

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam melakukan penelitian lebih lanjut perlu dilakukan identifikasi dan pendalaman teori-teori berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu yang relevan, guna untuk membantu dan mengarahkan fokus pada penelitian ini.

- 1) Berdasarkan penelitian yang dilakukan Pamungkas, dkk.2022 dengan judul “Sistem Monitoring Daya Listrik *Photovoltaic* Berbasis Internet Of Things (*IOT*)” yang menunjukkan parameter panel surya untuk daya listrik dan radiasi matahari yang diterima oleh panel surya dapat dimonitor dengan menggunakan sensor yang terhubung dengan mikrokontroler dan memanfaatkan aplikasi *Blynk* untuk mengirimkan data serta untuk memonitoring melalui *smartphone*. Pada penelitian pengembangan ini menggunakan teknik analisis data yang membandingkan hasil dari aplikasi *Blynk* dan hasil pada alat ukur[15].
- 2) Berdasarkan penelitian yang dilakukan Dian Faisal Akbar, dkk.2024 dengan judul “Perancangan Sistem Monitoring Panel Surya Dengan Berbasis Internet Of Things (*IOT*) Menggunakan *Blynk*” di jelaskan bahwa dalam jurnal ini, peneliti bertujuan untuk mengetahui *output* dari panel surya yang digunakan dengan jenis *polikristalin* dan memiliki berkapasitas 50 wp. Pada tahap pengujian alat yang menggunakan sensor INA219 dan *watt meter* didapatkan hasil dengan rata-rata daya harian yaitu sebesar 11,14 *watt*, sedangkan hasil rata-rata yang didapatkan oleh sensor INA219 sebesar 7,77 *watt* dan memiliki rata-rata *error* dengan pembacaan sebesar 25%[16].
- 3) Berdasarkan penelitian yang dilakukan Tri Ongko Priyono dan Guntur Prasetyo.2022 dengan judul “Rancang Bangun Sistem Monitoring Berbasis Berbasis Internet Of Things (*IOT*) Pada Panel Surya 20 WP Menggunakan Arduino Mega 2560”. Di dalam jurnal ini dijelaskan apabila monitoring untuk mengukur tegangan dan arus langsung pada panel, maka tidak akan efisien secara waktu dan tenaga dikarenakan setiap pengukuran diwajibkan

untuk langsung terhadap panel surya tersebut. Maka dari itu, penulis membuat rancang bangun sistem monitoring berbasis *IoT* dengan menggunakan mikrokontroler arduino mega 2560, yang mana sistem ini mampu untuk membaca tegangan, arus, dan daya listrik pada panel surya melalui *smartphone* ataupun komputer agar lebih memudahkan untuk mendapatkan data tanpa perlu mengukur langsung pada panel surya. Selain itu sistem ini juga menggunakan ESP8266 untuk menghubungkan langsung ke jaringan *internet wifi* dan untuk mengukur tegangan dan arus menggunakan sensor ACS712 dan *DC Voltage Sensor* agar hasil dapat ditampilkan pada platform *Blynk*[17].

- 4) Berdasarkan penelitian yang dilakukan Ragil Ardhiansyah, Endryansyah, dan Nur Kholis. 2022 dengan judul “Rancang Bangun Alat Monitoring Gangguan Pada Panel Surya Menggunakan NodeMCU Berbasis Website” dijelaskan panel surya selalu ditempatkan diatas dan di tempat yang luas, sehingga panel surya tidak dapat di patau setiap saat, maka dari itu diperlukan monitoring dan pemantauan jarak jauh untuk mengetahui kondisi dari panel tersebut, panel surya juga dapat mengalami penurunan yang disebabkan oleh adanya gangguan eksternal baik cuaca ataupun tertutup oleh suatu benda. Pada penelitian ini penulis bertujuan untuk merancang alat yang berguna untuk memonitoring gangguan pada panel surya menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 berbasis *website* yang juga dapat memantau panel secara *realtime*. Tujuan dari alat ini adalah untuk meningkatkan efisiensi panel surya dan mendeteksi gangguan yang dapat menurunkan efisiensi panel tersebut[18].

Berdasarkan acuan tinjauan pustaka diatas, penulis menyusun tugas akhir dengan membuat sistem monitoring secara realtime, data logging, serta deteksi dini gangguan berbasis adaptive thershold dalam satu sistem berbais IoT dengan menggunakan komunikasi Blynk, sehingga dapat meningkatkan keandalan respons terhadap kondisi abnormal pada panel surya.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Monitoring dan Deteksi Gangguan Dini Gangguan Pada Panel Surya Berbasis Internet Of Things (*IoT*)

Sistem monitoring dan deteksi dini gangguan pada panel surya berbasis Internet Of Things (*IoT*) adalah suatu sistem yang dikembangkan untuk melakukan pengawasan terhadap kondisi operasional panel surya secara realtime dan dari jarak jauh, disertai dengan mendeteksi adanya gangguan yang berpotensi mempengaruhi kinerja sistem berdasarkan data yang diperoleh dari sensor.

Sistem monitoring berfungsi untuk mengakusisi data parameter pada panel surya yang meliputi tegangan, arus, daya, suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya. Data yang diperoleh selanjutnya dikirimkan melalui jaringan internet berbasis *IoT*. Informasi tersebut kemudian disajikan melalui *website* sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi sistem secara *fleksibel* tanpa terbatas waktu dan lokasi[18].

Di sisi lain, proses deteksi dini gangguan pada sistem ini dilakukan melalui analisis keterkaitan antarparameter yang diukur, seperti efisiensi panel, intensitas cahaya, suhu, dan kondisi lingkungan. Sistem memanfaatkan pendekatan berbasis aturan (*rule-based system*) untuk mengklasifikasikan kondisi panel, apakah berada dalam keadaan normal atau mengalami gangguan, misalnya akibat penumpukan debu, adanya bayangan benda, maupun perubahan kondisi cuaca[18].

2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit energi listrik yang memanfaatkan energi radiasi matahari sebagai sumber energi utama melalui modul fotovoltaik (*photovoltaic module/PV module*). Modul fotovoltaik tersusun atas material semikonduktor, umumnya berbahan dasar silikon, yang mampu mengubah energi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Ketika permukaan sel surya menerima penyinaran, energi foton akan membebaskan elektron pada material semikonduktor sehingga menghasilkan aliran listrik arus searah (*Direct Current* atau *DC*) yang selanjutnya dapat dimanfaatkan secara langsung maupun dikonversi menjadi arus bolak-balik (*Alternating Current* atau *AC*) menggunakan inverter sesuai kebutuhan beban. [19]

PLTS menjadi salah satu teknologi energi terbarukan yang terus dikembangkan sebagai alternatif penyedia energi listrik karena memanfaatkan sumber energi yang tersedia secara alami, tidak menghasilkan emisi selama proses pembangkitan, serta memiliki biaya operasional yang relatif rendah. Selain itu, sistem ini dapat diterapkan pada berbagai skala, mulai dari sistem rumah tangga, fasilitas umum, hingga sektor industri. Di Indonesia, pemanfaatan PLTS juga menjadi solusi yang efektif untuk menyediakan pasokan listrik di wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional maupun pada daerah yang memiliki keterbatasan akses terhadap sumber energi lainnya.

Pada penelitian ini, PLTS berfungsi sebagai sumber energi utama yang menyuplai daya ke sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya digunakan untuk mengisi baterai melalui *Solar Charge Controller* (SCC) serta menyuplai beban berupa inverter 220 W yang digunakan untuk mengoperasikan lampu LED AC 12 W sebagai simulasi pembebanan. Selama proses tersebut, parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, dan daya dipantau secara real-time menggunakan sensor INA219, sedangkan intensitas cahaya diukur menggunakan sensor BH1750. Data hasil pengukuran kemudian diproses oleh ESP32 dan dikirim ke aplikasi Blynk serta Google Spreadsheet untuk mendukung proses monitoring dan deteksi dini gangguan pada panel surya.

Besarnya daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya merupakan hasil perkalian antara tegangan keluaran dan arus keluaran panel. Hubungan tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$P = V \times I$$

Dengan:

P = Daya yang dihasilkan oleh panel surya (*Watt*)

V = Tegangan keluaran dari panel surya (*Volt*)

I = Arus keluaran dari panel surya (*Ampere*)

Pada penelitian ini, nilai daya dihitung secara otomatis berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus yang diperoleh dari sensor INA219. Nilai tersebut digunakan sebagai salah satu parameter utama dalam mengevaluasi kinerja panel surya serta mendukung proses deteksi dini gangguan, seperti shadow maupun cable fault, melalui algoritma yang diterapkan pada mikrokontroler ESP32.

2.2.3 Gangguan pada Panel Surya

Gangguan pada sistem photovoltaic (PV) merupakan salah satu faktor yang dapat memengaruhi keandalan dan kinerja sistem dalam menghasilkan energi listrik. Gangguan dapat terjadi pada berbagai bagian sistem, baik pada sisi DC maupun sisi AC. Oleh karena itu, proses deteksi, klasifikasi, dan lokalisasi gangguan diperlukan untuk mengurangi kehilangan energi serta menjaga keandalan dan keselamatan sistem photovoltaic. Metode deteksi gangguan pada sistem PV dapat dilakukan menggunakan pendekatan visual dan termal maupun berdasarkan parameter kelistrikan yang dihasilkan oleh sistem[20].

Dalam penelitian ini, gangguan yang menjadi fokus pengamatan adalah *shadow* (bayangan) dan *cable fault* (gangguan kabel). Identifikasi kedua kondisi tersebut dilakukan melalui pemantauan beberapa parameter sistem, yaitu tegangan, arus, daya, dan intensitas cahaya. Data dari parameter tersebut digunakan untuk mengetahui perubahan kondisi operasi panel surya dan memberikan indikasi awal apabila terjadi kondisi yang tidak sesuai dengan kondisi operasi normal.

Gangguan *shadow* merupakan kondisi ketika sebagian permukaan panel surya menerima intensitas cahaya yang lebih rendah akibat terhalang oleh objek tertentu. Kondisi tersebut dapat memengaruhi energi yang diterima panel sehingga keluaran listrik panel dapat mengalami penurunan. Sementara itu, *cable fault* merupakan kondisi gangguan pada jalur penghantar atau sambungan kelistrikan yang dapat menghambat penyaluran energi listrik dari panel menuju sistem. Kedua kondisi tersebut memiliki karakteristik perubahan parameter yang berbeda sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam proses deteksi dini gangguan.

Pada sistem yang dirancang, intensitas cahaya digunakan sebagai parameter pendukung untuk membandingkan kondisi lingkungan dengan keluaran listrik panel. Penurunan intensitas cahaya yang diikuti penurunan daya dapat menjadi

indikasi adanya shadow. Sebaliknya, apabila intensitas cahaya berada pada kondisi cukup tetapi arus dan daya yang dihasilkan sangat rendah atau tidak sesuai dengan kondisi pencahayaan, kondisi tersebut dapat digunakan sebagai indikasi adanya gangguan pada jalur kabel. Dengan pendekatan tersebut, sistem monitoring dapat memberikan informasi kondisi panel secara real-time sekaligus memberikan peringatan dini terhadap kemungkinan terjadinya gangguan.

2.2.4 Gangguan Shadow (Bayangan)

Shadow atau bayangan sebagian (*partial shading*) merupakan kondisi ketika sebagian permukaan panel photovoltaic (PV) menerima intensitas radiasi matahari yang berbeda akibat terhalang oleh objek tertentu. Kondisi tersebut dapat menyebabkan ketidaksesuaian karakteristik listrik antarbagian panel dan berdampak pada penurunan energi atau daya keluaran yang dihasilkan oleh PV. Kondisi PV array yang mengalami bayangan sebagian dapat menyebabkan penurunan daya listrik, dengan besarnya penurunan dipengaruhi oleh persentase dan pola bayangan yang mengenai area PV array. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa perubahan kondisi bayangan dapat memengaruhi karakteristik hubungan daya-tegangan ($P-V$) dan menghasilkan variasi titik daya maksimum (*maximum power point*) pada PV array[21].

Selain menyebabkan penurunan daya keluaran, kondisi *partial shading* juga dapat menimbulkan *hotspot* pada sel atau modul yang mengalami bayangan. *Partial shading* memberikan dampak yang signifikan terhadap kinerja sistem PV, termasuk menyebabkan kehilangan daya dan pembentukan *hotspot* pada sel atau modul yang terkena bayangan. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa kondisi *shading fault* dapat dideteksi melalui pengolahan data dari parameter sistem PV, sehingga pemantauan kondisi operasi dapat digunakan sebagai bagian dari proses deteksi gangguan[22].

Pada penelitian ini, gangguan shadow digunakan sebagai salah satu kondisi yang perlu dideteksi oleh sistem monitoring. Keberadaan bayangan pada permukaan panel menyebabkan intensitas cahaya yang diterima panel menjadi lebih rendah sehingga keluaran listrik panel dapat mengalami perubahan. Kondisi

tersebut diamati melalui parameter intensitas cahaya, tegangan, arus, dan daya yang diperoleh dari sensor pada sistem monitoring.

Identifikasi gangguan shadow dilakukan dengan melihat hubungan antara kondisi pencahayaan dan keluaran listrik panel. Apabila intensitas cahaya mengalami penurunan dan pada saat yang sama daya keluaran panel juga mengalami penurunan, kondisi tersebut dapat menjadi indikasi adanya bayangan pada panel. Dengan demikian, parameter intensitas cahaya dapat digunakan sebagai parameter pendukung dalam membedakan kondisi shadow dari gangguan lain pada sistem panel surya.

2.2.5 Gangguan Cable Fault

Cable fault atau gangguan kabel merupakan salah satu kondisi gangguan kelistrikan yang dapat terjadi pada sistem photovoltaic (PV). Gangguan pada penghantar dapat menyebabkan terputusnya jalur penyaluran energi listrik sehingga memengaruhi kinerja dan kemampuan sistem dalam menghasilkan daya. Pada sistem PV, gangguan kelistrikan dapat berupa *open-circuit fault*, *short-circuit fault*, *line-line fault*, *line-ground fault*, serta beberapa jenis gangguan lainnya. Gangguan kelistrikan pada PV array dapat memengaruhi pembangkitan daya, efisiensi, keandalan, dan keselamatan sistem. Penelitian tersebut juga mengembangkan sistem monitoring PV secara daring untuk merekam parameter listrik dan mendeteksi kondisi gangguan pada PV array[23].

Salah satu gangguan yang berkaitan dengan kondisi kabel terputus adalah *open-circuit fault*. *Open circuit* merupakan kondisi terputusnya penghantar yang sebelumnya membawa arus. Pada kondisi tersebut, bagian PV yang mengalami gangguan kehilangan kemampuan untuk menyalurkan arus sehingga nilai arus keluaran mengalami penurunan. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa kondisi *open circuit* dapat diidentifikasi melalui perubahan nilai tegangan dan arus yang diperoleh dari sensor pada PV array[24].

Pada penelitian ini, istilah *cable fault* digunakan untuk menggambarkan gangguan pada jalur kabel atau sambungan antara panel surya dengan sistem berikutnya. Gangguan dapat berupa kabel terputus, koneksi yang tidak sempurna, atau sambungan yang menyebabkan penyaluran arus dari panel menjadi tidak

optimal. Kondisi tersebut dapat mengakibatkan perubahan nilai arus dan daya yang terukur oleh sistem monitoring.

Identifikasi cable fault dilakukan dengan mengamati hubungan antara kondisi pencahayaan dan parameter listrik panel. Ketika intensitas cahaya berada pada kondisi cukup, tetapi arus dan daya keluaran panel berada pada nilai yang sangat rendah atau mendekati nol, kondisi tersebut dapat digunakan sebagai indikasi adanya gangguan pada jalur kabel. Pendekatan ini memungkinkan sistem monitoring memberikan peringatan dini tanpa harus melakukan pemeriksaan fisik terhadap seluruh jalur kabel secara langsung.

2.2.6 Metode Deteksi Gangguan (*Rule-Based Fault Detection*)

Metode *Rule-Based Fault Detection* merupakan salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam sistem diagnosis untuk mendeteksi dan mengidentifikasi gangguan berdasarkan seperangkat aturan logika (*rule-based rules*). Metode ini bekerja dengan membandingkan parameter hasil pengukuran terhadap aturan atau nilai ambang (*threshold*) yang telah ditentukan sebelumnya, sehingga sistem dapat membedakan kondisi operasi normal dan kondisi yang mengindikasikan adanya gangguan. Keunggulan pendekatan ini terletak pada proses implementasinya yang sederhana, kebutuhan komputasi yang rendah, serta kemampuannya memberikan keputusan secara cepat tanpa memerlukan proses pelatihan model sebagaimana pada metode berbasis *machine learning*. Metode *Rule-Based Fault Detection* mampu mendeteksi dan mengklasifikasikan penurunan kinerja sistem fotovoltaik secara efektif melalui penerapan aturan logika berdasarkan parameter operasional sistem. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pendekatan *rule-based* dapat menjadi alternatif yang andal untuk proses deteksi gangguan karena mudah diterapkan, memiliki interpretasi yang jelas, serta mampu membedakan berbagai kondisi operasi sistem fotovoltaik secara sistematis[11].

Pada sistem fotovoltaik, proses deteksi gangguan dilakukan dengan memanfaatkan parameter listrik maupun parameter lingkungan yang menggambarkan kondisi operasi panel surya. Parameter seperti tegangan, arus, daya, intensitas cahaya, dan suhu memiliki hubungan yang erat terhadap performa keluaran panel surya sehingga dapat digunakan sebagai indikator dalam

mengidentifikasi adanya gangguan. Melalui metode *Rule-Based Fault Detection*, setiap parameter dibandingkan dengan aturan logika yang telah ditentukan sebelumnya untuk mengevaluasi apakah sistem masih berada pada kondisi operasi normal atau mengalami penyimpangan. Pendekatan ini memungkinkan proses identifikasi gangguan dilakukan secara cepat karena keputusan diperoleh langsung dari hasil evaluasi terhadap parameter yang dipantau tanpa memerlukan proses komputasi yang kompleks.

Pada penelitian ini, metode *Rule-Based Fault Detection* diterapkan dengan memanfaatkan parameter intensitas cahaya, arus, dan daya sebagai dasar pengambilan keputusan dalam proses identifikasi kondisi sistem. Ketiga parameter tersebut dipilih karena mampu merepresentasikan kondisi operasional panel surya pada saat menghasilkan energi listrik. Proses deteksi dilakukan menggunakan aturan logika (*if-then rules*) yang telah ditentukan berdasarkan karakteristik keluaran panel surya. Sistem akan mengevaluasi setiap parameter hasil monitoring secara *real-time* dan selanjutnya mengklasifikasikan kondisi panel surya ke dalam tiga kategori, yaitu *NORMAL*, *SHADOW*, dan *CABLE FAULT*.

Pada metode *Rule-Based Fault Detection* identifikasi kondisi panel surya dilakukan melalui evaluasi parameter intensitas cahaya, arus, dan daya yang selanjutnya digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi sistem ke dalam kategori, yaitu *NORMAL*, *SHADOW*, dan *CABLE FAULT*, berdasarkan aturan logika (*rule-based rules*) yang memanfaatkan parameter intensitas cahaya, arus, dan daya. Kondisi *NORMAL* ditetapkan ketika ketiga parameter tersebut masih berada pada rentang operasi yang sesuai sehingga panel surya bekerja sebagaimana mestinya. Pada kondisi ini, sistem hanya melakukan proses monitoring dan pencatatan data tanpa memberikan notifikasi gangguan kepada pengguna. Kondisi *SHADOW* diidentifikasi apabila intensitas cahaya yang diterima panel surya berada di bawah nilai ambang yang telah ditentukan dan diikuti dengan penurunan daya keluaran panel surya. Kombinasi kedua parameter tersebut menunjukkan adanya penurunan energi yang diterima panel akibat tertutup bayangan, sehingga sistem mengubah status menjadi *SHADOW* dan mengirimkan notifikasi melalui aplikasi Blynk. Sementara itu, kondisi *CABLE FAULT* ditentukan ketika intensitas cahaya masih

berada pada kondisi tinggi, tetapi arus keluaran panel surya mendekati nol. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa energi matahari masih tersedia, namun tidak dapat disalurkan menuju beban atau pengendali pengisian akibat adanya gangguan pada jalur penghantar atau koneksi kabel. Apabila kondisi ini terdeteksi, sistem akan mengubah status menjadi *CABLE FAULT* serta mengirimkan notifikasi kepada pengguna melalui aplikasi Blynk sehingga tindakan penanganan dapat segera dilakukan.

Tabel 2. 1 Tabel *Rule*

Kondisi	Aturan Logika	Keterangan
NORMAL	Tidak memenuhi kondisi <i>SHADOW</i> maupun <i>CABLE FAULT</i>	Panel surya beroperasi normal dan tidak terdapat indikasi gangguan.
<i>SHADOW</i>	$\text{Lux} < \text{LUX_SHADOW_THRESHOLD}$ dan $\text{Power} < \text{POWER_SHADOW_THRESHOLD}$	Terjadi penurunan intensitas cahaya yang menyebabkan daya keluaran panel surya menurun akibat bayangan.
<i>CABLE FAULT</i>	$\text{Lux} > \text{LUX_BRIGHT_THRESHOLD}$ dan $\text{Current} < \text{CURRENT_FAULT_THRESHOLD}$	Intensitas cahaya tinggi tetapi arus mendekati nol, mengindikasikan adanya gangguan pada jalur penghantar atau koneksi.

Pada Tabel 2.1 ditunjukkan aturan logika (*rule-based rules*) yang digunakan sebagai dasar dalam proses identifikasi kondisi panel surya. Pendekatan ini diadaptasi dari metode *rule-based* yang digunakan oleh Severiano et al. (2026) dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan kondisi *underperformance* pada sistem

photovoltaic berdasarkan evaluasi parameter operasi terhadap kondisi atau batas yang telah ditentukan. Dalam penelitian ini, konsep tersebut disesuaikan dengan karakteristik sistem monitoring yang digunakan, yaitu dengan memanfaatkan parameter intensitas cahaya (*lux*), arus (*A*), dan daya (*W*) sebagai dasar pengambilan keputusan[11].

Proses klasifikasi dilakukan dengan mengevaluasi hasil pengukuran terhadap aturan logika yang telah ditentukan. Kondisi *NORMAL* ditetapkan apabila parameter yang dipantau tidak memenuhi kriteria gangguan, sehingga panel surya dianggap beroperasi dalam kondisi normal. Kondisi *SHADOW* ditentukan ketika intensitas cahaya berada di bawah nilai ambang dan disertai dengan penurunan daya keluaran. Kombinasi kedua kondisi tersebut digunakan sebagai indikasi adanya bayangan yang mengurangi penerimaan cahaya pada panel dan selanjutnya memengaruhi keluaran daya. Sementara itu, kondisi *CABLE FAULT* ditentukan ketika intensitas cahaya masih berada pada kondisi tinggi, tetapi arus keluaran berada di bawah nilai ambang yang telah ditentukan. Kondisi tersebut digunakan sebagai indikasi adanya gangguan pada jalur penghantar atau koneksi kabel karena energi cahaya masih tersedia, tetapi arus yang dihasilkan tidak tersalurkan secara normal.

2.2.7 Panel Surya (*Solar Panel*)

Panel surya merupakan bagian utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang memiliki fungsi untuk mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui prinsip kerja fotovoltaiik. Komponen ini menjadi elemen kunci dalam PLTS karena berperan langsung dalam proses transformasi energi dari sinar matahari menjadi energi listrik[25].

Kinerja panel surya dalam menghasilkan energi listrik tidak terlepas dari pengaruh berbagai faktor operasional maupun lingkungan. Faktor-faktor tersebut meliputi intensitas radiasi matahari, suhu sekitar, sudut kemiringan pemasangan, serta kondisi permukaan panel. Perubahan pada salah satu atau beberapa parameter tersebut dapat memengaruhi besar kecilnya tegangan dan arus yang dihasilkan, sehingga berdampak langsung terhadap daya keluaran sistem PLTS.

Pada kondisi operasional di lapangan, panel surya juga tidak lepas dari kemungkinan terjadinya gangguan eksternal. Beberapa di antaranya berupa penumpukan debu pada permukaan panel, adanya bayangan dari objek di sekitar, hingga ketidaktepatan dalam proses instalasi. Faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan penurunan efisiensi konversi energi apabila tidak segera diidentifikasi dan ditangani. Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik kerja serta faktor yang memengaruhi performa panel surya menjadi dasar penting dalam pengembangan sistem pemantauan guna menjaga kinerja PLTS tetap optimal.

Pemanfaatan panel surya dalam sistem ini tidak hanya bertujuan sebagai sumber catu daya alternatif, tetapi juga diarahkan untuk mendukung peningkatan efisiensi penggunaan energi secara keseluruhan. Selain itu, penerapan sumber energi terbarukan ini diharapkan dapat mendukung pengembangan sistem yang lebih efisien, ramah lingkungan, serta berkelanjutan dalam jangka panjang.

Berdasarkan kebutuhan sistem yang dirancang, penelitian ini mengimplementasikan panel surya berkapasitas 50 Wp berbasis teknologi *polycrystalline silicon* sebagai sumber energi utama. Pemilihan jenis modul ini didasarkan pada pertimbangan teknis dan ekonomis, khususnya terkait keseimbangan antara tingkat efisiensi, biaya produksi, serta ketahanan operasional pada kondisi iklim tropis. Secara struktural, material *polycrystalline* tersusun atas banyak kristal silikon yang memungkinkan proses fabrikasi lebih sederhana dibandingkan *monocrystalline*, sehingga berdampak pada biaya yang lebih rendah dengan performa yang tetap kompetitif pada intensitas radiasi menengah. Selain itu, kapasitas 50 Wp dinilai representatif untuk skala prototipe karena mampu menyediakan suplai daya yang memadai bagi kebutuhan beban sekaligus sistem monitoring berbasis IoT. Rincian spesifikasi teknis modul panel surya yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Spesifikasi Panel Surya Polycrystalline Silicon

Parameter	Spesifikasi
Daya Maksimum (Pmax)	50 Wp
Tegangan Maksimum (Vmp)	±18 V
Arus Maksimum (Imp)	±2.78 A

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Open Circuit (Voc)	± 21.6 V
Arus Short Circuit (Isc)	± 3.05 A
Efisiensi Modul	$\pm 15\%$ - 17%
Toleransi Daya	$\pm 3\%$
Tegangan Sistem Maksimum	1000 V DC
Suhu Operasi	-40°C hingga +85°C
Dimensi	$\pm 670 \times 540 \times 30$ mm
Berat	± 4 - 4 kg
Material Kaca	Tempered Glass
Frame	Alumunium Alloy

Bentuk fisik dari Panel Surya *Polycrystalline Silicon* dapat ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Panel Surya *Poycrystalline Silicon*

2.2.8 Solar Charger Controller (SCC) PMW

Solar Charge Controller (SCC) merupakan salah satu komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang memiliki fungsi untuk mengendalikan aliran energi dari panel surya menuju baterai agar proses pengisian berlangsung secara aman dan stabil. Perangkat ini bekerja dengan membatasi tegangan dan arus yang masuk ke baterai sehingga tidak melebihi batas yang dapat

menyebabkan kerusakan, sekaligus membantu memaksimalkan penyerapan energi dari panel surya[26].

Dalam penerapannya, SCC tidak hanya berperan sebagai pengatur pengisian, tetapi juga menjadi bagian penting dalam menjaga keandalan sistem penyimpanan energi pada PLTS. Oleh karena itu, pemahaman mengenai cara kerja dan karakteristik SCC menjadi dasar dalam pengembangan sistem tenaga surya yang lebih efisien, terutama pada sistem yang memerlukan pengelolaan energi secara berkelanjutan dan terkontrol.

Pada sistem ini, *Solar Charge Controller* (SCC) berperan sebagai pengendali utama aliran energi dari panel surya ke baterai dengan menjaga kestabilan serta keamanan sistem melalui pengaturan tegangan dan arus pada tahap pengisian bulk, absorption, dan float, sehingga baterai terhindar dari overcharge serta terlindungi dari overdischarge, korsleting, dan kesalahan polaritas. Pada sistem ini, SCC juga berfungsi sebagai penghubung sebelum energi dari baterai disalurkan ke LM2596 untuk menurunkan tegangan bagi ESP32 dan sensor, serta ke inverter yang mengubah tegangan DC menjadi AC untuk lampu. Oleh karena itu, penggunaan SCC tipe PWM dinilai sesuai untuk sistem skala kecil karena lebih sederhana dan ekonomis, meskipun tingkat efisiensinya masih berada di bawah MPPT. Tabel 2.3 dibawah adalah tabel spesifikasi dari *Solar Charge Controller* (SCC) yang digunakan penulis.

Tabel 2. 3 Spesifikasi Solar Charger Control (SCC) PMW

Parameter	Spesifikasi
Model Number	KLD1230
Type	PWM (Pulse Width Modulation)
<i>Rated Voltage</i>	12V/24V
<i>Rated Current</i>	30A
<i>Max PV Voltage</i>	50V
<i>Max PV Input Power</i>	390W (12V) / 780W (24V)
<i>Protection</i>	Overcharge, Overdischarge, Short Circuit, Reverse Polarity, Overoad
Efisiensi	70% – 80%

Bentuk fisik dari *Solar Charger Control* (SCC) PWM dapat ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Solar Charger Controller (SCC) PWM

2.2.9 Baterai / Aki 20 Ah

Baterai pada sistem panel surya berperan sebagai media penyimpanan energi listrik hasil konversi panel surya, khususnya saat produksi energi mengalami fluktuasi akibat perubahan kondisi lingkungan. Keberadaan baterai memungkinkan energi yang telah dihasilkan tetap dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan, meskipun intensitas cahaya matahari tidak berada pada kondisi optimal[27].

Dalam penerapannya, penggunaan baterai tidak hanya berfungsi sebagai penyimpan energi, tetapi juga menjadi komponen penting dalam menjaga kestabilan suplai daya pada sistem PLTS. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan sistem penyimpanan yang tepat, baik dari sisi pengisian maupun pengosongan energi, agar performa baterai tetap optimal dan umur pakainya dapat dipertahankan.

Penentuan kapasitas baterai pada sistem PLTS dilakukan dengan menghitung total kebutuhan energi dari seluruh beban yang terpasang pada sistem. Pada penelitian ini, beban yang digunakan meliputi lampu LED AC 12W sebagai beban utama pada sisi keluaran inverter serta perangkat monitoring berbasis IoT yang terdiri dari ESP32, sensor INA219, sensor DS18B20, RTC, dan sensor BH1750. Selain beban utama tersebut, inverter 150W juga memberikan pengaruh terhadap konsumsi energi karena terdapat rugi-rugi daya saat proses perubahan tegangan DC menjadi AC.

Perhitungan kapasitas baterai bertujuan untuk mengetahui kemampuan baterai dalam menyuplai kebutuhan energi seluruh komponen selama sistem

beroperasi. Pada rancangan ini, sistem monitoring bekerja selama 4 jam setiap hari, sedangkan lampu LED AC digunakan selama 5 jam per hari. Berdasarkan waktu operasi tersebut, total kebutuhan energi harian sistem dapat dihitung sehingga kapasitas baterai minimum yang diperlukan dapat ditentukan agar sistem PLTS mampu bekerja dengan baik dan tetap stabil selama proses pengoperasian. Perhitungan kapasitas baterai pada sistem PLTS ini dilakukan menggunakan persamaan sebagai berikut.

1. Menghitung Daya Monitoring

Komponen	Daya
Esp32	: 1 W
INA219	: 0.1 W
DS18B20	: 0.05 W
RTC	: 0.05 W
BH1750	: 0.1 W
LM2596	: 0.5 W

Total daya monitoring

$$P_{\text{monitoring}} = 1 + 0.1 + 0.05 + 0.05 + 0.1 + 0.5$$

Hasil:

$$P_{\text{monitoring}} = 1.8W$$

2. Energi Monitoring

Monitoring aktif selama 4 jam untuk pengambilan data:

$$E_{\text{monitoring}} = 1.8 \times 4$$

Hasil:

$$E_{\text{monitoring}} = 7.2Wh$$

3. Energi Lampu AC

Daya lampu:

$$12W$$

Waktu operasi:

5jam

Energi lampu:

$$E_{lampu} = 12 \times 5$$

$$E_{lampu} = 12 \times 5$$

Hasil:

$$E_{lampu} = 60Wh$$

4. Energi Inverter

Meskipun inverter memiliki kapasitas 220W, inverter tetap memiliki rugi-rugi daya (*standby loss*).

Asumsi konsumsi inverter:

$$6W$$

Karena inverter aktif selama lampu menyala:

$$E_{inv} = 6 \times 5$$

$$E_{inv} = 6 \times 5$$

Hasil:

$$E_{inv} = 30Wh$$

5. Total Energi Harian

$$E_{total} = 7.2 + 60 + 30$$

Hasil:

$$E_{total} = 97.2Wh/hari$$

6. Menghitung Kapasitas Aki

Rumus kapasitas aki:

$$C_{aki} = \frac{E_{total}}{V \times DoD \times \eta}$$

$$C_{aki} = \frac{E_{total}}{V \times DoD \times \eta}$$

Substitusi:

- $E_{total} = 97.2Wh$
- $V = 12V$
- $DoD = 0.5$
- efisiensi = 0.9

$$C_{aki} = \frac{97.2}{12 \times 0.5 \times 0.9}$$

$$C_{aki} = \frac{97.2}{12 \times 0.5 \times 0.9}$$

Hasil:

$$C_{aki} \approx 18Ah$$

Berdasarkan hasil analisis kebutuhan daya pada sistem PLTS yang dirancang, total konsumsi energi harian tercatat sebesar 97,2 Wh/hari. Nilai tersebut berasal dari penggunaan lampu LED AC 12W, inverter 150W, serta perangkat monitoring berbasis ESP32 yang meliputi sensor INA219, DS18B20, RTC, dan BH1750. Sistem monitoring dioperasikan selama 4 jam setiap hari, sedangkan lampu LED AC digunakan selama 5 jam per hari. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan kapasitas baterai agar seluruh beban dapat disuplai secara optimal selama periode operasi.

Penentuan kapasitas baterai dilakukan menggunakan sistem tegangan 12V dengan jenis baterai VRLA atau aki timbal. Dalam perhitungannya digunakan nilai Depth of Discharge (DoD) sebesar 50% dan efisiensi sistem sebesar 90%. Dari hasil perhitungan diperoleh kebutuhan kapasitas minimum baterai sekitar 18 Ah. Meskipun demikian, untuk meningkatkan keandalan sistem dan mengurangi risiko pengosongan baterai secara berlebihan, dipilih kapasitas aki yang lebih besar, yaitu pada rentang 20–30 Ah. Kapasitas yang lebih tinggi juga memberikan cadangan energi tambahan ketika intensitas penyinaran matahari menurun atau saat kondisi cuaca kurang mendukung.

Panel surya berkapasitas 50WP yang digunakan pada sistem dinilai masih mampu mencukupi kebutuhan energi harian karena energi yang dihasilkan lebih besar dibandingkan total konsumsi beban. Dengan demikian, kombinasi panel surya 50WP, inverter 150W, dan aki 12V berkapasitas 20–30 Ah dianggap memadai untuk menunjang sistem monitoring PLTS berbasis IoT sekaligus menyuplai beban lampu LED AC pada penelitian ini. Tabel 2.4 dibawah adalah tabel spesifikasi dari baterai atau aki yang digunakan penulis.

Tabel 2. 4 Spesifikasi Baterai/Aki VRLA 12V 20Ah

Parameter	Spesifikasi
Tipe Baterai	VRLA (Valve Regulated Lead Acid)
Tegangan Nominal	12 V
Parameter	Spesifikasi
Kapasitas	20 Ah
Energi Tersimpan	±240 Wh
Tegangan Pengisian Siklus	14.4 – 14.7 V
Tegangan Float Charging	13.5 – 13.8 V
Arus Pengisian Maksimum	±6 A
Suhu Operasi	-15°C hingga +50°C

Bentuk fisik dari Baterai/Aki VRLA 12V 50Ah dapat ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Spesifikasi Baterai/Aki VRLA 12V 20Ah

2.2.10 Inverter 220 W

Inverter pada sistem panel surya berperan sebagai perangkat yang mengonversi energi listrik arus searah (DC) yang dihasilkan panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) yang sesuai dengan kebutuhan beban, sehingga dapat digunakan untuk mengoperasikan berbagai peralatan listrik[28].

Pada penelitian ini digunakan inverter berkapasitas **220 W** yang dihubungkan dengan baterai 12 V sebagai sumber masukan. Inverter berfungsi menyediakan tegangan keluaran sebesar 220 VAC untuk menyuplai beban AC yang digunakan selama proses pengujian sistem. Kapasitas inverter dipilih karena telah mencukupi kebutuhan daya beban pada penelitian, sehingga proses konversi energi dapat berlangsung secara stabil tanpa melebihi batas kemampuan inverter.

Selain berfungsi mengubah tegangan DC menjadi AC, inverter pada penelitian ini dimanfaatkan untuk menyediakan sumber listrik bagi lampu LED AC 12 W 220 V yang digunakan sebagai beban pengujian. Penggunaan beban tersebut bertujuan untuk mensimulasikan kondisi kerja panel surya pada aplikasi sebenarnya, sehingga proses penyaluran energi dari panel surya, baterai, hingga inverter dapat diamati secara menyeluruh. Melalui kondisi pembebanan ini, parameter listrik berupa tegangan, arus, dan daya dapat diukur secara real-time, sehingga kinerja sistem panel surya dapat dievaluasi serta digunakan sebagai dasar dalam mendeteksi perubahan karakteristik listrik yang mengindikasikan adanya gangguan pada sistem.

Selain itu, penggunaan inverter 220 W dipilih karena memiliki kapasitas yang mencukupi untuk menyuplai beban AC yang digunakan pada sistem PLTS skala kecil dalam penelitian ini. Meskipun daya beban yang digunakan relatif rendah, yaitu lampu LED AC 12 W 220 V, inverter 220 W mampu menyediakan tegangan keluaran AC yang stabil serta memberikan cadangan kapasitas daya apabila pada pengembangan selanjutnya dilakukan penambahan beban. Dengan demikian, inverter dapat beroperasi tanpa mendekati batas kapasitas maksimumnya, sehingga mendukung kestabilan dan keandalan sistem selama proses pengujian.

Kinerja inverter memiliki pengaruh terhadap efisiensi keseluruhan sistem PLTS, khususnya pada proses konversi energi listrik dari arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Setiap proses konversi akan menimbulkan rugi-rugi daya yang menyebabkan energi keluaran lebih kecil dibandingkan energi masukan. Oleh karena itu, pemilihan inverter dengan karakteristik konversi yang baik menjadi salah satu faktor penting untuk memaksimalkan pemanfaatan energi yang dihasilkan panel surya. Pada penelitian ini, inverter 220 W digunakan untuk mengubah tegangan DC 12 V yang berasal dari baterai menjadi tegangan AC 220 V sebagai sumber daya bagi lampu LED AC 12 W yang digunakan sebagai beban pengujian. Tabel 2.5 dibawah merupakan spesifikasi inverter yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2. 5 Spesifikasi Inverter Output DC

Parameter	Spesifikasi
Sumber tegangan	Baterai / panel surya
Tegangan umum	12V DC
Jenis arus	Arus Searah (DC)
Polaritas	Positif (+) dan Negatif (-)

Tabel 2. 6 Spesifikasi Inverter Output AC

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Keluaran	220V AC
Daya maksimum	220 W
Bentuk sinyal	Gelombang bolak-balik
Frekuensi	50 Hz
Bentuk gelombang	Modified Sine Wave
Jenis arus	Arus Bolak-balik (AC)

Bentuk fisik dari Inverter 220 W dapat ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Inverter 220 W

2.2.11 Buck Converter MP1584EN

Buck converter dimanfaatkan untuk menyesuaikan tegangan keluaran panel surya yang cenderung berubah-ubah agar sesuai dengan kebutuhan proses pengisian baterai. Variasi tegangan yang terjadi akibat perubahan intensitas cahaya matahari perlu dikondisikan menggunakan konverter DC-DC sehingga energi yang dihasilkan dapat disalurkan secara lebih stabil. Berdasarkan hasil pengujian, rangkaian buck converter mampu menurunkan tegangan menjadi lebih rendah dan menjaga kestabilannya sesuai kebutuhan sistem, sehingga proses pengisian baterai dapat berlangsung dengan lebih efisien[29].

Selain berfungsi menurunkan tegangan, buck converter juga berperan dalam menjaga kontinuitas suplai energi pada sistem dengan cara mereduksi fluktuasi tegangan yang dapat memengaruhi kinerja komponen lain. Proses konversi yang efisien memungkinkan energi yang tersedia dimanfaatkan secara optimal tanpa menimbulkan rugi-rugi daya yang signifikan. Dengan demikian, penggunaan buck converter menjadi bagian penting dalam memastikan distribusi energi pada sistem PLTS berjalan secara stabil dan terkendali.

Dalam sistem yang dikembangkan penulis, buck converter MP1584EN berperan sebagai penurun tegangan DC untuk dihubungkan menuju mikrokontroler. Penggunaan komponen ini memungkinkan tegangan yang masuk ke perangkat seperti ESP32 dan sensor tetap berada pada batas kerja yang aman, sehingga kinerja sistem monitoring dan deteksi dini gangguan dapat berjalan secara stabil. Selain itu, kestabilan tegangan yang dihasilkan juga mendukung keakuratan pembacaan data

sensor, sehingga analisis kondisi panel surya menjadi lebih andal. Untuk menyesuaikan dengan kebutuhan penulis, Tabel 2.7 dibawah adalah spesifikasi dari MP1584EN.

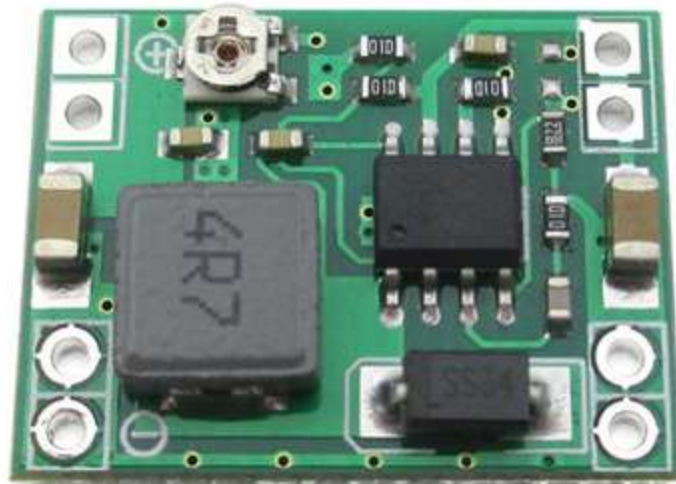
Tabel 2. 7 Spesifikasi Buck Converter MP1584EN

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Input	4.5V – 28V
Tegangan Output	0.8V – 20V
Arus Output	3A (Maks)
Efisiensi	96%
Switching Frequency	1.5MHz
Suhu Operasi	-45°C sampai 85°C
Dimensi	22x17x4mm

Tabel 2. 8 Datasheet Buck Converter MP1584EN

Nama Pin	Deskripsi
INPUT+	Positif sumber tegangan (baterai/panel)
INPUT-	Negatif sumber tegangan (ground sumber)
OUTPUT+	Positif keluaran yang sudah diturunkan tegangannya
OUTPUT-	Negatif keluaran (ground output)

Bentuk fisik dari Buck Converter MP1584EN dapat ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Buck Converter MP1584EN

2.2.12 Sensor INA219

Sensor INA219 merupakan perangkat yang digunakan untuk mengukur parameter listrik berupa tegangan dan arus pada sistem panel surya. Sensor ini bekerja dengan cara membaca nilai tegangan dan arus secara langsung pada

rangkaian, sehingga memungkinkan perhitungan daya keluaran panel surya secara real-time[30].

Dalam penerapannya dalam sistem, penggunaan INA219 menjadi penting dalam sistem monitoring karena mampu menyediakan data parameter listrik yang akurat dan kontinu. Data tersebut selanjutnya dapat dimanfaatkan sebagai dasar analisis kinerja panel surya, termasuk dalam mengidentifikasi adanya penyimpangan atau penurunan performa. Dengan demikian, sensor ini berperan sebagai komponen utama dalam mendukung pengembangan sistem pemantauan dan deteksi dini gangguan berbasis IoT.

Pada penelitian ini, selain mampu mengukur tegangan dan arus secara langsung, sensor INA219 juga memiliki tingkat akurasi yang baik serta mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler melalui komunikasi I2C. Data hasil pengukuran dapat dimanfaatkan sebagai dasar pemantauan dan analisis kinerja panel surya, termasuk untuk proses data logging dan penentuan ambang batas dalam mendeteksi kondisi abnormal, sehingga mendukung sistem monitoring dan deteksi dini gangguan secara lebih efektif. Tabel 2.9 dibawah adalah spesifikasi dari Sensor INA219 yang digunakan penulis.

Tabel 2. 9 Spesifikasi Sensor INA219

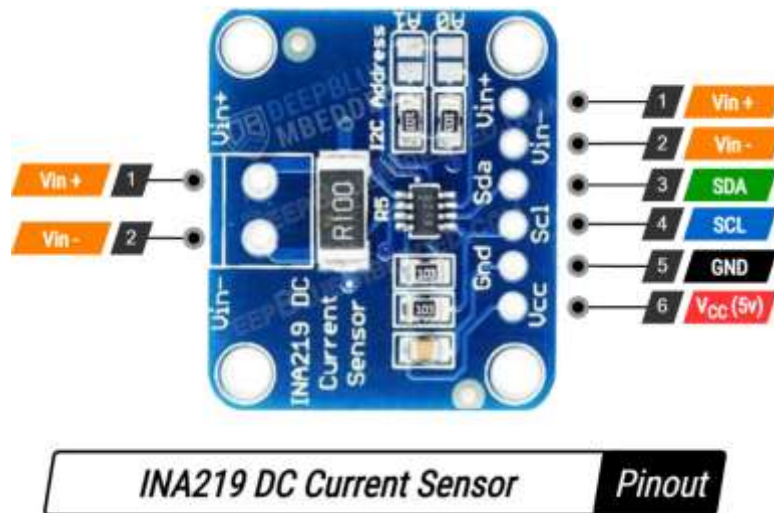
Parameter	Spesifikasi
Tegangan Kerja	3-5V
Arus Maksimum	3.2A
Tegangan Terukur	0-26V
Resolusi ADC	12-bit
Akurasi	0.5%
Resolusi Arus	0.8mA

Tabel 2. 10 Datasheet Sensor INA219

Nama Pin	Deskripsi
VIN-	Terminal masukan sensor untuk sisi negatif pengukuran arus dan tegangan.
VIN+	Terminal masukan sensor untuk sisi positif pengukuran arus dan tegangan.
VCC	Pin catu daya sensor yang digunakan untuk menyuplai tegangan kerja modul.
GND	Pin ground yang terhubung ke referensi tegangan nol pada sistem.

SCL	Jalur Serial Clock pada komunikasi I ² C yang berfungsi membawa sinyal clock.
SDA	Jalur Serial Data pada komunikasi I ² C yang berfungsi mengirim dan menerima data.

Bentuk fisik dari Sensor INA219 dapat ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Sensor INA219

2.2.13 RTC DS3231

Pada penelitian tersebut, modul RTC (Real-Time Clock) tipe DS3231 digunakan sebagai komponen penyedia informasi waktu yang presisi dalam sistem monitoring panel surya. Perangkat ini dimanfaatkan untuk mengatur proses pencatatan data secara otomatis, sehingga setiap hasil pengukuran, seperti tegangan dan arus, dapat tersimpan lengkap dengan penanda waktu (timestamp). Sistem data logger yang memanfaatkan RTC memungkinkan pencatatan data dilakukan secara berkala dalam interval tertentu, misalnya setiap beberapa menit, sehingga memudahkan dalam melakukan analisis kinerja panel surya berdasarkan waktu operasionalnya[32].

Pemanfaatan RTC dalam sistem monitoring menjadi penting karena memungkinkan pengelolaan data historis yang lebih terstruktur. Dengan adanya informasi waktu yang akurat, data yang tersimpan dapat digunakan untuk mengidentifikasi pola kinerja harian maupun mendeteksi perubahan kondisi sistem

secara lebih sistematis, sehingga mendukung pengembangan sistem pemantauan dan deteksi dini gangguan yang lebih efektif.

Penggunaan RTC pada penelitian ini juga mendukung sinkronisasi waktu antar komponen dalam sistem monitoring, sehingga proses pengambilan, penyimpanan, dan pengiriman data dapat berlangsung secara konsisten. Hal ini menjadi penting terutama pada sistem berbasis IoT yang memerlukan ketepatan waktu dalam pengolahan dan pengiriman informasi. Sedangkan spesifikasi dari RTC DS3231 ditunjukkan pada Tabel 2.11.

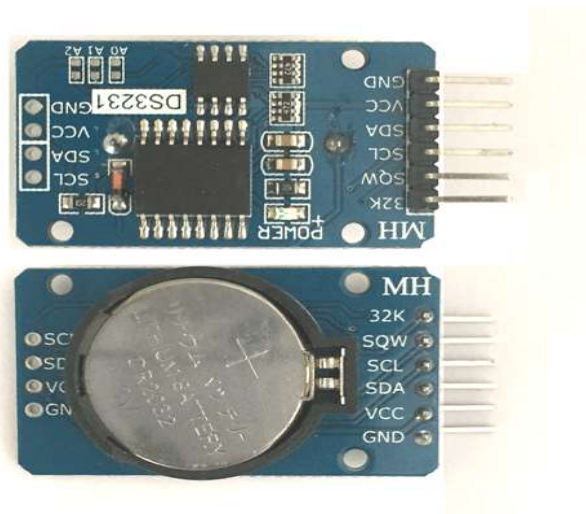
Tabel 2. 11 RTC DS3231

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Kerja	2.3V - 5.5V
Konsumsi Arus	500 nA
Tegangan Maksimum pada SDA, SCL	VCC + 0.3V
Suhu Operasi	-45°C sampai 80°C
Kapasitas Memori	32 Kb
Kecepatan Data	400 KHz
Dimensi	38x22x14 mm

Tabel 2. 12 Datasheet RTC DS3231

Nama Pin	Deskripsi
VCC	Pin catu daya yang dihubungkan ke terminal positif sumber tegangan.
GND	Pin ground yang dihubungkan ke ground (GND) sistem sebagai referensi tegangan nol.
SDA	Jalur Serial Data pada antarmuka I ² C yang digunakan untuk mengirim dan menerima data antara modul RTC dan mikrokontroler.
SCL	Jalur Serial Clock pada antarmuka I ² C yang digunakan untuk sinkronisasi komunikasi data.
SQW	Pin keluaran gelombang kotak (Square Wave Output) yang dapat digunakan sebagai sinyal clock atau interupsi dengan frekuensi tertentu.
32K	Pin keluaran osilator 32 kHz yang digunakan sebagai referensi clock eksternal.

Bentuk fisik dari RTC DS3231 dapat ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2. 7 RTC DS3231

2.2.14 Sensor GY-302 BH1750

Sensor GY-302 BH1750 dimanfaatkan untuk mengukur tingkat intensitas cahaya dengan hasil yang konsisten dan tingkat ketelitian yang baik. Sensor ini mampu merespons perubahan cahaya dengan cepat serta mudah diintegrasikan dalam sistem monitoring dan kontrol berbasis IoT, sehingga mendukung proses pengambilan data secara real-time[33].

Dalam sistem yang dikembangkan, sensor BH1750 berfungsi sebagai pengukur intensitas cahaya matahari yang diterima oleh panel surya. Data tersebut digunakan sebagai parameter lingkungan yang berpengaruh langsung terhadap kinerja panel, kemudian dikombinasikan dengan data tegangan dan arus untuk melakukan analisis kondisi sistem. Informasi ini juga dimanfaatkan dalam proses data logging dan penentuan ambang batas (adaptive threshold) untuk mendeteksi potensi gangguan seperti penurunan intensitas akibat bayangan atau kotoran, serta menjadi dasar dalam pengiriman notifikasi melalui platform Blynk.

Untuk memastikan kinerja sensor dalam sistem monitoring berjalan secara optimal, diperlukan pemahaman terhadap spesifikasi teknis dari modul GY-302 BH1750 yang digunakan. Spesifikasi tersebut mencakup rentang pengukuran intensitas cahaya, resolusi, tingkat akurasi, serta metode komunikasi data seperti antarmuka I2C. Informasi ini menjadi dasar dalam proses integrasi dengan mikrokontroler serta penyesuaian konfigurasi sistem agar hasil pengukuran lebih

presisi dan sesuai dengan kebutuhan analisis. Maka dari itu, rincian spesifikasi sensor GY-302 BH1750 disajikan dalam bentuk tabel pada tabel 2.13 berikut.

Tabel 2. 13 Sensor GY-302 BH1750

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Operasi	3V – 5V
Arus Operasi	< 0.12mA
Suhu Operasi	-40°C sampai 85°C
Sudut Sensitivitas	±120°
Rentang Pengukuran	1 – 65.535 lux
Akurasi	±20%
Dimensi	17 x 14mm

Tabel 2. 14 Sensor GY-302 BH1750

Nama Pin	Deskripsi
VIN	Pin catu daya yang digunakan untuk menyuplai tegangan kerja sensor, umumnya 3,3 V hingga 5 V DC.
GND	Pin ground yang dihubungkan ke ground (GND) sistem sebagai referensi tegangan nol.
SCL	Jalur Serial Clock pada antarmuka I ² C yang digunakan untuk sinkronisasi komunikasi data dengan mikrokontroler.
SDA	Jalur Serial Data pada antarmuka I ² C yang digunakan untuk mengirim dan menerima data hasil pengukuran intensitas cahaya.
ADDR/AD0	Pin pengaturan alamat I ² C. Jika pin ini dihubungkan ke logika HIGH, alamat I ² C berubah dari 0x23 menjadi 0x5C.

Bentuk fisik dari Sensor GY-302 BH1750 dapat ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2. 8 Sensor GY-302 BH1750

2.2.15 ESP32 Mikrokontroler

Dalam penelitian tersebut, ESP32 dimanfaatkan sebagai unit mikrokontroler utama pada sistem monitoring panel surya berbasis Internet of Things (IoT). Perangkat ini berfungsi untuk memproses data yang diperoleh dari sensor sekaligus mengirimkan hasil pengukuran ke platform berbasis internet secara real-time[34].

Pemilihan ESP32 didasarkan pada kemampuannya yang telah dilengkapi dengan konektivitas Wi-Fi, sehingga memungkinkan sistem monitoring dapat diakses dari jarak jauh melalui perangkat seperti smartphone. Selain itu, ESP32 juga mampu mengolah data dari berbagai sensor dengan baik, khususnya dalam pengukuran parameter listrik seperti tegangan, arus, dan daya[34].

Dalam sistem yang penulis kembangkan, ESP32 berfungsi sebagai unit pengendali utama yang menghubungkan dan mengelola seluruh komponen, mulai dari sensor INA219, BH1750, dan DS18B20 hingga modul pendukung lainnya. Data yang diperoleh dari sensor diproses oleh ESP32, kemudian dikirimkan ke aplikasi Blynk untuk ditampilkan secara real-time. Selain itu, data tersebut juga dimanfaatkan dalam proses data logging serta analisis menggunakan metode adaptive threshold. Dengan demikian, ESP32 tidak hanya berperan sebagai media komunikasi, tetapi juga sebagai pusat pengolahan data yang mendukung sistem monitoring dan deteksi dini gangguan pada panel surya secara terintegrasi.

Guna mengoptimalkan kinerja ESP32 dalam sistem dapat berjalan secara optimal, diperlukan pemahaman terhadap spesifikasi teknis perangkat yang digunakan. Spesifikasi ini meliputi kemampuan pemrosesan, kapasitas memori, serta fitur komunikasi yang mendukung integrasi dengan berbagai sensor dan platform IoT. Oleh karena itu, rincian spesifikasi ESP32 disajikan dalam bentuk tabel pada Tabel 2.15 berikut.

Tabel 2. 15 ESP32 Mikrokontroler

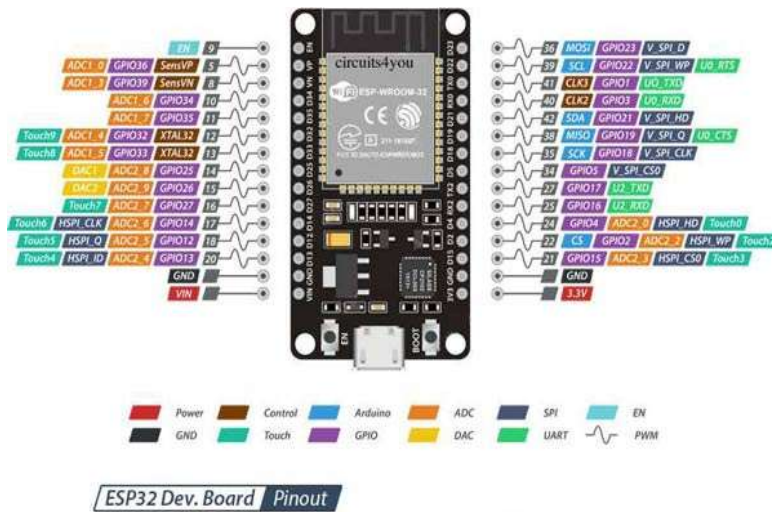
Parameter	Spesifikasi
WiFi Module	ESP-WROOM-32
Processor	ESP32-D0WDQ6
Built-In-Flash	32Mbit
Antenna	OnBoard PCB antenna

Peripheral Interface	UART/GPIO/ADC/DAC/SDIO/PWM/I2C/I2S
WiFi Protocol	IEEE 802.11 b/g/n
Bluetooth	Bluetooth 4.2

Tabel 2. 16 ESP32 Mikrokontroler

Nama Pin	Deskripsi
3V3	Pin keluaran tegangan 3,3 V yang digunakan untuk menyuplai daya ke sensor atau modul eksternal.
GND	Pin ground yang berfungsi sebagai referensi tegangan nol pada rangkaian.
EN (Enable)	Pin untuk mengaktifkan atau mereset modul ESP32. Ketika diberi logika LOW, ESP32 akan melakukan reset.
BOOT	Pin yang digunakan untuk menentukan mode booting, terutama saat proses upload program ke ESP32.
GPIO0	Pin input/output digital yang juga berfungsi dalam pemilihan mode boot.
GPIO1–GPIO39	Pin digital multifungsi yang dapat digunakan sebagai input atau output untuk membaca sensor, mengendalikan aktuator, dan komunikasi data.
ADC	Pin Analog-to-Digital Converter yang digunakan untuk membaca sinyal analog dari berbagai sensor.
AREF	Pin referensi tegangan analog eksternal untuk meningkatkan akurasi pembacaan ADC.
TX0 dan RX0	Pin komunikasi serial UART utama yang digunakan untuk pengiriman dan penerimaan data serta proses pemrograman.
TX2 dan RX2	Pin komunikasi UART tambahan yang dapat digunakan untuk komunikasi serial dengan perangkat lain.
SDA dan SCL	Pin komunikasi I ² C yang digunakan untuk menghubungkan sensor atau modul digital berbasis I ² C.
SCK, MISO, dan MOSI	Pin komunikasi SPI yang digunakan untuk pertukaran data dengan perangkat eksternal berbasis SPI.
SCK, SD0, CMD, dan D0–D4	Pin komunikasi SDIO yang digunakan untuk antarmuka penyimpanan seperti kartu SD.
DAC1 dan DAC2	Pin Digital-to-Analog Converter yang dapat menghasilkan sinyal analog dari data digital.
VP dan VN	Pin input analog tambahan yang digunakan untuk pengukuran tegangan atau pembacaan sensor analog.
GPIO34–GPIO39	Pin khusus input (input-only) yang digunakan untuk membaca sinyal dari sensor atau perangkat eksternal.

Bentuk fisik dari ESP32 dapat ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2. 9 ESP32 Mikrokontroler

2.2.16 Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan teknologi yang mengintegrasikan berbagai perangkat fisik ke dalam jaringan internet agar dapat saling berkomunikasi dan bertukar informasi secara otomatis. Perangkat yang terhubung, seperti sensor, aktuator, dan mikrokontroler, dapat mengumpulkan data dari lingkungan, mengirimkan informasi ke server atau platform berbasis cloud, serta menerima instruksi untuk menjalankan fungsi tertentu. Kemampuan tersebut memungkinkan proses pemantauan, pengendalian, dan analisis data dilakukan secara real-time, sehingga mendukung peningkatan efisiensi operasional serta mempercepat proses pengambilan keputusan.[35]

Internet of Things (IoT) dibangun atas beberapa komponen utama, yaitu sensor sebagai perangkat akuisisi data, mikrokontroler sebagai pengolah data, media komunikasi sebagai jalur transmisi informasi, platform *cloud* sebagai tempat penyimpanan data, serta antarmuka pengguna (*user interface*) sebagai media untuk menampilkan hasil pemantauan. Sensor berfungsi memperoleh informasi dari lingkungan, kemudian data tersebut diproses oleh mikrokontroler sebelum dikirim melalui jaringan internet menuju server atau platform *cloud*. Selanjutnya, data yang tersimpan dapat diakses oleh pengguna melalui aplikasi berbasis web maupun perangkat bergerak (*smartphone*) sehingga kondisi suatu sistem dapat dipantau secara real-time dari berbagai lokasi.

Penerapan teknologi IoT memberikan berbagai manfaat, di antaranya mempermudah proses pemantauan jarak jauh (*remote monitoring*), meningkatkan efisiensi dalam pengumpulan dan pengolahan data, serta mendukung pengambilan keputusan berdasarkan kondisi aktual sistem. Selain itu, data yang dikirim secara berkelanjutan dapat disimpan sebagai data historis sehingga dapat dimanfaatkan untuk mengevaluasi kinerja sistem, menganalisis tren perubahan parameter, serta mendeteksi potensi gangguan pada tahap awal.

Pada penelitian ini, teknologi IoT diimplementasikan sebagai media komunikasi antara mikrokontroler ESP32, aplikasi Blynk, dan layanan Google Sheets. ESP32 menerima data hasil pengukuran dari sensor INA219, BH1750, DS18B20, dan RTC, kemudian mengirimkan data tersebut melalui jaringan internet. Data hasil pengukuran ditampilkan secara real-time pada aplikasi Blynk sehingga pengguna dapat memantau kondisi panel surya dari jarak jauh. Selain itu, data yang sama juga dikirim dan disimpan secara otomatis pada Google Sheets sebagai media *data logging*. Penyimpanan data tersebut memudahkan pengguna dalam melakukan pencatatan, analisis historis, serta evaluasi terhadap kinerja sistem panel surya dalam periode tertentu.

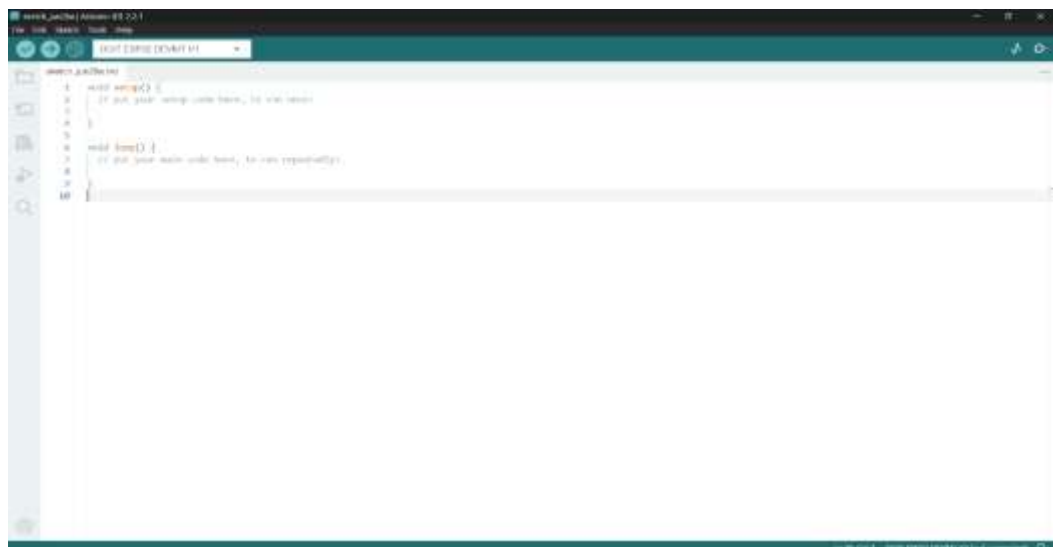
Selain mendukung proses monitoring, teknologi IoT juga dimanfaatkan untuk melakukan deteksi dini gangguan pada panel surya. ESP32 menganalisis data hasil pembacaan sensor untuk mengidentifikasi kondisi yang tidak normal, seperti penurunan arus akibat kabel terlepas atau penurunan daya yang disebabkan oleh *shadow* (bayangan). Ketika kondisi tersebut terdeteksi, sistem mengirimkan informasi status gangguan ke aplikasi Blynk sehingga pengguna dapat segera mengetahui adanya gangguan dan melakukan tindakan penanganan. Dengan adanya integrasi antara ESP32, Blynk, dan Google Sheets, sistem tidak hanya mampu melakukan pemantauan secara real-time, tetapi juga menyediakan riwayat data yang dapat digunakan sebagai dasar analisis performa dan evaluasi sistem PLTS.

2.2.17 Arduino IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) merupakan perangkat lunak yang digunakan sebagai media pengembangan untuk mendukung proses

pemrograman pada mikrokontroler berbasis platform Arduino. Perangkat lunak ini dirancang dengan antarmuka yang sederhana, mudah dipahami, dan bersifat intuitif sehingga dapat digunakan oleh pengguna dari berbagai tingkat kemampuan, baik untuk keperluan pembelajaran maupun pengembangan sistem tertanam (*embedded system*). Melalui Arduino IDE, pengguna dapat melakukan proses penulisan kode program, penyuntingan, kompilasi, hingga mengunggah (*upload*) program atau *sketch* ke papan mikrokontroler dengan mudah dan efisien.

Bahasa pemrograman yang digunakan pada Arduino IDE mengacu pada bahasa C/C++ yang telah disederhanakan sehingga proses pengembangan program menjadi lebih mudah dipahami dan terstruktur. Selain mendukung berbagai jenis papan mikrokontroler Arduino, seperti Arduino Uno, Arduino Mega, dan Arduino Nano, Arduino IDE juga kompatibel dengan berbagai papan mikrokontroler lainnya, termasuk ESP32. Dukungan tersebut dapat diperoleh dengan menambahkan konfigurasi papan melalui Board Manager serta menginstal pustaka (*library*) yang diperlukan. Dengan demikian, ESP32 dapat diprogram secara langsung menggunakan Arduino IDE. Oleh karena itu, Arduino IDE banyak dimanfaatkan sebagai salah satu perangkat lunak utama dalam pengembangan aplikasi berbasis mikrokontroler, khususnya pada sistem monitoring, otomasi, dan berbagai aplikasi berbasis Internet of Things (IoT).



Gambar 2. 10 Bagian Bagian Arduino IDE

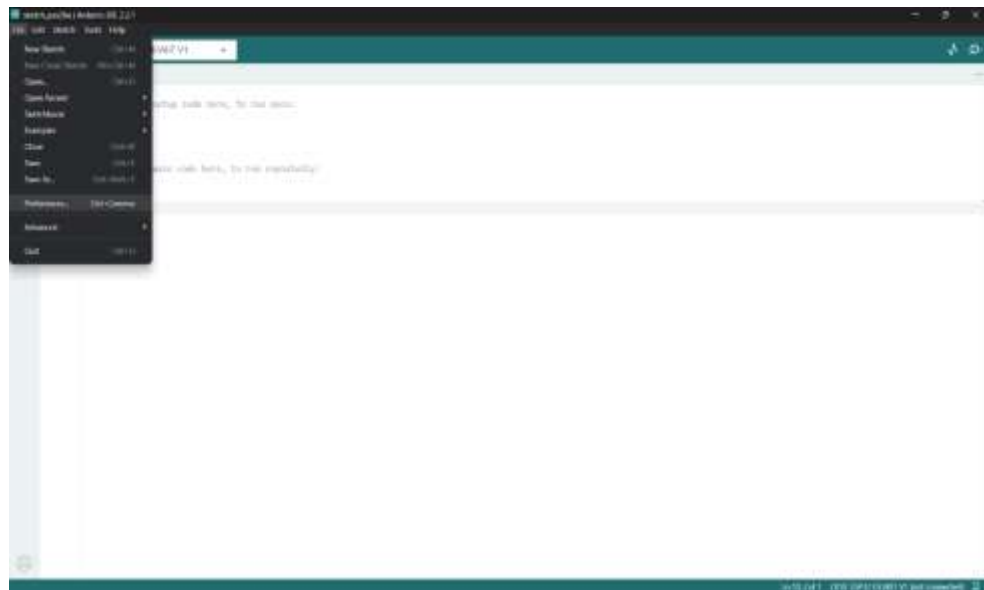
Gambar 2.10 memperlihatkan tampilan awal aplikasi Arduino IDE saat pertama kali dijalankan. Secara umum, Arduino IDE memiliki beberapa bagian utama yang berfungsi untuk mendukung seluruh proses pengembangan program mikrokontroler. Bagian yang paling sering digunakan adalah area kerja (*workspace*), yaitu ruang yang digunakan sebagai tempat untuk menulis, mengedit, dan menyusun kode program (*sketch*) yang akan diunggah ke papan mikrokontroler.

Pada bagian atas jendela aplikasi terdapat menu bar yang terdiri atas beberapa menu, yaitu File, Edit, Sketch, Tools, dan Help. Menu File digunakan untuk mengelola berkas program, seperti membuat proyek baru, membuka *sketch* yang telah tersedia, serta menyimpan hasil pemrograman. Menu Edit berfungsi untuk melakukan pengolahan kode, misalnya menyalin, memotong, menempelkan, mencari, maupun menambahkan komentar pada program. Selanjutnya, menu Sketch digunakan untuk melakukan proses kompilasi, mengunggah program ke mikrokontroler, serta mengelola pustaka (*library*) yang diperlukan selama proses pengembangan.

Sementara itu, menu Tools menyediakan berbagai konfigurasi yang berkaitan dengan perangkat keras, seperti pemilihan jenis papan mikrokontroler (*board*), pengaturan port komunikasi, pemilihan *programmer*, serta akses ke fitur pemantauan komunikasi serial. Adapun menu Help berisi dokumentasi, panduan penggunaan, serta berbagai referensi resmi yang dapat membantu pengguna dalam memahami fungsi dan penggunaan Arduino IDE secara lebih mendalam.

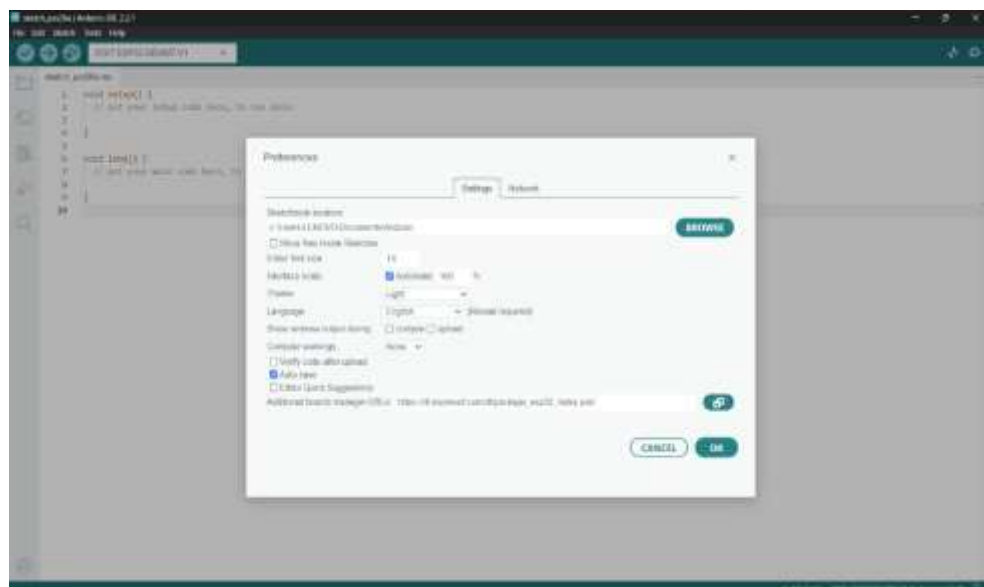
1. Membuka software Arduino IDE hingga tampilan awal muncul seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.
2. Menambahkan board pada Arduino IDE

Untuk menambahkan jenis papan mikrokontroler yang belum tersedia secara bawaan di dalam Arduino IDE, pengguna dapat mengakses menu *File > Preferences* seperti pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Tampilan Menu *File*

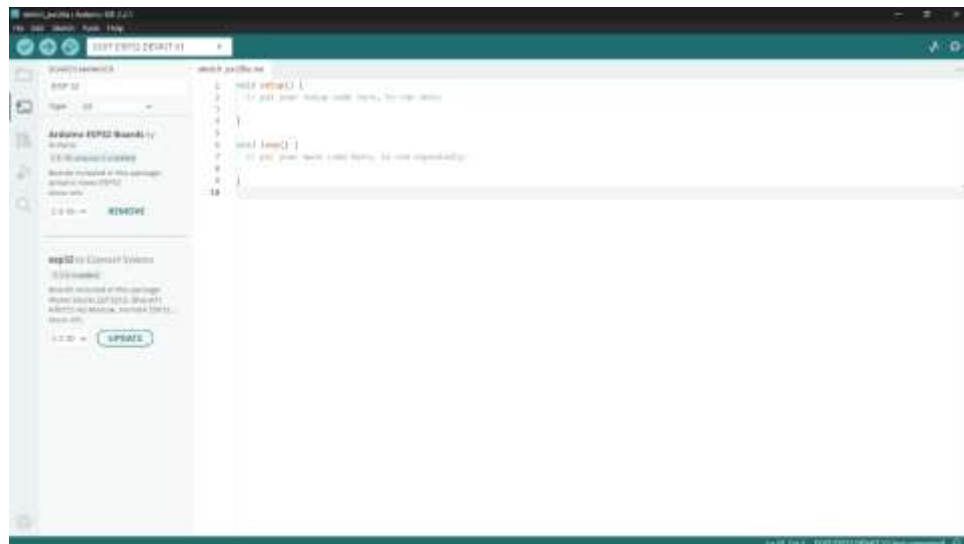
Pada jendela yang ditampilkan, pengguna dapat menambahkan URL repositori board pada kolom yang tersedia, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.12. Penambahan alamat repositori tersebut bertujuan agar Arduino IDE dapat mengunduh dan mengenali paket board tambahan sehingga mendukung proses pemrograman berbagai jenis mikrokontroler, termasuk ESP32.



Gambar 2. 12 URL Box untuk Menambahkan *Board*

3. Menginstal *board* melalui *Board Manager*

Setelah URL repositori berhasil ditambahkan, langkah berikutnya adalah mengunduh dan memasang jenis *board* yang akan digunakan melalui fitur Board Manager, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.13. Fitur ini dapat diakses melalui menu Tools > Board > Board Manager. Pada jendela Board Manager, pengguna dapat mencari nama *board* yang diinginkan, misalnya ESP32 by Espressif Systems. Selanjutnya, pengguna cukup memilih paket tersebut dan menekan tombol Install agar proses pengunduhan serta instalasi *board* ke dalam Arduino IDE dapat dilakukan secara otomatis.

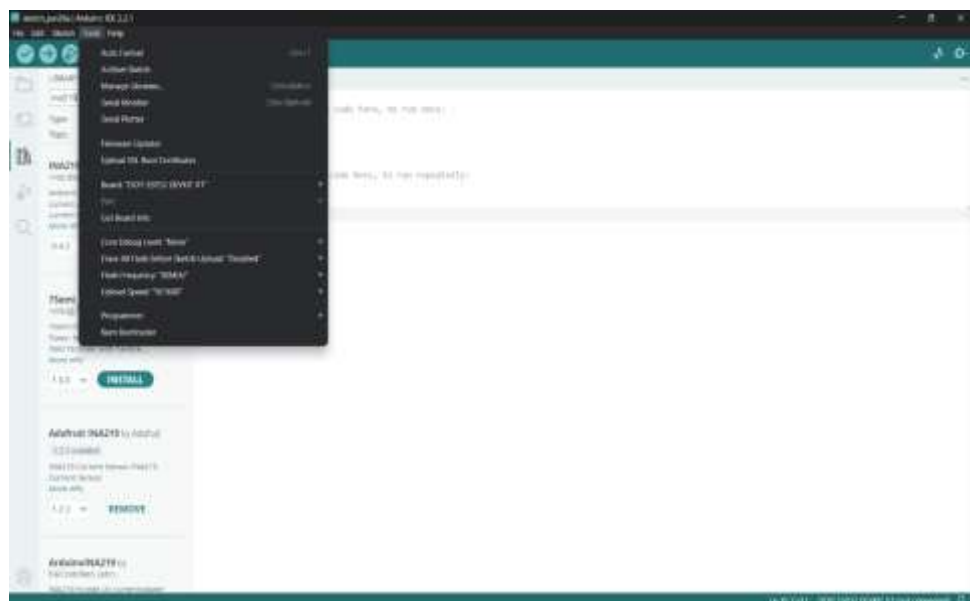


Gambar 2. 13 Tampilan *Board Manager*

4. Menginstal *Library*

Agar seluruh fungsi dan periferal pada ESP32 dapat digunakan secara optimal, diperlukan penambahan pustaka (*library*) yang sesuai dengan kebutuhan pemrograman. Instalasi pustaka dilakukan melalui fitur Library Manager yang dapat diakses melalui menu Tools > Manage Libraries maupun Sketch > Include Library > Manage Libraries, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14. Melalui jendela Library Manager, pengguna dapat mencari, memilih, dan menginstal pustaka yang diperlukan sehingga fitur-fitur yang digunakan pada sistem dapat diimplementasikan dengan baik selama proses pemrograman.

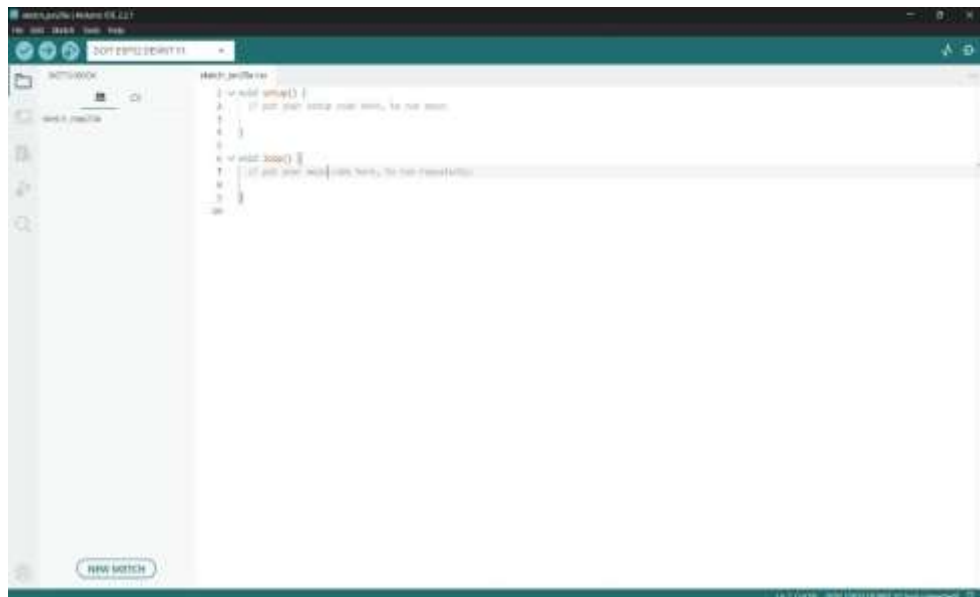
Selanjutnya, port komunikasi serial dapat dipilih melalui menu *Tools > Port*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.16. Pemilihan port yang sesuai merupakan langkah penting agar Arduino IDE dapat mengenali dan menjalin komunikasi dengan mikrokontroler yang terhubung ke komputer, sehingga proses pengunggahan program maupun komunikasi data dapat berlangsung dengan baik.



Gambar 2. 16 Tampilan Menu *Tools* untuk memilih *Port*

6. Menulis Program

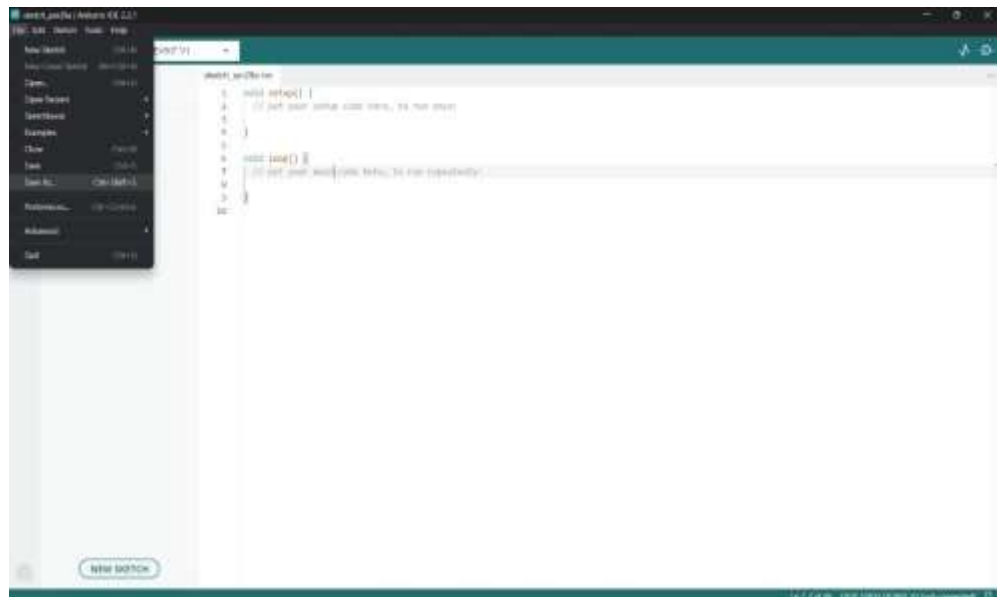
Setelah seluruh proses konfigurasi selesai dilakukan, pengguna dapat mulai menuliskan program atau *sketch* pada *editor* yang tersedia di Arduino IDE. Program yang dibuat berisi serangkaian instruksi atau logika yang akan dijalankan oleh mikrokontroler sesuai dengan fungsi sistem yang dirancang. Proses penulisan kode dilakukan pada area kerja (*editor*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.17.



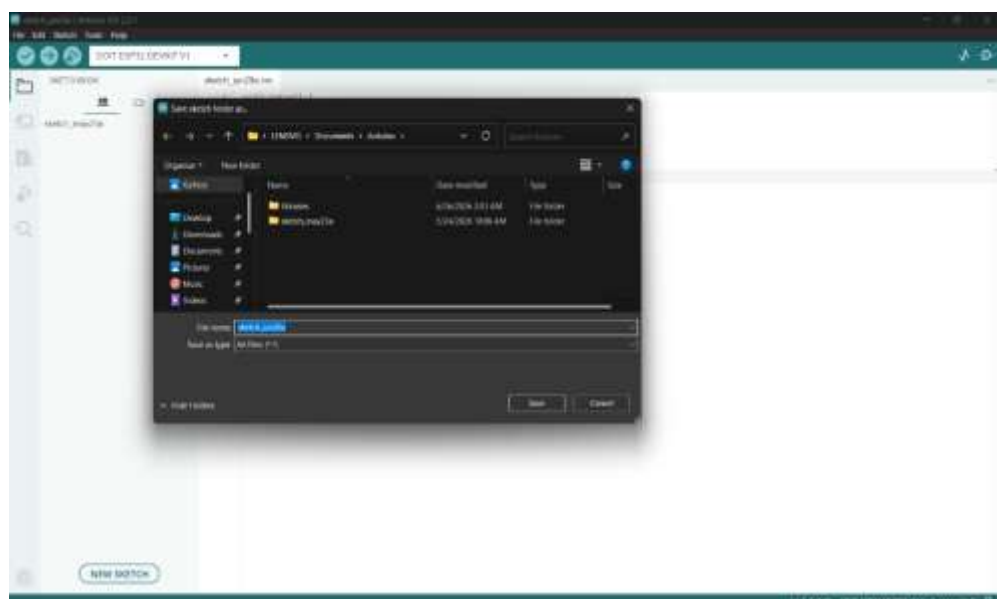
Gambar 2. 17 Area *Sketch* pada Arduino IDE

7. Menyimpan Program

Setelah proses penulisan program selesai, langkah berikutnya adalah menyimpan file *sketch* ke dalam media penyimpanan pada komputer. Penyimpanan program dapat dilakukan melalui menu *File > Save As*, sehingga pengguna dapat menentukan nama file serta lokasi penyimpanan sesuai kebutuhan. Tampilan menu *Save As* ditunjukkan pada Gambar 2.18. Program yang telah disimpan kemudian dapat digunakan untuk proses verifikasi (*Verify*) guna memeriksa adanya kesalahan pada kode sebelum diunggah ke papan mikrokontroler. Adapun tampilan jendela untuk menentukan lokasi penyimpanan file dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2. 18 Tampilan Menu *File* Untuk *Save Project*



Gambar 2. 19 Tampilan Menu untuk Menyimpan *Project* di *Computer*

2.2.18 Komunikasi Blynk

Blynk merupakan platform Internet of Things (IoT) yang mendukung mekanisme komunikasi dua arah antara mikrokontroler dan pengguna melalui aplikasi berbasis mobile. Sistem ini memungkinkan data hasil pembacaan sensor dikirim dari perangkat ke server untuk kemudian ditampilkan kepada pengguna secara real-time, sekaligus memberikan akses bagi pengguna untuk mengirimkan

perintah kembali ke perangkat. Proses komunikasi tersebut memanfaatkan protokol jaringan seperti TCP/IP, HTTP, dan MQTT, serta dilengkapi dengan sistem keamanan berupa enkripsi SSL/TLS guna menjaga keandalan dan kerahasiaan data selama transmisi[36].

Pada sistem yang penulis kembangkan, Blynk berfungsi sebagai media antarmuka utama yang menampilkan data hasil monitoring panel surya, seperti tegangan, arus, suhu, dan intensitas cahaya. Data yang dikirimkan oleh ESP32 akan divisualisasikan dalam bentuk angka maupun grafik sehingga memudahkan pengguna dalam memahami kondisi sistem secara langsung tanpa harus berada di lokasi.

Selain sebagai media monitoring, Blynk juga dimanfaatkan untuk mendukung proses deteksi dini gangguan melalui fitur notifikasi. Ketika sistem mendeteksi kondisi yang tidak normal berdasarkan analisis adaptive threshold, informasi tersebut akan dikirimkan secara otomatis ke aplikasi Blynk dalam bentuk peringatan. Hal ini memungkinkan pengguna untuk segera mengetahui adanya potensi gangguan dan melakukan tindakan penanganan secara cepat.

Pada integrasi komunikasi Blynk dalam sistem juga mendukung proses data logging secara tidak langsung, karena data yang ditampilkan secara kontinu dapat digunakan sebagai dasar analisis performa panel surya. Dengan demikian, penggunaan Blynk tidak hanya terbatas pada pemantauan, tetapi juga berperan dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan dan keandalan sistem monitoring serta deteksi dini gangguan pada panel surya berbasis IoT. Bentuk software dari komunikasi Blynk dapat ditunjukkan pada gambar 2.20.



Gambar 2. 20 Komunikasi Blynk

2.2.19 Google Spreadsheet

Google Spreadsheet merupakan layanan pengolah data berbasis *cloud* yang dikembangkan oleh Google untuk membuat, menyimpan, mengelola, dan membagikan data dalam bentuk lembar kerja secara daring. Berbeda dengan perangkat lunak spreadsheet konvensional yang menyimpan data secara lokal, Google Spreadsheet memungkinkan data disimpan pada server *cloud* sehingga dapat diakses dari berbagai perangkat yang terhubung ke internet. Selain mendukung pengolahan data, platform ini juga menyediakan fitur kolaborasi secara langsung (*real-time*), sehingga beberapa pengguna dapat mengakses dan memperbarui data yang sama secara bersamaan.[37]

Pada penelitian ini, Google Spreadsheet digunakan sebagai media penyimpanan (*data logging*) untuk seluruh hasil monitoring panel surya. ESP32 mengirimkan data hasil pembacaan sensor INA219, BH1750, dan RTC melalui jaringan internet menggunakan Google Apps Script. Selanjutnya, data tersebut disimpan secara otomatis ke dalam Google Spreadsheet sehingga setiap hasil pengukuran terdokumentasi berdasarkan waktu pengambilan data.

Selain berfungsi sebagai media penyimpanan data historis, Google Spreadsheet juga mendukung proses analisis terhadap gangguan yang terdeteksi oleh sistem. Ketika ESP32 mengidentifikasi kondisi abnormal, seperti penurunan arus akibat kabel terlepas atau penurunan daya akibat *shadow* (bayangan),

informasi tersebut akan tercatat bersama parameter pengukuran lainnya. Dengan demikian, pengguna tidak hanya memperoleh informasi kondisi panel secara real-time melalui aplikasi Blynk, tetapi juga memiliki rekaman data yang dapat digunakan untuk analisis, evaluasi, serta dokumentasi hasil monitoring.

Pada sistem yang dikembangkan, aplikasi Blynk berperan sebagai antarmuka untuk menampilkan kondisi panel surya secara real-time dan memberikan informasi apabila terdeteksi gangguan, sedangkan Google Spreadsheet berfungsi sebagai media penyimpanan data hasil monitoring secara berkelanjutan. Integrasi kedua platform tersebut memungkinkan sistem tidak hanya melakukan pemantauan secara langsung, tetapi juga menyediakan data historis yang dapat dimanfaatkan untuk mengevaluasi performa panel surya serta mendukung proses deteksi dini gangguan.



Gambar 2. 21 *Google Spreadsheet*

2.2.20 Lampu LED AC 12W 220V

Lampu LED AC 220V merupakan salah satu jenis beban yang banyak digunakan pada sistem PLTS karena memiliki konsumsi daya yang relatif rendah serta dapat dioperasikan menggunakan tegangan keluaran inverter. Pada sistem ini, inverter berfungsi mengubah tegangan DC yang berasal dari baterai menjadi tegangan AC 220V sehingga energi listrik dapat dimanfaatkan untuk menyalakan peralatan rumah tangga, khususnya sistem penerangan.[38]

Penggunaan lampu LED pada sistem tenaga surya juga dinilai lebih efisien dibandingkan lampu konvensional karena memiliki tingkat pencahayaan yang baik dengan kebutuhan daya yang lebih kecil. Selain itu, lampu LED menghasilkan

panas yang lebih rendah sehingga lebih aman dan cocok diterapkan pada sistem PLTS skala kecil maupun sistem monitoring berbasis IoT.

Pada penelitian ini digunakan lampu LED AC dengan daya 12 watt dan tegangan kerja 220V AC sebagai beban utama pada sisi keluaran inverter. Lampu tersebut dipilih karena memiliki konsumsi energi yang cukup hemat, namun tetap mampu memberikan pencahayaan yang stabil selama proses pengujian sistem berlangsung. Dengan penggunaan daya yang tidak terlalu besar, lampu LED 12W juga sesuai untuk diaplikasikan pada PLTS berkapasitas kecil dengan panel surya 50WP dan baterai 12V. Tabel 2.17 adalah spesifikasi umum lampu LED AC 12 watt 220V.

Tabel 2. 17 Spesifikasi Lampu LED AC 12W 220V

Parameter	Spesifikasi
Jenis lampu	LED AC
Daya	12 Watt
Tegangan kerja	220V AC
Fluks Cahaya	1310 lm
Frekuensi	50/60 Hz
Efisiensi	Hemat energi
Aplikasi	Rumah tangga dan sistem PLTS

Bentuk fisik dari Lampu LED AC 12W 220V dapat ditunjukkan pada gambar 2.22.



Gambar 2. 22 Lampu LED AC 12W 220V