Jurnal Fakultas Teknik
Universitas Muhamadiyah Parepare
Vol. xx No. xx, Agustus 2025

Sistem Kendali Pembangkit Listrik Tenaga Surya Skala Laboratorium Berbasis Internet Of Thing

Aidil[1*], Andi Muhammad Syafar[2], A. Irmayani Pawelloi[3]

*[1,*2,3]Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Parepare, Indonesia*
**Email : aidilbarru20@gmail.com*

Abstract: The increasing demand for renewable energy requires a more efficient and automatically controlled battery charging system. This study aims to design and implement a battery charging control system in a laboratory-scale Solar Power Plant (SPP) using an Internet of Things (IoT) approach. The main issue addressed is how to design a system architecture capable of automatically controlling battery charging and being monitored remotely through an IoT application. The method used involves an ESP32 microcontroller as the control unit, a voltage sensor to read the battery voltage, and a relay as an actuator to disconnect and connect the charging current. Voltage data and charging status are displayed on an LCD and sent in real-time to the Firebase Realtime Database. The system also records historical charging logs in the form of time, voltage, capacity, and charging status data. Test results show that the system works as designed, disconnecting charging when the voltage reaches 13.8V and reactivating it when the voltage drops to 12.20V. The system demonstrates stable charging and discharging performance, with testing recording an upper voltage threshold of 13.87V and a lower voltage threshold of 12.20V. This research proves that the system can serve as an initial solution in the development of IoT-based renewable energy charging monitoring and control technology.

Keyword : PV system; Microcontroller;IoT; Voltage sensor; Relay.

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang tidak akan habis dan ramah lingkungan. Komponen utama PLTS meliputi panel surya sebagai perangkat yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik, kontroler untuk mengatur arus pengisian ke baterai, baterai sebagai penyimpan energi, dan inverter sebagai pengubah arus DC menjadi arus AC (Corio et al. 2023). PLTS dapat digunakan di daerah yang belum terjangkau pasokan listrik atau belum memiliki pembangkit listrik berbasis gas maupun air (Melly 2024).

Pemanfaatan energi terbarukan, khususnya PLTS, menjadi salah satu strategi penting untuk mengurangi ketergantungan pada energi fosil yang semakin menipis serta menurunkan dampak negatif terhadap lingkungan (Dwisari 2023). Namun sistem PLTS konvensional umumnya hanya mengandalkan kontroler bawaan tanpa adanya sistem pemantauan cerdas. Hal ini dapat menyebabkan pengisian baterai tidak optimal, berisiko overcharging, atau bahkan kerusakan baterai akibat pengendalian yang tidak presisi (Pratama 2021).Pengembangan sistem kendali PLTS skala laboratorium menjadi penting sebagai sarana penelitian dan pembelajaran untuk menguji kinerja PLTS secara terkendali (Jeryan 2024).

Teknologi *Internet of Things* (IoT) menawarkan solusi dengan kemampuan menghubungkan perangkat secara *real-time*, memungkinkan pemantauan dan pengendalian dilakukan secara otomatis (Pongoh 2023).

Penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada pemantauan data tanpa disertai pengendalian pengisian otomatis (Sari 2024) atau hanya mengoptimasi algoritma MPPT tanpa integrasi pemantauan berbasis *cloud* .Hal ini menunjukkan adanya kebutuhan akan pengembangan sistem yang mengintegrasikan kendali otomatis berbasis IoT."(Zain 2023).

Penelitian ini mengusulkan perancangan dan implementasi sistem kendali PLTS skala laboratorium berbasis IoT dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali, sensor tegangan untuk membaca level baterai, dan modul *relay* untuk memutus serta menyambungkan jalur pengisian secara otomatis. Data tegangan dan status pengisian dikirim ke *Firebase Realtime Database* dan dapat dipantau melalui aplikasi web secara *real-time*.

Tujuan penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan sistem kendali PLTS skala laboratorium berbasis IoT yang mampu mengoptimalkan proses pengisian, dan mencegah *overcharging*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Kota Parepare, Sulawesi Selatan, dengan lokasi uji coba pengambilan data dilakukan di universitas Muhammadiyah parepare. Waktu pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan Juni 2025 hingga, Juli 2025.

2.2 Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian dan pengembangan *research and de velopment* (R&D), karena penelitian ini tidak hanya merancang dan mengimplementasi kan sistem kendali PLTS berbasis Internet Of Thing(IoT), tetapi juga menguji performa nya dan mengevaluasi otomatisasi berdasarkan ambang tegangan. Pendekatan ini selaras dengan yang digunakan oleh (Julizal 2024) dalam merancang sistem pelayanan masyarakat dan (Iftitah 2022) dalam pengembangan software media pembelajaran. Selain itu, menekankan bahwa tahap-tahap R&D meliputi desain produk, pengujian, dan evaluasi, yang juga diterapkan dalam penelitian ini.

2.3 Alat dan Bahan Penelitian

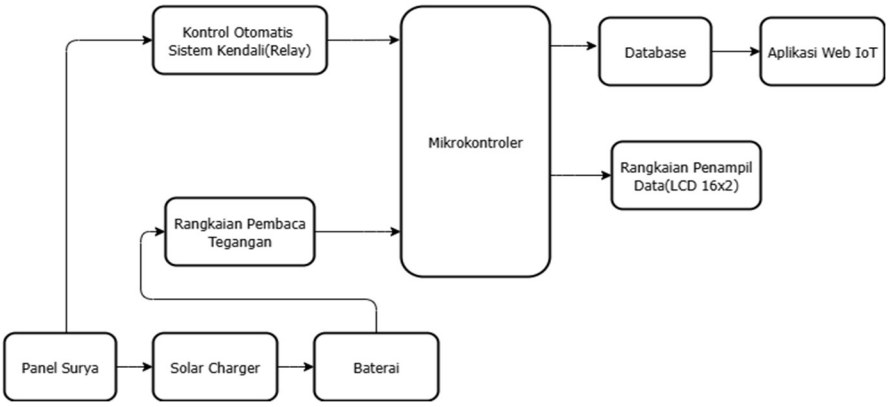
Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari berbagai komponen elektronik yang dirancang untuk membangun sistem kendali PLTS skala laboratorium. Komponen-komponen tersebut dirinci pada Tabel 1.

Tabel 1. Alat dan Bahan

No	Nama Komponen	Spesifikasi / Fungsi
1	Esp 32	Mikrokontroler berbasis Tensilaca Xtensa LX6 Dual Core, sebagai pusat kendali sistem.
2	Sensor Teganagn Dc 0-25v	Mengukur tegangan Dc Dalam Satuan volt.
3	Modul *Relay* 2 *Channel*	Memutus dan meyambungkan pegisian secara otomatis.
4	*Stepdown* Lm 2596	Menurunkan tegangan input DC lebih tinggi menjadi tegangan output DC yang lebih rendah,
5	LCD I2C 16x2	Menampilkan data Tegangan,Kondisi Relay dan Kapasitas Baterai secara real-time.
6	*Board Expansion* Esp 32	Media koneksi antar komponen elektronika.
7	Baterai	Meyimpan Dan Menyediakan sumber tegangan stabil untuk Esp 32,SCC, sensor, dan aktuator.
8	Panel Surya	Mengubah Energi Matahari Ke Energi Listrik
9	*Solar Charger Controller*	menerima energi listrik dari panel surya dan mengatur pengisian baterai untuk memastikan baterai diisi dengan aman dan efisien.

2.4 Rancangan Sistem

Blok diagram penelitian ini menunjukkan alur kerja mulai dari panel surya dan rangkaian pembaca tegangan sebagai input, yang kemudian diproses oleh mikrokontroler. Hasil pemrosesan digunakan untuk mengendalikan *relay*, menampilkan informasi pada LCD, dan mengirim data ke *database*. Sistem secara otomatis memutus atau menyambung jalur pengisian sesuai ambang tegangan untuk mencegah *overcharging* dan *deep discharge*.



Gambar 1. Blok Diagram

Gambar 1 menunjukkan keterhubungan komponen pada sistem. Data tegangan yang dibaca dibandingkan dengan nilai ambang batas yang telah ditentukan, sehingga *relay* dikendalikan untuk memutus atau menyambung jalur pengisian sesuai kondisi baterai. Status pengisian kemudian ditampilkan pada LCD 16x2 dan dikirimkan ke *database* agar dapat dipantau secara *real-time* melalui aplikasi web IoT. Rancangan ini diharapkan mampu menjaga kestabilan tegangan baterai, mengurangi intervensi manual, serta meningkatkan efisiensi pengelolaan energi pada PLTS.

2.5 Teknik Pengumpulan Data

- Pengujian Akurasi Sensor

Tahap ini dilakukan untuk mempelajari akurasi sensor untuk proses memastikan bahwa sensor memenuhi spesifikasi yang diperlukan dan berfungsi dengan benar dalam kondisi yang diinginkan. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa sensor dapat memberikan hasil data yang akurat dan konsisten.

- Pengujian kinerja Sistem

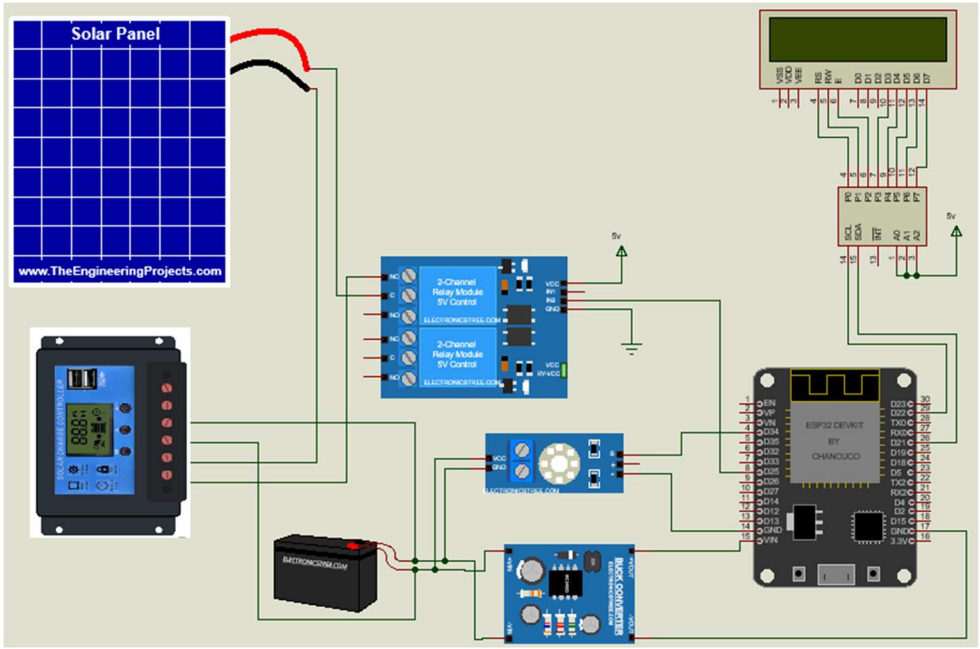
Tahap ini dilakukan untuk menguji kinerja sistem dengan tujuan memverifikasi bahwa sistem dapat memutus dan menyambungkan jalur pengisian secara otomatis sesuai dengan batas tegangan yang telah ditentukan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada perancangan sistem terbagi atas dua bagian yaitu perancangan perangkat keras (*Hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Perangkat keras terdiri dari Esp 32,Sensor Tegangan, LCD 16x2, *Relay*,*Stepdown*,Panel Surya,*Solar Charger Controller* (SCC) dan Baterai.

3.1 Perancangan Perangkat Keras

Dalam perancangan sistem kendali panel surya ini, dilakukan integrasi antara panel surya, *solar charge controller*,LCD,baterai 12V,sensor,modul *relay,*dan mikrokontroler.



Gambar 2. Rangkaian Sistem Kendali PLTS

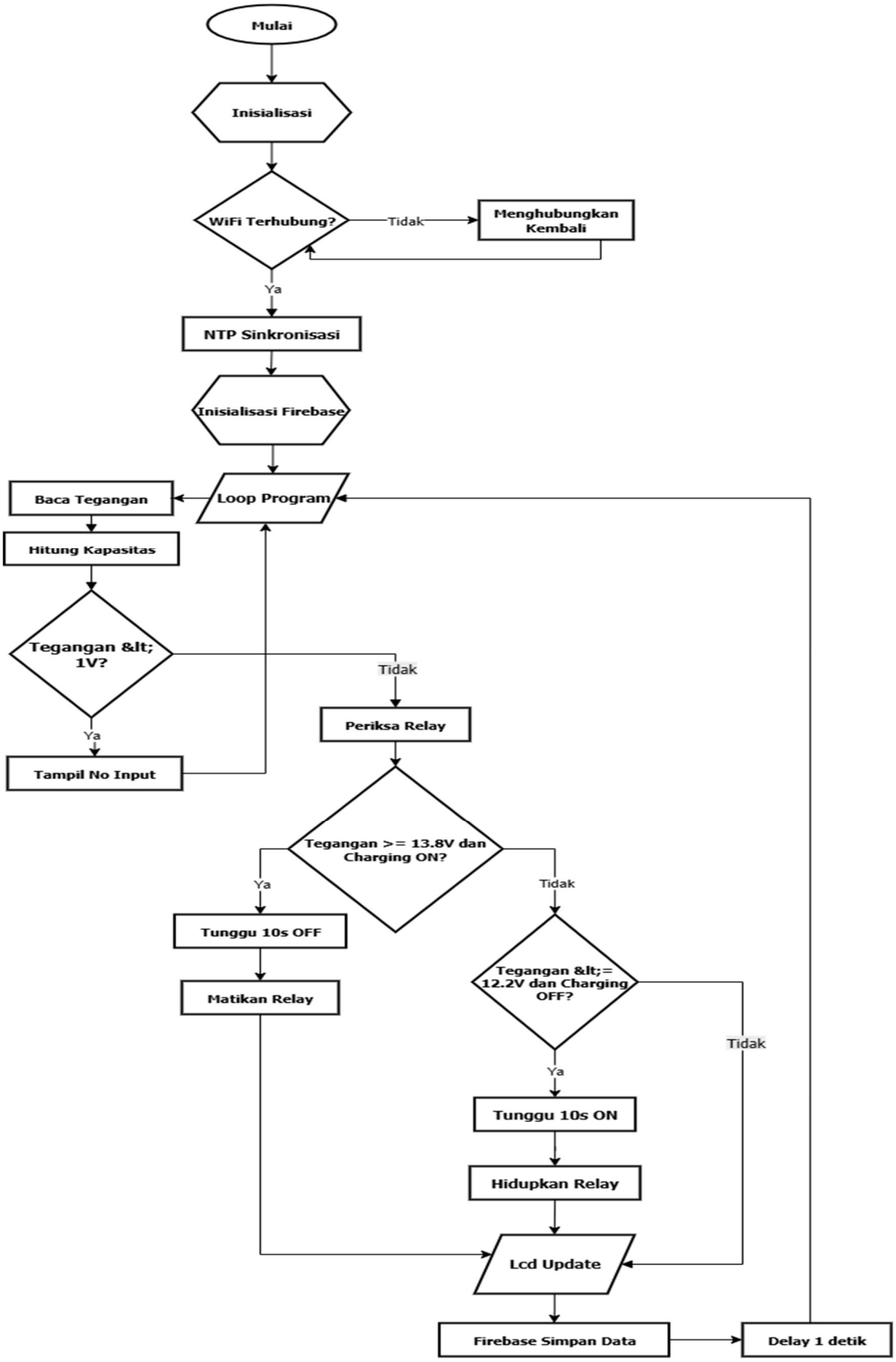
Pada Gambar 2 ditunjukkan bahwa panel surya menghasilkan energi listrik yang disalurkan ke *Solar Charge Controller* (SCC) untuk mengatur aliran arus pengisian ke baterai. Sensor tegangan digunakan untuk memantau level tegangan baterai secara *real-time*, kemudian data dikirim ke mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai pusat pengendali logika sistem. Modul r*elay* 2-*channel* mengatur sirkuit pengisian atau beban secara otomatis berdasarkan tegangan yang terdeteksi. Informasi sistem ditampilkan melalui LCD 16x2 yang menunjukkan status tegangan dan proses pengisian. Sistem ini dilengkapi dengan antarmuka I2C dan logika digital antara sensor, *relay*, dan ESP32 untuk memastikan kendali dan pemantauan berjalan secara efisien.

3.2 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak bertujuan mengontrol dan memantau seluruh perangkat keras yang terhubung, seperti sensor tegangan, modul *relay*, dan LCD I2C, melalui instruksi yang diprogram pada mikrokontroler ESP32.

a. Diagram Alir (*Flowchart*)

Gambar 3 menunjukkan alur kerja sistem kendali. Proses dimulai dengan inisialisasi koneksi WiFi, sensor, relay, dan layanan Firebase. Sistem kemudian membaca tegangan baterai secara kontinu. Nilai tegangan dibandingkan dengan ambang batas yang telah ditentukan untuk menentukan kondisi relay. Jika tegangan melebihi 13,8 V, sistem akan menunggu selama 10 detik sebelum memutus jalur pengisian guna mencegah overchar ging. Sebaliknya, jika tegangan turun di bawah 12,2 V, relay akan diaktifkan kembali setelah penundaan 10 detik untuk mencegah undercharge. Hasil pembacaan tegangan, kapasitas baterai, dan status relay ditampilkan pada LCD, serta dikirim ke Firebase agar dapat dipantau secara real-time

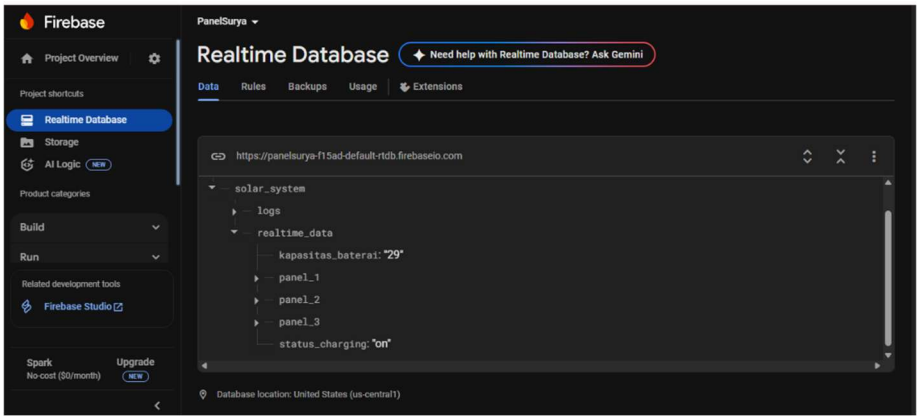


Gambar 3. Diagram Alir (*Flowchart*)

b. Desain internet Of Things

- firebase database

Pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT) meningkatkan efisiensi pengelolaan PLTS. Penelitian ini menggunakan *Firebase Realtime Database* sebagai media penyimpanan data secara *real-time*. Tampilan struktur *database* ditunjukkan pada Gambar 4.

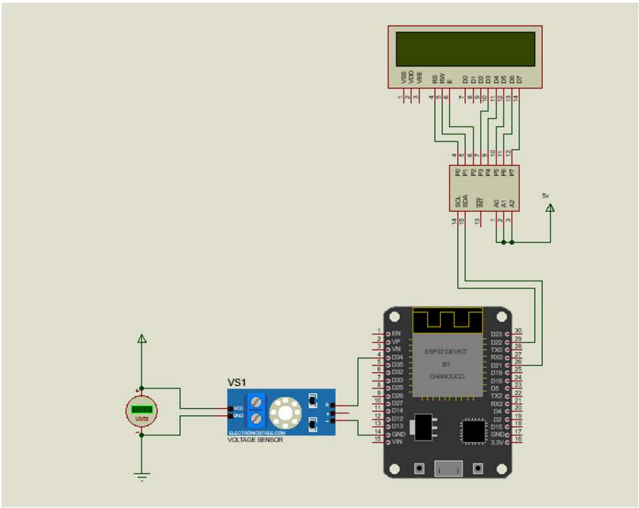


Gambar 4. Tampilan Realtime Database

Firebase Realtime Database berfungsi menyimpan dan menyinkronkan data tegangan dan status relay secara *real-time* antara mikrokontroler ESP32 dan aplikasi web. Data yang tersimpan terdiri dari dua bagian, yaitu *Realtime*_Data yang menampilkan kondisi terkini dan Log yang mencatat riwayat pengukuran.

3.3 Pengujian Akurasi Sensor Tegangan

Pengambilan data dilakukan untuk mengevaluasi akurasi dan konsistensi pembacaan sensor tegangan. Sensor dihubungkan dengan *power supply* secara seri untuk pengaturan tegangan. Tegangan input diatur bertahap dari 0 hingga 9,7 V untuk memperoleh data kalibrasi pada beberapa titik. Hasil pembacaan ditampilkan secara langsung pada LCD 16x2. Proses pengujian ditunjukkan pada Gambar 5.

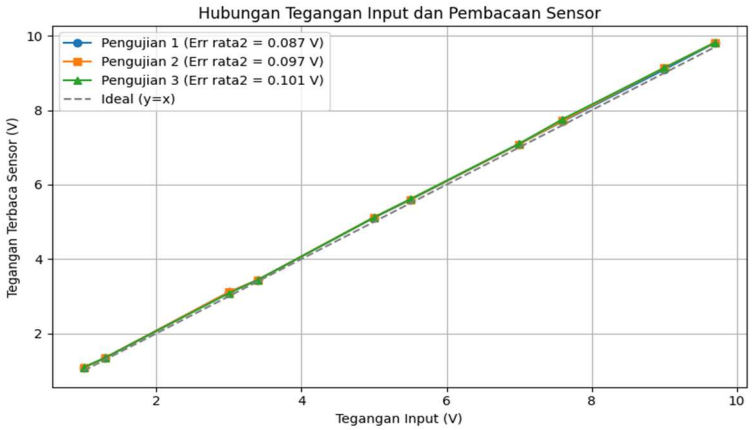


Gambar 5. Pegujian Sensor Tegangan

Pengujian dilakukan untuk mengetahui performa sensor dalam merespons variasi tega ngan input dari sumber daya listrik (*power supply*). Sensor diuji pada sepuluh tingkat tegangan berbeda, mulai dari 1,0V hingga 9,7V. Setiap titik pengujian dilakukan seban yak tiga kali guna memastikan kestabilan serta konsistensi data yang diperoleh.Hasil Pengujian dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Data Hasil Pegujian Sensor Tegangan

No	PowerSuply(Volt)	Pegujian	Hasil Pembacaan Sensor Tegangan (volt)
1	1,00	1	1,08
		2	1,08
		3	1,09
2	1,30	1	1,35
		2	1,35
		3	1,35
3	3,00	1	3,11
		2	3,11
		3	3,08
4	3,40	1	3,44
		2	3,44
		3	3,44
5	5,00	1	5,11
		2	5,12
		3	5,12
6	5,50	1	5,59
		2	5,60
		3	5,61
7	7,00	1	7,09
		2	7,09
		3	7,10
8	7,60	1	7,70
		2	7,72
		3	7,76
9	9,00	1	9,09
		2	9,14
		3	9,14
10	9,70	1	9,81
		2	9,82
		3	9,82



Gambar 6. Grafik Hubungan Tengangan Input dan Pembacaan sensor

Berdasarkan data pada Tabel 2 dan Gambar 6, sensor tegangan menunjukkan respons yang konsisten dan stabil terhadap seluruh variasi tegangan input. Rata-rata pembacaan sensor pada setiap titik pengujian memiliki deviasi yang sangat kecil, sehingga dapat dikatakan hasil pengukuran cukup presisi.Perhitungan akurasi dilakukan dengan menggunakan rumus persentase error:

$$PersentaseError = \frac{Nilai\ terukur - Nilai\ sebernarnya}{Nilai\ sebernarnya} \times 100\%$$

Berdasarkan Tabel 3, nilai error terbesar terjadi pada tegangan input 1,0V sebesar 8,30%, sedangkan error terkecil terdapat pada tegangan 3,4V yaitu 1,18%.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Nilai Eror

No.	Tegangan Input (V)	Rata-rata Pembacaan Sensor (V)	Nilai Sebenarnya (V)	Nilai Terukur (V)	Nilai Error(%)
1	1,00	(1,08+1,08+1,09)/3 = 1,083	1,00	1,083	8,30%
2	1,30	(1,35+1,35+1,35)/3 = 1,350	1,30	1,350	3,85%
3	3,00	(3,11+3,11+3,08)/3 = 3,100	3,00	3,100	3,33%
4	3,40	(3,44+3,44+3,44)/3 = 3,440	3,40	3,440	1,18%
5	5,00	(5,11+5,12+5,12)/3 = 5,117	5,00	5,117	2,34%
6	5,50	(5,59+5,60+5,61)/3 = 5,600	5,50	5,600	1,82%
7	7,00	(7,09+7,09+7,10)/3 = 7,093	7,00	7,093	1,33%
8	7,60	(7,70+7,72+7,76)/3 = 7,727	7,60	7,727	1,67%
9	9,00	(9,09+9,14+9,14)/3 = 9,123	9,00	9,123	1,37%
10	9,70	(9,81+9,82+9,82)/3 = 9,817	9,70	9,817	1,21%

Nilai rata-rata error keseluruhan dihitung menggunakan rumus persentase error pada setiap titik pengujian, kemudian dibagi jumlah titik pengukuran.

$$Rata - Rata\ Error = \frac{\sum Error\ tiap\ titik}{Jumlah\ titik\ pengukuran}$$

$$Rata - Rata\ Eror = \frac{8{,}30 + 3{,}85 + 3{,}33 + 1{,}18 + 2{,}34 + 1{,}82 + 1{,}33 + 1{,}67 + 1{,}37 + 1{,}21}{10}$$

$$Rata - Rata\ Error = \frac{26{,}40}{10} = 2{,}64\%$$

Hasil ini menunjukkan bahwa rata-rata nilai error dari sensor tegangan hanya sekitar 2,64 %, sehingga dapat dikategorikan akurat dan masih berada pada kategori akurasi baik (≤5%).

Kenaikan tegangan input menghasilkan peningkatan pembacaan sensor secara linier. Hal ini dibuktikan melalui perhitungan koefisien korelasi Pearson (R) berdasarkan data pengujian pada 10 titik tegangan dengan masing-masing tiga kali pembacaan, kemudian diambil rata-ratanya. Rumus koefisien korelasi Pearson (R) ditunjukkan pada Persamaan dibawah:

$$R = \frac{\mathrm{n}(\sum \mathrm{XY}) - (\sum \mathrm{X})(\sum \mathrm{Y})}{\sqrt{[\mathrm{n}\sum \mathrm{X}^2 - (\sum \mathrm{X})^2][\mathrm{n}\sum \mathrm{Y}^2 - (\sum \mathrm{Y})^2]}}$$

Dengan keterangan:

- n = jumlah pasangan data. (n=10)
- $\sum \mathrm{X} =$ jumlah dari semua nilai tegangan input.
- $\sum \mathrm{Y} =$ jumlah dari semua rata − rata pembacaan sensor.
- $\sum \mathrm{X}^2 =$ jumlah dari kuadrat setiap nilai tegangan input.
- $\sum \mathrm{Y}^2 =$ jumlah dari kuadrat setiap rata − rata pembacaan sensor.
- $\sum \mathrm{XY} =$ jumlah dari perkalian setiap pasangan data X dan Y.

Data hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 4. Data Hasil Peritungan

No	Tegangan Input (X)	Rata-rata Pembacaan Sensor (Y)	X^2	Y^2	XY
1	1,00	1,083	1,00	1,173	1,083
2	1,30	1,350	1,69	1,823	1,755
3	3,00	3,100	9,00	9,610	9,300
4	3,40	3,440	11,56	11,834	11,696
5	5,00	5,117	25,00	26,184	25,585
6	5,50	5,600	30,25	31,360	30,800
7	7,00	7,093	49,00	50,312	49,651
8	7,60	7,727	57,76	59,706	58,725
9	9,00	9,123	81,00	83,229	82,107
10	9,70	9,817	94,09	96,374	95,225
Jumlah	$\sum \mathrm{X}$=52,50	$\sum \mathrm{Y}$=53,45	$\sum \mathrm{X}^2$=360,35	$\sum \mathrm{Y}^2$=371,645	$\sum \mathrm{XY}$=365,927

$$R = \frac{10(365{,}927) - (52{,}50)(53{,}45)}{\sqrt{[10(360{,}35) - (52{,}50)^2][10(371{,}645) - (53{,}45)^2}}$$

$$R = \frac{3659{,}27 - 2806{,}125}{\sqrt{[3603{,}5 - 2756{,}25] - [371{,}645 - 2856{,}9025]}}$$

$$R = \frac{853{,}145}{\sqrt{[847{,}25] - [859{,}5475]}}$$

$$R = \frac{853{,}145}{\sqrt{728286{,}32}}$$

$$R = \frac{853{,}145}{853{,}397}$$

$$R = 0{,}9997$$

Koefisien determinasi (R^2) adalah kuadrat dari koefisien korelasi (R). Nilai ini meunjukkan persentase variasi pada pembacaan sensor yang dapat dijelaskan oleh variasi pada tegangan input.

$$R^2 = R^2 \approx (0{,}9997)^2 \approx 0{,}9994$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai (R^2) adalah 0.9994. Nilai ini sangat dekat dengan 1, yang mengindikasikan bahwa hubungan antara tegangan input dan pembacaan sensor sangat linear dan akurat.

3.4 Hasil Pengujian Kinerja Sistem

Setelah sensor tegangan diuji dan dipastikan memiliki akurasi serta karakteristik linier yang baik, dilakukan pengujian kinerja sistem. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam membaca tegangan baterai, menghitung kapasitas, dan mengendalikan relay sebagai pemutus atau penghubung jalur pengisian. Sistem bekerja otomatis berdasarkan ambang batas tegangan, mengaktifkan relay pada tegangan ≤ 12,2 V dan menonaktifkannya pada tegangan ≥ 13,8 V. Data hasil pemantauan disimpan secara real-time pada Firebase, ditampilkan pada LCD, dan dapat diakses melalui aplikasi web IoT.Pengujian kinerja sistem dilakukan pada dua kondisi, yaitu charging dan discharging.

a. Pengujian Kondisi Charging

Pada kondisi charging (Tabel 5), tegangan baterai meningkat dari 12,41 V (36%) menjadi 13,87 V (86%) dalam waktu ± 1 jam 25 menit, dengan relay tetap aktif hingga mencapai ambang batas atas. Relay kemudian otomatis nonaktif (OFF) pada 13,87 V sehingga mencegah *overcharging*.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kondisi *Charging*

No	Waktu	Tegangan baterai(V)	Kondisi Relay	Kapasitas baterai(%)
1	13.53	12,41	ON	36
2	14.03	12,67	ON	46
3	14.13	12,95	ON	55
4	14.23	13,20	ON	64
5	14.35	13,38	ON	70
6	14.47	13,46	ON	72
7	15.02	13,57	ON	76
8	15.12	13,70	ON	81
9	15.18	13,87	OFF	86

Selama proses pengisian, durasi pengujian berlangsung selama 85 menit (pukul 13.53 hingga 15.18). Tegangan baterai meningkat dari 12,41 V menjadi 13,87 V, sehingga selisih kenaikan tegangan adalah 1,46 V. Dengan demikian, laju kenaikan tegangan dapat dihitung sebagai:

$$\text{Laju kenaikan tengangan} = \frac{1{,}46V}{85\ menit} = 0{,}017\text{V/menit}$$

Sedangkan kapasitas baterai meningkat dari 36% menjadi 86% (selisih 50%), sehingga laju kenaikan kapasitas adalah:

$$\text{Laju kenaikan Kapasitas} = \frac{50\%}{85\ menit} = 0{,}59\%/\text{menit}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pengisian bekerja stabil dengan kenaikan tegangan yang linear terhadap waktu pengisian

b. Pegujian Kondisi *Discharging*

Pada kondisi discharging (Tabel 6), tegangan menurun dari 12,98 V (56%) menjadi 12,20 V (29%) dalam waktu ± 64 menit, dengan relay tetap nonaktif hingga ambang batas bawah tercapai. Sistem kemudian otomatis mengaktifkan kembali relay untuk melindungi baterai dari *deep discharge*.

Tabel 6. Pegujian Kondisi Discharging

No	Waktu	Tegangan baterai(V)	Kondisi relay	Kapasitas baterai(%)
1	15.24	12,98	OFF	56
2	15.34	12,58	OFF	43
3	15.44	12,52	OFF	41
4	15.54	12,50	OFF	39
5	16.04	12,36	OFF	35
6	16.14	12,31	OFF	33
7	16.24	12,23	OFF	31
8	16.28	12,20	ON	29

Durasi pengujian discharging berlangsung selama 64 menit (15.24 - 16.28).Tegangan baterai turun dari 12,98 V menjadi 12,20 V, sehingga selisih penurunan tegangan adalah 0,78 V. Laju penurunan tegangan dihitung sebagai:

$$\text{Laju penurunan tegangan} = \frac{0{,}78V}{64\ menit} = 0{,}012\text{V/menit}$$

Kapasitas baterai turun dari 56% menjadi 29% (selisih 27%), sehingga laju penurunan kapasitas adalah:

$$\text{Laju penurunan Kapasitas} = \frac{27\%}{64\ menit} = 0{,}42\%\text{menit}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pengisian bekerja stabil dengan kenaikan tegangan yang linear terhadap waktu pengisian.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan perancangan, implementasi, dan pengujian, sistem kendali PLTS skala laboratorium berbasis IoT berhasil diimplementasikan menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali yang mampu mengatur pengisian baterai otomatis dengan memutus pengisian pada 13,8 V dan mengaktifkannya kembali pada 12,2 V. Sistem menampilkan data tegangan, kapasitas, dan status pengisian melalui LCD serta mengirimkannya secara real-time ke Firebase, sekaligus menyimpan log historis untuk analisis performa. Hasil validasi sensor menunjukkan akurasi yang baik dengan rata-rata error 2,64% dan R^2 sebesar 0,9994. Pada kondisi charging, tegangan meningkat dari 12,41 V menjadi 13,87 V selama 85 menit dengan laju 0,017 V/menit dan kapasitas bertambah 50% (0,59%/menit), sedangkan pada discharging tegangan turun dari 12,98 V ke 12,20 V selama 64 menit dengan laju 0,012 V/menit dan kapasitas berkurang 27% (0,42%/menit). Penelitian ini berkontribusi dalam pengembangan sistem kendali PLTS berbasis IoT yang stabil dan efisien, serta dapat dikembangkan lebih lanjut melalui pengujian baterai berkapasitas lebih besar, integrasi multi-sumber energi, dan penerapan algoritma prediktif maupun kecerdasan buatan.

REFERENSI

Corio, Dean, Ricky Maulana, Putty Yunesti, and Zulka Hendri. 2023. *Perencanaan Dan Operasi Sistem Tenaga Listrik*.

Dwisari. 2023. "Pemanfaatan Energi Matahari: Masa Depan Energi Terbarukan." *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika* 7(2): 376–84. doi:10.37478/optika.v7i2.3322.

Iftitah. 2022. "Penerapan Metode Research And Development Pada Proses Pengembangan Software Media Pembelajaran Practice Learning Questions Jenjang SMA." *Jurnal Repositor* 4(3): 217–28. doi:10.22219/repositor.v4i3.1422.

Jeryan. 2024. "Design Of Off-Grid Solar Power Plant (Plts) Systems As A."

Julizal. 2024. "Metode Research and Development (R & D) Pelayanan Pengantar Masyarakat Untuk Masyarakat Menggunakan Java." *Remik: Riset dan E-jurnal Manajemen Informatika Komputer* 8(April): 1–16.

Melly, Wasilah Ananda. 2024. "Prototype Sistem Monitoring Penyerapan Daya Dan Perawatan Panel Surya Pada PLTS Berbasis Website." http://scholar.unand.ac.id/463272/.

Pongoh, Deitje. 2023. "Central Publisher." *Central Publisher* 1: 1901–9.

Pratama, M. Freza. 2021. "Sistem Monitoring Dan Kontrol Daya Plts Menggunakan Iot Berbasis Fuzzy Logic." : 1–81. http://repository.unissula.ac.id/22976/12/Magister Teknik Elektro_20601700007_fullpdf.pdf.

Sari. 2024. "Sistem Monitoring Arus Listrik Berbasis Internet of Things (IoT) Pada Solar Panel Di Laboratorium Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) UIN Suska Riau." *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science* 4(1): 205–11. doi:10.57152/malcom.v4i1.1033.

Zain, Iqra. 2023. "Internet of Things." *Cyber Resilience of Systems and Networks* 2019(July 2016): 1–150.