

Sistem Monitoring Kondisi Sehat (*State Of Health*) Baterai Lifepo₄ Berbasis Web Dengan Integrasi Data Suhu, Arus, Dan Tegangan

Reza Fadhilah¹, Denny Irawan²

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro
Universitas Muhammadiyah, Indonesia
Fadhilahreza556@gmail.com

Abstrak

Penggunaan baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) menuntut pemantauan State of Health (SoH) yang akurat untuk mencegah degradasi dini. Pemantauan parameter kritis secara real-time sangat penting sebagai upaya proaktif dalam meningkatkan keselamatan dan mengoptimalkan masa pakai baterai. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemantauan berbasis web terintegrasi untuk memfasilitasi akses pengawasan data secara komprehensif bagi pengguna. Metode penelitian ini mengimplementasikan mikrokontroler ESP32 sebagai pengolah data dari sensor tegangan 0–25V, sensor arus ACS758, dan sensor suhu MAX6675. Estimasi nilai SoH dihitung menggunakan metode coulomb counting, melalui integrasi arus terhadap waktu untuk mengukur kapasitas aktual baterai. Hasil pengujian menunjukkan bahwa antarmuka dashboard web berhasil menampilkan data operasional secara interaktif dengan transmisi nirkabel yang stabil. Sensor tegangan secara presisi merekam variasi siklus, sensor ACS758 terbukti unggul mendeteksi aliran arus dinamis, dan MAX6675 secara konsisten mendeteksi fluktuasi suhu sel. Algoritma coulomb counting secara halus merekam akumulasi muatan listrik sehingga estimasi SoH yang dihasilkan merepresentasikan kondisi fisik baterai secara akurat. Secara keseluruhan, integrasi perangkat keras dan lunak beroperasi secara harmonis sebagai solusi pemeliharaan kinerja baterai yang sangat efektif

Kata kunci: Baterai LiFePO₄, State of Health, Coulomb Counting, Mikrokontroler ESP32, Monitoring Web.

Abstract

The use of Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) batteries demands accurate State of Health (SoH) monitoring to prevent premature degradation. Real-time monitoring of critical parameters is essential as a proactive effort in enhancing safety and optimizing lifespan. Therefore, this research aims to develop an integrated web-based monitoring system to facilitate comprehensive data supervision access for users. The method implements an ESP32 microcontroller as a data processor from a 0–25V voltage sensor, an ACS758 current sensor, and an MAX6675 temperature sensor. SoH estimation is calculated using the coulomb counting method through current integration over time to measure actual battery capacity. Test results indicate the web dashboard successfully displays interactive operational data with highly stable wireless transmission. The voltage sensor precisely records cycle variations, the ACS758 sensor excellently detects dynamic current flows, and the MAX6675 consistently detects cell temperature fluctuations. The coulomb counting algorithm smoothly records electrical charge accumulation, yielding SoH estimates that accurately represent the battery's physical condition. Overall, the hardware and software integration operates harmoniously as a highly effective battery performance maintenance solution.

Keywords: LiFePO₄ Battery, State of Health, Coulomb Counting, ESP32 Microcontroller, Web Monitoring.

I. PENDAHULUAN

Pesatnya kemajuan teknologi transportasi listrik saat ini menuntut adanya sistem penyimpanan energi yang memiliki performa tinggi, aman, serta efisien, di mana baterai memainkan peran vital dalam menentukan kemampuan operasional kendaraan. Kebutuhan akan baterai yang andal terus meningkat seiring dengan meluasnya penggunaan kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi [1]. Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) digunakan secara luas karena tingkat keamanannya yang tinggi, stabilitas termal yang sangat baik, serta siklus hidup yang panjang [2]. Dengan berbagai keunggulan tersebut, baterai LiFePO₄ telah menjadi pilihan utama untuk aplikasi kendaraan listrik berdaya menengah hingga tinggi [3].

Meskipun demikian, baterai tetap dapat mengalami degradasi performa selama operasional akibat paparan suhu berlebih, arus pengisian atau pengosongan yang terlalu tinggi, serta ketidakseimbangan kapasitas sel, yang mengurangi kemampuannya dalam menyuplai energi [4]. State of Health (SOH) merupakan parameter kritis yang menggambarkan seberapa dekat kinerja baterai saat ini dengan kondisi awalnya [5]. Nilai SOH sangat dipengaruhi oleh degradasi kapasitas, resistansi internal, dan parameter kelistrikan lainnya. Menggunakan baterai secara terus-menerus hingga kapasitasnya habis total dapat mempercepat penurunan siklus hidup baterai secara signifikan [6]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa dengan mempertahankan setidaknya 20% kapasitas selama penggunaan, siklus hidup baterai LiFePO₄ dapat mencapai 850 siklus pada tingkat reliabilitas 75%, sehingga pemantauan SOH sangat penting untuk mencegah kegagalan dini [7].

Walaupun Battery Management System (BMS) umumnya digunakan untuk mengontrol suhu, tegangan, dan arus guna memperpanjang usia baterai, fungsionalitas pemantauannya sering kali terbatas pada indikator dasar sehingga tidak mampu memberikan deteksi dini terhadap degradasi kesehatan [8]. merancang BMS dengan monitoring tegangan pada purwarupa mobil listrik berbasis baterai LiFePO₄ dan memperoleh akurasi lebih dari 95%, namun belum mengintegrasikan estimasi SOH secara real-time [9]. Untuk mengatasi tantangan tersebut, teknologi Internet of Things (IoT)

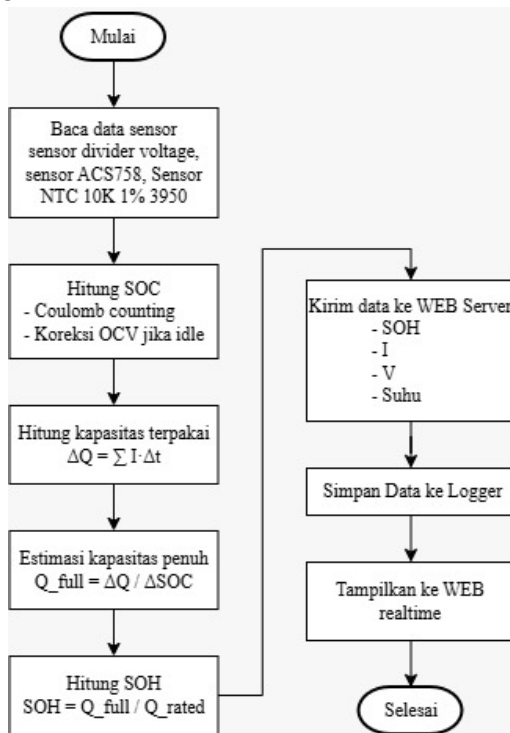
memungkinkan data kondisi baterai untuk ditransmisikan secara otomatis dan real-time melalui jaringan [10].

Pengguna dapat mengakses informasi tersebut secara jarak jauh melalui antarmuka web tanpa memerlukan inspeksi fisik langsung pada perangkat keras [11]. merancang BMS dengan monitoring tegangan pada purwarupa mobil listrik berbasis baterai LiFePO₄ dan memperoleh akurasi lebih dari 95%, namun belum mengintegrasikan estimasi SOH secara real-time [12]. sehingga nilai SOH dapat diturunkan dari perbandingan kapasitas aktual terhadap kapasitas nominal. Mikrokontroler ESP32 dengan modul Wi-Fi terintegrasi telah banyak digunakan sebagai platform monitoring baterai berbasis IoT, di antaranya untuk monitoring kondisi baterai dan SoH secara real-time [13], monitoring kondisi baterai kendaraan Listrik [14], monitoring baterai dan besaran fisis kendaraan listrik berbasis IoT [15], monitoring SoH terintegrasi platform web [16], monitoring kondisi baterai kendaraan listrik berbasis web [17], serta BMS dengan proteksi arus adaptif terhadap suhu [18]. Pada penerapan monitoring dan kontrol otomatis berbasis IoT pada PLTS terbukti memungkinkan sistem beroperasi 24 jam penuh serta melindungi baterai dari kerusakan melalui pemantauan level baterai dan load shedding adaptif [19]. Sementara itu, pada PLTB, efisiensi generator yang rendah (maksimal 6,86%) menunjukkan bahwa tanpa monitoring real-time, deteksi dini penurunan performa sistem tidak dapat dilakukan secara optimal [20]. Namun, belum banyak penelitian yang mengintegrasikan seluruh parameter pemantauan, termasuk estimasi SOH berbasis Coulomb Counting, ke dalam satu sistem monitoring berbasis web yang komprehensif untuk baterai LiFePO₄.

Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem pemantauan SOH berbasis web untuk baterai LiFePO₄ yang secara komprehensif mengintegrasikan data suhu, arus, dan tegangan. Sistem yang diusulkan ini bertujuan untuk memberikan peringatan dini terkait adanya lonjakan suhu, anomali pada arus, maupun penurunan tegangan, guna memastikan masa pakai yang lebih panjang, operasional yang lebih aman, dan efisiensi energi yang dioptimalkan untuk aplikasi energi modern.

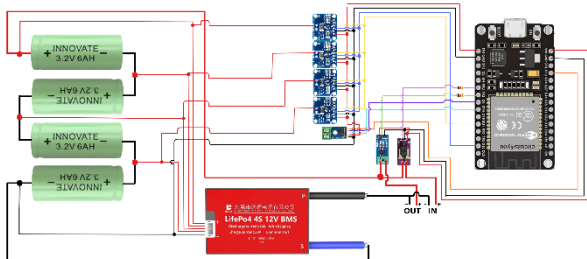
II. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian ini mencakup beberapa tahapan utama yang disusun secara sistematis, mulai dari perancangan arsitektur sistem, implementasi perangkat keras, konfigurasi perangkat lunak, hingga prosedur akuisisi data. Sistem pemantauan yang diusulkan dirancang secara khusus untuk paket baterai 4S LiFePO4 yang secara mendasar dilindungi oleh *Battery Management System* (BMS) Daly 4S 40A. Penggunaan BMS ini sangat krusial untuk mencegah terjadinya kegagalan kritis pada sel baterai, seperti pengisian berlebih (*overcharge*), pengosongan berlebih (*overdischarge*), arus berlebih (*overcurrent*), dan hubung singkat. Secara keseluruhan, rancangan keseluruhan akan di sajikan pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir

A. Perancangan Perangkat Keras



Gambar 2. Diagram blok sistem perangkat keras

Keandalan sistem dalam akuisisi data ditingkatkan dengan memanfaatkan protokol komunikasi digital guna meminimalkan gangguan *noise* analog. Konverter MAX6675 diintegrasikan dengan termokopel tipe-K untuk memberikan pembacaan suhu dengan resolusi 12-bit (0,25°C per langkah) melalui jalur bus SPI khusus. Untuk pemantauan parameter elektrik, empat sensor INA219 dikonfigurasi pada jalur bus I2C yang sama dengan alamat perangkat keras yang unik (0x40 hingga 0x45), yang memungkinkan pemantauan tegangan setiap sel LiFePO4 secara independen. Tahap pembacaan arus menggunakan sensor ACS758 dengan sensitivitas terkalibrasi sebesar 35,0 mV/A untuk menangani arus pengisian yang besar, sementara sensor ACS712 (66,0 mV/A) digunakan secara spesifik untuk memantau jalur pengosongan (*discharge*).

B. Perancangan Perangkat Lunak dan Estimasi SOH

Mikrokontroler ESP32 diprogram menggunakan lingkungan Arduino IDE untuk memproses data sensor mentah, melakukan kalkulasi estimasi kesehatan baterai, serta bertindak sebagai *host* server web lokal. Antarmuka visualisasi data dikonfigurasi untuk menyajikan parameter operasional secara *real-time* kepada pengguna melalui *dashboard* web. Estimasi *State of Charge* (SOC) dihitung secara kontinu menggunakan metode *Coulomb Counting* dengan mengintegrasikan arus terhadap waktu. Representasi matematis dari perhitungan tersebut didefinisikan sebagai berikut:

$$SOC = SOC_{prev} + \frac{I \times \Delta t}{Q_{rated}} \quad (1)$$

Di mana I merupakan arus baterai, Δt adalah interval pengukuran dalam satuan jam, dan Q_{rated} adalah kapasitas nominal baterai. Kapasitas yang telah digunakan (ΔQ) diperoleh dengan menghitung akumulasi muatan listrik:

$$\Delta Q = I \times \Delta t \quad (2)$$

Ketika terjadi penurunan SOC yang signifikan atau selama fase kalibrasi otomatis yang dipicu oleh ambang batas tegangan tertentu, sistem akan melakukan estimasi terhadap kapasitas penuh (Q_{full}):

$$Q_{full} = \frac{\Delta Q}{\Delta SOC} \quad (3)$$

Nilai *State of Health* (SOH) kemudian ditentukan dengan membandingkan hasil estimasi kapasitas penuh terhadap kapasitas pengenal yang ditetapkan oleh pabrikan.

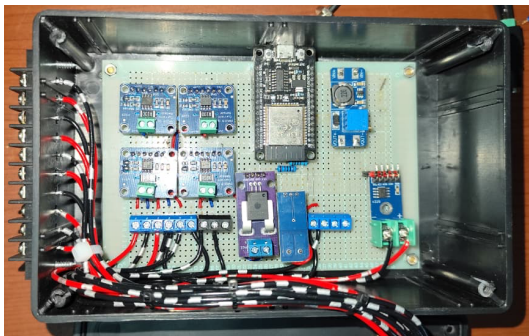
$$SOH = \frac{Q_{full}}{Q_{rated}} \times 100 \quad (4)$$

C. Prosedur Pengujian dan Akuisisi Data

Fase pengujian dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi sensor dibandingkan dengan instrumen pengukuran standar (seperti voltmeter dan amperemeter) serta menilai kesehatan baterai dalam siklus tertentu. Protokol pengujian pengisian daya melibatkan proses pengisian terkontrol dalam peningkatan bertahap sebesar 50 mAh. Setelah setiap kenaikan 50 mAh, mekanisme relai digunakan untuk memutus proses pengisian secara otomatis. Hal ini memungkinkan sel baterai untuk berada dalam kondisi istirahat (*rest*), sehingga memfasilitasi pengukuran *Open Circuit Voltage* (OCV) yang stabil dan koreksi SOC yang lebih presisi selama kondisi *idle*. Sistem secara kontinu mencatat margin kesalahan sensor, mendokumentasikan degradasi SOH secara iteratif, dan mentransmisikan data tersebut ke server web.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hardware



Gambar 3. Hardware

Pada gambar 3 merupakan hasil Perancangan hardware pada sistem monitoring kondisi sehat (*state of health*) baterai lifepo₄ berbasis web ini disusun untuk memperoleh data tegangan, arus, dan suhu secara real-time, sekaligus memastikan sistem mampu mengirimkan informasi tersebut ke web server melalui modul ESP32.

B. Akurasi Pengukuran dan Kalibrasi

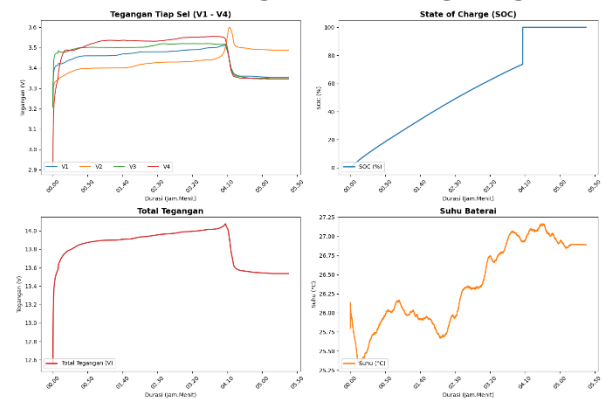
Proses kalibrasi dilakukan untuk menjamin reliabilitas data pada *dashboard*. Sensor INA219

menunjukkan presisi tinggi dalam memantau tegangan sel dengan margin kesalahan rata-rata kurang dari 0,5% dibandingkan dengan multimeter industri. Untuk pemantauan arus, filter derau (*noise*) diterapkan dalam kode program untuk mengabaikan fluktuasi di bawah 0,45 A, sehingga perhitungan SOC tetap stabil selama periode diam. Detail hasil akurasi pengukuran untuk setiap parameter disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Akurasi Pengukuran dan Kalibrasi

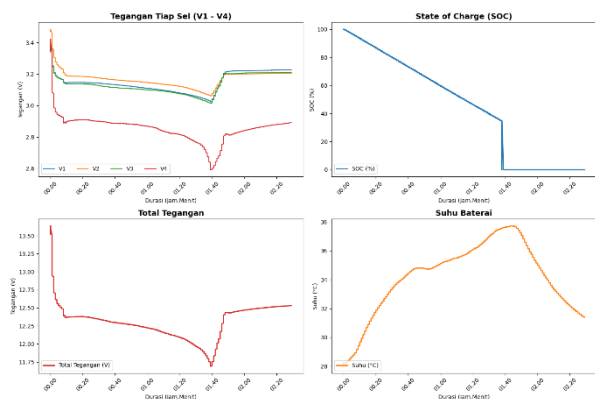
Parameter	Sensor	Alat Referensi	Rata-rata Error (%)
Tegangan (Sel)	INA219	Multimeter Digital	< 0,5%
Arus	ACS758	Clamp Meter	1,2%
Suhu	MAX6675	Termometer Digital	0,8%

C. Analisis Fase Pengisian dan Pengosongan



Gambar 4. Grafik Pengisian

Data *real-time* yang diperoleh selama proses pengisian selama kurang lebih 5 jam 50 menit terekam pada Gambar 4. Tegangan sel individu (V1-V4) meningkat secara stabil dari kondisi awal sekitar 3,2 V, namun terjadi ketidakseimbangan sel yang nyata di akhir siklus pengisian aktif. Sel 2 (V2) mengalami lonjakan tegangan yang tajam hingga mencapai ambang batas maksimum 3,6 V secara signifikan lebih cepat daripada sel lainnya. Saat ambang batas ini terdeteksi, BMS berhasil memutus arus pengisian untuk mencegah pengisian berlebih (*overcharge*).



Gambar 5. Grafik Pengosongan

Pada fase pengosongan yang diilustrasikan pada Gambar 5, paket baterai diuji di bawah beban aktif selama sekitar 2 jam 20 menit. Tegangan total paket menurun secara bertahap dari 13,6 V hingga mencapai titik kritis sekitar 11,75 V. Pemantauan tingkat sel mengungkapkan anomali kritis: Sel 4 (V4) menunjukkan penurunan tegangan yang jauh lebih curam dibandingkan sel lainnya dan merosot hingga kira-kira 2,6 V pada tanda waktu 01.40.

D. Hasil Pengujian *State of Health* (SOH) dan Analisis Kapasitas

Berdasarkan metode *Coulomb counting* yang telah diterapkan, nilai *State of Health* (SOH) diperoleh dengan mengintegrasikan akumulasi arus terhadap waktu untuk mengestimasi kapasitas aktual secara *real-time*. Hasil pengujian SOH untuk keempat sel baterai LiFePO₄ disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian SOH

Sel	Arus (I)	Waktu (t)	Q _{rated} (Ah)	SOH (%)
V1	3.065	1.6	5.107	73.52%
V2	3.065	1.6	5.107	74.77%
V3	3.065	1.6	5.107	73.15%
V4	3.065	1.6	5.107	70.4%

Tabel 3 menguraikan parameter kelistrikan yang menjadi dasar penentuan SOH. Kolom Arus (I) menunjukkan rata-rata arus pengosongan sebesar 3,065 A yang ditarik secara konstan selama periode Waktu (t) 1,6 jam. Kapasitas pengenal (*Q_{rated}*) sebesar 5,107 Ah merepresentasikan kapasitas awal sel yang dikalibrasikan pada sistem. Melalui kalkulasi perbandingan antara estimasi kapasitas

aktual dengan *Q_{rated}*, didapatkan nilai SOH yang merepresentasikan kondisi fisik masing-masing sel.

Berdasarkan tabel tersebut, terlihat adanya variasi tingkat degradasi. Sel 2 (V2) menunjukkan kondisi paling optimal dengan nilai SOH sebesar 74,77%, sementara Sel 4 (V4) mengalami degradasi terburuk dengan SOH yang turun hingga 70,4%. Variasi degradasi ini sejalan dengan hasil analisis termal dan kurva tegangan sebelumnya. Tingkat SOH yang rendah pada Sel 4 (V4) tervalidasi oleh anomali fisik di mana sel tersebut mengalami penurunan tegangan paling curam hingga menyentuh ambang batas kritis 2,6 V pada menit ke-01.40.

Keakuratan persentase SOH yang dihasilkan oleh sistem pemantauan ini divalidasi secara berjenjang, yakni melalui kalibrasi instrumen pengukuran menggunakan alat ukur referensi standar dan analisis komparatif terhadap spesifikasi *datasheet* pabrikan baterai.

Pertama, validitas nilai SOH yang diturunkan dari algoritma *Coulomb counting* sangat bergantung pada akurasi pembacaan arus dinamis secara *real-time*. Untuk menjamin kepresisian data tersebut, sensor arus ACS758 pada sistem telah dikalibrasi secara langsung menggunakan instrumen standar industri, yaitu Tang Ampere (*Clamp Meter*). Berdasarkan hasil kalibrasi pada Tabel 2, pembacaan dari sensor terbukti sangat presisi dengan margin *error* rata-rata yang sangat rendah, yaitu hanya 1,2% terhadap Tang Ampere referensi. Karena nilai arus merupakan variabel fundamental dalam mengintegrasikan muatan listrik, tingginya tingkat akurasi dari hasil kalibrasi instrumen ini menjamin bahwa kapasitas aktual dan persentase SOH yang dihasilkan secara matematis sangat valid dan dapat diandalkan.

Kedua, hasil estimasi SOH divalidasi silang dengan karakteristik spesifikasi baterai dan ambang batas proteksi fisik dari BMS komersial (Daly 4S 40A) yang terpasang pada purwarupa. Pada pengujian sistem ini, nilai kapasitas pengenal aktual (*Q_{rated}*) yang berhasil dikalibrasi dan dijadikan dasar perhitungan SOH adalah 5,107 Ah. Penurunan dari kapasitas nominal 6Ah ke 5,107 Ah merupakan fenomena degradasi yang wajar pada sel baterai pasaran, dan hal ini membuktikan bahwa sistem *Coulomb counting* berhasil mengukur kapasitas

nyata (*real capacity*) alih-alih hanya berpatokan pada klaim label pabrikan.

Lebih lanjut, karakteristik kurva pengosongan (*discharge curve*) pada sistem ini divalidasi silang dengan literatur terkini terkait degradasi baterai LiFePO₄. Berdasarkan penelitian Latif dkk. (2025), sel LiFePO₄ yang sehat akan mempertahankan fase kurva tegangan yang stabil (*voltage plateau*), di mana pemendekan durasi *plateau* yang diiringi oleh penurunan tegangan secara drastis merupakan indikator langsung dari penyusutan kapasitas dan degradasi SOH [21]. Pada pengujian ini, sensor INA219 mencatat bahwa Sel 4 (V4) mengalami penurunan tegangan yang sangat curam hingga menyentuh angka 2,6 V secara jauh lebih cepat dibandingkan ketiga sel lainnya. Perilaku fisik ini membuktikan secara empiris bahwa Sel 4 telah mencapai titik akhir kapasitasnya secara prematur sesuai dengan profil literatur [21], sekaligus bergerak mendekati ambang batas proteksi tegangan bawah (*under-voltage protection*) dari perangkat BMS Daly 4S 40A komersial yang terpasang pada sistem. Penurunan kapasitas aktual yang terkonfirmasi oleh karakteristik profil tegangan ini sangat selaras dengan hasil kalkulasi matematis sistem yang menunjukkan bahwa nilai SOH V4 terdegradasi menjadi yang terendah, yakni 70,4%. Keselarasan antara profil tegangan fisik, persentase perhitungan SOH literatur, dan ambang batas kerja BMS komersial ini mengonfirmasi bahwa sistem mampu memberikan estimasi degradasi baterai yang tervalidasi secara komprehensif tanpa memerlukan *battery analyzer* eksternal.

E. Analisis Termal dan Ketidakseimbangan Sel

Integrasi konverter termokopel MAX6675 memungkinkan pelacakan termal dengan akurasi tinggi. Selama siklus pengosongan, suhu terpantau naik secara bertahap dari 28°C menjadi 37,8°C. Berbeda dengan termistor analog yang sering mengalami fluktuasi non-linear, MAX6675 menyediakan kurva digital yang halus, sehingga sistem dapat mengorelasikan lonjakan suhu dengan peristiwa pengosongan arus tinggi secara tepat. Presisi ini sangat vital bagi algoritma SOH karena degradasi LiFePO₄ sangat sensitif terhadap stres termal.

Data eksperimental mengonfirmasi kesenjangan kinerja yang signifikan pada Sel 4 (V4). Dalam

firmware, faktor kompensasi khusus diterapkan untuk V4 dengan nilai resistansi 0,24, dibandingkan dengan 0,04 untuk sel yang sehat (V1-V3). Hal ini menjelaskan mengapa V4 mencapai ambang batas penghentian 2,6 V secara signifikan lebih cepat meskipun paket baterai dimulai dari keadaan seimbang. Algoritma SOH berhasil mengidentifikasi ketidakseimbangan ini, membuktikan bahwa sistem dapat menentukan kegagalan sel tertentu sebelum seluruh paket baterai terkomprohi.

F. Dashboard Berbasis Web dan Stabilitas Jaringan

Antarmuka visualisasi pada *dashboard* menyediakan pemantauan *real-time* yang terintegrasi secara mulus dengan mikrokontroler ESP32. Indikator kapasitas visual menyoroti ketidakseimbangan sel secara aktual, seperti tampilan Sel 4 pada persentase kesehatan yang lebih rendah (68%) dibandingkan Sel 2 (85%). *Dashboard* ini juga memfasilitasi interaksi dua arah; pengguna dapat mengirimkan perintah sinkronisasi SOC ke 100% melalui perintah server jarak jauh tanpa intervensi fisik.

Sistem menjaga keseimbangan antara pembaruan data SOH dan konsumsi daya dengan mengeksekusi transmisi HTTP pada interval terkontrol 3000 milidetik. Dalam pengujian pada kondisi jaringan Wi-Fi yang tidak stabil, sistem menunjukkan ketahanan yang baik melalui *subroutine* penyambungan kembali otomatis. Ketahanan jaringan ini sangat krusial dalam pemantauan SOH; selama periode gangguan koneksi, ESP32 tetap menghitung akumulasi *Coulomb counting* secara lokal di dalam memori sehingga tidak ada data luasan arus yang hilang. Hal ini memastikan bahwa kalkulasi persentase SOH yang ditampilkan pada web akan tetap akurat saat sistem kembali *online*. Selama 8 jam pengujian berkelanjutan, sistem menunjukkan retensi data 100%, membuktikan kelayakannya sebagai solusi pemantauan degradasi baterai jarak jauh yang andal.

IV. KESIMPULAN

Pengembangan sistem pemantauan *State of Health* (SOH) baterai LiFePO₄ berbasis web telah berhasil diimplementasikan dan divalidasi melalui integrasi mikrokontroler ESP32 dengan sensor presisi untuk

parameter tegangan, arus, dan suhu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa arsitektur perangkat keras dan lunak mampu melacak perilaku baterai secara akurat selama siklus pengisian dan pengosongan aktif, termasuk kemampuan mendeteksi ketidakseimbangan sel individual secara dini untuk mencegah kerusakan akibat *deep discharge* atau *overcharge*. Implementasi metode *Coulomb counting* memberikan estimasi *State of Charge* (SOC) yang akurat dan menerjemahkan degradasi kapasitas menjadi persentase SOH yang terukur untuk setiap sel. Integrasi IoT dua arah melalui *dashboard* web tidak hanya meningkatkan kemampuan pemantauan jarak jauh tetapi juga memungkinkan kalibrasi sistem secara remote, sehingga menjadi solusi efektif untuk pemeliharaan kinerja baterai. Sebagai saran untuk pengembangan selanjutnya, sistem ini dapat ditingkatkan dengan integrasi algoritma prediksi masa pakai baterai yang lebih kompleks berdasarkan pola penggunaan data historis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Denny Irawan, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik, atas bimbingan yang berkelanjutan, saran-saran berharga, dan motivasi yang diberikan sepanjang pelaksanaan penelitian hingga penyusunan naskah ini.

REFERENSI

- [1] A. Jamaah, A. H. Riyadi, E. A. Karuniawan, and A. Rochadi, "Analisis Active Balancer pada Battery Management System (BMS) Sebagai Penyeimbang Tegangan Pengisian Power Bank Tenaga Surya dengan Kapasitas 160WP JURNAL MEDIA INFORMATIKA [JUMIN]," vol. 6, no. 3, pp. 2174–2178, 2025.
- [2] R. A. Saputra, "Rancang bangun sistem manajemen baterai (bms) pada kendaraan roda 3 listrik dengan motor bldc 48v 1000watt," 2025.
- [3] K. Khaeruddin, W. Wijono, and R. N. Hasanah, "Desain Penyeimbangan Sel Baterai Lithium-Ion dengan Teknik Cell-to-Cell Charging Mode pada Battery Management System (BMS)," *J. Ecotipe (Electronic, Control. Telecommun. Information, Power Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 9–15, 2021, doi: 10.33019/jurnalecotipe.v8i1.2137.
- [4] L. Primabaraka, "Pengendalian Fast Charging Baterai Lifepo4 Kendaraan Listrik Dengan Mempertimbangkan Liga Primabaraka," vol. 23222361, no. April, 2025.
- [5] M. Aryo Pradhana, T. Andromeda, and D. Y. Christyono, "Pengisi Daya Baterai LiFePO4 Sebagai Sumber Energi Motor Listrik," *Transient*, vol. 10, no. 2, pp. 70–74, 2022, [Online]. Available: <http://ejournal3.undip>.
- [6] S. S. Kusumah, R. Zahran, and J. Raharjo, "Design of a LifePo4 Battery Pack 21 A for Electric Motorcycle," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2025. doi: 10.1088/1742-6596/2942/1/012020.
- [7] Devyna Lufhf and B. Wahyudi, "Studi Optimasi Pengaruh Sisa Kapasitas dan Arus Pengisian Terhadap Keandalan Individu Baterai LiFePO4 3,2V 6AH," *J. Mech. Eng.*, vol. 1, no. 3, p. 10, Jul. 2024, doi: 10.47134/jme.v1i3.2757.
- [8] A. Firyal Adila, R. Maulana Abdullah, I. Irianto, D. Septi Yanaratri, S. Sutedjo, and R. R. Renny Rakhmawati, "Sistem Monitoring Kecepatan Otoped Listrik Menggunakan Baterai LiFePO4 sebagai Transportasi Alternatif," *J. JEETech*, vol. 6, no. 1, pp. 25–38, Feb. 2025, doi: 10.32492/jeetech.v6i1.6103.
- [9] 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: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 13, no. 2, pp. 65–74, Jun. 2024, doi: 10.14710/transient.v13i2.65-74
- [10] Y. N. Hilal, P. Muliandhi, and E. N. Ardina, "Analisa Balancing Bms (Battery Management System) Pada Pengisian Baterai Lithium-Ion Tipe Inr 18650 Dengan Metode Cut Off," *J. SIMETRIS*, vol. 14, no. 2, 2023.
- [11] A. A. Sapta Pradana, N. Hendrari, and D. R. Suchendra, "Sistem Monitoring Baterai

- Berbasis IoT Menggunakan Blynk IoT," *J. e-Proceeding Appl. Sci.*, vol. 10, no. 3, pp. 765–773, 2024.
- [12] K. M. M. Bawango, H. S. Kolibu, and S. H. J. Tongkukut, "Estimasi State of Charge Pada Baterai Li-ion Dengan Menggunakan Metode Coulomb Counting," *Jurnal LPPM Bidang Sains dan Teknologi*, vol. 9, no. 2, pp. 78–84, 2024, doi: 10.35801/jlppmsains.9.2.2024.51598.
- [13] M. A. P. Kusumojakti and U. Zaky, "Deteksi Real-Time Kondisi Baterai Menggunakan Sistem Monitoring Berbasis Perangkat Bergerak," *Jurnal Informatika Teknologi dan Sains (Jinteks)*, vol. 6, no. 4, pp. 912–918, Nov. 2024. [Online]. Available: <https://jurnal.uts.ac.id/index.php/JINTEKS/article/view/4866>
- [14] A. S. Budi and A. Bachri, "Rancang Bangun GPS Tracker dan Monitoring Kondisi Baterai Pada Mobil Listrik Berbasis Mikrokontroler ESP32," *Journal of Electrical Engineering and Computer (JEECOM)*, 2024. [Online]. Available: <https://ejournal.unuja.ac.id/index.php/jeecom/article/view/9131>
- [15] Irfan, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Baterai serta Besaran Fisis Sepeda Listrik Berbasis IoT," *J3EIT (Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology)*, Universitas Tanjungpura, 2023. [Online]. Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/j3eituntan/article/view/62411>
- [16] (Penulis), "Rancang Bangun Sistem Monitoring State of Health (SoH) Baterai Berbasis Internet of Things (IoT) Terintegrasi Platform Blynk," *TEKNIKA*, Politeknik Negeri Sriwijaya, vol. 20, no. 2, 2026. [Online]. Available: <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/teknika/article/view/11886>
- [17] (Penulis), "Rancang Bangun Monitoring Kondisi Baterai dan Lokasi Kendaraan Listrik Berbasis Mikrokontroler ESP32," *Mars: Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Ilmu Komputer*, 2025. [Online]. Available: <https://journal.arteei.or.id/index.php/Mars/article/view/916>
- [18] Suhariningsih, F. Yulianda, E. Sunarno, and M. A. B. Nugroho, "Battery Management System dengan Fitur Adaptive Current Protection terhadap Suhu," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 12, no. 2, 2024, doi: 10.26760/elkomika.v12i2.498.
- [19] Irawan, D., Prastya, E. P., & Hidayah, A. (2023). Koordinasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Berbasis Algoritma Multiple Sequence Alignment (MSA). *Multitek Indonesia: Jurnal Ilmiah*, 17(1), 17–26.
- [20] Irawan, D., & Kinanti, Z. A. (2023). Performance Analysis of Wind Turbine. *KONTRIBUSIA*, 6(1), 129–133.
- [21] C. Latif, T. A. J. Maulana, M. F. I. Yogiarto, dan A. F. Adziimaa, "Exponential-Offset Modeling and XRD Correlation of SOH Degradation in LiFePO4 Batteries under Extreme Loading," *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 175-181, 2025.