

Perancangan Sistem Proteksi Baterai Berbasis *Load Shedding* Pada Sistem *Hybrid* (PLTS-PLTB) Rumah Apung

Rizkyanto Malah¹, Zefanya Aring², Randy Pramudya Anung³, Leony Ariesta Wenno⁴, Fanny Jouke Doringin⁵
^{1,2,3,4,5}Politeknik Negeri Manado, Manado, 95258
e-mail: rizkyantomalah@gmail.com

Abstrak— Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan energi terbarukan mengalami peningkatan yang signifikan untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil serta menekan emisi karbon. Salah satu solusi yang berkembang adalah sistem pembangkit listrik hybrid yang mengombinasikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), Khususnya pada wilayah pesisir pantai seperti rumah rakit apung di pantai malalayang. Namun, sistem penyimpanan energi berbasis baterai pada sistem tersebut belum dilengkapi dengan sistem proteksi yang memadai, sehingga berpotensi mengalami kondisi overcharge dan overdischarge yang dapat menurunkan kinerja dan umur pakai baterai. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah sistem proteksi baterai berbasis (IoT) pada sistem hybrid PLTS-PLTB. Metode yang digunakan adalah Research and Development (R&D) melalui tahapan perancangan, pembuatan, dan pengujian sistem. Sistem dirancang menggunakan sensor PZEM-017 sebagai pengukuran parameter listrik, ESP32 sebagai pengendali utama, serta relay sebagai aktuator untuk mekanisme load shedding bertingkat. Monitoring sistem dilakukan secara real-time melalui platform Blynk. Hasil pengujian menunjukkan akurasi pengukuran tegangan yang baik, dengan nilai kesalahan berkisar antara 0,55% hingga 0,82% dan rata-rata 0,686% jika dibandingkan dengan multimeter. Sistem perlindungan juga berfungsi sesuai rancangan, di mana pemutusan beban terjadi secara bertahap berdasarkan tegangan baterai: 24 V (semua beban aktif), 23 V (beban 1 mati), 22 V (beban 1 dan 2 mati), 21 V (beban 1, 2, dan 3 mati), dan 20 V (semua beban mati). Sistem ini mampu merespons perubahan tegangan secara konsisten tanpa pemicu palsu. Sistem ini meningkatkan keamanan, keandalan, dan masa pakai baterai, serta mendukung Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) 7 dan 13.

Kata kunci: Energi terbarukan, sistem hybrid, proteksi baterai, load shedding, IoT

Abstract— In recent years, the use of renewable energy has increased significantly to reduce dependence on fossil fuels and cut carbon emissions. One emerging solution is a hybrid power generation system that combines solar power plants (SPP) and wind power plants (WPP), particularly in coastal areas such as the floating houses on Malalayang Beach. However, the battery-based energy storage system in this setup lacks adequate protection mechanisms, making it susceptible to overcharging and over-discharging conditions that can degrade battery performance and shorten its lifespan. This study aims to design an IoT-based battery protection system for the SPP-WPP hybrid system. The method used is Research and Development (R&D) through the stages of system design, fabrication, and testing. The system is designed using a PZEM-017 sensor for measuring electrical parameters, an ESP32 as the main controller, and a relay as the actuator for a multi-level load shedding mechanism. System monitoring is performed in real-time via the Blynk platform. Test results show good voltage measurement accuracy, with error values ranging from 0.55% to 0.82% and an average of 0.686% when compared to a multimeter. The protection system also functions as designed, where load disconnection occurs gradually based on battery voltage: 24 V (all loads active), 23 V (load 1 off), 22 V (loads 1 and 2 off), 21 V (loads 1, 2, and 3 off), and 20 V (all loads off). This system is capable of consistently responding to voltage changes without false triggers. It enhances safety, reliability, and battery lifespan, and supports Sustainable Development Goals (SDGs) 7 and 13.

Keywords: Renewable energy, hybrid system, battery protection, load shedding, IoT

I. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan energi terbarukan mengalami peningkatan yang signifikan sebagai upaya untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil serta menekan emisi gas karbon. Salah satu solusi yang berkembang adalah sistem pembangkit Listrik.

hybrid yang mengombinasikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan memanfaatkan potensi energi matahari dan angin [1]. Penerapan sistem energi *hybrid* ini sangat relevan bagi wilayah pesisir, khususnya di kawasan Pantai Malalayang, Kota Manado. Pemanfaatan rumah apung oleh masyarakat nelayan tidak hanya berfungsi sebagai sarana penunjang aktivitas perikanan, tetapi juga berpotensi

dikembangkan sebagai destinasi wisata bahari. Namun, keterbatasan akses terhadap jaringan listrik konvensional masih menjadi kendala utama dalam mendukung aktivitas di lokasi tersebut [2]. Oleh karena itu, sistem *hybrid* berbasis *off-grid* menjadi alternatif dalam penyediaan energi listrik [3].

Dalam sistem energi *hybrid* berbasis *off-grid*, baterai LiFePO₄ berperan sebagai komponen penyimpan energi utama yang menentukan keandalan pasokan listrik [4]. Namun, baterai memiliki sensitivitas tinggi terhadap kondisi operasional yang ekstrem, termasuk pengisian berlebihan (*Overcharge*), pengosongan dalam (*Deep discharge*), dan pengosongan berlebihan (*Overdischarge*). Kondisi-kondisi tersebut dapat mempercepat degradasi kapasitas baterai secara ireversibel dan berpotensi menimbulkan risiko keselamatan seperti *thermal runaway*. Penelitian yang dilakukan oleh Xiong menunjukkan bahwa manajemen baterai yang tidak optimal dapat mempersingkat umur pakai baterai hingga 40% dibandingkan kondisi operasi idealnya [5]. Oleh karena itu, diperlukan sistem manajemen dan proteksi baterai yang andal untuk menjaga kinerja serta memperpanjang masa operasional sistem energi secara keseluruhan yang dihasilkan [6].

Berdasarkan kajian terhadap penelitian terdahulu, terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan dan sebagian besar sistem proteksi baterai yang ada hanya melakukan pemutusan beban secara total tanpa mempertimbangkan prioritas beban, serta belum diterapkan secara terintegrasi pada sistem hybrid PLTS-PLTB di lingkungan pesisir. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada integrasi tiga aspek sekaligus, yaitu: (1) mekanisme *load shedding* bertingkat berbasis level tegangan baterai LiFePO₄ pada sistem *hybrid* PLTS-PLTB 24V, (2) monitoring parameter listrik real-time menggunakan sensor PZEM-017 dengan komunikasi RS485-Modbus RTU, dan (3) antarmuka *IoT* berbasis platform Blynk untuk pemantauan dan kontrol jarak jauh, yang diterapkan pada konteks spesifik rumah apung di Pantai Malalayang, Kota Manado. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem proteksi baterai tersebut guna meningkatkan efisiensi energi, keandalan sistem, dan umur pakai baterai pada lingkungan off-grid pesisir.

II. STUDI PUSTAKA

Studi pustaka ini membahas beberapa konsep dasar yang digunakan sebagai landasan dalam perancangan sistem, yaitu sistem proteksi baterai pada sistem pembangkit hybrid PLTS-PLTB berbasis mikrokontroler.

A. Sistem Load Shedding

Load Shedding merupakan mekanisme pelepasan beban listrik, baik secara otomatis maupun manual, yang bertujuan melindungi sistem kelistrikan dari kondisi padam menyeluruh (*blackout*). Penerapannya mencakup sistem transmisi dan distribusi pada tegangan tinggi sampai tegangan rendah [7].

B. Sistem Hybrid (PLTS-PLTB)

Pembangkit listrik berbasis sistem *hybrid* yang mengandalkan sumber energi terbarukan memiliki karakteristik perubahan naik turunnya pasokan tegangan listrik akibat pengaruh kondisi lingkungan [8]. Kombinasi kedua sumber ini memungkinkan sistem menghasilkan pasokan energi yang lebih stabil karena sifat keduanya yang saling melengkapi [3].

C. Internet Of Things

Internet of Things (IoT) Adalah paradigma teknologi yang menghubungkan perangkat fisik dengan jaringan internet melalui sensor dan modul komunikasi, sehingga memungkinkan pertukaran data secara otomatis. Dalam penelitian ini, *IoT* dimanfaatkan untuk pemantauan kondisi sistem secara *real-time* dari jarak jauh [9].

D. Baterai

Baterai adalah teknologi penyimpanan yang paling banyak digunakan untuk tujuan ini dan beberapa kontribusi dalam literatur menunjukan aplikasi yang menarik dari baterai dalam jaringan transmisi [10]. Sistem manajemen pengisian daya baterai merupakan media terintegrasi yang berfungsi untuk mengontrol parameter arus dan tegangan secara presisi guna memastikan sel baterai beroperasi dalam batas aman [11]. Jenis baterai LiFePO₄ adalah salah-satu jenis baterai lithium-ion yang menggunakan lithium besi fosfat (LiFePO₄) sebagai material katoda [12].

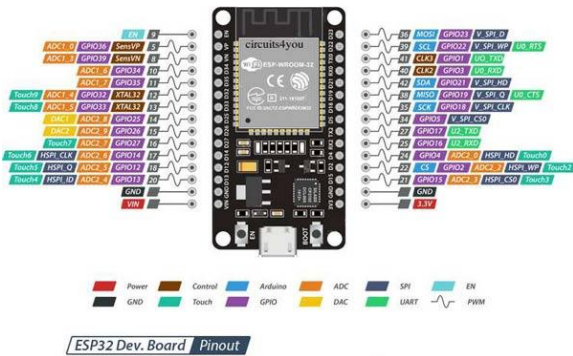


Gambar 1. Baterai LiFePO₄

SoC (*State Of Charge*) merepresentasikan persentase energi yang tersisa pada baterai relatif terhadap kapasitas penuhnya, serupa dengan indikator bahan bakar pada kendaraan berbahan bakar bensin yang menunjukkan berapa banyak energi yang tersisa didalam baterai. SoC baterai yang akurat tidak hanya membantu memberikan informasi tentang baterai yang tersisah, tapi jaminan yang andal dan aman [5].

E. ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler berbasis WiFi dan Bluetooth yang banyak digunakan pada sistem *Internet of Things IoT*. Kemampuan pemrosesan data yang memadai serta dukungan komunikasi nirkabel menjadikan ESP32 pilihan utama dalam pengembangan sistem pemantauan dalam pengendalian jarak jauh [13], [14].



Gambar 2. ESP32

F. Relay

Relay merupakan komponen saklar elektromagnetik yang digunakan untuk menghubungkan atau memutuskan rangkaian listrik menggunakan sinyal kontrol bertegangan rendah. Prinsip kerja relay bekerja berdasarkan medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan untuk menggerakkan kontak saklar [15].



Gambar 3. Modul Relay 2 Channel

G. Sensor PZEM-017

PZEM-017 adalah modul sensor DC yang mampu mengukur tegangan, arus, daya, dan energi listrik hingga 300V DC dengan bantuan shunt eksternal. Data hasil pengukuran ditransmisikan ke mikrokontroler melalui antar muka RS485 menggunakan protocol *Modbus RTU* [16].

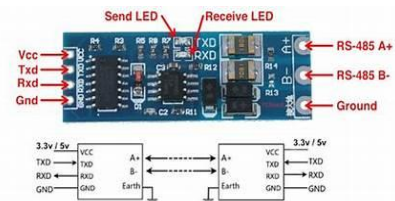


Gambar 4. Sensor PZEM-017

H. RS485

RS485 adalah standar komunikasi serial diferensial yang dirancang untuk transmisi data jarak jauh dengan ketahanan tinggi terhadap interferensi elektromagnetik. Kemampuannya mendukung komunikasi *multi-device*

dalam satu jalur menjadikannya pilihan umum pada sistem industri. Dalam penelitian ini, RS485 menghubungkan sensor PZEM-017 dengan ESP32 menggunakan protokol *Modbus RTU* [17].



Gambar 5. RS485

I. Resistor Shunt

Resistor shunt merupakan alat listrik yang menghasilkan jalur resistansi rendah untuk arus listrik. Shunt juga dapat disebut sebagai *shunt ammeter* atau *resistor shunt* arus, biasanya digunakan untuk pengukuran arus tinggi dengan resistansi rendah. Penerapan hukum ohm yang digunakan shunt resistor sebagai berikut [18]:

$$V = I \times R \text{ Atau } I = V \div R. \quad (1)$$

Dimana: V =tegangan,
I = Arus, dan
R = resistansi.

Berdasarkan konsep dan komponen yang telah dijelaskan, sistem proteksi baterai pada pembangkit *hybrid* memerlukan integrasi antara perangkat monitoring, pengendalian, serta mekanisme proteksi yang tepat. Oleh karena itu, diperlukan kajian terhadap penelitian sebelumnya sebagai acuan dalam pengembangan sistem yang lebih optimal. Beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan topik ini antara lain sebagai berikut:

1. Penelitian membahas sistem load shedding pada *energy storage* berbasis mikrokontroler ATmega328. Penelitian ini menunjukkan bahwa metode ini mampu memperpanjang durasi penggunaan beban vital hingga 2 jam 6 menit 30 detik dibandingkan sistem tanpa load shedding. Namun, sistem tersebut belum terintegrasi dengan *IoT* dan belum diterapkan pada sistem *hybrid* PLTS-PLTB [7].
2. Penelitian oleh Ahmad Alif Farhan, Diana Alia, dan Hadi Setiawan membahas sistem pembangkit listrik tenaga bayu dengan monitoring pengisian baterai berbasis *IoT*. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan waktu pengisian baterai antara siang dan malam, dengan waktu pengisian optimal sebesar 8,82 jam pada siang hari. Namun, penelitian ini masih terbatas pada sistem monitoring dan belum dilengkapi mekanisme proteksi maupun pengendalian beban pada kondisi baterai [19].
3. Penelitian oleh Leony Ariesta Wenno, Engel Manuel Punuh, Marson James Budiman, Deitje Sophie Pongoh, Henny A. B. Lesnussa, Julianus Gesuri Daud. mengembangkan sistem proteksi tegangan baterai berbasis *IoT* menggunakan ESP32 dan platform Blynk Sistem mampu melakukan monitoring real-time serta

memutus beban saat terjadi *undervoltage* (11,8 Volt pada sistem 12 Volt), serta memberikan notifikasi melalui aplikasi. Namun, sistem masih bersifat pemutusan beban total tanpa pengaturan beban secara bertingkat [20].

Penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem monitoring dan proteksi baterai berbasis *IoT* yang mampu memantau tegangan dan arus serta memutus beban saat terjadi kondisi abnormal seperti *undervoltage* atau *overvoltage*. Namun, sebagian besar sistem masih melakukan pemutusan beban secara total tanpa mempertimbangkan prioritas beban. Selain itu, penerapan load shedding bertingkat yang adaptif terhadap penurunan tegangan baterai masih terbatas, khususnya pada sistem hybrid PLTS–PLTB. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan sistem proteksi baterai berbasis ESP32 pada sistem hybrid PLTS–PLTB 24 Volt dengan mekanisme load shedding bertingkat berdasarkan level tegangan baterai secara real-time untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan umur pakai baterai.

III. METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Research and Development* (R&D). Metode ini dipilih karena penelitian berfokus pada proses perancangan, pengembangan, dan pengujian sistem proteksi baterai berbasis *Load Shedding* pada sistem hybrid PLTS-PLTB di rumah rakit apung. Melalui metode ini, penelitian tidak hanya menghasilkan konsep, tetapi juga menghasilkan prototipe yang dapat diuji secara langsung.

A. Alur Penelitian

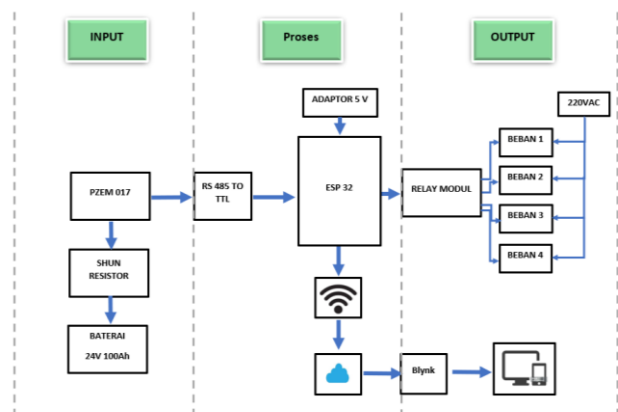


Gambar 6. Tahapan Penelitian

Alur penelitian dilakukan berdasarkan *flowchart* pada Gambar 6, yang meliputi tahap identifikasi masalah, studi literatur, perancangan sistem, pembuatan prototipe, serta pengujian sistem. Tahap perancangan mencakup perangkat keras dan perangkat lunak agar sistem dapat bekerja secara terpadu. pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja dan respon sistem terhadap kondisi yang diberikan. Apabila hasil pengujian belum sesuai, dilakukan perbaikan pada tahap perancangan. Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui akurasi pengukuran dari sensor dan multimeter, sehingga dapat mengetahui nilai presisi antara sensor dan multimeter dengan menghitung nilai error serta respon sistem terhadap perubahan tegangan baterai.

B. Diagram Blok Sistem

Pengembangan sistem dimulai dengan pembuatan diagram blok, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, untuk menggambarkan alur kerja sistem secara keseluruhan.

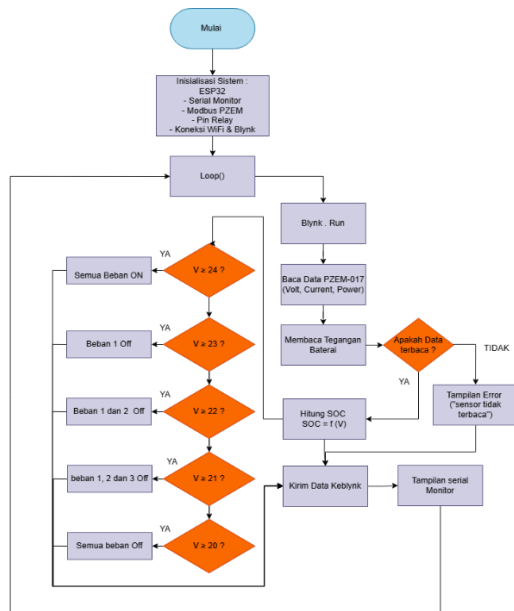


Gambar 7. Diagram Blok Sistem Monitoring Dan Proteksi

Gambar 7. menggambarkan integrasi komponen utama sistem yang terdiri dari blok input, pemrosesan, dan output, di mana pada blok input terdapat baterai 24 Volt 100 Ah sebagai sumber daya utama serta sensor PZEM-017 yang didukung resistor shunt untuk pengukuran tegangan dan arus. Pada blok pemrosesan, data hasil pengukuran dikirim ke mikrokontroler ESP32 melalui komunikasi RS485 untuk diproses dan dievaluasi dalam menentukan kondisi baterai, serta dikirim ke platform Blynk melalui koneksi Wi-Fi. Pada blok output, ESP32 mengendalikan modul relai sebagai saklar otomatis untuk pengaturan beban, di mana pada kondisi normal seluruh beban aktif, namun ketika tegangan baterai turun di level batas yang ditentukan, sistem akan memutus beban secara otomatis.

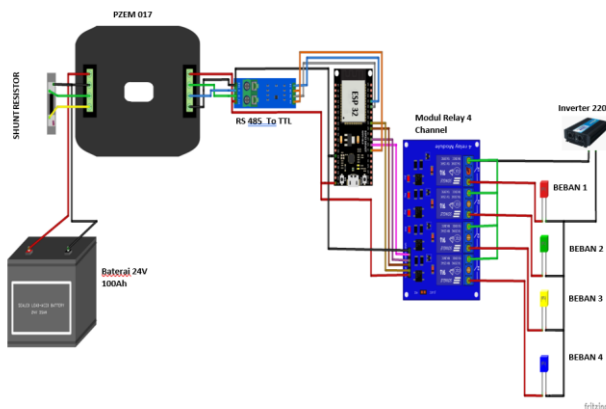
C. Perancangan Sistem

Sistem ini dirancang dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali utama untuk memantau dan melindungi baterai DC 24 Volt dalam sistem hibrida PLTS-PLTB. Sensor PZEM-017 digunakan untuk mengukur parameter listrik baterai, sedangkan modul relai 2 modul berfungsi sebagai aktuator untuk pengendalian beban.



Gambar 8. Flowchart Sistem

Alur kerja sistem yang digunakan diilustrasikan melalui Gambar 8. Proses dimulai dari inisialisasi perangkat, dilanjutkan dengan pengukuran parameter tegangan, arus, serta daya menggunakan sensor PZEM-017. Tegangan baterai kemudian diproses untuk menentukan persentase *State Of Charge* (SOC). Lebih lanjut, sistem mengevaluasi kondisi tegangan guna mengendalikan beban secara bertingkat melalui mekanisme load shedding (pemadaman bertahap). Output dari pengelolaan data ini dikirimkan ke aplikasi Blynk sekaligus ditampilkan di serial monitor.

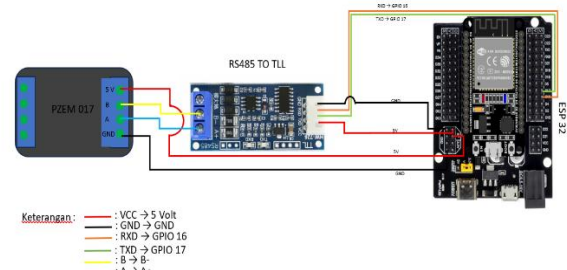


Gambar 9. Single Diagram Perkabelan

Konfigurasi sistem pengkabelan diilustrasikan pada Gambar 9. Diagram satu garis menghubungkan baterai 24 Volt 100 Ah ke sensor PZEM-017 melalui resistor shunt untuk pengukuran arus dan tegangan. Sensor tersebut kemudian diintegrasikan dengan ESP32 melalui modul konverter RS485-ke-TTL untuk komunikasi data. ESP32 menerima daya dari adaptor 5 Volt untuk memastikan stabilitas operasional sistem. Selain itu, ESP32 terhubung ke modul relai sebagai pengendali keluaran untuk implementasi pemutusan beban. Di sisi beban, sumber daya AC 220 Volt terhubung ke relai, sehingga aliran daya dapat dikendalikan secara otomatis. Desain sistem ini menerapkan

pemisahan sirkuit DC dan AC untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan secara keseluruhan.

Modul relay 2 channel yang digunakan telah dilengkapi dengan *optocoupler* sebagai komponen isolasi galvanis antara sisi kontrol (DC 3,3V dari ESP32) dan sisi beban (AC 220V), dengan tegangan isolasi antara koil dan kontak sebesar 1500V AC dan isolasi antar kontak sebesar 1000V AC, sehingga memenuhi persyaratan keamanan untuk pengendalian beban AC pada sistem *hybrid* PLTS-PLTB ini.



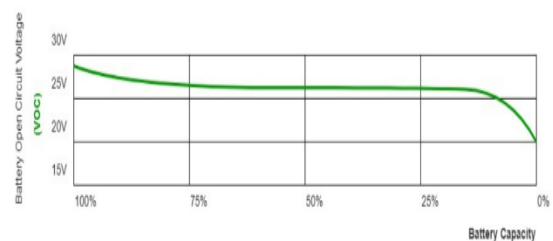
Gambar 10. Diagram koneksi RS485 antara sensor PZEM-017, Konverter RS485 To TTL, dan ESP32

Gambar 10. menunjukkan konfigurasi koneksi fisik RS485 secara lengkap. Komunikasi antara sensor PZEM-017 dan mikrokontroler ESP32 menggunakan antarmuka RS485 dengan protokol *Modbus RTU*. Konfigurasi parameter komunikasi yang digunakan adalah *baud rate* 9600 bps, *data bit* 8, *stop bit* 2, *parity* none, dengan sensor PZEM-017 dikonfigurasi sebagai *slave* pada alamat 0x01 dan ESP32 sebagai *master*. Pembacaan data meliputi tegangan pada register 0x0000, arus pada 0x0001, daya pada 0x0002–0x0003, dan energi pada 0x0004–0x0005. Koneksi fisik RS485 menggunakan jalur A+ dan B- dari PZEM-017 ke konverter RS485-ke-TTL, dengan sisi TTL dihubungkan ke GPIO 16 (RX) dan GPIO 17 (TX) ESP32 disertai VCC 5V dan GND.

D. Mekanisme Pengendalian Beban Berdasarkan Karakteristik Baterai

Karakteristik baterai LiFePO₄ berfungsi sebagai acuan utama dalam menentukan batas operasional sistem perlindungan. karakteristik baterai 24 volt dijelaskan lebih lanjut melalui grafik hubungan tegangan-kapasitas (*State of Charge*) pada Gambar 11.

24 LiFePO₄ Cell Volatage Chart

Gambar 11. Kurva tegangan baterai LiFePO₄ 24 Volt

Berdasarkan kurva pada Gambar 11. tersebut, hubungan antara tegangan dan *State of Charge* (SOC) dalam penelitian ini disederhanakan menggunakan pendekatan linear untuk

mempermudah pengujian secara real-time. *State of Charge* (SOC) Nilai digunakan sebagai parameter tambahan dalam proses monitoring berbasis *IoT*. Informasi SOC hanya ditampilkan pada aplikasi Blynk tidak sebagai pengambilan keputusan untuk pengendalian beban dan pengendalian beban tetap didasarkan pada tegangan baterai. Adapun nilai SOC terhadap tegangan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Set Nilai SOC

SOC (%)	Tegangan (V)
100	24
75	23
50	22
25	21
0	20

Selain itu, sistem menerapkan mekanisme pemutusan beban bertahap (*load shedding*) sesuai dengan tingkat tegangan baterai. Penurunan tegangan akan memicu pemutusan beban secara berurutan berdasarkan prioritas untuk menjaga kestabilan sistem. Kondisi pemutusan beban didefinisikan sebagai berikut:

- ❖ Tegangan 24 Volt sampai 29,2 Volt, sistem berada dalam kondisi normal dan seluruh beban aktif
- ❖ Tegangan 23 Volt, beban 1 dimatikan
- ❖ Tegangan 22 Volt, beban 1 dan beban 2 dimatikan
- ❖ Tegangan 21 Volt, beban 1, beban 2 dan beban 3 dimatikan
- ❖ Tegangan 20 Volt, seluruh beban dimatikan

Batas tegangan ini didasarkan pada karakteristik baterai LiFePO4 24 Volt, 100 Ah, yang memiliki batas tegangan aman minimum untuk mencegah pengosongan berlebihan dan menjaga stabilitas sistem.

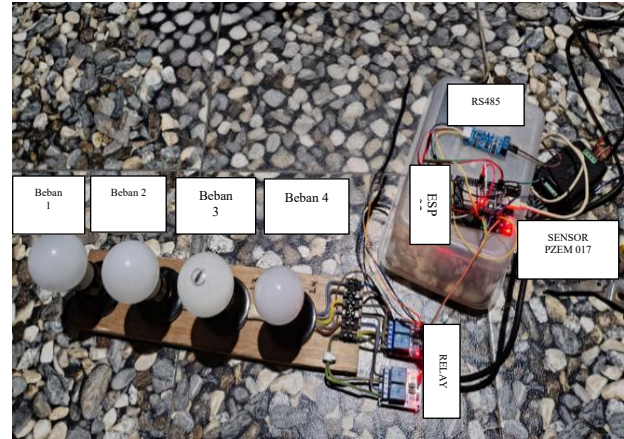
E. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian sistem ini dilakukan dengan menyiapkan seluruh komponen yang diperlukan. Baterai digunakan sebagai penyimpan daya, kemudian variasi beban diberikan dalam bentuk tanpa beban, dan beban 1 sampai beban 4. Pengukuran dilakukan menggunakan sensor PZEM-017 dan dibandingkan dengan multimeter guna menentukan tingkat akurasi. Respon sistem diamati melalui kinerja relay dalam memutus beban sesuai batas tegangan yang telah ditetapkan. Pengujian ini dilaksanakan sebanyak 5 kali pengulangan untuk memperoleh data yang representatif. Selain itu, sistem pemantauan memanfaatkan platform Blynk untuk mengobservasi data secara real-time. Data hasil pengujian dianalisis dengan menghitung nilai error guna mengevaluasi akurasi sensor PZEM-017 terhadap multimeter.

$$ERROR = \frac{\text{Pengukuran Sensor} - \text{Pengukuran Multimeter}}{\text{pengukuran multimeter}} \times 100\%.(2)$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, sistem proteksi baterai berbasis load shedding telah berhasil dirancang dan diimplementasikan sesuai dengan tahapan awal perancangan. Hasil perancangan prototipe alat ditunjukkan pada Gambar 12. yang menggambarkan tampilan fisik sistem proteksi baterai.

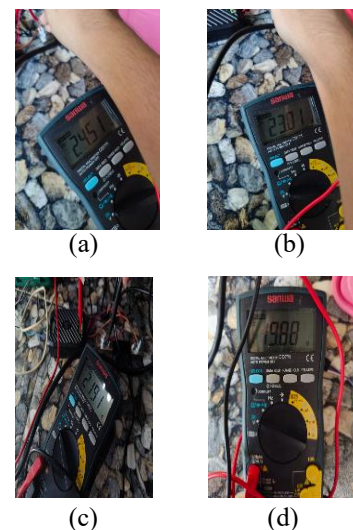


Gambar 12. Prototipe Sistem Proteksi Baterai

Proses pengujian sistem proteksi pada baterai dengan konsep load shedding menggunakan beban lampu yang terdiri dari 4 buah, yang dimana akan memadamkan lampu ketika terjadi penurunan tegangan pada baterai sesuai set nilai yang diatur.

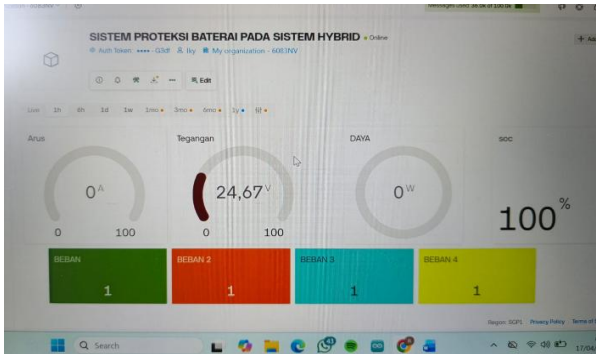
A. Hasil Pengujian Sistem Monitoring

Pengujian monitoring dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi sensor PZEM-017 yang sudah terintegrasi dengan *IoT* akan dibandingkan dengan pengukuran manual menggunakan multimeter. Hasil data yang didapatkan dari dua pengukuran tersebut dengan cara dibandingkan untuk melihat selisih nilai error sebagai rekomendasi monitoring pada sistem proteksi baterai.



Gambar 13. Pengukuran Tegangan Baterai Menggunakan Multimeter pada kondisi (a) Beban tanpa beban, (b) beban normal, (c) beban maksimum, (d) tegangan drop

Pengukuran multimeter ditunjukkan pada Gambar 13. Dipelihatkan terdapat 4 pengukuran tegangan pada baterai dengan 5 pengujian yang dilakukan sebagai sampel data perbandingan. Pengukuran pada multimeter disesuaikan dengan nilai set ketetapan yang diatur pada sistem *Load Shedding*.



Gambar 14. Tampilan pada aplikasi Blynk

Selain itu, pengujian juga dilakukan dengan sistem monitoring berbasis IoT menggunakan aplikasi Blynk melalui perangkat laptop sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14. Tampilan Blynk tersebut pada kondisi tegangan 24 Volt dengan set nilai SOC 100%, sehingga beban bisa digunakan secara maksimal.

Berdasarkan data pengukuran yang diperoleh, dilakukan pengolahan dan analisis untuk dapat mengetahui hasil error pembacaan sensor dan pengukuran pada baterai. Adapun hasil pengukuran dari sensor PZEM-017 dengan multimeter yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sistem Monitoring

Uji	Kondisi	Tegangan Sensor (V)	Tegangan Multimeter (V)	Error (%)
1	Beban 1, 2, 3, 4 aktif	24,67	24,51	0,65
2	Beban 1, 2 dan 3 aktif	23,01	23,1	0,82
3	Beban 1 dan 2 aktif	22,03	21,91	0,55
4	Beban 1 aktif	21,42	21,28	0,66
5	Semua beban padam	20,03	19,88	0,75

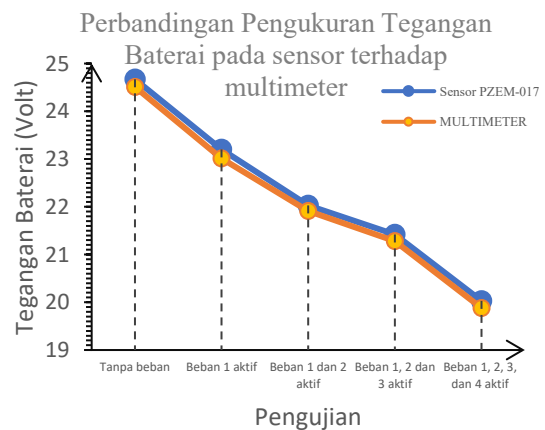
Hasil data dari pengukuran sensor dengan multimeter Tabel 2, terdapat selisih nilai sehingga dihitung kesalahan seperti pada kondisi beban 1, 2, 3, dan 4 aktif dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Error} = \frac{24,67 - 24,51}{24,51} \times 100\%$$

$$\text{Error} = 0,65\%$$

Berdasarkan hasil pengujian, nilai error berada pada rentang 0,55% hingga 0,83%, dengan rata-rata error sebesar 0,686%. Nilai ini jauh di bawah ambang batas toleransi yang umum ditetapkan dalam sistem monitoring industri, yaitu

$\pm 1\%$. Hal ini menunjukkan bahwa sensor PZEM-017 memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dalam mengukur tegangan baterai pada sistem DC 24V. Perbandingan ini konsisten dengan hasil penelitian yang relevan melaporkan akurasi PZEM-017 di bawah 1% untuk pengukuran tegangan panel surya [18]. Selisih terkecil terjadi pada kondisi beban 1 dan 2 aktif (0,55%), sedangkan selisih terbesar muncul pada kondisi beban 1, 2, dan 3 aktif (0,83%). Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh noise elektromagnetik yang meningkat seiring bertambahnya beban aktif, namun tetap berada dalam batas yang dapat diterima. Secara keseluruhan, hasil ini mengonfirmasi bahwa integrasi sensor PZEM-017 dengan komunikasi RS485-Modbus RTU dan platform Blynk memberikan sistem monitoring yang andal untuk aplikasi proteksi baterai real-time. Sehingga data pengukuran tersebut dapat disajikan pada Gambar 15.



Gambar 15. Grafik Perbandingan Sensor Dengan Multimeter

Gambar 15. Menunjukkan dua kondisi pengukuran yang mengalami perubahan tegangan pada baterai, di mana semakin besar beban yang digunakan, maka tegangan akan turun. Grafik ini menunjukkan adanya selisih dari 2 hasil data pengukuran pada multimeter maupun pada sensor dengan pemantauan aplikasi Blynk. Hasil error yang didapatkan masih dalam batas kecil ($<1\%$) jadi sensor tergolong akurat.

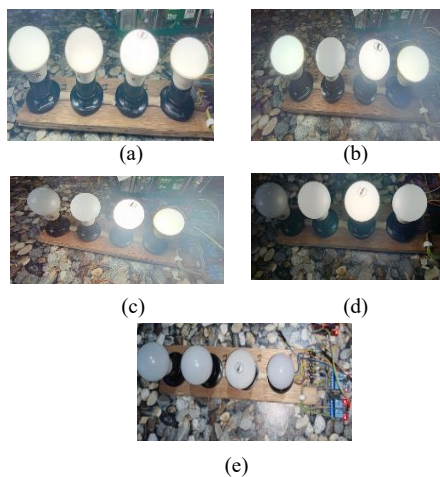
B. Hasil Pengujian Sistem Proteksi

Pengujian sistem proteksi dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem dalam memutus beban secara bertingkat berdasarkan level tegangan baterai. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi tegangan yang disimulasikan secara bertahap untuk mengamati respons relay terhadap setiap perubahan ambang tegangan yang telah ditetapkan. Setiap kondisi pengujian diulangi sebanyak 5 kali untuk memvalidasi konsistensi respons sistem. Hasil pengujian sistem proteksi ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian Sistem Proteksi

Uji	Tegangan (V)	Relay aktif (on)	Relay tidak aktif (off)	Status Beban
1	24	Relay 1, 2, 3, dan 4	-	Semua beban menyala
2	23	Relay 2, 3, dan 4	Relay 1	Beban 1 mati
3	22	Relay 3, dan 4	Relay 1, dan 2	Beban 1 dan 2 mati
4	21	Relay 4	Relay 1, 2, dan 3	Beban 1, 2, dan 3 mati
5	20	-	Relay 1, 2, 3, dan 4	Semua beban mati

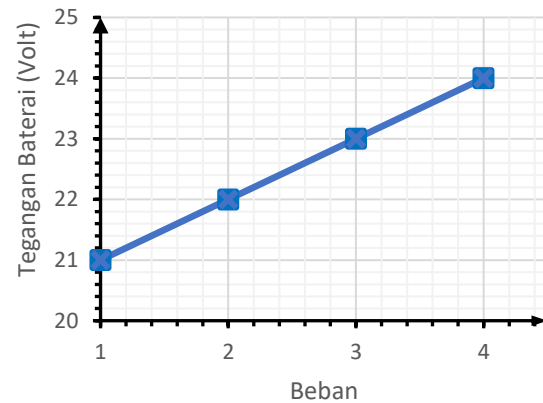
Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu memutus beban secara bertingkat sesuai dengan level tegangan yang ditetapkan. Untuk memperjelas kinerja sistem proteksi berbasis *load shedding* dapat ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Pengujian beban lampu sebagai indikator pada kondisi pengujian 24Volt (a), pengujian 23 volt (b), pengujian 22 volt (c), pengujian 21 volt (d), pengujian 20 volt (e).

Gambar 16. Merupakan hasil pengujian yang dilakukan dengan menerapkan sistem *load Shedding* bekerja berdasarkan level tegangan baterai. Penurunan tegangan menyebabkan sistem melakukan pemutusan beban secara bertahap sesuai dengan urutan yang diprioritaskan. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan tegangan dengan tepat dan konsisten pada setiap level yang ditetapkan, tanpa terjadi false trigger atau missed trigger dalam seluruh 5 iterasi pengujian. Pendekatan *load shedding* bertingkat ini secara signifikan lebih unggul dibandingkan sistem pemutusan total yang dilaporkan oleh Wenno et al. (2025) [20], karena memungkinkan beban prioritas tinggi tetap beroperasi meski tegangan baterai telah turun ke level kritis. Hal ini secara langsung memperpanjang waktu operasi sistem dan meningkatkan keandalan pasokan energi pada kondisi baterai rendah. Untuk memperjelas mekanisme kerja sistem, hubungan antara tegangan baterai dan kondisi beban dapat ditunjukkan pada grafik pada Gambar 17.

Hubungan Tegangan Baterai terhadap Jumlah Beban Aktif pada Sistem Load Shedding



Gambar 17. Grafik Hubungan Tegangan Baterai terhadap Status Beban

Gambar 17. Menunjukkan Grafik menggambarkan korelasi antara tegangan baterai dan jumlah beban aktif pada sistem proteksi load shedding. Jumlah beban aktif menurun bertahap seiring penurunan tegangan: pada 24 V seluruh 4 beban aktif (SOC 100%); 23 V memutus beban pertama (SOC 75%); 22 V memutus beban kedua (SOC 50%); 21 V memutus beban ketiga (SOC 25%); serta pada 20 V semua beban nonaktif (SOC 0%). Pola tangga (step) pada grafik menandakan pengendalian diskrit berbasis switching *ON/OFF* di setiap ambang tegangan. Pola ini selaras dengan karakteristik kurva tegangan-SOC baterai LiFePO₄ yang relatif datar di bagian tengah, sehingga pemilihan titik ambang berbasis tegangan memberikan resolusi pembagian SOC yang cukup memadai untuk aplikasi ini. Dibandingkan dengan sistem yang menggunakan pendekatan continuous SOC estimation berbasis algoritma *Extended Kalman Filter* (EKF), pendekatan berbasis tegangan ini lebih sederhana secara komputasional namun tetap efektif untuk aplikasi off-grid berskala kecil seperti rumah apung. Secara keseluruhan, sistem ini berhasil mencegah kondisi overdischarge sekaligus memaksimalkan pemanfaatan kapasitas baterai yang tersedia.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem proteksi baterai berbasis load shedding bertingkat pada sistem hybrid PLTS-PLTB untuk rumah apung di Pantai Malalayang, Manado, menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor PZEM-017, dan platform IoT Blynk. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh tiga temuan utama. Pertama, sistem monitoring berbasis sensor PZEM-017 dengan komunikasi RS485-Modbus RTU menghasilkan akurasi pengukuran tegangan sebesar 99,17%–99,45% (error rata-rata 0,686%), yang memenuhi standar toleransi pengukuran instrumen kelas industri. Kedua, mekanisme load shedding bertingkat berhasil bekerja secara akurat dan konsisten pada semua 5 level tegangan yang ditetapkan (24V, 23V, 22V, 21V, dan 20V) tanpa false trigger dalam seluruh iterasi pengujian, membuktikan keandalan sistem pengendalian berbasis relay. Ketiga, integrasi platform Blynk memungkinkan

pemantauan parameter baterai (tegangan, arus, daya, dan estimasi SOC) secara real-time melalui jaringan Wi-Fi. Kontribusi utama penelitian ini adalah penerapan load shedding bertingkat yang adaptif terhadap level SOC baterai LiFePO₄ pada sistem hybrid off-grid pesisir, yang mengatasi keterbatasan sistem pemutusan total yang dominan pada penelitian sebelumnya. Ke depan, pengembangan sistem ini dapat diarahkan pada integrasi algoritma estimasi SOC yang lebih akurat (seperti Coulomb counting atau Extended Kalman Filter) serta perluasan aplikasi pada skala sistem hybrid yang lebih besar dengan kapasitas baterai dan beban yang lebih beragam. Sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini berkontribusi terhadap pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDGs 7 (Energi Bersih dan Terjangkau) melalui penyediaan akses energi terbarukan berbasis sistem hybrid PLTS-PLTB di daerah off-grid, serta SDGs 13 (Penanganan Perubahan Iklim) dengan mengurangi ketergantungan masyarakat pesisir terhadap genset berbahan bakar fosil sebagai sumber energi utama.

REFERENSI

- [1] G. Lumanauw, A. A. S. Ramschie, and F. A. Bungkaes, "Analisa Kebutuhan Baterai Dan Sistem Pengisian Dan Pengosongan Baterai Untuk Sistem Hybrid (PLTB & PLTS) Di Kawasan Pesisir Danau Tondano," *J. Elektr.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–12, 2025, doi: 10.65485/elektrik.v4i1.1211.
- [2] C. J. Saputro *et al.*, "Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sebagai Sumber Energi Pada Rakit Rumah Apung Di Kawasan Pesisir Pantai Malalayang Kota Manado," *J. Elektr.*, vol. 04, no. 02, pp. 40–48, 2025, doi: <https://doi.org/10.65485/elektrik.v4i1.1196>.
- [3] A. E. Lewi, K. A. Widodo, and B. R. P. D. Palevi, "Perancangan Sistem Hybrid PLTS dan PLTB off Grid pada Skala Rumah Tinggal di Daerah Perbukitan," *Magnetika*, vol. 08, no. 2, pp. 280–290, 2024, [Online]. Available: <https://www.ejournal.itn.ac.id/magnetika/article/view/10312>
- [4] A. Joewono, "PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA OFF-GRID DENGAN PROTEKSI BATERAI Mina," *Sci. J. Widya Tek.*, vol. 22, no. 2, 2023, [Online]. Available: <https://journal.ukwms.ac.id/index.php/teknik/article/view/4789>
- [5] R. Xiong, J. Cao, Q. Yu, H. He, and F. Sun, "Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1832–1843, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2780258.
- [6] I. D. S. Edi Maulana, Yuwaldi Away, "MANAJEMEN PENGISIAN BATERAI LI-ION DENGAN ALGORITMA SORTING PADA PEMBANGKIT PHOTOVOLTAIC (PV)," *Syntax Lit. J. Ilm. Indones.*, vol. 9, no. 4, 2024, doi: <https://doi.org/10.36418/syntax-literate.v9i4.15482>.
- [7] K. M. Linggih, I. G. D. Arjana, and C. G. I. Partha, "Rancang Bangun Sistem Load Shedding Pada Energy Storage Berbasis Mikrokontroler Atmega 328," *JPTE J. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 12, no. 1, pp. 88–97, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal.undiksha.ac.id/index.php/JJPTE/article/view/49673/26273>
- [8] I. E. Kosmadakis and C. Elmasides, "A sizing method for PV–battery–generator systems for off-grid applications based on the LCOE," *Energies*, vol. 14, no. 7, 2021, doi: 10.3390/en14071988.
- [9] P. Gunoto, A. Rahmadi, and E. Susanti, "PERANCANGAN ALAT SISTEM MONITORING DAYA PANEL," *Sigma Tek.*, vol. 5, no. 2, pp. 285–294, 2022, [Online]. Available: <https://www.journal.unrika.ac.id/index.php/sigmateknika/article/view/4555/3117>
- [10] A. Burgio, D. Cimmino, A. Nappo, L. Smarrazzo, and G. Donatiello, "An IoT-Based Solution for Monitoring and Controlling Battery Energy Storage Systems at Residential and Commercial Levels," *Energies*, vol. 16, no. 7, 2023, doi: 10.3390/en16073140.
- [11] G. Jin and W. Zhao, "High-Temperature Stability of LiFePO₄ / Carbon Lithium-Ion Batteries: Challenges and Strategies," 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/suschem6010007>.
- [12] R. G. Shandy, "Deteksi Thermal Runaway Pada Cell Batre LiFePO₄," p. 60, 2025, [Online]. Available: <http://digilib.unila.ac.id/id/eprint/92875>
- [13] A. B. Putranto, Z. Muhlisin, A. Lutfiah, and F. Mangkusasmito, "Perancangan Alat Karakterisasi Dioda dengan ESP32 dan Rangkaian Op-Amp LM358 Berbasis Android," *J. Sist. Komput.*, vol. 13, no. 1, p. 8, 2021, doi: 10.31937/sk.v13i1.2088.
- [14] L. A. Wenno, B. J. Waworuntu, S. N. Rumokoy, H. G. Kaunang, and S. B. Dodie, "Konsep Pemanfaatan Teknologi IoT Berbasis ESP32 untuk Sakelar Cerdas pada Sistem PLTS Rakit Rumah Apung," *J. Elektr.*, vol. 4, no. 2, pp. 1–9, 2025, doi: 10.65485/elektrik.v4i2.1171.
- [15] N. Effendi *et al.*, "Perancangan sistem penyiraman tanaman otomatis menggunakan sensor kelembapan tanah berbasis IoT," *J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 91–98, 2022, doi: <https://doi.org/10.37859/coscitech.v3i2.3923>.
- [16] F. Fauzy *et al.*, "RANCANG BANGUN ALAT TELEMETRI PARAMETER PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA BERBASIS IoT," *J. EKSITASI*, vol. 1, no. 1, pp. 14–21, 2022, [Online]. Available: <https://journal.unhas.ac.id/index.php/eksitasi/article/view/20645>
- [17] Mohammd Syafri Hidayat, Dwi Sasmita Aji Pambudi, and Anggara Trisna Nugraha, "Sistem Monitoring Air Compressor pada Sistem Pendistribusian Udara Berbasis IoT," *Elektriese J. Sains dan Teknol. Elektro*, vol. 12, no. 02, pp. 126–140, 2022, [Online]. Available: <https://jurnal.itscience.org/index.php/elektriese/article/view/1944/1427>
- [18] I. A. Abdullah Mubarak 'Aafi, Jamaaluddin Jamaaluddin, "Implementasi Sensor Pzem-017 Untuk Monitoring Arus, Tegangan dan Daya Pada Instalasi Panel Surya dengan Sistem Data Logger Menggunakan Google Spreadsheet dan Smartphone," *SNESTIK*, pp. 191–196, 2022, [Online]. Available: <https://ejurnal.itats.ac.id/snestik/article/view/2718>
- [19] Ahmad Alif Farhan, Diana Alia, and Hadi Setiawan, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu dengan Sistem Monitoring Pengisian Battery Berbasis Internet of Things (IoT)," *Jupiter Publ. Ilmu Keteknikan Ind. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 3, no. 3, pp. 124–142, 2025, doi: 10.61132/jupiter.v3i3.866.
- [20] L. A. Wenno *et al.*, "A PROTOTYPE OF AN IOT BASE VOLTAGE PROTECTION SYSTEM FOR BATTERIES," *Int. Conf. Informatics, Multimedia, Cyber Inf. Syst.*, pp. 415–420, 2025, doi: 10.1109/ICIMCIS68501.2025.11327359.