pISSN : 0852-0232, eISSN : 2656-582X DOI : 10.14710/gt.v22i4.xxxxx

ANALISIS PANEL SURYA DENGAN VARIASI JENIS MATERIAL SEL SURYA

Ambar Yulianti[1)], Fakhruddin Mangkusasmito[2)],
[1)]Program Studi Str. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
**E-mail : fakhm17@gmsil.com*

ABSTRACT

This study aims to analyze the performance of various types of solar panels based on solar cell materials and technologies in order to determine energy conversion efficiency and their suitability for specific applications. The three main materials examined are monocrystalline silicon, polycrystalline silicon, and thin-film, each with different characteristics in terms of light absorption, efficiency, and environmental durability. Emerging technologies such as Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) and tandem cells are also analyzed to assess their potential performance improvements over conventional technologies. The research was conducted through experimental testing and simulations, measuring the power output and efficiency of each panel type under different environmental conditions, such as varying light intensities and operational temperatures. The results show that monocrystalline silicon panels with PERC technology deliver the highest energy conversion efficiency, while thin- film panels perform better in low-light conditions and offer greater flexibility. These findings provide a comprehensive understanding of the advantages and limitations of each solar panel material and technology, serving as a valuable reference for selecting the most suitable panel type for household, industrial, or large-scale renewable energy projects.

Keywords: *Solar panel, solar cell material, solar cell technology, energy efficiency*

Pendahuluan

Permintaan energi global terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan kemajuan teknologi. Ketergantungan terhadap energi fosil menyebabkan berbagai permasalahan seperti keterbatasan cadangan, ketergantungan impor, dan dampak lingkungan yang signifikan. Oleh karena itu, penggunaan energi terbarukan menjadi solusi yang semakin relevan, terutama energi surya yang tersedia melimpah di Indonesia.

Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar, yakni sekitar 4,8 kWh/m² atau setara dengan 112.000 GWp. Namun, pemanfaatannya baru mencapai sekitar 10 MWp [1]. Pemerintah Indonesia telah menetapkan target untuk mengembangkan sekitar 20,9 GW pembangkit listrik energi terbarukan pada tahun 2030, dengan tujuan utama menghasilkan lebih dari 700 GW kapasitas listrik dari pembangkit listrik baru dan terbarukan, termasuk listrik tenaga surya [2].

Panel surya merupakan salah satu teknologi utama dalam pemanfaatan energi matahari. Namun, kinerja panel surya sangat bergantung pada jenis material dan teknologi sel yang digunakan. Beberapa jenis panel yang umum digunakan adalah monocrystalline, polycrystalline, dan thin-film, masing-masing dengan karakteristik efisiensi dan ketahanan yang berbeda.

Selain jenis material, teknologi terkini seperti Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) dan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) juga dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem panel surya. Pemanfaatan mikrokontroler seperti ESP32 serta aplikasi cloud seperti Firebase memungkinkan pengumpulan dan analisis data kinerja panel secara real-time.

Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan performa dua jenis panel surya, yaitu monocrystalline dan polycrystalline, menggunakan sistem monitoring berbasis IoT. Melalui pengukuran parameter seperti tegangan, arus, suhu, dan intensitas cahaya, penelitian ini bertujuan menentukan jenis panel yang paling efisien untuk digunakan di kondisi lingkungan tropis.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah: (1) Bagaimana perbandingan efisiensi berbagai jenis material panel surya? (2) Bagaimana pengaruh teknologi sel surya terhadap kinerja panel surya? (3) Faktor apa saja yang mempengaruhi kinerja dan ketahanan panel surya?

Agar penelitian ini lebih terfokus dan terarah, terdapat beberapa batasan yang ditetapkan. Penelitian ini dibatasi pada empat jenis material utama panel surya (silikon monokristalin, polikristalin, thin-film, dan perovskit) serta fokus pada parameter efisiensi, daya tahan, biaya produksi, dan kinerja dalam berbagai kondisi cuaca. Pengujian dilakukan melalui simulasi laboratorium dan studi literatur, tanpa uji lapangan jangka panjang. Aspek lingkungan hanya mencakup keberlanjutan dan potensi daur ulang. Selain itu, dilakukan pengujian daya tahan selama sebulan serta pengaruh siluet terhadap kinerja panel surya.

Artikel ini bertujuan untuk menganalisis kinerja panel surya berdasarkan variasi material dan teknologi sel. Tujuan spesifiknya meliputi: mengukur efisiensi masing-masing material, mengidentifikasi faktor lingkungan yang memengaruhi kinerja, membandingkan kinerja dalam kondisi operasional berbeda, serta mengembangkan sistem monitoring berbasis ESP32 dan Firebase.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem pembangkitan energi listrik yang memanfaatkan sinar matahari melalui teknologi fotovoltaik. Panel surya menangkap energi cahaya dan mengubahnya menjadi energi listrik menggunakan bahan semikonduktor. Di Indonesia, potensi energi surya diperkirakan mencapai 4,8 kWh/m²/hari, namun baru dimanfaatkan sekitar 0,1% dari total potensinya [1].

Sel Surya

Sel surya adalah perangkat elektronik yang mengubah energi cahaya matahari menjadi listrik melalui efek fotovoltaik, menggunakan material semikonduktor seperti silikon. Satu sel menghasilkan tegangan sekitar 0,6 volt, sehingga beberapa sel disusun seri menjadi panel surya untuk mencapai tegangan lebih tinggi. Teknologi ini digunakan dari skala kecil hingga sistem pembangkit listrik rumah tangga dan industri.
Secara umum, teknologi sel surya terbagi menjadi tiga generasi.
Generasi Pertama:

1. Menggunakan silikon kristalin (monocrystalline & polycrystalline).
2. Monocrystalline: efisiensi tinggi (hingga 20%), tapi mahal dan sensitif terhadap cuaca.
3. Polycrystalline: efisiensi lebih rendah, namun lebih murah dan tetap berfungsi di kondisi mendung.

Generasi Kedua:

1. Menggunakan lapisan tipis seperti a-Si, CdTe, dan CIGS.
2. Lebih murah diproduksi, tapi efisiensinya rendah (6–8%) dan beberapa material bersifat toksik.
3. Cocok untuk perangkat kecil seperti kalkulator.

Generasi Ketiga:

1. Teknologi inovatif seperti perovskite, DSSC, dan OPV.
2. Menawarkan efisiensi tinggi dan desain fleksibel, namun masih dalam tahap riset dan pengembangan.
3. Perovskite menunjukkan efisiensi laboratorium hingga 20%+.

Selain berdasarkan generasi, panel surya juga diklasifikasikan berdasarkan jenis material dan teknologi manufakturnya.

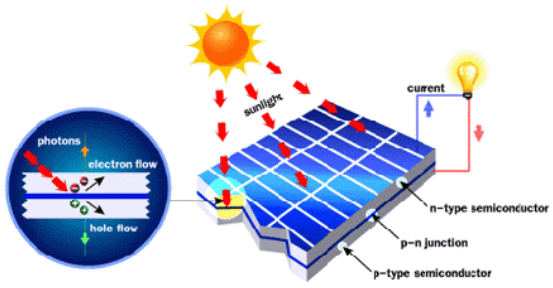
Berdasarkan Material:

1. Monocrystalline: efisiensi tinggi, tahan lama, mahal.
2. Polycrystalline: lebih ekonomis, efisiensi sedang.
3. Thin-Film: ringan dan fleksibel, efisiensi rendah.
4. Perovskite: efisiensi tinggi & biaya rendah, tapi belum stabil untuk jangka panjang.
5.

Berdasarkan Teknologi:

1. PERC: meningkatkan efisiensi dengan lapisan reflektif belakang.
2. Bifacial: menyerap cahaya dari dua sisi.
3. Half-cut: membelah sel untuk mengurangi resistansi.
4. Shingled: susunan tumpang-tindih meningkatkan efisiensi dan estetika.

Prinsip Kerja Panel Surya



Gambar 1. Cara Kerja Panel Surya [3]

Sel surya bekerja berdasarkan prinsip efek fotovoltaik, yaitu proses konversi energi cahaya menjadi energi listrik. Ketika foton dari cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, energinya membebaskan elektron dari atom dalam material semikonduktor. Elektron yang terlepas ini menciptakan arus listrik saat bergerak bebas. Agar proses ini berlangsung secara efisien, semikonduktor yang digunakan harus memiliki celah energi

(bandgap) yang sesuai untuk memungkinkan perpindahan elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Dalam sel surya, digunakan kombinasi semikonduktor tipe-n (bermuatan negatif karena kelebihan elektron) dan tipe-p (bermuatan positif karena kelebihan hole). Ketika keduanya digabungkan, terbentuk sambungan p-n yang menciptakan medan listrik internal. Medan ini memisahkan elektron dan hole ke arah berlawanan, menghasilkan arus listrik yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi.

Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Panel Surya

Kinerja panel surya tidak hanya ditentukan oleh desain dan teknologi yang digunakan, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal. Salah satu faktor utama adalah intensitas cahaya matahari, di mana semakin tinggi intensitasnya, semakin besar energi listrik yang dapat dihasilkan. Selain itu, suhu lingkungan dan

permukaan panel juga berperan penting, karena

suhu yang terlalu tinggi dapat menurunkan efisiensi akibat meningkatnya hambatan pergerakan elektron. Kualitas material panel turut menentukan efisiensi dan daya tahan panel surya; material berkualitas tinggi biasanya lebih mahal namun memberikan hasil yang optimal dalam jangka panjang. Penempatan panel juga penting, orientasi dan sudut kemiringan yang tepat memungkinkan penyerapan sinar matahari secara maksimal. Terakhir, kualitas kabel dan konduktor dalam sistem penghubung memengaruhi performa keseluruhan; penggunaan komponen yang tidak sesuai dapat menyebabkan kehilangan daya dan menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Daya Panel Surya

Daya panel surya adalah jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik dari cahaya matahari dalam satuan waktu.

Rumus perhitungan daya:

$$P = V \times I$$

Dimana P adalah daya (Watt), V adalah tegangan (Volt), dan I adalah arus (Ampere).

Terdapat beberapa jenis daya pada panel surya, yaitu daya maksimum (Pmax) yang menunjukkan output tertinggi saat panel berada dalam kondisi optimal (radiasi 1000 W/m² dan suhu 25°C), daya nyata (real-time power) yang mencerminkan daya aktual sesuai kondisi lingkungan saat itu, serta daya rata-rata harian, yaitu total energi yang dihasilkan dalam sehari dibagi waktu efektif penyinaran matahari. Ketiga jenis daya ini penting untuk mengevaluasi performa dan efisiensi sistem panel surya dalam berbagai situasi operasional.

Efisiensi Sel Surya

Efisiensi sel surya merupakan indikator utama untuk menilai seberapa baik suatu panel surya mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Semakin tinggi efisiensinya, semakin besar daya listrik yang dapat dihasilkan dari jumlah sinar matahari yang diterima, dengan kerugian energi yang minimal. Efisiensi dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk luas permukaan panel, intensitas radiasi matahari, daya listrik keluaran (Pout), dan irradiance (E), yang diukur dalam Watt per meter persegi (W/m²).

Efisiensi panel surya dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\eta = \frac{Pout}{Pin} \times 100\%$$

atau lebih rinci

$$\eta = \frac{Vpv \times \text{Ipv}}{Irad \times \text{A}} \times 100\%$$

Di mana :

η = Efisiensi Panel Surya
Pout = Daya Output (W)
Vpv = Tegangan Panel Surya (V)
Ipv = Arus Keluar Panel Surya (A)
Pin = Daya Input (W)
Irad = Irradiasi Matahari (W/m2)
A = Luas Penampangan Panel Surya (m2)

Untuk mendapatkan nilai irradiance, intensitas cahaya dalam lux perlu dikonversi ke W/m² dengan faktor konversi rata-rata 1 lux ≈ 0,0083 W/m². Nilai ini memungkinkan evaluasi kinerja panel bahkan dalam kondisi iradiasi rendah. Selain itu, efisiensi sangat dipengaruhi oleh nilai Peak Sun Hour (PSH), yaitu durasi efektif harian di mana intensitas cahaya setara dengan 1000 W/m². PSH bergantung pada kondisi geografis, iklim lokal, serta durasi dan intensitas penyinaran matahari. Semakin tinggi PSH suatu lokasi, semakin besar potensi energi yang dapat dikonversi panel surya, sehingga efisiensinya pun meningkat.

Daya input dari cahaya matahari dihitung dari konversi nilai intensitas cahaya (lux) menjadi irradiance menggunakan konstanta:

$$E_{irr} = lux \times 0.0083$$

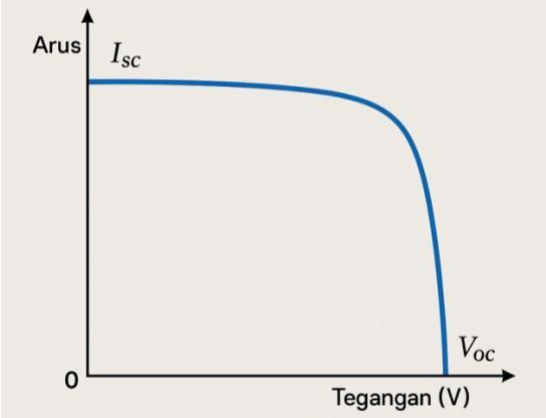
Daya input keseluruhan:

$$P_{in} = E_{irr} \times A$$

Dengan A = luas permukaan panel surya dalam satuan m2
Maka, Efisiensi panel surya dapat dihitung menggunakan :

$$\eta = \text{Pout/Pin} \times 100\%$$

Dimana, η adalah efisiensi panel surya dalam persen %



Gambar 2. Karakteristik pada Sel Surya

Performansi Sel Surya

Performansi sel surya adalah ukuran efektivitas modul fotovoltaik dalam mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Kinerja ini sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti efisiensi konversi, suhu kerja, irradiance (intensitas cahaya), dan durasi penyinaran harian (PSH), parameter utama performansi sel surya sebagai berikut:

Efisiensi Konversi Energi (%), mengukur seberapa banyak energi matahari yang berhasil diubah menjadi listrik [18].

$$\eta = \text{Pout}/(E \times A) \times 100\%$$

Keterangan :
E = Intensitas radiasi matahari (W/m2)
A = Luas permukaan panel (m2)
Di mana,
Pout = V × I

Irradiance (W/m2), Intensitas radiasi matahari yang diterima oleh panel. Semakin tinggi irradiance, semakin besar potensi daya yang dapat dihasilkan [4].

Suhu Sel Surya, Kenaikan suhu menurunkan tegangan kerja sel surya → efisiensi menurun [5].

Fill Factor (FF), ukuran dari "kualitas" sel surya :

$$FF = (Vmp \times Imp)/(Voc \times Isc)$$

Di mana,
Vmp , Imp = Tegangan & arus pada titik daya maksimum
VOC = Tegangan saat rangkaian terbuka
Isc = Arus hubung singkat
Peak Sun Hours (PSH), Jumlah waktu efektif per hari dengan irradiance setara 1000 W/m². Penting dalam menghitung energi harian [6].
Energi Harian = Daya Panel (W) × PSH (jam) [6]

Korelasi Suhu dan Kelembapan

Kenaikan suhu permukaan panel surya dapat secara signifikan menurunkan kinerjanya, terutama pada daya keluaran dan efisiensi konversi energi. Suhu tinggi meningkatkan resistansi internal material semikonduktor, sehingga menurunkan arus dan tegangan keluaran, yang pada akhirnya mengurangi jumlah daya listrik yang dihasilkan. Kondisi ini sangat merugikan ketika intensitas cahaya tinggi, karena panel tidak mampu bekerja pada kapasitas optimalnya. Selain suhu, kelembapan udara juga berdampak negatif terhadap kinerja panel. Kelembapan tinggi mengurangi tegangan terbuka (Voc), arus hubung singkat (Isc), dan total daya yang dihasilkan, karena partikel uap air menghalangi sebagian sinar matahari yang masuk ke permukaan panel. Dalam jangka panjang, kelembapan juga dapat mempercepat degradasi material panel. Hubungan antara suhu atau kelembapan dengan daya panel surya bersifat negatif, dan dapat diukur menggunakan koefisien korelasi Pearson. Semakin tinggi suhu atau kelembapan, maka daya keluaran panel cenderung menurun.

Untuk mengetahui hubungan atau korelasi antara suhu atau kelembapan dengan daya panel surya, biasanya digunakan rumus koefisien korelasi Pearson (r), yaitu:

$$r = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \cdot \sum(Y - \bar{Y})^2}}$$

Keterangan:
- rrr = koefisien korelasi
- XXX = variabel bebas (suhu atau kelembapan)
- YYY = variabel terikat (daya panel surya)
- X¯\bar{X}X¯ = rata-rata nilai X
- Y¯\bar{Y}Y¯ = rata-rata nilai Y

Dengan XXX sebagai suhu atau kelembapan udara, dan YYY sebagai daya keluaran panel surya. Hasil dari perhitungan ini menunjukkan arah dan kekuatan hubungan antara kedua variabel. Bila hasil korelasi bernilai negatif, hal tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu atau kelembapan udara, maka daya keluaran panel surya cenderung menurun.

Komponen Sistem Monitoring Panel Surya

Komponen sistem monitoring panel surya mencakup berbagai perangkat penting yang mendukung pemantauan performa dan efisiensi panel secara real-time. Dua jenis panel surya yang umum digunakan adalah monocrystalline (efisiensi tinggi, mahal) dan polycrystalline (efisiensi lebih rendah, namun lebih ekonomis). Untuk memantau parameter lingkungan, digunakan sensor suhu dan kelembapan DHT22 yang akurat dan mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler.

Sensor ACS712 digunakan untuk mengukur arus listrik berbasis efek Hall, sedangkan sensor tegangan DC 0–25V bekerja dengan prinsip pembagi tegangan. Modul RTC DS3231 berfungsi menjaga waktu secara akurat, penting untuk pencatatan data sensor. Untuk mengukur intensitas cahaya, digunakan sensor BH1750 yang menghasilkan data dalam satuan lux melalui komunikasi I2C.

Modul step-down LM2596 mengatur tegangan dari sumber daya agar sesuai dengan kebutuhan komponen, dan mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai otak sistem, mendukung Wi-Fi dan Bluetooth. Komponen seperti PCB dan resistor memastikan konektivitas dan aliran arus yang baik. Mounting diperlukan untuk memastikan posisi optimal panel dan sensor. Arduino IDE digunakan untuk memprogram mikrokontroler, sementara box komponen menjaga semua perangkat tertata dan aman.

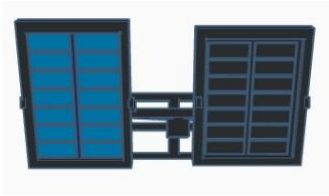
Untuk aplikasi berbasis lokasi, digunakan modul GPS NEO-6M, dan lampu DC digunakan sebagai indikator visual daya keluaran. Semua data sensor dikirim ke Google Spreadsheets melalui internet, memungkinkan pemantauan dan analisis data secara real-time, menjadikannya solusi monitoring berbasis IoT yang efisien dan mudah diakses.

Pembuatan Perangkat Keras (Hardware)

Proses pembuatan perangkat keras sistem monitoring panel surya dilakukan secara bertahap, dimulai dari identifikasi kebutuhan sistem, pemilihan komponen, perancangan rangkaian, perakitan, hingga pengujian. Sistem ini dirancang untuk membaca dan mengirim data secara real-time dari dua jenis panel surya monocrystalline dan polycrystalline menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali.

Komponen utama meliputi sensor tegangan, sensor arus (ACS712), sensor suhu dan kelembapan (DHT22), sensor cahaya (BH1750), modul waktu nyata (RTC DS3231), modul GPS (Neo-6M), serta step-down converter LM2596. Semua komponen ini dirancang terintegrasi agar dapat mengukur parameter lingkungan dan kelistrikan panel secara akurat.

Setelah skematik dibuat dengan software seperti Fritzing, proses perakitan dimulai dengan pemasangan komponen ke PCB dan penyolderan sesuai dengan wiring diagram. Komponen-komponen tersebut kemudian diposisikan ke dalam box pelindung yang dilengkapi dengan lubang khusus untuk sensor dan koneksi kabel.



Gambar 3. Design Tampak Atas



Gambar 4. Design Tampak Belakang



Gambar 5. Design Tampak Depan



Gambar 6. Design Tampak Kanan



Gambar 7. Design Tampak Kiri

Desain ini mencakup tampilan mounting dari berbagai sudut, yang dibuat untuk mempermudah penempatan komponen, panel surya monocrystalline dan panel surya polycrystalline.

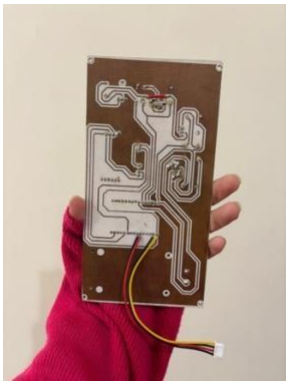


Gambar 8. Box Komponen

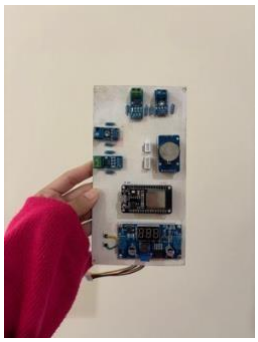
Setiap komponen diposisikan sesuai dengan layout yang telah dirancang guna menjamin fungsi indikator bekerja secara optimal. Setelah itu, proses perakitan komponen utama pada papan PCB dilakukan dengan cermat, dengan tujuan menjaga kerapian susunan serta menghindari kesalahan saat proses penyolderan. Proses ini dapat dilihat pada Gambar di bawah ini.



Gambar 9. Proses Penyolderan



Gambar 10. PCB Tampak Belakang



Gambar 11. PCB Tampak Depan

Komponen inti seperti ESP32 beserta pin input untuk sensor dan suplai daya dipasang di atas papan PCB mengikuti rancangan wiring diagram yang telah disusun sebelumnya.

Setelah pemasangan indikator selesai, sistem eksternal seperti panel surya, adaptor, komponen kepada box komponen mulai dirakit. Komponen mulai dihubungkan satu sama lain menggunakan kabel jumper, adaptor juga dihubungkan agar stabil, kemudian GPS Neo-6M juga ditempelkan pada sisi kiri mounting, serta menyediakan juga thermometer digital apabila cuaca sedang hujan.



Gambar 12. Merakit Panel ke Mounting

Langkah terakhir dari pembuatan perangkat keras yaitu melakukan uji coba secara meluruh untuk memastikan seluruh komponen terpasang dengan benar dan sistem dapat menyala serta berfungsi dengan baik.

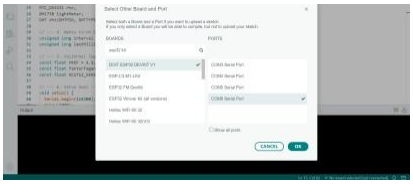


Gambar 13. Pengecekan Alat

Pembuatan Perangkat Lunak (Software)

Pembuatan Program pada Arduino IDE

Pada tahap ini, pengembangan perangkat lunak untuk mengoperasikan sistem monitoring dan kontrol tekanan dilakukan dengan memanfaatkan platform Arduino IDE. Langkah awal dimulai dengan membuka aplikasi Arduino IDE yang telah terpasang di computer.



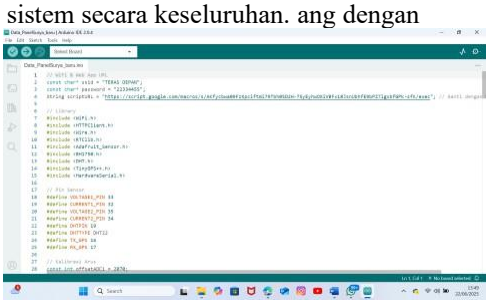
Gambar 14. Pemilihan Board dan Port ESP32

Langkah berikutnya adalah mengimpor Pustaka (library) yang dibutuhkan untuk mendukung kerja sensor dan actuator pada sistem. Pustaka library seperti WiFi.h, Wire.h, RTClib.h, Adafruit_Sensor.h, BH1750.h DHT.h, TinyGPS++.h, dan HardwareSerial.h.

```
3
4   // 1. Library
5   #include <WiFi.h>
6   #include <BlynkSimpleEsp32.h>
7   #include <Wire.h>
8   #include <RTClib.h>
9   #include <Adafruit_Sensor.h>
10  #include <BH1750.h>
11  #include <DHT.h>
12  #include <TinyGPS++.h>
13  #include <HardwareSerial.h>
```

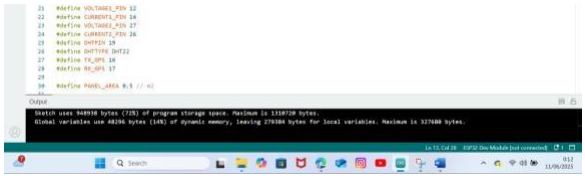
Gambar 15. Library pada Arduino IDE

Setelah proses impor pustaka selesai dilakukan, tahap berikutnya adalah menyusun program untuk membaca data dari sensor dan mengatur kerja sistem secara keseluruhan. ang dengan



Gambar 16. Penulisan Program Pada Arduino IDE

Langkah selanjutnya adalah melakukan inisialisasi terhadap komponen dan variabel yang akan digunakan dalam program. Setelah seluruh kode selesai ditulis, proses verifikasi dapat dilakukan dengan menekan tombol *Verify* yang terletak di bagian kiri atas tampilan Arduino IDE.

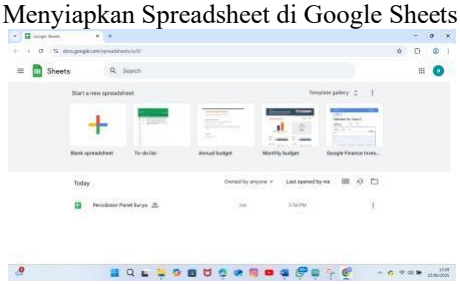


Gambar 17. Inisialisasi Komponen dan Variabel

Setelah proses verifikasi berhasil tanpa ditemukan kesalahan, tahap akhir yang dilakukan adalah mengirimkan (*upload*) program ke board ESP32. Pengunggahan ini dilakukan dengan menekan tombol *Upload* pada Arduino IDE. Jika proses berhasil, akan muncul notifikasi *Done Uploading* yang menandakan bahwa kode telah berhasil dikirim ke perangkat dan siap dijalankan.

Menghubungkan dengan platform Google Spreadsheet

1. Menyiapkan Spreadsheet di Google Sheets



Gambar 18. Halaman Dokumen Baru

2. Membuat Google Apps Script

```
function doGet(e) {
 var sheet =
     SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet().getSheetB
     yName("Sheet1");
 sheet.appendRow([
  new Date(),
  e.parameter.v1,
  e.parameter.i1,
  e.parameter.daya1,
  e.parameter.ef1,
  e.parameter.v2,
  e.parameter.i2,
  e.parameter.daya2,
  e.parameter.ef2,
  e.parameter.suhu,
  e.parameter.hum,
  e.parameter.lux,
  e.parameter.lat,
  e.parameter.lng
 ]);
 return ContentService.createTextOutput("OK");
}
```

- Klik > *Save*, lalu pilih Deploy > Manage deployments.
- Klik New Deployment, pilih Web App
- Isi nama, atur :
  - Execute as : Me
  - Who has access : Anyone
- Klik Deploy, izinkan akses, lalu salin URL Web App yang muncul

https://script.google.com/macros/s/AKfycbwa09FzX

pciftmi79Tbh0SD2H-7SyEyhwOXiVBFx18JsnUbhfE9bPZ7lgxbfGPk-sfK/exec

Pemrograman ESP

- Buka Arduino IDE, pemrograman yang membaca sensor akan mengirimkan data ke URL Google Script

```
String scriptURL = "https://script.google.com/macros/s/AKfycbwa09FzXpciftmi79Tbh0SD2H-7SyEyhwOXiVBFx18JsnUbhfE9bPZ7lgxbfGPk-sfK/exec
```

Pengujian dan Analisa

Pengujian Harian

Tabel 1. Perbandingan Hari Pertama

Waktu	Jenis	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	Efisiensi (%)	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Intensitas Cahaya	Latitude	Longitude
6/15/2025 08:00:30	Monocrystalline	19,27	1,41	27,25	91,39	27,4	66	13735	-6.988.287	110.417.945
	Polycrystalline	18,99	1,12	21,27	51,58					
6/15/2025 09:00:31	Monocrystalline	19,16	0,73	13,92	11,72	30,4	73,5	54612,5	-7.001.112	110.417.325
	Polycrystalline	16,3	0,67	10,92	6,65					
6/15/2025 10:00:32	Monocrystalline	19,2	0,99	19,08	23,46	31,6	69,7	37407,5	-7.005.214	110.418.760
	Polycrystalline	19,16	0,83	15,90	14,14					
6/15/2025 11:00:33	Monocrystalline	19,09	0,65	12,41	46,7	33,4	61,9	12236,67	-6.993.258	110.416.890
	Polycrystalline	18,88	0,54	10,19	27,72					
6/15/2025 12:00:34	Monocrystalline	18,24	1,15	20,92	17,64	34	67	54612,5	-7.002.240	110.417.540
	Polycrystalline	12,96	0,5	6,44	3,93					
6/15/2025 13:00:35	Monocrystalline	16,76	0,99	16,66	14,05	37,1	52,4	28360,83	-7.210.092	110.419.120
	Polycrystalline	13	0,77	10,01	11,75					
6/15/2025 14:00:36	Monocrystalline	19,07	0,61	11,66	13,11	36,1	50,9	40947,5	-7.005.441	110.417.888
	Polycrystalline	18,69	0,84	15,71	12,78					
6/15/2025 15:00:37	Monocrystalline	17,76	0,99	17,58	32,24	35,1	58,4	25138,33	-7.101.681	110.418.301
	Polycrystalline	17,04	0,96	16,28	21,56					
6/15/2025 16:00:38	Monocrystalline	18,14	0,38	6,93	10,75	31,4	72,5	29708,33	-6.988.287	110.417.945
	Polycrystalline	17,58	0,34	6,05	6,78					
6/15/2025 17:00:39	Monocrystalline	17,76	0,27	4,75	8,7	29,5	78	25138,33	-7.109.781	110.418.702
	Polycrystalline	17,04	0,21	3,58	4,74					
Minimal	Monocrystalline			4,75						
	Polycrystalline			3,58						
Maksimal	Monocrystalline			27,25						
	Polycrystalline			21,27						
Rata - rata	Monocrystalline			15,116						
	Polycrystalline			11,64						

Berdasarkan data hasil pengujian, panel surya monocrystalline menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan polycrystalline dalam hal daya dan efisiensi. Daya maksimum yang dihasilkan oleh panel monocrystalline mencapai 27,25 Watt dengan efisiensi tertinggi sebesar 91,39%. Sementara itu, panel polycrystalline menghasilkan daya maksimum sebesar 21,27 Watt dengan efisiensi tertinggi sebesar 51,58%.

Rata-rata daya yang dihasilkan oleh monocrystalline sebesar 15,12 Watt dengan efisiensi rata-rata 31,61%, sedangkan pada polycrystalline rata-rata daya yang dihasilkan sebesar 11,64 Watt dengan efisiensi rata-rata 17,62%. Hal ini menunjukkan bahwa panel monocrystalline lebih efektif dalam mengubah energi cahaya menjadi listrik.

Selain itu, pada waktu-waktu dengan intensitas cahaya yang tinggi, panel monocrystalline tetap menghasilkan daya dan efisiensi yang lebih baik. Performa panel juga dipengaruhi oleh suhu dan kelembapan, namun monocrystalline tetap lebih stabil.
Secara keseluruhan, panel monocrystalline lebih unggul dalam hal daya keluaran dan efisiensi dibandingkan polycrystalline, sehingga lebih cocok untuk digunakan pada kondisi pengujian ini.

Pengujian Pengaruh Siluet



Gambar 19. Mika Warna Muda Setelah Dipasang

Pada gambar diatas Pengujian panel surya monocrystalline dan polycrystalline dengan penutup mika warna hijau muda yang dipasang 50% sebagai media penghalang cahaya.

Tabel 2. Perbandingan Hari Kedelapan (Menggunakan Mika Hijau Muda)

Waktu	Jenis	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	Efisiensi (%)	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Intensitas Cahaya	Latitude	Longitude
6/25/2025 08:00:30	Monocrystalline	15,11	1,47	22,21	66,47	27,5	84,1	15385	-7,05314	110,42523
	Polycrystalline	14,84	1,45	21,55	46,65					
6/25/2025 09:00:31	Monocrystalline	18,97	1,32	25,03	30,12	30,4	73,5	38265	-7,05319	110,42523
	Polycrystalline	18,86	1,18	25,75	22,41					
6/25/2025 10:00:32	Monocrystalline	19,06	1,27	24,2	42,11	32,4	64,4	26466,67	-7,0532	110,42524
	Polycrystalline	18,77	1,11	20,8	26,17					
6/25/2025 11:00:33	Monocrystalline	18,59	1,62	30,11	50,95	34,2	59,7	27105,83	-7,05315	110,42523
	Polycrystalline	18,3	1,57	28,67	35,24					
6/25/2025 12:00:34	Monocrystalline	19,01	1,4	26,61	66,29	34,1	57,9	18495	-7,05311	110,42527
	Polycrystalline	18,83	1,38	25,9	46,65					
6/25/2025 13:00:35	Monocrystalline	18,39	1,51	27,76	47,22	35,1	56,7	27079,17	-7,05316	110,42523
	Polycrystalline	18,24	1,45	26,49	32,6					
6/25/2025 14:00:36	Monocrystalline	15,7	0,93	14,6	49,17	33,1	62,1	13664,17	-7,05321	110,42526
	Polycrystalline	15,08	0,84	12,68	30,9					
6/25/2025 15:00:37	Monocrystalline	18,3	1,03	18,88	50,75	33,9	60,8	17132,5	-7,05325	110,42523
	Polycrystalline	13,22	0,54	7,07	13,75					
6/25/2025 16:00:38	Monocrystalline	11.45	0,2	2,29	11,04	31.5	67.6	9557.5	-7,05322	110,4252
	Polycrystalline	11.09	0.15	1.7	5.91					
6/25/2025 17:00:39	Monocrystalline	8.48	0,24	2,03	36,45	29.7	79.3	2564.17	-7,05317	110,42522
	Polycrystalline	8.35	0.19	1.6	20.72					
Minimal	Monocrystalline			2,03						
	Polycrystalline			1,6						
Maksimal	Monocrystalline			30,11						
	Polycrystalline			28,67						
Rata - rata	Monocrystalline			19,372						
	Polycrystalline			17,22						

Berdasarkan data hasil pengujian dengan penutup mika warna muda (hijau), panel surya monocrystalline menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan polycrystalline dalam hal daya dan efisiensi. Daya maksimum yang dihasilkan oleh panel monocrystalline mencapai 30,11 Watt dengan efisiensi tertinggi sebesar 66,47%. Sementara itu, panel polycrystalline menghasilkan daya maksimum sebesar 28,67 Watt dengan efisiensi tertinggi sebesar 46,65%.

Rata-rata daya yang dihasilkan oleh monocrystalline sebesar 19,37 Watt dengan efisiensi rata-rata 45,05%, sedangkan pada polycrystalline rata-rata daya yang dihasilkan sebesar 17,22 Watt dengan efisiensi rata-rata yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun panel ditutup mika warna muda, monocrystalline tetap lebih efektif dalam mengubah energi cahaya menjadi listrik.

Selain itu, pada waktu-waktu dengan intensitas cahaya tinggi, panel monocrystalline tetap mampu menghasilkan daya dan efisiensi yang lebih baik dibandingkan polycrystalline. Meskipun terdapat penurunan kinerja akibat penutup mika, panel monocrystalline tetap menunjukkan performa yang lebih stabil terhadap variasi suhu, kelembapan, serta

intensitas cahaya.

Secara keseluruhan, panel monocrystalline tetap lebih unggul dalam hal daya keluaran dan efisiensi dibandingkan panel polycrystalline pada pengujian menggunakan mika warna muda (hijau), sehingga lebih direkomendasikan untuk digunakan dalam kondisi serupa.



Gambar 20. Mika Warna Tua Setelah Dipasang

Pada gambar diatas Pengujian panel surya monocrystalline dan polycrystalline dengan penutup mika warna hijau tua yang dipasang 50% sebagai media penghalang cahaya.

Tabel 3. Perbandingan Hari Kesembilan (Menggunakan Mika Hijau Tua)

Waktu	Jenis	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	Efisiensi (%)	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Intensitas Cahaya	Latitude	Longitude
6/26/2026 08:00:30	Monocrystalline	18,7	1,18	22,16	21,84	28,4	68,2	46730	-7,05313	110,4252
	Polycrystalline	18,48	1,11	20,48	14,6					
6/26/2026 09:00:31	Monocrystalline	19,01	1,26	23,97	20,21	32,4	58,4	54612,5	-7,05312	110,42524
	Polycrystalline	18,5	1,18	21,92	13,36					
6/26/2026 10:00:32	Monocrystalline	18,75	1,73	32,44	27,35	32,8	56,5	54612,5	-7,05318	110,42522
	Polycrystalline	18,15	1,72	31,21	19,03					
6/26/2026 11:00:33	Monocrystalline	18,42	1,12	20,63	17,4	34,1	53,3	54612,5	-7,0532	110,42518
	Polycrystalline	18,29	1,03	18,87	11,51					
6/26/2026 12:00:34	Monocrystalline	18,36	1,38	25,26	21,3	35,3	49	54612,5	-7,05316	110,42522
	Polycrystalline	17,84	1,38	24,54	14,96					
6/26/2026 13:00:35	Monocrystalline	18,52	0,96	17,69	14,92	36,3	48,6	54612,5	-7,05317	110,42521
	Polycrystalline	18	0,84	15,14	9,23					
6/26/2026 14:00:36	Monocrystalline	18,01	1,25	22,51	18,98	35,5	50,3	54612,5	-7,05314	110,42519
	Polycrystalline	17,14	1,15	19,65	11,98					
6/26/2026 15:00:37	Monocrystalline	13,19	0,34	4,54	22,37	35,5	51,3	9339,17	-7,05315	110,42523
	Polycrystalline	8,88	0,19	1,7	6,05					
6/26/2026 16:00:38	Monocrystalline	8,07	0,18	1,45	13,83	32,3	57,7	4825,83	-7,05314	110,42527
	Polycrystalline	7,92	0,15	1,21	8,36					
6/26/2026 17:00:39	Monocrystalline	8,18	0,17	1,39	16,97	31,8	60,3	3773,33	-7,05311	110,42526
	Polycrystalline	7,97	0,15	1,22	10,75					
Minimal	Monocrystalline			1,39						
	Polycrystalline			1,21						
Maksimal	Monocrystalline			32,44						
	Polycrystalline			31,21						
Rata - rata	Monocrystalline			17,204						
	Polycrystalline			15,59						

Berdasarkan data hasil pengujian dengan menggunakan mika warna tua (hijau) sebagai penutup panel, panel surya monocrystalline tetap menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan polycrystalline dalam hal daya dan efisiensi. Daya maksimum yang dihasilkan oleh panel monocrystalline mencapai 32,44 Watt dengan efisiensi tertinggi sebesar 27,35%. Sementara itu, panel polycrystalline menghasilkan daya maksimum sebesar 31,21 Watt dengan efisiensi tertinggi sebesar 19,03%.

Rata-rata daya yang dihasilkan oleh panel monocrystalline sebesar 17,20 Watt dengan efisiensi rata-rata 19,51%, sedangkan pada panel polycrystalline rata-rata daya yang dihasilkan sebesar 15,59 Watt dengan efisiensi rata-rata 11,98%. Meskipun selisihnya tidak terlalu besar karena adanya penurunan intensitas cahaya akibat penggunaan mika, panel monocrystalline tetap lebih unggul dalam mengubah energi cahaya menjadi listrik.

Selain itu, pada beberapa waktu dengan intensitas cahaya tinggi, panel monocrystalline masih mampu menghasilkan daya dan efisiensi yang lebih baik dibandingkan polycrystalline. Faktor suhu dan kelembapan juga turut memengaruhi performa panel, namun panel monocrystalline tetap menunjukkan performa yang lebih stabil.

Secara keseluruhan, pada pengujian dengan mika warna tua ini, panel monocrystalline tetap lebih unggul dibandingkan polycrystalline dalam hal daya keluaran dan efisiensi, sehingga lebih direkomendasikan untuk digunakan dalam kondisi serupa.



Gambar 21. Kardus Setelah Dipasang

Pada gambar 5.diatas Pengujian panel surya monocrystalline dan polycrystalline dengan penutup kardus yang dipasang 50% sebagai media penghalang cahaya.

Tabel 4. Perbandingan Hari Kesepuluh (Menggunakan Mika Penghalang Kardus)

Waktu	Jenis	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	Efisiensi (%)	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Intensitas Cahaya	Latitude	Longitude
6/27/2027 08:00:30	Monocrystalline	6,6	0,88	5,8	6,75	29,4	70,9	39628,33	-7,0532	110,42524
	Polycrystalline	7,13	1,18	8,44	7,1					
6/27/2027 09:00:31	Monocrystalline	6,52	0	0	0	32,5	59,8	20994,17	-7,05313	110,42525
	Polycrystalline	6,93	0	0	0					
6/27/2027 10:00:32	Monocrystalline	6,67	0	0	0	31,9	60,3	54612,5	-7,05313	110,42523
	Polycrystalline	7,2	0,34	2,48	1,51					
6/27/2027 11:00:33	Monocrystalline	6,52	0	0	0	34,2	54,7	54612,5	-7,05328	110,42515
	Polycrystalline	7,04	0,15	1,08	0,66					
6/27/2027 12:00:34	Monocrystalline	6,65	0	0	0	35,5	52,5	54612,5	-7,05317	110,42524
	Polycrystalline	7,11	0	0	0					
6/27/2027 13:00:35	Monocrystalline	6,38	0	0	0	33,3	56,9	26158,33	-7,05317	110,4252
	Polycrystalline	6,95	0,54	3,72	4,73					
6/27/2027 14:00:36	Monocrystalline	6,64	0	0	0	35	56	54612,5	-7,05317	110,42522
	Polycrystalline	7,13	0	0	0					
6/27/2027 15:00:37	Monocrystalline	6,52	0	0	0	35,9	54,3	40362,5	-7,05316	110,42522
	Polycrystalline	7,04	0	0	0					
6/27/2027 16:00:38	Monocrystalline	5,63	0	0	0	32,5	61,7	9936,67	-7,05321	110,42517
	Polycrystalline	6,85	0	0	0					
6/27/2027 17:00:39	Monocrystalline	3,13	0,15	0,48	28,09	30,8	69,1	784,17	-7,05315	110,42528
	Polycrystalline	5,87	0	0	0					
Minimal	Monocrystalline			0						
	Polycrystalline			0						
Maksimal	Monocrystalline			5,8						
	Polycrystalline			8,44						
Rata - rata	Monocrystalline			0,628						
	Polycrystalline			1,57						

Berdasarkan data hasil pengujian dengan menggunakan setengah penutup kardus, performa panel surya mengalami penurunan yang signifikan, baik pada jenis monocrystalline maupun polycrystalline. Daya maksimum yang mampu dihasilkan oleh panel monocrystalline hanya sebesar 5,8 Watt dengan efisiensi tertinggi 28,09%, sedangkan panel polycrystalline menghasilkan daya

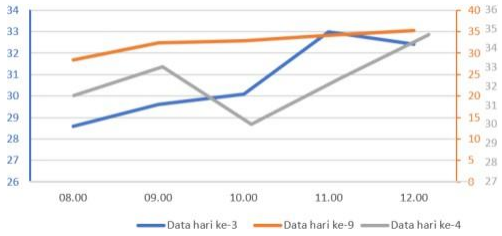
maksimum 8,44 Watt dengan efisiensi tertinggi 7,1%.

Rata-rata daya yang dihasilkan oleh panel monocrystalline sebesar 0,63 Watt dengan efisiensi rata-rata yang sangat rendah. Sementara itu, panel polycrystalline juga menunjukkan rata-rata daya hanya 1,57 Watt, yang juga sangat rendah.

Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan kardus sebagai penutup sangat menghambat masuknya cahaya ke permukaan panel, sehingga kinerja kedua jenis panel menjadi sangat menurun. Efek penutupan ini menyebabkan panel tidak mampu mengubah energi cahaya menjadi energi listrik secara optimal, bahkan banyak titik pengujian yang menghasilkan daya nol.

Secara keseluruhan, baik panel monocrystalline maupun polycrystalline mengalami penurunan kinerja yang signifikan pada pengujian dengan setengah penutup kardus ini. Panel polycrystalline sedikit lebih unggul dalam daya maksimum, namun secara umum kedua panel tidak efektif untuk menghasilkan daya dalam kondisi ini.

Pengaruh Suhu dan Kelembapan Terhadap Keluaran Daya

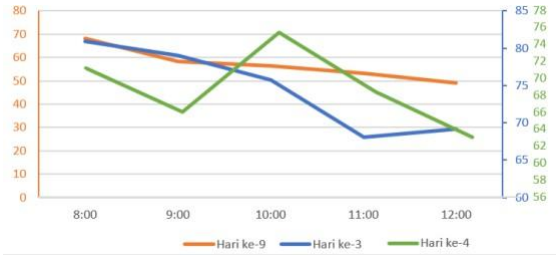


Gambar 22. Grafik Suhu

Analisis dilakukan terhadap dua jenis panel surya, yaitu monocrystalline dan polycrystalline, dengan menghitung nilai korelasi (r) antara suhu dan efisiensi pada tiga hari berbeda.

Hari Ketiga
Monocrystalline: r ≈ -0.724
Korelasi negatif cukup kuat → Efisiensi menurun seiring kenaikan suhu.
Polycrystalline: r ≈ -0.112
Korelasi negatif sangat lemah → Efisiensi hampir tidak terpengaruh oleh suhu.
Hari Kesembilan
Monocrystalline: r ≈ -0.289
Korelasi negatif lemah → Ada kecenderungan penurunan efisiensi, tapi tidak signifikan.
Polycrystalline: r ≈ -0.070
Korelasi sangat lemah → Suhu hampir tidak memengaruhi efisiensi.

Hari Keempat
Monocrystalline: r ≈ -0.916
Korelasi negatif sangat kuat → Kenaikan suhu menyebabkan penurunan efisiensi yang drastis.
Polycrystalline: r ≈ -0.942
Korelasi negatif sangat kuat → Efisiensi menurun tajam seiring peningkatan suhu.



Gambar 22. Grafik Kelembapan

Pengamatan dilakukan pada dua jenis panel surya yaitu monocrystalline dan polycrystalline dengan menghitung koefisien korelasi (r) antara kelembapan udara dan efisiensi panel.

Hari Ketiga
Monocrystalline: r ≈ +0.532
Korelasi positif sedang → Efisiensi meningkat saat kelembapan naik, tetapi pengaruhnya tidak terlalu kuat.
Polycrystalline: r ≈ +0.516
Korelasi positif sedang → Pola serupa, efisiensi naik seiring kelembapan, namun efeknya sedang.

Hari Kesembilan
Monocrystalline: r ≈ +0.586
Korelasi positif sedang → Kelembapan yang lebih tinggi cenderung meningkatkan efisiensi.
Polycrystalline: r ≈ +0.707
Korelasi positif cukup kuat → Efisiensi cukup sensitif terhadap peningkatan kelembapan.

Hari Keempat
Monocrystalline: r ≈ +0.673
Korelasi positif cukup kuat → Kelembapan tinggi berkorelasi dengan peningkatan efisiensi.
Polycrystalline: r ≈ +0.734
Korelasi positif kuat → Peningkatan kelembapan berdampak signifikan terhadap efisiensi panel.

Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis korelasi antara suhu dan efisiensi panel surya, diperoleh bahwa suhu memiliki pengaruh negatif terhadap efisiensi baik pada panel monocrystalline maupun polycrystalline. Semakin tinggi suhu yang diterima panel, efisiensi cenderung mengalami penurunan. Pada panel monocrystalline, korelasi antara suhu dan efisiensi bervariasi mulai dari kategori lemah hingga sangat kuat, menunjukkan bahwa peningkatan suhu umumnya berdampak negatif terhadap kinerjanya. Hal yang sama juga terjadi pada panel polycrystalline, meskipun kekuatan

korelasinya bervariasi dan pada beberapa hari pengujian menunjukkan korelasi yang lebih lemah. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa suhu tinggi menghambat efisiensi kerja panel surya.

Sementara itu, hasil analisis korelasi antara kelembapan dan efisiensi menunjukkan adanya hubungan positif untuk kedua jenis panel. Efisiensi panel cenderung meningkat saat kelembapan udara lebih tinggi. Pada panel monocrystalline, korelasi antara kelembapan dan efisiensi berada dalam kisaran sedang hingga cukup kuat, meskipun tidak selalu signifikan. Sedangkan pada panel polycrystalline, korelasi yang ditunjukkan umumnya sedikit lebih tinggi dibandingkan monocrystalline, menandakan bahwa panel jenis ini lebih responsif terhadap kondisi kelembapan tinggi. Secara keseluruhan, kelembapan udara memberikan pengaruh positif terhadap efisiensi panel surya, terutama untuk jenis polycrystalline.

Kendala

Pengujian Tanpa Penghalang (15–21 Juni 2025):
15 Juni: Gangguan GPS NEO-6M (sulit mengunci sinyal).
16 Juni: Sensor DHT22 eror, perlu diganti.
17 Juni: Sensor BH1750 tidak konsisten membaca intensitas cahaya.
18 Juni: Cuaca mendung → arus panel rendah, efisiensi menurun.
19 Juni: DHT22 kembali eror.
20 Juni: ESP32 mengalami overheat, pengujian dilakukan manual dengan adaptor eksternal.
21 Juni: Tidak ada kendala.

Pengujian Dengan Penghalang (25–27 Juni 2025):
25 Juni: Sensor BH1750 tidak stabil lagi meskipun sempat normal.
26 & 27 Juni: Pengambilan data berjalan lancar tanpa gangguan.

Kesimpulan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel monocrystalline memiliki performa yang lebih unggul dibandingkan polycrystalline. Monocrystalline mampu menghasilkan daya maksimum hingga 27,25 Watt dan efisiensi tertinggi sebesar 91,39%, sedangkan polycrystalline hanya mencapai 21,27 Watt dengan efisiensi 51,58%. Selain itu, panel monocrystalline juga menunjukkan performa yang lebih stabil terhadap perubahan lingkungan.

Pengujian juga dilakukan dengan berbagai jenis penutup (mika warna muda, tua, dan kardus setengah), yang menunjukkan bahwa panel monocrystalline tetap unggul dalam kondisi tertutup semi-transparan. Namun, penggunaan penutup seperti kardus menyebabkan penurunan kinerja drastis pada kedua panel, meskipun polycrystalline sempat mencatat daya maksimum yang lebih tinggi dalam kondisi ini. Secara umum, panel monocrystalline lebih direkomendasikan untuk aplikasi di bawah penutup semi-transparan.

Selain itu, analisis korelasi menunjukkan bahwa suhu berpengaruh negatif terhadap efisiensi panel. Semakin tinggi suhu, efisiensi cenderung menurun. Sementara itu, kelembapan udara memiliki korelasi positif terhadap efisiensi, di mana efisiensi cenderung meningkat saat kelembapan lebih tinggi. Panel polycrystalline menunjukkan respons yang sedikit lebih kuat terhadap kelembapan dibandingkan monocrystalline. Kesimpulannya, panel monocrystalline lebih efisien secara umum dan lebih stabil dalam berbagai kondisi lingkungan, sedangkan suhu dan kelembapan merupakan faktor penting yang memengaruhi kinerja kedua jenis panel.

Saran

Peneliti memberikan beberapa saran pengembangan untuk meningkatkan keandalan dan fungsionalitas sistem monitoring panel surya. Pertama, disarankan untuk menambahkan kipas pendingin guna mencegah overheating pada ESP32 selama pengujian. Selain itu, penggunaan komponen seperti relay atau MOSFET dapat dipertimbangkan untuk memungkinkan kontrol otomatis terhadap aliran daya. Ke depannya, platform monitoring sebaiknya ditingkatkan ke sistem yang lebih profesional seperti ThingsBoard, Blynk, atau Grafana yang menawarkan fitur visualisasi dan pemrosesan data lebih kompleks dibandingkan Google Spreadsheet.

Disarankan pula agar durasi pengujian diperpanjang hingga beberapa bulan untuk mengevaluasi performa panel dalam berbagai musim, sehingga analisis degradasi dan daya tahan panel menjadi lebih komprehensif. Penelitian selanjutnya juga sebaiknya mengkaji lebih dalam pengaruh bayangan parsial terhadap efisiensi panel, dengan variasi jenis dan posisi bayangan. Selain itu, disarankan untuk menyertakan jenis panel lain seperti thin-film, bifacial, atau perovskite agar hasil penelitian menjadi lebih luas dan aplikatif. Terakhir, desain perangkat perlu dibuat lebih modular dan tahan terhadap cuaca agar dapat digunakan langsung di lapangan tanpa memerlukan modifikasi tambahan.

Daftar Pustaka

1. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Matahari untuk PLTS di Indonesia," Kementerian ESDM. Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: https://www.esdm.go.id/id/media- center/arsip-berita/matahari-untuk-plts- di-indonesia.
2. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, " Punya Potensi Pasar Besar, Penggiat PLTS di Indonesia Diminta Tak Keluar Gelanggang," Kementerian ESDM. Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: https://www.esdm.go.id/id/media- center/arsip-berita/punya-potensi-pasar- besar-penggiat-plts-di-indonesia- diminta-tak-keluar-gelanggang.
3. S. Prayogi, "Sejarah dan Konsep Teori Sel Surya." [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/374509124.
4. M. Anggara and W. Saputra, "Analisis Kinerja Sel Surya Monocrystalline dan Polycrystalline di Kabupaten Sumbawa NTB," vol. 14, no. 1, pp. 7–12.
5. D. Dahliya, S. Samsurizal, and N. Pasra, "Efisiensi Panel Surya Kapasitas 100 Wp Akibat Pengaruh Suhu Dan Kecepatan Angin," *SUTET*, vol. 11, no. 2, pp. 71–80, Dec. 2021, doi: 10.33322/sutet.v11i2.1551.
6. Humas Universitas Airlangga, "Efek Peak Sun Hours pada Produktivitas Energi Listrik Sebuah PLTS," Universitas Airlangga. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: https://unair.ac.id/efek-peak-sun-hours- pada-produktivitas-energi-listrik- sebuah-plts.