

PERANCANGAN POWER STATION BERBASIS PANEL SURYA SEBAGAI POWER SUPPLY MICROGREEN INCUBATOR

Harly Amirul Haq¹, Dody Wahjudi², Tri Watiningsih³, Eko Sudaryanto⁴

^{1,2,3,4}Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Wijayakusuma Purwokerto

Email: dodywahjudi@unwiku.ac.id

Abstrak

Penelitian berjudul "Perancangan Power Station Berbasis Panel Surya sebagai Power Supply Microgreen Incubator" bertujuan merancang sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) untuk inkubator microgreen. Sistem ini terdiri dari panel surya 100 Wp, baterai LiFePO4 12V 30Ah, dan solar charge controller (SCC) tipe PWM. Untuk meningkatkan daya, sistem dilengkapi dengan Dual Axis Solar Tracker berbasis mikrokontroler Arduino Nano dan sistem monitoring menggunakan mikrokontroler ESP32 serta berbagai sensor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa solar tracker meningkatkan rata-rata daya input panel surya menjadi 104,51 W dengan intensitas cahaya 205,25 W/m². Energi maksimum harian yang diperoleh adalah 153,45 Wh, dengan efisiensi panel surya 16,45%, SCC 99,1%, dan baterai 9,20%. Total efisiensi sistem PLTS tercatat 1,31%, tergolong rendah akibat keterbatasan kapasitas baterai. Meskipun demikian, sistem mampu menyuplai kebutuhan daya harian inkubator sebesar 253,45 Wh secara aman dan berkelanjutan.

Keywords— Pembangkit Listrik Tenaga Surya, Solar Tracker Dual Axis, Sensor, Motor DC

Abstract

The research titled "Design of a Solar Panel-Based Power Station for a Microgreen Incubator Power Supply" aimed to design a solar power system for a microgreen incubator. The system comprises a 100 Wp solar panel, a 12V 30Ah LiFePO4 battery, and a PWM-type solar charge controller (SCC). To enhance power output, the system incorporates a dual-axis solar tracker based on an Arduino Nano microcontroller and a monitoring system utilizing an ESP32 microcontroller and various sensors. The results indicate that the solar tracker increased the average solar panel input power to 104.51 W at a light intensity of 205.25 W/m². The maximum daily energy yield was 153.45 Wh, with efficiencies of 16.45% for the solar panel, 99.1% for the SCC, and 9.20% for the battery. The total system efficiency was recorded at 1.31%, a figure considered low due to battery capacity limitations. Nevertheless, the system is capable of safely and sustainably meeting the incubator's daily power requirement of 253.45 Wh.

Keywords: Solar Photovoltaic System, Microgreen Incubator, Dual-Axis Solar Tracker, LiFePO₄ Battery, Solar Charge Controller, ESP32

1. PENDAHULUAN

Krisis energi di seluruh dunia dan tingkat emisi gas rumah kaca yang meningkat telah mendorong pengembangan teknologi energi terbarukan. Terutama di negara-negara dengan potensi energi matahari yang besar seperti Indonesia. Dengan menggunakan sel surya, yang dapat mengubah menjadi energi listrik dan dikenal sebagai pembangkit listrik tenaga surya (PLTS).

Dengan menggunakan pembangkit listrik tenaga surya dapat ikut serta dalam mengurangi emisi gas rumah kaca. Namun, efisiensi penggunaan panel surya sering kali terpengaruh oleh posisi matahari yang berubah-ubah sepanjang

hari, penerapan *solar tracker dual-axis* yang dapat mengarahkan panel surya ke posisi optimal matahari sangat penting untuk meningkatkan persentase produksi sinar matahari yang dapat ditangkap oleh sel surya sebanyak 15 hingga 20 persen.

Sektor pertanian mengalami transformasi dengan meningkatnya pembudidaya tanaman *microgreen*. Tanaman ini merupakan jenis sayuran yang memiliki kandungan nutrisi yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis sayuran dewasa pada umumnya. Untuk melakukan penanaman dibutuhkan *incubator* khusus yang terdapat sistem pengairan, pengatur suhu dan *led grow light*. Untuk mendapatkan hasil yang maksimal, diperlukan lingkungan yang terkontrol dan sumber energi yang konsisten. Di sinilah peran *power station* berbasis panel surya dan *solar tracker* sebagai sumber energi yang relevan dan dapat diandalkan.

Kemajuan teknologi seperti *Internet of Things (IoT)* memberikan peluang untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan sistem. Dengan menggunakan sensor dan sistem monitoring berbasis *IoT*, petani dapat memantau kondisi inkubator secara *real-time*. Hal ini meliputi pemantauan suhu, kelembapan, dan kinerja sistem solar secara efisien. Dengan menerapkan teknologi ini tidak hanya memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih baik, tetapi juga dapat membantu dalam meningkatkan produktivitas dan profitabilitas budidaya *microgreen*. Tujuan Dibuatnya Alat Ini Antara Lain:

1. Merancang dan membangun sistem power station berbasis panel surya yang dilengkapi dengan solar tracker untuk menyediakan sumber energi yang efisien dan berkelanjutan bagi *microgreen incubator*.
2. Mengembangkan sistem monitoring berbasis *IoT* untuk memantau kondisi *microgreen incubator* secara *real-time*, termasuk suhu, kelembapan, dan kinerja sistem solar, guna mendukung pengelolaan yang lebih efektif.
3. Menganalisis efisiensi penggunaan panel surya dan pengaruh sistem solar tracker terhadap peningkatan kinerja *microgreen incubator*.

2. STUDI PUSTAKA / LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian pertama dilakukan oleh Muhammad Baharuddin Arief (2024) dengan judul “Desain Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Off-grid* dan Monitoring Berbasis *Node-Red*”. Penelitian ini membahas desain sistem pembangkit listrik tenaga surya *off-grid* untuk memenuhi kebutuhan listrik di kantin. Sistem ini mengintegrasikan teknologi monitoring berbasis *Node-Red* untuk memantau parameter seperti tegangan, arus, dan suhu.

Penelitian kedua dilakukan oleh J. Samuel dan Dr. B. Rajagopal (2021) dengan judul “*IoT Based Solar Panel Monitoring and Control*”. Penelitian ini fokus pada penerapan teknologi *IoT* untuk memantau kinerja panel surya secara *real-time*. Sistem menggunakan *NodeMCU ESP8266* untuk membaca parameter seperti tegangan, arus, suhu, dan kelembapan, serta mengirimkan data ke *cloud* untuk pemantauan jarak jauh.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mengubah energi matahari menjadi listrik menggunakan panel surya. Sistem PLTS terbagi dua jenis, Grid-Connected (On-Grid) yang terhubung ke jaringan PLN untuk menghasilkan listrik ramah lingkungan, membantu mengurangi tagihan listrik dan Stand Alone (Off-Grid) yang beroperasi mandiri untuk memenuhi kebutuhan listrik, sering digunakan di daerah terpencil yang belum terjangkau listrik PLN.

2.3 Panel Surya

Panel surya terdiri dari sel surya yang mampu mengubah sinar matahari menjadi listrik arus searah (*DC*). Matahari, sumber cahaya paling kuat yang energinya dapat ditangkap dan dimanaatkan, umumnya disebut sebagai surya atau “*sol*”, sementara sel *fotovoltaik* dapat diartikan sebagai “cahaya-listrik”.

2.4 Solar Charger Controller

SCC (*Sollar Charger Controller*) adalah rangkaian elektronika yang berperan mengatur arus *DC* menuju baterai serta distribusi daya dari baterai ke beban. Selain itu, SCC juga berfungsi membatasi arus agar tidak terjadi kelebihan pengisian baterai dan lonjakan tegangan yang berasal dari panel surya.

2.5 Baterai

Baterai memainkan peran penting dalam sistem energi surya yang berfungsi sebagai unit penyimpanan energi dalam sistem tenaga surya, menyediakan listrik pada malam hari atau saat intensitas sinar matahari rendah untuk menjaga pasokan energi yang stabil.

2.6 MCB (*Miniature Circuit Breaker*)

MCB (*Miniature Circuit Breaker*) adalah komponen sistem listrik yang berfungsi sebagai perangkat pelindung dalam instalasi listrik saat terjadi kelebihan beban atau korsleting.

2.7 Kebutuhan Energi

Pembangunan sistem PLTS yang optimal memerlukan perhitungan kebutuhan energi harian, jumlah panel surya, dan jumlah baterai dengan menggunakan Persamaan 1–5.

1. Menentukan Total Daya Per Hari

$$P_{Beban1} = \text{Daya beban} \times \text{Waktu operasi} \quad \text{Pers (1)}$$

$$P_{Beban2} = \text{Daya beban} \times \text{Waktu operasi} \quad \text{Pers (2)}$$

$$P_{TOTAL\ BEBAN} = P_{Beban1} + P_{Beban2} + \dots + P_{Beban5} \quad \text{Pers (3)}$$

2. Menentukan Jumlah Solar Panel

$$\text{Jumlah PV} = \text{Total Daya Harian} \times \text{Charging Effective} \quad \text{Pers (4)}$$

3. Menentukan Jumlah Baterai

$$\begin{aligned} &\text{Jumlah Baterai} && \text{Pers} \\ &= \frac{\text{Total Daya Harian}}{\text{Voltase Baterai} \times \text{Arus Baterai}} && (5) \end{aligned}$$

2.8 Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Efisiensi adalah parameter kunci dalam sistem PLTS, menunjukkan kemampuan sistem mengubah energi matahari menjadi listrik yang dapat digunakan. Kinerja keseluruhan sistem dipengaruhi oleh karakteristik dan tingkat efisiensi dari masing-masing komponen, yang dapat dihitung menggunakan Persamaan 6 hingga 15

1. Luas Panel Surya dan Iradiasi

$$A = p \times l \quad \text{Pers (6)}$$

Keterangan:

A = Luas Panel Surya

p = Panjang Panel Surya

l = Lebar Panel Surya

$$I_r = Lux \times 0,0079 \quad \text{Pers (7)}$$

Keterangan:

I_r = Iradiasi

Lux = Intensitas Cahaya

0,0079 = Faktor konversi rata-rata dari lux

2. Efisiensi Panel Surya

$$P_{in} = I_r \times A \quad \text{Pers (8)}$$

Keterangan:

P_{in} = Daya Input Panel Surya

I_r = Iradiasi

A = Luas Permukaan Panel Surya

$$P_{out} = V \times I \quad \text{Pers (9)}$$

Keterangan:

P_{out} = Daya Output Panel Surya

V = Tegangan Panel Surya

I = Arus Panel Surya

$$\eta_{PV} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \quad \text{Pers (10)}$$

Keterangan:

η_{PV} = Efisiensi Panel Surya

P_{out} = Daya Output Panel Surya

P_{in} = Daya Input Panel Surya

3. Efisiensi Solar Charge Controller

$$P_{out} SCC = V \times I \quad \text{Pers (11)}$$

Keterangan:

$P_{out} SCC$ = Daya Output *Solar Charge Controller*

V = Tegangan

I = Arus

$$\eta_{SCC} = \frac{P_{out} SCC}{P_{in} SCC} \times 100 \% \quad \text{Pers (12)}$$

Keterangan:

η_{SCC} = Efisiensi *Solar Charge Controller*

$P_{out} SCC$ = Daya Output *Solar Charge Controller*

$P_{in} SCC$ = Daya Input *Solar Charge Controller*

4. Efisiensi Baterai

$$P_{in} \text{Baterai} = P_{out} SCC \times \text{Charging Effective} \quad \text{Pers (3)}$$

Keterangan:

$P_{in} \text{Baterai}$ = Daya Input Baterai

$P_{out} SCC$ = Daya Output *Solar Charge Controller*

Charging Effective = Waktu Pengisian

$$\eta_{Baterai} = \frac{P_{out} \text{Baterai}}{P_{in} \text{Baterai}} \times 100 \% \quad \text{Pers (14)}$$

Keterangan:

$\eta_{Baterai}$ = Efisiensi Baterai

$P_{out} \text{Baterai}$ = Daya Output Baterai

$P_{in} \text{Baterai}$ = Daya Input Baterai

5. Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya

$$\eta_{PLTS} = \eta_{PV} \times \eta_{SCC} \times \eta_{Baterai} \quad \text{Pers (5)}$$

Keterangan:

η_{PLTS} = Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya

η_{PV} = Efisiensi Panel Surya

η_{SCC} = Efisiensi *Solar Charge Controller*

$\eta_{Baterai}$ = Efisiensi Baterai

2.9 Pengujian Error Sensor

Pembacaan sensor sering berbeda dari kondisi aktual akibat keterbatasan sensor, gangguan lingkungan, atau kesalahan data. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan error terhadap nilai acuan menggunakan Persamaan 16.

$$\text{Error Sensor (\%)} = \frac{| \text{Alat Ukur} - \text{Sensor} |}{\text{Alat Ukur}} \times 100 \quad \text{Pers (16)}$$

Keterangan:

Error Sensor (%) = Persentase *Error* Pembacaan Sensor

Alat Ukur = Nilai Pembacaan Dari Alat Ukur

Sensor = Nilai Pembacaan Dari Sensor

Nilai rata-rata *Error* dapat dihitung menggunakan Persamaan 17 berikut.

$$\begin{aligned} & \text{Rata - rata } error \% & \text{Pers (17)} \\ & = \frac{n(Error\%)}{n(Pengujian)} \end{aligned}$$

Keterangan:

Rata-rata Error (%) = Persentase Rata-rata *Error* Pembacaan Sensor

$n(Error\%)$ = Total Pembacaan *Error* Sensor

$n(Pengujian)$ = Total Pengujian Sensor

Akurasi Pembacaan (%) dapat dihitung menggunakan Persamaan 18 berikut.

$$\begin{aligned} & \text{Akurasi \%} & \text{Pers (18)} \\ & = 100 - \text{Error Pembacaan} \end{aligned}$$

Keterangan:

Akurasi (%) = Persentase Akurasi Pembacaan Sensor

100 = Nilai Persentase Penuh

Error Pembacaan = Hasil Pembacaan *Error* Sensor

Nilai rata-rata akurasi dapat dihitung menggunakan Persamaan 19 berikut.

$$\begin{aligned} & \text{Rata - rata akurasi \%} & \text{Pers (19)} \\ & = \frac{n(Akurasi\%)}{n(Pengujian)} \end{aligned}$$

Keterangan:

Rata-rata akurasi (%) = Persentase Rata-rata Akurasi Pembacaan Sensor

$n(Akurasi\%)$ = Total Akurasi Pembacaan Sensor

$n(Pengujian)$ = Total Pengujian Sensor

2.10 Solar Tracker

Solar Tracker memastikan panel surya tetap berada pada sudut yang tepat terhadap arah sinar matahari sepanjang hari, dengan memantau lintasan matahari agar panel dapat menyesuaikan posisi secara otomatis sesuai dengan arah cahaya. Akibatnya, teknologi ini meningkatkan efisiensi penerimaan energi[15].

2.11 Pergerakan Matahari Dan Penentuan Sudut Panel

Untuk meningkatkan efisiensi energi panel surya, perhitungan posisi matahari secara akurat sangat penting. Berikut beberapa parameter penting diantaranya:

1. Sudut Deklinasi (δ)

Sudut Deklinasi (δ) bervariasi secara musiman, disebabkan oleh kemiringan sumbu rotasi bumi dan revolusi bumi mengelilingi matahari. Karena bumi miring $23,45^\circ$, sudut ini berkisar antara $+23,45^\circ$ hingga $-23,45^\circ$, dan hanya bernilai 0° saat terjadi ekuinoks (musim semi dan gugur)[16]. Sudut deklinasi dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.20.

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (n - 81)\right) \quad \text{Pers (2.20)}$$

Keterangan:

δ = Sudut Deklinasi dalam derajat

n = Hari ke- n dalam tahun (misalnya, 1 Januari = 1)

$\frac{360}{365}$ = Mengubah Jumlah Hari Dalam Tahun

81 = Hari Ke-81 Dalam Tahun, Yaitu Sekitar 22 Maret, Yang Merupakan Titik Balik Musim Semi (*Spring Equinox*).

2. Sudut Jam Matahari (H)

Sudut jam matahari menunjukkan posisi matahari relatif terhadap posisi tertinggi. Sudut ini digunakan untuk menentukan waktu dalam perhitungan posisi matahari. Dalam hal ini, dapat langsung menggunakan *Hour*

Angle (H) tanpa menghitung waktu matahari lokal yang biasanya dipengaruhi oleh faktor bujur geografis dan koreksi *Equation of Time*[16].

Sudut jam matahari dapat dihitung menggunakan Persamaan 21.

$$HRA = 15^{\circ} \times (LST - 12) \quad \text{Pers (21)}$$

Keterangan:

HRA = Hour Angle yang menunjukkan waktu relative terhadap Tengah hari matahari (0° pada Tengah hari)

LST = Waktu Lokal Matahari

15° = Perputaran Bumi Setiap Jamnya

12 = Tengah Hari Waktu Lokal Matahari

3. Sudut *Elevasi* (El)

Sudut *elevasi* adalah sudut antara garis *horizontal* dan arah sinar matahari yang datang. Semakin tinggi posisi matahari maka semakin besar nilai sudut *elevasi*. Sudut ini penting untuk menggerakkan panel surya ke arah yang lebih *vertical*, sehingga dapat menangkap cahaya matahari secara maksimal. Sudut *elevasi* dapat dihitung menggunakan persamaan 22.

$$El = \sin^{-1}[\sin \varphi \times \sin \delta + \cos \delta \times \cos \delta \times \cos H] \quad \text{Pers (22)}$$

Keterangan:

El = Sudut *Elevasi* dalam derajat

φ = Lintang lokasi (latitud)

δ = Sudut Deklinasi dalam derajat

HRA = Sudut Jam dalam derajat

4. Sudut *Azimut*

Sudut *azimut* adalah sudut mendatar antara utara dan proyeksi posisi matahari pada bidang *horizontal*. Sudut ini digunakan untuk mengatur rotasi *horizontal* pada panel surya, memastikan bahwa panel selalu menghadap matahari sepanjang hari. Perhitungan sudut *azimut* memungkinkan orientasi panel surya mengikuti pergerakan matahari dari timur ke barat[16]. Sudut *azimut* dapat dihitung menggunakan persamaan 23.

$$Az = \cos^{-1}[\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos H] \quad \text{Pers (23)}$$

Keterangan:

Az = Sudut *azimut* dalam derajat

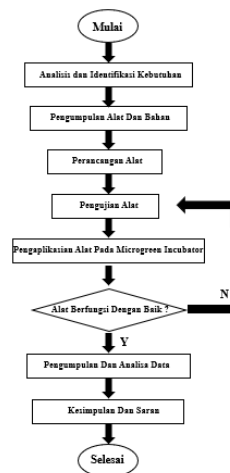
δ (delta) = Deklinasi matahari (derajat)

φ (phi) = Lintang tempat pengamatan (derajat)

HRA = Hour Angle atau sudut waktu (derajat)

3. METODE

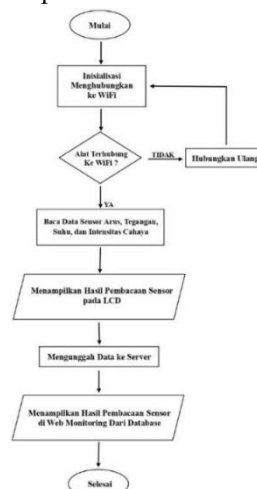
3.1 Tahapan Penelitian



Gambar 1 Tahapan Penelitian

3.2 Flowchart Sistem

Flowchart atau Diagram Alir dapat digunakan untuk suatu gambaran atau konsep sistem yang akan dibuat sehingga dapat terstruktur secara jelas. Diagram alir juga digunakan agar mempermudah penulis dalam perencanaan, diagram alir sistem dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Flowchart Sistem

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan penelitian merupakan komponen yang penting dalam proses pembuatan sistem. Komponen-komponen tersebut mencakup berbagai perangkat yang diperlukan untuk mengimplementasikan sistem tersebut. Berikut alat dan bahan yang digunakan.

1. Komponen Power Station

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| a. Panel Surya | f. Voltage Sensor 0-25V |
| b. Solar charge controller | g. Current Sensor INA219 |
| c. MCB | h. Temperature Sensor |

- d. Baterai *LIFEPO4*
- e. NodeMCU ESP32
- 2. Komponen Solar Tracker
 - a. Motor *DC*
 - b. Arduino Nano
- 3. Alat Pendukung
 - a. Solder
 - b. Tinol
 - c. Tang
 - d. Multimeter
 - i. *Lux* Sensor
 - j. *LCD With I2C*
 - c. *BTS7960*
 - d. *RTC*
 - e. Gunting
 - f. Gerinda
 - g. Bor
 - h. Obeng

3.4 Perancangan Alat

1. Desain *Hardware*

Dalam desain *hardware* terdapat dua tahap yaitu desain *box power station* pada Gambar 3 dan mekanik *solar tracker* pada Gambar 4.



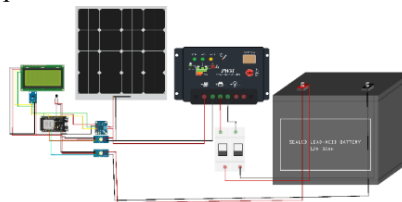
Gambar 3 Desain Box Power Station



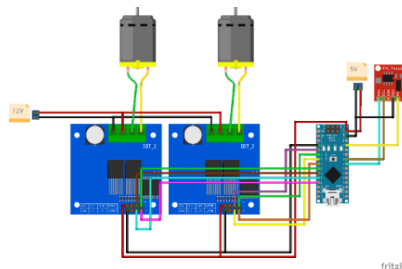
Gambar 4 Desain Dual Axis Solar Tracker

2. Desain Rangkaian Elektronik Sistem

Pembuatan wiring pada alat disesuaikan dengan kebutuhan seperti untuk input, proses, dan output. Pada Gambar 5 merupakan rangkaian Power Station, sensor tegangan, sensor arus, sensor suhu dan sensor lux sebagai input. Esp32 berperan sebagai pemroses dan LCD sebagai output. Kemudian Gambar 6 merupakan rangkaian Solar Tracker Dual Axis, modul RTC sebagai input, Arduino Nano sebagai pemroses dan Driver BH7960 dan Motor DC sebagai output.



Gambar 5 Rangkaian Elektronik Power Station



Gambar 6 Rangkaian Elektronik Dual Axis Solar Tracker

3.5 Desain Schematic PCB

Schematic sangat diperlukan dalam rangkaian elektronik, tujuannya agar instalasi komponen lebih mudah dan terstruktur. Nantinya dari *schematic* tersebut dapat dicetak pada *Printed Circuit Board (PCB)*.

3.6 Perhitungan Kebutuhan Energi

Hal yang perlu diperhatikan dalam membangun sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya yaitu menentukan kebutuhan energi agar dapat menentukan konfigurasi sistem yang tepat. Berikut rumus yang dapat digunakan:

1. Menentukan Total Daya Per Hari

$$P_{Beban1} = \text{Daya beban} \times \text{Waktu beroperasi}$$

$$P_{Beban2} = \text{Daya beban} \times \text{Waktu beroperasi}$$

$$P_{TOTAL BEBAN} = P_{Beban1} + P_{Beban2} + \dots + P_{Beban5}$$

2. Menentukan Jumlah Solar Panel

$$\text{Jumlah PV} = \frac{\text{Total Daya Harian}}{\text{Charging Effective}}$$

3. Menentukan Jumlah Baterai

$$\text{Jumlah Baterai} = \frac{\text{Total Daya Harian}}{\text{Voltase Baterai} \times \text{Arus Baterai}}$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Menentukan Kebutuhan Energi

Dalam menentukan total kebutuhan energi langkah pertama yang perlu dilakukan yaitu menghitung kebutuhan daya berdasarkan kebutuhan peralatan elektronika yang digunakan dengan perhitungan jumlah unit yang dibutuhkan dikalikan dengan daya per unit kemudian dikalikan lama waktu beroperasi.

Tabel 1 Daftar Komponen

Komponen	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)	Quantity	Jam	Daya Harian (Wh)
NodeMCU ESP32	0,1	4,7	0,47	2	24	22,56
BH1750	0,04	4,9	0,19	2	24	9,4
DS18B20	0,08	3,3	0,26	1	24	6,33
LCD	0,11	4,9	0,53	2	24	25,87
FAN	0,12	9,9	1,18	1	6	7,12
Grow LED	1,55	6,7	10,38	1	6	62,31
Moisture	0,09	3,3	0,29	2	24	14,25
Voltage Divider	0,02	4,8	0,09	2	24	4,6
INA219	0,04	3,3	0,13	1	24	3,16
TOTAL	2,15	45,8	13,57	14	-	155,6

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Untuk menentukan kebutuhan konsumsi energi setiap komponen dapat menggunakan Persamaan 1.

1. Menentukan Total Daya Per Hari

$$P_{Beban} = \text{Daya beban} \times \text{Waktu beroperasi}$$

$$P_{ESP32} = 1,2W \times 24 \text{ Jam} = 57,6 \text{ Wh}$$

Jadi total daya harian yang dibutuhkan sebanyak 155,6 Wh. Untuk data lengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.1.

2. Menentukan Jumlah Panel Surya

$$\text{Jumlah PV} = \frac{\text{Total Daya Harian}}{\text{Charging Effective}}$$

$$\text{Jumlah PV} = \frac{155,6}{5} = 31,12$$

Misalkan Misalkan menggunakan panel surya dengan nilai 100 WP, maka dibutuhkan 31,12 W : 100 Wp = 0,311 Pcs solar panel atau dibulatkan menjadi 1 solar panel.

3. Menentukan Jumlah Baterai

Sistem ini menggunakan baterai dengan nilai 12V 30Ah, maka:

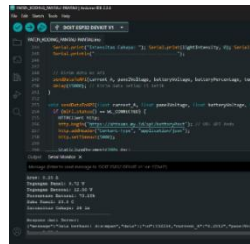
$$\text{Jumlah Baterai} = \frac{\text{Total Daya Harian}}{\text{Voltase Baterai} \times \text{Arus Baterai}}$$

$$\text{Jumlah Baterai} = \frac{155,6 \text{ Wh}}{12 \text{ V} \times 30 \text{ Ah}} = \frac{155,6 \text{ Wh}}{360 \text{ Wh}} = 0,43 \text{ Pcs}$$

Jadi baterai dengan nilai 12V 30Ah yang dibutuhkan sebanyak 0,43 Pcs jika dibulatkan menjadi 1 Pcs baterai.

4.2 Pengujian Program

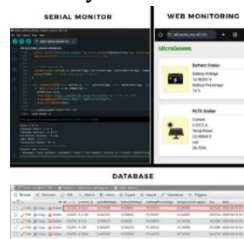
Pengujian dilakuka untuk memastikan bahwa kode atau program yang telah dibuat berfungsi sesuai dengan perencanaan. Pengujian *software* menggunakan *Arduino IDE* untuk membaca data dari sensor dan ditampilkan melalui serial monitor.



Gambar 7 Pengujian Program di Arduino IDE

4.3 Pengujian ESP32

Pengujian ini dilakukan dengan cara menghubungkan semua sensor ke *pin out ESP32*. Data hasil pembacaan dari sensor, nantinya akan tersimpan ke dalam *database* dengan format, *current_A* (Pembacaan arus dari sensor *INA219*), *voltagePanel* (Pembacaan tegangan panel surya dari sensor tegangan pertama), *voltageBattery* (Pembacaan tegangan baterai dari sensor tegangan kedua), *temperaturePanel* (Pembacaan suhu panel surya dari sensor *temperature*), *lux* (Pembacaan intensitas cahaya dari sensor *BH1750*).



Gambar 8 Pengujian Keseluruhan Program

Gambar 4.2 menunjukkan data yang terbaca di serial monitor, dikirim ke database, lalu ditampilkan pada web dan LCD untuk pemantauan. Jika sensor gagal membaca, data tidak terkirim dan muncul notifikasi “Error Dalam Mengirim Data -1”.

4.4 Pengujian Sensor Arus

Pengujian dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor dan clamp ampere untuk mengetahui nilai error sebagai dasar kalibrasi INA219. Tabel 2 menampilkan hasil pengukuran setelah kalibrasi.

Tabel 2 Hasil Pengujian Sensor Arus

No	Sensor	Clamp Ampere	Selisih	Error	Akurasi
1.	3,24A	3,20A	0,04	1,25 %	98,75 %
2.	3,25A	3,24A	0,01	0,31 %	99,69 %
3.	3,23A	3,20A	0,03	0,94 %	99,06 %
4.	3,24A	3,20A	0,04	1,25 %	98,75 %
Rata-rata				0,93 %	99,06 %

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Pengujian INA219 sebanyak 4 kali menghasilkan rata-rata error 0,93% dengan akurasi 99,06%. Error terbesar 1,25% dan terkecil 0,31%. Tabel 2 menunjukkan sensor bekerja baik.

4.5 Pengujian Sensor Tegangan Panel Surya

Pengujian dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor tegangan panel dan multimeter untuk mengetahui error sebagai dasar kalibrasi. Tabel 3 menampilkan hasil setelah kalibrasi.

Tabel 3 Hasil Pengujian Sensor Tegangan Panel Surya

No	Sensor	Multimeter	Selisih	Error	Akurasi
1.	13,66V	13,70V	0,04	0,29 %	99,71 %
2.	13,75V	13,79V	0,04	0,29 %	99,71 %
3.	13,95V	13,90V	0,05	0,35 %	99,65 %
4.	14,03V	14,00V	0,03	0,21 %	99,79 %
Rata-rata				0,28 %	99,71 %

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Pengujian sensor tegangan panel 4 kali menghasilkan rata-rata error 0,28% dengan akurasi 99,71%. Error terbesar 0,35% dan terkecil 0,21%. Tabel 3 menunjukkan sensor bekerja baik.

4.6 Pengujian Sensor Tegangan Baterai

Pengujian dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor tegangan baterai dan multimeter untuk mengetahui error sebagai dasar kalibrasi. Tabel 4 menampilkan hasil setelah kalibrasi.

Tabel 4 Hasil Pengujian Sensor Tegangan Baterai

No	Sensor	Multimeter	Selisih	Error	Akurasi
1.	12,24V	12,27V	0,03	0,24 %	99,79 %
2.	12,44V	12,43V	0,01	0,08 %	99,92 %
3.	12,48V	12,46V	0,02	0,16 %	99,84 %
4.	12,52V	12,50V	0,02	0,16 %	99,84 %
Rata-rata				0,16 %	99,84 %

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Pengujian sensor tegangan baterai 4 kali menghasilkan rata-rata error 0,16% dengan akurasi 99,84%. Error terbesar 0,24% dan terkecil 0,08%. Tabel 4.4 menunjukkan sensor bekerja baik.

4.7 Pengujian Sensor Suhu

Pengujian dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor suhu dan thermometer untuk mengetahui error sebagai dasar kalibrasi. Tabel 5 menampilkan hasil setelah kalibrasi.

Tabel 5 Hasil Pengujian Sensor Suhu

No	Sensor	Thermometer	Selisih	Error	Akurasi
1.	33,2 °C	32 °C	1,2	3,75 %	96,25 %
2.	33,1 °C	32 °C	1,1	3,44 %	96,56 %
3.	33,0 °C	32 °C	1	3,13 %	96,87 %
4.	32,0 °C	32 °C	0	0,0 %	100 %
Rata-rata				2,58 %	97,42 %

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Pengujian sensor suhu 4 kali menghasilkan rata-rata error 2,58% dengan akurasi 97,42%. Error terbesar 3,75% dan terkecil 0%. Tabel 5 menunjukkan sensor bekerja baik.

4.8 Pengujian Sensor Lux

Pengujian dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor intensitas cahaya dan lux meter untuk mengetahui error sebagai dasar kalibrasi. Tabel 6 menampilkan hasil setelah kalibrasi.

Tabel 6 Hasil Pengujian Sensor Lux

No	Sensor	Lux Meter	Selisih	Error	Akurasi
1.	42	43	1,0	2,33 %	97,67 %
2.	42,2	43	0,8	1,86 %	98,14 %
3.	42,1	43	0,9	2,09 %	97,91 %
4.	42,2	43	0,8	1,86 %	98,91 %
Rata-rata				2,03 %	98,15 %

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Pengujian sensor *lux* 4 kali menghasilkan rata-rata error 2,03% dengan akurasi 98,15%. Error terbesar 2,33% dan terkecil 1,86%. Tabel 6 menunjukkan sensor bekerja baik.

4.9 Menentukan Sudut Gerak Solar Tracker

Sebelum pengujian solar tracker, perlu dihitung sudut efektif per jam agar panel dapat mengikuti pergerakan matahari secara optimal. Penentuan sudut azimut dan elevasi diawali dengan perhitungan sudut deklinasi matahari menggunakan Persamaan 20.

$$\delta = 23.45^{\circ} \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (n - 81)\right)$$

$$\delta = 23.45^{\circ} \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (32 - 81)\right)$$

$$\delta = 23.45^{\circ} \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (-49)\right)$$

$$\delta = 23.45^{\circ} \times \sin \approx -48.3288$$

$$\delta = 23.45^{\circ} \times (-0.7475)$$

$$\delta = (-17.52)$$

Setelah sudut deklinasi dihitung, langkah berikutnya adalah menentukan Hour Angle (sudut jam) pada pukul 08.00–16.00. Perhitungan Hour Angle menggunakan Persamaan 21.

$$HRA_8 = 15^{\circ} \times (8 - 12) = 15^{\circ} \times (-4) = -60$$

$$HRA_9 = 15^{\circ} \times (9 - 12) = 15^{\circ} \times (-3) = -45$$

$$HRA_{10} = 15^{\circ} \times (10 - 12) = 15^{\circ} \times (-2) = -30$$

$$HRA_{11} = 15^{\circ} \times (11 - 12) = 15^{\circ} \times (-1) = -15$$

$$HRA_{12} = 15^{\circ} \times (12 - 12) = 15^{\circ} \times (0) = 0$$

$$HRA_{13} = 15^{\circ} \times (13 - 12) = 15^{\circ} \times (1) = 15$$

$$HRA_{14} = 15^{\circ} \times (14 - 12) = 15^{\circ} \times (2) = 30$$

$$HRA_{15} = 15^{\circ} \times (15 - 12) = 15^{\circ} \times (3) = 45$$

$$HRA_{16} = 15^{\circ} \times (16 - 12) = 15^{\circ} \times (4) = 60$$

Langkah selanjutnya menghitung sudut *elevasi* berdasarkan sudut *deklinasi* dan sudut jam, dapat menggunakan Persamaan 2.22 Halaman 23 dan menghitung sudut *azimut* menggunakan Persamaan 23.

$$El_n = \sin^{-1}[\sin \phi \times \sin \delta + \cos \delta \times \cos \phi \times \cos H]$$

$$Az = \cos^{-1}[\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos H]$$

Tabel 7 Sudut Elavasi dan Azimut

Waktu	<i>Elevasi</i>	<i>Azimut</i>
08.00	30,7°	103°
09.00	45°	102°
10.00	59°	101°
11.00	72	100°
12.00	79,8°	100°
13.00	72°	100°
14.00	59°	101°
15.00	45°	102°
16.00	30,7°	103°

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Hasil perhitungan pada Tabel 7 menunjukkan sudut elevasi dan azimut matahari efektif sebagai berikut: pukul 08.00 (30,7°; 103° timur), 09.00 (45°; 102° timur), 10.00 (59°; 101° timur), 11.00 (72°; 100° timur), 12.00 (79°; 100° barat), 13.00 (72°; 100° barat), 14.00 (59°; 101° barat), 15.00 (45°; 102° barat), dan 16.00 (30,7°; 103° barat).

4.10 Pengujian Sudut Motor

Pengujian motor DC dilakukan untuk mengukur akurasi pergerakan panel surya berdasarkan waktu RTC dengan membandingkan sudut kemiringan terhadap alat ukur. Hasilnya ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8 Hasil Pengujian Motor DC Elevasi

Real Time Clock	Sudut Motor Elevasi (°)	Kemiringan Panel Surya (°)	Selisih	Error	Akurasi
08.00	30,7	30	0,7	2,28 %	97,72 %
09.00	45	44	1	2,22 %	97,78 %
10.00	59	58	1	1,69 %	98,31 %
11.00	72	70	2	2,78 %	97,22 %
12.00	79,8	78	1,8	2,26 %	97,74 %
13.00	72	70	2	2,78 %	97,22 %
14.00	59	58	1	1,69 %	98,31 %
15.00	45	44	1	2,22 %	97,78 %
16.00	30,7	30	0,7	2,28 %	97,72 %
Rata-rata				2,30 %	97,75 %

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Pengujian motor elevasi pukul 08.00–16.00 (9 kali) menghasilkan rata-rata error 2,30% dengan akurasi 97,75%. Data lengkap ditampilkan pada Tabel 9.

Tabel 9 Hasil Pengujian Motor DC Azimut

Real Time Clock	Sudut Motor Azimut (°)	Kemiringan Panel Surya (°)	Selisih	Error	Akurasi
08.00	103	105	2	1,94%	98,06%
09.00	102	103	1	0,98%	99,02%
10.00	101	103	2	1,98%	98,02%
11.00	100	103	3	3%	97%
12.00	100	103	3	3%	97%
13.00	100	103	3	3%	97%
14.00	101	103	2	1,98%	98,02%
15.00	102	103	1	0,98%	99,02%
16.00	103	103	0	0 %	100%
Rata-rata				1,87 %	98,12 %

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Pengujian motor azimut pukul 08.00–16.00 (9 kali) menghasilkan rata-rata error 1,87% dengan akurasi 98,12%. Data lengkap ditampilkan pada Tabel 9.

4.11 Hasil Keseluruhan Pengujian Alat

Pengujian alat dilakukan selama 7 hari di Desa Karangreja, Kecamatan Kutasari, Kabupaten Purbalingga, Jawa Tengah. Kedua alat diuji secara bersamaan dan data hasil pengujian digunakan untuk menentukan efisiensi sistem, diantaranya yaitu:

1. Efisiensi Panel Surya

Pengukuran intensitas cahaya selama tujuh hari ditampilkan pada Tabel 10 untuk mengetahui daya input panel.

Tabel 10 Hasil Pengujian Daya Input Panel Surya

Hari	Waktu	Lux	Iradiasi (W/m^2)	Pin (W)
Hari ke-1	08.00	27960,73	220,89	112,49
	09.00	34911,37	275,70	140,30
	10.00	34937,62	275,91	140,40
	11.00	43229,83	341,52	173,81
	12.00	36370,27	287,32	146,30
	13.00	17820,41	140,78	71,68
	14.00	10133,43	80,05	40,76
	15.00	7451,62	58,87	29,98
	16.00	1528,66	12,07	6,15
Hari ke-2	08.00	37554,9	296,68	151,07
	09.00	48666,67	384,47	195,77
	10.00	48976,95	386,92	197,02
	11.00	40166,18	317,31	161,58
	12.00	28145,54	222,35	113,22
	13.00	18514,09	146,26	74,48
	14.00	14900,85	117,72	59,94
	15.00	6321,65	49,94	25,43

Hari	Waktu	Lux	Iradiasi (W/m^2)	Pin (W)
Hari ke-3	16.00	2399,39	18,96	9,65
	08.00	44601,19	352,35	179,42
	09.00	51156,67	404,14	205,79
	10.00	33530,56	264,89	134,88
	11.00	36496,31	288,32	146,81
	12.00	40717,24	321,67	163,79
	13.00	18514,09	146,26	74,48
	14.00	26398,64	208,55	106,19
	15.00	4715,23	37,25	18,97
Hari ke-4	16.00	417,88	3,30	1,68
	08.00	29152,96	230,31	117,27
	09.00	31334,19	247,54	126,05
	10.00	20008,95	158,07	80,49
	11.00	15464,02	122,17	62,21
	12.00	33639,16	265,75	135,32
	13.00	22552,26	178,16	90,72
	14.00	18339,7	144,88	73,77
	15.00	3574,12	28,24	14,38
Hari ke-5	16.00	305,78	2,42	1,23
	08.00	16495,89	130,32	66,36
	09.00	34193,79	270,13	137,55
	10.00	25717,8	203,17	103,45
	11.00	35591,73	281,17	143,17
	12.00	20008,23	158,07	80,49
	13.00	11470,65	90,62	46,14
	14.00	4733,7	37,40	19,04
	15.00	4683,4	37,00	18,84
Hari ke-6	16.00	598,92	4,73	2,41
	08.00	43940,83	347,13	176,76
	09.00	43797,49	346,00	176,18
	10.00	43428,3	343,08	174,70
	11.00	45898,6	362,60	184,64
	12.00	13745,27	108,59	55,29
	13.00	6038,53	47,70	24,29
	14.00	11775,56	93,03	47,37
	15.00	5517,18	43,59	22,19
Hari ke-7	16.00	336,86	2,66	1,36
	08.00	46461,82	367,05	186,90
	09.00	43804,22	346,05	176,21
	10.00	38311,96	302,66	154,12
	11.00	27073,8	213,88	108,91
	12.00	34659,47	273,81	139,42
	13.00	13206,51	104,33	53,13
	14.00	3209,87	25,36	12,91
	15.00	3094,49	24,45	12,45
Rata-rata		25982,00	205,25	104,51

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Nilai rata-rata iradiasi diperoleh dari rata-rata lux yang dihitung menggunakan Persamaan 7.

$$Ir = Lux \times 0,0079$$

$$Ir = 25982,00 \times 0,0079$$

$$Ir = 205,25W/m^2$$

Hasil pengujian menunjukkan nilai iradiasi sebesar 205,25 W/m². Selanjutnya, daya input panel (Pin) dihitung dengan mengalikan luas panel dengan iradiasi. Dimensi panel 760 × 670 × 30 mm, sehingga luas permukaan dihitung menggunakan Persamaan 6.

$$A = p \times l$$

$$A = 760 \text{ mm} \times 670 \text{ mm}$$

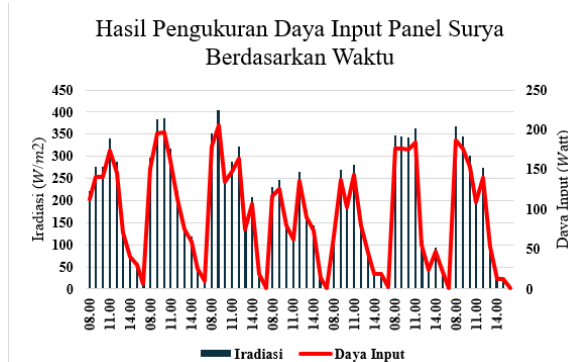
$$A = 509200 \text{ mm} = 0,5092 \text{ m}^2$$

Daya input (P_{in}) diperoleh dari hasil perkalian iradiasi dengan luas permukaan panel, dihitung menggunakan Persamaan 8.

$$P_{in} = Ir \times A$$

$$P_{in} = 205.25 \frac{W^2}{m} \times 0.5092 \text{ m}^2$$

$$P_{in} = 104.51 \text{ Watt}$$



Gambar 8 Grafik Pengukuran Daya Input Panel Surya

Berdasarkan Gambar 8, daya input dipengaruhi intensitas cahaya matahari; semakin tinggi intensitas, semakin besar daya input. Grafik menunjukkan kenaikan intensitas pukul 08.00–12.00 dan penurunan pukul 13.00–16.00, dengan rata-rata tertinggi pada pukul 12.00. Pengukuran tegangan dan arus output panel dilakukan pukul 08.00–16.00 untuk memperoleh daya output (P_{out}), ditampilkan pada Tabel 11.

Tabel 11 Hasil Pengujian Daya Output Panel Surya

Hari	Waktu	Arus (A)	Tegangan (V)	Pout (W)
Hari ke-1	08.00	1.84	13.97	25.70
	09.00	1.93	14.1	27.21
	10.00	1.86	14.12	26.26
	11.00	1.95	14.27	27.82
	12.00	1.69	14.06	23.75
	13.00	1.04	13.47	14.00
	14.00	0.65	13.25	8.61
	15.00	0.46	13.1	6.02
Hari ke-2	16.00	0.08	12.71	1.01
	08.00	2.63	13.64	35.88
	09.00	3.53	14.35	50.62
	10.00	2.23	14.36	32.03
	11.00	1.61	14.18	22.83
	12.00	1.28	13.28	17.00
	13.00	0.93	12.81	11.91
	14.00	0.79	12.68	10.01
Hari ke-3	15.00	0.36	12.42	4.47
	16.00	0.13	11.94	1.55
	08.00	3.17	14.15	44.86
	09.00	3.15	14.37	45.26
	10.00	2.01	13.95	28.03
	11.00	1.69	13.79	23.37
	12.00	1.97	13.99	27.56
	13.00	2.21	14.14	31.25
	14.00	1.49	13.78	20.53

Hari	Waktu	Arus (A)	Tegangan (V)	Pout (W)
	15.00	0.26	12.92	3.35
	16.00	0.01	9.04	0
Hari ke-4	08.00	1.87	13.52	25.28
	09.00	1.91	13.54	25.86
	10.00	1.18	13	15.34
	11.00	0.84	12.81	10.76
	12.00	1.69	13.46	22.75
	13.00	1.13	13.07	14.76
	14.00	0.96	12.86	12.34
	15.00	0.19	12.13	2.30
	16.00	0	7.65	0
Hari ke-5	08.00	0.94	12.42	11.67
	09.00	2.29	13.3	30.45
	10.00	1.63	13.43	21.89
	11.00	2.29	13.74	31.47
	12.00	1.25	13.26	16.57
	13.00	0.73	12.96	9.46
	14.00	0.28	12.55	3.51
	15.00	0.28	11.95	3.34
	16.00	0.04	7.92	0
Hari ke-6	08.00	3.34	14.32	47.82
	09.00	3.3	14.44	47.65
	10.00	2.69	14.38	38.67
	11.00	2.23	14.34	32.00
	12.00	0.81	13.21	10.70
	13.00	0.34	12.79	4.34
	14.00	0.72	12.95	9.32
	15.00	0.35	12.59	4.40
	16.00	0.02	7.25	0
Hari ke-7	08.00	3.36	14.32	48.11
	09.00	2.81	14.17	39.81
	10.00	2.37	14.08	33.37
	11.00	1.66	13.75	22.82
	12.00	2.06	14.02	28.88
	13.00	0.75	13.21	9.90
	14.00	0.18	12.68	2.28
	15.00	0.17	12.51	2.12
	16.00	0	5.82	0
Total		80.59	846.54	1238.45
Rata-rata		1.2792	13.4371	17.19

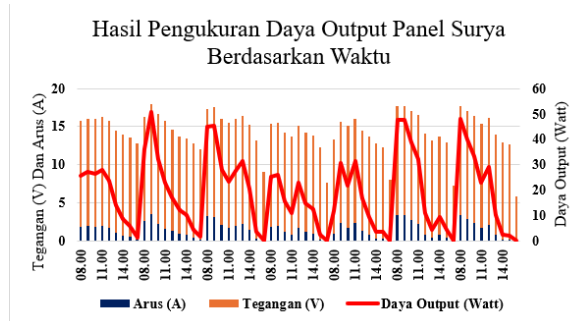
(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Berdasarkan Tabel 11, rata-rata arus panel 1,27 A dan rata-rata tegangan 13,43 V. Nilai daya output (Pout) kemudian dihitung menggunakan Persamaan 9.

$$P_{out} = V \times I$$

$$P_{out} = 13.43 \text{ V} \times 1.27 \text{ A}$$

$$P_{out} = 17.19 \text{ Watt}$$



Gambar 9 Grafik Pengukuran Daya Output Panel Surya

Gambar 9 menunjukkan bahwa daya output dipengaruhi oleh hasil perkalian tegangan dan arus; semakin besar keduanya, semakin besar pula daya output panel surya. Nilai efisiensi panel surya dihitung dari perbandingan daya input (P_{in}) dan daya output (P_{out}) menggunakan Persamaan 10.

$$nPV = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \%$$

$$nPV = \frac{17.19}{104.51} \times 100 \%$$

$$nPV = 16.45 \%$$

Berdasarkan hasil rata-rata, $P_{out} = 17,19$ W dan $P_{in} = 104,51$ W sehingga efisiensi panel surya mencapai 16,45%. Rincian efisiensi harian selama tujuh hari ditampilkan pada Tabel 12.

Tabel 12 Hasil Pengujian Efisiensi Daya Panel Surya

Hari	Waktu	Pin (W)	Pout (W)	nPV (%)
Hari ke-1	08.00	112.49	25.70	22.85%
	09.00	140.30	27.21	19.39%
	10.00	140.40	26.26	18.70%
	11.00	173.81	27.82	16.00%
	12.00	146.30	23.75	16.23%
	13.00	71.68	14.00	19.53%
	14.00	40.76	8.61	21.12%
	15.00	29.98	6.02	20.08%
Hari ke-2	16.00	6.15	1.01	16.42%
	08.00	151.07	35.88	23.75%
	09.00	195.77	50.62	25.86%
	10.00	197.02	32.03	16.26%
	11.00	161.58	22.83	14.13%
	12.00	113.22	17.00	15.01%
	13.00	74.48	11.91	15.99%
	14.00	59.94	10.01	16.70%
Hari ke-3	15.00	25.43	4.47	17.58%
	16.00	9.65	1.55	16.06%
	08.00	179.42	44.86	25.00%
	09.00	205.79	45.26	21.99%
	10.00	134.88	28.03	20.78%
	11.00	146.81	23.37	15.92%
	12.00	163.79	27.56	16.83%
	13.00	74.48	31.25	41.96%
Hari ke-4	14.00	106.19	20.53	19.33%
	15.00	18.97	3.35	17.66%
	16.00	1.68	0	0.00%
	08.00	117.27	25.28	21.56%
	09.00	126.05	25.86	20.52%
Hari ke-4	10.00	80.49	15.34	19.06%
	11.00	62.21	10.76	17.29%
	12.00	135.32	22.75	16.81%

Hari	Waktu	Pin (W)	Pout (W)	nPV (%)
	13.00	90.72	14.76	16.27%
	14.00	73.77	12.34	16.73%
	15.00	14.38	2.30	16.00%
	16.00	1.23	0	0.00%
Hari ke-5	08.00	66.36	11.67	17.58%
	09.00	137.55	30.45	22.14%
	10.00	103.45	21.89	21.16%
	11.00	143.17	31.47	21.98%
	12.00	80.49	16.57	20.59%
	13.00	46.14	9.46	20.50%
	14.00	19.04	3.51	18.43%
	15.00	18.84	3.34	17.73%
Hari ke-6	16.00	2.41	0	0.00%
	08.00	176.76	47.82	27.05%
	09.00	176.18	47.65	27.05%
	10.00	174.70	38.67	22.14%
	11.00	184.64	32.00	17.33%
	12.00	55.29	10.70	19.35%
	13.00	24.29	4.34	17.87%
	14.00	47.37	9.32	19.67%
Hari ke-7	15.00	22.19	4.40	19.83%
	16.00	1.36	0	0.00%
	08.00	186.90	48.11	25.74%
	09.00	176.21	39.81	22.60%
	10.00	154.12	33.37	21.65%
	11.00	108.91	22.82	20.95%
	12.00	139.42	28.88	20.71%
	13.00	53.13	9.90	18.63%
	14.00	12.91	2.28	17.66%
	15.00	12.45	2.12	17.03%
	16.00	0.63	0	0.00%
Total		104.51	1083.47	1007.28%
Rata-rata		1.2792	17.1979	16,45%

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Hasil pengujian menunjukkan efisiensi panel surya hanya 16,45%, lebih rendah dari ideal (18–22%), karena ketidaksesuaian dengan SCC PWM yang menyalurkan tegangan panel langsung ke baterai. Tegangan pengisian 15,5 V melebihi batas aman baterai LiFePO₄ (14,4–14,6 V). Solusi menurunkan tegangan input panel ke 14,5 V agar baterai tetap aman, namun mengurangi potensi daya dan menurunkan efisiensi sistem.

2. Efisiensi Solar Charger Controller

Daya input SCC sama dengan daya output panel, yaitu 17,19 W. Berdasarkan hasil pengukuran, SCC menghasilkan tegangan 13,43 V dan arus 1,27 A, sehingga daya output SCC dihitung menggunakan Persamaan 2.11.

$$P_{out\ SCC} = V \times I$$

$$P_{out\ SCC} = 13.43\ V \times 1.27\ A$$

$$P_{out\ SCC} = 17,05\ Watt$$

Untuk menentukan nilai efisiensi SCC dapat menggunakan Persamaan 12.

$$n_{SCC} = \frac{17,05}{17.19} \times 100\ \%$$

$$n_{SCC} = 0,991 \times 100\ \%$$

$$n_{SCC} = 99,1\ \%$$

Efisiensi SCC PWM mencapai 99,1%, dihitung dari perbandingan daya output ke baterai (17,05 W) terhadap daya input dari panel (17,19 W). Hasil ini menunjukkan SCC bekerja cukup optimal dalam mentransfer daya, dan efisiensinya tergolong baik untuk tipe PWM.

3. Efisiensi Baterai

Efisiensi baterai dihitung dengan membandingkan daya output baterai dan daya input yang masuk, menggunakan Persamaan 2.14 (Halaman 23).

$$n_{\text{Baterai}} = \frac{P_{\text{out Baterai}}}{P_{\text{in Baterai}}} \times 100 \%$$

Daya input baterai dihitung dari hasil perkalian daya output SCC dengan durasi pengisian, sesuai Persamaan 2.13 (Halaman 23).

$$P_{\text{in Baterai}} = P_{\text{out SCC}} \times \text{Waktu Pengisian}$$

$$P_{\text{in Baterai}} = 17,05 \times 9 \text{ Jam}$$

$$P_{\text{in Baterai}} = 153,45 \text{ Wh}$$

Daya output baterai diperoleh dari hasil pengukuran tegangan dan arus saat baterai digunakan. Hasil pengukuran konsumsi malam hari ditampilkan pada Tabel 13.

Tabel 13 Hasil Pengukuran Konsumsi Baterai

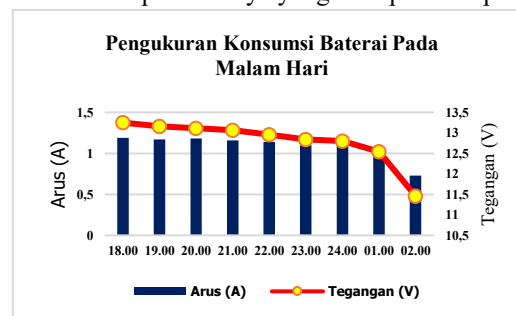
Waktu	Arus (A)	Tegangan Beban (V)	Daya (W)	Tegangan Baterai (V)
18.00	1,19	13	15,47	13,25
19.00	1,17	12,91	15,1	13,16
20.00	1,18	12,86	15,17	13,11
21.00	1,16	12,82	14,87	13,07
22.00	1,14	12,71	14,48	12,96
23.00	1,10	12,59	13,84	12,84
24.00	1,10	12,55	13,8	12,80
01.00	1,08	12,29	13,27	12,54
02.00	0,73	11,21	8,18	11,46
Total	9,85	112,94	124,18	115,19
Rata-rata	1,09	12,54	13,79	12,79

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

Dari data tersebut hasil rata-rata daya pemakaian baterai adalah sebesar 13,79 Watt, maka dapat dihitung efisiensi baterai menggunakan Persamaan 14.

$$n_{\text{Baterai}} = \frac{13,79}{153,45} \times 100 \% = 8,98\%$$

Berdasarkan hasil pengujian, efisiensi baterai yang digunakan pada sistem ini hanya mencapai 9,20%. Nilai ini tergolong sangat rendah jika dibandingkan dengan efisiensi ideal baterai LiFePO₄ yang umumnya berada pada kisaran 90–95%. Rendahnya efisiensi tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya proses pengisian daya yang tidak mencapai tegangan maksimum, kondisi cuaca yang kurang mendukung sehingga intensitas sinar matahari tidak optimal, serta kemungkinan adanya pengaturan atau pemilihan Solar Charge Controller (SCC) yang kurang tepat. Selain itu, efisiensi baterai juga dapat menurun apabila beban yang digunakan melebihi kapasitas daya yang mampu ditampung oleh baterai.



Gambar 10 Grafik Pengukuran Konsumsi Baterai

4. Efisiensi Sistem PLTS

Efisiensi total sistem PLTS diperoleh dari perkalian efisiensi panel surya (16,45%), SCC PWM (99,1%), dan baterai LiFePO₄ (8,98%), sesuai perhitungan dengan Persamaan 2.15.

$$n_{\text{PLTS}} = n_{\text{PV}} \times n_{\text{SCC}} \times n_{\text{Baterai}}$$

$$nPLTS = 16,45\% \times 99,1\% \times 8,98\% = 1,46\%$$

Hasil perhitungan menunjukkan efisiensi system PLTS sebesar 1,46%. Nilai ini tergolong rendah yang dipengaruhi oleh kapasitas efektif baterai yang tidak termanfaatkan secara penuh. Secara teoritis, baterai LiFePO4 konfigurasi 4S2P 12V 15Ah memiliki energi sebesar 384Wh (30Ah x 12,8V). Namun berdasarkan hasil pengujian, energi yang dapat dimanfaatkan hanya sekitar 124,18Wh hingga mendekati batas cut-off 11,5V. Dengan estimasi pemakaian 80% kapasitas, sehingga diperoleh kapasitas efektif sekitar 155Wh atau setara 12Ah, yaitu sekitar 40% dari kapasitas nominal.

5. KESIMPULAN

1. Rancang bangun sistem *power station* berbasis panel surya dengan *solar tracker* telah berhasil direalisasikan. Sistem mampu menyuplai energi untuk *microgreen incubator* serta bekerja secara terintegrasi menggunakan ESP32 dan Arduino Nano untuk pembacaan sensor dan pengendalian motor *azimut* dan *elevasi*. *Dual-Axis Solar Tracker* menunjukkan kinerja yang baik dengan akurasi sudut *azimut* 98,12% dan *elevasi* 97,75%, sehingga mampu mengoptimalkan penerimaan intensitas cahaya matahari.
2. Sistem monitoring berbasis *IoT* berhasil dikembangkan dan bekerja secara *real-time*. Parameter suhu, kelembapan, arus, tegangan, dan intensitas cahaya dapat dipantau melalui website monitoring. Hasil pengujian menunjukkan tingkat akurasi sensor yang tinggi, yaitu sensor arus 99,06%, tegangan 93,12%, suhu 97,42%, dan lux 97,97% sehingga sistem monitoring dinyatakan efektif dalam mendukung pengelolaan *incubator*.
3. Analisis efisiensi sistem menunjukkan bahwa panel surya memiliki efisiensi 16,46% dan *Solar Charge Controller* 99,1%, namun efisiensi baterai hanya 9,20% sehingga efisiensi total system PLTS sebesar 1,46%. Kapasitas efektif baterai *LiFePO4* 12V 15Ah dengan konfigurasi 4S2P yang terukur hanya sekitar 155Wh (+-12Ah) atau sekitar 40% dari kapasitas nominal. Meskipun demikian, system proteksi baterai bekerja dengan baik dimana *cut-off* pada 11,5V sehingga penggunaan energi tetap dalam batas aman. Hasil ini menunjukkan bahwa kinerja sistem dipengaruhi oleh keterbatasan kapasitas efektif baterai.

6. DAFTAR PUSTAKA

- A. M. Putra and A. Aslimeri, "Sistem Kendali Solar Tracker Satu Sumbu berbasis Arduino dengan sensor LDR," JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional), vol. 6, no. 1, p. 322, 2020, doi: 10.24036/jtev.v6i1.107775.
- D. Eka, "Rancang Bangun Power Bank Portable Dengan Menggunakan Sel Surya Dan Vertical Axis Wind Turbine Disertai Sistem Kompas," 2020.
- J. K. Tharamuttam and A. K. Ng, "Design and Development of an Automatic Solar Tracker," Energy Procedia, vol. 143, pp. 629–634, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.738.
- K. V. N. R. Ummah, S. Sutedjo, M. M. Rifadil, and L. S. Mahendra, "Alat Uji MCB 1 Fasa Instalasi Milik Pelanggan (IML)," Emit. J. Tek. Elektro, vol. 22, no. 2, pp. 141–147, 2022, doi: 10.23917/emitor.v22i2.19352.
- M. A. D, S. K. S, P. P. H, and S. K. S, "Design and Fabrication of Dual Axis Solar Tracker for Maximum Energy Harvesting," Int. J. Res. Publ. Eng. Technol., vol. 1, no. 1, pp. 1–4, 2015.
- M. B. Arief, M. Widyartono, W. Aribowo, and A. L. Wardani, "Desain Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-Grid dan Monitoring Berbasis Node-Red," Elposys J. Sist. Kelistrikan, vol. 11, no. 1, pp. 45–50, 2024, doi: 10.33795/elposys.v11i1.4906.
- M. Firly, D. Wahjudi, and P. Yulianto, "Perancangan Sistem Penyiraman Dan Pemupukan Otomatis (Smart Garden) Berbasis Iot (Internet of Things) Menggunakan Nodemcu Esp8266," Teodolita Media Komunikasi Ilm. di Bid. Tek., vol. 23, no. 1, pp. 115–1129, 2022, doi: 10.53810/jt.v23i1.444.
- M. Partap et al., "Microgreen: A tiny plant with superfood potential," J. Funct. Foods, vol. 107, no. July, p. 105697, 2023, doi: 10.1016/j.jff.2023.105697.
- M. S. Karthik, M. Mahalakshmi, R. Mahitha, and S. Meena, "IoT Based Solar Panel Fault Monitoring and Control," Int. J. Inf. Comput. Sci., vol. 6, no. 3, pp. 7609–7618, 2021, [Online]. Available: <http://ijics.com>

- Q. Liang, H. Yue, S. Wang, S. Yang, K. ho Lam, and X. Hou, "Recycling and crystal regeneration of commercial used LiFePO₄ cathode materials," *Electrochim. Acta*, vol. 330, p. 135323, 2020, doi: 10.1016/j.electacta.2019.135323.
- R. A. Setiawan et al., "Analisis Perhitungan Kebutuhan Sistem pada Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Rumah Tangga 900 Watt," *Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 3, no. 2, pp. 11–26, 2025.
- R. H. Hilmy, R. Susana, and F. Hadiatna, "Rancang Bangun Smart Grow Box Hidroponik Untuk Pertumbuhan Tanaman Microgreen Berbasis Internet of Things," *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 10, no. 2, p. 41, 2021, doi: 10.30591/polektro.v10i2.2579.
- R. M. Ramli and W. A. Jabbar, "Design and implementation of solar-powered with IoT-Enabled portable irrigation system," *Internet Things Cyber-Physical Syst.*, vol. 2, no. August, pp. 212–225, 2022, doi: 10.1016/j.iotcps.2022.12.002.
- R. Nurfajriansyah, "Perancangan Portable Powerbank Berbasis Panel Surya Sebagai Multipurpose Reserve Power Generation (Mrpg)," *Peranc. Portable Powerbank Berbas. Panel Surya Sebagai Multipurp. Reserv. Power*, vol. 1, no. 1, pp. 1–40, 2018.
- S. Biswas, M. H. Bhuyan, and M. K. Hassan, "IoT-Based Automated Solar Panel Cleaning and Monitoring Technique," *J. Eng. Res. Reports*, vol. 25, no. 8, pp. 56–69, 2023, doi: 10.9734/jerr/2023/v25i8959.
- Samsurizal;, K. T. Mauriraya;, M. Fikri;, N. Pasra;, and Christiono;, "Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)," 2021.
- Z. Muhamad, R. Muhida, and O. S. Putra, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Pos Batas Security PT. Gula Putih Mataram Kabupaten Lampung Tengah," *J. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 11–21, 2022.