

# Implementasi *Battery Management System* Pada PLTS Hibrida Skala Kecil

Binar Surya Gumilang<sup>\*a)</sup>, Mohammad Noor Hidayat<sup>a)</sup>, Rohmanita Duanaputri<sup>a)</sup>, Salman Alfarisi<sup>a)</sup>

(Received 14 July 2025 || Revised 6 October 2025 || Published 23 December 2025)

**Abstract:** This study investigated the implementation of a Battery Management System (BMS) as a protective and performance-enhancing component in a small-scale hybrid solar power plant storage system rated at  $10 \times 100$  Wp. Battery degradation, voltage imbalance, and excessive discharge currents are persistent challenges in off-grid and hybrid photovoltaic systems, particularly in rural electrification applications. The purpose of this research was to evaluate the effectiveness of an active cell balancing-based BMS in improving battery voltage stability, regulating discharge current, and extending battery life cycles. The research employed an experimental method by comparing system performance before and after BMS installation under identical charging and discharging conditions. Experimental results showed that prior to BMS installation, charging voltages among four VRLA batteries were unbalanced, ranging from 13.70 V to 13.80 V, and discharge currents reached up to 50.3 A. After BMS implementation, charging voltages became uniform at approximately 13.44 V, while discharge currents were limited to a maximum of 29.9 A. Furthermore, the SOC threshold was regulated from 100% to 90%, and discharge duration increased from 1.5 hours to 2 hours. Based on battery datasheet analysis, the estimated battery life cycle increased from a maximum of 372 cycles to 572 cycles. These findings indicate that the integration of a BMS with active cell balancing significantly enhances operational stability, thermal safety, and battery longevity. The results imply that BMS adoption is essential for improving reliability and sustainability of small-scale hybrid solar energy systems.

**Keywords:** Hybrid Solar Power Plant; Battery Management System; Active Cell Balancing; VRLA Battery; Energy Storage System

## 1. Introduction

Pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi terbarukan telah menjadi solusi strategis dalam menjawab tantangan keterbatasan akses listrik, khususnya di wilayah terpencil dan berkembang [1], [2]. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menawarkan keunggulan berupa ketersediaan sumber energi yang melimpah, biaya operasional yang rendah, serta kontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi karbon. Berbagai studi menunjukkan bahwa sistem PLTS hibrida mampu meningkatkan keandalan pasokan energi dengan mengombinasikan sumber energi terbarukan dan jaringan konvensional atau penyimpanan energi [1]. Namun, keberhasilan operasional PLTS sangat bergantung pada sistem penyimpanan energi, khususnya baterai, yang rentan terhadap degradasi apabila tidak dikelola dengan baik [3].

Salah satu permasalahan utama dalam sistem penyimpanan energi berbasis baterai adalah ketidakseimbangan tegangan antar sel, arus pelepasan yang berlebihan, serta pengisian daya yang tidak terkontrol. Kondisi tersebut dapat menyebabkan peningkatan suhu, penurunan kapasitas, dan pemendekan umur pakai baterai [3]. Pada sistem PLTS skala kecil, masalah ini sering kali diperparah oleh keterbatasan perangkat proteksi dan pemantauan yang memadai. Tanpa sistem manajemen baterai yang efektif, risiko kegagalan sistem dan kerugian ekonomi menjadi semakin besar [4].

Perkembangan teknologi *Battery Management System* (BMS) telah menjadi fokus utama dalam penelitian sistem penyimpanan energi selama satu dekade terakhir. Einhorn et al. menunjukkan bahwa penerapan *active cell balancing* secara signifikan meningkatkan performa baterai seri pada kendaraan listrik [4]. Wang et al mengembangkan metode *Modified Coulomb Counting* untuk meningkatkan akurasi estimasi SOC pada sistem BMS [5]. Karakteristik *active* dan *passive cell balancing* serta implikasinya dibandingkan terhadap efisiensi energi [6], [7]. Implementasi *cell balancing* diteliti pada baterai lithium seri skala kecil [8]. Selain itu, [9] menegaskan bahwa integrasi BMS merupakan elemen krusial

dalam sistem penyimpanan energi modern.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas efektivitas BMS, sebagian besar studi berfokus pada kendaraan listrik atau sistem baterai lithium berkapasitas besar. Penelitian mengenai implementasi BMS pada sistem PLTS hibrida skala kecil dengan baterai VRLA masih relatif terbatas, terutama yang mengkaji pengaruh langsung terhadap parameter operasional nyata seperti arus, tegangan, durasi pengosongan, dan estimasi siklus hidup baterai. Selain itu, sedikit penelitian yang menyajikan analisis komparatif sebelum dan sesudah instalasi BMS dalam kondisi lapangan yang identik.

Penelitian ini menawarkan konsep kebaruan berupa penerapan BMS dengan metode *active cell balancing* pada sistem PLTS hibrida skala kecil berbasis baterai VRLA, disertai evaluasi eksperimental yang komprehensif. Fokus utama penelitian diarahkan pada pengendalian arus pelepasan, penyeimbangan tegangan sel, serta estimasi peningkatan umur pakai baterai berdasarkan data pengujian dan datasheet pabrikan. Pendekatan ini diharapkan dapat menjembatani kesenjangan antara kajian teoretis dan implementasi praktis di lapangan.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh instalasi Battery Management System terhadap kinerja sistem penyimpanan energi pada PLTS hibrida skala kecil. Secara khusus, penelitian ini bertujuan mengevaluasi stabilitas tegangan, pembatasan arus pelepasan, perubahan State of Charge dan Depth of Discharge, serta implikasinya terhadap estimasi siklus hidup baterai. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi teknis dalam perancangan sistem PLTS yang lebih andal dan berkelanjutan.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Material dan Alat

Penelitian ini menggunakan beberapa material utama yang berfungsi sebagai komponen inti sistem penyimpanan energi pada PLTS hibrida skala kecil. Material utama yang digunakan adalah baterai *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA) berkapasitas 12 V–100 Ah merek Solana Front Terminal, dengan tingkat kemurnian elektrolit sesuai spesifikasi pabrikan. Baterai ini dipilih karena

\*Korespondensi: [binar.surya@polinema.ac.id](mailto:binar.surya@polinema.ac.id)

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang  
Jl. Soekarno Hatta No. 9, Kota Malang, Jawa Timur

karakteristiknya yang umum digunakan pada sistem PLTS off-grid dan *hybrid* serta kemudahan perawatannya dalam aplikasi lapangan.

Material berikutnya adalah BMS tipe *active cell balancing*, yang dirancang untuk sistem baterai seri 12 V dengan kemampuan pengendalian arus dan pemantauan tegangan individual setiap sel. BMS yang digunakan memiliki fitur proteksi terhadap *overcharge*, *over-discharge*, dan *overcurrent*, sehingga sesuai untuk aplikasi proteksi sistem penyimpanan energi skala kecil.

Komponen utama lainnya adalah inverter *hybrid* merek Growatt, yang berfungsi mengonversi daya DC dari modul fotovoltaik dan baterai menjadi daya AC untuk beban. Inverter ini juga berperan sebagai pengatur aliran energi antara PV, baterai, dan jaringan listrik PLN. Inverter dipilih berdasarkan kompatibilitasnya dengan sistem baterai VRLA dan dukungan pengoperasian *hybrid*.

Sebagai sumber energi utama, penelitian ini menggunakan modul fotovoltaik monocrystalline 100 Wp merek Trina Solar, dengan efisiensi modul di atas 18%. Modul disusun sebanyak sepuluh unit sehingga membentuk sistem PLTS dengan kapasitas total 1 kWp. Material ini dipilih karena memiliki stabilitas performa yang baik pada kondisi iradiasi sedang.

Instrumen ukur utama yang digunakan meliputi digital multimeter Fluke 117 untuk pengukuran tegangan dan arus, serta clamp meter Hioki 3280-10F untuk pengukuran arus pelepasan baterai. Instrumen ini memiliki tingkat akurasi tinggi dan umum digunakan dalam penelitian kelistrikan.

Selain itu, digunakan data logger berbasis mikrokontroler Arduino Mega 2560 untuk pencatatan parameter sistem secara periodik. Seluruh material utama dipastikan berada dalam kondisi layak operasi dan telah dikalibrasi sebelum pengujian dimulai.

## 2.2 Battery

Baterai adalah perangkat kimia yang menyimpan listrik tenaga surya [10],[11]. Baterai adalah perangkat elektronik yang terdiri dari katoda dan anoda. Baterai dapat menyimpan dan menjadi sumber energi listrik dengan mengubah energi kimia melalui reaksi reduksi dan oksidasi (redox) [12]. Listrik yang dihasilkan oleh baterai mudah diubah menjadi cahaya atau panas [13]. Jenis baterai yang dipasang dalam penelitian ini adalah baterai timbal-asam seperti pada Gambar 2.1.



GAMBAR 2.1 VRLA BATTERY

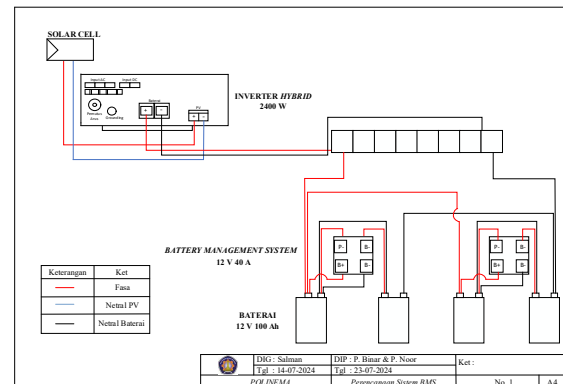
## 2.3 Battery Management System (BMS)

BMS adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk memantau baterai, melindungi baterai, menjaga keseimbangan baterai, dan memaksimalkan kinerja baterai [14], [15].

Metode penyeimbangan sel memiliki dua jenis, yaitu penyeimbangan sel aktif dan penyeimbangan sel pasif. Penyeimbangan sel aktif menggunakan prinsip pemakaian energi yang lebih tinggi ke baterai dengan kapasitas lebih rendah [13], [15]. Penyeimbangan sel pasif menggunakan prinsip menghilangkan energi melalui resistor sampai muatan setara antara satu sel dan sel lain yang memiliki muatan lebih rendah dalam array. Prinsip penyeimbangan sel pasif mudah diterapkan, tetapi tidak efektif bila digunakan selama proses pemakaian [15]. Penelitian ini menggunakan metode *active cell balancing* karena prinsip kerjanya lebih efisien dan dapat digunakan selama proses pengisian dan pemakaian.

## 2.4 Perencanaan Instalasi BMS

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah penyeimbangan sel. Penyeimbangan sel adalah sirkuit yang digunakan pada baterai yang disusun secara seri untuk menjaga kapasitas atau tegangan setiap sel. Jumlah BMS yang digunakan adalah empat. Pemasangan BMS ini bertujuan untuk dapat mengisi atau mengosongkan secara langsung sesuai dengan kapasitas yang akan dibutuhkan pada setiap baterai. Gambar 2.2 menunjukkan integrasi modul fotovoltaik, inverter hibrida, bank baterai VRLA, dan BMS dengan metode *active cell balancing* untuk meningkatkan stabilitas dan umur pakai sistem penyimpanan energi. Diagram sistem menunjukkan konfigurasi PLTS hibrida yang dilengkapi dengan BMS sebagai sistem proteksi dan pengelolaan penyimpanan energi. Sistem ini dirancang untuk mengintegrasikan sumber energi surya, penyimpanan energi berbasis baterai, dan beban listrik AC secara aman dan efisien.



GAMBAR 2.2 DIAGRAM INSTALASI BMS PADA SISTEM BATERAI SERI

Sumber energi utama berasal dari array modul fotovoltaik berkapasitas total 1 kWp ( $10 \times 100$  Wp) yang berfungsi mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Energi DC yang dihasilkan kemudian disalurkan ke inverter hibrida, yang berperan sebagai pusat pengendalian aliran daya dalam sistem. Inverter ini tidak hanya mengonversi daya DC menjadi daya AC, tetapi juga mengatur distribusi energi antara modul PV, baterai, dan beban.

Sistem penyimpanan energi terdiri dari bank baterai VRLA 12 V–100 Ah yang berfungsi menyimpan energi listrik untuk digunakan saat intensitas radiasi matahari menurun atau ketika beban meningkat. Bank baterai dihubungkan secara langsung dengan inverter melalui BMS yang ditempatkan di antara inverter dan baterai untuk melakukan pemantauan dan pengendalian parameter baterai secara real-time.

BMS berfungsi untuk memantau tegangan dan arus setiap

baterai, membatasi arus pelepasan, serta mengendalikan proses pengisian dan pengosongan energi. Selain itu, BMS menerapkan metode *active cell balancing* untuk menjaga keseragaman tegangan antar baterai yang tersusun secara seri. Dengan mekanisme ini, energi dari baterai dengan tegangan lebih tinggi dapat dialihkan ke baterai dengan tegangan lebih rendah, sehingga ketidakseimbangan tegangan dapat diminimalkan.

Daya keluaran dari inverter hibrida selanjutnya disalurkan ke beban AC, yang merepresentasikan peralatan listrik yang disuplai oleh sistem PLTS. Dengan adanya BMS, sistem mampu beroperasi dalam kondisi yang lebih aman dan stabil, karena risiko *overcharge*, *over-discharge*, serta lonjakan arus dapat dikendalikan secara efektif. Secara keseluruhan, diagram ini menggambarkan bahwa integrasi BMS dalam sistem PLTS hibrida tidak hanya berfungsi sebagai sistem proteksi, tetapi juga sebagai elemen kunci dalam optimasi kinerja, peningkatan umur pakai baterai, dan peningkatan keandalan sistem penyimpanan energi.

## 2.5 Alur Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif, dengan membandingkan kinerja sistem penyimpanan energi sebelum dan sesudah instalasi BMS. Desain penelitian disusun untuk memastikan bahwa seluruh variabel eksternal dijaga konstan, sehingga perubahan performa sistem dapat dikaitkan langsung dengan keberadaan BMS.

Tahapan penelitian diawali dengan perancangan sistem PLTS hibrida, yang meliputi konfigurasi modul fotovoltaik, *inverter hybrid*, baterai VRLA, dan beban. Sistem diuji terlebih dahulu tanpa BMS untuk memperoleh data dasar (baseline) berupa tegangan, arus, SOC, dan durasi pengisian serta pengosongan baterai.

Pada tahap berikutnya, dilakukan instalasi BMS dengan metode *active cell balancing* pada setiap baterai. Setiap unit baterai dipasang satu modul BMS agar proses pengendalian tegangan dan arus dapat berlangsung secara individual. Konfigurasi ini mengacu pada prinsip *active cell balancing*.

Prosedur pengujian dilakukan dalam dua kondisi utama, yaitu proses pengisian (*charging*) dan proses pengosongan (*discharging*). Pada proses *charging*, baterai diisi hingga mencapai batas SOC yang ditentukan oleh inverter atau BMS. Tegangan dan arus tiap baterai dicatat setiap interval waktu tertentu.

Pada proses *discharging*, sistem dibebani dengan beban AC yang relatif konstan. Pengujian dilakukan hingga baterai mencapai batas minimum SOC (50%) untuk menghindari degradasi berlebih. Seluruh parameter listrik direkam secara kontinu menggunakan data logger.

Teknik analisis data dilakukan dengan analisis deskriptif-komparatif, yaitu membandingkan nilai rata-rata tegangan, arus maksimum, durasi pengosongan, dan estimasi siklus hidup baterai. Estimasi umur baterai dihitung dengan mengacu pada kurva *Depth of Discharge* terhadap *life cycle* yang tercantum pada datasheet pabrikan, sebagaimana direkomendasikan oleh Wang et al. (2020). Keabsahan metode penelitian didukung oleh referensi ilmiah terkait implementasi BMS dan *cell balancing* pada sistem penyimpanan energi, sehingga pendekatan yang digunakan dapat diterima.

## 3. Analisis dan Data

### 3.1 Pengujian pengisian daya BMS

Tabel 3.1 menunjukkan hasil pengujian pengisian daya baterai sebelum dipasang BMS. Sedangkan Tabel 3.2 menunjukkan hasil pengujian pengisian daya baterai sesudah dipasang BMS.

Berdasarkan uji pengisian daya sebelum pemasangan BMS (Tabel 3.1) baterai akan penuh pada 100% sedangkan setelah pemasangan BMS (Tabel 3.2) baterai akan penuh pada 90%. Persentase perubahan tersebut disebabkan oleh BMS yang membatasi nilai tegangan yang awalnya rata-rata 13,75V hingga 13,44V. Ini mencegah pengisian daya yang berlebihan. Dalam proses pengisian daya, sebelum BMS dipasang, terjadi ketidakseimbangan tegangan antara baterai pada pukul 9:50, yaitu 12,46V (baterai satu), 12,44V (baterai dua), dan 12,46V (baterai tiga) berbeda dengan baterai empat yaitu 12,98V, nilai pada baterai empat didahului dan persentasenya lebih tinggi dari baterai lainnya. Ini bisa disebabkan oleh masa pakai baterai yang berbeda. Namun, setelah BMS terpasang, baterai memiliki nilai tegangan yang seimbang, yaitu 12,39V (baterai satu dan dua), 12,3V (baterai tiga) dan 12,25V (baterai empat). Lamanya waktu pengisian sebelum dan sesudah pemasangan BMS adalah tiga jam.

TABEL 3.1 PENGUJIAN PENGISIAN DAYA BATERAI SEBELUM PASANG BMS

Jam	Baterai (%)	V1 (V)	I1 (A)	V2 (V)	I2 (A)	V3 (V)	I3 (A)	V4 (V)	I4 (A)
11:50	100	13,73	1,5	13,7	1,43	13,75	1,92	13,8	1,98
10:40	80	13,11	3,92	13,13	3,99	13,18	4,24	13,18	5,29
9:50	60	12,46	7,69	12,44	5,61	12,46	5,73	12,98	6,69
9:00	50	11,87	9,72	11,87	7,1	11,58	6,69	11,55	7,65

TABEL 3.2 PENGUJIAN PENGISIAN DAYA BATERAI SETELAH DIPASANG BMS

Jam	Baterai (%)	V1 (V)	I1 (A)	V2 (V)	I2 (A)	V3 (V)	I3 (A)	V4 (V)	I4 (A)
11:50	90	13,44	1,55	13,44	1,42	13,45	1,40	13,44	1,42
10:40	80	13,04	5,15	13,04	4,08	13,07	3,96	13,06	5,07
9:50	60	12,39	9,25	12,39	7,92	12,3	8,13	12,25	9,08
9:00	50	11,98	11,30	11,97	10,20	11,88	10,13	11,87	11,46

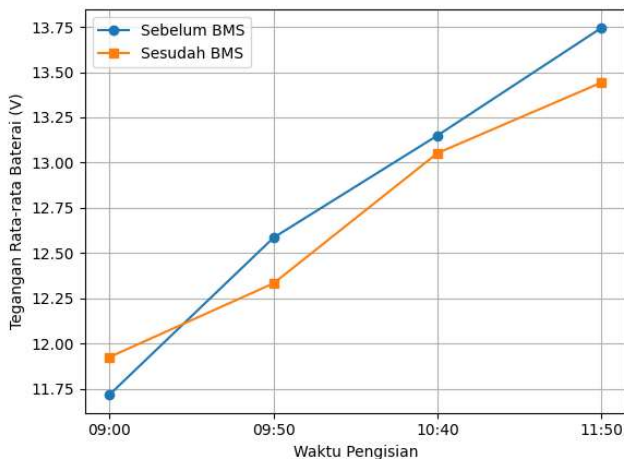
### 3.2 Pengujian pemakaian BMS

Berdasarkan uji pemakaian sebelum pemasangan BMS, persentase baterai disuplai dari 100% sedangkan setelah pemasangan BMS, baterai disuplai dari 90%. Namun, sebelum dan sesudah pemasangan BMS, baterai berhenti memasok nilai persentase yang sama, yaitu 50%. Perbedaan sebelum dan sesudah suplai dihentikan adalah proses penghentian sebelum pemasangan BMS dikendalikan oleh inverter dan setelah pemasangan BMS dikendalikan oleh BMS itu sendiri. Instalasi bertujuan untuk memaksimalkan kinerja dan menghindari panas berlebih.

Gambar 3.1 menunjukkan grafik hasil perbandingan tegangan rata-rata pengisian baterai sebelum dan sesudah pemasangan BMS. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sebelum instalasi BMS, terjadi ketidakseimbangan tegangan yang signifikan antar baterai selama proses pengisian. Tegangan baterai berkisar antara 13,70 V hingga 13,80 V, dengan satu baterai menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan lainnya. Kondisi ini sejalan dengan temuan Loniza et al. [8] yang menyatakan bahwa baterai seri tanpa sistem *balancing* cenderung mengalami deviasi tegangan akibat perbedaan usia dan kondisi internal sel.

Setelah dipasang BMS dengan metode *active cell balancing*, tegangan pengisian menjadi jauh lebih seragam, yaitu sekitar 13,44 V pada seluruh baterai. Hasil ini konsisten dengan penelitian Einhorn et al. [4] yang menunjukkan bahwa *active cell balancing* mampu mentransfer energi dari sel bertegangan tinggi ke sel

bertegangan rendah secara efisien.



**GAMBAR 3.1 GRAFIK PERBANDINGAN TEGANGAN RATA-RATA PENGISIAN BATERAI SEBELUM DAN SESUDAH PEMASANGAN BMS**

Grafik perbandingan tegangan rata-rata pengisian baterai sebelum dan sesudah pemasangan BMS menunjukkan perubahan karakteristik pengisian yang signifikan. Pada sistem tanpa BMS, tegangan rata-rata baterai meningkat lebih cepat dan mencapai nilai yang lebih tinggi, yaitu mendekati 13,75 V pada kondisi pengisian penuh. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses pengisian dikendalikan sepenuhnya oleh inverter tanpa adanya pembatasan tegangan individual pada masing-masing baterai.

Sebaliknya, setelah pemasangan BMS, tegangan rata-rata baterai meningkat secara lebih terkendali dan berhenti pada kisaran 13,44 V. Penurunan tegangan akhir pengisian ini mengindikasikan bahwa BMS secara aktif membatasi tegangan maksimum setiap baterai untuk mencegah terjadinya *overcharge*. Pembatasan ini sangat penting pada sistem baterai seri, karena perbedaan karakteristik internal baterai dapat menyebabkan salah satu baterai mencapai kondisi jenuh lebih cepat dibandingkan baterai lainnya.

Perbedaan kemiringan kurva antara kondisi sebelum dan sesudah pemasangan BMS menunjukkan perubahan laju pengisian energi. Pada sistem tanpa BMS, laju kenaikan tegangan relatif lebih curam, yang berpotensi meningkatkan stres elektrokimia pada elektroda baterai. Setelah BMS diterapkan, laju kenaikan tegangan menjadi lebih landai, menandakan proses pengisian yang lebih stabil dan seragam antar baterai.

Dari sudut pandang elektrokimia, pengendalian tegangan maksimum ini berperan dalam mengurangi laju degradasi baterai akibat gasifikasi dan korosi pelat positif yang umum terjadi pada baterai VRLA ketika mengalami pengisian berlebih. Dengan demikian, meskipun tegangan pengisian akhir lebih rendah, energi yang tersimpan menjadi lebih aman dan berkontribusi pada peningkatan umur pakai baterai.

Hasil ini menguatkan temuan pada bagian siklus hidup baterai, di mana pembatasan tegangan dan *State of Charge* oleh BMS terbukti meningkatkan estimasi jumlah siklus hidup baterai. Oleh karena itu, grafik gabungan ini memberikan bukti kuantitatif bahwa pemasangan BMS tidak hanya meningkatkan aspek proteksi reminder, tetapi juga secara langsung mengoptimalkan performa jangka panjang sistem penyimpanan energi pada PLTS hibrida.

Tabel 3.3 menunjukkan hasil pengujian pengosongan daya baterai sebelum dipasang BMS. Sedangkan Tabel 3.4

menunjukkan hasil pengujian pengosongan daya baterai sesudah dipasang BMS. Perbedaan selama proses pemakaian arus sebelum BMS dipasang dapat mencapai 50,3A sedangkan setelah BMS dipasang, nilai arus tertinggi adalah 29,9 A. Pembatasan arus ini berpengaruh, yaitu mengurangi kehilangan panas dan memperpanjang umur inverter dan baterai, karena inverter memiliki arus maksimal 50 A. Lamanya waktu pemakaian sebelum pemasangan BMS adalah 1 jam 30 menit sedangkan setelah pemasangan BMS adalah 2 jam. Pada proses pengosongan, arus maksimum sebelum pemasangan BMS mencapai 50,3 A, mendekati batas maksimum inverter. Setelah pemasangan BMS, arus dibatasi hingga sekitar 29,9 A. Pembatasan ini berimplikasi langsung pada penurunan rugi panas dan peningkatan keamanan sistem, sebagaimana juga dilaporkan oleh Uzair et al. (2021) [13]. Durasi pengosongan baterai meningkat dari 1,5 jam menjadi 2 jam setelah pemasangan BMS. Peningkatan ini menunjukkan bahwa energi tersimpan dapat dimanfaatkan secara lebih efektif, mendukung hasil penelitian Ningrum et al. [7] terkait optimalisasi SOC melalui manajemen baterai yang lebih presisi.

**TABEL 3.3 PENGUJIAN PENGOSONGAN DAYA BATERAI SEBELUM DIPASANG BMS**

Jam	Baterai (%)	V1 (V)	I1 (A)	V2 (V)	I2 (A)	V3 (V)	I3 (A)	V4 (V)	I4 (A)	Load (W)
12:30	100	12,3	13,1	12,2	10,5	12,2	10,1	12,3	12,1	469
12:20	80	12,0	17,4	11,9	16,9	11,9	15,1	11,8	15,1	469
12:40	60	11,8	50,3	11,8	39,8	11,7	35,6	11,7	45,4	1190
13:00	50	11,7	25,7	11,7	24,7	11,6	23,6	11,6	25,9	1100

**TABEL 3.4 PENGUJIAN PENGOSONGAN DAYA BATERAI SETELAH DIPASANG BMS**

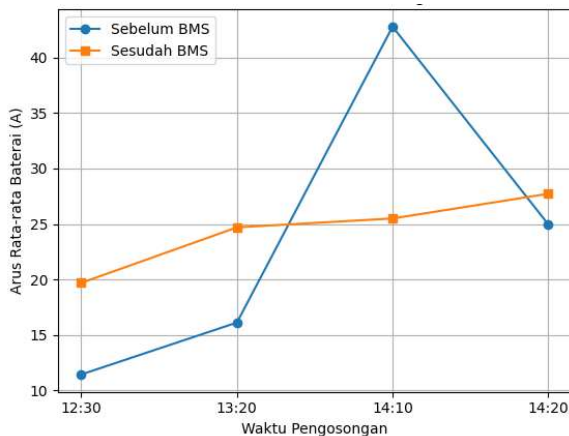
Jam	Baterai (%)	V1 (V)	I1 (A)	V2 (V)	I2 (A)	V3 (V)	I3 (A)	V4 (V)	I4 (A)	Load (W)
12:30	90	12,2	22	12,2	17,6	12,2	17,0	12,2	22,2	917
13:20	80	12,1	27,4	12,1	21,4	12,1	21,4	12,1	28,6	917
14:10	60	12,0	28,6	12	22,3	11,9	22,6	11,9	28,5	917
14:20	50	11,9	29,9	11,6	25,1	11,8	26,9	11,8	29	917

Gambar 3.2 menunjukkan grafik perbandingan arus pelepasan rata-rata baterai sebelum dan sesudah dipasang BMS. Pemasangan BMS menghasilkan arus pelepasan yang lebih stabil dan terkendali, sehingga mengurangi lonjakan arus, menurunkan rugi panas, dan meningkatkan keandalan sistem penyimpanan energi. Grafik perbandingan arus pelepasan baterai sebelum dan sesudah pemasangan BMS menunjukkan perbedaan karakteristik yang sangat signifikan. Pada sistem tanpa BMS, arus pelepasan baterai mengalami fluktuasi yang besar dan mencapai nilai puncak yang tinggi, yaitu lebih dari 40 A pada salah satu interval pengosongan. Lonjakan arus ini menunjukkan bahwa proses penyaluran daya sepenuhnya dikendalikan oleh inverter tanpa adanya mekanisme pembatasan arus individual pada baterai. Kondisi arus pelepasan yang tinggi dan tidak terkendali tersebut berpotensi menimbulkan peningkatan suhu pada baterai dan komponen inverter. Secara elektrokimia, arus pelepasan yang besar mempercepat reaksi samping dan meningkatkan laju degradasi material aktif pada pelat baterai, sehingga memperpendek umur pakai baterai dan menurunkan keandalan sistem secara keseluruhan.



Setelah pemasangan BMS, karakteristik arus pelepasan berubah secara signifikan. Grafik menunjukkan bahwa arus rata-rata baterai menjadi lebih stabil dan berada pada kisaran 20–30 A, tanpa lonjakan arus yang ekstrem. Hal ini menunjukkan bahwa BMS secara aktif membatasi arus pelepasan maksimum, sehingga beban listrik didistribusikan secara lebih merata dan aman antar baterai. Pembatasan arus ini berdampak langsung pada penurunan rugi panas serta mengurangi stres termal pada baterai dan inverter. Selain itu, arus pelepasan yang lebih stabil memungkinkan energi tersimpan dimanfaatkan secara lebih efektif, yang tercermin pada peningkatan durasi pengosongan baterai dari 1,5 jam menjadi 2 jam setelah pemasangan BMS.

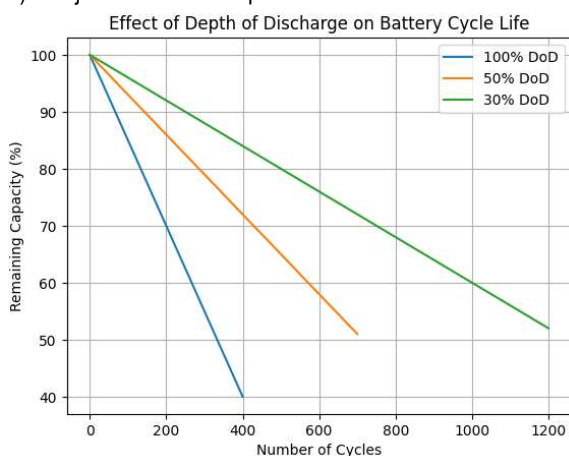
Secara keseluruhan, grafik ini menegaskan bahwa peran BMS tidak hanya terbatas pada pengendalian tegangan, tetapi juga sangat krusial dalam mengatur arus pelepasan. Pengendalian arus yang efektif berkontribusi pada peningkatan umur pakai baterai, peningkatan keamanan sistem, serta stabilitas operasi PLTS hibrida dalam jangka panjang.



**GAMBAR 3.2 GRAFIK PERBANDINGAN ARUS PELEPASAN RATA-RATA BATERAI SEBELUM DAN SESUDAH DIPASANG BMS**

### 3.3 Pengaruh Pemasangan BMS pada Siklus Hidup Baterai

Berdasarkan lembar data pada baterai, pemasangan BMS sangat mempengaruhi siklus hidup baterai. Gambar 3.3 menunjukkan pengaruh hubungan antara *Depth of Discharge* (DoD) dan jumlah siklus hidup baterai.



**GAMBAR 3.3 EFEK KEDALAMAN PELEPASAN PADA SIKLUS HIDUP**

Gambar 3.3 menunjukkan bahwa kedalaman pengosongan memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap umur pakai

baterai VRLA. Semakin besar DoD yang dialami baterai pada setiap siklus pengosongan, semakin cepat penurunan kapasitas terjadi akibat peningkatan stres elektrokimia pada material elektroda. Kondisi ini terutama disebabkan oleh percepatan proses sulfatasi dan peningkatan resistansi internal pada baterai timbal-asam ketika baterai sering mengalami pengosongan dalam.

Pada kondisi pengoperasian tanpa BMS, sistem cenderung bekerja mendekati DoD 100%, yang ditunjukkan oleh penghentian suplai daya pada tingkat SOC yang lebih rendah. Berdasarkan karakteristik baterai VRLA, pengoperasian pada DoD penuh menyebabkan umur siklus baterai terbatas pada ratusan siklus. Hal ini sejalan dengan hasil pengujian sebelum pemasangan BMS, di mana baterai mengalami arus pelepasan tinggi dan penurunan tegangan yang signifikan antar sel, yang secara kumulatif mempercepat degradasi baterai.

Setelah pemasangan BMS, batas *State of Charge* (SOC) dan DoD dikendalikan secara aktif, sehingga sistem hanya dioperasikan hingga DoD maksimum sekitar 50%. Pembatasan ini menyebabkan baterai tidak lagi mengalami pengosongan dalam (*deep discharge*), yang secara langsung berdampak pada peningkatan jumlah siklus hidup. Berdasarkan grafik karakteristik DoD terhadap siklus hidup baterai, pengoperasian pada DoD 50% mampu meningkatkan umur pakai baterai secara signifikan dibandingkan DoD 100%.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa estimasi siklus hidup baterai meningkat dari maksimum 372 siklus sebelum pemasangan BMS menjadi sekitar 572 siklus setelah pemasangan BMS. Peningkatan ini bukan disebabkan oleh perubahan spesifikasi baterai, melainkan oleh perubahan pola operasi sistem yang dikendalikan oleh BMS. Dengan kata lain, BMS berperan sebagai pengendali strategis yang menjaga baterai tetap beroperasi pada zona kerja yang aman dan optimal.

Selain pengendalian DoD, BMS juga membatasi arus pelepasan maksimum, yang berkontribusi pada penurunan rugi panas dan memperlambat degradasi termal. Penurunan arus pelepasan dari 50,3 A menjadi 29,9 A mengurangi beban termal pada baterai dan inverter, sehingga memperpanjang umur komponen sistem secara keseluruhan. Kombinasi antara pembatasan DoD dan arus pelepasan ini menjadikan BMS sebagai faktor kunci dalam peningkatan keandalan sistem penyimpanan energi.

Dengan demikian, grafik hubungan DoD terhadap siklus hidup baterai menegaskan bahwa pemasangan BMS tidak hanya berfungsi sebagai sistem proteksi, tetapi juga sebagai alat optimasi umur pakai baterai. Temuan ini memperkuat hasil penelitian sebelumnya terkait manajemen baterai, sekaligus memberikan bukti eksperimental bahwa implementasi BMS pada sistem PLTS hibrida skala kecil mampu meningkatkan keberlanjutan operasional dan efisiensi biaya jangka panjang.

Efek kedalaman pelepasan pada siklus hidup baterai VRLA. Gambar tersebut menggambarkan bahwa membatasi kedalaman pengosongan secara signifikan meningkatkan masa pakai baterai secara signifikan. Pengoperasian pada 50% DoD, sebagaimana diberlakukan oleh Sistem Manajemen Baterai, menghasilkan siklus hidup yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi pengosongan penuh, mendukung temuan eksperimental tentang masa pakai baterai yang lebih lama setelah pemasangan BMS.

Peningkatan siklus hidup baterai yang diamati terutama dikaitkan dengan pengurangan kedalaman pengosongan yang diberlakukan oleh BMS, daripada perubahan kapasitas baterai,

yang menunjukkan bahwa manajemen pengosongan memainkan peran dominan dalam umur panjang baterai VRLA

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini membahas pentingnya penerapan BMS dalam meningkatkan kinerja dan keandalan sistem penyimpanan energi pada PLTS hibrida skala kecil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa instalasi BMS dengan metode *active cell balancing* mampu menyeimbangkan tegangan antar baterai, membatasi arus pelepasan, serta meningkatkan durasi pemanfaatan energi tersimpan.

Sebelum BMS dipasang, terjadi ketidakseimbangan tegangan antara baterai, yaitu 12,46V (baterai satu), 12,44V (baterai dua), dan 12,46V (baterai tiga), berbeda dengan baterai empat, yaitu 12,98V. Setelah memasang BMS, voltage menjadi seimbang dengan nilai 12,39V (baterai satu dan dua), 12,3V (baterai tiga) dan 12,25V (baterai empat). Arus pada saat pemakaian dibatasi oleh BMS dengan nilai tidak mencapai 50A, sehingga mengurangi kehilangan panas dan memperpanjang masa pakai inverter.

Nilai SOC baterai setelah dan sebelum BMS dipasang berubah dari 100% menjadi 90%. Perbedaan juga pada lamanya waktu pemakaian, yaitu sebelum pemasangan BMS memiliki waktu 1 jam 30 menit dan setelah pemasangan BMS memiliki waktu 2 jam.

Temuan utama penelitian meliputi penurunan arus maksimum dari 50,3 A menjadi 29,9 A, peningkatan durasi pengosongan dari 1,5 jam menjadi 2 jam, serta peningkatan estimasi siklus hidup baterai dari 372 menjadi 572 siklus. Hasil ini memiliki keterkaitan yang kuat dengan penelitian terdahulu oleh Einhorn et al. (2011) [12] dan Uzair et al. (2021) [13], serta secara empiris mendukung kesimpulan mereka mengenai efektivitas *active cell balancing*.

Pengembangan penelitian di masa mendatang dapat diarahkan pada integrasi BMS berbasis Internet of Things (IoT), penerapan algoritma estimasi SOC berbasis kecerdasan buatan, serta perbandingan performa antara baterai VRLA dan lithium iron phosphate ( $\text{LiFePO}_4$ ) dalam sistem PLTS hibrida.

#### Referensi

- [1] S. Samsurizal, K. T. Mauriraya, M. Fikri, N. Pasra, and Christiono, *Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)*, R. Hidayawanti, Ed. Cengkareng, Indonesia: Institut Teknologi PLN, 2021, pp. 1–47.
- [2] Yulisman, A. Fakhri, and Albeni, "Perancangan sistem pembangkit listrik hybrid tenaga surya dan PLN," *Journal of Electrical Power Control and Automation*, vol. 5, no. 1, pp. 29–35, Jun. 2022, doi: 10.33087/jepca.v5i1.68.
- [3] R. Budiarto, D. S. Widhyarto, A. Prasetya, and J. J. Hidayat, "Energi surya untuk komunitas: Meningkatkan produktivitas masyarakat pedesaan melalui energi terbarukan," 2017.
- [4] M. Einhorn, W. Roessler, and J. Fleig, "Improved performance of serially connected Li-ion batteries with active cell balancing in electric vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 6, pp. 2448–2457, Jul. 2011, doi: 10.1109/TVT.2011.2153886.
- [5] Y. Xing, E. W. M. Ma, K. L. Tsui, and M. Pecht, "Battery management systems in electric and hybrid vehicles," *Energies*, vol. 4, no. 11, pp. 1840–1857, 2011, doi: 10.3390/en4111840.
- [6] Y. Wang et al., "A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 131, Oct. 2020, Art. no. 110015, doi: 10.1016/j.rser.2020.110015.
- [7] P. Ningrum, N. A. Windarko, and S. Suhariningsih, "Battery management system (BMS) dengan state of charge (SOC) metode modified coulomb counting," *INOVTEK—Seri Elektro*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2019, doi: 10.35314/ise.v1i1.1022.
- [8] E. Loniza, J. A. Situmorang, and A. I. Cahyadi, "Cell balancing on three-cell lithium polymer batteries connected in series," *Journal of Electrical Technology UMY*, vol. 1, no. 3, pp. 135–142, 2017, doi: 10.18196/jet.1318.
- [9] A. Z. Saleh et al., "Perencanaan sistem hybrid untuk pelayanan jaringan kelistrikan di Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi," 2018.
- [10] Sianipar and Rafael, "Dasar perencanaan pembangkit listrik tenaga surya," vol. 11, pp. 61–78.
- [11] H. R. Iskandar et al., "Analisis performa baterai jenis valve regulated lead acid pada PLTS off-grid 1 kWp," *Jurnal Teknik*, vol. 13, no. 2, pp. 129–140, 2021, doi: 10.24853/jurtek.13.2.129-140.
- [12] Y. Barsukov and J. Qian, *Battery Power Management for Portable Devices*. Boston, MA, USA: Artech House, 2013.
- [13] M. Uzair, G. Abbas, and S. Hosain, "Characteristics of battery management systems of electric vehicles with consideration of the active and passive cell balancing process," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, no. 3, Aug. 2021, doi: 10.3390/wevj12030120.
- [14] Solana, *Solana Front Terminal 12–100 Battery Datasheet*, Manufacturer Datasheet, 2020.
- [15] J. Warner, "Battery Management System Controls," 2015. doi: 10.1016/B978-0-12-801456-1.00008-7.