

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian mengenai kinerja panel surya telah dilakukan oleh berbagai peneliti sebelumnya sebagai dasar pengembangan teknologi energi terbarukan di Indonesia. Rozak et al. [3] menganalisis efisiensi panel surya monocrystalline, polycrystalline, dan thin film dalam berbagai kondisi cuaca di Indonesia, dan menemukan bahwa monocrystalline memiliki efisiensi tertinggi di bawah sinar matahari langsung, sementara thin-film lebih stabil dalam kondisi berawan.

Nugroho dan Isyanto [4] membandingkan performa panel monocrystalline dan thin-film, dan menyimpulkan bahwa monocrystalline unggul dari segi efisiensi namun membutuhkan biaya investasi lebih tinggi. Atikah et al. meneliti pengaruh suhu terhadap daya output pada panel surya monocrystalline dan polycrystalline, dan menemukan bahwa peningkatan suhu berdampak negatif terhadap kinerja panel. Penelitian mereka menunjukkan bahwa saat suhu meningkat, tegangan dan daya yang dihasilkan panel menurun secara signifikan pada kedua jenis panel [5].

Referensi-referensi tersebut menjadi dasar dalam merancang dan menganalisis perbandingan panel surya dengan variasi jenis material dan pengaruh lingkungan terhadap efisiensinya.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 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].

2.2.2 Sel Surya

Sel surya merupakan perangkat elektronik yang berfungsi mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik melalui proses efek fotovoltaiik, sehingga dikenal pula sebagai *photovoltaic cell (PV)* [6]. Perangkat ini memanfaatkan material semikonduktor, seperti silikon murni, yang mampu menghasilkan arus listrik ketika terkena cahaya matahari. Mekanisme ini terjadi karena foton yang datang menumbuk elektron pada lapisan sambungan p–n, menyebabkan perpindahan muatan yang menghasilkan arus listrik [7].

Dalam kondisi standar, satu sel surya hanya menghasilkan tegangan sekitar 0,6 volt tanpa beban. Oleh karena itu, beberapa sel harus disusun secara seri agar menghasilkan tegangan yang lebih tinggi. Misalnya, 36 sel surya yang dirangkai secara seri dapat menghasilkan tegangan sekitar 16–18 volt, cukup untuk mengisi aki 12V [8]. Gabungan beberapa sel dalam satu unit disebut panel surya atau modul surya, dan susunan panel yang lebih besar dapat digunakan untuk menyuplai kebutuhan listrik rumah tangga maupun industri ringan [8].

Teknologi sel surya terus berkembang, dan saat ini secara umum diklasifikasikan menjadi tiga generasi utama. Generasi pertama mencakup sel surya berbasis kristalin silikon (*monocrystalline* dan *polycrystalline*), yang banyak digunakan karena efisiensinya relatif tinggi dan ketahanannya baik [9]. Generasi kedua menggunakan material *thin-film* seperti CdTe dan CIGS, menawarkan biaya produksi lebih rendah namun dengan efisiensi lebih rendah pula. Sedangkan generasi ketiga mencakup teknologi baru seperti *perovskite*, *dye-sensitized solar cells (DSSC)*, dan *organic PV (OPV)*, yang menjanjikan efisiensi tinggi dengan fleksibilitas desain, meskipun masih dalam tahap penelitian dan pengembangan [8].

1. Klasifikasi Panel Surya Berdasarkan Generasi

a. Generasi Pertama

Sel surya generasi pertama adalah jenis sel surya yang pertama kali dikembangkan [9] dan masih digunakan hingga saat ini. Material utama dalam pembuatan sel surya generasi ini adalah silikon yang diolah menjadi kristal dengan tingkat kemurnian tinggi, dikenal sebagai *crystalline silicon*. *Crystalline silicon*

sendiri terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu monocrystalline dan polycrystalline [9].

Sel surya monocrystalline dapat dikenali dari tampilan fisiknya yang memiliki warna kebiruan polos tanpa pola atau corak. Jenis ini memiliki efisiensi yang cukup tinggi, berkisar antara 16-17%, bahkan beberapa varian dapat mencapai efisiensi hingga 20% [9]. Selain itu, sel surya monocrystalline memiliki dimensi yang lebih kecil dibandingkan jenis lainnya. Namun, di balik keunggulannya, sel ini memiliki harga yang lebih mahal karena proses pembuatannya yang kompleks. Selain itu, kinerjanya dapat menurun secara signifikan dalam kondisi cuaca berawan, yang menyebabkan efisiensinya berkurang [9].



Gambar 2. 1 Panel Surya Monocrystalline

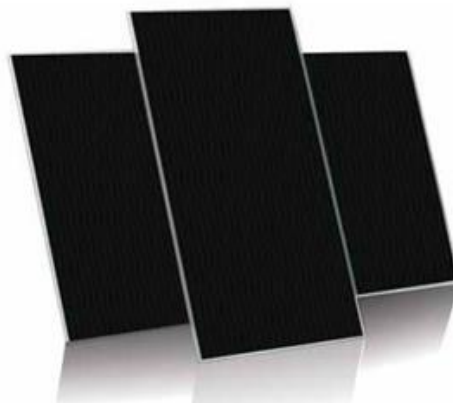
Di sisi lain, sel surya polycrystalline memiliki tampilan yang lebih bercorak dengan perpaduan warna biru tua dan biru muda. Dari segi efisiensi, jenis ini lebih rendah dibandingkan monocrystalline, namun memiliki keunggulan karena tetap dapat menghasilkan listrik meskipun dalam kondisi mendung. Selain itu, biaya produksinya lebih murah, menjadikannya pilihan yang lebih ekonomis. Oleh karena itu, sel surya polycrystalline lebih banyak digunakan di pasaran, terutama untuk sistem pembangkit listrik tenaga surya dalam skala kecil.



Gambar 2. 2 Panel Surya Polycrystalline

b. Generasi Kedua

Sel surya generasi kedua memiliki ketebalan yang jauh lebih tipis dibandingkan dengan generasi pertama, hanya berukuran beberapa mikron saja. Jenis sel surya ini dikenal sebagai sel surya lapisan tipis dan dibuat dari berbagai material seperti silikon amorf (a-Si), cadmium telluride (CdTe), dan Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) [9]. Silikon amorf merupakan bentuk silikon yang lebih sederhana dibandingkan silikon kristal, sedangkan CdTe dan CIGS adalah bahan semikonduktor alternatif yang mampu mengubah energi cahaya matahari menjadi listrik.



Gambar 2. 3 Panel Surya Amorphous

Keunggulan utama dari sel surya generasi kedua terletak pada proses produksinya yang lebih sederhana dan biaya pembuatannya yang lebih rendah dibandingkan generasi pertama. Namun, sel surya ini juga memiliki kelemahan signifikan, terutama dalam hal efisiensi konversi energi yang relatif rendah, berkisar antara 6-8% [9]. Selain itu, beberapa bahan yang digunakan dalam pembuatannya bersifat beracun dan sulit diperoleh [9], sehingga penggunaannya sebagai pembangkit listrik skala besar kurang efektif. Meski demikian, sel surya jenis ini lebih cocok diterapkan pada perangkat elektronik berdaya rendah seperti kalkulator dan jam tangan, di mana kebutuhan energinya tidak terlalu besar.

c. Generasi Ketiga

Sel surya generasi ketiga merupakan inovasi terbaru dalam teknologi sel surya, meskipun hingga kini masih dalam tahap penelitian dan pengembangan [9]. Para ilmuwan terus berupaya menyempurnakan generasi ini dengan tujuan menciptakan panel surya yang memiliki efisiensi tinggi serta proses produksi yang lebih sederhana. Harapannya, sel surya generasi ketiga dapat menggabungkan keunggulan efisiensi yang lebih baik dibandingkan generasi pertama dengan biaya produksi yang lebih terjangkau dibandingkan generasi kedua [9].

Saat ini, terdapat tiga jenis utama sel surya generasi ketiga yang sedang banyak dikembangkan, yaitu perovskite, Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC), dan Organic Photovoltaic (OPV). Perovskite berperan sebagai material elektrolit yang mampu menyerap cahaya matahari dan mengaktifkan muatan positif (hole) serta muatan negatif (elektron). Elektron yang terbentuk kemudian bergerak menuju Elektron Transport Material, di mana ia bertindak sebagai semikonduktor tipe-n. Efisiensi konversi energi dari sel surya berbasis perovskite telah mencapai sekitar 20,2% [9], menjadikannya sebagai salah satu kandidat yang menjanjikan dalam pengembangan teknologi energi surya masa depan.

2. Klasifikasi Panel Surya Berdasarkan Jenis Material dan Teknologi

Selain klasifikasi berdasarkan generasi, panel surya juga dapat dibedakan berdasarkan material utama pembentuk sel serta teknologi manufaktur atau desain strukturalnya. Klasifikasi ini lebih fokus pada karakteristik teknis panel surya yang digunakan secara luas di industri saat ini [10].

a. Berdasarkan Jenis Material

Jenis material merujuk pada bahan semikonduktor utama yang digunakan dalam pembuatan sel surya, yang berpengaruh besar terhadap efisiensi dan biaya produksi panel :

1. Monocrystalline Silicon [11]

- Dibuat dari satu kristal silikon murni .
- Efisiensi tinggi (18%–22%), umur panjang.
- Ciri khas: berwarna hitam dan memiliki sudut potong.

2. Polycrystalline Silicon [12]

- Dibuat dari beberapa kristal silikon yang dilebur bersama.
- Biaya lebih rendah, namun efisiensinya sedikit lebih rendah (15%–18%).
- Ciri khas: warna kebiruan dan tekstur kristal tidak seragam.

3. Thin-Film (Film Tipis) [13]

- Menggunakan lapisan semikonduktor sangat tipis, seperti CdTe atau CIGS.
- Fleksibel dan ringan, cocok untuk aplikasi portabel atau bangunan.
- Efisiensi lebih rendah (sekitar 10%–14%).

4. Perovskite Solar Cells [14]

- Material baru dengan struktur kristal perovskite.
- Menawarkan potensi efisiensi tinggi dan biaya produksi rendah dengan catatan efisiensi laboratorium mencapai hingga 25.7%.
- Masih dalam tahap pengembangan untuk stabilitas jangka Panjang.

b. Berdasarkan Teknologi Panel Surya

Jenis ini merujuk pada desain dan rekayasa sistem sel surya yang mempengaruhi kinerja dan efisiensi panel dalam menangkap cahaya:

1. PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) [15]
 - Teknologi peningkatan dari sel silikon biasa.
 - Menambahkan lapisan pemantul cahaya di belakang sel untuk meningkatkan efisiensi.
2. Bifacial Panels [15]
 - Mampu menyerap cahaya dari kedua sisi (depan dan belakang).
 - Efisiensi lebih tinggi, cocok untuk lokasi dengan banyak pantulan cahaya.
3. Half-cut Cell Technology [16]
 - Sel surya dibelah menjadi dua, mengurangi resistansi dan meningkatkan kinerja.
 - Lebih tahan terhadap shading sebagian.
4. Shingled Cell Technology [16]
 - Sel diatur seperti atap sirap (shingle), mengurangi area mati dan meningkatkan efisiensi.
 - Estetika panel lebih menarik.

Tabel 2. 1 Klasifikasi Perbedaan

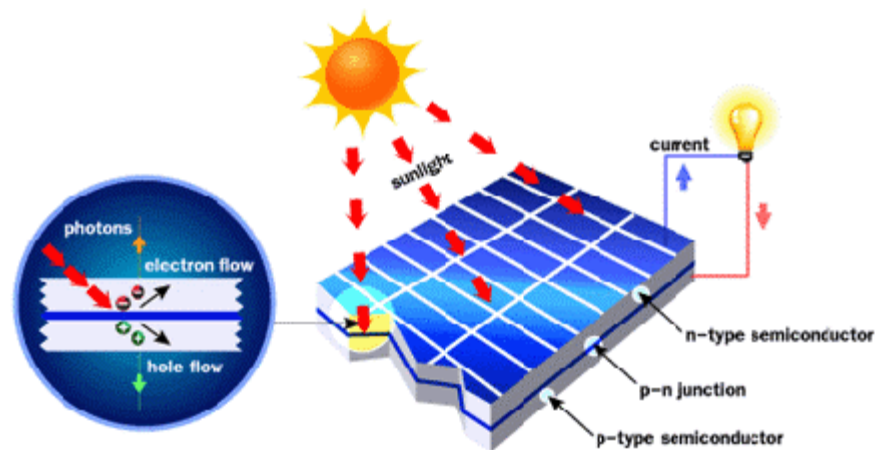
Aspek	Berdasarkan Material	Berdasarkan Teknologi
Fokus Klasifikasi	Jenis Semikonduktor yang digunakan	Cara sel disusun, dirancang, dan dibuat
Contoh	Monocrystalline, Thin Film, Perovskite	PERC, Bifacial, Half-Cut, Shingled
Pengaruh terhadap kinerja	Efisiensi dasar dan biaya produksi	Optimalisasi kinerja dan efisiensi panel
Sifat Umum	Fisik dan kimia bahan	Inovasi desain dan sistem manufaktur

2.3 Prinsip Kerja Panel Surya

Sel surya bekerja berdasarkan prinsip efek fotovoltaiik, yaitu proses di mana energi cahaya diubah menjadi energi listrik. Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, foton (partikel cahaya) yang memiliki energi cukup akan membebaskan elektron dari ikatan atom dalam bahan semikonduktor. Elektron yang terlepas kemudian bergerak bebas, menciptakan arus listrik.

Agar proses ini optimal, semikonduktor yang digunakan harus memiliki celah energi (bandgap) yang memungkinkan foton untuk melepaskan elektron valensi ke pita konduksi. Kehilangan elektron ini juga menghasilkan hole, yaitu lubang bermuatan positif, di tempat asal elektron.

Dalam teknologi sel surya, digunakan dua jenis semikonduktor: tipe-n (kelebihan elektron) dan tipe-p (kelebihan hole). Ketika kedua tipe ini digabungkan, terbentuk sambungan p-n yang menciptakan medan listrik internal. Medan ini memisahkan elektron dan hole ke arah yang berlawanan, sehingga menghasilkan aliran listrik yang bisa dimanfaatkan sebagai energi. [7].



Gambar 2. 4 Cara Kerja Panel Surya [6]

2.4 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Panel Surya

Kinerja panel surya tidak hanya bergantung pada desain dan teknologinya, tetapi juga dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal. Berikut ini beberapa faktor utama yang memengaruhi performa sistem panel surya :

1. Intensitas Cahaya Matahari

Panel surya memperoleh energi dari sinar matahari, sehingga intensitas cahaya sangat menentukan besarnya energi listrik yang dihasilkan. Kondisi cuaca, waktu dalam sehari, serta letak geografis suatu lokasi berperan besar dalam menentukan seberapa banyak sinar matahari yang diterima oleh panel.

2. Suhu Lingkungan dan Permukaan Panel

Suhu tinggi cenderung menurunkan efisiensi kerja panel surya. Semakin panas suhu permukaan panel, semakin tinggi hambatan dalam pergerakan elektron, yang menyebabkan penurunan daya listrik yang dihasilkan.

3. Kualitas Material Panel Surya

Panel surya yang dibuat dengan material berkualitas tinggi umumnya menunjukkan efisiensi konversi energi yang lebih baik dan masa pakai yang lebih lama. Meskipun harganya lebih tinggi, panel dengan kualitas unggul cenderung memberikan hasil yang lebih optimal dalam jangka panjang.

4. Orientasi dan Kemiringan Panel

Penempatan panel yang tepat, baik dari sisi arah hadap maupun sudut kemiringan, sangat memengaruhi jumlah energi matahari yang dapat diserap. Panel yang terpapar langsung oleh sinar matahari tanpa halangan akan bekerja lebih efisien dibandingkan panel yang terhalang oleh bayangan atau tidak diarahkan secara optimal.

5. Kualitas Sistem Penghubung (Kabel dan Konduktor)

Komponen penghubung seperti kabel dan konduktor juga memainkan peran penting dalam menjaga efisiensi sistem. Kabel yang berkualitas rendah atau tidak sesuai spesifikasi dapat menyebabkan rugi-rugi daya dan menurunkan performa keseluruhan sistem panel surya.

2.5 Daya Panel Surya

Daya panel surya adalah jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik dari cahaya matahari dalam satuan waktu. Daya ini dihitung menggunakan rumus :

Rumus perhitungan Daya

$$P = V \times I \quad (1)$$

Dimana:

P = Daya output (*Watt*)

V = Tegangan output dari panel (*Volt*)

I = Arus output dari panel (*Ampere*)

Jenis Daya pada Panel Surya, sebagai berikut :

1. Daya Maksimum (P_{max}) :

Daya tertinggi yang dapat dihasilkan panel saat berada dalam kondisi optimal (radiasi cahaya $\pm 1000 \text{ W/m}^2$, suhu standar 25°C).

2. Daya Nyata (Real-Time Power) :

Daya yang benar-benar dihasilkan panel berdasarkan kondisi lingkungan aktual (suhu, intensitas cahaya, posisi matahari, dsb).

3. Daya Rata-Rata Harian :

Total energi harian (Wh) dibagi waktu efektif penyinaran matahari (jam), menghasilkan rata-rata output daya selama satu hari.

2.6 Efisiensi Sel Surya

Efisiensi sel surya merupakan salah satu parameter penting yang digunakan untuk menilai seberapa baik kinerja suatu panel surya dalam mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Semakin tinggi efisiensi suatu sel surya, maka semakin besar pula daya listrik yang dapat dihasilkan dari jumlah sinar matahari yang diterimanya.

Tingkat efisiensi juga mencerminkan kualitas dari panel surya tersebut. Panel yang memiliki efisiensi tinggi biasanya menghasilkan daya listrik secara optimal dengan kerugian energi (losses) yang relatif kecil. Oleh karena itu, efisiensi menjadi indikator utama untuk menentukan apakah suatu sel surya bekerja dengan performa yang baik atau tidak .

Beberapa faktor utama yang memengaruhi efisiensi sel surya antara lain:

1. Luas permukaan panel surya (A_c), yang berfungsi sebagai area penangkap cahaya matahari,
2. Intensitas radiasi matahari (Insolasi/ I) yang diterima oleh permukaan panel,
3. Daya listrik keluaran (P_{out}) yang dihasilkan oleh panel tersebut.
4. Irradiance (E): Daya per satuan luas dari radiasi matahari pada saat tertentu.
Satuan: Watt/m^2

Secara matematis, efisiensi sel surya dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\eta_{\text{panel Surya}} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad [3] \quad (2)$$

$$\eta_{\text{panel Surya}} = \frac{V_{pv} \times I_{pv}}{I_{rad} \times A} \times 100\% \quad [3] \quad (3)$$

Di mana:

- η = Efisiensi Panel Surya
- P_{out} = Daya Output (W)
- V_{pv} = Tegangan Panel Surya (V)
- I_{pv} = Arus Keluar Panel Surya (A)
- P_{in} = Daya Input (W)
- I_{rad} = Irradiasi Matahari (W/m^2)
- A = Luas Penampangan Panel Surya (m^2)

Nilai iradiasi diperoleh dari hasil konversi pengukuran intensitas cahaya. Umumnya, standar satuan untuk mengukur radiasi matahari adalah watt per meter persegi (W/m^2). Namun, alat pengukur radiasi matahari memiliki keterbatasan, terutama dalam mendeteksi nilai radiasi yang rendah. Oleh karena itu, digunakan pengukuran intensitas cahaya (luminansi) dengan satuan lux (lumen per meter persegi). Untuk menghubungkan kedua jenis pengukuran ini, diperlukan faktor konversi yang efektif antara lux dan W/m^2 . Faktor ini memungkinkan pemanfaatan alat pengukur cahaya dalam mengevaluasi performa panel surya saat iradiasi rendah. Berdasarkan berbagai literatur, nilai luminous efficacy berkisar antara 21 hingga 131 lux per W/m^2 , dengan asumsi umum bahwa 120 lux setara dengan 1

W/m^2 , sehingga $1 \text{ lux} \approx 0,0083 \text{ W/m}^2$. Nilai konversi ini bergantung pada standar acuan dan kemampuan kalibrasi alat pengukur yang digunakan.

Efisiensi suatu sel surya sangat dipengaruhi oleh nilai Peak Sun Hour (PSH), yaitu jumlah waktu efektif dalam satu hari ketika intensitas cahaya matahari setara dengan 1000 W/m^2 . Nilai PSH menjadi faktor penting karena menggambarkan potensi energi matahari yang dapat dimanfaatkan oleh panel surya dalam satu hari. Besarnya nilai PSH sangat bergantung pada kondisi lingkungan di lokasi pemasangan panel surya. Beberapa faktor yang memengaruhi PSH antara lain :

1. penyinaran matahari sepanjang hari,
2. Kecerahan langit atau tingkat intensitas cahaya yang mencapai permukaan panel,
3. Kondisi geografis dan iklim lokal, seperti ketinggian tempat, tingkat awan, dan kelembaban udara.

Dengan kata lain, semakin tinggi nilai PSH pada suatu lokasi, maka semakin besar pula potensi energi yang dapat dikonversi oleh sel surya, sehingga efisiensinya pun cenderung meningkat [17].

Daya input dari cahaya matahari dihitung dari konversi nilai intensitas cahaya (lux) menjadi irradiance menggunakan konstanta [18] :

$$E_{irr} = lux \times 0.0083 \quad (4)$$

Daya *input* keseluruhan :

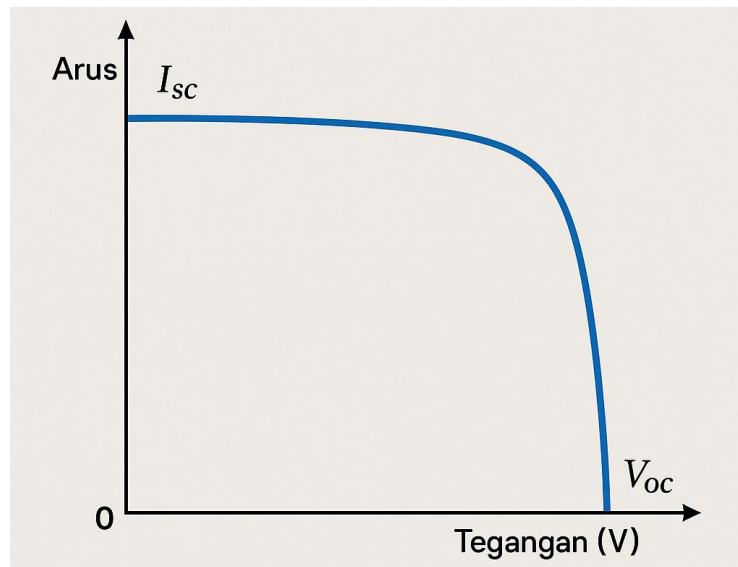
$$P_{in} = E_{irr} \times A \quad (5)$$

Dengan A = luas permukaan panel surya dalam satuan m^2

Maka, Efisiensi panel surya dapat dihitung menggunakan :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

Dimana, η adalah efisiensi panel surya dalam persen %



Gambar 2. 5 Karakteristik pada Sel Surya

2.7 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 :

1. Efisiensi Konversi Energi (%), mengukur seberapa banyak energi matahari yang berhasil diubah menjadi listrik [19].

$$\eta = \frac{P_{out}}{E \times A} \times 100\% \quad [19] \quad (7)$$

Keterangan :

E = Intensitas radiasi matahari (W/m^2)

A = Luas permukaan panel (m^2)

Di mana,

$$P_{out} = V \times I \quad (8)$$

Irradiance (W/m^2), Intensitas radiasi matahari yang diterima oleh panel.

Semakin tinggi irradiance, semakin besar potensi daya yang dapat dihasilkan [20].

2. Suhu Sel Surya, Kenaikan suhu menurunkan tegangan kerja sel surya → efisiensi menurun [19].
3. Fill Factor (FF), ukuran dari “kualitas” sel surya :

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (9)$$

Di mana, V_{mp} , I_{mp} = Tegangan & arus pada titik daya maksimum

V_{oc} = Tegangan saat rangkaian terbuka

I_{sc} = Arus hubung singkat

4. Peak Sun Hours (PSH), Jumlah waktu efektif per hari dengan irradiance setara 1000 W/m². Penting dalam menghitung energi harian [17] :

$$\text{Energi Harian} = \text{Daya Panel (W)} \times \text{PSH (jam)} \quad (10)$$

2.8 Korelasi Suhu dan Kelembapan

Kenaikan suhu pada permukaan panel surya secara signifikan dapat menurunkan kinerja panel, khususnya dalam hal daya keluaran dan efisiensi konversi energi. Peningkatan suhu ini menyebabkan meningkatnya resistansi internal pada material semikonduktor yang menyusun sel surya, sehingga arus dan tegangan keluaran panel mengalami penurunan. Akibatnya, daya listrik yang dihasilkan pun menjadi lebih rendah dari potensi maksimalnya. Jika kondisi ini dibiarkan terus-menerus, panel surya tidak dapat beroperasi secara optimal, terutama pada saat intensitas cahaya matahari tinggi yang seharusnya menjadi momen puncak produksi energi [21].

Peningkatan kelembapan udara berdampak negatif terhadap performa panel surya. Ketika kelembapan udara meningkat, terdapat penurunan pada tegangan terbuka (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}), dan daya listrik yang dihasilkan. Hal ini terjadi karena partikel uap air dalam udara dapat menghalangi sebagian cahaya matahari yang masuk ke permukaan panel, sehingga jumlah energi cahaya yang diterima panel berkurang. Selain itu, tingginya kelembapan juga dapat mempercepat penurunan kualitas material panel dalam jangka panjang, sehingga kinerjanya menurun [22].

Secara rinci, pengaruh kelembapan udara ini menyebabkan penurunan tegangan dan arus secara bertahap seiring naiknya tingkat kelembapan. Dengan kata lain, semakin tinggi kelembapan udara, semakin rendah daya keluaran yang dihasilkan oleh panel surya. Hubungan ini bersifat negatif dan cukup konsisten dalam pengamatan selama penelitian [22].

Penelitian ini menegaskan pentingnya memperhatikan kondisi lingkungan sekitar saat penggunaan panel surya, khususnya di wilayah dengan tingkat kelembapan udara yang tinggi. Kondisi kelembapan yang tidak terkendali dapat menurunkan efisiensi dan hasil energi dari panel surya secara signifikan. Oleh karena itu, perlunya langkah-langkah mitigasi seperti perawatan rutin atau penggunaan pelindung tambahan untuk menjaga performa panel surya tetap optimal dalam jangka panjang [22]

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

$$r = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \cdot \sum(Y - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

Keterangan:

- r = koefisien korelasi
- X = variabel bebas (suhu atau kelembapan)
- Y = variabel terikat (daya panel surya)
- $(X - \bar{X})$ = rata-rata nilai X
- $(Y - \bar{Y})$ = rata-rata nilai Y

Dengan X sebagai suhu atau kelembapan udara, dan Y 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.

Maka :

- a. Hubungan suhu terhadap daya biasanya negatif karena suhu yang terlalu tinggi menurunkan kinerja panel.
- b. Hubungan kelembapan terhadap daya juga umumnya negatif karena kelembapan tinggi bisa menghambat intensitas cahaya.

2.9 Komponen Sistem Monitoring Panel Surya

2.9.1 Panel Surya Monocrystalline dan Polycrystalline

1. Monocrystalline Silicon

Panel surya monocrystalline merupakan jenis panel yang memiliki warna hitam khas dan dibuat dari satu kristal silikon murni. Struktur kristal tunggal ini memungkinkan elektron mengalir lebih leluasa, sehingga menghasilkan efisiensi konversi energi yang tinggi, umumnya sekitar 15–20%. Meskipun proses produksinya lebih rumit dan mahal, panel ini dikenal tahan lama serta tetap bekerja cukup baik dalam kondisi cuaca mendung. Pada penelitian ini digunakan panel surya monocrystalline dengan ukuran $45,1 \times 2,5 \times 58$ cm.



Gambar 2. 6 Monocrystalline

2. Polycrystalline Silicon

Jenis polycrystalline memiliki tampilan berwarna biru tua dan terbentuk dari beberapa kristal silikon yang digabung. Karena tidak melalui proses pemurnian lanjutan, efisiensinya lebih rendah dibandingkan monocrystalline, sekitar 13–16%. Namun, panel ini lebih murah dan proses produksinya lebih sederhana, sehingga cocok untuk pengguna dengan anggaran terbatas atau untuk keperluan edukasi [23]. Pada penelitian ini digunakan panel surya polycrystalline dengan ukuran $67 \times 2.5 \times 54$ cm.



Gambar 2. 7 Polycrystalline

Baik monocrystalline maupun polycrystalline menggunakan silikon sebagai bahan utama. Pada monocrystalline, silikon diproses menggunakan metode Czochralski untuk menghasilkan kristal tunggal, lalu dipotong menjadi wafer dan melalui berbagai tahapan untuk membentuk sel surya. Sedangkan polycrystalline tidak melalui proses pemurnian tersebut dan menghasilkan bentuk kristal yang lebih beragam [23].

Tabel 2. 2 Perbandingan dan Kekurangan Panel Surya

Aspek	Monocrystalline	Polycrystalline
Efisiensi	Lebih tinggi (15–20%)	Lebih tinggi (13–16%)
Daya tahan	Tahan lama	Cukup baik

Biaya	Lebih mahal	Lebih ekonomis
Proses produksi	Kompleks dan menghasilkan lebih banyak limbah	Sederhana dan lebih ramah biaya
Kinerja suhu tinggi	Cenderung menurun, tapi masih stabil	Juga menurun, namun lebih signifikan

Pemilihan jenis panel surya harus disesuaikan dengan kebutuhan. Jika mengutamakan efisiensi dan keandalan jangka panjang, maka monocrystalline adalah pilihan terbaik. Namun, jika terdapat kendala biaya atau digunakan dalam skala kecil, panel polycrystalline bisa menjadi alternatif yang tepat.

2.9.2 Sensor Suhu dan Kelembapan DHT22

DHT22 merupakan sensor digital yang mampu mengukur suhu dan kelembapan secara bersamaan dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi. Keunggulan utama dari sensor ini adalah kemampuannya untuk memberikan data suhu dan kelembapan dalam satu perangkat, sehingga tidak memerlukan dua sensor terpisah [24].

Sensor ini tersedia dalam bentuk komponen lepas maupun dalam modul siap pakai untuk mikrokontroler seperti Arduino. Modul DHT22 umumnya sudah dilengkapi dengan papan PCB dan resistor internal, sehingga pengguna tidak perlu melakukan konfigurasi tambahan seperti pemasangan pull-up resistor.

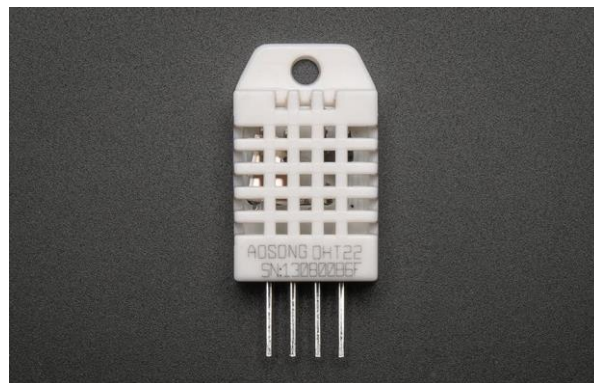
DHT22 memiliki tiga pin utama: VCC, GND, dan Data, sementara pin keempat biasanya tidak digunakan. Tata letak pin-nya identik dengan DHT11, sehingga keduanya dapat saling diganti dalam suatu rangkaian tanpa perlu mengubah desain fisik maupun konfigurasi pin [24]. Spesifikasi Sensor Suhu dan Kelembapan DHT22 :

Tabel 2. 3 Spesifikasi Sensor Suhu dan Kelembapan DHT22

Parameter	Spesifikasi
Tegangan kerja	3,3V hingga 6V
Arus konsumsi	sekitar 2,5 mA saat pengambilan data

Sinyal keluaran	digital terkalibrasi
Rentang pengukuran suhu	-40°C hingga 125°C
Akurasi suhu	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pada suhu 25°C
Resolusi suhu	0,1°C
Rentang kelembaban	0% hingga 100% RH
Akurasi kelembaban	$\pm 2-5\%$ RH (pada suhu 0–50°C)
Resolusi kelembaban	0,1% RH
Frekuensi pembacaan data	2 Hz (dua kali per detik)

Dengan kombinasi fitur ini, DHT22 sangat cocok digunakan dalam berbagai proyek monitoring lingkungan yang memerlukan ketelitian dan kemudahan integrasi.



Gambar 2. 8 DHT22

2.9.3 Sensor Arus ACS712 20A

ACS712 merupakan modul sensor arus yang umum digunakan untuk memantau dan mengukur aliran arus listrik baik dalam sistem arus searah (DC) maupun arus bolak-balik (AC). Sensor ini dikenal karena kemampuannya dalam mendeteksi arus hingga beberapa ampere dengan tingkat akurasi yang tinggi. Oleh karena itu, ACS712 banyak diaplikasikan dalam berbagai proyek, seperti pemantauan penggunaan energi listrik, sistem proteksi elektronik, serta sistem pengukuran daya baterai [25].

Salah satu kelebihan utama dari sensor ini adalah kemampuannya dalam mereduksi gangguan elektromagnetik dari lingkungan, sehingga memberikan hasil

pengukuran yang stabil dan akurat. Teknologi inti yang digunakan dalam ACS712 adalah Hall Effect dengan karakteristik low-offset linear, yang memungkinkan pengubahan medan magnet menjadi sinyal tegangan [25].

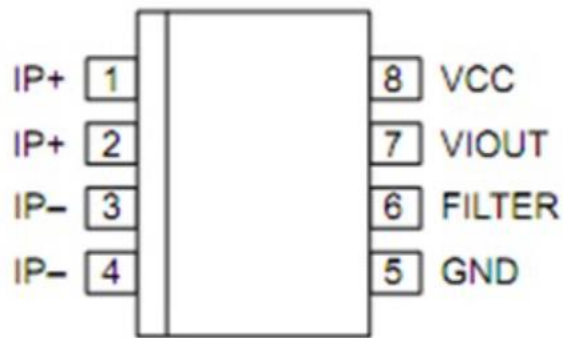
Cara kerja sensor ini melibatkan aliran arus melalui jalur penghantar berbahan tembaga di dalam sensor. Arus tersebut menghasilkan medan magnet yang kemudian ditangkap oleh sensor Hall Effect yang telah tertanam dalam komponen. Medan magnet ini lalu dikonversi menjadi tegangan analog yang sebanding dengan besarnya arus yang mengalir, sehingga memungkinkan pengukuran arus secara langsung dan real-time [25].

Struktur internal dari ACS712 juga dirancang untuk memaksimalkan efisiensi kerja sensor. Jalur penghantar dan elemen Hall Effect ditempatkan secara berdekatan untuk memastikan transmisi medan magnet yang optimal. Ditambah lagi, sensor ini dilengkapi dengan BiCMOS Hall IC, yang berfungsi untuk mempertahankan kestabilan tegangan output sekaligus meningkatkan presisi pengukuran [25].

Sebagai sensor arus berbasis efek Hall, ACS712 dirancang untuk mendeteksi perubahan medan magnet yang ditimbulkan oleh aliran arus listrik, dan mengubahnya menjadi sinyal tegangan yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Sensor ini bersifat fleksibel karena dapat digunakan untuk mendeteksi baik arus DC maupun AC [25].

Dalam dunia industri, ACS712 digunakan untuk memantau konsumsi daya peralatan mesin, mencegah kerusakan akibat arus berlebih, serta meningkatkan efisiensi dan keamanan sistem kelistrikan. Di sektor otomotif, sensor ini membantu dalam pemantauan sistem kelistrikan seperti pengisian baterai dan kinerja motor listrik. Sementara itu, pada aplikasi rumah tangga dan komersial, ACS712 digunakan dalam berbagai peralatan elektronik untuk mengontrol dan menjaga kestabilan arus [25].

Dengan tingkat presisi yang tinggi dan kemampuan deteksi arus yang andal, ACS712 menjadi salah satu komponen penting dalam sistem monitoring modern, baik untuk keperluan eksperimen maupun sistem kendali industri [25].



Gambar 2. 9 Sensor Arus ACS712

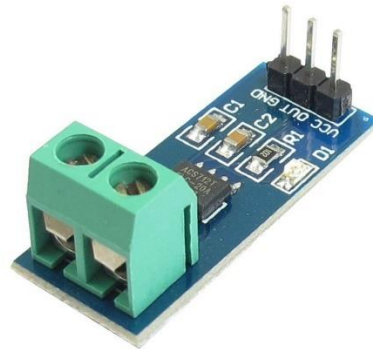
Tabel 2. 4 Pin Sensor Arus ACS712

Number	Name	Description
1 and 2	IP +	Terminals for current being sampled; fused internally
3 and 4	IP -	Terminals for current being sampled; fused internally
5	GND	Signal ground terminal
6	FILTER	Terminal for external capacitor that sets bandwidth
7	VOUT	Analog output signal
8	VCC	Device power supply terminal

Tabel 2. 5 Spesifikasi Sensor Arus ACS712

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Operasi (Vcc)	5 V DC
Kisaran Arus Terdeteksi	$\pm 5\text{A}$, $\pm 20\text{A}$, atau $\pm 30\text{A}$ (tergantung tipe ACS712)
Sensitivitas Output	185 mV/A (ACS712-5A), 100 mV/A (ACS712-20A), 66 mV/A (ACS712-30A)
Tegangan Output (tanpa arus)	Sekitar 2.5 V (arus 0 A)
Jenis Output	Analog (proporsional terhadap arus)

Teknologi Pengukuran	Hall Effect (Efek Hall)
Respons Frekuensi	Hingga 80 kHz
Waktu Respons	5 μ s
Konsumsi Arus Operasional	10 mA (tipikal)
Isolasi Galvanik	2100 VRMS antara bagian pengindra dan output
Suhu Operasional	-40°C hingga +85°C
Dimensi Modul (umum)	Sekitar 31 mm x 13 mm x 12 mm



Gambar 2. 10 Sensor Arus ACS712

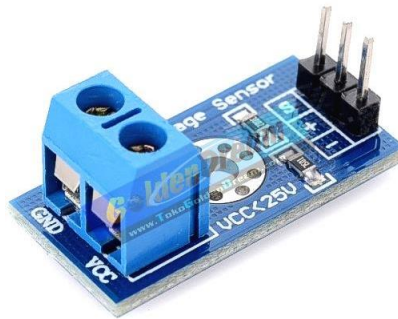
2.9.4 Sensor Tegangan DC 0-25V

Sensor ini bekerja dengan prinsip pembagi tegangan (voltage divider) dan dirancang untuk mengubah tegangan tinggi (hingga 25V) menjadi rentang tegangan analog yang aman dibaca oleh mikrokontroler (biasanya 0–5V atau 0–3.3V) [26].

Tabel 2. 6 Spesifikasi Sensor Tegangan DC 0-25 V

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Input	DC 0–25V (maksimal disarankan < 25V untuk keamanan)
Tegangan Input	0–5V (analog output ke pin ADC mikrokontroler)
Rasio Skala	Biasanya 5:1 (tegangan output = tegangan input $\div$ 5)

Tegangan Operasi	3.3V – 5V (dapat digunakan dengan ESP32 atau Arduino)
Jenis Output	Analog (perlu dikalibrasi untuk hasil yang akurat)
Tipe Sensor	Pembagi tegangan dengan resistor (bukan sensor aktif)
Komponen Utama	Resistor pembagi tegangan (biasanya $R1 = 30k\Omega$, $R2 = 7.5k\Omega$)
Dimensi Modul	$\pm 28 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$
Konektor Input	Terminal screw (untuk kabel input VDC)
Pin Output	Vout (analog ke ADC), GND, dan VCC



Gambar 2. 11 Sensor Tegangan DC 0-25 V

2.9.5 Modul RTC DS3231

Modul DS3231 adalah modul Real Time Clock (RTC) yang digunakan untuk menjaga waktu (jam, menit, detik), tanggal (hari, bulan, tahun), dan hari dalam seminggu secara akurat dan stabil meskipun mikrokontroler dimatikan atau direstart. Modul ini sangat cocok digunakan dalam proyek berbasis mikrokontroler seperti ESP32 atau Arduino untuk aplikasi yang membutuhkan pencatatan waktu seperti data logger, sistem alarm, atau pengontrol otomatis.

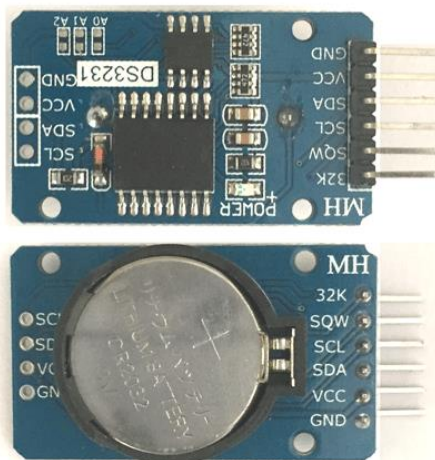
Tabel 2. 7 Spesifikasi RTC DS3231

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Operasi	3.3V – 5.5V (kompatibel dengan ESP32 dan Arduino)
Komunikasi	I2C (alamat default: 0x68)

Akurasi Waktu	± 2 ppm (setara ± 1 menit dalam 1 tahun)
Backup Baterai	CR2032 (3V) untuk menjaga waktu saat tidak ada catu daya utama
Format Waktu	12 jam atau 24 jam
Rentang Tahun	2000 – 2099
Fitur Tambahan	Sensor suhu internal, dua alarm, dan fungsi square wave output
RTC IC	DS3231SN (versi presisi tinggi dari DS1307)
Interface Modul	SDA dan SCL (I2C), VCC, dan GND

Tabel 2. 8 Pin RTC DS3231

Pin	Fungsi
VCC	Catu daya (3.3V atau 5V)
GND	Ground
SDA	Data I2C
SCL	Clock I2C
32K	Output sinyal 32.768 kHz (opsional)
SQW	Output gelombang kotak (square wave, opsional)



Gambar 2. 12 RTC DS3231

2.9.6 Sensor Intensitas Cahaya BH1750

BH1750 merupakan sensor cahaya digital 16-bit yang dirancang untuk mengukur tingkat pencahayaan di lingkungan sekitar. Sensor ini beroperasi menggunakan protokol komunikasi I2C, sehingga mudah diintegrasikan dengan berbagai mikrokontroler seperti ESP32 atau Arduino. Output sensor ini berupa nilai pencahayaan dalam satuan lux, yang merupakan satuan standar internasional (SI) untuk intensitas cahaya [27].

Sensor BH1750 tersedia dalam berbagai varian modul breakout, namun semua varian tetap menggunakan komponen inti yang sama. Umumnya, modul ini sudah dilengkapi dengan pin I2C standar: VCC, GND, SDA, dan SCL. Fitur – fitur utama BH1750[27] :

1. Menggunakan antarmuka I2C untuk komunikasi data. Spektrum respons mendekati sensitivitas mata manusia terhadap cahaya.
2. Memiliki konverter digital internal untuk mengubah pencahayaan menjadi data digital.
3. Dapat mengukur intensitas cahaya dari 1 hingga 65.535 lux.
4. Konsumsi daya rendah dan mendukung mode penghematan energi (power down).
5. Dilengkapi dengan fungsi penyaringan gangguan cahaya dari sumber 50Hz/60Hz.
6. Mendukung dua alamat I2C yang dapat dipilih, memungkinkan penggunaan lebih dari satu sensor pada satu jalur I2C.
7. Tingkat akurasi $\pm 20\%$, cukup baik untuk aplikasi pengukuran umum.
8. Minim terpengaruh oleh radiasi inframerah, sehingga hasil pembacaan lebih stabil.
9. Mendukung dua mode pengukuran: mode kontinu dan mode satu kali (single-shot).

Sensor ini menyediakan dua jenis metode pengukuran:

- a. Mode Kontinu (Continuous Mode): Sensor melakukan pengukuran secara berkelanjutan.

- b. Mode Sekali (One-Time Mode): Sensor hanya melakukan satu kali pembacaan lalu masuk ke mode hemat daya.

Setiap metode dapat digunakan dalam tiga tingkat resolusi yang berbeda [27].

Tabel 2. 9 BH1750

Mode Resolusi	Presisi	Waktu Pengukuran
Resolusi Rendah	± 4 lux	± 16 ms
Resolusi Tinggi	± 1 lux	± 120 ms
Resolusi Tinggi 2	± 0.5 lux	± 120 ms



Gambar 2. 13 BH1750

2.9.7 Modul Step-Down LM2596

LM2596 adalah modul konversi tegangan DC ke DC tipe buck converter yang digunakan untuk menurunkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih rendah dan stabil. Tegangan output ini dapat diatur secara manual melalui potensiometer multiturn yang tersedia pada modul, memungkinkan penyesuaian sesuai kebutuhan perangkat yang akan diberi daya [28].

Modul ini sangat berguna ketika sumber daya yang tersedia memiliki tegangan lebih tinggi dari yang dibutuhkan oleh perangkat elektronik. Misalnya, jika kamu memiliki adaptor 12V namun hanya memerlukan 5V untuk menjalankan mikrokontroler atau sensor, maka modul LM2596 dapat digunakan untuk mengurangi tegangan tersebut tanpa membuang energi secara signifikan [28].

Salah satu kelebihan utamanya adalah kemampuannya menjaga tegangan output tetap stabil, meskipun tegangan input mengalami fluktuasi naik atau turun.

Ini menjadikannya ideal untuk proyek-proyek yang membutuhkan sumber daya DC yang konstan dan andal [28].

Contoh penggunaan [28] :

- Menurunkan tegangan dari 12V ke 5V untuk memberi daya ke ESP32, sensor, atau modul komunikasi.
- Digunakan pada sistem tenaga surya untuk menyesuaikan tegangan dari panel ke perangkat elektronik.
- Mengatur daya untuk perangkat portable, robotika, atau IoT.

Spesifikasi Modul Step Down LM2596 [28] :

Tabel 2. 10 Spesifikasi Modul Step Down LM2596

Spesifikasi	Keterangan
Nama	Step Down Module
IC Regulator	LM2596
Jenis Tegangan	DC ke DC
Tegangan Masukan	3.2 – 40 V
Tegangan Keluaran	1.25 – 35 V
Arus Keluaran Maksimum	3A
Arus Terus Menerus	2.5A ke bawah disarankan
Frequency	65 kHz
Koefisien Konversi	< 90 %
Suhu Kerja	-45 - +85°C
Ukuran	± 43 x 21 x 14 mm



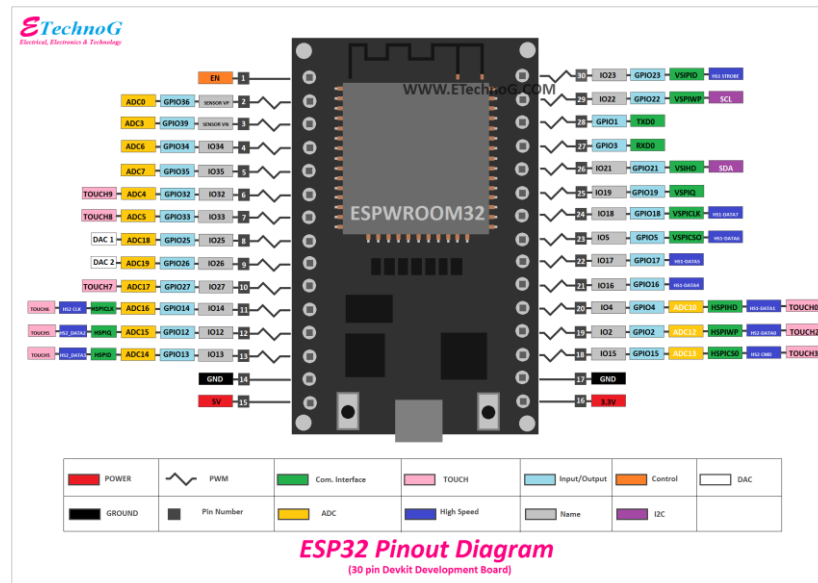
Gambar 2. 14 Modul Step Down LM2596

2.9.8 Mikrokontroler ESP32 V1 (30 Pin)

ESP32 merupakan mikrokontroler dengan fitur Wi-Fi dan Bluetooth bawaan, cocok untuk aplikasi IoT. Versi 30 pin memberikan banyak GPIO dan konektivitas. ESP32 dapat dimanfaatkan untuk melakukan deteksi objek, namun terdapat sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan. Deteksi hanya dapat dilakukan secara efektif apabila kamera dalam kondisi statis, lingkungan memiliki pencahayaan yang memadai, dan objek yang dideteksi berukuran cukup besar. Proses pendeteksian memerlukan waktu sekitar 3 hingga 4 detik per frame, sehingga tidak cocok untuk kebutuhan real-time.

Agar hasil deteksi lebih optimal, disarankan penggunaan kamera dengan resolusi tinggi. Sayangnya, sebagian besar modul kamera yang kompatibel dengan ESP32 masih memiliki resolusi yang terbatas. Hal ini berdampak pada kualitas gambar yang kurang tajam dan berpengaruh terhadap akurasi dalam proses identifikasi objek.

Ke depan, diharapkan proses pengujian sistem deteksi objek dapat menggunakan kamera eksternal yang terhubung melalui USB atau kabel langsung ke komputer. Hal ini bertujuan untuk mengurangi latensi dan meningkatkan kualitas gambar yang diolah. Selain itu, akurasi deteksi dapat ditingkatkan dengan menggunakan algoritma berbasis data set yang lebih spesifik, sehingga sistem dapat lebih fokus mengenali karakteristik objek tertentu secara lebih tepat [29].



Gambar 2. 15 Pin ESP32

Spesifikasi ESP32 :

Tabel 2. 11 Spesifikasi ESP32

Spesifikasi	Keterangan
Prosesor	Dual-core Xtensa LX6, hingga 240 MHz
Memori	520 KB SRAM, opsional PSRAM (hingga 4MB)
Wi-Fi	802.11 b/g/n (2.4 GHz)
Bluetooth	v4.2 + BLE
GPIO	Hingga 36 pin
Antarmuka	UART, SPI, I2C, I2S, PWM, CAN, SD Card
ADC/DAC	12-bit ADC (18 ch), 8-bit DAC (2 ch)
Sensor Internal	Hall sensor, sensor suhu, sentuh kapasitif
Penyimpanan	Flash 4MB (umum), dukung SPI Flash
Tegangan Operasi	3.0 – 3.3V (regulator onboard 5V)
Konsumsi Daya	Aktif: 160–240 mA, Sleep: <10 μ A

2.9.9 PCB dan Resistor

PCB (Printed Circuit Board) adalah papan sirkuit cetak yang berfungsi sebagai fondasi utama dalam perangkat elektronik. Papan ini menghubungkan dan menopang berbagai komponen elektronik melalui jalur konduktif yang terbuat dari

tembaga. PCB memungkinkan aliran listrik antar komponen dengan efisien, menggantikan metode pengkabelan manual yang lebih kompleks [30].

Komponen utama PCB [30] :

1. Substrat (Bahan Dasar): Biasanya terbuat dari bahan isolator seperti FR-4 (fiberglass dengan resin epoksi), substrat memberikan kekuatan mekanis dan isolasi listrik pada PCB.
2. Lapisan Tembaga: Lembaran tembaga tipis yang ditempelkan pada substrat berfungsi sebagai jalur konduktif untuk aliran listrik.
3. Solder Mask: Lapisan pelindung berwarna (umumnya hijau) yang menutupi jalur tembaga untuk mencegah hubungan pendek dan korosi.
4. Silkscreen: Lapisan tinta putih yang digunakan untuk mencetak informasi seperti simbol komponen, label, dan indikator lainnya pada permukaan PCB.

Jenis – jenis PCB [30] :

1. Single-Layer PCB: Memiliki satu lapisan tembaga, digunakan untuk sirkuit sederhana.
2. Double-Layer PCB: Memiliki dua lapisan tembaga di kedua sisi papan, memungkinkan koneksi yang lebih kompleks.
3. Multi-Layer PCB: Terdiri dari tiga atau lebih lapisan tembaga, digunakan dalam perangkat dengan kepadatan sirkuit tinggi seperti komputer dan smartphone.
4. Rigid PCB: Papan kaku yang tidak dapat ditekuk, umum digunakan dalam berbagai perangkat elektronik.
5. Flexible PCB: Papan yang dapat ditekuk, cocok untuk aplikasi yang memerlukan fleksibilitas seperti perangkat wearable.
6. Rigid-Flex PCB: Kombinasi antara rigid dan flexible PCB, digunakan dalam aplikasi yang memerlukan bagian kaku dan fleksibel sekaligus.

2.9.10 Arduino IDE

Arduino IDE (Integrated Development Environment) merupakan software khusus yang digunakan untuk membuat dan menyusun program pada papan pengembangan Arduino. Software ini berperan sebagai media untuk menuliskan,

menyunting, memeriksa, serta mengunggah kode program langsung ke perangkat Arduino [31].

Arduino IDE menyediakan antarmuka editor teks tempat pengguna dapat menulis program yang disebut “Sketch”, yaitu kode sumber dengan ekstensi file .ino. Program ini akan dikompilasi dan diunggah ke papan Arduino untuk dijalankan [31].

Arduino IDE dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Java, dan mendukung penggunaan bahasa C/C++. Selain itu, software ini juga telah dilengkapi dengan berbagai pustaka (library) bawaan yang menyederhanakan pengolahan input dan output, sehingga pengguna bisa lebih mudah mengembangkan fungsionalitas perangkat tanpa harus menulis kode dari awal [31].



Gambar 2. 16 Aplikasi Arduino IDE

2.9.11 Box Komponen

Box Komponen adalah wadah atau tempat yang dirancang untuk menyimpan berbagai jenis komponen elektronik dalam kondisi yang rapi dan terorganisir. Fungsinya adalah untuk mengurangi risiko kerusakan, kehilangan, atau kebingungannya dalam mencari komponen yang diperlukan selama proses perancangan atau perbaikan rangkaian elektronik. Box ini biasanya digunakan oleh teknisi, insinyur, atau individu yang bekerja dengan banyak komponen elektronik kecil. Fungsi dan Manfaat:

1. Pengorganisasian: Box komponen memudahkan pengelompokan berbagai komponen elektronik berdasarkan jenis atau ukuran, seperti resistor, kapasitor, IC, atau konektor.

2. Perlindungan: Komponen-komponen elektronik kecil rentan terhadap kerusakan akibat benturan atau lingkungan yang tidak terjaga. Box komponen memberikan perlindungan dari debu, kelembapan, dan guncangan.
3. Efisiensi Kerja: Dengan komponen yang tertata rapi, pencarian komponen yang dibutuhkan menjadi lebih cepat, sehingga menghemat waktu dan meningkatkan produktivitas.
4. Pencegahan Kehilangan Komponen: Komponen kecil seperti resistor atau IC sering kali hilang jika tidak disimpan dengan baik. Box komponen mencegah hal tersebut dengan menyediakan ruang penyimpanan yang terstruktur.

Box Laci (Drawer Box) merupakan jenis box yang paling umum, terdiri dari beberapa laci kecil untuk menyimpan komponen. Biasanya digunakan untuk komponen yang lebih kecil dan lebih sering diakses. Box Sekat Portabel (Portable Divider Box) box jenis ini memiliki sekat-sekat yang dapat diatur sesuai kebutuhan, sangat cocok untuk membawa komponen ke lokasi kerja atau proyek. Organizer Kit biasanya berbentuk box kompak yang berisi berbagai komponen dasar yang umum digunakan dalam proyek elektronik, seperti dalam kit Arduino atau Raspberry Pi. Modular Storage box ini dapat disusun atau ditumpuk untuk menghemat ruang dan memudahkan penyimpanan dalam laboratorium atau workshop.



Gambar 2. 17 Box Komponen

2.9.12 Modul GPS NEO-6M

GPS NEO-6M adalah modul penerima sinyal satelit yang dikembangkan oleh u-blox, perusahaan asal Swiss yang dikenal dalam bidang teknologi navigasi

dan komunikasi nirkabel. Modul ini mampu menerima sinyal dari beberapa satelit GPS secara simultan untuk menentukan posisi geografis (lintang dan bujur), kecepatan, serta waktu (UTC) dengan akurasi tinggi [32].

Modul ini memiliki sensitivitas tinggi sehingga tetap dapat menangkap sinyal meskipun dalam kondisi lingkungan yang kurang ideal, seperti di antara bangunan atau di bawah naungan pepohonan. Biasanya dilengkapi dengan antena aktif dan memori EEPROM untuk mempercepat proses pencarian satelit saat pertama kali dinyalakan (time to first fix) [32].

NEO-6M banyak digunakan dalam proyek pelacakan kendaraan, sistem monitoring berbasis lokasi, drone, dan aplikasi IoT lainnya. Keunggulan utama modul ini adalah harganya yang terjangkau, kemudahan dalam penggunaan, serta kompatibilitasnya dengan berbagai platform mikrokontroler seperti Arduino, ESP32, dan Raspberry Pi. Karena alasan tersebut, NEO-6M menjadi pilihan populer di kalangan pelajar, pengembang, dan pegiat elektronika DIY.



Gambar 2. 18 GPS NEO-6M

2.9.13 Lampu DC

Lampu DC (Direct Current) adalah jenis lampu yang dirancang untuk bekerja menggunakan arus searah. Arus searah merupakan arus listrik yang mengalir hanya dalam satu arah dan umumnya bersumber dari baterai, adaptor DC, atau sistem tenaga surya. Lampu ini sering digunakan pada sistem off-grid, perangkat elektronik portabel, maupun sebagai indikator dalam sistem monitoring.

Salah satu keunggulan lampu DC adalah efisiensinya yang tinggi. Terutama pada jenis LED (Light Emitting Diode), lampu dapat menghasilkan pencahayaan yang terang dengan konsumsi daya yang rendah. Lampu LED DC juga memiliki

umur pakai yang panjang dan menghasilkan panas yang lebih sedikit dibandingkan lampu konvensional.

Pada sistem monitoring panel surya, lampu DC dapat dimanfaatkan sebagai beban listrik. Misalnya, lampu LED 24V 6W akan menyala saat sistem bekerja dan memberikan gambaran langsung terkait distribusi daya dari panel. Penggunaan lampu ini juga membantu dalam proses pengujian sensor arus dan tegangan, serta sebagai indikator visual apakah sistem menyuplai energi secara normal.

Karakteristik penting dari lampu DC antara lain:

1. Beroperasi pada tegangan tetap (misalnya 5V, 12V, atau 24V),
2. Pentingnya pemasangan polaritas (+ dan -) dengan benar,
3. Konsumsi daya rendah dan ramah energi,

Cocok digunakan pada rangkaian elektronik berbasis microcontroller seperti ESP32.



Gambar 2. 19 Lampu DC

2.9.14 Platform Monitoring Google Spreadsheets

Platform monitoring yang digunakan dalam proyek ini adalah Google Spreadsheets, sebuah layanan lembar kerja daring yang disediakan oleh Google. Google Spreadsheets dipilih karena bersifat gratis, mudah diakses, dan mampu menampung serta menampilkan data secara real-time. Dalam sistem monitoring ini, Google Spreadsheets berfungsi sebagai media penyimpanan data yang dikirim secara otomatis dari mikrokontroler ESP32 melalui jaringan internet. Data yang

dikirim mencakup informasi hasil pembacaan sensor, seperti tegangan, arus, suhu, kelembapan, intensitas cahaya, serta koordinat GPS. Dengan bantuan Google Apps Script, spreadsheet dapat diubah menjadi server sederhana yang menerima permintaan HTTP GET dari ESP32 dan menyimpan data yang diterima langsung ke dalam baris-baris tabel secara otomatis, lengkap dengan penanda waktu. Pengguna dapat memantau dan menganalisis data secara langsung melalui tampilan spreadsheet, bahkan melakukan visualisasi data dalam bentuk grafik atau mengunduhnya untuk keperluan dokumentasi. Keunggulan utama dari platform ini terletak pada kemudahannya dalam integrasi, aksesibilitas tinggi, kemampuan kolaborasi, serta dukungan penyimpanan berbasis cloud yang menjadikannya solusi efektif dan efisien untuk sistem monitoring berbasis IoT seperti pada proyek ini.