

Perancangan dan Pengujian PLTS Off-Grid Portabel Berbasis IoT untuk Aplikasi Darurat Infrastruktur Transportasi

¹ Budi Triyono, ^{2*} Dimas Nur Prakoso, ³ Yuli Prasetyo, ⁴ Basuki Winarno, ⁵ Ryan Wicaksono, ⁶ Santi Triwijaya ⁷ Satrio Nugroho (11 pt bold)

^{1,2,3,4,5,7} Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun, Madiun

⁶ Teknologi Elektro Perkeretaapian, Politeknik Perkeretaapian Indonesia, Madiun

¹ buditriyono@pnm.ac.id, ² dimasnur@pnm.ac.id, ³ yuliprasetyo2224@pnm.ac.id, ⁴ Basuki@pnm.ac.id,
⁵ ryanwicak@pnm.ac.id ⁶ santi@ppi.ac.id, ⁷ satrionugroho177@gmail.com

Article Info

Article history:

Received: 6 March 2026

Revised: 6 April 2026

Accepted: 07 May 2026

Keyword:

PLTS

IoT monitoring

Baterai Lithium

Energi Keberlanjutan

ABSTRACT

The availability of a reliable power supply in transportation infrastructure is essential to maintain safety, order, and service continuity, particularly during emergency conditions when the grid power supply is disrupted. This study aimed to design and evaluate a portable off-grid photovoltaic (PV) system based on the Internet of Things (IoT) as an emergency power source for sustainable transportation infrastructure. The research method employed a system engineering approach consisting of literature review, hardware design, IoT-based monitoring system integration, prototype assembly, as well as laboratory and field testing. The developed system consisted of three solar panels with a total capacity of 300 Wp, a 12 V 100 Ah lithium battery, a 20 A PWM solar charge controller, a 1000 W inverter, and an Ubidots-based monitoring dashboard. The test results showed that the solar panel output voltage ranged from 19.5 to 20.5 V, with the highest output power reaching 89.3 W at 11:00 a.m. The output voltage of the solar charge controller remained relatively stable in the range of 13.37–13.43 Vdc during the charging process. In the battery discharge test, the voltage decreased from 13.46 Vdc to 13.37 Vdc, followed by a decrease in inverter AC voltage from 205 Vac to 198 Vac. The IoT system successfully displayed electrical parameters in real time, including voltage, current, power, charging-discharging status, and battery state of charge. The results indicate that the developed system is feasible as a portable, efficient, and easily monitored emergency power supply solution.

This is an open access article under the CC BY-SA license



DOI: <https://doi.org/10.32492/nucleus.v5i1.5109>

Corresponding Author:

Dimas Nur Prakoso

Teknik Listrik, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun,

Jl. Serayu No 84, Pandean, Madiun, Jawa Timur 63133.

Email: dimasnur@pnm.ac.id

Abstrak—Ketersediaan catu daya yang andal pada infrastruktur transportasi sangat penting untuk menjaga keselamatan, ketertiban, dan kontinuitas layanan, khususnya pada kondisi darurat ketika pasokan listrik dari jaringan terganggu. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid portabel berbasis Internet of Things (IoT) sebagai sumber daya darurat untuk infrastruktur transportasi berkelanjutan. Metode penelitian menggunakan pendekatan rekayasa sistem yang

meliputi studi literatur, perancangan perangkat keras, integrasi sistem monitoring IoT, perakitan prototipe, serta pengujian laboratorium dan lapangan. Sistem yang dikembangkan terdiri atas tiga panel surya dengan total kapasitas 300 Wp, baterai lithium 12 V 100 Ah, solar charge controller PWM 20 A, inverter 1000 W, serta dashboard monitoring berbasis Ubidots. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan keluaran panel surya berada pada rentang 19,5–20,5 V dengan daya tertinggi mencapai 89,3 W pada pukul 11.00. Tegangan keluaran solar charge controller relatif stabil pada rentang 13,37–13,43 Vdc selama proses pengisian. Pada pengujian baterai saat pelepasan beban, tegangan menurun dari 13,46 Vdc menjadi 13,37 Vdc, diikuti penurunan tegangan AC inverter dari 205 Vac menjadi 198 Vac. Sistem IoT berhasil menampilkan parameter kelistrikan secara real-time, meliputi tegangan, arus, daya, status charging-discharging, dan state of charge baterai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan layak digunakan sebagai solusi catu daya darurat yang portabel, efisien, dan mudah dipantau.

I. Pendahuluan

Transformasi menuju transportasi berkelanjutan menuntut dukungan infrastruktur yang andal, aman, efisien, dan rendah emisi[1], [2]. Infrastruktur pendukung transportasi seperti penerangan area, sistem informasi dan rambu elektronik, perangkat komunikasi, sistem pemantauan lalu lintas, pos layanan, serta titik pengisian perangkat operasional memerlukan pasokan listrik yang stabil agar tetap berfungsi optimal. Dalam konteks transisi energi sektor transportasi, keandalan pasokan energi menjadi faktor penting untuk menjaga kontinuitas layanan sekaligus mendukung target penurunan emisi[1], [2].

Namun, pada berbagai kondisi lapangan, pasokan listrik dari jaringan (on-grid) tidak selalu tersedia secara kontinu. Gangguan jaringan, pemadaman terencana, bencana alam, hingga keterbatasan akses listrik pada area tertentu dapat menyebabkan fasilitas transportasi mengalami penurunan layanan bahkan berhenti beroperasi. Infrastruktur transportasi termasuk bagian dari infrastruktur kritis, sehingga gangguan pada sistem pendukung energinya dapat menimbulkan dampak terhadap keselamatan, mobilitas, dan kualitas layanan publik[3].

Pada kondisi darurat, kebutuhan listrik menjadi semakin penting karena berkaitan langsung dengan aspek keselamatan, ketertiban, dan kontinuitas layanan transportasi. Solusi konvensional berupa generator berbahan bakar fosil masih banyak digunakan, tetapi memiliki sejumlah keterbatasan, antara lain emisi karbon, kebisingan, kebutuhan logistik bahan bakar, dan biaya operasional yang relatif tinggi. Oleh karena itu, diperlukan solusi catu daya darurat yang lebih ramah lingkungan, mudah dipindahkan, cepat dioperasikan, dan mampu mendukung kebutuhan energi untuk beban prioritas. Salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi besar untuk dimanfaatkan adalah energi surya, yang dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui panel fotovoltaik. Untuk konteks Indonesia, studi pemetaan potensi surya di wilayah Jawa-Bali menunjukkan bahwa kawasan ini memiliki prospek yang baik untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) [4].

Meskipun energi surya tersedia melimpah, keluaran energi listrik dari panel surya bersifat fluktuatif karena dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, suhu, waktu, dan kondisi lingkungan. Oleh karena itu, sistem PLTS memerlukan penyimpanan energi, seperti baterai, agar energi yang dihasilkan pada saat radiasi tinggi dapat disimpan dan digunakan kembali ketika iradiasi menurun atau saat malam hari. Pada sistem off-grid, kombinasi panel surya dan baterai menjadi komponen utama untuk menjaga kontinuitas suplai energi pada beban[5].

Pemanfaatan PLTS off-grid portabel menjadi salah satu alternatif yang relevan karena dapat bekerja mandiri tanpa ketergantungan pada jaringan listrik. Sistem ini berpotensi diterapkan sebagai catu daya darurat pada infrastruktur transportasi, terutama pada lokasi dengan mobilitas tinggi, kondisi tanggap darurat, atau akses jaringan listrik yang terbatas. Namun, agar sistem PLTS portabel dapat digunakan secara efektif, diperlukan pengelolaan energi yang baik terhadap variasi beban dan perubahan intensitas radiasi matahari. Integrasi Internet of Things (IoT) pada sistem PLTS portabel dapat meningkatkan keandalan melalui pemantauan parameter listrik secara real time, sehingga operator dapat mengetahui status baterai, kondisi pengisian, performa keluaran, dan potensi gangguan lebih cepat. Selain itu, sistem monitoring berbasis IoT memungkinkan pengawasan jarak jauh, pencatatan data, dan evaluasi performa sistem secara lebih efisien[5], [6].

Berdasarkan uraian tersebut, masih terdapat kebutuhan akan pengembangan sistem PLTS off-grid portabel berbasis IoT yang secara khusus dirancang sebagai catu daya darurat untuk mendukung infrastruktur

transportasi berkelanjutan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi performa sistem PLTS off-grid portabel berbasis IoT sebagai solusi emergency power management pada infrastruktur transportasi berkelanjutan. Evaluasi dilakukan dengan meninjau kinerja pembangkitan PV, stabilitas pengisian baterai, karakteristik pelepasan energi saat berbeban, kestabilan keluaran inverter, serta efektivitas sistem monitoring IoT dalam menyajikan status operasi dan parameter energi secara real-time.

Meskipun berbagai penelitian terdahulu telah membahas penerapan PLTS off-grid, sistem penyimpanan energi berbasis baterai, maupun monitoring berbasis IoT, sebagian besar studi masih berfokus pada aspek perancangan teknis, pengujian komponen secara terpisah, atau aplikasi beban umum. Studi terkait PLTS off-grid umumnya menekankan kapasitas pembangkitan, efisiensi pengisian baterai, atau karakteristik inverter, sedangkan studi monitoring IoT lebih banyak diarahkan pada visualisasi parameter listrik secara real-time. Namun, belum banyak penelitian yang secara spesifik mengintegrasikan ketiga aspek tersebut dalam satu kerangka evaluasi sistem untuk kebutuhan catu daya darurat pada infrastruktur transportasi, yang memiliki karakteristik berbeda karena menuntut portabilitas, kesiapan operasi cepat, pemantauan jarak jauh, dan kemampuan mendukung beban prioritas saat terjadi gangguan pasokan listrik utama.

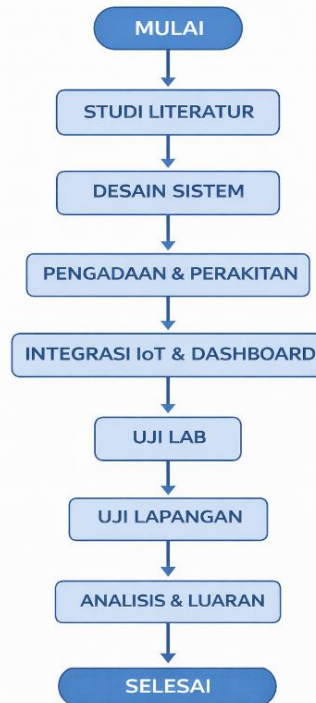
Kesenjangan penelitian tersebut menunjukkan bahwa kebaruan sistem PLTS off-grid portabel tidak cukup hanya dinilai dari keberhasilan merangkai panel surya, baterai, charge controller, inverter, dan dashboard IoT. Nilai ilmiah yang lebih penting terletak pada bagaimana sistem tersebut dievaluasi sebagai bagian dari emergency power management, yaitu kemampuan sistem dalam menghasilkan, menyimpan, menyalurkan, dan memantau energi secara terukur pada skenario darurat. Oleh karena itu, evaluasi performa sistem perlu mencakup stabilitas keluaran panel surya, karakteristik pengisian melalui solar charge controller, respons baterai saat pelepasan beban, kestabilan tegangan keluaran inverter, serta kontribusi monitoring IoT dalam mendeteksi status operasi charging-discharging dan state of charge baterai secara real-time.

Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi dan evaluasi performa PLTS off-grid portabel berbasis IoT sebagai sistem manajemen daya darurat untuk aplikasi infrastruktur transportasi. Berbeda dari studi yang hanya menampilkan prototipe atau monitoring parameter listrik, penelitian ini menempatkan sistem sebagai solusi catu daya darurat yang dievaluasi berdasarkan perilaku energi pada proses pembangkitan, penyimpanan, konversi, dan pemantauan operasional. Pendekatan ini memberikan kontribusi ilmiah dalam bentuk kerangka evaluasi sistem PLTS portabel untuk mendukung keandalan energi pada kondisi darurat transportasi berkelanjutan.

II. Metode Penelitian

A. Metode Penelitian

Pengembangan PLTS Off-Grid Portabel Berbasis IoT untuk Catu Daya Darurat Infrastruktur Transportasi Berkelanjutan menggunakan pendekatan rekayasa sistem (engineering design) yang mencakup perancangan perangkat keras PLTS portabel, integrasi sistem monitoring berbasis IoT, serta pengujian kinerja bertahap (laboratorium dan lapangan). Metode ini dipilih agar solusi yang dihasilkan tidak hanya berfungsi secara teknis, namun juga aplikatif untuk kebutuhan darurat pada infrastruktur transportasi.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Gambar 1 di atas menggambarkan alur pelaksanaan penelitian secara sistematis mulai dari tahap awal hingga akhir. Penelitian diawali dengan Mulai, kemudian dilanjutkan dengan studi literatur untuk mengkaji teori, referensi ilmiah, serta teknologi terkini terkait PLTS off-grid portabel dan sistem monitoring berbasis IoT. Setelah itu dilakukan desain sistem, yaitu perancangan arsitektur dan spesifikasi perangkat keras maupun perangkat lunak yang dibutuhkan, termasuk penentuan kapasitas panel surya, baterai, charge controller/inverter, sensor, serta rancangan komunikasi data IoT. Tahap berikutnya adalah pengadaan dan perakitan, yaitu proses pembelian komponen sesuai desain dan perakitan prototipe PLTS portabel. Selanjutnya dilakukan integrasi IoT dan dashboard, yaitu pemasangan sensor, pemrograman mikrokontroler, pengiriman data, serta pembuatan tampilan monitoring real-time untuk memantau parameter kelistrikan sistem. Setelah sistem terintegrasi, dilakukan uji laboratorium (uji lab) untuk memastikan fungsi sistem berjalan dengan baik, mengevaluasi kestabilan keluaran, efisiensi, serta kemampuan suplai pada variasi beban. Tahap berikutnya adalah uji lapangan, yaitu pengujian langsung pada skenario penggunaan nyata sebagai catu daya darurat infrastruktur transportasi untuk melihat performa, portabilitas, dan keandalan sistem saat digunakan di kondisi operasional.

B. Panel Surya

Modul *photovoltaic* adalah sejumlah sel surya yang dirangkai secara seri dan paralel, untuk meningkatkan tegangan dan arus yang dihasilkan sehingga cukup untuk pemakaian sistem catu daya beban[7]. Untuk mendapatkan keluaran energi listrik yang maksimal maka permukaan modul surya harus mengarah ke matahari untuk menyerap cahaya matahari yang akan menjadi bahan utama pada rangkaian PLTS[8].

Panel surya yang biasa diketahui yaitu jenis Crystalline Silicon dan Thin Film. Jenis Crystalline Silicon terbuat dari bahan silikon dan terbagi menjadi dua yaitu Polycrystalline memiliki efisiensi 13-15% dan Monocrystalline memiliki efisiensi 14-16% [9]. Sedangkan jenis Thin Film terbuat dari bahan kimia seperti CdTe dan CIGs dan memiliki efisiensi 6,5-8%. Masing-masing jenis panel surya memiliki kelebihan dan kekurangan, pemilihan jenis panel surya disesuaikan pada intensitas cahaya matahari yang diterima panel surya.



Gambar 2. Photovoltaic

Instalasi panel surya dilakukan melalui dua cara yaitu secara paralel dan seri. Pemasangan paralel digunakan untuk memperoleh arus yang lebih besar. Sedangkan pemasangan secara seri memiliki tujuan untuk mendapatkan nilai tegangan yang tinggi. Pemilihan pemasangan secara paralel atau seri ini disesuaikan dengan rating tegangan masukan dari Solar Charge Controller (SCC) dan Inverter.

C. Solar Charge Controller (SCC)

Solar Charge Controller (SCC) merupakan perangkat dalam sistem PLTS yang berfungsi sebagai pengatur pengisian daya dari panel surya ke baterai. SCC ini digunakan untuk menjaga tegangan dan arus yang masuk ke baterai sesuai dengan rating baterai[10]. SCC akan memastikan baterai tidak mengalami pelepasan muatan (over discharge) dan kelebihan muatan (over charge) yang dapat mengurangi usia dari baterai.



Gambar 3. Gambar Solar Charge Controller PWM

SCC dilengkapi dengan PWM yang berfungsi untuk mendapatkan daya maksimum dari hasil konversi energi panel surya[11]. Dimana panel surya akan menghasilkan daya maksimum pada saat terkena cahaya matahari. Tetapi ketika cahaya matahari terhalan oleh awan mendung, daya yang dihasilkan akan kecil. Untuk itu, SCC yang dilengkapi PWM akan memaksimalkan daya yang dikonversi dari cahaya matahari sebelum masuk ke baterai dan inverter.

D. Baterai

Baterai merupakan salah satu komponen yang digunakan pada sistem pembangkit listrik tenaga surya yang dilengkapi penyimpanan cadangan energi listrik. Baterai memiliki fungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan panel surya dalam bentuk listrik arus searah[12]. Energi listrik yang disimpan pada baterai berfungsi sebagai cadangan, yang biasanya dipergunakan pada saat panel surya tidak menghasilkan energi listrik, contohnya pada saat malam hari atau cuaca mendung. Selain itu tegangan keluaran ke sistem lebih stabil.



Gambar 4. Gambar Baterai Lithium Ion

Batas pengosongan baterai sering disebut istilah *depth of discharge* (DOD), yang dinyatakan dalam satuan persen, biasanya ditentukan sebesar 80% [13]. Banyak tipe dan klasifikasi baterai yang diproduksi saat ini, yang masing-masing memiliki desain yang spesifik dan karakteristik performa berbeda sesuai dengan aplikasi khusus yang dikehendaki.

E. Inverter

DC to AC Converter atau biasa dikenal dengan Inverter merupakan salah satu komponen utama dalam sistem PLTS[14]. Beban rumah tangga umumnya memiliki rating tegangan AC, sedangkan keluaran dari panel surya adalah DC. Untuk itu diperlukan Inverter yang dapat merubah tegangan dari tegangan DC keluaran panel surya/baterai menjadi tegangan AC sesuai beban rumah tangga.



Gambar 5. Inverter

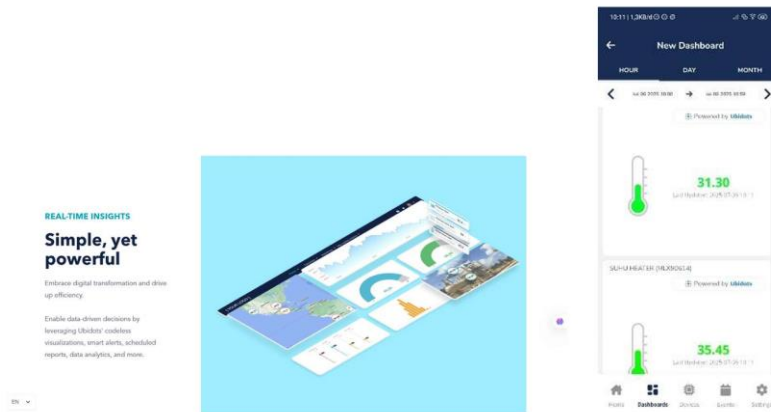
Ada beberapa jenis Inverter yang ada di pasaran berdasarkan mutu daya keluarannya. Ada yang sinus murni (*pure sine wave*) dan *modified wave*. Untuk sistem PLTS, Inverter yang baik digunakan adalah tipe *pure sine wave*, karena inverter jenis ini mampu memberikan suplai bagi semua jenis beban[15], table 1 merupakan spesifikasi dari inverter.

Tabel 1. Spesifikasi Inverter

Brand	Taffware
Wave Form	PSW/Pure Sine Wave
Voltase Input (VDC)	12 VDC
Voltase Outptut (VAC)	220VAC
Kontinu Power	800 Watt
Surge Power	1600 Watt
Frequency	50 Hz
Material	Metal Body
Dimensions	247x105x60mm

F. Internet of Things (IoT)

IoT adalah konsep di mana objek fisik dilengkapi dengan sensor, perangkat lunak, dan teknologi lainnya untuk terhubung dan bertukar data dengan perangkat lain melalui internet. Dalam konteks monitoring, IoT memungkinkan pengumpulan data suhu secara real-time dan pengiriman informasi tersebut ke pengguna melalui aplikasi atau platform berbasis web[16]. Salah satu platform yang digunakan dalam penelitian ini adalah Ubidots, platform ini berbasis cloud yang dirancang khusus untuk memudahkan pengembangan aplikasi IoT tanpa memerlukan keahlian programming mendalam.

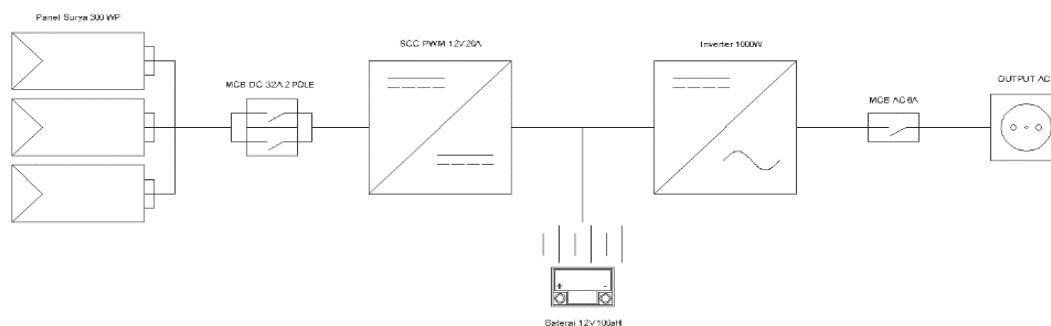


Gambar 5. Tampilan Dashboard

Platform ini menyediakan jasa menghubungkan antara perangkat hardware, konektivitas, dan cloud dengan pendekatan low-code untuk engineer dan developer yang tidak memiliki waktu atau energi untuk membangun aplikasi IoT production-ready yang lengkap sendiri. Ubidots menawarkan building blocks yang mencakup dashboard drag-and-drop, API yang ramah perangkat, analytics, reports dan alerts, serta mendukung berbagai perangkat seperti Arduino, Raspberry Pi, Particle, Espressif, dan Onion.

G. Single Line Wiring PLTS

Desain Single Line Wiring dibuat bertujuan untuk memudahkan pembaca maupun penulis memahami alur dari trainer PLTS dengan lebih jelas. Berikut desain wiring trainer PLTS.



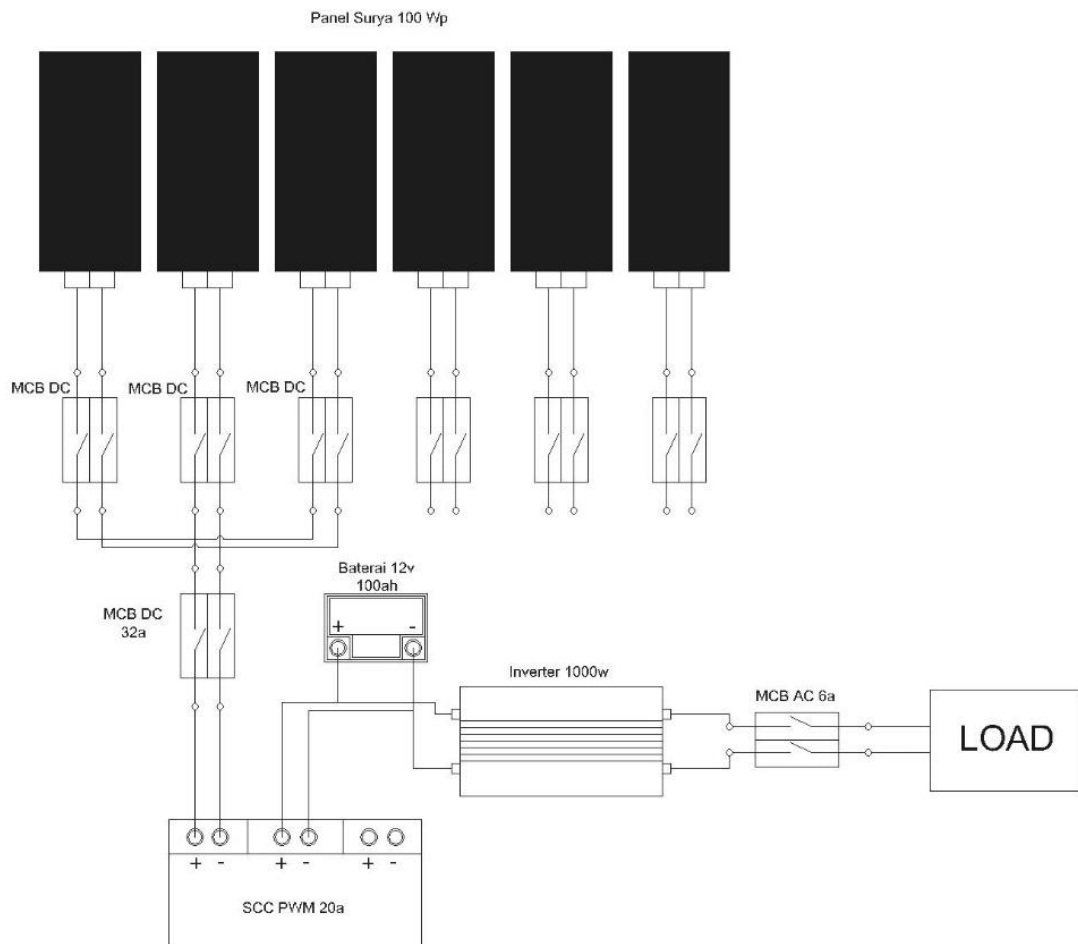
Gambar 6. Desain Single Line Diagram

Gambar Single Line ini merupakan gambaran skematik system PLTS yang akan dipasang. Modul PV yang akan digunakan adalah 3 PV yang dirangkai secara parallel. Dari rangkaian tersebut akan disambungkan dengan MCB DC dan lanjut menuju ke Solar Charge Controller. Dari Solar Charge Controller akan disambungkan ke baterai dan juga inverter. Lalu inverter akan dihubungkan ke MCB AC dan lanjut ke Output AC.

H. Single Line Wiring PLTS

Desain Wiring merupakan salah satu bagian penting dalam suatu perangkat atau instalasi. Desain Wiring dibuat bertujuan untuk memudahkan pembaca maupun penulis memahami alur daya dari trainer PLTS secara menyeluruh, baik dalam proses instalasi, pemeliharaan maupun saat melakukan pemasangan. Pada sub bab

ini dijelaskan secara rinci mengenai tata letak dan hubungan antar komponen listrik dalam bentuk diagram pengkabelan. Pada desain wiring ini juga digunakan untuk menggambarkan jalur aliran arus listrik serta koneksi antar komponen. Berikut desain wiring trainer PLTS:



Gambar 7. Desain Wiring Modul PLTS

III. Hasil, Analisis Performa, dan Pembahasan

Bab ini tidak hanya menyajikan hasil pengukuran, tetapi juga menganalisis makna teknis dari setiap parameter terhadap performa sistem PLTS off-grid portabel sebagai catu daya darurat. Analisis dilakukan dengan meninjau hubungan antara hasil pengujian PV, kestabilan SCC, karakteristik discharge baterai, keluaran inverter, dan fungsi monitoring IoT dalam mendukung emergency power management.

Hasil pengujian disajikan berdasarkan skenario eksperimen yang telah ditetapkan pada metode penelitian, yaitu pengujian keluaran panel surya, pengujian kestabilan solar charge controller, pengujian baterai pada kondisi discharge, pengujian tegangan keluaran inverter saat berbeban, serta evaluasi sistem monitoring IoT. Penyajian hasil berdasarkan skenario ini bertujuan untuk memperkuat keterulangan eksperimen, validitas data, dan komparabilitas performa sistem dengan penelitian sejenis.

A. Hasil Perakitan Trainer yang di Desain

Pada gambar berikut merupakan hasil jadi trainer PLTS dan pengujian sambungan rangkaian setelah perakitan:



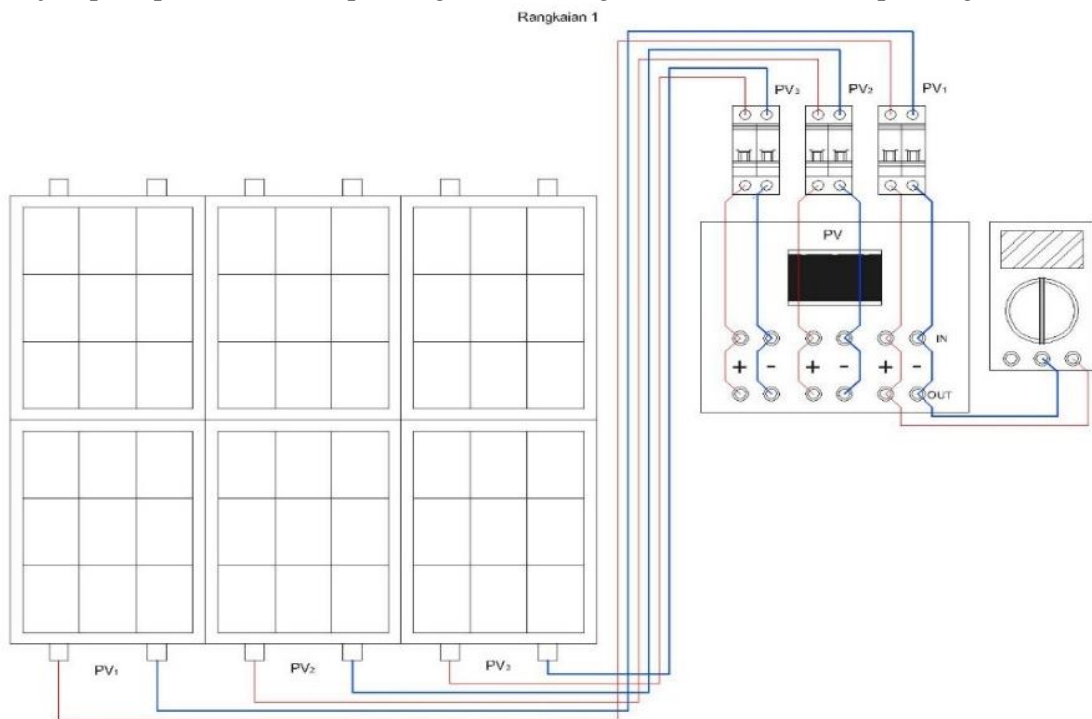
Gambar 8. Rangkaian Modul Trainer

Dalam mode buzzer ini, Avo Meter dapat memberukan sinyal suara sehingga mempermudah dalam melacak dan mengidentifikasi masalah pada rangkaian yang benar atau yang mungkin mengalami masalah. Melalui pengujian ini, akan membantu mencegah kegagalan system, kesalahan, serta memastikan keselamatan bagi pengguna modul trainer khususnya saat pengujian dengan tegangan.

B. Hasil Pengujian Output Panel Surya

Tujuan pengujian hasil produksi Solar PV (Panel Surya) pada setiap keluaran solar panel dan ketika dirangkai secara paralel pada modul trainer PLTS adalah untuk mengetahui kinerja dan keandalan system PLTS yang telah dirakit. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa panel surya menghasilkan daya listrik DC yang sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan dan system rangkaian berfungsi dengan baik. Pengujian ini, dilaksanakan dengan menggunakan 3unit solat PV dan modul trainer PLTS yang sudah dirangkai.

Data Pengujian ini diambil untuk mengetahui berapa besar nilai tegangan dari panel sel surya terhadap posisi sinar matahari dan juga apakah sesuai dengan name plate spesifikasi dari panel surya itu sendiri. Di saat cuaca cerah, panel surya ini mampu menghasilkan tegangan tertinggi sekitar 19,5V sampai dengan 20,5V yang terjadi pada pukul 09.00 sampai dengan 14.00 dengan nilai arus 1,7A sampai dengan 4,4A.



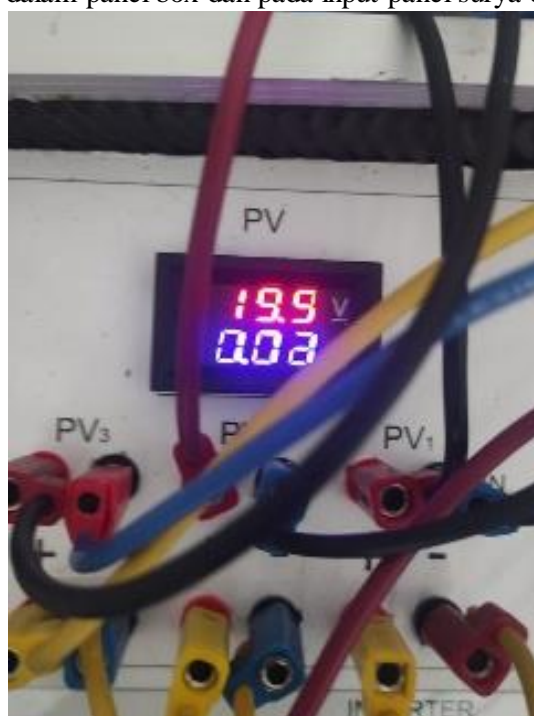
Gambar 9. Rangkaian Pengujian PV

Pengujian ini dilakukan langsung pada panel box dari panel surya. Pengujian keluaran panel surya ini dilakukan dalam berbagai waktu dalam sehari untuk melihat variasi daya keluaran akibat perubahan intensitas cahaya matahari.



Gambar 10. Pengukuran Output Tegangan PV pada Panel Control

Pengujian ini dilakukan pada input panel surya dalam modul trainer. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan ketika dalam panel box dan pada input panel surya dalam trainer.



Gambar 11. Pengukuran Output Panel Surya pada Modul

Dari hasil pengujian tersebut didapatkan bahwa setiap Panel Surya berfungsi dengan baik dan didapatkan juga hasil dari pengukuran selama 5 jam bahwa Cahaya yang dihasilkan oleh matahari mempengaruhi nilai daya yang dihasilkan oleh Panel Surya. Dapat dilihat pada tabel hasil pengujian bahwa semakin tinggi intensitas Cahaya matahari yang diterima oleh Panel Surya, maka semakin tinggi nilai daya yang dihasilkan oleh Panel Surya.

Tabel 2. Nilai Hasil Pengujian Output PV

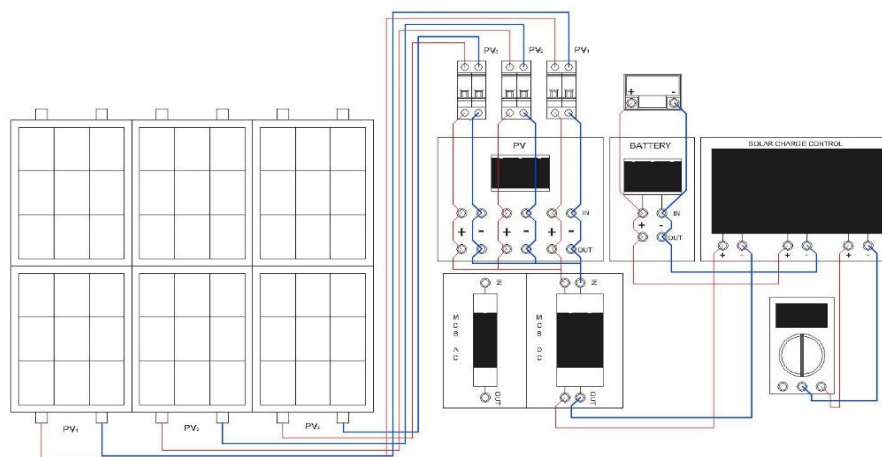
Waktu	PV 1			PV 2			PV 3		
	V	A	P	V	A	P	V	A	P
09.00	19,6 V	3,8 A	74,4 W	19,5 V	3,8 A	74,1 W	19,6 V	3,9 A	76,4 W
10.00	20,2 V	3,8 A	76,7 W	20,1 V	3,8 A	76,3 W	20,2 V	3,8 A	76,7 W
11.00	20,1 V	4,1 A	82,4 W	20,1 V	4,3 A	86,4 W	20,3 V	4,4 A	89,3 W
12.00	20,3 V	3,5A	71 W	20,3 V	3,5 A	71 W	20,5 V	3,6 A	73,8 W
13.00	20,1 V	2,4 A	48,2 W	20,2 V	2,3 A	46,4 W	20,4 V	2,4 A	48,9 W
14.00	20,2 V	1,7 A	34,3 W	20,2 V	1,7A	34,3 W	20,3 V	1,8 A	36,5 W

Berdasarkan hasil pengujian output panel surya, tegangan keluaran masing-masing panel relatif stabil pada rentang 19,5–20,5 V, sedangkan variasi daya lebih dominan dipengaruhi oleh perubahan arus. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan intensitas radiasi matahari lebih kuat tercermin pada perubahan arus keluaran panel dibandingkan tegangan. Daya tertinggi sebesar 89,3 W diperoleh pada PV 3 pukul 11.00, yang menunjukkan bahwa periode tersebut merupakan kondisi paling optimal selama pengujian karena posisi matahari dan intensitas penyinaran mendukung proses konversi energi fotovoltaik secara lebih efektif.

Jika dibandingkan dengan kapasitas nominal sistem sebesar 300 Wp, daya keluaran aktual per panel masih berada di bawah kapasitas puncaknya. Hal ini wajar karena daya nominal panel umumnya diperoleh pada kondisi standar pengujian, sedangkan pengujian lapangan dipengaruhi oleh intensitas radiasi, sudut datang cahaya, temperatur panel, rugi-rugi kabel, dan kondisi lingkungan. Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa performa panel tidak hanya ditentukan oleh kapasitas terpasang, tetapi juga oleh kondisi operasional aktual. Dalam konteks catu daya darurat, temuan ini penting karena sistem perlu dirancang dengan mempertimbangkan margin kapasitas agar tetap mampu menyuplai beban prioritas meskipun daya PV aktual lebih rendah dari kapasitas nominal.

C. Hasil Pengujian Output Solar Charge Controller

Data pengujian output Solar Charge Controller ini dilakukan untuk mengetahui nilai dari keluaran solar charge controller ketika keadaan charging baterai. Rangkaian dan nilai hasil pengujian dapat dilihat pada tabel berikut.



Gambar 12. Rangkaian Uji Solar Charge Controller



Gambar 12. Pengukuran Output Solar Charge Controller

Dari hasil pengujian tersebut didapatkan bahwa komponen Solar Charge Controller (SCC) berfungsi dengan baik dan didapatkan juga hasil dari pengukuran selama 5 jam bahwa output dari Solar Charge Controller ini dipengaruhi oleh kapasitas baterai. Dapat dilihat pada tabel hasil pengujian bahwa semakin lama waktu pengujian komponen, tegangan output juga semakin tinggi dikarenakan baterai dalam kondisi charging.

Tabel 3. Nilai Hasil Pengujian Solar Charge Controller Tegangan

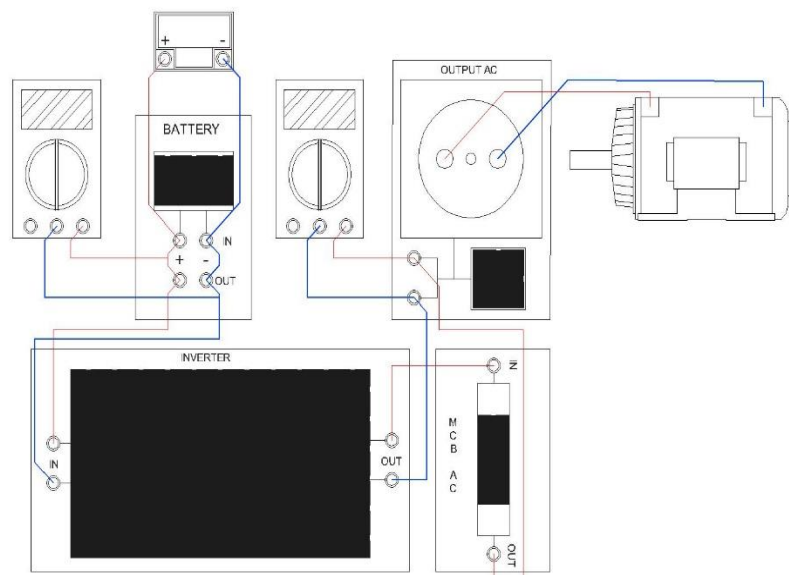
Waktu	Tegangan
09.00	13,37 Vdc
10.00	13,38 Vdc
11.00	13,4 Vdc
12.00	13,41 Vdc
13.00	13,43 Vdc

Hasil pengujian solar charge controller menunjukkan tegangan keluaran yang relatif stabil pada rentang 13,37–13,43 Vdc selama proses pengisian. Stabilitas ini menunjukkan bahwa SCC mampu mengatur tegangan dari panel surya menuju baterai sehingga proses charging berlangsung dalam batas yang aman. Kenaikan tegangan yang kecil dan bertahap mengindikasikan bahwa baterai berada dalam kondisi pengisian yang terkendali, tanpa fluktuasi tegangan yang ekstrem.

Dari sisi desain sistem, kestabilan keluaran SCC menjadi indikator penting karena baterai lithium memerlukan proses pengisian yang terkontrol untuk menjaga umur pakai dan keamanan sistem. Pada aplikasi darurat, kestabilan ini juga berpengaruh terhadap kesiapan sistem karena baterai harus dapat menerima energi dari panel surya secara konsisten sebelum digunakan untuk menyuplai beban. Dengan demikian, hasil pengujian SCC tidak hanya menunjukkan bahwa komponen berfungsi, tetapi juga mendukung argumentasi bahwa sistem memiliki mekanisme pengelolaan energi yang cukup stabil untuk skenario emergency power management.

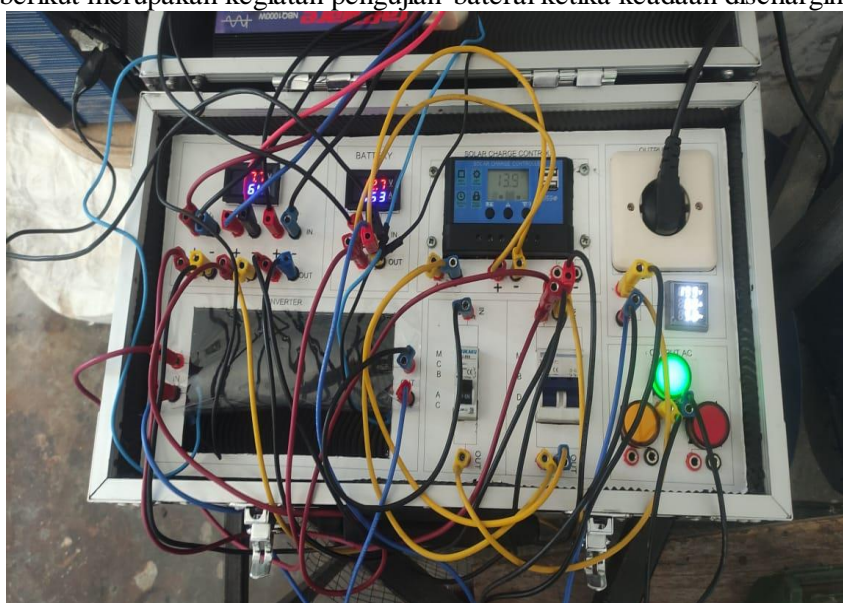
D. Hasil Pengujian Baterai pada Keadaan Discharge

Pengujian Inverter ini dilakukan saat keadaan berbeban. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berapa banyak energi yang digunakan oleh baterai dalam waktu tertentu. Rangkaian dan data pengujian baterai dapat dilihat pada gambar dan tabel berikut.



Gambar 13. Rangkaian Uji Baterai Discharging

Pada gambar berikut merupakan kegiatan pengujian baterai ketika keadaan discharging.



Gambar 13. Pengujian Baterai ketika Discharging

Dari Hasil Pengujian diatas, dapat disimpulkan bahwa tegangan baterai menurun 0,02 – 0,03 setiap 15 menit. Tegangan output dari inverter juga terlihat menurun tergantung pada lama penggunaan beban.

Tabel 4. Hasil Pengujian Baterai Discharging

Pukul	Tegangan Baterai	Tegangan AC Berbeban
14.00	13,46 Vdc	205 Vac
14.15	13,42 Vdc	199 Vac
14.30	13,39 Vdc	198 Vac
14.45	13,37 Vdc	198 Vac

Pada pengujian discharge, tegangan baterai menurun dari 13,46 Vdc menjadi 13,37 Vdc selama periode pengujian, sedangkan tegangan AC inverter menurun dari 205 Vac menjadi 198 Vac. Penurunan ini menunjukkan adanya hubungan antara kondisi tegangan baterai sebagai sumber DC dan kemampuan inverter dalam mempertahankan tegangan keluaran AC saat berbeban. Semakin lama beban disuplai, energi tersimpan pada baterai berkurang sehingga tegangan input inverter ikut menurun dan berdampak pada keluaran AC.

Meskipun terjadi penurunan tegangan, perubahan tegangan baterai relatif kecil selama periode pengujian, sehingga baterai masih mampu mempertahankan suplai energi dalam jangka pendek. Namun, tegangan AC berbeban yang berada pada kisaran 198–205 Vac menunjukkan adanya voltage drop yang perlu diperhatikan, terutama jika sistem digunakan untuk beban sensitif yang memerlukan tegangan mendekati 220 Vac. Temuan ini memberikan pelajaran desain bahwa pemilihan kapasitas inverter, kapasitas baterai, dan jenis beban harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi darurat. Untuk beban prioritas seperti lampu darurat, perangkat komunikasi, atau sensor pemantauan, performa ini masih dapat diterima, tetapi untuk beban dengan kebutuhan tegangan stabil lebih tinggi diperlukan optimasi lebih lanjut.

E. Hasil Tampilan IoT yang di Desain

Implementasi pemantauan jarak jauh dilakukan dengan merancang sebuah dashboard berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan platform Ubidots. Dashboard ini berfungsi sebagai antarmuka pengguna (User Interface) untuk memantau performa sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan status baterai secara real-time. Desain tata letak disusun secara ergonomis untuk memudahkan pembacaan data teknis yang meliputi arus, tegangan, daya, hingga kondisi suhu komponen utama. Visualisasi desain antarmuka sistem monitoring tersebut disajikan pada Gambar 14:



Gambar 14. Hasil Desain IoT pada Sistem

Implementasi dashboard IoT memberikan kontribusi penting dalam meningkatkan fungsi sistem dari sekadar sumber daya portabel menjadi sistem catu daya darurat yang dapat dipantau secara operasional. Parameter seperti tegangan, arus, daya, status charging-discharging, dan state of charge baterai memungkinkan operator mengetahui kondisi energi sistem secara real-time. Informasi ini penting karena pada kondisi darurat, keputusan operasional harus dibuat dengan cepat, misalnya menentukan apakah sistem masih mampu menyuplai beban, apakah baterai perlu diisi ulang, atau apakah beban tertentu harus diprioritaskan.

Dengan adanya monitoring IoT, evaluasi performa tidak hanya dilakukan setelah pengujian selesai, tetapi juga dapat dilakukan selama sistem beroperasi. Hal ini meningkatkan nilai ilmiah sistem karena data operasional dapat digunakan sebagai dasar analisis performa, deteksi anomali, dan pengembangan strategi manajemen beban. Oleh karena itu, kontribusi IoT dalam penelitian ini bukan hanya sebagai fitur visualisasi, tetapi sebagai bagian dari mekanisme emergency power management berbasis data.

Dari pengambilan data yang dilakukan menggunakan metode eksperimen pada alat PLTS OFF-Grid Portable parameter dan Skenario pengujian sistem ditampilkan pada tabel di bawah:

Tabel 5. Parameter dan Skenario Pengujian Sistem

Skenario pengujian	Parameter yang diukur	Interval pengukuran	Durasi/rentang waktu	Tujuan evaluasi
Output panel surya	Tegangan, arus, daya	1 jam	09.00–14.00 WIB	Menilai performa pembangkitan PV terhadap variasi waktu penyinaran
Output SCC	Tegangan keluaran SCC	1 jam	09.00–13.00 WIB	Menilai kestabilan tegangan pengisian baterai
Discharge baterai	Tegangan baterai DC, tegangan AC inverter	15 menit	45–60 menit	Menilai kemampuan baterai dan inverter saat menyuplai beban
Monitoring IoT	Tegangan, arus, daya, SoC, status charging-discharging	Real-time	Selama sistem beroperasi	Menilai efektivitas pemantauan jarak jauh
Sistem keseluruhan	Kestabilan suplai, portabilitas, respons monitoring	Berdasarkan skenario operasi	Uji laboratorium dan lapangan	Menilai kelayakan sistem sebagai catu daya darurat

Berdasarkan Tabel 5. parameter dan skenario pengujian disusun untuk memastikan bahwa evaluasi sistem dilakukan secara terukur, sistematis, dan dapat direplikasi. Setiap skenario pengujian merepresentasikan fungsi utama sistem PLTS off-grid portabel, mulai dari pembangkitan energi, pengisian baterai, pelepasan daya ke beban, pemantauan berbasis IoT, hingga evaluasi kelayakan sistem secara keseluruhan. Dengan penetapan parameter, interval, durasi, dan tujuan evaluasi yang jelas, hasil pengujian dapat digunakan sebagai dasar untuk menilai performa sistem sebagai catu daya darurat pada infrastruktur transportasi.

Penelitian selanjutnya diaplikasikan untuk pengujian jangka panjang pada kondisi lapangan yang lebih beragam, termasuk variasi cuaca, intensitas radiasi matahari, dan jenis beban prioritas pada infrastruktur transportasi. Pengembangan sistem juga dapat diarahkan pada penggunaan SCC tipe MPPT, optimasi kapasitas baterai dan inverter, analisis efisiensi energi, serta penerapan algoritma manajemen beban darurat. Selain itu, fitur IoT dapat ditingkatkan dengan prediksi kapasitas baterai, alarm dini gangguan sistem, data logging otomatis, dan integrasi dengan pusat monitoring transportasi agar sistem lebih adaptif, andal, dan siap diterapkan pada skenario emergency power management yang lebih luas.

IV. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, perhitungan, dan pengujian yang telah dilakukan terhadap modul trainer PLTS dengan Sistem Baterai Lithium Ion, maka dapat disimpulkan beberapa hal penting sebagai berikut:

1. Telah berhasil direalisasikan sebuah modul sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mandiri. Spesifikasi teknis sistem ini mengintegrasikan tiga unit panel surya dengan total kapasitas 300 Wp, baterai Litium 12V 100Ah, Solar Charge Controller (SCC) tipe Pulse Width Modulation (PWM) 20A, serta inverter daya 1000 Watt.
2. Arsitektur pengabelan (*wiring design*) diimplementasikan secara sistematis dengan mengutamakan aspek keamanan melalui integrasi indikator dan proteksi arus lebih berupa *Miniature Circuit Breaker* (MCB). Desain ini mampu merepresentasikan alur daya sistem surya riil yang memfasilitasi kebutuhan analisis parameter elektrikal dan pemahaman alur daya.
3. Kinerja panel surya menunjukkan efektivitas yang optimal dalam proses pengisian energi baterai. Parameter output panel menunjukkan kestabilan tegangan pada rentang 19 – 20,8 Vdc dengan capaian arus maksimum sebesar 4,6 A per unit panel. Performa puncak (*peak power*) teramati pada interval pukul 11.00 hingga 13.00 WIB, yang berkorelasi linear dengan puncak intensitas radiasi matahari.
4. Unit baterai Litium 12V 100Ah menunjukkan stabilitas suplai daya yang baik saat dibebani daya 250 Watt selama satu jam pengujian. Teramati adanya degradasi tegangan dari 13,46 Vdc ke 13,37 Vdc selama fase pelepasan beban (*discharging*). Sementara itu, pada fase pengisian (*charging*), tegangan

- meningkat dari 13,12 Vdc menjadi 13,61 Vdc dalam durasi 5 jam menggunakan energi dari panel surya, yang mengonfirmasi efisiensi baterai sebagai unit penyimpanan energi.
5. Inverter mampu meregulasi tegangan output AC dengan tingkat stabilitas yang memadai. Pada kondisi tanpa beban (*no-load*), tegangan output berada pada rentang 235 – 250 Vac. Namun, pada pengujian menggunakan beban induktif motor listrik 1 fasa sebesar 250 Watt, terjadi fenomena tegangan jatuh (*voltage drop*) yang terukur pada kisaran 205 Vac hingga 198 Vac selama satu jam operasional.
 6. Sistem pemantauan jarak jauh telah berhasil diimplementasikan menggunakan platform IoT Ubidots, yang memungkinkan pengawasan parameter elektrikal secara *real-time*. Berdasarkan pengujian, *dashboard* yang dirancang mampu menyajikan visualisasi data yang presisi mengenai daya pengisian (*charging*), status pelepasan beban (*discharging*), serta *State of Charge* (SoC) baterai. Integrasi fitur riwayat status dan sistem peringatan (*alarm*) pada antarmuka IoT ini terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi pengawasan operasional serta mempermudah proses identifikasi anomali teknis pada sistem PLTS secara nirkabel.

V. Daftar Pustaka

- [1] J. Stefany, G. Collazos, L. Milena, C. Ardila, C. Jaime, and F. Cardona, "Energy transition in sustainable transport: concepts, policies, and methodologies," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, no. 49, pp. 58669–58686, 2024.
- [2] F. Jelti, A. Allouhi, K. Anissa, and T. Aoul, "Transition Paths towards a Sustainable Transportation System: A Literature Review," pp. 1–25, 2023.
- [3] M. Sathurshan, A. Saja, J. Thamboo, M. Haraguchi, and S. Navaratnam, "Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review of Measurement Frameworks," 2022.
- [4] Y. Tanoto, G. Satia, and S. Frederick, "Clustering-based assessment of solar irradiation and temperature attributes for PV power generation site selection: A case of Indonesia's Java-Bali region," vol. 13, no. 2, pp. 351–361, 2024.
- [5] M. A. Case, P. Lodge, and H. Chung, "The Long-Term Usage of an Off-Grid Photovoltaic System with a Lithium-Ion Battery-Based Energy Storage System on High," 2024.
- [6] B. E. Demir, "applied sciences A New Low-Cost Internet of Things-Based Monitoring System Design for Stand-Alone Solar Photovoltaic Plant and Power Estimation," 2023.
- [7] M. T. Samsurizal, Aji and K. T. M., "Energi dan Kelistrikan: Jurnal Ilmiah Pemanfaatan Tenaga Surya Pada Photovoltaic Jenis Polycrystalline Untuk Catu Daya Tanaman Hidroponik Energi dan Kelistrikan: Jurnal Ilmiah," vol. 13, no. 1, pp. 58–66, 2021.
- [8] R. A. Harahap and E. Susanti, "PERANCANGAN PLTS 200 WP DENGAN SOLAR TRACKER," vol. 5, no. 2, pp. 323–332, 2022.
- [9] S. A. Putri, A. D. Farhani, A. S. Anjani, A. D. Saragih, and P. N. Nilam, "JOURNAL OF APPLIED MECHANICAL Transformasi Teknologi dalam Sel Surya Film Tipis Generasi Kedua," vol. 5, no. 1, pp. 34–42, 2025.
- [10] K. A. Widodo and N. P. Agustini, "ANALISIS EFISIENSI PENGISIAN BATERAI PADA PLTS OFF GRID DENGAN SISTEM SCC PWM DAN MPPT," vol. 09, pp. 130–144, 2025.
- [11] N. F. Wahidin, E. Yadie, and M. A. Putra, "Analisis Perbandingan Charging SCC Jenis PWM Dan MPPT Pada Automatic Handwasher with Workstation Bertenaga Surya Politeknik Negeri Samarinda," vol. 03, no. 01, pp. 12–20, 2022.
- [12] M. K. Usman, "ANALISIS INTENSITAS CAHAYA TERHADAP ENERGI LISTRIK YANG," vol. 9, no. 2, pp. 52–58, 2020.
- [13] E. Nasrullah, S. Alam, and A. Arif, "PERANCANGAN ALAT UKUR STATE OF CHARGE, DEPTH OF DISCHARGE DAN STATE OF HEALTH BATERAI LITHIUM-ION (LI-ION) DAN BATERAI NICKEL-METAL HYDRIDE (NI-MH) MENGGUNAKAN ARDUINO NANO," 1973.
- [14] M. Syahwil and N. Kadir, "Rancang Bangun Modul Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sistem Off-grid Sebagai Alat Penunjang Praktikum Di Laboratorium," vol. 3, no. 1, pp. 26–35, 2021.

- [15] R. Lastry, D. Damaris, B. Bangun, and D. Agave, “KAJIAN INVERTER PURE SINE WAVE TERHADAP BEBAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA KAPASITAS 100 WP,” vol. 04, no. 02, pp. 70–78, 2023.
- [16] B. Artono, D. N. Prakoso, T. Annisa, and W. Lestari, “Sistem Monitoring Mesin Pengaduk Adonan Roti Otomatis Berbasis Internet of Things (IoT),” vol. 4, no. 1, pp. 25–41, 2023.