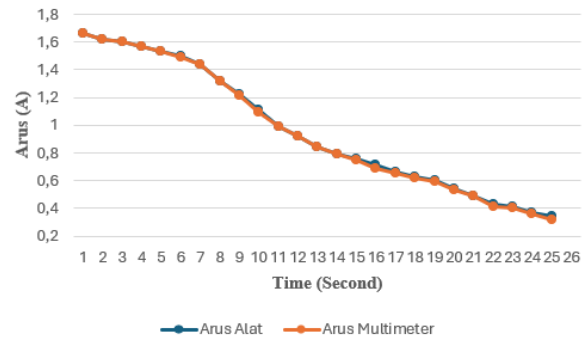
Gambar 14. Grafik Tegangan Discharging

Pada Gambar 14 menunjukkan bahwa nilai tegangan yang terbaca oleh Modul INA219 cukup mendekati nilai tegangan sebenarnya yang diukur oleh multimeter. Selisih *error* paling tinggi pada tegangan saat *Discharging* berada pada 0,08V, dengan *error* tertinggi sebesar 0,64% terjadi saat sensor menunjukkan 12,40V sedangkan multimeter menunjukkan 12,48 V. Nilai *error* ini masih

tergolong kecil dan dapat diterima dalam sistem monitoring tegangan baterai.

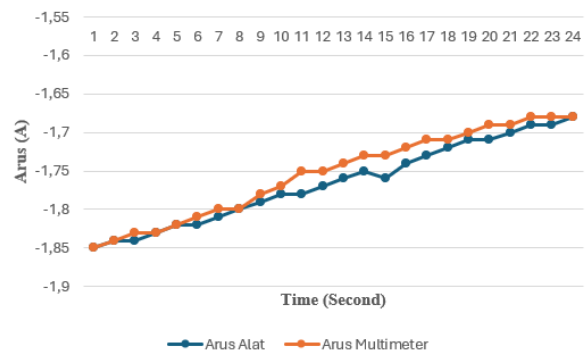
III.2.2. Pengujian Sensor Arus

Evaluasi sensor arus dilakukan guna mengkaji ketelitian modul INA219 dalam mengukur arus yang digunakan dalam sistem pemantauan baterai.



Gambar 15. Grafik Arus Charging

Pada Gambar 15 menunjukkan bahwa nilai arus yang terbaca oleh Modul INA219 cukup mendekati nilai arus sebenarnya yang diukur oleh multimeter. Selisih antara sensor arus dan multimeter yaitu 0,02 pada saat sensor arus terbaca 0,34A sedangkan pada multimeter terbaca 0,32A. Nilai selisih ini masih tergolong kecil dan dapat diterima dalam sistem monitoring arus baterai.

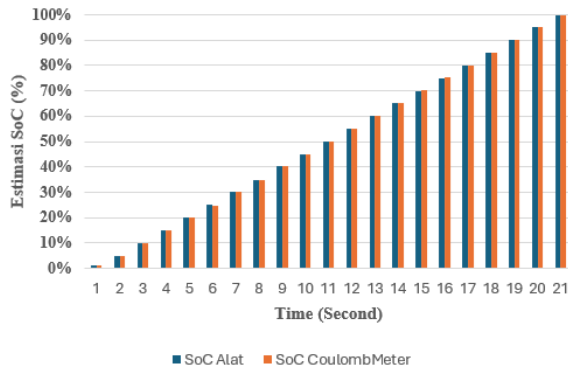


Gambar 16. Grafik Arus Discharging

Pada Gambar 16 menunjukkan bahwa nilai arus yang terbaca oleh Modul INA219 cukup mendekati nilai arus sebenarnya yang diukur oleh multimeter. Selisih tertinggi yaitu 0,03 terjadi pada saat nilai pada sensor arus terbaca -1,75A sedangkan pada multimeter terbaca -1,73A. Nilai selisih ini masih tergolong kecil dan dapat diterima dalam sistem monitoring arus baterai.

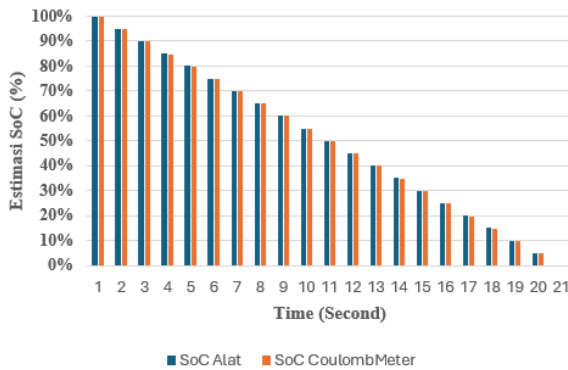
III.2.3. Pengujian SoC Coulomb Counting

Pengujian pembacaan nilai SoC dilakukan untuk mengevaluasi keakuratan estimasi kapasitas baterai yang tersisa oleh sistem monitoring berbasis mikrokontroler.



Gambar 17. Grafik SoC Charging

Pada Gambar 17 menunjukkan bahwa nilai SoC yang terbaca oleh alat Penelitian cukup mendekati nilai SoC sebenarnya yang diukur oleh *Coulomb Meter*. Selisih terbesar yaitu 0,20% dengan nilai *error* 0,5% terjadi ketika nilai SoC pada alat terbaca 40,00% sedangkan pada *Coulomb Meter* terbaca 40,20%. Nilai *error* ini masih tergolong kecil.

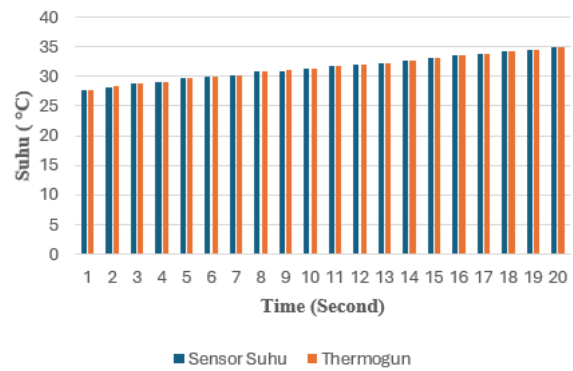


Gambar 18. Grafik SoC Discharging

Pada gambar 18 menunjukkan bahwa nilai SoC yang terbaca oleh alat Penelitian cukup mendekati nilai SoC sebenarnya yang diukur oleh *Coulomb Meter*. Selisih terbesar yaitu 0,22% dengan nilai *error* 0,22% terjadi ketika nilai SoC pada alat terbaca 90,00% sedangkan pada *Coulomb Meter* terbaca 89,80%. Nilai *error* ini masih tergolong kecil.

III.2.4. Pengujian Sensor Suhu

Pengujian terhadap sensor suhu dilakukan guna menilai tingkat akurasi pembacaan sensor NTC yang diaplikasikan dalam sistem.



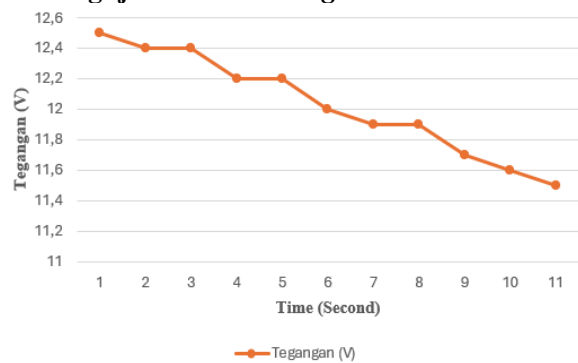
Gambar 19. Grafik Perbandingan Suhu

Pada gambar 19 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan antara pembacaan suhu oleh sensor dan *thermogun* sebagai alat acuan. Selisih terbesar yaitu 0,06°C, ketika suhu yang terbaca oleh sensor adalah 29,66°C, sedangkan pada *thermogun* menunjukkan 29,72°C. Meskipun terdapat selisih, nilai *error* tertinggi yang tercatat hanya 0,20%, yang tetap berada dalam rentang toleransi, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang cukup baik.

III.2.5. Pengujian Sistem Proteksi

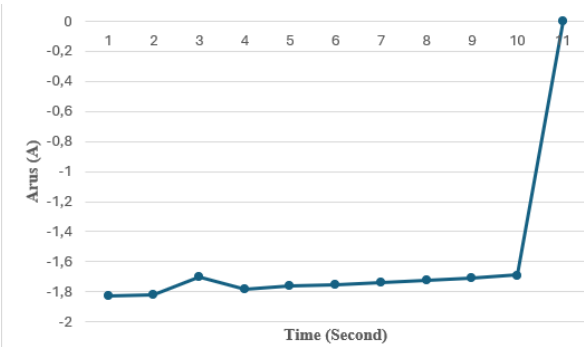
Sistem proteksi baterai dirancang untuk mencegah terjadinya tiga kondisi berisiko tinggi, yaitu *Overdischarge*, *Overcharge*, dan *Overheating*, yang dapat menyebabkan penurunan performa, kerusakan permanen, bahkan membahayakan keselamatan.

a. Pengujian Overdischarge



Gambar 20. Grafik Overdischarge (Tegangan)

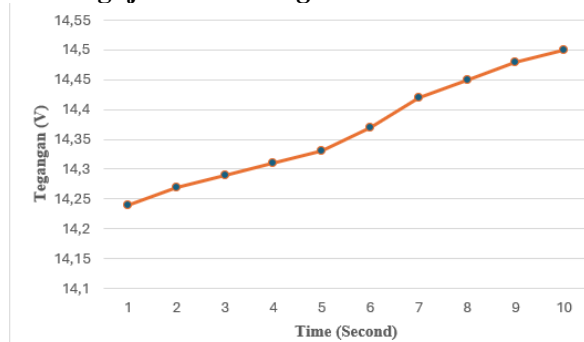
Pada Gambar 20 menunjukkan bahwa sistem proteksi aktif ketika tegangan sudah mencapai 16,5 V.



Gambar 21. Grafik *Overdischarge*(Arus)

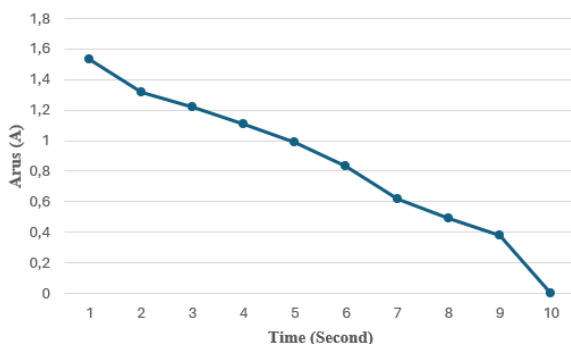
Pada Gambar 21 menunjukkan ketika tegangan mencapai 11,50 V, sistem berhasil memutuskan beban dengan arus terbaca 0A. Pemutusan arus ini menunjukkan sistem bekerja sesuai dengan batas yang telah ditetapkan. *Overdischarge* yang dibiarkan dapat menyebabkan kerusakan permanen pada sel baterai, sehingga fitur ini sangat penting untuk menjaga kesehatan baterai.

b. Pengujian *Overcharge*



Gambar 22. Grafik *Overcharging* (Tegangan)

Pada gambar 22 menunjukkan sistem proteksi aktif ketika tegangan mencapai 14,5V.



Gambar 23. Grafik *Overcharging* (Arus)

Pada Gambar 23 ketika tegangan mencapai 14,50V, sistem memutuskan proses pengisian daya dengan arus terbaca 0A. Tegangan pengisian yang berlebihan dapat memicu reaksi kimia berbahaya seperti gas berlebih atau pemuaiian. Sistem proteksi bekerja dengan akurat untuk menghentikan pengisian, melindungi baterai dari *Overcharge*.

c. Pengujian *Overheating*

Tabel 2. Proteksi *Overheating* (*Discharging*)

No	Tegangan (V)	Arus (A)	Suhu (°C)
1	12,5	-1,83	28
2	12,4	-1,82	29
3	12,4	0	45
4	12,2	-1,78	30
5	12,2	0	50
6	12	-1,75	30
7	11,9	-1,74	29
8	11,9	0	70
9	11,7	-1,71	31
10	11,6	-1,69	31

Tabel 3. Proteksi *Overheating* (*Charging*)

No	Tegangan (V)	Arus (A)	Suhu (°C)
1	14,21	1,55	28
2	14,24	1,53	28
3	14,27	1,32	29
4	14,27	0	45
5	14,31	1,11	30
6	14,31	0	50
7	14,37	0,83	30
8	14,42	0,62	29
9	14,42	0	70
10	14,48	0,38	31

Pada Tabel 2 ketika suhu mencapai 40°C, sistem secara otomatis memutuskan aliran arus. Proteksi ini sangat penting untuk mencegah kenaikan suhu berlebih yang dapat mempercepat degradasi baterai atau bahkan menyebabkan bahaya kebakaran. Sistem berhasil mendeteksi dan merespon kondisi ini dengan cepat.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa perancangan dan penerapan algoritma *Coulomb Counting* sebagai pendekatan estimasi *State of Charge* (SoC) yang diterapkan pada baterai *Lead-Acid* berhasil dilakukan dengan tingkat akurasi sebesar 95%. Estimasi SoC yang dihasilkan telah dibandingkan dengan alat referensi (*Coulomb Meter*) dan menunjukkan tingkat *error* kurang dari 5%. Hal ini menyatakan bahwa metode *Coulomb Counting* dapat digunakan untuk mengestimasi SoC cukup akurat dan dapat diandalkan. Selain itu, sistem proteksi juga berfungsi dengan baik dalam mencegah *Overdischarge* (tegangan <11,50 V),

Overcharge (tegangan >14,50 V), dan *Overheating* (suhu >40°C). Selain itu, metode *Coulomb Counting* bersifat fleksibel dan berpotensi diterapkan pada jenis baterai lain seperti *Lithium-ion*, *Nickel-based battery*, dan lain-lain, dengan penyesuaian parameter kapasitas, batas tegangan, serta karakteristik pengisian dan pengosongan. Untuk pengembangan lebih lanjut, sistem monitoring dapat dilengkapi dengan fitur penyimpanan data secara lokal maupun *cloud* untuk analisis historis, integrasi komunikasi jarak jauh untuk pemantauan *real time* serta diintegrasikannya beban dengan sistem untuk mempersentasikan kebutuhan kendaraan listrik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan apresiasi yang setinggi-tingginya kepada Politeknik Negeri Bandung atas dukungan pendanaan melalui skema Penelitian A1 serta penyediaan fasilitas. Keberhasilan penyelesaian penelitian ini tidak terlepas dari bantuan dan kerja sama berbagai pihak di lingkungan institusi.

REFERENSI

- [1] E. Tarigan and A. Sebayang, "Pengaruh diameter pulley terhadap tegangan pengisian baterai pada engine stand 1500 CC," *Pros. Konf. Nas. Soc.*, pp. 675–683, 2021, doi: <https://ojs.polmed.ac.id/index.php/KONSEP2021/issue/view/34>.
- [2] S. H. Park, T. Thu, H. Pham, and T. H. Kim, "and Ethanol Fermentation of Ammonia-Pretreated," 2020.
- [3] Syariful Azis, "MULTIPLE STORAGE DEVICE PADA RANGKAIAN PENYEIMBANG BATERAI UNTUK APLIKASI PLTS (PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA) OFF GRID," *Pros. Semin. Nas. Ilmu Tek. Dan Apl. Ind. Fak. Tek. Univ. Lampung*, vol. 9, pp. 356–363, 2020, doi: <https://doi.org/10.23960/prosidingsinta.v5i.78>.
- [4] A. I. Ramadhani, "Desain Dan Implementasi Battery Charger Valve Regulated Lead Acid Dengan Monitoring State of Charge Menggunakan Metode Coulomb Counting Pada Lampu Taman," *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 11, no. 1, p. 63, 2022, doi: 10.30591/polektr.v11i1.3226.
- [5] D. S. Yanaratri, S. D. Amanda, and I. Renny, "PENERAPAN ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM UNTUK ESTIMASI STATE OF CHARGE BATERAI LEAD ACID Teknik Elektro Industri , Politeknik Elektronika Negeri Surabaya , Jl. Raya ITS , Keputih , Sukolilo , Surabaya , 60111 PENDAHULUAN Baterai lead acid merupak," *ISAS Publ.*, vol. 9, no. 1, pp. 120–127, 2023.
- [6] A. A. Abdel-Rehim, S. Akl, and S. Elsoudy, "Investigation of the tribological behavior of mineral lubricant using copper oxide nano additives," *Lubricants*, vol. 9, no. 2, pp. 1–20, 2021, doi: 10.3390/lubricants9020016.
- [7] R. Firanda and M. Yuhendri, "Monitoring State Of Charge Accumulator Berbasis Graphical User Interface Menggunakan Arduino," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 2, no. 1, pp. 11–16, 2021, doi: <https://doi.org/10.24036/jtein.v2i1.95>.
- [8] Y. Afrida, J. J., and U. U., "Studi Penentuan State Of Charge (SOC) pada Baterai Valve Regulated Lead Acid NP7-12 Menggunakan MATLAB," *Electr. J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 17, no. 2, pp. 146–150, 2023, doi: 10.23960/elc.v17n2.2481.
- [9] I. Wahyu C, S. Triwijaya, Y. Wiarco, M. Rukmana, T. Elektro Perkeretaapian, and P. Perkeretaapian Indonesia Madiun, "Prototipe Battery Management System dalam Fasilitas Operasi Perkeretaapian," *J. Perkeretaapi. Indones. (Indonesian Railw. J.*, vol. 7, no. Oktober, p. p, 2023.
- [10] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, "A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. August 2016, pp. 834–854, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.001.
- [11] M. Ginting, M. Arrayan, A. Ramadhan, D. Denis, and I. Setiawan, "Perancangan Dan Analisis Pengujian Efektivitas Sistem Monitoring Tegangan Pada Battery Management System Dengan Baterai Lithium Iron Phosphate Pada Purwarupa Mobil Listrik," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 13, no. 2, pp. 65–74, 2024, doi: 10.14710/transient.v13i2.65-74.
- [12] P. Wang and C. Zhu, "Summary of Lead-acid Battery Management System," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 440, no. 2, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/440/2/022014.
- [13] D. Rahmawati *et al.*, "DESIGN OF WIRELESS SENSOR NETWORK FOR BATTERY MANAGEMENT SYSTEM IN SOLAR PUBLIC STREET LIGHTING RANCANG BANGUN WIRELESS SENSOR NETWORK UNTUK BATTERY MANAGEMENT SYSTEM PADA PENERANGAN JALAN B . Metode Perhitungan Coulomb menghitung kapasitas baterai berdas," *TESLA J. Tek. Elektro*, vol. 26, no. 1, pp. 49–58, 2024, doi: <https://doi.org/>

- 10.24912/tesla.v26i1.29444 Abstract.
- [14] S. Triwijaya, A. Pradipta, and Y. Prasetyo, "Battery Management Optimization Considers State Of Charge Using Coulomb Counting Method Pengoptimalan Manajemen Baterai Mempertimbangkan Status Pengisian Baterai Menggunakan Metode Coulomb Counting," *J. Geuthee Eng. Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 1–07, 2023, doi: 10.52626/joge.v.
- [15] Syafii, I. El Fakhri, T. K. Agung, and F. Azizah, "Design of battery state of charge monitoring and control system using coulomb counting method based," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 33, no. 2, pp. 736–745, 2024, doi: 10.11591/ijeeecs.v33.i2.pp736-745.
- [16] Bonifasius, A. Bayuprakoso, and P. Munadi, "Analisis Estimasi State of Charge Baterai Li-Ion Berbasis Open Circuit Voltage Dan Coulomb Counting Pada Otoped," *J. Tek. Mesin S-1*, vol. 9, no. 3, pp. 429–434, 2021.
- [17] M. R. C. Maltezo *et al.*, "Arduino-based battery monitoring system with state of charge and remaining useful time estimation," *Int. J. Adv. Technol. Eng. Explor.*, vol. 8, no. 76, pp. 432–444, 2021, doi: 10.19101/IJATEE.2021.874023.
- [18] S. SUHARININGSIH, F. YULIANDA, E. SUNARNO, and M. A. B. NUGROHO, "Battery Management System dengan Fitur Adaptive Current Protection terhadap Suhu," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 12, no. 2, p. 498, 2024, doi: 10.26760/elkomika.v12i2.498.
- [19] M. Y. Yoo, J. H. Lee, H. Lee, J. H. Choi, J. S. Huh, and W. Sung, "Co-Estimating State of Charge and Capacity of Automotive Lithium-Ion Batteries Under Deep Degradation Using Multiple Estimators," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 20, 2024, doi: 10.3390/app14209569.
- [20] A. K. Pandey, S. Pal, and A. Singh, "Effect of Addition of Rice Husk Ash and Super Plasticizer on Pervious Concrete," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, no. June, pp. 3045–3049, 2021, [Online]. Available: www.irjet.net
- [21] M. Saz, "Battery Management System with Embedded Systems Software Advanced Battery Management System with Embedded Systems Software," no. March, 2025, doi: 10.13140/RG.2.2.35771.73760.
- [22] P. Chatterjee, J. Singh, R. Singh, Y. A. R. Avadh, and S. Kanchan, "Electric Vehicle Modeling in MATLAB and Simulink with SoC & SoE Estimation of a Lithium-ion Battery," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1116, no. 1, p. 012103, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1116/1/012103.
- [23] J. Wang, W. Yu, G. Cheng, and L. Chen, "Online SOC Estimation of Lithium-ion Battery Based on Improved Adaptive H Infinity Extended Kalman Filter".
- [24] A. G. Simanjuntak, "Pembuatan Baterai Manajemen Sistem (BMS) Dengan Protekasi Terhadapap Overcharge," *E-Proceeding Aplied Sci.*, vol. 10, no. 3, pp. 745–751, 2024.
- [25] T. Desai, F. Oliva, R. M. G. Ferrari, and D. Carnevale, "Real-time Battery State of Charge and parameters estimation through Multi-Rate Moving Horizon Estimator," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 6124–6129, 2023, doi: 10.1016/j.ifacol.2023.10.709.

