

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Suplai Daya Hybrid

Sistem suplai daya hybrid merupakan konfigurasi sistem kelistrikan yang mengintegrasikan dua atau lebih sumber energi guna menjamin kontinuitas pasokan daya ke beban. Dalam aplikasinya, sistem ini menggabungkan keunggulan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi terbarukan dengan jaringan listrik konvensional seperti PLN melalui sistem grid connected. Penggunaan konfigurasi hybrid memungkinkan sistem untuk bekerja secara lebih andal, di mana PLTS dapat berfungsi sebagai sumber daya utama sekaligus cadangan (backup) ketika terjadi gangguan atau pemadaman pada jaringan utama. Secara teknis, sistem ini memerlukan komponen Grid Tie Inverter (GTI) untuk mensinkronisasi parameter arus searah (DC) dari modul surya dengan parameter arus bolak-balik (AC) pada jaringan eksisting agar distribusi daya berjalan stabil dan efisien (Nurjaman & Purnama, 2022).

2.1.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem pembangkit energi yang memanfaatkan energi terbarukan dari pancaran sinar matahari untuk menghasilkan listrik secara mandiri dan ramah lingkungan. Komponen utama dalam sistem PLTS ini adalah panel surya atau modul surya, yang berfungsi mengonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui prinsip efek fotovoltaiik.



Gambar 2. 1 Panel Surya

(Sumber: <https://sinarmonas.co.id/product/categories/panel-surya->)

Panel ini terbuat dari bahan semikonduktor, umumnya silikon, yang memiliki sambungan tipe-p dan tipe-n untuk menghasilkan aliran arus listrik saat terpapar radiasi matahari. Proses ini terjadi ketika energi foton dari cahaya matahari membebaskan elektron-elektron dalam bahan semikonduktor sehingga menimbulkan arus searah atau *Direct Current* (DC).

2.1.3 Solar Charge Controller (SCC)

Solar Charge Controller (SCC) merupakan perangkat elektronika daya yang berfungsi meregulasi arus listrik dari panel surya menuju baterai dan beban. Fungsi utama SCC adalah mengoptimalkan proses pengisian energi serta memproteksi unit penyimpanan (baterai) guna mencegah kerusakan akibat pengisian berlebih (*overcharging*) maupun pengosongan berlebih (*deep discharging*). Berdasarkan teknologi yang digunakan dalam meregulasi pengisian daya dari panel surya ke baterai, SCC secara umum diklasifikasikan menjadi dua jenis utama:

Pulse Width Modulation (PWM): Merupakan teknologi pengatur pengisian yang bekerja dengan cara menghubungkan panel surya secara langsung ke baterai melalui sakelar elektronik. Saat tegangan baterai mendekati titik penuh, pengontrol akan memutus dan menyambung arus secara cepat (modulasi lebar pulsa) untuk menjaga tegangan baterai pada level konstan. Namun, efisiensi tipe ini terbatas karena memaksa panel surya untuk beroperasi pada level tegangan baterai, sehingga potensi daya maksimal dari panel tidak terserap sepenuhnya.

Maximum Power Point Tracking (MPPT): Merupakan teknologi pengisian

yang lebih mutakhir dengan menggunakan sistem konversi daya DC-to-DC converter. Perangkat ini dilengkapi dengan algoritma cerdas yang mampu melacak titik daya maksimum (P_{max}) dari panel surya secara real-time, meskipun kondisi intensitas cahaya matahari dan suhu sel surya berubah-ubah. MPPT mampu menurunkan tegangan panel yang berlebih dan mengonversinya menjadi arus pengisian tambahan ke baterai, sehingga efisiensi daya yang dihasilkan dapat meningkat hingga 20% - 30% dibandingkan dengan tipe PWM.

Jenis *Solar Charge Controller* (SCC) yang digunakan dalam proyek akhir ini adalah tipe MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Pemilihan tipe ini didasarkan pada kemampuannya dalam melacak titik daya maksimum dari panel surya secara otomatis, sehingga efisiensi konversi energi menjadi jauh lebih tinggi dibandingkan tipe PWM. Hal ini sangat krusial bagi sistem supply daya, karena memastikan baterai tetap terisi secara maksimal untuk menjaga kontinuitas operasional sistem, terutama saat kondisi cuaca mendung atau intensitas cahaya matahari sedang tidak stabil.



Gambar 2. 2 Solar Charge Controller

(Sumber: <https://ftmm.unair.ac.id/optimalisasi-sistem-pembangkit-listrik-tenaga-surya-plts-dengan-maximum-power-point-tracking-mppt/>)

2.1.4 Power Supply

Power Supply atau Catu Daya adalah suatu perangkat elektronika yang berfungsi sebagai sumber tenaga atau energi listrik bagi perangkat lain. Secara prinsip, catu daya merupakan sebuah sistem atau rangkaian yang mengubah energi listrik dari satu bentuk ke bentuk energi listrik lainnya (misalnya dari AC ke DC) agar sesuai dengan karakteristik beban yang disuplai.



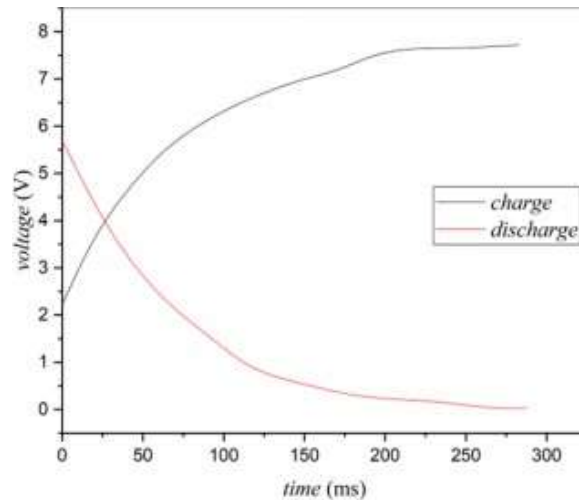
Gambar 2. 3 Power Supply 12V 10 A

(Sumber : https://www.machpower.it/ProductsResources/1581/VS-YGY-125000_it_sch.pdf?1637946300)

Pemilihan power supply dengan spesifikasi 12V 5 A dalam sistem ini didasarkan pada pertimbangan analisis kebutuhan total beban operasional agar sistem dapat berjalan secara optimal dan berkelanjutan. Kapasitas arus sebesar 10 Ampere dipilih untuk memastikan ketersediaan daya yang cukup saat seluruh fungsi sistem aktif secara bersamaan, terutama ketika proses pengolahan citra sedang berjalan. Dengan menyediakan arus yang lebih besar dari estimasi konsumsi beban riil, sistem memiliki ambang batas keamanan (safety margin) yang memadai untuk menangani lonjakan arus mendadak tanpa risiko kegagalan daya.

2.1.5 Karakteristik Discharge pada Power Supply

Discharge merupakan proses pelepasan energi listrik yang tersimpan di dalam komponen seperti kapasitor menuju beban, di mana kecepatannya harus dikontrol agar tegangan tetap stabil saat terjadi lonjakan arus mendadak atau pemutusan daya utama. Berdasarkan teori yang dipaparkan oleh Ashari (2001), proses ini sangat krusial dalam menentukan hold-up time, yaitu durasi waktu yang dibutuhkan tegangan output untuk tetap berada dalam ambang batas kerja fungsional setelah sumber daya utama terputus. Pada unit power supply, sistem kontrol digunakan untuk mengelola pelepasan energi muatan kapasitor guna menjaga stabilitas tegangan saat menghadapi beban non-linier.



Gambar 2. 4 Grafik Tegangan Discharge pada Kapasitor Terhadap Waktu
(Sumber : Amien et al., 2023)

Karakteristik discharge pada kapasitor ditandai dengan penurunan nilai tegangan (V_c) secara eksponensial saat komponen tidak lagi terhubung ke sumber daya. Berdasarkan pengujian pada kapasitor $220\mu\text{F}$, ditemukan bahwa tegangan menurun dari nilai 5,6V hingga mencapai 0,02V. Kecepatan waktu proses discharge sangat dipengaruhi oleh besarnya hambatan (R) dan nilai kapasitansi (C) dalam rangkaian. Peningkatan nilai hambatan dan kapasitansi secara signifikan akan memperpanjang durasi hold time tegangan terhadap beban. Penurunan tegangan ini juga disebabkan oleh sifat self-discharge yang terjadi di dalam kapasitor itu sendiri, yang mengakibatkan berkurangnya muatan secara bertahap seiring berjalannya waktu (Amien et al., 2023)

2.1.6 *Arduino Nano*

Arduino Nano merupakan sebuah papan pengembangan mikrokontroler berbasis chip ATmega328P yang memiliki fungsionalitas serupa dengan Arduino Uno namun dikemas dalam dimensi yang jauh lebih ringkas. Arduino Nano ini dirancang untuk penggunaan pada breadboard atau ruang panel yang terbatas, dengan tetap menyediakan performa yang mumpuni melalui 14 pin input/output digital serta 8 pin input analog. Keunggulan utama Arduino Nano terletak pada kemampuannya untuk beroperasi dengan konsumsi daya yang sangat rendah, sehingga menjadikannya unit kendali yang sangat efisien dalam sistem manajemen energi berbasis baterai atau tenaga surya.



Gambar 2. 5 Arduino Nano
(Sumber : <https://www.arduino.biz.id/2023/02/arduino-nano-pengertian-fungsi-dan-spesifikasinya.html>)

2.1.7 Modul Relay DC 5 V

Modul Relay DC 5 V merupakan sakelar elektronik yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Alat ini memungkinkan sirkuit dengan daya rendah (seperti mikrokontroler Arduino atau Raspberry Pi) untuk mengendalikan sirkuit dengan daya yang jauh lebih besar (seperti lampu 12V, alarm, atau motor). Penggunaan relay pada sistem ini bertujuan untuk menjaga kontinuitas aliran listrik pada beban, di mana pengujian menunjukkan bahwa relai mampu melakukan transisi peralihan dari PLN ke sumber cadangan dalam waktu jeda (switching time) sebesar 12,10 ms (Basil et al., 2021)



Gambar 2. 6 Modul Relay
(Sumber : <https://cncstorebandung.com/product/relay-1-channel-relay-5v-with-optocoupler-protection-for-arduino-nodemcu-high-quality/?add-to-cart=15521>)

2.1.8 Modul Voltage Divider

Modul pembagi tegangan atau voltage divider adalah suatu perangkat atau komponen elektronika yang berfungsi untuk mendeteksi, mengukur, dan mengubah besaran tegangan listrik dari suatu sumber daya menjadi sinyal yang dapat diproses oleh unit kendali seperti mikrokontroler. Modul ini bertindak sebagai alat penerjemah yang memungkinkan perangkat elektronik bertegangan rendah untuk memantau kondisi perangkat bertegangan tinggi secara aman.



Gambar 2. 7 Modul Voltage Divider
(Sumber : <https://store.ichibot.id/product/sensor-tegangan-dc-0-25v-voltage-sensor-divider-dc-0-25v/>)

Adapun Spesifikasi dari Voltage Divider ini adalah :

- 1 Tegangan Operasional : 5 VDC
- 2 Arus Operasional : < 15 mA
- 3 Waktu Respons : < 200 mS
- 4 Output Analog : 0 - 5 Volt DC
- 5 Rentang Deteksi Tegangan : 0,02445 Volt s/d 25 Volt DC
- 6 Rasio Pembagi Tegangan : 5 : 1
- 7 Resolusi Analog : 0,00489 Volt
- 8 Rentang Temperature : -25 derajat Celcius s/d 85 °C
- 9 Storage Temperature : -30 derajat Celcius s/d 90 °C
- 10 Berat : 4 g
- 11 Dimensi : 25 mm x 13 mm x 12 mm

2.1.9 LCD I2C

LCD I2C merupakan sebuah modul penampil karakter yang telah terintegrasi dengan rangkaian konverter serial untuk menyederhanakan sistem komunikasi data pada proyek elektronika. Secara umum, modul ini merupakan gabungan dari layar LCD standar (biasanya ukuran 16x2 atau 20x4) dengan modul *backpack* berbasis chip PCF8574 yang memanfaatkan protokol komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I2C). Keunggulan utama dari penggunaan teknologi I2C ini terletak pada efisiensi pengabelan, di mana sistem yang sebelumnya memerlukan 6 hingga 10 pin digital pada Arduino kini hanya membutuhkan 2 pin data saja, yaitu SDA (*Serial Data*) dan SCL (*Serial Clock*).



Gambar 2. 8 LCD I2C

(Sumber : https://thepihut.com/products/i2c-16x2-arduino-lcd-display-module?srltid=AfmBOoqLFIVzBXJhdFt1mSOyxIE4Z491_CABsuokN6sj54vaDojNqD5r)

2.1.10 Step Down Buck Converter 5- 40 v DC to 1.2 – 35 v DC

Step-down buck converter adalah perangkat elektronika daya yang berfungsi untuk menurunkan tegangan searah (DC) dari level yang lebih tinggi ke level yang lebih rendah dengan tingkat efisiensi energi yang sangat tinggi. buck converter bekerja dengan prinsip switching atau penyaklaran cepat menggunakan komponen induktor dan kapasitor untuk menyimpan serta melepaskan energi.



Gambar 2. 9 Step Down Duck Converter

(Sumber: (https://th.bing.com/th/id/OIP.OszB91uJWU_JH6i9bToCOwHaGp?w=207&h=186&c=7&r=0&o=7&dpr=1.3&pid=1.7&rm=3))

2.1.11 LTC 3780

Modul berbasis IC LTC3780 mampu meregulasi tegangan keluaran agar tetap presisi pada titik yang telah ditentukan, terlepas dari fluktuasi ekstrem pada tegangan sumber seperti saat terjadi penurunan kapasitas baterai atau lonjakan arus pengisian. Selain itu, modul ini juga dibekali dengan kemampuan memutuskan tegangan keluaran (cut-off) secara otomatis apabila ambang batas pengaturan telah tercapai.



Gambar 2. 10 Modul LTC 3780
(<https://components101.com/modules/ltc3780-dc-dc-step-up-module>)

2.1.12 Baterai LiFePO4

Lithium Iron Phosphate) adalah jenis baterai lithium-ion yang menggunakan Lithium Iron Phosphate sebagai bahan katoda dan elektroda karbon grafit dengan dukungan logam sebagai anoda. Teknologi ini dikenal sebagai salah satu inovasi paling aman dan stabil dalam keluarga baterai lithium untuk berbagai aplikasi daya. Baterai LiFePO4 memiliki tingkat keamanan yang sangat tinggi karena stabilitas termal dan kimianya yang baik, sehingga risiko meledak atau terbakar akibat overcharge atau korsleting jauh lebih rendah dibandingkan jenis lithium lainnya. Salah satu fitur unggulannya adalah siklus hidup (cycle life) yang sangat panjang, di mana baterai ini mampu melewati 2.000 hingga 5.000 siklus pengisian dan pengosongan sebelum kapasitasnya menurun signifikan.



Gambar 2. 11 Baterai LiFePO4
(Sumber :<https://down-id.img.susercontent.com/file/id-11134207-7r992-ltro5kvuhyjeaa.webp>)

2.1.13 Kebutuhan Daya Pada Sistem

Perhitungan daya dilakukan untuk menentukan total konsumsi energi dari seluruh komponen yang digunakan. Berdasarkan prinsip dasar elektronika, daya listrik (P) dihitung dengan mengalikan tegangan operasional (V) dengan kuat arus (I) yang mengalir pada beban. Berikut ini merupakan tabel perhitungan daya pada sistem berdasarkan komponen yang digunakan.

Tabel 2. 1 Penggunaan Daya Komponen pada Sistem

Komponen	Tegangan (V)	Arus Maks (I)	Daya (P)
Raspberry Pi 5	5 V	5 A	25 W
Kamera Web Cam	5 V	0,5 A	2,50 W
Arduino Nano	5 V	0,05 A	0,25 W
Modul Relay	5 V	0,07 A	0,35 W
LCD I2C	5 V	0,08 A	0,40 W
Modul Pembagi Tegangan (2)/Modul Voltage Divider	5 V	0,002 A	0,01 W
Solar Charge Controller (MPPT)	12 atau 24	0,02 A	0,24 W
Alarm 12 V DC	12	0,35 A	4,20 W
Pilot Lamp Kinogawa (2 Buah)	12 V	0,02 A	0,48 W
Total			33,43 W

Berdasarkan rincian penggunaan daya pada sistem, total daya operasional sistem mencapai 33,43 Watt. Beban yang cukup besar dikonsumsi oleh Raspi dan juga kamera. Pada saat kondisi standby konsumsi arus berkisar antara 0,7 A – 1 A karena tidak ada komputasi berat yang dilakukan. Saat algoritma image processing berjalan pada Raspberry Pi 5, CPU bekerja ekstra perhitungan matriks, GPU aktif mengolah data visual, dan Kamera USB menarik daya konstan untuk sensor gambarnya konsumsi arus melonjak hingga kisaran 2 – 2,5 A.

Total konsumsi energi harian (E) dihitung dengan mengalikan daya beban (P) dengan durasi operasional (t) sebagaimana persamaan berikut:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^n (P_i \times t_i)$$

E: Total konsumsi energi dalam satu hari (Watt-hour atau Wh)

P: Daya alat/komponen (Watt)

t: Durasi Operasional (Jam)

Maka, $E_{total} = 33,43 \text{ Watt} \times 24 \text{ Jam} = 802 \text{ W/hr}$

Berdasarkan perhitungan konsumsi daya sistem selama 24 jam di dapat sebesar 802 Wh. konsumsi energi pada sistem ini tidak hanya didasarkan pada beban puncak, tetapi juga mempertimbangkan beban rata-rata (average load) untuk merepresentasikan kondisi operasional yang terjadi di lapangan. Estimasi beban puncak sebesar 33,43 Watt diasumsikan terjadi secara periodik, yakni sekitar 2 hingga 3 kali per jam. Durasi tersebut merupakan waktu aktif sistem saat algoritma image processing berhasil mendeteksi keberadaan monyet, yang memicu Raspberry Pi 5 melakukan sistem algoritmanya. Setelah siklus deteksi dan respons selesai, sistem akan kembali ke kondisi standby dengan konsumsi daya yang jauh lebih rendah.

Di luar periode deteksi tersebut, sistem berada dalam kondisi standby dengan beban daya yang lebih rendah, daya yang di konsumsi Raspberry Pi 5 berkisar antara 4,52 Watt hingga 5,16 Watt. Dengan mengintegrasikan durasi beban puncak dan kondisi standby selama 24 jam menggunakan rumus daya sebelumnya, diperoleh total konsumsi energi harian sebesar 110,4 Wh hingga 125,6 Wh. Rentang angka ini menunjukkan efisiensi penggunaan energi yang signifikan dibandingkan perhitungan beban puncak kontinu.

2.2 Penelitian Terdahulu

Terdapat penelitian terdahulu lainnya yang digunakan sebagai acuan, yaitu jurnal berjudul “Sistem Deteksi Hama Babi menggunakan CNN (Convolutional Neural Network) berbasis Raspberry Pi” yang ditulis oleh Aditia Reza Nugraha, Fitri Utaminingrum, dan Hurriyatul Fitriyah. Penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem pengawasan keamanan perkebunan untuk mendeteksi hama babi liar yang sering merusak hasil panen dan membahayakan keselamatan petani.

dalam penelitian ini menggunakan Raspberry Pi 4 Model B sebagai unit pemroses utama yang dipadukan dengan webcam sebagai sensor untuk menangkap gambar secara real-time.

Untuk memberikan peringatan dini, sistem ini dilengkapi dengan buzzer yang berfungsi sebagai output notifikasi suara ketika hama terdeteksi. Implementasi sistem ini menggunakan metode Deep Learning dengan arsitektur YOLOv3 pada algoritma Convolutional Neural Network (CNN) untuk mengklasifikasikan objek antara babi liar dan manusia. Kekurangan pada penelitian ini adalah hanya mengandalkan sumber daya tunggal tanpa adanya mekanisme cadangan atau sistem hybrid, yang membuatnya sangat rentan terhadap kegagalan sistem apabila terjadi pemadaman sumber listrik secara tiba-tiba di area perkebunan (Nugraha et al., 2021)

Pada penelitian yang berjudul “Implementasi Sistem Pengusir Hama Monyet Ramah Lingkungan di Kelompok Tani Tunas Harapan Balikpapan” yang ditulis oleh Fitri Oktafiani, Ain Sahara, Ahmad Rosidi, Surya Saputra, Sigit Kusuma Wijaya, Ferdi Bagus Purnomo, dan Muhammad Rezha. Penelitian ini berfokus pada perlindungan terhadap area pertanian (Kebun tomat). Perlindungan terhadap area pertanian dilakukan melalui integrasi sensor gerak (PIR) dan sensor tekanan yang berfungsi memicu output berupa modul suara yang aktif serta pagar listrik bertegangan rendah yang bertujuan untuk mengusir mengusir hama monyet tanpa harus mengancam nyawa satwa tersebut, karena tegangan pada pagar listrik hanya 12V DC. Sistem ini menggunakan catu daya mandiri yaitu Panel Surya sebagai sumber energi listrik untuk kebutuhan operasional sistem. Kekurangan pada penelitian ini adalah penggunaan sumber daya tunggal (PLTS) yang memiliki resiko terjadi gangguan pada sistem apabila hari mendung dan ketika beban perangkat seperti pagar listrik dan modul suara bekerja secara kontinyu (Darmiyati et al., 2025)

Pada penelitian yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Kontrol Pembangkit Hybrid (PLN-Solar Cell) Berbasis Wemos D1 Mini Esp8266” yang ditulis oleh I Wayan Suriana dan I Wayan Sugarayasa. Penelitian ini menggunakan metode rancang bangun prototipe, memanfaatkan domain tegangan DC untuk sinkronisasi sumber energi. Implementasi dilakukan menggunakan

mikrokontroler Wemos D1 Mini ESP8266 yang mengintegrasikan sensor tegangan INA219, Real Time Clock (RTC), dan aplikasi Blynk sebagai antarmuka pemantauan berbasis IoT. Sistem saklar pada penelitian ini bekerja secara otomatis menggunakan modul relai yang dikendalikan oleh mikrokontroler berdasarkan ambang batas (threshold) tegangan baterai sebesar $>11,8$ Volt. Mekanisme saklar ini memungkinkan perpindahan suplai daya dari panel surya ke grid PLN dalam hitungan milidetik tanpa menyebabkan beban mengalami reboot atau mati mendadak, karena sinkronisasi dilakukan pada sisi arus searah (DC).

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan tersebut berhasil menciptakan sistem suplai daya mandiri yang stabil dan efisien untuk menjaga keberlangsungan daya pada beban (Suriana & Sugarayasa, 2023). Namun pada sistem monitoringnya, sangat bergantung pada sinyal internet, dan juga penetapan ambang batas switching pada tegangan 11,8 Volt berisiko mempercepat kerusakan baterai karena memaksa penggunaan energi hingga batas minimum secara berulang.

Penelitian “Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Antara PLN dan PLTS” yang ditulis oleh Benediktus Boranpil Juen, I Wayan Suriana, I Wayan Sukadana, dan I Wayan Sugara Yasa. Penelitian berfokus pada pengembangan sistem suplai daya mandiri yang menggabungkan sumber energi terbarukan dari panel surya dengan jaringan listrik PLN. Objek penelitian yang digunakan adalah prototipe sistem pembangkit listrik hybrid dengan kapasitas beban berupa satu buah lampu 5 Watt. sistem ini dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Nano sebagai pusat pemroses data. Penelitian ini menggunakan Sensor Tegangan INA219 yang berfungsi membaca nilai tegangan terminal aki dan panel komunikasi i2c.

Implementasi sistem kontrol dilakukan dengan menggunakan modul relai yang bekerja sebagai saklar pemindah otomatis (*automatic transfer switch*). Logika perpindahan daya didasarkan pada ambang batas tegangan baterai (aki) 12V 32Ah, sistem akan memindahkan beban dari baterai ke PLN jika tegangan terdeteksi habis pada angka 11,2 Volt dan akan berpindah kembali ke baterai saat tegangan terisi cukup pada angka 12,0 Volt. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses sinkronisasi dan perpindahan sumber daya ini memerlukan waktu sekitar 1

detik. Untuk penyajian data, seluruh informasi parameter tegangan aki dan panel surya ditampilkan secara real-time melalui media LCD 16x2 yang terpasang pada boks panel (Juen et al., 2020)

Selanjutnya pada penelitian “State of Charge Estimation of LiFePO₄ in Various Temperature Scenarios” yang ditulis oleh Mingzhu Wang, Guan Wang, Zhanlong Xiao, Yuedong Sun, dan Yuejiu Zheng. Dalam penelitian ini, penulis menggunakan 1 sel baterai LiFePO₄ sebagai objek uji utama untuk menganalisis perilaku tegangan pada berbagai kondisi lingkungan. Namun, karena sistem yang dirancang dalam proposal ini berbasis 12V, maka hasil penelitian tersebut perlu dikonversikan ke dalam susunan 4 sel seri (4S). Berdasarkan hasil konversi tersebut, indikator kapasitas baterai dianggap penuh (100%) saat menyentuh tegangan 14,6 V, yang merupakan akumulasi dari tegangan 3,65 V/sel. Pada tingkat kapasitas 80%, tegangan sistem berada di angka 13,28 V (3,32 V/sel), untuk parameter kapasitas 70%, tegangan sistem akan menunjukkan nilai sebesar 13,20 V (3,30 V/sel). sedangkan untuk titik tengah kapasitas atau 50%, tegangan menunjukkan nilai 12,96 V (3,24 V/sel) (Wang et al., 2023)

Keunggulan dari sistem yang dirancang dalam proyek akhir ini adalah penerapan mekanisme suplai daya hybrid yang mengintegrasikan panel surya (solar cell) sebagai sumber energi terbarukan, sehingga perangkat mampu beroperasi secara mandiri dan berkelanjutan. Selain itu desain alat ini di buat agar dapat di letakkan di luar ruangan (outdoor) yang didukung dengan penggunaan karet seal pada panel box, serta desain kaki/base di buat lebar agar menjaga stabilitas terhadap cuaca buruk. Alat ini dilengkapi dengan sistem kontrol yang mampu melakukan validasi ketersediaan tegangan pada input daya PLN yang dilakukan oleh Modul Pembagi Tegangan sebelum melakukan proses perpindahan sumber (switching). Penyajian data dilakukan secara lokal, di mana persentase baterai maupun tegangan dapat dipantau secara langsung di lokasi melalui tampilan LCD . Hal ini menjamin sistem tetap bekerja optimal dan informatif dalam segala kondisi cuaca tanpa bergantung pada kondisi internet.