

Prototype Sistem Manajemen Beban Adaptif Untuk Meningkatkan Efisiensi Energi Dan Umur Baterai Pada Sistem *Hybrid* Angin Dan Surya

Agil Ridhohan^{*)1}, Ihtari Prastyaningrum²

^{1,2}Prodi Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas PGRI Madiun

^{*)}Corresponding author, email: agilpsht1922@gmail.com

Abstrak

Sistem pembangkit *hybrid* berbasis energi surya dan angin merupakan salah satu solusi energi terbarukan yang mampu meningkatkan kontinuitas suplai energi dibandingkan penggunaan satu sumber energi saja. Namun, fluktuasi daya yang dihasilkan akibat perubahan kondisi cuaca dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara energi yang tersedia dan kebutuhan beban. Selain itu, penggunaan baterai secara terus-menerus tanpa pengelolaan yang tepat dapat mempercepat degradasi kapasitas dan menurunkan umur baterai. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengembangkan Sistem Manajemen Beban Adaptif berbasis ESP32 yang mampu mengatur penggunaan beban secara otomatis berdasarkan kondisi *State of Charge* (SoC) baterai dan ketersediaan energi pada sistem *hybrid* angin dan surya. Sistem dikembangkan menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan kuantitatif eksperimen. Komponen utama yang digunakan meliputi ESP32, sensor ACS712, sensor tegangan, *Relay*, LCD TFT, dan platform *Blynk* sebagai media monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT). Pengujian dilakukan melalui validasi ahli, pengujian fungsional alat, pengujian efisiensi energi, dan pengujian umur baterai. Hasil penelitian diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi, menjaga kestabilan sistem, serta memperpanjang umur baterai melalui mekanisme pengendalian beban secara *real-time*.

INFO.

Info. Artikel:

No. 041

Received. July, 14, 2026

Revised. August 14, 2026

Accepted. August 20, 2026

Page. 54 – 62

Kata kunci:

- ✓ Sistem Hybrid
- ✓ Manajemen Beban Adaptif
- ✓ ESP32
- ✓ State of Charge
- ✓ Internet of Things
- ✓ Efisiensi Energi

Abstract

A hybrid power generation system based on solar and wind energy is one renewable energy solution capable of improving the continuity of energy supply compared to relying on a single energy source. However, fluctuations in power output caused by changing weather conditions can lead to an imbalance between available energy and load demand. Additionally, continuous battery use without proper management can accelerate capacity degradation and shorten battery life. This research aims to design and develop an ESP32-based Adaptive Load Management System capable of automatically regulating load usage based on the battery's *State of Charge* (SoC) and energy availability in a hybrid wind and solar system. The system was developed using the *Research and Development* (R&D) method with a quantitative experimental approach. The main components used include the ESP32, an ACS712 sensor, a voltage sensor, a relay, a TFT LCD, and the *Blynk* platform as an *Internet of Things* (IoT)-based monitoring medium. Testing was conducted through expert validation, functional testing of the device, energy efficiency testing, and battery lifespan testing. The research results are expected to improve energy efficiency, maintain system stability, and extend battery life through *real-time* load control mechanisms.

PENDAHULUAN

Energi merupakan kebutuhan utama dalam mendukung berbagai aktivitas manusia, sehingga ketersediaan sumber energi yang berkelanjutan menjadi aspek penting dalam pembangunan. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar adalah energi surya karena tersedia melimpah, mudah diperoleh, dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik yang ramah lingkungan [1]. Seiring dengan perkembangan teknologi di bidang kelistrikan, berbagai inovasi terus dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkit berbasis energi terbarukan. Perkembangan tersebut mendorong lahirnya berbagai solusi yang lebih kreatif dan inovatif dalam pemanfaatan energi

alternatif untuk memenuhi kebutuhan energi secara berkelanjutan [2]. Sistem pembangkit listrik *hybrid* yang mengombinasikan energi surya dan angin merupakan salah satu solusi pemanfaatan energi terbarukan yang mampu meningkatkan kontinuitas pasokan energi listrik. Kombinasi kedua sumber energi tersebut dapat mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil sekaligus meningkatkan keandalan sistem pembangkit. Namun, daya yang dihasilkan panel surya dan turbin angin sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti intensitas radiasi matahari dan kecepatan angin, sehingga energi yang dihasilkan cenderung berfluktuasi [3].

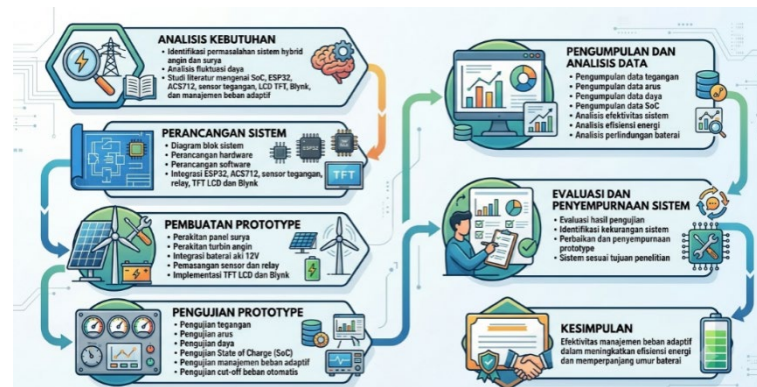
Dalam menjaga kontinuitas suplai energi, sistem *hybrid* umumnya dilengkapi dengan baterai sebagai media penyimpanan energi. Akan tetapi, penggunaan baterai yang tidak terkontrol dapat menyebabkan pengosongan berlebih (*over-discharge*) yang berdampak pada penurunan kapasitas, efisiensi, dan umur pakai baterai. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan energi yang mampu menyesuaikan penggunaan beban dengan kondisi energi yang tersedia agar baterai dapat beroperasi secara optimal [4]. Salah satu parameter yang banyak digunakan dalam pengelolaan baterai adalah *State of Charge (SoC)*, yaitu nilai yang menunjukkan jumlah energi yang masih tersimpan di dalam baterai.

Penelitian yang dilakukan oleh [5] menunjukkan bahwa metode *Coulomb Counting* dapat digunakan untuk memperkirakan nilai SoC baterai secara efektif. Selain itu, [6] menjelaskan bahwa pemantauan SoC secara berkelanjutan berperan penting dalam menjaga performa dan kesehatan baterai selama proses pengisian maupun pengosongan. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh [7] berhasil mengembangkan sistem monitoring dan manajemen energi pada pembangkit *hybrid* berbasis *Internet of Things (IoT)* dengan tingkat akurasi pengukuran yang tinggi. Sementara itu, [8] mengembangkan sistem manajemen energi adaptif yang mampu meningkatkan efisiensi distribusi daya pada sistem energi terbarukan. Namun, penelitian tersebut masih berfokus pada fungsi monitoring dan optimasi distribusi daya serta belum memanfaatkan nilai SoC sebagai dasar pengendalian beban otomatis untuk melindungi baterai dari pengosongan berlebih.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem manajemen beban adaptif berbasis ESP32 yang memanfaatkan nilai SoC sebagai parameter utama dalam pengambilan keputusan pengendalian beban. Sistem dilengkapi dengan sensor ACS712, sensor tegangan, *Relay*, LCD TFT, dan aplikasi *Blynk* untuk melakukan monitoring secara *real-time*. Ketika nilai SoC berada di bawah batas yang telah ditentukan, sistem akan melakukan pemutusan beban (*load cut-off*) secara otomatis. Kebaruan penelitian ini terletak pada pemanfaatan SoC sebagai dasar pengendalian beban adaptif pada sistem *hybrid* angin dan surya untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi sekaligus memperpanjang umur baterai.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development (R&D)*, yaitu metode penelitian yang berfokus pada proses perancangan, pengembangan, dan pengujian [9]. Metode *Research and Development (R&D)* merupakan pendekatan yang digunakan untuk menghasilkan atau mengembangkan suatu produk melalui tahapan analisis kebutuhan, perancangan, pembuatan, pengujian, evaluasi, dan penyempurnaan. Pada penelitian ini, metode R&D diterapkan untuk mengembangkan *prototype* sistem manajemen beban adaptif yang digunakan sebagai media monitoring dan pengendalian beban pada sistem *hybrid* angin dan surya [10]. Penelitian ini dilaksanakan melalui serangkaian tahapan yang dimulai dari analisis kebutuhan, perancangan sistem, pembuatan *prototype*, pengujian, pengumpulan dan analisis data, hingga evaluasi dan penyempurnaan sistem. Setiap tahapan dilakukan secara sistematis agar *prototype* yang dikembangkan sesuai dengan tujuan penelitian dan dapat berfungsi sebagaimana yang direncanakan. Alur pelaksanaan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian Sistem Manajemen Beban Adaptif

A. Analisis Kebutuhan

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi permasalahan yang terjadi pada sistem *hybrid* angin dan surya, khususnya terkait fluktuasi daya yang dapat memengaruhi efisiensi penggunaan energi dan umur baterai. Selain itu dilakukan studi literatur mengenai *State of Charge* (SoC), ESP32, sensor ACS712, sensor tegangan, LCD TFT, aplikasi *Blynk*, dan sistem manajemen beban adaptif sebagai dasar perancangan sistem.

B. Perancangan Sistem

Pada tahap ini dilakukan perancangan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Perangkat keras terdiri atas panel surya, turbin angin, baterai aki 12 V, ESP32, sensor ACS712, sensor tegangan, *Relay*, LCD TFT, dan aplikasi *Blynk*. Sedangkan perangkat lunak dirancang untuk melakukan monitoring parameter sistem serta pengendalian beban berdasarkan nilai SoC baterai. Diagram blok dan integrasi antar komponen dirancang agar sistem mampu bekerja secara otomatis dan *real-time*.

C. Pembuatan Prototype

Tahap pembuatan prototipe dilakukan dengan merakit seluruh komponen sesuai rancangan yang telah dibuat. Panel surya dan turbin angin digunakan sebagai sumber energi utama yang terhubung dengan baterai melalui sistem pengisian. Selanjutnya dilakukan pemasangan sensor arus, sensor tegangan, *Relay*, LCD TFT, serta konfigurasi aplikasi *Blynk* untuk monitoring data secara nirkabel. Setelah seluruh komponen terintegrasi, dilakukan pengujian awal untuk memastikan sistem dapat beroperasi dengan baik.

D. Pengujian Prototype

Pengujian prototipe dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem yang telah dikembangkan. Parameter yang diuji meliputi tegangan, arus, daya, dan nilai SoC baterai. Selain itu dilakukan pengujian fungsi manajemen beban adaptif dan mekanisme *cut-off* beban otomatis ketika nilai SoC berada di bawah batas yang telah ditentukan. Hasil pengukuran sensor dibandingkan dengan alat ukur standar untuk mengetahui tingkat akurasi sistem.

E. Pengumpulan dan Analisis Data

Data penelitian diperoleh dari hasil pembacaan sensor yang meliputi tegangan, arus, daya, dan SoC baterai. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengetahui efektivitas sistem dalam meningkatkan efisiensi energi dan melindungi baterai dari kondisi *over-discharge*. Analisis juga dilakukan terhadap perubahan konsumsi energi sebelum dan sesudah penerapan sistem manajemen beban adaptif.

F. Evaluasi dan Penyempurnaan Sistem

Tahap evaluasi dilakukan berdasarkan hasil pengujian dan analisis data. Apabila ditemukan ketidaksesuaian antara hasil yang diperoleh dengan tujuan penelitian, dilakukan perbaikan pada

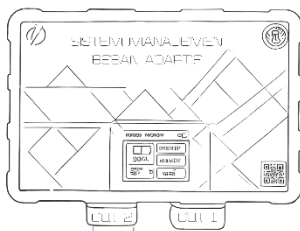
perangkat keras maupun perangkat lunak. Tahap ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja sistem sehingga dapat beroperasi secara optimal sesuai dengan rancangan yang telah ditetapkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

1. Perancangan *Prototype*

Tahap perancangan *Prototype* dilakukan setelah proses perancangan perangkat keras dan perangkat lunak selesai. Perakitan diawali dengan menyiapkan seluruh komponen yang digunakan, seperti ESP32, sensor arus ACS712, sensor tegangan, *Relay*, LCD TFT 2.8 inch, dan baterai aki 12 V. Selanjutnya, setiap komponen dirangkai dan dihubungkan sesuai desain sistem, kemudian ditempatkan dengan rapi di dalam box. Setelah seluruh komponen terpasang, dilakukan pengunggahan program ke ESP32 serta integrasi dengan aplikasi *Blynk* sehingga terbentuk *Prototype* sistem manajemen beban adaptif yang siap digunakan untuk pengujian dan pengambilan data penelitian.

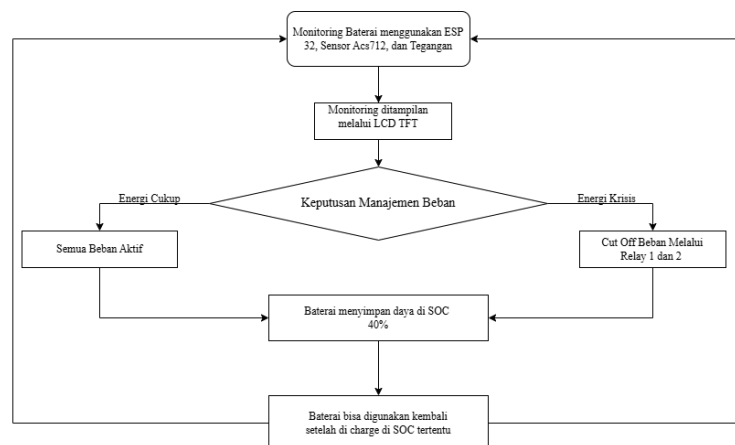


Gambar 2. Desain *Prototype*



Gambar 3. Tampak depan *Prototype*

Prototype yang telah dirakit selanjutnya diprogram agar mampu melakukan pembacaan data sensor, menghitung parameter kelistrikan, serta mengendalikan relay berdasarkan nilai *State of Charge* (SoC) baterai. Alur kerja program tersebut disusun dalam bentuk *flowchart* untuk memudahkan penyusunan logika program dan menunjukkan urutan proses yang dijalankan oleh sistem. Menurut [11], *flowchart* merupakan diagram yang menyajikan tahapan suatu proses atau program menggunakan simbol-simbol yang dihubungkan oleh garis alir sehingga urutan kerja sistem dapat dipahami dengan lebih jelas.



Gambar 4. Flowchart cara kerja sistem

2. Uji Coba *Prototype*

Pengujian *Prototype* sistem manajemen beban adaptif dilakukan dengan tiga pengujian, yaitu pengujian fungsional, pengujian efisiensi energi, dan pengujian umur baterai.

a. Pengujian Fungsional

Pengujian fungsional alat dilakukan untuk memastikan bahwa setiap komponen dan fitur pada sistem manajemen beban adaptif dapat bekerja sesuai dengan fungsi yang telah dirancang. Setiap komponen diuji dengan memberikan kondisi operasi tertentu dan mengamati respons yang dihasilkan oleh sistem. Kriteria keberhasilan pengujian ditentukan berdasarkan kemampuan komponen dalam menjalankan fungsi yang telah dirancang. Pengujian fungsional sistem dengan persamaan 1:

$$P = \frac{\sum x}{\sum xi} \times 100\%(1) \dots\dots\dots [1]$$

Keterangan:

P : Presentase kelayakan (%)
 $\sum X$: Jumlah skor yang diperoleh
 $\sum X_i$: Jumlah skor maksimal

Berdasarkan persamaan tersebut, hasil pengujian fungsional dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Pengujian Fungsional

No.	Komponen	Indikator Keberhasilan	Hasil
1.	ESP 32	ESP 32 dapat menjalankan program tanpa error	✓
2.	Sensor Tegangan	Nilai tegangan dapat terbaca pada sistem	✓
3.	Sensor Arus ACS712	Nilai arus dapat terukur dan ditampilkan	✓
4.	LCD TFT ILI9341	Data tegangan, arus, daya, dan SOC tampil pada layar	✓
5.	Relay	Relay dapat memutus dan menghubungkan beban sesuai kondisi	✓
6.	Perhitungan Daya	Nilai daya (Watt) dapat dihitung dan ditampilkan	✓
7.	Perhitungan Tegangan	Nilai tegangan yang ditampilkan sesuai hasil pengukuran referensi	✓
8.	Perhitungan SOC	Nilai SOC dapat ditampilkan sesuai kapasitas baterai	✓
9.	Perhitungan Arus	Nilai arus yang ditampilkan sesuai hasil pengukuran referensi	✓
10.	Blynk	Data monitoring tampil pada aplikasi <i>Blynk</i> secara real-time	✓

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 1, seluruh fungsi pada sistem manajemen beban adaptif dapat bekerja sesuai dengan rancangan. Pengujian terhadap sepuluh variabel menunjukkan bahwa seluruh fungsi memperoleh status berhasil, sehingga tingkat keberhasilan sistem mencapai 100%. Sensor tegangan dan sensor arus mampu membaca parameter dengan baik, LCD TFT dan aplikasi *Blynk* berhasil menampilkan data secara *real-time*, serta *Relay* dapat mengendalikan beban sesuai kondisi yang ditentukan. Selain itu, fungsi manajemen beban adaptif dan *cut-off* beban otomatis berjalan sesuai dengan nilai SoC yang telah ditetapkan. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan layak digunakan sebagai sistem monitoring dan pengendalian beban pada sistem hybrid angin dan surya.

b. Pengujian Efisiensi Energi

Pengujian efisiensi energi bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem manajemen beban adaptif dalam mengoptimalkan penggunaan energi. Pengujian dilakukan dengan membandingkan konsumsi energi sebelum dan sesudah penerapan sistem manajemen beban adaptif berdasarkan parameter energi yang digunakan, *State of Charge (SoC)*, dan *Depth of Discharge (DoD)* baterai. Pengujian efisiensi energi dengan persamaan 2:

$$EE = \frac{E_{\text{sebelum}} - E_{\text{sesudah}}}{E_{\text{sebelum}}} \times 100\% \dots\dots\dots [2]$$

Keterangan:

EE : Efisiensi energi (%)

E : Energi yang digunakan sebelum penerapan sistem (Wh)

Berdasarkan persamaan tersebut, hasil pengujian fungsional dapat dilihat pada Tabel 2, sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil Uji Efisiensi Energi

No.	Sebelum				Sesudah			
	V	A	Jam	Wh	V	A	Jam	Wh
1.	12	0,56	14,45	97,10	12	0,56	8,47	56,92
2.	12	1,5	5,3	95,40	12	1,5	3,17	57,06
3.	12	1,1	7,1	93,72	12	1,1	4,2	55,44
4.	12	2,52	3,13	94,65	12	2,52	2,03	61,39
5.	12	5,88	1,33	93,84	12	5,88	0,83	58,80
x̄				94,94	12			57,92

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 2, rata-rata konsumsi energi sebelum penerapan sistem manajemen beban adaptif sebesar 94,94 Wh, sedangkan setelah penerapan sistem menjadi 57,92 Wh. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa energi yang digunakan pada kondisi setelah penerapan sistem lebih rendah dibandingkan kondisi sebelumnya. Hal ini dipengaruhi oleh mekanisme *cut-off* otomatis yang menghentikan penggunaan beban ketika *State of Charge (SoC)* mencapai batas yang telah ditentukan, sehingga proses pengosongan baterai tidak berlangsung hingga kapasitas minimum. Kondisi tersebut juga tercermin dari meningkatnya nilai SoC dan menurunnya nilai *Depth of Discharge (DoD)*, yang menunjukkan bahwa penggunaan kapasitas baterai menjadi lebih terkendali selama proses pengujian.

Tabel 3. Hasil Uji Efisiensi Energi

Parameter	Sebelum	Sesudah	Perubahan
Wh	94,94Wh	57,92Wh	-37,02Wh
SOC %	5,81%	42,54%	+36,73%
DOD %	94,19%	57,46%	-36,73%

Berdasarkan hasil uji efisiensi energi, penerapan sistem manajemen beban adaptif menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan kondisi sebelum penerapan sistem. Rata-rata energi yang digunakan menurun dari 94,94 Wh menjadi 57,92 Wh, sehingga diperoleh peningkatan efisiensi energi sebesar 38,99%. Peningkatan efisiensi ini terjadi karena sistem menerapkan mekanisme *cut-off* otomatis saat *State of Charge (SoC)* mencapai batas minimum 40%, sehingga baterai tidak mengalami pengosongan secara berlebihan (*overdischarge*). Dampaknya, nilai SoC akhir meningkat dari 5,81% menjadi 42,54%, sedangkan nilai *Depth of Discharge (DoD)* menurun dari 94,19% menjadi 57,46% atau berkurang sebesar 36,73%. Penurunan DoD tersebut menunjukkan bahwa kedalaman pengosongan baterai menjadi lebih rendah, sehingga beban kerja dan stres pada sel baterai dapat diminimalkan.

c. Pengujian Efisiensi Baterai

Pengujian efisiensi baterai bertujuan untuk mengetahui pengaruh penerapan sistem manajemen beban adaptif terhadap penggunaan dan ketahanan baterai pada sistem hybrid angin dan surya. Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai *State of Charge* (SoC), *Depth of Discharge* (DoD), dan *Equivalent Full Cycle* (EFC) sebelum dan sesudah penerapan sistem. Hasil pengujian digunakan untuk menganalisis kemampuan sistem dalam mengurangi pengosongan baterai secara berlebih sehingga dapat meningkatkan umur pakai baterai. Pengujian efisiensi energi dengan persamaan 3:

$$PUB (\%) = \frac{CL_{\text{sesudah}} - CL_{\text{sebelum}}}{CL_{\text{sebelum}}} \times 100\% \dots\dots\dots [3]$$

Keterangan:

PUB : Presentase Umur Baterai (%)

CL : Umur siklus baterai sebelum perlakuan/optimasi (siklus)

Berdasarkan persamaan tersebut, hasil pengujian fungsional dapat dilihat pada Tabel 4, sebagai berikut:

Tabel 4. Hasil Uji Efisiensi Baterai

No.	Sebelum				Sesudah			
	Ah	DOD%	EFC	Siklus	Ah	DOD%	EFC	Siklus
1.	8,09	96,33%	0,963	311	4,74	56,47%	0,565	531
2.	7,95	94,64%	0,946	317	4,76	56,61%	0,566	530
3.	7,81	92,98%	0,930	323	4,62	55,00%	0,550	545
4.	7,89	93,90%	0,939	319	5,12	60,90%	0,609	493
5.	7,82	93,10%	0,931	322	4,90	58,33%	0,583	514
x̄	7,91	94,19%	0,942	319	4,83	57,46%	0,575	522

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 3, terdapat perbedaan nilai *State of Charge* (SoC), *Depth of Discharge* (DoD), *Equivalent Full Cycle* (EFC), dan jumlah siklus baterai antara kondisi sebelum dan sesudah penerapan sistem manajemen beban adaptif. Rata-rata nilai DoD menurun dari 94,19% menjadi 57,46%, diikuti penurunan nilai EFC dari 0,942 menjadi 0,575. Sementara itu, rata-rata jumlah siklus baterai meningkat dari 319 siklus menjadi 522 siklus. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa setelah penerapan sistem, proses pengosongan baterai berlangsung pada kedalaman yang lebih rendah dibandingkan kondisi sebelum penerapan sistem, sehingga penggunaan kapasitas baterai menjadi lebih terkendali.

Tabel 5. Hasil Uji Umur Baterai

Parameter	Sebelum	Sesudah	Perubahan
Siklus	319	522	204

Berdasarkan hasil uji umur baterai, penerapan sistem manajemen beban adaptif terbukti mampu meningkatkan umur pakai baterai secara signifikan. Estimasi umur baterai meningkat dari 319 siklus sebelum penerapan sistem menjadi 522 siklus setelah penerapan sistem, atau bertambah 204 siklus dengan persentase peningkatan sebesar 63,64%. Peningkatan ini terjadi karena mekanisme *cut-off* otomatis pada batas *State of Charge* (SoC) 40% mampu mengurangi *Depth of Discharge* (DoD) rata-rata dari 94,19% menjadi 57,46%, sehingga nilai *Equivalent Full Cycle* (EFC) juga menurun dari 0,942 menjadi 0,575. Penurunan EFC menunjukkan bahwa baterai mengalami siklus pengisian dan pengosongan penuh yang lebih sedikit, sehingga mengurangi stres mekanis dan kimiawi pada sel baterai.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengembangkan *prototype* sistem manajemen beban adaptif berbasis ESP32 pada sistem *hybrid* angin dan surya. *Prototype* yang dikembangkan mampu melakukan monitoring tegangan, arus, daya, dan *State of Charge* (SoC) secara *real-time* melalui LCD TFT dan aplikasi Blynk, serta mengendalikan beban secara otomatis menggunakan mekanisme *load cut-off* berdasarkan nilai SoC. Hasil validasi ahli memperoleh nilai rata-rata 93,60% dengan kategori sangat layak, sedangkan hasil pengujian fungsional menunjukkan tingkat keberhasilan 100%, sehingga seluruh komponen dan fitur sistem dapat beroperasi sesuai dengan rancangan.

Penerapan sistem manajemen beban adaptif menurunkan rata-rata konsumsi energi dari 94,94 Wh menjadi 57,92 Wh atau meningkatkan efisiensi energi sebesar 38,99%. Selain itu, nilai *State of Charge* (SoC) meningkat dari 5,81% menjadi 42,54%, sedangkan rata-rata *Depth of Discharge* (DoD) menurun dari 94,19% menjadi 57,46%. Perubahan tersebut diikuti dengan peningkatan estimasi umur baterai dari 319 siklus menjadi 522 siklus atau meningkat sekitar 63,64%, yang menunjukkan bahwa mekanisme pengendalian beban berbasis *State of Charge* (SoC) mampu membuat penggunaan energi dan kapasitas baterai menjadi lebih terkendali dibandingkan sebelum penerapan sistem manajemen beban adaptif. Berdasarkan hasil penelitian, pengembangan *prototype* selanjutnya dapat dilakukan dengan menggunakan baterai Li-ion 18650 sebagai pengganti baterai aki, meningkatkan tampilan antarmuka LCD TFT agar lebih informatif, serta menambahkan lampu indikator pada box *prototype* untuk memudahkan pemantauan status inverter selama sistem beroperasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas PGRI Madiun yang telah memberikan dukungan dan fasilitas selama pelaksanaan penelitian. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Ibu Ihtiari Prastyaningrum, S.Pd., M.T. selaku dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan masukan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Hardiyanto, I. Prastyaningrum, "Pengenalan Energi Matahari sebagai Energi Alternatif pada Siswa TK Islam Terpadu Mujahidin Kota Madiun," *KACANEGERA: Jurnal Pengabdian pada Masyarakat*, vol. 8, no. 3, 2025.
- [2] I. Prastyaningrum and P. Ardi, "Project Based Learning For Brush Less DC Motor," *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya)*, vol. 5, pp. 112–118, 2020, doi: 10.20961/prosidingsnfa.v5i0.46591.
- [3] H. Anwar, Nur Rahmah. 2021. "Perancangan Turbin Angin Jenis Helical untuk Sistem Pembangkit Listrik." *Jurnal Teknik Mesin Sinergi* 19(1): 9–17. doi:10.31963/sinergi.v19i1.2683.
- [4] Iskandar, Handoko Rusiana, Clarez Bebby Elysees, Rijal Ridwanulloh, Atik Charisma, dan Hajjar Yuliana. 2021. "ANALISIS PERFORMA BATERAI JENIS VALVE REGULATED LEAD ACID PADA PLTS OFF-GRID 1 KWP." *Jurnal Teknologi* 13(2).
- [5] Bawango, Kesya M M, dan Hesky S Kolibu. 2024. "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.
- [6] Zhao, Jiahui, Yong Zhu, Bin Zhang, Mingyi Liu, Jianxing Wang, Chenghao Liu, dan Xiaowei Hao. 2023. "Review of State Estimation and Remaining Useful Life Prediction Methods for Lithium-Ion Batteries." *Sustainability* 15(6): 5014. doi:10.3390/su15065014.
- [7] Abdillah, Hartawan, Tamam Asrori, Mas Ahmad Baihaqi, Dani Hari Tunggal Prasetyo, dan Alief Muhammad. 2023. "Sistem Monitoring dan Manajemen Energi pada Pembangkit Hybrid PLTS, PLTB,

-
- dan PLN berbasis Internet of Things.” *JASIEK (Jurnal Aplikasi Sains, Informasi, Elektronika dan Komputer)* 5(2): 41–50. doi:10.26905/jasiek.v5i2.10920.
- [8] Mangate, L.D., Haider Alabdeli, Rohit Agarwal, T. Saravanan, Janakiraman V, Nitin Sherje, dan K. Kumaraswamy Naidu. 2024. “Adaptive Energy Management System for Enhancing Efficiency and Reliability in Hybrid Renewable Energy Systems” ed. K.P. Navven, J. Guru Jawahar, K. Ramya, dan B. Pragathi. *E3S Web of Conferences* 591: 01015. doi:10.1051/e3sconf/202459101015.
- [9] F. Febita, T. Andari, and R. Lusiana, “Pengembangan E-LKPD Berbasis *Problem Based Learning* Dalam Melatih Kemampuan Berpikir Kritis Pada Materi Matriks,” *LEMMA*, vol. 10, no. 2, pp. 161–171, Jun. 2024, doi: 10.22202/jl.2024.v10i2.8335.
- [10] T. N. Aini, T. Nurvita Sari, N. Halifah R., and Darmadi, “Media Pembelajaran Geoboard Meningkatkan Pemahaman Keliling Bangun Datar Siswa Kelas V SDN Tlogomas 2,” *Indonesian Journal of Education*, vol. 1, no. 2, pp. 35–42, Oct. 2024.
- [11] S. Nita, S. Kartikawati, “Analysis Of The Impact Narrative Algorithm Method, Pseudocode and Flowchart Towards Students Understanding Of The Programming Algorithm Courses,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 835, no. 1, Art. no. 012044, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/835/1/012044.