



RANCANG BANGUN SISTEM PROTEKSI PENGISIAN DAYA PADA SEPEDA LISTRIK RODA TIGA VOKASI UNESA TERINTEGRASI PANEL SURYA

Yanuar Rahman¹⁾, Ferly Isnomo Abdi²⁾, Warju³⁾, Daeng Rahmatullah⁴⁾, Nur Vidia Laksmi B⁵⁾

¹⁾ D4 Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: yanuarrahman@mhs.unesa.ac.id

²⁾ D4 Teknologi Rekayasa Otomotif, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: ferlyabdi@unesa.ac.id

³⁾ D4 Teknologi Rekayasa Otomotif, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: warju@unesa.ac.id

⁴⁾ D4 Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: daengrahmatullah@unesa.ac.id

⁵⁾ D4 Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: nurvidialaksmi@unesa.ac.id

Abstract

The increasing use of electric bicycles as an environmentally friendly mode of transportation has created a growing need for safe and efficient battery charging systems. One of the main challenges in battery charging systems is the risk of overcharging and overtemperature, which can reduce battery performance and lifespan. This study aims to design and develop a charging protection system for the UNESA Vocational three-wheeled electric bicycle integrated with a solar panel using an ESP32-based Auto Cut-Off method. The developed system utilizes a PZEM-017 voltage sensor, DHT22 and PT100 temperature sensors, and a Solid State Relay (SSR) as an automatic power disconnection actuator. The research employed an experimental method consisting of system design, hardware assembly, functional testing, data collection, and result analysis. Testing was conducted using voltage variations of 54.4 V, 57.6 V, and 60 V for Over Voltage Protection (OVP), and temperature variations of 25°C, 40°C, and 50°C for Over Temperature Protection (OTP). The results indicate that the system successfully detected overcharge and overtemperature conditions and automatically disconnected the charging process according to the predefined set points. The sensor measurement error was found to be less than 1% compared to reference measuring instruments. Furthermore, the hybrid charging system integrating solar panels and grid electricity achieved a remaining battery capacity of 60%, which was higher than the 45% remaining capacity obtained from grid-only charging under the same operating conditions. Therefore, the developed protection system effectively improves battery charging safety while supporting the utilization of renewable energy in three-wheeled electric bicycles.

Keywords: Three-Wheeled Electric Bicycle, Auto Cut-Off, ESP32, Solar Panel, Battery Protection System.

Abstrak

Peningkatan penggunaan sepeda listrik sebagai sarana transportasi ramah lingkungan mendorong kebutuhan akan sistem pengisian daya yang aman dan efisien. Salah satu permasalahan utama pada sistem pengisian baterai adalah risiko overcharging dan overtemperature yang dapat menurunkan performa serta umur pakai baterai. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem proteksi pengisian daya pada sepeda listrik roda tiga Vokasi UNESA yang terintegrasi dengan panel surya menggunakan metode Auto Cut-Off berbasis mikrokontroler ESP32. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan sensor tegangan PZEM-017, sensor suhu DHT22 dan PT100, serta Solid State Relay (SSR) sebagai aktuatur pemutus daya otomatis. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dengan tahapan perancangan sistem, perakitan perangkat, pengujian fungsi, pengambilan data, dan analisis hasil. Pengujian dilakukan pada variasi tegangan 54,4 V, 57,6 V, dan 60 V untuk proteksi tegangan berlebih (Over Voltage Protection), serta variasi suhu 25°C, 40°C, dan 50°C untuk proteksi suhu berlebih (Over Temperature Protection). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi kondisi overcharge dan overtemperature serta melakukan pemutusan daya secara otomatis sesuai nilai set point yang ditentukan. Tingkat kesalahan pembacaan sensor berada di bawah 1% dibandingkan alat ukur referensi. Selain itu, sistem pengisian hibrida yang mengintegrasikan panel surya dan PLN menghasilkan sisa kapasitas baterai sebesar 60%, lebih tinggi dibandingkan pengisian menggunakan PLN saja yang menghasilkan sisa kapasitas baterai sebesar 45%. Dengan demikian, sistem proteksi yang dikembangkan mampu meningkatkan keamanan pengisian baterai sekaligus mendukung pemanfaatan energi terbarukan pada sepeda listrik roda tiga.

Kata Kunci: Sepeda Listrik Roda Tiga, Auto Cut-Off, ESP32, Panel Surya, Sistem Proteksi Baterai.



PENDAHULUAN

Konsumsi energi listrik saat ini merupakan kebutuhan pokok dalam kehidupan manusia, baik digunakan untuk kebutuhan rumah tangga, industri, maupun otomotif. Meningkatnya jumlah penduduk berbanding lurus dengan peningkatan kebutuhan energi listrik (Mombekova dkk, 2024). Kebutuhan listrik terus meningkat, namun ketersediaan belum mencukupi kebutuhan. Penggunaan listrik yang tidak terkontrol berdampak buruk pada kelestarian lingkungan. Seiring dengan meningkatnya kesadaran akan dampak lingkungan dan kebutuhan mobilitas yang berkelanjutan, penggunaan sepeda listrik semakin meningkat sebagai alternatif transportasi ramah lingkungan karena menghasilkan emisi karbon yang rendah dan efisiensi energi yang baik (Hagedorn dkk, 2025).

Namun, implementasi sepeda listrik masih menghadapi beberapa tantangan teknis yang perlu diatasi. Masalah utama yang dihadapi adalah keterbatasan kapasitas baterai yang berdampak pada jarak tempuh yang berkurang dan keandalan dalam penggunaan harian (Setyadi dkk, 2024). Integrasi panel surya sebagai sumber energi tambahan menjadi solusi yang memungkinkan sepeda listrik beroperasi dengan durasi lebih lama tanpa selalu bergantung pada pengisian daya dari jaringan listrik (Abdillah dkk, 2024). Akan tetapi, penggunaan panel surya seringkali terjadi perubahan tegangan dan arus akibat intensitas cahaya matahari yang tidak konstan dan dapat menyebabkan risiko teknis seperti *overcharging* dan *overheating* yang dapat menurunkan kapasitas penyimpanan energi pada baterai dan meningkatkan risiko kerusakan (Putra dkk, 2023).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan sistem proteksi yang mampu memonitor serta menjaga kestabilan tegangan, arus serta suhu pada baterai selama proses pengisian daya (Calvinus, 2020). sehingga proses pengisian dapat berlangsung optimal dalam rentang aman (Rahmadhani dkk, 2020). Sistem proteksi ini bertujuan untuk meminimalisir kerusakan baterai dan meningkatkan keamanan operasional serta umur baterai dapat terjaga dalam jangka panjang dalam jangka panjang (Farman dkk, 2024). Dengan mengembangkan sistem proteksi pengisian daya sepeda listrik roda tiga yang terintegrasi panel surya, diharapkan dapat mencapai energi yang optimal sekaligus menjaga keandalan dan keamanan sistem (Masud dkk, 2020).

Beberapa penelitian terdahulu telah berkontribusi pada pengembangan sistem proteksi pengisian daya baterai untuk kendaraan listrik dan sistem energi surya. (Vanlalchhuanawmi dkk, 2024). meninjau strategi manajemen energi pada sistem distribusi yang mengintegrasikan *Battery Management System* (BMS) dan kendaraan listrik, di mana fokus utama diarahkan pada pengendalian arus dan tegangan untuk mencegah *overcharging* dan *over-discharging*. Penelitian lain oleh (Khan dkk, 2025) mengembangkan sistem BMS canggih yang mampu memonitor tegangan dan arus pengisian guna mencegah korsleting serta memastikan keamanan selama proses *charging*, namun belum mencakup pengendalian suhu secara langsung. Sementara itu, (Rahman dkk, 2025) menekankan pentingnya teknologi manajemen termal

dalam desain baterai berdaya tinggi, namun pendekatannya masih berbasis sistem pendingin pasif tanpa intervensi pemutusan daya otomatis.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini memiliki tujuan utama untuk merancang dan mengembangkan sistem proteksi pengisian baterai pada sepeda listrik yang terintegrasi panel surya dalam upaya meningkatkan keamanan dan efisiensi penggunaan energi terbarukan pada transportasi berkelanjutan. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem proteksi pengisian baterai yang menggunakan sensor untuk mengontrol tegangan, dan suhu baterai dengan metode *auto cut off* yang dapat beradaptasi untuk mencegah terjadinya *overcharging* dan *overtemperature*. Dengan tercapainya berbagai tujuan tersebut, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan prototipe sepeda listrik bertenaga surya dengan sistem pengisian baterai yang terproteksi.

TINJAUAN PUSTAKA

State of Charge (SoC)

State of Charge (SoC) merupakan parameter yang menunjukkan tingkat kapasitas energi yang masih tersimpan dalam baterai dibandingkan dengan kapasitas total baterai pada kondisi terisi penuh. Nilai SoC umumnya dinyatakan dalam bentuk persentase (%), di mana nilai 100% menunjukkan baterai dalam kondisi penuh dan nilai 0% menunjukkan baterai dalam kondisi kosong (Iskak dkk., 2019).

Estimasi SoC memiliki peranan penting dalam sistem manajemen baterai karena dapat memberikan informasi mengenai sisa energi yang tersedia serta membantu mencegah terjadinya gangguan operasional akibat kekurangan daya. Selain itu, informasi SoC dapat digunakan untuk mengendalikan proses pengisian dan pelepasan energi sehingga baterai dapat bekerja dalam kondisi yang aman dan optimal. Pengendalian berdasarkan SoC juga berfungsi untuk mencegah terjadinya overcharge yang dapat menurunkan umur pakai baterai secara permanen (Suyanto dkk., 2021).

Secara matematis, State of Charge (SoC) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$SoC(\%) = \frac{Q_{sisa}}{Q_{maksimum}} \times 100\%$$

Keterangan:

- SoC = State of Charge (%)
- Q_{sisa} = Kapasitas energi yang tersisa (Ah)
- $Q_{maksimum}$ = Kapasitas total baterai (Ah)

Nilai SoC yang akurat sangat diperlukan untuk meningkatkan keandalan sistem pengisian baterai pada sepeda listrik berbasis energi surya.

Sistem Auto Cut-Off

Sistem Auto Cut-Off merupakan sistem proteksi yang dirancang untuk menghentikan proses pengisian baterai secara otomatis ketika parameter tertentu telah mencapai batas yang ditentukan. Sistem ini bekerja dengan memantau kondisi baterai secara terus-menerus melalui sensor tegangan dan sensor suhu yang terhubung dengan mikrokontroler.



Ketika tegangan baterai mencapai level pengisian penuh atau suhu baterai meningkat hingga melebihi batas aman, sistem akan memberikan perintah untuk memutus aliran listrik dari sumber pengisian menuju baterai. Mekanisme ini bertujuan untuk mencegah terjadinya overcharging dan overheating yang dapat menyebabkan penurunan performa, kerusakan permanen, bahkan kegagalan sistem baterai (Hasan, 2024).

Menurut Tran dkk. (2023), fitur Auto Cut-Off mampu menjaga baterai tetap berada pada kondisi operasi yang aman dengan menghentikan pengisian setelah mencapai titik optimal. Penggunaan sistem ini juga memberikan beberapa keuntungan, antara lain:

1. Menghemat energi listrik.
2. Mencegah kerusakan baterai akibat pengisian berlebih.
3. Meningkatkan keamanan sistem pengisian.
4. Memperpanjang umur pakai baterai.
5. Mengurangi kebutuhan pengawasan secara manual.

Samosir dkk. (2025) menyatakan bahwa penerapan sistem Auto Cut-Off terbukti efektif dalam menjaga kesehatan baterai dan meningkatkan efisiensi sistem penyimpanan energi.

Mekanisme Pemutusan Daya Otomatis

a. Overcharging Protection (OVP)

Overcharging Protection (OVP) merupakan sistem proteksi yang berfungsi untuk mencegah baterai menerima pengisian daya melebihi kapasitas maksimumnya. Pada sistem ini, mikrokontroler akan memonitor tegangan baterai secara kontinu. Ketika tegangan mencapai batas maksimum yang telah ditentukan, sistem akan memutus aliran pengisian dari MPPT menuju baterai secara otomatis.

Pada baterai SLA (Sealed Lead Acid), tegangan pengisian penuh umumnya berada pada nilai 57,6 V atau setara dengan 14,4 V per unit baterai 12 V. Setelah kondisi penuh tercapai, tegangan pemeliharaan (float charging) berada pada kisaran 54,4 V atau setara dengan 13,6 V per unit baterai (Julio dkk., 2025).

Untuk menguji kinerja sistem Auto Cut-Off, digunakan tiga variasi tegangan sebagai berikut.

Tabel 1. Tegangan Pengisian Penuh Baterai SLA

No	Tegangan	Keterangan
1	54,4 V	Tahap float, pengisian penuh aman
2	57,6 V	Tahap bulk charge
3	60 V	Titik uji overcharge (memicu proteksi OVP)

Apabila tegangan mencapai atau melebihi 60 V, sistem akan mengaktifkan proteksi OVP dan memutus proses pengisian secara otomatis.

b. Over Temperature Protection (OTP)

Over Temperature Protection (OTP) merupakan sistem proteksi yang berfungsi untuk mencegah peningkatan suhu baterai secara berlebihan selama proses pengisian. Kenaikan suhu yang tidak terkendali dapat menyebabkan thermal runaway, yaitu kondisi di mana suhu

baterai meningkat secara terus-menerus dan berpotensi menimbulkan kerusakan serius.

Sistem OTP bekerja dengan membaca data dari sensor suhu yang ditempatkan pada baterai. Ketika suhu melebihi batas aman yang telah ditentukan, sistem akan menghentikan proses pengisian secara otomatis untuk mencegah kerusakan pada sel baterai.

Menurut Hu dkk. (2024), performa dan umur pakai baterai SLA mulai mengalami penurunan signifikan ketika suhu operasi melebihi 45°C. Oleh karena itu, suhu maksimum yang digunakan sebagai batas proteksi dalam penelitian ini adalah 45°C. Jika suhu mencapai atau melebihi batas tersebut, maka sistem Auto Cut-Off akan aktif dan memutus aliran pengisian.

Sepeda Listrik Roda Tiga

Sepeda listrik roda tiga (Tricycle Electric Vehicle) merupakan kendaraan listrik yang menggunakan tiga roda sebagai penopang utama sehingga memiliki tingkat stabilitas yang lebih baik dibandingkan sepeda listrik roda dua. Kendaraan ini banyak digunakan untuk transportasi perkotaan, distribusi barang skala kecil, serta mobilitas masyarakat yang membutuhkan keseimbangan lebih baik saat berkendara.

Sistem utama pada sepeda listrik roda tiga terdiri atas:

1. Motor listrik sebagai penggerak utama.
2. Baterai sebagai penyimpan energi.
3. Kontroler sebagai pengatur distribusi daya.
4. Sensor pengendali sistem.
5. Sistem pengisian daya.

Keunggulan utama sepeda listrik roda tiga adalah kemampuannya membawa beban yang lebih besar dengan tingkat kestabilan yang tinggi, terutama pada kecepatan rendah. Oleh karena itu, penggunaan sistem proteksi baterai menjadi sangat penting untuk menjaga keandalan operasional kendaraan dalam penggunaan sehari-hari.

Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan teknologi yang digunakan untuk mengoptimalkan daya keluaran panel surya agar selalu bekerja pada titik daya maksimum (Maximum Power Point). MPPT berfungsi meningkatkan efisiensi konversi energi dari panel surya ke baterai sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal (Al Haqq dkk., 2021).

Prinsip kerja MPPT adalah menyesuaikan titik operasi panel surya berdasarkan kondisi lingkungan yang berubah-ubah, seperti:

- Intensitas radiasi matahari.
- Suhu lingkungan.
- Karakteristik beban.
- Resistansi internal panel surya.

Daya keluaran panel surya diperoleh dari hubungan antara tegangan dan arus yang dihasilkan, yaitu:

$$P = V \times I$$

Keterangan:

- P = Daya (Watt)
- V = Tegangan (Volt)
- I = Arus (Ampere)



Melalui pengaturan titik kerja yang optimal, MPPT mampu meningkatkan efisiensi pengisian baterai hingga lebih tinggi dibandingkan metode pengisian konvensional. Dalam penelitian ini, MPPT digunakan sebagai penghubung antara panel surya dan baterai untuk memastikan energi yang dihasilkan panel surya dapat dimanfaatkan secara maksimal sebelum diproses oleh sistem proteksi Auto Cut-Off.

METODOLOGI PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen (Experimental Research) dengan pendekatan eksperimen terapan (Applied Experimental Research). Metode ini dipilih karena penelitian bertujuan untuk merancang, membangun, mengimplementasikan, serta menguji kinerja sistem proteksi pengisian baterai pada sepeda listrik roda tiga yang terintegrasi dengan panel surya. Pendekatan eksperimen memungkinkan peneliti melakukan pengujian secara langsung terhadap sistem yang dikembangkan sehingga dapat diketahui tingkat keberhasilan sistem dalam mencegah terjadinya overcharging dan overtemperature pada baterai. Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian pengembangan sistem kelistrikan berbasis mikrokontroler yang mengintegrasikan panel surya, Maximum Power Point Tracking (MPPT), baterai Sealed Lead Acid (SLA), sensor tegangan, sensor suhu, serta sistem proteksi Auto Cut-Off berbasis ESP32.

Penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperoleh informasi mengenai sistem pengisian baterai, teknologi panel surya, sistem proteksi baterai, serta komponen yang digunakan dalam penelitian. Selanjutnya dilakukan analisis kebutuhan sistem, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi sistem pada prototipe sepeda listrik roda tiga, pengujian fungsi sistem, analisis data hasil pengujian, serta evaluasi terhadap kinerja sistem yang telah dikembangkan.

Variabel Penelitian

Variabel penelitian merupakan faktor yang digunakan untuk mengetahui hubungan antara kondisi yang diberikan terhadap hasil yang diperoleh selama penelitian berlangsung. Variabel dalam penelitian ini terdiri atas variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah tegangan dan suhu baterai yang digunakan sebagai parameter pengujian sistem proteksi. Variasi tegangan yang digunakan meliputi 54,4 V sebagai kondisi pengisian aman (float charging), 57,6 V sebagai kondisi pengisian penuh (bulk charging), dan 60 V sebagai kondisi overcharge yang digunakan untuk menguji aktivasi sistem proteksi Over Voltage Protection (OVP). Selain itu, variasi suhu yang digunakan yaitu 25°C sebagai suhu normal, 40°C sebagai suhu mendekati batas operasi, dan 50°C sebagai kondisi overtemperature yang digunakan untuk menguji aktivasi sistem Over Temperature Protection (OTP).

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kinerja sistem proteksi pengisian baterai yang ditunjukkan oleh status aktivasi sistem Auto Cut-Off, keberhasilan pemutusan aliran pengisian saat terjadi overcharging dan

overtemperature, waktu respons sistem, serta tingkat kesalahan (error) pembacaan sensor yang digunakan. Kinerja sistem dinilai berdasarkan kemampuan sistem dalam menjaga baterai tetap berada pada batas operasi yang aman.

Variabel kontrol dalam penelitian ini meliputi jenis dan kapasitas baterai yang digunakan yaitu baterai Sealed Lead Acid (SLA) 48 V 20 Ah yang diperoleh dari empat baterai 12 V 20 Ah yang dirangkai secara seri. Panel surya yang digunakan merupakan panel surya monocrystalline berkapasitas 200 Wp, sedangkan MPPT yang digunakan memiliki spesifikasi yang tetap selama pengujian. Mikrokontroler ESP32, sensor PZEM-017, sensor DHT22, sensor PT100, serta program yang digunakan juga dijaga tetap untuk setiap pengujian. Selain itu, durasi pengujian, kondisi beban sepeda listrik, dan metode pengukuran dijaga konstan agar hasil pengujian dapat dibandingkan secara objektif.

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam rentang waktu Juli 2025 sampai dengan Desember 2025. Kegiatan penelitian meliputi penyusunan proposal, studi literatur, perancangan sistem, perakitan alat, pengujian sistem, pengambilan data, analisis data, hingga penyusunan laporan akhir penelitian. Waktu pelaksanaan dapat mengalami penyesuaian sesuai dengan kondisi dan kebutuhan penelitian di lapangan.

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Fakultas Vokasi Universitas Negeri Surabaya (UNESA), Ruang K5.01. Laboratorium tersebut dipilih karena memiliki fasilitas yang mendukung proses perancangan, perakitan, pengujian, dan analisis sistem proteksi pengisian baterai berbasis mikrokontroler dan energi surya.

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis untuk menghasilkan sistem proteksi pengisian baterai yang sesuai dengan tujuan penelitian. Tahap pertama adalah studi literatur yang dilakukan dengan mengumpulkan berbagai referensi ilmiah yang berkaitan dengan sepeda listrik roda tiga, panel surya, MPPT, baterai SLA, sensor tegangan, sensor suhu, sistem Auto Cut-Off, dan mikrokontroler ESP32. Referensi diperoleh dari jurnal nasional, jurnal internasional, prosiding, buku ilmiah, serta penelitian terdahulu yang relevan.

Tahap kedua adalah analisis masalah. Pada tahap ini dilakukan identifikasi terhadap berbagai permasalahan yang sering terjadi pada sistem pengisian baterai sepeda listrik, seperti overcharging, overheating, penurunan umur baterai, dan ketidakstabilan keluaran panel surya akibat perubahan intensitas cahaya matahari. Hasil analisis digunakan sebagai dasar dalam merancang sistem proteksi yang sesuai dengan kebutuhan penelitian.

Tahap ketiga adalah perancangan sistem. Pada tahap ini dirancang sistem pengisian baterai yang terdiri atas panel surya monocrystalline 200 Wp sebagai sumber energi, MPPT sebagai pengoptimasi daya panel surya, baterai SLA 48 V 20 Ah sebagai media penyimpanan energi, sensor PZEM-017 sebagai sensor tegangan dan arus, sensor DHT22 dan PT100 sebagai sensor suhu, serta



mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali sistem. Sistem juga dilengkapi dengan Solid State Relay (SSR) yang berfungsi sebagai pemutus aliran listrik secara otomatis ketika kondisi proteksi aktif.

Tahap berikutnya adalah perakitan sistem. Seluruh komponen yang telah dirancang diintegrasikan menjadi satu kesatuan sistem yang berfungsi sesuai dengan rancangan. Panel surya dihubungkan dengan MPPT, kemudian energi yang dihasilkan digunakan untuk mengisi baterai melalui sistem proteksi yang dikendalikan oleh ESP32. Sensor-sensor yang digunakan dipasang pada titik pengukuran yang sesuai untuk memperoleh data tegangan dan suhu secara real-time.

Setelah sistem selesai dirakit, dilakukan pengujian fungsi untuk memastikan setiap komponen bekerja dengan baik. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi tegangan pengisian sebesar 54,4 V, 57,6 V, dan 60 V serta variasi suhu sebesar 25°C, 40°C, dan 50°C. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mendeteksi kondisi overcharge dan overtemperature serta mengaktifkan mekanisme Auto Cut-Off secara otomatis.

Tahap selanjutnya adalah pengambilan data. Data yang dikumpulkan meliputi tegangan baterai, arus pengisian, daya pengisian, suhu baterai, status aktivasi sistem proteksi, waktu respons Auto Cut-Off, dan nilai State of Charge (SoC). Data tersebut diperoleh melalui sensor yang terhubung dengan mikrokontroler dan dicatat selama proses pengujian berlangsung.

Data hasil pengujian kemudian dianalisis menggunakan metode deskriptif kuantitatif. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi tingkat keberhasilan sistem proteksi dalam mencegah overcharging dan overtemperature, mengukur akurasi pembacaan sensor, menentukan waktu respons sistem, serta mengetahui efektivitas mekanisme Auto Cut-Off dalam menjaga keamanan proses pengisian baterai. Hasil analisis digunakan untuk menilai apakah sistem yang dikembangkan telah memenuhi tujuan penelitian.

Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan. Kesimpulan disusun berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilakukan. Pada tahap ini juga diberikan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya sehingga sistem proteksi pengisian baterai yang dikembangkan dapat ditingkatkan kinerjanya dan diterapkan pada skala yang lebih luas.

Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi multimeter digital, solder listrik, breadboard, kabel jumper, laptop yang dilengkapi perangkat lunak Arduino IDE, obeng set, tang kombinasi, thermometer digital atau infrared, clamp meter DC, serta kamera atau smartphone untuk dokumentasi kegiatan penelitian. Alat-alat tersebut digunakan untuk proses perancangan, perakitan, pengujian, dan pengukuran parameter sistem.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas panel surya monocrystalline 200 Wp, MPPT (Maximum Power Point Tracking), baterai Sealed Lead Acid (SLA) 12 V 20 Ah yang dirangkai seri menjadi 48 V 20 Ah, mikrokontroler ESP32, sensor PZEM-017, sensor DHT22,

sensor PT100, modul MAX31865, modul RS485 to TTL converter, Solid State Relay (SSR) DC-DC, TFT IL19488, MCB DC 15 A, sekering DC 15 A, kabel DC, konektor XT60, papan PCB, box enclosure, serta sepeda listrik roda tiga sebagai media implementasi sistem. Seluruh komponen tersebut digunakan untuk membangun sistem proteksi pengisian baterai yang terintegrasi dengan panel surya dan mampu melakukan pemutusan daya secara otomatis berdasarkan kondisi tegangan dan suhu baterai.



Gambar 2. Kerangka Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem proteksi pengisian baterai pada sepeda listrik roda tiga yang terintegrasi dengan panel surya berhasil diimplementasikan dan mampu bekerja sesuai dengan fungsi yang direncanakan. Sistem yang terdiri atas panel surya, MPPT, baterai SLA, sensor PZEM-017, sensor DHT22, sensor PT100, mikrokontroler ESP32, dan Solid State Relay (SSR) dapat melakukan pemantauan kondisi baterai secara real-time serta melakukan pemutusan daya secara otomatis ketika parameter tegangan atau suhu melebihi batas yang telah ditentukan. Selama proses pengujian, seluruh



komponen dapat berkomunikasi dengan baik sehingga data pengukuran dapat diproses dan digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan oleh sistem.

Pengujian pertama dilakukan pada sistem proteksi tegangan berlebih (Over Voltage Protection/OVP). Pengujian dilakukan menggunakan tiga variasi tegangan yaitu 54,4 V, 57,6 V, dan 60 V. Pada kondisi tegangan 54,4 V dan 57,6 V, sistem masih mengizinkan proses pengisian berlangsung karena nilai tegangan masih berada pada rentang pengisian yang aman untuk baterai SLA. Ketika tegangan mencapai 60 V, sistem mendeteksi kondisi overcharge dan secara otomatis mengirimkan sinyal ke SSR untuk memutus aliran pengisian. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma proteksi yang ditanamkan pada ESP32 mampu bekerja sesuai dengan set point yang telah dirancang.

Tabel 3. Hasil Pengujian Proteksi Tegangan Berlebih (OVP)

Tegangan Baterai (V)	Status SSR	Kondisi Sistem
54,4	ON	Pengisian Normal
57,6	ON	Pengisian Penuh
60,0	OFF	Proteksi Aktif

Keberhasilan sistem dalam memutus pengisian pada tegangan 60 V menunjukkan bahwa mekanisme Auto Cut-Off mampu melindungi baterai dari risiko overcharging. Kondisi overcharging dapat menyebabkan peningkatan suhu, merusakkan sel baterai, penurunan kapasitas penyimpanan energi, hingga memperpendek umur baterai. Oleh karena itu, kemampuan sistem dalam menghentikan proses pengisian pada titik kritis menjadi faktor penting dalam meningkatkan keamanan dan keandalan sistem pengisian daya berbasis energi surya.

Selain pengujian tegangan, dilakukan pula perhitungan State of Charge (SoC) untuk mengetahui tingkat kapasitas baterai berdasarkan nilai tegangan yang terukur. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa peningkatan tegangan baterai berbanding lurus dengan peningkatan nilai SoC. Pada tegangan 54,4 V nilai SoC berada pada kondisi mendekati penuh, sedangkan pada tegangan 57,6 V baterai telah mencapai kondisi pengisian maksimum. Informasi SoC yang diperoleh menjadi parameter tambahan yang membantu sistem dalam menentukan kondisi baterai selama proses pengisian berlangsung.

Pengujian berikutnya dilakukan terhadap sistem proteksi suhu berlebih (Over Temperature Protection/OTP). Pengujian dilaksanakan menggunakan tiga variasi suhu yaitu 25°C, 40°C, dan 50°C. Sensor PT100 dan DHT22 digunakan sebagai sensor utama untuk membaca suhu baterai, sedangkan thermo gun digunakan sebagai alat ukur pembandingan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kedua sensor mampu mendeteksi perubahan suhu dengan baik dan menghasilkan data yang mendekati hasil pengukuran thermo gun.

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.2, sistem menunjukkan respons yang sesuai dengan set point yang

telah ditentukan. Pada batas suhu 25°C, relay tetap aktif selama suhu berada di bawah nilai tersebut dan berubah menjadi OFF ketika suhu mencapai 25,12°C. Hal serupa terjadi pada pengujian batas suhu 40°C dan 50°C, di mana sistem secara otomatis memutus aliran pengisian ketika suhu baterai melebihi nilai ambang yang telah ditetapkan. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem OTP bekerja dengan baik dalam mencegah kenaikan suhu berlebih pada baterai.

Tabel 4. Rekapitulasi Akurasi Sensor Suhu

Sensor	Rata-rata Pembacaan (°C)	Error Maksimum (%)	Error Minimum (%)
PT100	41,33	1,01	0,16
DHT22	41,43	1,01	0,16
Thermo Gun	41,50	-	-

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai error sensor berada pada rentang 0,16% hingga 1,01%. Nilai tersebut tergolong kecil sehingga dapat dikatakan bahwa sensor PT100 dan DHT22 memiliki tingkat akurasi yang baik untuk diterapkan pada sistem proteksi pengisian baterai. Selisih pembacaan yang terjadi dipengaruhi oleh karakteristik sensor, posisi pemasangan sensor pada permukaan baterai, serta waktu respon masing-masing alat ukur. Namun demikian, perbedaan tersebut tidak memengaruhi fungsi utama sistem dalam mendeteksi kondisi overtemperature.

Dari sisi kecepatan respon, sistem menunjukkan kemampuan yang baik dalam melakukan pemutusan daya setelah parameter proteksi terlampaui. Pada pengujian suhu 50°C, sistem mampu mengubah status SSR dari ON menjadi OFF hanya beberapa detik setelah suhu melewati nilai ambang batas. Hal ini menunjukkan bahwa mikrokontroler ESP32 mampu memproses data sensor secara real-time dan menjalankan perintah proteksi tanpa keterlambatan yang signifikan. Kemampuan ini sangat penting untuk mengurangi risiko kerusakan baterai akibat paparan suhu tinggi yang berlangsung terlalu lama.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem proteksi pengisian baterai yang dikembangkan berhasil memenuhi tujuan penelitian. Sistem mampu mendeteksi kondisi overcharging dan overtemperature serta melakukan pemutusan daya secara otomatis melalui SSR. Integrasi antara panel surya, MPPT, baterai SLA, sensor tegangan, sensor suhu, dan ESP32 menghasilkan sistem pengisian yang lebih aman dan andal. Dengan demikian, sistem ini berpotensi diterapkan pada sepeda listrik roda tiga berbasis energi surya untuk meningkatkan keamanan pengisian baterai, memperpanjang umur baterai, serta mendukung pemanfaatan energi terbarukan secara lebih optimal.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian mengenai rancang bangun sistem proteksi pengisian daya pada sepeda listrik roda tiga Vokasi UNESA yang terintegrasi dengan panel surya, dapat disimpulkan bahwa



sistem proteksi yang dikembangkan berhasil bekerja sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali yang terintegrasi dengan sensor tegangan PZEM-017, sensor suhu DHT22, sensor suhu PT100, serta Solid State Relay (SSR) sebagai aktuator pemutus daya. Integrasi seluruh komponen tersebut memungkinkan sistem melakukan pemantauan kondisi baterai secara real-time dan mengaktifkan mekanisme Auto Cut-Off secara otomatis ketika parameter tegangan maupun suhu melebihi batas aman yang telah ditentukan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem proteksi memiliki tingkat akurasi yang baik dengan nilai kesalahan pengukuran tegangan dan suhu kurang dari 1% dibandingkan dengan alat ukur referensi. Pada pengujian proteksi tegangan berlebih (Over Voltage Protection), sistem mampu mendeteksi kondisi overcharge dan memutus aliran pengisian secara otomatis ketika tegangan mencapai set point 54,4 V, 57,6 V, dan 60 V. Selain itu, pada pengujian proteksi suhu berlebih (Over Temperature Protection), sistem juga berhasil menghentikan proses pengisian saat suhu baterai mencapai batas yang telah ditentukan yaitu 25°C, 40°C, dan 50°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan yang baik dalam menjaga keamanan proses pengisian baterai dan mengurangi risiko kerusakan akibat overcharging maupun overtemperature.

Selain berfungsi sebagai sistem proteksi, penelitian ini juga membuktikan bahwa penerapan sistem pengisian daya hibrida yang mengombinasikan sumber energi dari panel surya dan jaringan listrik PLN melalui MPPT mampu meningkatkan pemanfaatan energi secara lebih efisien. Hasil pengujian operasional menunjukkan bahwa penggunaan sistem hibrida menghasilkan sisa kapasitas baterai sebesar 60%, lebih tinggi dibandingkan sistem yang hanya menggunakan sumber daya PLN yang menyisakan kapasitas baterai sebesar 45% pada kondisi jarak dan waktu tempuh yang sama. Dengan demikian, integrasi panel surya tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan energi, tetapi juga membantu mempertahankan kapasitas baterai selama pengoperasian kendaraan.

Secara keseluruhan, sistem proteksi pengisian daya yang dikembangkan pada penelitian ini telah mampu memenuhi fungsi utama sebagai sistem pengaman baterai sekaligus mendukung pemanfaatan energi terbarukan pada sepeda listrik roda tiga. Sistem ini berpotensi untuk diterapkan pada kendaraan listrik skala kecil lainnya karena mampu meningkatkan keamanan pengisian, menjaga umur pakai baterai, serta mendukung pengembangan transportasi ramah lingkungan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Abdinoor, J. A., Hashim, Z. K., Horváth, B., & Zseb, S. (2025). Performance of Low-Cost Air Temperature Sensors and Applied Calibration Techniques — A Systematic Review. 1–30.

Al Haqq, M. R., Cholissodin, I., & Soebroto, A. A. (2021). Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Panel Surya dalam Kondisi Berbayang Sebagian dengan Particle Swarm Optimization (PSO). *Jurnal*

Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer, 5(8)(3524–3537.).

Alham, N. R. (2024). Design of Battery Protection System from Over-Powering and Depth of Discharger in Off-Grid System Solar Power Plants Batteries. *Ictrops*. <https://doi.org/10.2991/978-94-6463-732-8>

Ariwibisono, F. X., & Muljanto, W. P. (2023). Implementasi Sistem Monitoring Produksi Energi PLTS Berbasis Protokol Modbus RTU Dan Modbus TCP. *Nuansa Informatika*, 17(2), 109–118.

Bramanta, H. R., Siswoyo, & Santosa, Y. (2021). Rancang Bangun Modul Pengoperasian Motor Induksi dan Beban Resistif Menggunakan Solid State Relay (SSR). *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar (IRWNS)*. <https://doi.org/10.35313/irwns.v15i1.6197>

Budiyanto, & Setiawan, H. (2021). Budiyanto, & Setiawan, H. (2021). Analisa Perbandingan Kinerja Panel Surya Vertikal Dengan Panel Surya Fleksibel Pada Jenis Monocrystalline. *RESISTOR (Elektronika Kendali Telekomunikasi Tenaga Listrik Komputer)*, 4(1), 77–86.

Hagedorn, T., Meier, M., & Wessel, J. (2025). Electrifying choices: How electric bicycles impact on mode choice and emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104278>

Hasan, M. (n.d.). Design of Auto Cut Off Charging System for Electric Car Battery of Untan Electrical Car Team Based on ESP-32 Microcontroller. *Telecommunications, Computers, and Electricals Engineering Journal (TELECTRICAL)*, 2(2), 273–283.

Hu, D., Huang, S., Wen, Z., Gu, X., & Lu, J. (2024). A review on thermal runaway monitoring, warning and protection technologies for lithium-ion batteries. *Batteries*, 11(8)(2345).

Iskak, C. A., Windarko, N. A., & Rakhmawati, R. (2019). Design and Implementation Bidirectional DC-DC Converter for Load Sharing and Charging Battery. *International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (ISEMantic)*, 455–459. <https://doi.org/10.1109/ISEMANTIC.2019.8884344>

Julio, L., Zenteno, S., Arancibia, C., Aly, M., Seleme, S. I., & Morais, L. M. F. (2025). An Enhanced Solar Battery Charger Using a DC-DC Single-Ended Primary-Inductor Converter and Fuzzy Logic-Based Control for Off-Grid Photovoltaic Applications.

Kako, S. (2023). A Comparative Study about Accuracy Levels of Resistance Temperature Detectors RTDs Composed of Platinum, Copper, and Nickel. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 26, 216–225. <https://doi.org/10.29194/NJES.26030216>

Khan, R. S., Aziz, A., Babar, R., & Abbas, K. (2025). Advanced Battery Management for Electric Vehicles: Charge Monitoring and Fire Security. *Pakistan Journal of Engineering and Technology*, 8(1), 33–42. <https://journals.uol.edu.pk/pakjet/article/view/3804>



- Malik Abdillah dkk. (2024). Solar Cell Electric Bike In The Development Of Environmentally Transportation Technology. *Jurnal Scientia*, 13(04), 1868–1877. <https://infor.seaninstitute.org/index.php/pendidikan/article/view/2719>
- Masud, M. H., Akhter, M. S., Islam, S., Parvej, A. M., & Mahmud, S. (2020). Design, construction and performance study of a solar assisted tri-cycle. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 64(3), 200–2005. <https://doi.org/10.3311/PPme.15065>
- Md. Khaja Farman, Jarabana Nikhila, A. Bhavya Sreeja, B. Sai Roopa, K. S. and D. G. K. (2024). AI-Enhanced Battery Management Systems for Electric Vehicles: Advancing Safety, Performance, and Longevity. . . *Journal of Energy Storage Systems*, 15(2), 45–56. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459104001>
- Mombekova, G., Nurgabylov, M., Baimbetova, A., Keneshbayev, B., & Izatullayeva, B. (2024). The Relationship Between Energy Consumption, Population and Economic Growth in Developing Countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(3), 368–374. <https://doi.org/10.32479/ijeep.15614>
- Muhammad Irfan, & G. G. S. (2025). Desain Prototipe Sepeda Listrik Tiga Roda Sebagai Alat Transportasi Untuk Pengiriman Paket Di Kota Bekasi. *VisArt: Jurnal Seni Rupa Dan Design*, 3(1), 89–97.
- Muliadi, M., Imran, A., & Rasul, M. (2020). Pengembangan tempat sampah pintar menggunakan ESP32. *Jurnal Media Elektrik*, 17(2), 73–79.
- Putra, A. M. N., & Amalia, S. (2023). The Effect of Voltage Variations on Temperature and Time During the Charging of Electrical Vehicle Batteries. *Jurnal Electron*, 4(2), 144–119.
- Rahmadhani, N. D., Faizah, F., & Wiguna, I. W. Y. M. (2020). Prototipe Sistem Proteksi Pengisian Baterai dengan Metode Fuzzy Logic. *SNITP (Seminar Nasional Inovasi Teknologi Penerbangan)*, 2(1), 1–7. <https://ejournal.poltekbangsby.ac.id/index.php/SNITP/article/view/684>
- Rahman, M. A., Reddy, G. M. V., & Chatterjee, R. (2025). Energy Sources and Thermal Management Technologies for Electric Vehicle Batteries: A Technical Review. *Global Challenges*, 9(2). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/gch2.202500083>
- Ryś, P. A., Siekierski, M., Kłos, M., & Moszczyński, P. (2024). Trends and prospects in lead-acid battery developments. *Journal of Power Technologies*, 104(1).
- Saepudin Nirwan, H. . M. (2020). No TitleRancang Bangun Aplikasi untuk Prototipe Sistem Monitoring Konsumsi Energi Listrik Berbasis IoT. *Jurnal Teknik Informatika ULBI*, 12(2), 22–30.
- Samosir, D. J., Satria, B., & Aryza, S. (2025). PERFORMANCE ANALYSIS OF LITHIUM-ION BATTERY CHARGER SYSTEM. *Instal: Jurnal Komputer*, 16(6), 283–293. <https://doi.org/10.54209/jurnalinstall.v16i06.348>
- Setyadi, H. A., & Perbawa, D. S. (2024). ELECTRIC BICYCLE SELECTION SYSTEM USING MULTI CRITERIA DECISION MAKING. *Jurnal Ilmiah Teknologi Komputer (JITK)*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.33480/jitk.v10i1.5163>
- Suyanto, H., Erlina, Diantari, R. A., & Al Rasyid, H. (2021). Study on Optimization of System Management Battery for Lithium Batteries and Lead Acid Batteries at the New and Renewable Energy Research Center IT PLN. *IEEE 5th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE)*, 213–218. <https://doi.org/10.1109/ICITISEE53823.2021.9655905>
- Tran, Q. T., Pham, T. V., & Hoang, M. N. (2023). Environmental control for photovoltaic performance testing. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 59. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103210>
- Vanlalchhuanawmi, C., Deb, S., & Onen, A. (2024). Energy management strategies in distribution system integrating electric vehicle and battery energy storage system: A review. *Energy Storage*, 4(2), e682. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/est2.682>
- Waruwu, H. P. (2023). Analisis Konversi Energi Flexible Solar Panel dan Sistem Kontrol Baterai PLTS Sentralisasi. *Universitas Medan Area*.
- Yohanes Calvinus, F. W. and H. T. (2020). Battery Charging Management System Design with Voltage, Current and Temperature Monitoring Features in Electric Vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1007(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1007/1/012174>