

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Sebagai bahan pertimbangan dalam menyelesaikan tugas akhir ini penyusun melakukan studi literatur terkait sensor.

1. Merujuk pada jurnal “*Box Design of Series Parallel Plug-in and Monitoring of LiFePO₄ Battery Performance as Solar Panel Power Storage*” mengenai desain wadah baterai seri-paralel dan *Monitoring* kinerja baterai Lithium Iron Prosphate (LiFePO₄) sebagai tempat penyimpanan daya panel surya. sistem *Monitoring* dirancang menggunakan mikrokontroller ESP 32 yang terintegrasi dengan sensor arus dan tegangan ACS712 serta sensor suhu DS18B20 untuk mengukur parameter penting pada baterai pada kondisi pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*). [5]
1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Asqolani, Azro, dkk. 2023. “Rancang Bangun Sistem *Monitoring* Baterai Pada PLTS dengan Sistem Kontrol Beban Berbasis *Internet of Things* (IoT)” merancang sistem *Monitoring* baterai pada PLTS dengan sistem kontrol beban berbasis *Internet of Things* (IoT). Penelitian ini menggunakan sensor INA 219 untuk melakukan pengukuran arus dan tegangan, menggunakan metode *Open Circuit Voltage* (OCV) untuk estimasi kapasitas pada baterai, serta mikrokontroller ESP 32 yang terhubung dengan pada *platform blynk*. [6]
2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Putra, Dimas, Rangga, Rajawali, Perkasa, dkk. 2024. “Perancangan Alat *Monitoring* Kinerja PLTS *Off-Grid* Berbasis IoT Menggunakan NodeMCU ESP 32 dan Telegram” merancang alat *Monitoring* kinerja PLTS *Off-Grid* berbasis IoT menggunakan NodeMCU ESP 32 dan telegram. Penelitian ini menggunakan model *prototype* eksperimen, dimana data hasil *Monitoring* dikirimkan melalui bot telegram sehingga pengguna memantau kondisi PLTS melalui Smartphone. Parameter listrik yang diukur berupa arus,

tegangan, serta suhu pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan menggunakan sensor INA 219, PZEM-003T, DHT 22, dan BH1750. [7]

3. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Zain, Faizal, Norma, dkk. 2023. “Pengembangan Sistem *Monitoring* Kapasitas Baterai Kendaraan Listrik Berbasis *Internet of Things*” mengembangkan sistem *Monitoring* kapasitas baterai kendaraan listrik berbasis IoT. Penelitian ini menemukan bahwa modul sensor INA219 memiliki persentase *error* pembacaan tegangan pada rentang 0% hingga 0,66% dengan rata-rata 0,18%, serta *error* pembacaan arus pada rentang 0,91% hingga 7,57%. Temuan ini menjadi acuan penting bahwa sensor INA219 memiliki tingkat akurasi yang memadai untuk aplikasi *Monitoring* baterai, meskipun diperlukan proses kalibrasi yang tepat untuk meminimalkan *error*. [8]
4. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Widiyanto, Eko, Didik, dkk. 2019. “*Simple LoRa Protocol: Protokol Komunikasi LoRa Untuk Sistem Pemantauan Multisensor*” mengembangkan *Simple LoRa Protocol* untuk sistem pemantauan multisensor”. Hasil pengujian menunjukkan bahwa modul LoRa mampu mencapai jangkauan transmisi hingga 1,24 km pada kondisi *line-of-sight* dengan kesalahan pengiriman data sebesar 0,2%. Penelitian ini menunjukkan bahwa komunikasi LoRa dapat diandalkan sebagai media transmisi data pada sistem *Monitoring* yang membutuhkan jangkauan luas. [9]

Berdasarkan acuan tinjauan pustaka di atas, penyusun menyusun tugas akhir dengan membuat sistem *Monitoring* baterai Lithium-Ion pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berbasis IoT menggunakan komunikasi *LoRa*. dengan menggunakan sensor INA 219, DS18B20 dan sistem komunikasi *LoRa* untuk membaca parameter kelistrikan *Shunt Voltage*, *Battery Voltage*, *Current*, *Power*, *Load Voltage*, dan *State of Charge (SoC)* untuk memantau kondisi baterai berbasis IoT menggunakan komunikasi *LoRa* yang terintegrasi *Google Spreadsheet*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Pemantauan Berbasis *Real-time* dan IoT

Hibban, Muhammad, Akmal, dkk. 2025. “Pengembangan Integrated Monitoring System Berbasis Internet of Things (IOT) Pada Kendaraan Steyr 91 Rosenbauer” sistem pemantauan secara real-time dirancang untuk memonitor suatu kondisi objek secara berkelanjutan menggunakan sensor-sensor fisik yang terhubung dengan mikrokontroller. Data kemudian ditransmisikan menggunakan internet sehingga datanya dapat diakses kapan saja dan lokasi manapun tanpa jarak. [10]

Muhammad, Hisar, Alexcandra, dkk. 2024. “Sistem Pemantauan Dan Pengendalian Energi Berbasis IoT Untuk Meningkatkan Efisiensi Energi Dalam Lingkungan Cerdas” efektivitas sistem pemantauan energi berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroller mampu memberikan gambaran tentang konsumsi energi yang sangat akurat secara real-time. Hal ini meminimalisir inefisiensi dan mencegah potensi kegagalan pada sistem akibat lewatnya batas parameter aman operasional sistem. [11]

Sistem pemantauan melibatkan penggunaan perangkat lunak khusus yang memungkinkan pengumpulan data secara berkelanjutan, analisis data secara real-time, dan pengiriman notifikasi atau alarm apabila terjadi sesuatu yang tidak diinginkan pada sistem. Data yang dikumpulkan melalui sistem Monitoring dapat berupa metrik kinerja, log kejadian, data sensor atau informasi yang lainnya yang berkaitan dengan sistem yang terpantau.

2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Menurut Nurjaman, Hendi, Bagja, dkk. 2022, “Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sebagai Solusi Energi Terbarukan Rumah Tangga” Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik menggunakan teknologi sel surya (Photovoltaic). PLTS menjadi salah satu solusi energi terbarukan yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil. [12]

Sistem PLTS terdiri dari beberapa komponen utama seperti panel surya, Solar Charge Controller (SCC), baterai, inverter, dan beban listrik. Panel surya memiliki fungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC), Energi yang dihasilkan kemudian diatur oleh SCC untuk mengoptimalkan proses pengisian baterai dan melindungi baterai dari overcharge maupun overdischarge. Energi yang tersimpan pada baterai dapat digunakan kembali saat cahaya pada matahari rendah atau dalam kondisi tidak ada cahaya matahari sama sekali seperti kondisi malam hari.

Pada sistem ini Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menggunakan konfigurasi Off-Grid tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN dan dapat menyimpan energi yang dihasilkan pada baterai dan tidak menggunakan inverter karena beban listrik nya adalah Lampu LED DC. Fokus pemantauan hanya pada baterai LiFePO₄ saat pengisian (charging) dan pengosongan (discharging).

2.2.3 Panel Surya

Menurut penelitian [13] “Analisis Efisiensi Panel Surya Sebagai Energi Alternatif” Panel surya (Solar Panel) merupakan perangkat yang terdiri dari beberapa sel surya (Solar Cell) yang memiliki fungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik (Photovoltaic Effect). Sel surya terbuat dari material semikonduktor biasanya silikon yang dapat menghasilkan aliran elektron saat terkena cahaya matahari sehingga menghasilkan arus listrik searah (DC).

Prinsip kerja sel surya dimulai dari cahaya matahari (foton) menembus lapisan penutup dan lapisan anti-reflektif, foton tersebut diserap oleh semikonduktor seperti siliko. Energi dari foton mengakibatkan elektron lepas dari atomnya, menciptakan pasangan elektron-hole. Medan listrik disambungan P-N memisahkan Hole dan elektron, mengarahkan elektron ke lapisan tipe-N dan hole ke lapisan tipe-P. Elektron mengalir melalui lapisan kontak depan dan hole melalui lapisan kontak belakang, menciptakan arus listrik yang dapat digunakan.

Pada sistem Monitoring ini, panel surya 50 WP berfungsi sebagai sumber energi listrik primer yang mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC) untuk mengisi baterai LiFePO₄ melalui Solar Charge Controller.

Kondisi operasi sistem charging, idle, dan discharging dapat diidentifikasi dari polaritas dan besaran arus yang terukur oleh sensor INA219, Berikut Tabel 2-1 ditunjukkan spesifikasi panel surya yang digunakan.

Tabel 2-1 Spesifikasi Panel Surya

Keterangan Panel Surya	Spesifikasi
Model Number	SP050W-36-M
Tipe	<i>Monocrystalline</i>
<i>Max Power</i>	50W
<i>Max Power Voltage</i>	18.24V
<i>Max Power Current</i>	2.75A
<i>Open-Circuit Voltage</i>	21.8V
<i>Short Circuit Current</i>	2.87A

Panel surya monokristalin merupakan jenis panel surya dengan tingkat efisiensi yang tinggi dalam menghasilkan daya listrik per satuan luas. Efisiensi panel ini dapat mencapai sekitar 15%. Namun, panel monokristalin memiliki kelemahan yaitu performanya akan menurun ketika digunakan pada kondisi cahaya matahari rendah atau cuaca berawan. Selain itu, bentuk sel suryanya yang cenderung bulat atau segi enam menyebabkan terdapat ruang kosong ketika disusun menjadi panel surya. Bentuk panel surya monokristalin ditunjukkan pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Panel Surya Monokristalin

Panel surya memiliki dua terminal utama yang berfungsi sebagai jalur keluaran energi listrik hasil konversi energi cahaya matahari melalui efek fotovoltaiik. Kedua terminal tersebut, yaitu terminal positif (+) dan terminal negatif (-), berperan dalam menyalurkan arus listrik dari panel surya menuju Solar Charge Controller (SCC) sebagai pengatur proses pengisian baterai. Adapun fungsi masing-masing terminal pada panel surya ditunjukkan pada Tabel 2.2

Tabel 2-2 Tabel Fungsi Terminal pada Panel Surya

No	Keterangan	Fungsi
1	Terminal Positif (+)	Terminal positif merupakan jalur keluaran elektron bebas hasil efek fotovoltaiik pada lapisan tipe-N sambungan P-N, memiliki potensial listrik lebih tinggi, dan dihubungkan ke terminal PV+ pada <i>Solar Charge Controller</i>
2	Terminal Negatif (-)	Terminal negatif merupakan jalur referensi <i>ground</i> sistem, tempat berkumpulnya hole pada lapisan tipe-P, dan dihubungkan ke terminal PV- pada <i>Solar Charge Controller</i> .

2.2.4 Solar Charge Controller Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Menurut Penelitian [14] “Comparative Analysis Of Solar Charge Controller Performance Between MPPT And PWM On Solar Panels” Solar Charge Controller (SCC) MPPT merupakan pengontrol pengisian baterai yang mampu mengoptimalkan daya keluaran panel surya dengan mencari Maximum Power Point (MPPT). Berbeda dengan SCC tipe PWM yang hanya menghubungkan panel ke baterai melalui teknik pensaklaran, MPPT menggunakan konverter DC-DC untuk menyesuaikan tegangan dan arus sehingga energi yang diserap dari panel menjadi lebih maksimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SCC MPPT menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan PWM pada berbagai kondisi operasi.

keberhasilan SCC MPPT sangat dipengaruhi oleh algoritma pelacakan yang digunakan, seperti Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance, Fuzzy Logic, dan Neural Network. Algoritma yang tepat mampu meningkatkan efisiensi

konversi energi, mempercepat proses pelacakan titik daya maksimum, serta mengurangi rugi-rugi daya akibat perubahan kondisi lingkungan.

SCC MPPT (Maximum Power Point Tracking) bekerja dengan cara melacak titik daya maksimum (Maximum Power Point/MPPT) dari panel surya secara dinamis dan terus-menerus. Titik daya maksimum adalah kondisi di mana panel surya menghasilkan daya keluaran paling besar, yang dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari dan suhu panel.

Panel surya memiliki karakteristik kurva I-V (arus-tegangan) yang berubah-ubah tergantung kondisi lingkungan. Pada kurva tersebut terdapat satu titik operasi tertentu yang menghasilkan daya maksimum, yaitu hasil perkalian tegangan (V_{mpp}) dan arus (I_{mpp}) yang paling besar. SCC MPPT menggunakan algoritma pelacakan yang paling umum adalah algoritma Perturb and Observe (P&O) untuk secara terus-menerus mengubah-ubah titik operasi panel dan mengamati apakah daya yang dihasilkan meningkat atau menurun, kemudian menyesuaikan impedansi masukan agar selalu berada pada titik daya maksimum.

Setelah daya dari panel surya diekstraksi pada tegangan MPP (umumnya lebih tinggi dari tegangan baterai), SCC MPPT menggunakan rangkaian konverter DC-DC step-down (buck converter) untuk menurunkan tegangan tersebut ke level yang sesuai dengan kebutuhan pengisian baterai. Proses konversi ini memungkinkan energi yang lebih besar dari panel surya dapat disalurkan ke baterai dibandingkan dengan SCC PWM yang hanya menggunakan metode switching on/off sederhana. Berikut Tabel 2-3 ditunjukkan spesifikasi *Solar Charge Controller MPPT* yang digunakan.

Tabel 2-3 Spesifikasi *Solar Charge Controller MPPT*

Keterangan	Spesifikasi
Model Number	POW Keeper 1220
Tipe	Maximum Power Point Tracker (MPPT)
<i>Rated Voltage</i>	12/24V
<i>Charging Current</i>	20A

<i>Max PV Open Circuit Voltage</i>	60V
<i>Battery Voltage Range</i>	8-32V
<i>Tracking Efficiency</i>	99,5%
<i>Peak Conversion Efficiency</i>	97%
<i>Max Input Power (12V)</i>	260W
<i>Max Input Power (24V)</i>	520W

Solar Charge Controller (SCC) Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan perangkat elektronika yang berfungsi mengatur proses pengisian baterai dari panel surya dengan cara mengoptimalkan daya keluaran panel pada titik daya maksimum (*Maximum Power Point*), SCC MPPT juga berfungsi melindungi baterai dari kondisi *overcharge*, *overdischarge*, dan arus balik (*reverse current*), sehingga dapat memperpanjang umur pakai baterai dan meningkatkan keandalan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Bentuk *Solar Charge Controller* MPPT yang ditunjukkan pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 *Solar Charge Controller* MPPT

Solar Charge Controller (SCC) MPPT memiliki beberapa terminal yang berfungsi sebagai penghubung antara panel surya, baterai, dan beban DC dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Setiap terminal memiliki fungsi yang berbeda sesuai dengan alur penyaluran energi listrik, mulai dari penerimaan daya dari panel surya, proses pengisian baterai, hingga penyaluran daya ke beban. Keterangan fungsi masing-masing terminal pada SCC MPPT ditunjukkan pada Tabel 2-4

Tabel 2-4 Keterangan Fungsi Terminal SCC MPPT

No	Keterangan	Fungsi
1	PV+	<i>Input</i> positif energi surya masuk pada <i>Solar Charge Controller</i> (SCC)
2	PV-	<i>Ground</i> referensi dan <i>input</i> negatif dari panel surya dan masuk pada (SCC)
3	BAT+	Terminal positif pada baterai dan <i>Output charging</i> ke baterai
4	BAT-	Terminal negatif pada baterai dan <i>ground</i> referensi baterai
5	LOAD +	<i>Output</i> positif daya pada beban DC
6	LOAD -	<i>Output</i> negatif daya pada beban DC dan menjadi <i>ground</i> referensi beban

2.2.5 Baterai Lithium Iron Prosphate (LiFePO4)

Menurut penelitian [15] “Pengisi Daya Baterai LiFePO4 Sebagai Sumber Energi Pada Sepeda Listrik” Baterai merupakan perangkat yang bisa menyuplai energi listrik searah (DC) , proses utama dari cara kerja baterai adalah perubahan pada energi kimia dalam baterai menjadi energi listrik. Pengisian daya pada Rechargeable Energy dilakukan dengan cara mengalirkan arus berkelanjutan sampai tegangan pada baterai naik ke nilai yang telah ditentukan sesuai dengan spesifikasi baterai yang digunakan. Karena mengisi daya berlebih dari kapasitas

maksimal pada baterai akan mengakibatkan kerusakan dan umur penggunaan berkurang pada sistem ini menggunakan baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4).

Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) adalah jenis baterai lithium-ion yang menggunakan senyawa Lithium Iron Phosphate sebagai katoda. Grafit (C) sebagai anoda, dan larutan garam lithium dalam pelarut organik sebagai elektrolit. Baterai ini menjadi salah satu komponen kunci dalam sistem penyimpanan energi. Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) menjadi pilihan yang tepat dalam sistem penyimpanan energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) karena mempunyai karakteristik umur pakai yang panjang, aman terhadap suhu tinggi dan energi yang stabil.

Prinsip kerja baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) menggunakan mekanisme interkalasi ion lithium (Li^*) yang bergerak bolak-balik antara elektroda melalui elektrolit, sementara elektron mengalir melalui rangkaian luar untuk menghasilkan dan menyimpan energi listrik. Saat proses pengisian (*charging*) energi listrik dari sumber eksternal mendorong ion (Li^*) melepaskan diri dari kristal katoda LiFePO_4 membentuk FePO_4 , setelah itu bermigrasi melewati elektrolit menuju anoda dan berinterkalasi menuju lapisan dalam grafit membentuk LiC_6 . Reaksi ini bersifat reversible tetapi tidak merusak struktur material elektroda. Alasan ini mengapa LiFePO_4 mampu bertahan lebih dari 2000 siklus pengisian (*charging*). Pada proses pengosongan (*discharging*) ion Li^* yang tersimpan di anoda (LiC_6) kembali terlepas dan mengalir melalui elektrolit menuju katoda, berikatan kembali dengan FePO_4 menjadi LiFePO_4 , elektron yang dilepas anoda mengalir melalui rangkaian luar. Proses ini yang menghasilkan energi listrik untuk mensuplai beban.

Pada sistem ini, baterai LiFePO_4 berfungsi sebagai media penyimpan energi listrik yang dihasilkan panel surya sekaligus sumber energi utama untuk menyuplai beban saat panel surya tidak aktif. Baterai juga berperan sebagai objek utama pemantauan sistem, di mana parameter tegangan, arus, daya, dan suhu baterai diukur secara real-time menggunakan sensor INA219 dan DS18B20. Berikut Tabel 2-5 ditunjukkan spesifikasi baterai LiFePO_4 yang digunakan.

Tabel 2-5 Spesifikasi Baterai LiFePO4

Keterangan Baterai	Spesifikasi
Tegangan Baterai	12,8V (4S2P)
Kapasitas Baterai	12.000 mAh
Cell Tipe	LiFePO4 (3,2V 6.000 mAh)
<i>Charging Voltage</i>	13,8-15 V DC Max
<i>Discharge Rate</i>	3C (3x12= 36A)
Dimensi	150x65X95 mm

Baterai LiFePO4 memiliki tingkat keamanan yang lebih tinggi, stabilitas termal yang baik, umur siklus (*cycle life*) yang panjang, serta efisiensi pengisian yang tinggi. Selain itu, baterai LiFePO4 memiliki kemampuan mempertahankan tegangan keluaran yang relatif stabil selama proses pelepasan energi, sehingga banyak digunakan pada sistem penyimpanan energi, kendaraan listrik, dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Bentuk Baterai LiFePO4 yang ditunjukkan pada Gambar 2.3

**Gambar 2.3** Baterai LiFePO4

Baterai LiFePO4 memiliki dua terminal utama, yaitu terminal positif (+) dan terminal negatif (-), yang berfungsi sebagai jalur keluaran dan masukan energi listrik selama proses pengisian (*charging*) maupun pengosongan (*discharging*). Kedua terminal tersebut menjadi penghubung antara baterai dengan rangkaian luar, seperti Solar Charge Controller (SCC) dan beban, sehingga proses penyaluran energi listrik dapat berlangsung dengan baik. Adapun fungsi masing-masing terminal pada baterai LiFePO4 ditunjukkan pada Tabel 2-6.

Tabel 2-6 Fungsi Terminal Baterai LiFePO4

No	Keterangan	Fungsi
1	Terminal Positif (+)	<i>Output</i> tegangan positif cell (3,2V)
2	Terminal Negatif (-)	<i>Output</i> tegangan negatif cell dan sebagai referensi <i>ground</i> cell

2.2.6 State of Charge (SoC)

State of Charge (SoC) adalah parameter yang menunjukkan persentase kapasitas energi yang tersisa pada baterai dibandingkan dengan kapasitas energi maksimumnya pada kondisi baterai penuh. Nilai SoC dinyatakan dalam bentuk persentase dengan rentang 0% hingga 100%, di mana 0% menunjukkan kondisi baterai kosong dan 100% menunjukkan kondisi baterai penuh. SoC merupakan hal yang cukup penting dalam teknologi monitoring baterai karena menggambarkan status muatan dan energi yang tersimpan pada baterai, serta membantu pengguna untuk mengoptimalkan penggunaan baterai dan mencegah kerusakan akibat pengosongan berlebihan.

Menurut penelitian [16] Terdapat beberapa metode estimasi SoC yang umum digunakan, antara lain metode Coulomb Counting, Open Circuit Voltage (OCV), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), dan Kalman Filter. Metode OCV merupakan metode paling sederhana untuk estimasi SoC karena pada beberapa jenis baterai, tegangan OCV merupakan fungsi linear dari SoC sehingga pengukuran tegangan dapat digunakan untuk memprediksi SoC baterai dengan mudah.

Pada penelitian ini digunakan metode berbasis tegangan (Voltage-Based Estimation) menggunakan Battery Voltage yang terukur oleh sensor INA219. Metode ini dipilih karena implementasinya yang sederhana dan tidak memerlukan integrasi arus secara terus-menerus. Baterai LiFePO4 12V konfigurasi 4S memiliki tegangan minimum 10V, dan BMS akan mendeteksi ketika tegangan baterai turun hingga sekitar 10V untuk memicu pemutusan tegangan rendah (Low Voltage Disconnect/LVD). Tegangan pengisian yang direkomendasikan untuk baterai

LiFePO₄ 12V adalah 14,4V, sedangkan tegangan minimum baterai adalah sekitar 10V.

Berdasarkan karakteristik tegangan baterai LiFePO₄ 4S tersebut, perhitungan SoC pada penelitian ini menggunakan rumus sebagai berikut

$$SoC = \frac{V_{batt} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \times 100\% \quad (2.1)$$

Keterangan:

V_{batt} = Tegangan baterai terukur (*Battery Voltage*) dalam Volt

V_{min} = Tegangan minimum baterai = 10,0 V (SoC 0%)

V_{max} = Tegangan maksimum pengisian = 14,4V (SoC 100%)

2.2.7 State of Health (SoH)

State of Health (SoH) adalah parameter yang menunjukkan kondisi kesehatan baterai dibandingkan dengan kondisi baterai saat masih baru, dinyatakan dalam bentuk persentase. Nilai SoH 100% menunjukkan bahwa baterai masih dalam kondisi sempurna seperti saat baru, sedangkan nilai SoH yang semakin rendah menunjukkan adanya degradasi atau penurunan kemampuan baterai akibat siklus pengisian dan pengosongan yang berulang.

Menurut penelitian [17] “State-of-health estimation of lithium-ion batteries: A comprehensive literature review from cell to pack levels” *State of Health* (SOH) adalah parameter yang digunakan untuk menggambarkan tingkat kesehatan baterai dengan membandingkan kondisi baterai saat ini terhadap kondisi baterai saat masih baru. SOH digunakan untuk mengetahui tingkat degradasi baterai akibat proses pengisian dan pengosongan yang berulang, sehingga dapat menjadi indikator sisa umur pakai baterai.

Pada penelitian ini digunakan metode berbasis resistansi internal karena implementasinya yang sederhana dan dapat dilakukan secara real-time menggunakan data Shunt Voltage dan arus yang sudah tersedia dari sensor INA219 tanpa memerlukan sensor tambahan. Metode berbasis resistansi internal bekerja berdasarkan prinsip bahwa resistansi internal baterai akan meningkat seiring

bertambahnya usia dan jumlah siklus pengisian akibat degradasi material elektroda dan elektrolit di dalam sel baterai. Resistansi internal baterai dihitung menggunakan Hukum Ohm berdasarkan perbandingan antara tegangan jatuh pada resistor shunt (Shunt Voltage) dengan arus yang mengalir sebagai berikut:

Berdasarkan karakteristik tegangan baterai LiFePO₄ 4S tersebut, perhitungan SoH pada penelitian ini menggunakan rumus sebagai berikut

$$SoH = \frac{R_{ref}}{R_{internal}} \times 100\% \quad (2.2)$$

Keterangan:

R_{ref} = Resistansi Internal Referensi ditetapkan 100 mΩ berdasarkan data pengujian Hari Ke-1

$R_{internal}$ = Resistansi Internal Terukur

2.2.8 Lampu LED DC

Menurut penelitian [18] “Karakteristik Dan Efisiensi Lampu Light Emitting Dioda (LED) Sebagai Lampu Hemat Energi” Lampu Light Emitting Diode (LED) adalah komponen semikonduktor yang mengubah energi listrik menjadi energi cahaya melalui proses elektrolumensi. Lampu LED mempunyai intensitas cahaya yang tinggi dan menghasilkan panas yang sangat kecil dibandingkan dengan lampu pijar suhu LED hanya mencapai 36°C lampu pijar bisa mencapai 170°C.

Prinsip kerja lampu LED DC berdasarkan prinsip polarisasi. Seperti halnya dioda, chip LED mempunyai kutub positif dan negatif (p-n) hanya akan menyala apabila diberikan arus maju (forward bias). LED terbuat dari bahan semikonduktor hanya mengizinkan arus listrik mengalir ke satu arah dan tidak pada arah sebaliknya. Jika LED diberikan arah arus sebaliknya hanya akan ada sedikit arus yang melewati chip pada LED sehingga tidak mengeluarkan emisi cahaya.

Pada sistem Monitoring ini, lampu LED DC 12V dengan daya 20W digunakan sebagai beban listrik yang merepresentasikan konsumsi daya nyata dalam sistem PLTS. Lampu berfungsi sebagai beban discharge baterai LiFePO₄ sehingga sistem dapat diuji pada kondisi operasi yang nyata. Berikut Tabel 2-7 ditunjukkan spesifikasi Lampu LED DC yang digunakan.

Tabel 2-7 Spesifikasi Lampu LED DC

Keterangan Lampu LED DC	Spesifikasi
Tegangan Kerja	12V DC
Daya	20 Watt
Jenis LED	LED Bulb / balon LED

lampu LED DC memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi, konsumsi daya yang lebih rendah, umur pakai yang lebih panjang, serta menghasilkan panas yang lebih sedikit. Oleh karena itu, lampu LED DC banyak digunakan sebagai beban pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), terutama pada sistem mandiri (*stand-alone photovoltaic system*), karena dapat dioperasikan langsung menggunakan energi yang disimpan pada baterai tanpa memerlukan konversi dari arus searah menjadi arus bolak-balik. Bentuk Lampu LED DC yang ditunjukkan pada Gambar 2.4

**Gambar 2.4** Lampu LED DC

Lampu LED DC memiliki dua terminal utama, yaitu terminal positif (+) dan terminal negatif (-), yang berfungsi sebagai jalur masuk dan keluarnya arus searah (DC). Kedua terminal tersebut harus dihubungkan dengan polaritas yang benar agar LED dapat bekerja pada kondisi *forward bias* sehingga mampu menghasilkan cahaya. Selain sebagai penghubung ke sumber tegangan, masing-masing terminal juga memiliki fungsi yang berkaitan dengan struktur semikonduktor di dalam chip LED. Adapun fungsi setiap terminal pada lampu LED DC ditunjukkan pada tabel 2-8 berikut.

Tabel 2-8 Fungsi Terminal Lampu LED DC

No	Keterangan	Fungsi
1	Terminal Positif (+)	Terminal masukan arus DC yang dihubungkan ke kutub positif sumber tegangan. Pada struktur internal chip LED, terminal ini merupakan sisi semikonduktor tipe-P yang menerima aliran <i>hole</i> sehingga terjadi kondisi <i>forward bias</i> dan chip LED dapat memancarkan cahaya.
2	Terminal Negatif (-)	Terminal keluaran arus DC yang dihubungkan ke kutub negatif sumber tegangan atau <i>ground</i> . Pada struktur internal chip LED, terminal ini merupakan sisi semikonduktor tipe-N yang menjadi jalur keluarnya elektron setelah proses rekombinasi elektron- <i>hole</i> menghasilkan emisi foton.

2.2.9 Sensor DS18B20

Menurut penelitian [19] “Penerapan Sensor Suhu DS18B20 dan Sensor pH Sebagai Otomatisasi Pakan Ikan Berbasis IoT” Sensor suhu DS18B20 adalah sensor digital yang mempunyai 12-bit ADC internal dengan tegangan referensi 5V. Sensor ini sangat presisi dan memiliki tingkat perubahan terkecil hingga $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dengan rentang suhu -10°C sampai $+85^{\circ}\text{C}$. Secara lebih lengkap, sensor DS18B20 dapat mengukur suhu dengan rentang -55°C sampai $+125^{\circ}\text{C}$ dengan akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ untuk temperatur antara -10°C dan $+85^{\circ}\text{C}$, sehingga cocok digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan akurasi tinggi. Pada sistem ini untuk mendeteksi suhu baterai menggunakan sensor DS18B20.

Prinsip kerja DS18B20 dimulai dari proses pendeteksian suhu oleh elemen sensing internal internal berbasis semikonduktor yang mengubah besaran suhu menjadi sinyal listrik analog, lalu dikonversi menjadi data digital oleh ADC yang terintegrasi dalam chip. Kemudian hasil konversi disimpan dalam register suhu 2-byte pada memori Scratchpad DS18B20, setelah data suhu tersimpan DS18B20

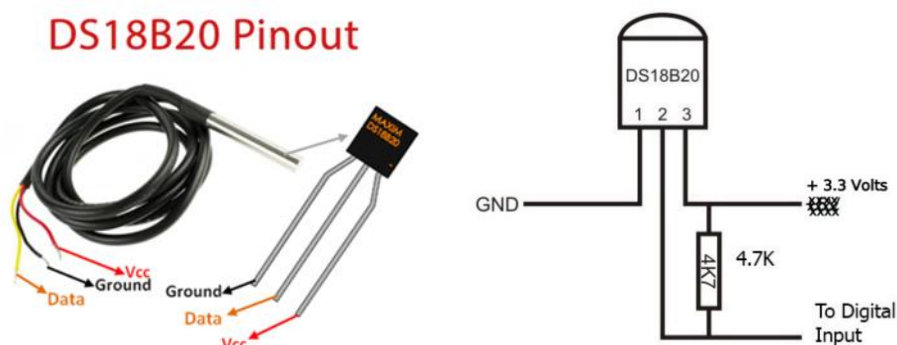
mengirimkan data tersebut pada mikrokontroller melalui protokol komunikasi 1-Wire, pada sistem ini sensor DS18B20 berfungsi untuk mengukur suhu di sekitar baterai.

Sensor DS18B20 pada sistem ini dipasang menempel pada permukaan baterai LiFePO₄ dan berfungsi sebagai pengukur suhu operasi baterai secara real-time. Data suhu yang diperoleh menjadi parameter pelengkap dalam sistem Monitoring untuk memastikan baterai beroperasi dalam rentang suhu yang aman, Berikut Tabel 2-9 ditunjukkan spesifikasi sensor DS18B20 yang digunakan.

Tabel 2-9 Spesifikasi Sensor DS18B20

Keterangan Sensor DS18B20	Spesifikasi
Tegangan Suplai	3-5 V
Rentang Pengukuran Suhu	-55°C s.d. +125°C
Resolusi ADC	9-12 bit
Arus <i>Standby</i>	750-1000 mA
Tegangan Suplai	3-5,5 V DC
Protokol Komunikasi	1-Wire
Resistor <i>Pull-up</i>	4,7K Ω

Sensor DS18B20 menggunakan protokol komunikasi *1-Wire*, sehingga hanya memerlukan satu jalur data untuk berkomunikasi dengan mikrokontroler selain pin catu daya (VCC) dan ground (GND), Berikut gambar 2.5 ditunjukkan Pinout sensor DS18B20 yang digunakan.



Gambar 2.5 Pinout Sensor DS18B20

Sensor suhu DS18B20 memiliki tiga pin utama yang berfungsi sebagai jalur catu daya dan komunikasi data dengan mikrokontroler. Ketiga pin tersebut terdiri atas pin VDD sebagai masukan tegangan, pin GND sebagai *referensi ground*, dan pin DQ (Data) sebagai jalur komunikasi digital menggunakan protokol 1-Wire. Setiap pin memiliki fungsi yang berbeda dalam mendukung proses pengukuran suhu serta pengiriman data ke mikrokontroler. Adapun fungsi masing-masing pin pada sensor DS18B20 ditunjukkan pada Tabel 2.10.

Tabel 2-10 Fungsi Pin Sensor DS18B20

No	Keterangan	Fungsi Pin
1	GND	Terminal negatif atau referensi <i>ground</i> . Pin ini dihubungkan ke kutub negatif sumber tegangan (0V). GND berfungsi sebagai jalur kembali arus listrik dari sensor menuju sumber catu daya.
2	DQ (Data/Signal)	Pin data sekaligus pin komunikasi 1-Wire antara sensor DS18B20 dengan mikrokontroler. Pin ini bersifat <i>open drain</i> , artinya hanya dapat menarik tegangan ke rendah (logika 0) dan memerlukan resistor pull-up eksternal sebesar 4,7 k Ω yang dihubungkan ke VCC agar dapat menghasilkan logika 1. Melalui pin DQ inilah seluruh komunikasi data suhu dikirimkan secara serial ke mikrokontroler menggunakan protokol 1-Wire.
3	VDD	Terminal positif catu daya sensor. Pin ini menerima tegangan operasional sebesar 3,0V hingga 5,5V dari sumber eksternal. Pada mode normal <i>Power</i> , pin VDD dihubungkan ke sumber tegangan 3,3V (jika menggunakan ESP32)

2.2.10 Sensor INA219

Wiyadi, Eri, dkk. 2020. Menurut penelitian [20] “Simple I-V Acquisition Module with High Side Current Sensing Principle For Real Time Photovoltaic Measurement” sensor INA219 adalah sensor pengukur tegangan DC dan arus

berbasis komunikasi I2C yang dikembangkan oleh Texas Instruments. Sensor INA219 menggunakan metode high-side Current sensing, yaitu pengukuran arus dilakukan pada sisi positif sumber tegangan sehingga tidak mengganggu jalur ground sistem. Sensor INA219 mampu mengukur tegangan pada bus hingga 26 V dan arus hingga beberapa ampere tergantung pada nilai resistor shunt yang digunakan pada modul. Sensor ini dapat menghitung daya listrik secara langsung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus.

Prinsip kerja sensor INA 219 adalah memantau tegangan jatuh (drop voltage) pada resistor shunt sekaligus tegangan bus suplai, dengan konversi waktu dan filtering yang dapat diprogram dengan internal multiplier memungkinkan pembacaan langsung arus dalam satuan ampere, sedangkan register perkalian tambahan menghitung daya dalam satuan watt. 2 masukan analog sensor INA 219 VIN+ dan VIN- dihubungkan pada resistor shunt yang dipasang secara seri pada jalur yang diukur, bus yang diukur tegangan nya dari 0-26 V. Sensor INA 219 mendeteksi tegangan jatuh kecil pada resistor shunt sebagai tegangan shunt, dan mendeteksi tegangan terhadap ground dari pin VIN- sebagai tegangan bus.

Pengukuran arus dilakukan berdasarkan hukum ohm, resistor shunt yang digunakan modul memungkinkan pengukuran tegangan jatuh (drop voltage) yang sebanding dengan arus yang mengalir, ini merupakan hal yang penting dalam akurasi pengukuran arus, INA 219 dapat mengidentifikasi tegangan shunt pada rentang Battery Voltage dari 0 hingga 26V. dengan diketahui tegangan shunt (V_{shunt}) dan nilai resistor shunt (R_{shunt}) arus yang mengalir dapat dihitung menggunakan rumus:

$$I = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (2.2)$$

Untuk pengukuran daya (Power), Sensor INA219 Mermentau tegangan jatuh (drop voltage) pada shunt maupun tegangan bus suplai dengan waktu konversi dan filtering yang dilakukan pada pemograman, Nilai kalibrasi dapat diprogram dengan internal multiplier memungkinkan pembacaan arus secara langsung, register perkalian tambahan menghitung daya dalam watt. Daya dihitung secara internal dari hasil perkalian nilai arus dengan tegangan pada bus dengan rumus:

$$P = I \times V_{bus} \quad (2.3)$$

Untuk pengukuran Load Voltage, Load Voltage adalah tegangan aktual yang diterima oleh beban (load). Load Voltage dapat dihitung secara internal dengan rumus:

$$V_{Load} = V_{bus} + \left(\frac{V_{shunt}}{1000} \right) \quad (2.4)$$

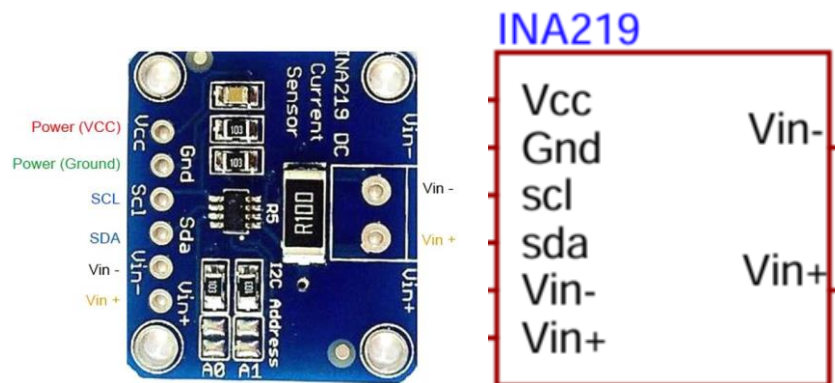
Sensor INA219 pada sistem ini berfungsi sebagai pengukur tegangan, arus, dan daya baterai LiFePO4 secara real-time yang menjadi komponen inti sistem Monitoring. Sensor dipasang secara seri pada jalur antara terminal positif baterai dengan SCC menggunakan resistor shunt 0,1Ω, sehingga mampu mendeteksi arah dan besaran arus baik pada kondisi charging maupun discharging. Berikut Tabel 2-11 ditunjukkan spesifikasi sensor INA219 yang digunakan.

Tabel 2-11 Spesifikasi Sensor INA219

Keterangan Sensor INA219	Spesifikasi
Resistor <i>Shunt</i>	0,1 Ω
Rentang Arus	3,2A (bidirectional)
Resolusi Arus	0,8 mA
Tegangan <i>Bus</i> Maks	26 V DC
Tegangan Suplai	3-5,5 V DC
Tegangan <i>Shunt</i> Maks	320 mV
Resolusi ADC	12-bit
Protokol komunikasi	I2C

INA219 menggunakan antarmuka komunikasi Inter-Integrated Circuit (I²C) sehingga hanya memerlukan dua jalur komunikasi, yaitu Serial Data (SDA) dan Serial Clock (SCL), selain pin catu daya dan ground. Sensor ini memiliki resolusi pengukuran *Analog-to-Digital Converter* (ADC) hingga 12-bit, dengan kemampuan mengukur tegangan bus hingga 26 V dan tegangan shunt hingga ±320 mV. Dengan menggunakan resistor shunt berpresisi, INA219 mampu memberikan hasil pengukuran arus yang akurat serta mendukung proses kalibrasi sesuai

kebutuhan aplikasi. Berikut gambar 2.6 ditunjukkan Pinout sensor INA219 yang digunakan.



Gambar 2.6 Pinout Sensor INA219

Sensor INA219 memiliki beberapa pin yang digunakan sebagai jalur catu daya, komunikasi data, pengukuran tegangan dan arus, serta konfigurasi alamat komunikasi I²C. Masing-masing pin memiliki fungsi yang berbeda sehingga pemasangan harus dilakukan dengan benar agar sensor dapat mengukur parameter kelistrikan dan berkomunikasi dengan mikrokontroler secara optimal. Adapun fungsi setiap pin pada sensor INA219 ditunjukkan pada Tabel 2-12 berikut.

Tabel 2-12 Keterangan Fungsi Pin Sensor INA129

No	Keterangan	Fungsi
1	VCC	Pin suplai daya untuk mengaktifkan IC INA219 dihubungkan ke sumber tegangan antara 3-5V pada mikrokontroller
2	GND	<i>Ground</i> referensi analog agar memiliki referensi tegangan operasional yang sama
3	SCL	Jalur <i>clock</i> untuk komunikasi antarmuka I2C pin ini mengatur sinkronisasi pengiriman data dan dihubungkan ke pin SCL mikrokontroller
4	SDA	Jalur data 2 arah untuk komunikasi I2C, pin ini berfungsi mengirimkan hasil pengukuran ke mikrokontroller dan menerima perintah terhubung pada pin SDA mikrokontroller

No	Keterangan	Fungsi
5	VIN +	Pin <i>input</i> diferensial positif, pin ini dihubungkan langsung ke kutub positif dari sumber daya utama sebelum menuju ke perangkat yang akan diukur dayanya.
6	VIN -	Pin <i>input</i> diferensial negatif, pin ini dihubungkan langsung ke perangkat beban (<i>load</i>). Arus utama akan mengalir melewati resistor <i>shunt</i> (0,1 ohm) yang ada didalam modul dari titik VIN+ menuju pada VIN-
7	A0 & A1	Pin konfigurasi ini digunakan untuk menentukan alamat (<i>address</i>) I2C.

2.2.11 Buck Converter MP1584EN

Menurut penelitian [21] “Rancang Bangun Buck Converter Efisiensi Tinggi Dengan Pengendali Arduino Nano Berbasis Simulasi Multisim 14.2” Buck Converter adalah konverter DC-DC penurun tegangan. Buck Converter terdiri dari saklar semikonduktor yang berupa Thyristor atau transistor, dioda, induktor filter, dan kapasitor filter. Buck Converter dapat menurunkan tegangan dengan efisiensi yang tinggi dibandingkan dengan regulator linear, khususnya terdapat selisih besar antara tegangan input dan Output. Pada sistem ini menggunakan Buck Converter model MP1584EN.

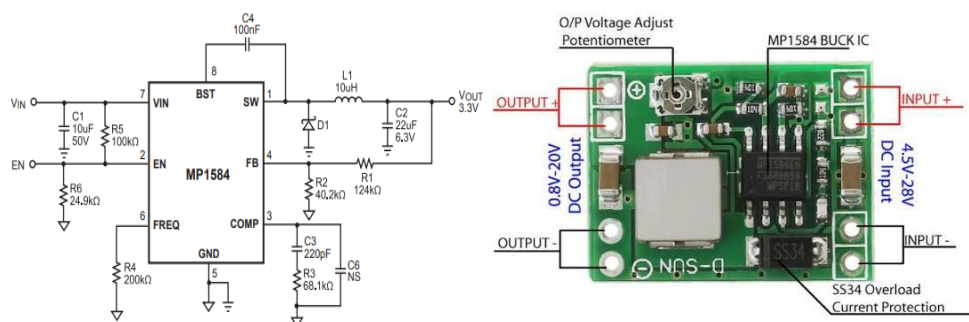
Prinsip kerja MP1584EN terbagi menjadi 2 fase yaitu fase ON dan fase OFF. Pada mode konduksi (ON), beban akan timbul tegangan sebesar tegangan sumber. Saklar MOSFET internal tertutup sehingga arus mengalir dari sumber melalui induktor filter menuju kapasitor dan beban. Pada mode tidak konduksi (OFF) tegangan pada beban menjadi nol dari sisi saklar, induktor melepaskan energi yang tersimpan menuju beban melalui dioda freewheeling. Dalam kondisi ini tegangan induktor bernilai negatif karena arus pada induktor menjadi berkurang.

Pada sistem Monitoring ini, modul buck converter MP1584EN berfungsi sebagai penurun tegangan dari tegangan baterai LiFePO₄ yang bervariasi antara

12,8V hingga 13,56V menjadi tegangan 5V DC yang stabil untuk mencatu mikrokontroler ESP32 transmitter. Penggunaan MP1584EN dipilih karena efisiensinya yang tinggi dibandingkan regulator linear, sehingga konsumsi energi baterai dapat diminimalkan pada sistem PLTS. Berikut Tabel 2-13 ditunjukkan spesifikasi *Buck Converter* MP1584EN yang digunakan.

Tabel 2-13 Spesifikasi Buck Converter MP158EN

Keterangan MP158EN	Spesifikasi
Tegangan <i>Input</i>	4,5-28 V
Tegangan <i>Output</i>	0,8-25 V
Arus <i>Output</i> Maksimum	3 A
<i>Current Limit Internal</i>	4,0-4,7 A
Frekuensi <i>Switching</i>	1000kHz-1,5MHz



Gambar 2.7 Buck Converter MP158EN

Tabel 2-3 Keterangan Fungsi Pin Buck Converter MP158EN

No	Keterangan	Fungsi
1	SW (<i>Switch Mode</i>)	Terminal keluaran dari <i>high-side</i> MOSFET internal. Pin ini terhubung ke induktor filter eksternal dan dioda Schottky. Tegangan pada pin SW berupa sinyal pulsa DC yang beralih antara VIN dan GND sesuai <i>duty cycle</i> PWM. Dioda Schottky bertegangan jatuh rendah harus dipasang dari pin SW ke GND sedekat mungkin

No	Keterangan	Fungsi
		untuk meredam <i>switching spike</i> yang terjadi saat peralihan fase <i>ON-OFF</i> .
2	EN (<i>Enable</i>)	Pin pengaktif (<i>enable</i>) IC. Apabila pin EN ditarik ke bawah ambang batas yang ditentukan (di bawah 1,35V), IC akan masuk mode <i>shutdown</i>
3	COMP (<i>Compensation</i>)	Pin kompensasi loop kontrol. Pin ini merupakan keluaran dari <i>error</i> amplifier internal yang digunakan untuk mengkompensasi frekuensi loop umpan balik (<i>feedback loop</i>).
4	FB (<i>Feedback</i>)	Pin umpan balik tegangan <i>Output</i> . Pin ini merupakan masukan ke error amplifier internal yang membandingkan tegangan <i>Output</i> terhadap tegangan referensi internal sebesar 0,8V
5	GND	Terminal <i>ground</i> sekaligus <i>thermal pad</i> . Pin ini harus dihubungkan sedekat mungkin ke kapasitor <i>Output</i> untuk mempersingkat jalur arus <i>switching</i> yang tinggi.
6	FREQ (<i>Frequency</i>)	Pin pemrograman frekuensi <i>switching</i> . Frekuensi <i>switching</i> IC diatur dengan menghubungkan resistor dari pin FREQ ke GND. Semakin besar nilai resistor, semakin rendah frekuensi <i>switching</i> yang dihasilkan.
7	VIN (<i>Input Supply</i>)	Pin masukan tegangan suplai utama. Pin ini menyuplai daya ke seluruh rangkaian kontrol.
8	BST (<i>Bootstrap</i>)	Pin <i>bootstrap</i> untuk catu daya <i>driver</i> MOSFET <i>high-side</i> internal. Pin ini merupakan sumber tegangan positif untuk internal <i>floating high-side</i> MOSFET <i>driver</i> .

2.2.12 Mikrokontroller ESP 32

Mikrokontroler merupakan sebuah komputer kecil yang dikemas dalam bentuk chip IC (*Integrated Circuit*) dan dirancang untuk melaksanakan tugas serta operasi tertentu. Pada dasarnya, sebuah IC mikrokontroler tersusun dari satu atau lebih inti prosesor (CPU), memori berupa RAM dan ROM, serta perangkat masukan dan keluaran yang dapat diprogram. Dalam penerapannya, mikrokontroler digunakan pada berbagai produk maupun perangkat yang bekerja secara otomatis, seperti sistem kendali mesin kendaraan, perangkat medis, pengendali jarak jauh, mesin industri, hingga peralatan listrik..

Mikrokontroler memiliki arsitektur yang kompak dan hemat energi. Biasanya, mereka dilengkapi dengan unit pemroses yang terdiri dari CPU (*Central Processing Unit*), memori (ROM dan RAM), serta perangkat I/O seperti GPIO (*General Purpose Input/Output*), ADC (*Analog-to-Digital Converter*), PWM (*Pulse Width Modulation*), dan komunikasi serial seperti UART, SPI, dan I2C. Selain itu, beberapa mikrokontroler juga dapat mendukung fitur seperti Wi-Fi, *Bluetooth*, dan USB.

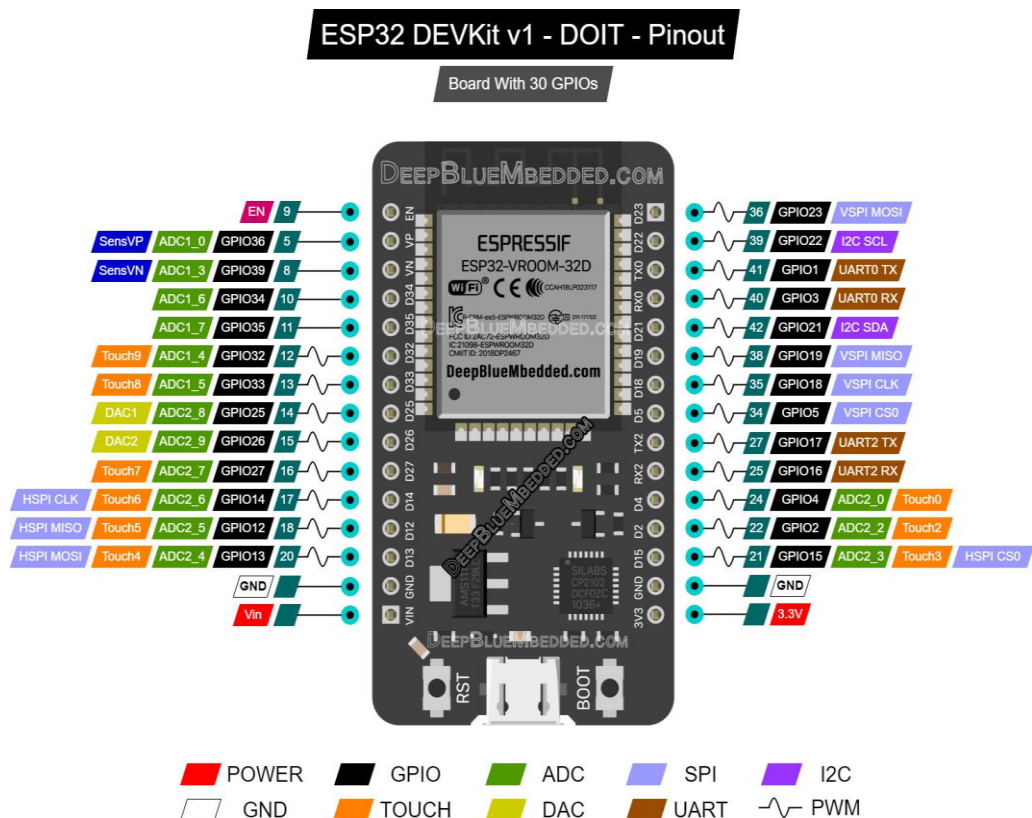
Pada sistem ini menggunakan jenis mikrokonroller ESP 32, menurut penelitian [22] “ESP32 Microcontroller: *A Review of Architecture, Communication, Protocols, Aplications and Research Challenges*” ESP32 merupakan mikrokontroler berperforma tinggi yang dikembangkan oleh *Espressif Systems* dan dirancang secara khusus untuk kebutuhan aplikasi *Internet of Things* (IoT) serta sistem tertanam (*embedded system*). Mikrokontroler ini telah mengintegrasikan berbagai fitur dalam satu chip, meliputi konektivitas Wi-Fi, *Bluetooth*, prosesor *dual-core*, serta beragam antarmuka komunikasi peripheral. Berkat kelengkapan fitur tersebut, ESP32 menjadi salah satu platform yang paling banyak dimanfaatkan dalam penelitian maupun pengembangan berbagai sistem, seperti sistem *Monitoring*, otomasi, *smart home*, *smart agriculture*, dan perangkat IoT lainnya.

Modul ESP32-WROOM-32 menggunakan prosesor Xtensa *dual-core* 32-bit LX6 yang mampu beroperasi pada kecepatan hingga 240 MHz. Modul ini dilengkapi dengan SRAM berkapasitas 520 kB serta flash memory sebesar 4

MB yang digunakan untuk menyimpan program maupun data. ESP32 juga mendukung konektivitas nirkabel melalui WiFi dengan standar 802.11 b/g/n serta *Bluetooth* versi 4.2 yang telah dilengkapi dengan fitur *Bluetooth Low Energy* (BLE). Selain itu, ESP32 menyediakan sebanyak 48 pin GPIO yang dapat dikonfigurasi sebagai masukan maupun keluaran, serta mendukung berbagai fitur seperti ADC (*Analog to Digital Converter*), PWM (*Pulse Width Modulation*), dan DAC (*Digital to Analog Converter*) yang memungkinkan penggunaannya dalam berbagai kebutuhan sistem elektronika dan otomasi.

Tabel 2-4 Spesifikasi ESP32

Keterangan ESP 32	Spesifikasi
Mikrokontroler	Tensilica 32-bit <i>Single-/Dual-core</i> CPU Xtensa LX6
<i>Digital input-Output (DIO) pins</i>	25
<i>Memory</i>	520 KiB SRAM
<i>Flash Memory</i>	4 MB
<i>Analog Input (ADC) pins</i>	6
<i>Analog Output (DAC) Pins</i>	2
UARTs	3
SPIs	2
I2Cs	3
Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n/e/i
<i>Clock Speed</i>	240 MHz



Gambar 2.8 ESP32

Tabel 2-5 Keterangan Fungsi Pin ESP32

No	Keterangan	Fungsi
1	GPIO (<i>General Purpose Input Output</i>)	Membaca sinyal digital dari sensor, mengendalikan aktuator seperti LED, relay, dll.
2	ADC (<i>Analog to Digital Converter</i>)	Membaca nilai sensor analog seperti sensor suhu, cahaya, potensiometer
3	DAC (<i>Digital to Analog</i>)	Menghasilkan sinyal analog seperti <i>Output</i> audio atau kontrol motor
4	PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>)	Mengontrol kecepatan motor, intensitas LED, dan perangkat yang memerlukan sinyal PWM
5	UART (<i>Universal Asynchronous</i>)	Menghubungkan ESP32 dengan perangkat serial seperti modul GPS, <i>Bluetooth</i> , atau komputer

No	Keterangan	Fungsi
	<i>Receiver Transmitter</i>)	
6	I2C (<i>Integrated Circuit</i>)	Menghubungkan sensor, display, dan modul lain secara bersamaan menggunakan dua kabel SDA, SCL
7	SPI (<i>Serial Peripheral Interface</i>)	Menghubungkan perangkat dengan kecepatan tinggi seperti memori eksternal, display TFT
8	<i>Strapping Pins</i>	Mengatur mode <i>booting</i> seperti <i>flash</i> mode atau <i>download</i> mode

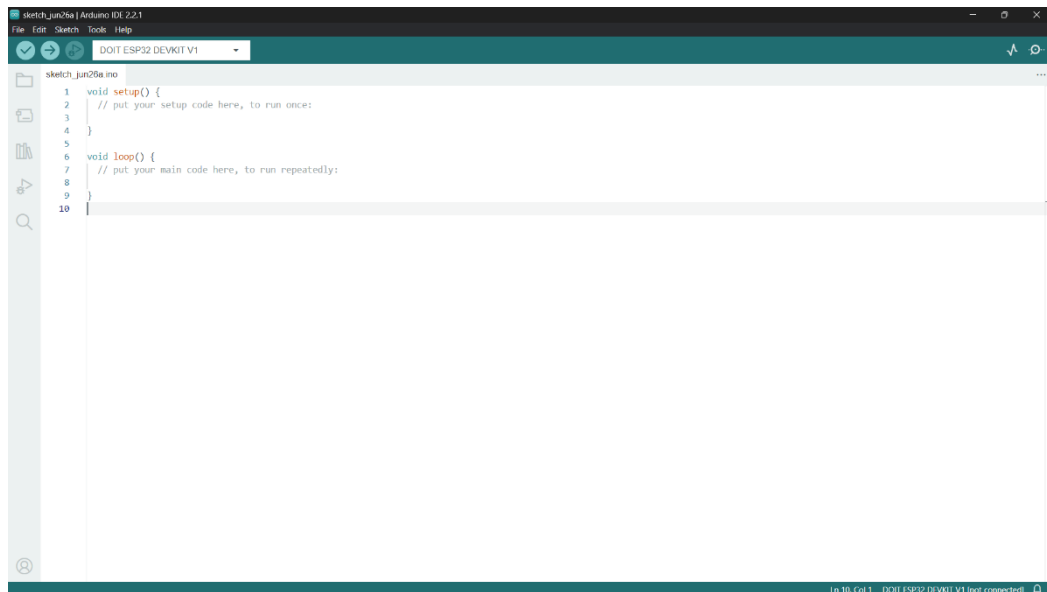
Pada sistem *Monitoring* ini digunakan dua unit mikrokontroler ESP32 dengan peran yang berbeda. ESP32 pertama berfungsi sebagai *transmitter* yang bertugas membaca data dari sensor INA219 dan DS18B20, mengolah data secara lokal, kemudian mengirimkannya melalui modul LoRa SX1278. ESP32 kedua berfungsi sebagai *receiver* yang menerima data dari *transmitter*, menampilkannya pada LCD I2C 16x2, serta mengirimkan data ke platform *Google Sheets* melalui koneksi Wi-Fi dengan interval pengambilan data setiap 5 menit.

Agar mikrokontroler ESP32 dapat menjalankan proses pengolahan data sesuai dengan fungsi yang telah dirancang, ESP32 perlu diprogram menggunakan serangkaian instruksi logika yang tersimpan di dalam memori internalnya. Instruksi-instruksi tersebut ditulis menggunakan bahasa pemrograman tertentu, kemudian dikompilasi dan diunggah ke dalam mikrokontroler sehingga dapat dieksekusi sesuai kebutuhan sistem. Salah satu perangkat lunak yang umum digunakan dalam proses pemrograman ESP32 adalah *Arduino Integrated Development Environment* (Arduino IDE), yang menyediakan antarmuka pengguna beserta berbagai pustaka pendukung guna memudahkan proses penyusunan, pengujian, dan pengunggahan program ke dalam mikrokontroler.

2.2.13 Arduino IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) adalah sebuah perangkat lunak pengembangan yang dimanfaatkan untuk mendukung proses pemrograman pada mikrokontroler berbasis *platform* Arduino. Perangkat lunak ini dirancang dengan tampilan antarmuka yang sederhana dan intuitif, sehingga sesuai digunakan baik dalam kegiatan pembelajaran maupun pengembangan sistem tertanam oleh pengguna dari berbagai tingkat kemampuan. Melalui Arduino IDE, pengguna dapat melaksanakan proses penyusunan, pengeditan, kompilasi, serta pengunggahan program atau sketch ke papan mikrokontroler dengan efektif dan efisien.

Bahasa pemrograman yang diterapkan pada Arduino IDE mengacu pada bahasa C/C++ yang telah disederhanakan, sehingga proses penyusunan kode program menjadi lebih mudah dipahami dan lebih terstruktur. Selain mendukung berbagai jenis papan mikrokontroler Arduino seperti Arduino Uno, Arduino Mega, dan Arduino Nano, Arduino IDE juga menyediakan kompatibilitas dengan berbagai mikrokontroler lainnya, termasuk ESP32. Dengan menambahkan konfigurasi papan melalui board manager serta menginstall pustaka yang dibutuhkan, ESP32 dapat diprogram secara langsung menggunakan Arduino IDE. Oleh karena itu, Arduino IDE dapat dijadikan sebagai salah satu perangkat lunak utama dalam pengembangan aplikasi berbasis ESP32, khususnya pada sistem *Monitoring* dan otomasi berbasis mikrokontroler.



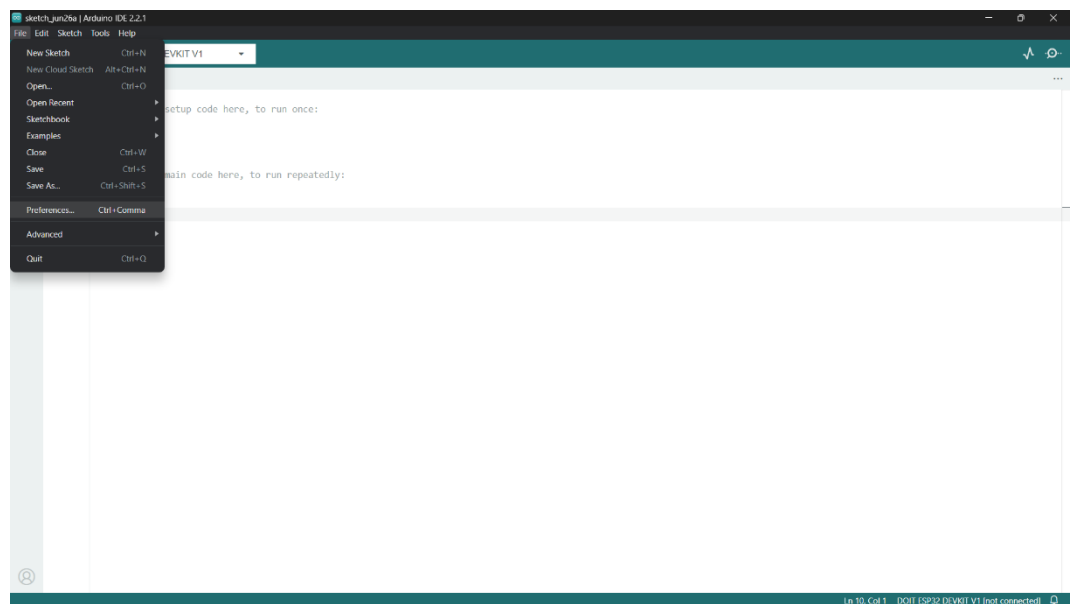
Gambar 2.9 Bagian-Bagian Arduino IDE

Gambar 2.9 menampilkan tampilan awal aplikasi Arduino IDE ketika pertama kali dijalankan. Secara umum, Arduino IDE tersusun atas beberapa bagian utama yang saling berkaitan dan mendukung keseluruhan proses pemrograman mikrokontroler. Bagian yang paling dominan adalah area kerja (*workspace*), yaitu ruang yang digunakan sebagai tempat penyusunan dan pengeditan kode program (*sketch*) yang akan diunggah ke dalam mikrokontroler.

Pada bagian atas tampilan terdapat menu bar yang memuat menu *File*, *Edit*, *Sketch*, *Tools*, dan *Help*. Menu *File* berfungsi untuk mengelola berkas program, mencakup pembuatan, pembukaan, dan penyimpanan *sketch*. Menu *Edit* digunakan untuk keperluan pengolahan kode program, seperti menyalin, memformat, serta menambahkan komentar pada baris kode. Menu *Sketch* difungsikan untuk menjalankan proses kompilasi, mengunggah program ke mikrokontroler, serta menambahkan pustaka yang diperlukan oleh sistem. Menu *Tools* menyediakan berbagai pengaturan teknis, di antaranya pemilihan jenis papan mikrokontroler (*board*), konfigurasi *port* komunikasi, serta akses terhadap fitur pemantauan serial. Adapun menu *Help* menyediakan informasi bantuan, dokumentasi resmi, serta referensi yang berkaitan dengan penggunaan Arduino IDE.

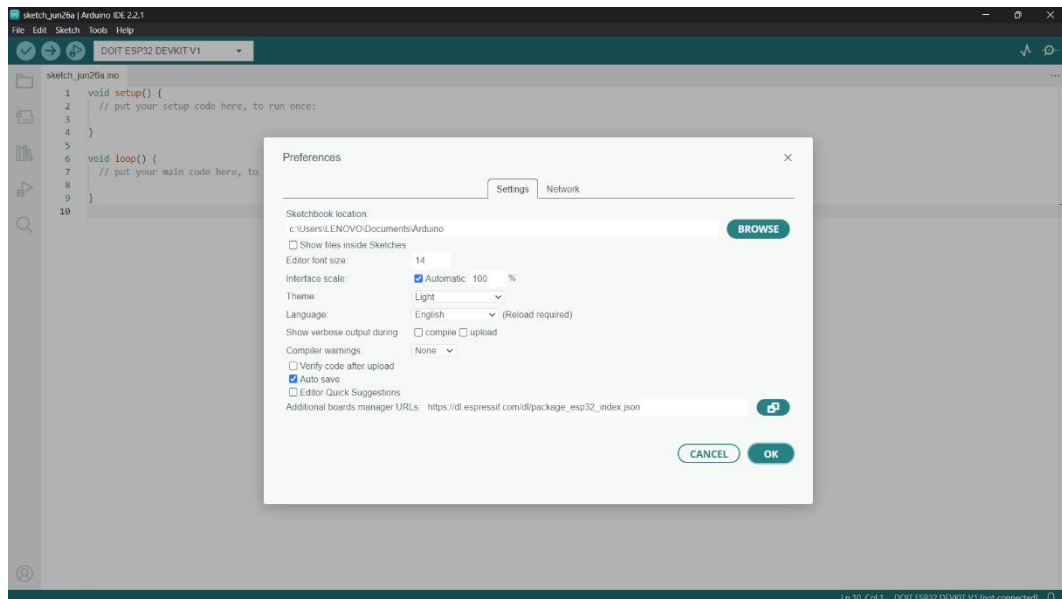
1. Membuka aplikasi Arduino IDE hingga tampilan awal muncul seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9
2. Menambahkan board pada Arduino IDE

Untuk menambahkan jenis papan mikrokontroler yang belum tersedia secara bawaan di dalam Arduino IDE, pengguna dapat mengakses menu *File > Preferences* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.10



Gambar 2.10 Tampilan Menu *File*

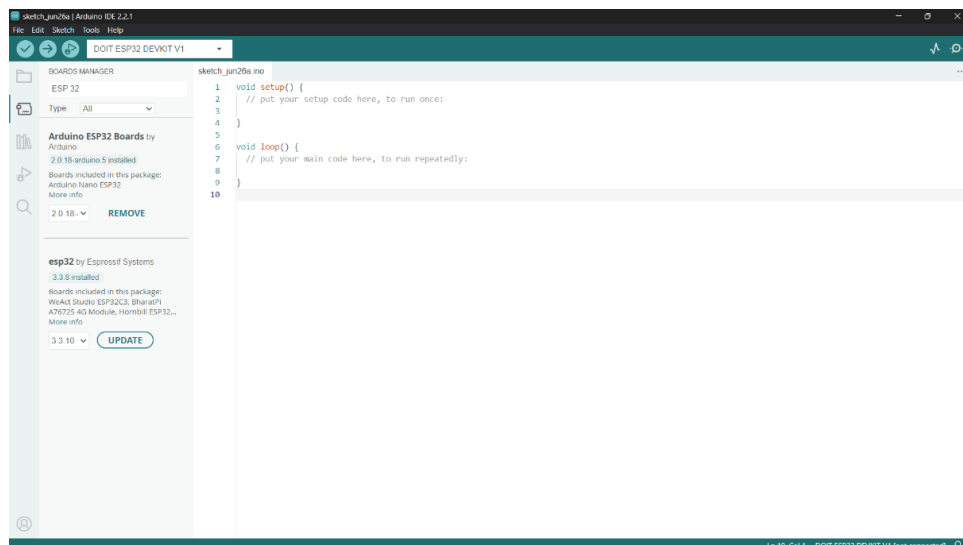
Pada jendela yang tampil, pengguna dapat memasukkan tautan URL repositori *board* pada kolom yang telah disediakan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Langkah ini bertujuan agar Arduino IDE dapat mengenali dan mendukung penggunaan papan mikrokontroler tambahan, termasuk ESP32.



Gambar 2.11 URL Box untuk Menambahkan Board

3. Menginstal board melalui Board Manager

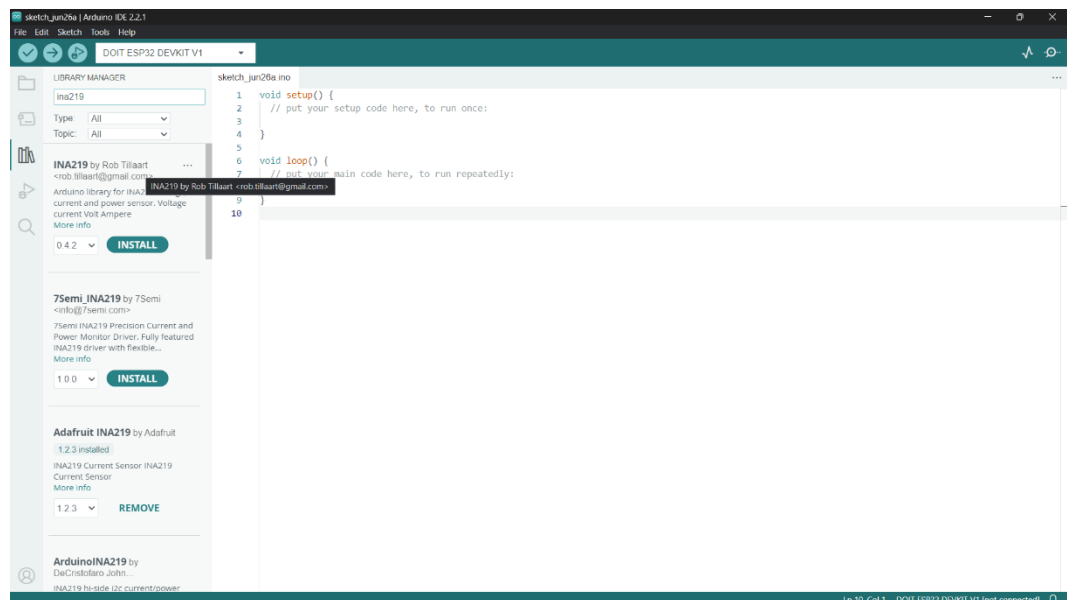
Setelah URL repositori berhasil ditambahkan, pengguna perlu mengunduh dan menginstal jenis papan yang diinginkan melalui fitur *Board Manager* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12. Fitur ini dapat diakses melalui menu *Tools > Board > Board Manager*. Pada halaman *Board Manager* yang tersedia, pengguna dapat mencari nama papan yang dibutuhkan, misalnya "ESP32 by Espressif Systems", kemudian menekan tombol Install untuk mengunduh dan menambahkan board tersebut ke dalam Arduino IDE.



Gambar 2.12 Tampilan Board Manager

4. Menginstal *Library*

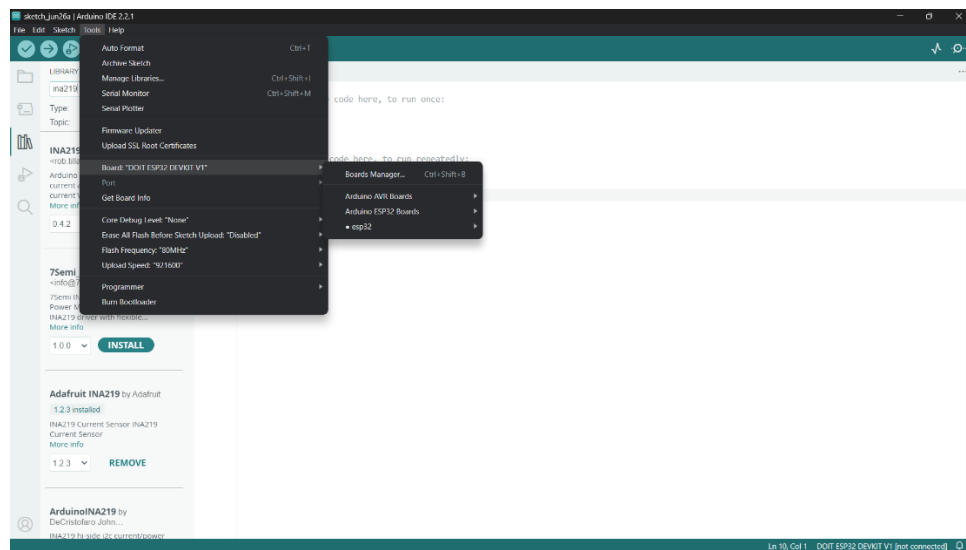
Untuk mengaktifkan berbagai fitur tambahan yang dibutuhkan pada ESP32, pengguna juga perlu menambahkan pustaka (*library*) pendukung yang sesuai. Proses penginstalan pustaka ini dapat dilakukan melalui menu *Tools > Manage Libraries* atau melalui *Sketch > Include Library > Manage Libraries* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.13. Melalui jendela *Library Manager* yang tersedia, pengguna dapat mencari dan menginstal pustaka yang diperlukan sesuai dengan kebutuhan pemrograman sistem yang dikembangkan.



Gambar 2.13 Tampilan *Manage library*

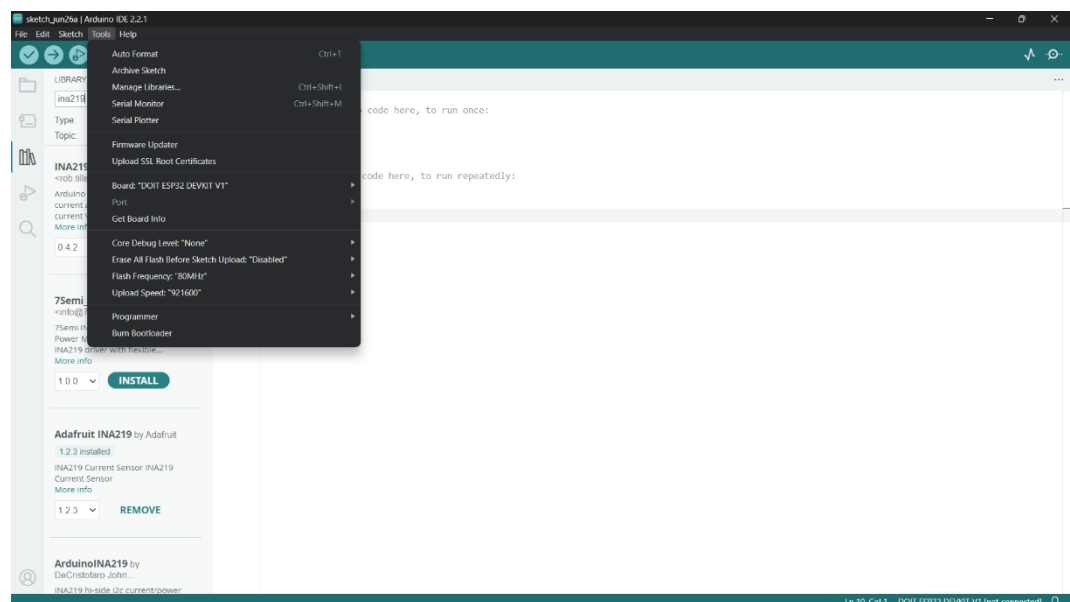
5. Memilih jenis *board* dan *port* yang digunakan

Sebelum memulai proses pemrograman, pengguna terlebih dahulu perlu menentukan jenis papan mikrokontroler dan *port* komunikasi serial yang akan digunakan. Pemilihan jenis papan dilakukan melalui menu *Tools > Board* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Tampilan Menu *Tools* untuk memilih *Board*

Adapun port komunikasi dapat dipilih melalui menu *Tools* > *Port* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.15. Pengaturan ini sangat penting dilakukan agar Arduino IDE dapat terhubung dengan benar ke perangkat keras mikrokontroler yang digunakan.

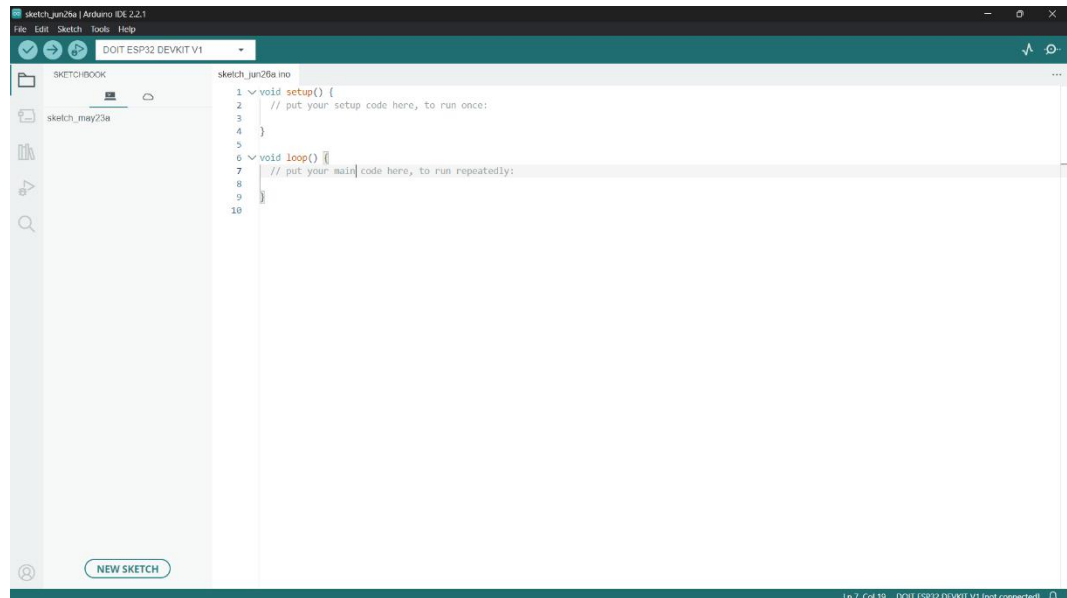


Gambar 2.15 Tampilan Menu *Tools* untuk memilih *Port*

6. Menulis Program

Setelah seluruh konfigurasi selesai dilakukan, pengguna dapat memulai proses penyusunan program atau *sketch* pada area *editor* yang tersedia di dalam Arduino IDE. Program tersebut memuat serangkaian instruksi logika

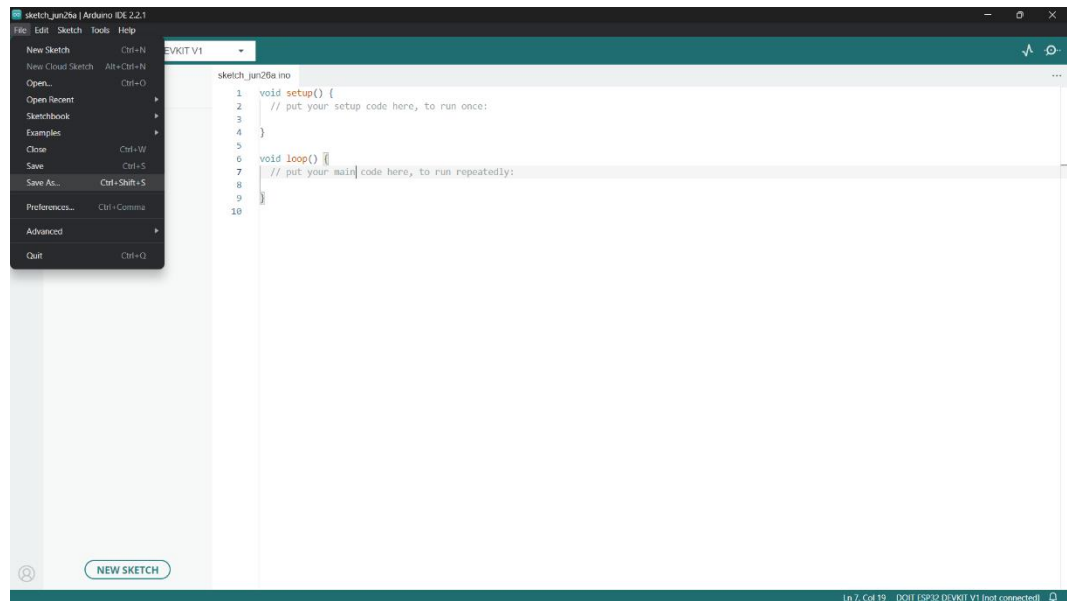
yang akan dieksekusi oleh mikrokontroler sesuai dengan fungsi sistem yang dirancang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16.



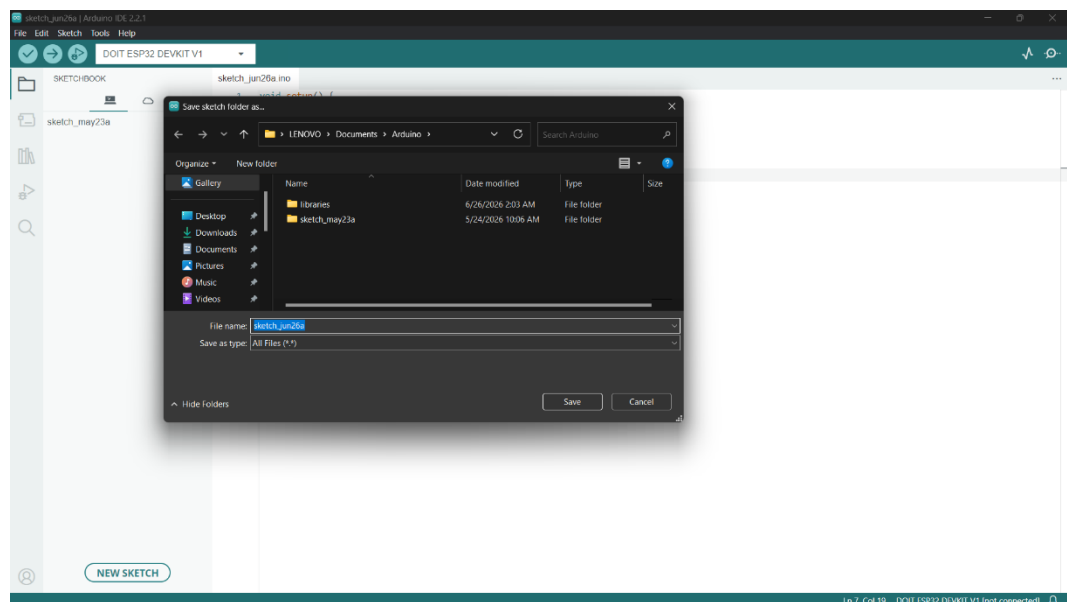
Gambar 2.16 Area *Sketch* pada Arduino IDE

7. Menyimpan Program

Setelah program selesai ditulis, langkah selanjutnya adalah menyimpan *file* program ke dalam *folder* yang terdapat pada perangkat komputer. Proses penyimpanan dilakukan melalui menu *File > Save As*, di mana pengguna dapat menentukan lokasi penyimpanan serta nama *file* sesuai dengan kebutuhan. Tampilan menu *Save As* dapat dilihat pada Gambar 2.17. Program yang telah tersimpan selanjutnya dapat digunakan untuk proses verifikasi dan kemudian diunggah ke papan mikrokontroler agar instruksi yang telah ditulis dapat dijalankan. Tampilan penentuan lokasi penyimpanan file dapat dilihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.17 Tampilan Menu *File* Untuk *Save Project*



Gambar 2.18 Tampilan Menu untuk Menyimpan *Project* di *Computer*

2.2.14 LoRa SX1278 Ra-02

Menurut penelitian [23] “Analisis dan Optimasi Kinerja Transmisi LoRa SX1278 Ra-02 Untuk Sistem *Monitoring* Kualitas Air Berbasis *Internet of Things*” LoRa SX1278 Ra-02 merupakan modul komunikasi nirkabel (*wireless transceiver*) yang memanfaatkan chip Semtech SX1278 dengan teknologi modulasi LoRa (*Long Range*). Modul ini beroperasi pada frekuensi 433 MHz dan dirancang khusus untuk keperluan komunikasi data jarak jauh dengan

konsumsi daya yang rendah sesuai konsep *Low Power Wide Area Network* (LPWAN). Berkat karakteristik tersebut, LoRa SX1278 Ra-02 banyak dimanfaatkan pada berbagai aplikasi *Internet of Things* (IoT), pemantauan lingkungan, pertanian cerdas, *smart city*, maupun sistem *Monitoring* industri. Modul LoRa SX1278 Ra-02 mampu mengirimkan data sensor secara *real-time* pada sistem *Monitoring* berbasis IoT dengan memanfaatkan sejumlah parameter komunikasi, yaitu *Spreading Factor* (SF), *Bandwidth* (BW), *Coding Rate* (CR), dan *Transmit Power* (Tx Power). Pengaturan pada masing-masing parameter tersebut berpengaruh signifikan terhadap kualitas komunikasi, jangkauan transmisi, konsumsi daya, serta keandalan pengiriman data yang dihasilkan oleh sistem.

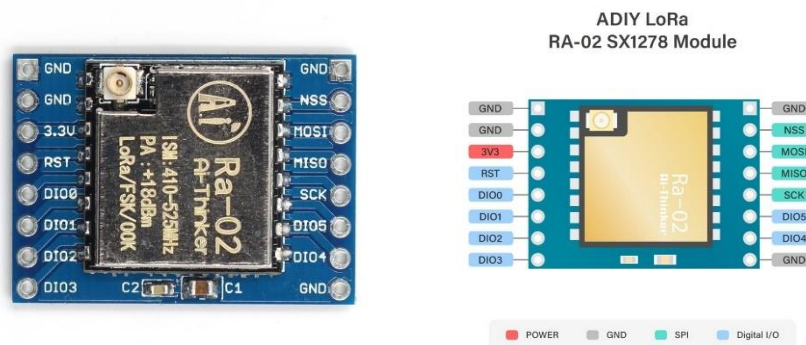
Prinsip kerja LoRa SX1278 Ra-02, LoRa SX1278 Ra-02 bekerja menggunakan teknik modulasi *Chirp Spread Spectrum* (CSS), yaitu metode penyebaran sinyal di mana data direpresentasikan menggunakan sinyal chirp yang frekuensinya berubah secara linier naik (*up-chirp*) maupun turun (*down-chirp*) sepanjang waktu transmisi. Kualitas dan jangkauan komunikasi LoRa SX1278 Ra-02 sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter utama. *Spreading Factor* (SF) merupakan rasio antara chirp dengan simbol di mana nilai *Spreading Factor* bernilai 7 hingga 12. *Spreading Factor* merupakan salah satu parameter yang menentukan kualitas komunikasi LoRa. Nilai SF yang lebih rendah seperti SF7 memberikan data *rate* yang lebih tinggi sekitar 5,5 kbps namun menghasilkan jangkauan komunikasi yang lebih pendek dan ketahanan yang lebih rendah terhadap interferensi. Sebaliknya, SF yang lebih tinggi seperti SF12 meningkatkan link *budget* sehingga meningkatkan ketahanan terhadap interferensi dan noise serta memperluas jangkauan komunikasi secara signifikan, namun mengurangi data rate hingga sekitar 250 bps.

Pada sistem *Monitoring* ini, modul LoRa SX1278 Ra-02 berfungsi sebagai media komunikasi data nirkabel jarak jauh yang menghubungkan ESP32 *transmitter* di sisi baterai dengan ESP32 *receiver* di sisi *display* dan *logging* data. Sistem komunikasi dirancang secara *request-driven*, di mana *receiver* mengirimkan sinyal permintaan "REQ" setiap 5 menit, kemudian *transmitter*

merespons dengan mengirimkan paket data sensor melalui LoRa pada frekuensi 433 MHz dengan *Spreading Factor* SF11 dan daya pancar 20 dBm.

Tabel 2-6 Spesifikasi LoRa SX1278 Ra-02

Keterangan LoRa SX1278 Ra-02	Spesifikasi
Frekuensi Operasi	433 MHz
Daya Pancar Maksimum	+ 20 dBm
Spreading Factor	SF7-SF12
Bandwidth	7,8 kHz-500 kHz
Jangkauan (LOS)	10 km
Jangkauan (NLOS)	1-3 km
Tegangan Operasi	3,3V
Kecepatan SPI	10 MHz



Gambar 2.19 LoRa SX1278 Ra-02

Tabel 2-7 Keterangan Fungsi Pin LoRa SX1278 Ra-02

No	Keterangan	Fungsi
1	GND	Terminal <i>ground</i> negatif. Dihubungkan ke <i>ground</i> sistem. Semua referensi tegangan modul mengacu pada pin ini.
2	VCC	Terminal suplai tegangan operasi modul sebesar 3,3V. Modul tidak toleran terhadap tegangan 5V sehingga harus dicatu dari sumber 3,3V.

No	Keterangan	Fungsi
3	MISO	<i>Master In Slave Out</i> jalur data SPI dari modul LoRa (<i>slave</i>) ke mikrokontroler (master). Digunakan untuk mengirim data hasil penerimaan ke ESP32.
4	MOSI	<i>Master Out Slave In</i> jalur data SPI dari mikrokontroler (master) ke modul LoRa (<i>slave</i>). Digunakan ESP32 untuk mengirim perintah dan data ke modul.
5	SCK	<i>Serial Clock</i> sinyal <i>clock</i> SPI yang dihasilkan mikrokontroler untuk menyinkronkan transfer data antara ESP32 dan modul LoRa
6	NSS	<i>Chip Select</i> (aktif <i>LOW</i>) pin pemilih modul LoRa. Ketika ESP32 menarik pin ini ke <i>LOW</i> , modul LoRa aktif dan siap menerima perintah SPI. Ketika <i>HIGH</i> , modul diabaikan
7	DIO0	Digital I/O 0 pin interrupt utama. Pada mode LoRa berfungsi sebagai <i>TxDone</i> (transmisi selesai) dan <i>RxDone</i> (penerimaan selesai). Pin ini yang digunakan ESP32 untuk mendeteksi paket data masuk.
8	DIO1	Digital I/O 1 pin interrupt sekunder. Berfungsi sebagai <i>RxTimeout</i> (batas waktu penerimaan habis) dan <i>FhssChangeChannel</i> pada mode FHSS.
9	DIO2	Digital I/O 2 pin interrupt tersier. Berfungsi sebagai <i>FhssChangeChannel</i> pada mode LoRa dan sebagai jalur data pada mode FSK.
10	DIO3	Digital I/O 3 pin interrupt tambahan. Berfungsi sebagai <i>CadDone</i> (<i>Channel Activity Detection</i>

No	Keterangan	Fungsi
		selesai) yang digunakan untuk mendeteksi apakah kanal sedang aktif.
11	RST	<i>Reset</i> pin untuk mereset modul LoRa secara <i>hardware</i> . Ketika pin ini ditarik ke <i>LOW</i> kemudian dilepas ke <i>HIGH</i> , modul melakukan <i>restart</i> penuh.
12	GND	Terminal <i>ground</i> tambahan. Sama dengan Pin 1, dihubungkan ke <i>ground</i> sistem untuk memastikan referensi tegangan yang stabil

2.2.15 Catu Daya Receiver (Adaptor)

Menurut penelitian [24] “Perancangan Catu Daya Arus Searah Keluaran Ganda Sebagai Penggerak Robot Lengan Artikulasi” Catu daya (*Power supply*) merupakan suatu perangkat elektronik yang berfungsi untuk menyediakan, mengubah, mengatur, serta menyalurkan energi listrik agar sesuai dengan kebutuhan beban atau perangkat elektronik yang dicatu. Catu daya bekerja dengan cara mengkonversi sumber energi listrik yang berasal dari jaringan PLN maupun sumber lainnya menjadi tegangan dan arus yang stabil, sehingga seluruh peralatan elektronik yang terhubung dapat beroperasi dengan baik dan optimal. Pada sistem catu daya *receiver* menggunakan adaptor *switching* sebagai *supply* daya untuk system.

Prinsip kerja adaptor *switching* tegangan AC dari PLN disearahkan langsung oleh rangkaian dioda *bridge* menjadi tegangan DC tinggi tanpa melalui transformator besar seperti pada adaptor konvensional. Tegangan DC tinggi tersebut kemudian dipotong-potong secara cepat oleh transistor *switching* pada frekuensi tinggi antara 20kHz hingga 1MHz menghasilkan sinyal pulsa PWM yang *duty cycle*-nya menentukan besarnya tegangan *output*.

Sinyal pulsa frekuensi tinggi tersebut selanjutnya melewati transformator berinti ferit berukuran kecil untuk diturunkan tegangannya sesuai kebutuhan, kemudian disearahkan kembali menggunakan dioda Schottky dan dihaluskan

oleh kapasitor filter sehingga menghasilkan tegangan DC yang bersih dan stabil. Tahap terakhir adalah regulasi umpan balik menggunakan optocoupler yang memantau tegangan *output* secara terus-menerus dan menyesuaikan *duty cycle switching* secara otomatis agar tegangan *output* tetap konstan meskipun beban berubah-ubah.

Pada sistem *receiver*, adaptor *switching* 5V 1A DC Jack berfungsi sebagai sumber catu daya utama yang mengkonversi tegangan AC 220V dari PLN menjadi tegangan DC stabil 5V untuk mencatu ESP32 *receiver*, modul LoRa SX1278 Ra-02, dan LCD I2C 16x2. Tegangan 5V dari adaptor disalurkan melalui konektor DC Jack dan melewati dioda Schottky SS14 sebagai proteksi polaritas terbalik sebelum masuk ke jalur catu daya sistem *receiver*.

Tabel 2-8 Spesifikasi Adaptor

Keterangan Adaptor	Spesifikasi
Tegangan <i>Input</i>	100-240V AC
Tegangan <i>Output</i>	5V DC
Arus <i>Output</i> Maksimum	1 A
Daya <i>Output</i> Maksimum	5 W
Konektor <i>Output</i>	DC Jack



Gambar 2.20 Adaptor DC 5V 1A

Tabel 2-9 Keterangan Fungsi Pin Adaptor

No	Keterangan	Fungsi
1	Terminal Positif (+)	Terminal keluaran tegangan positif +5V DC. Pada konektor DC Jack, terminal positif terletak di bagian tengah/dalam konektor (<i>center pin</i>).
2	Terminal Negatif (-)	Terminal <i>ground</i> atau referensi negatif. Pada konektor DC Jack, terminal negatif terletak di bagian luar/selubung konektor (<i>outer sleeve</i>)

2.2.16 LCD I2C 16x2

LCD I2C (*Liquid Crystal Display Inter-Integrated Circuit*) merupakan modul tampilan karakter yang pada umumnya menggunakan LCD 16×2 atau 20×4 berbasis IC HD44780 yang dikombinasikan dengan modul antarmuka I2C (*Inter-Integrated Circuit*) seperti IC PCF8574. Penambahan antarmuka I2C pada modul LCD ini memungkinkan pengendalian LCD hanya menggunakan dua jalur komunikasi saja, yaitu SDA (Serial Data) sebagai jalur data dan SCL (*Serial Clock*) sebagai jalur *clock*, sehingga jumlah pin mikrokontroler yang dibutuhkan menjadi jauh lebih sedikit dibandingkan dengan penggunaan antarmuka paralel konvensional.

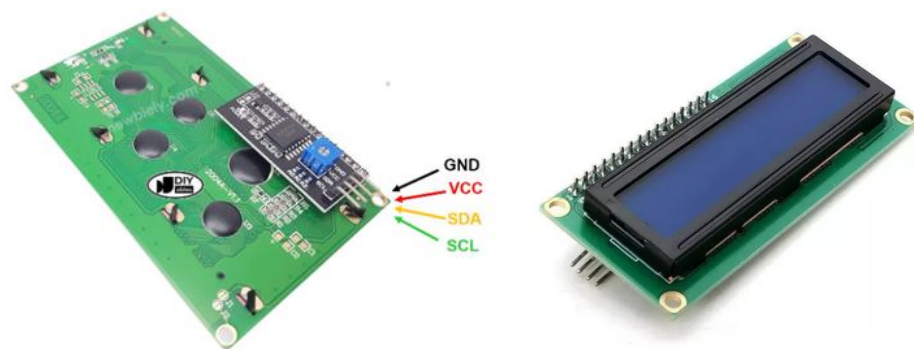
Menurut penelitian [25] “Rancang Bangun Sistem Peringatan Dan Kendali Kelembaban Media Tanam Otomatis Berbasis Arduino Uno Dengan Tampilan LCD I2C” LCD I2C banyak dimanfaatkan sebagai media penampil informasi pada sistem berbasis Arduino maupun ESP32. Modul ini mampu menampilkan hasil pembacaan sensor, status operasi sistem, maupun pesan peringatan secara *real-time*, sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kondisi perangkat elektronik yang sedang beroperasi. Protokol I2C merupakan sistem komunikasi serial sinkron yang memungkinkan beberapa perangkat terhubung secara bersamaan pada dua jalur komunikasi yang sama, yaitu SDA (Serial Data) dan SCL (*Serial Clock*). Penerapan protokol I2C pada modul LCD menjadikan komunikasi antara mikrokontroler dengan modul tampilan lebih sederhana dan

efisien, serta mampu menghemat penggunaan pin GPIO pada mikrokontroler secara signifikan.

Pada sistem *receiver*, LCD I2C 16x2 berfungsi sebagai media penampil data *Monitoring* baterai LiFePO4 secara *real-time*. Data yang ditampilkan meliputi suhu, *Shunt Voltage*, *Battery Voltage*, *Current*, *Power*, dan *Load Voltage* yang ditampilkan secara bergantian setiap 3 detik. Selain menampilkan data sensor, LCD juga berfungsi sebagai indikator status operasi sistem, seperti status koneksi Wi-Fi, proses pengiriman data ke *Google Sheets*, dan kondisi komunikasi LoRa antara *transmitter* dan *receiver*.

Tabel 2-10 Spesifikasi LCD I2C 16x2

Keterangan LCD	Spesifikasi
Tegangan Operasi	5V DC
Tegangan Logika I2C	3,3-5V DC
Arus Operasi	1,5-2 mA
Dimensi Modul	80 x 36 mm
Modul Antarmuka	I2C



Gambar 2.21 LCD I2C 16x2

Tabel 2-11 Keterangan Fungsi Pin LCD I2C 16x2

No	Keterangan	Fungsi Pin
1	GND	<i>Ground</i> / kutub negatif. Titik referensi 0volt untuk seluruh rangkaian LCD.

No	Keterangan	Fungsi Pin
2	VCC	Tegangan sumber / daya. Menyalakan modul LCD beserta backlight-nya. Gunakan 5V agar tampilan lebih terang (3.3V juga bisa tapi lebih redup).
3	SDA	<i>Serial Data</i> — jalur dua arah untuk mengirim data antara ESP32 dan LCD lewat protokol I2C
4	SCL	<i>Serial Clock</i> — jalur sinyal detak (<i>clock</i>) yang menyinkronkan pengiriman data I2C, mengatur kapan tiap bit data dibaca.

2.2.17 Internet of Things (IoT)

Menurut penelitian [26] “*Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications*” *Internet of Things* (IoT) merupakan sebuah paradigma teknologi yang menghubungkan berbagai perangkat fisik (*physical objects*) yang telah dilengkapi dengan sensor, aktuator, perangkat lunak, serta konektivitas jaringan, sehingga perangkat-perangkat tersebut mampu mengumpulkan, mengirimkan, menerima, dan bertukar data melalui internet tanpa membutuhkan interaksi manusia secara langsung. Dengan kemampuan tersebut, IoT memungkinkan berbagai perangkat untuk saling berkomunikasi dan beroperasi secara otomatis dalam mendukung proses pengambilan keputusan maupun pengendalian sistem yang lebih efisien.

Sistem *Internet of Things* terdiri atas empat komponen inti yang saling terintegrasi, yaitu perangkat fisik yang bertanggung jawab dalam pengumpulan data dari lingkungan serta melakukan tindakan berdasarkan data yang diperoleh, protokol komunikasi yang memungkinkan perangkat untuk terhubung dan saling bertukar data seperti Wi-Fi, *Bluetooth*, 5G, dan LoRaWAN, platform pengolahan data sebagai sistem yang memproses dan menganalisis data yang diterima dari perangkat, serta aplikasi sebagai antarmuka yang memberikan layanan dan informasi kepada pengguna.

Secara fundamental, sistem IoT bekerja melalui empat tahapan utama yaitu sensing di mana sensor mengumpulkan data dari lingkungan, *communication* di mana data dikirim melalui jaringan komunikasi, *processing* di mana data diproses di *cloud* atau *edge device*, serta *action* di mana sistem memberikan respons atau tindakan berdasarkan hasil pemrosesan data tersebut.

Pada sistem *Monitoring* ini, teknologi IoT diterapkan untuk menghubungkan sensor INA219 dan DS18B20 yang terpasang pada baterai LiFePO4 dengan platform *cloud Google Sheets* dan *Blynk* melalui koneksi Wi-Fi pada ESP32 *receiver*. Data parameter baterai berupa Suhu, *Shunt Voltage*, *Battery Voltage*, *Current*, *Power*, *State of Charge (SoC)* dan suhu dikirimkan secara otomatis setiap 5 menit dan dapat dipantau secara *real-time* dari jarak jauh melalui *Google Sheets* tanpa memerlukan interaksi manusia secara langsung, sesuai dengan prinsip dasar *Internet of Things*.

2.2.18 Google Spreadsheet

Menurut penelitian [27] “Pengelolaan Proses Pembelajaran Dengan *Google Spreadsheet*” *Google Spreadsheet* atau *Google Sheets* merupakan aplikasi pengolah lembar kerja (*spreadsheet*) berbasis *cloud* yang dikembangkan oleh *Google* sebagai bagian dari layanan *Google Workspace*. Aplikasi ini memungkinkan pengguna untuk membuat, mengedit, mengolah, menyimpan, serta berbagi data secara daring (*online*), sehingga beberapa pengguna dapat mengakses dan bekerja pada dokumen yang sama secara bersamaan dalam waktu nyata (*real-time*) tanpa memerlukan instalasi perangkat lunak tambahan pada perangkat yang digunakan.



Gambar 2.22 *Google Spreadsheet*

Pada sistem *Monitoring* ini, *Google Sheets* dimanfaatkan sebagai platform penyimpanan dan pencatatan data (*data logging*) berbasis *cloud* yang menerima data secara otomatis dari *ESP32 receiver* melalui koneksi internet. Setiap kali *ESP32 receiver* berhasil menerima paket data dari *ESP32 transmitter* via LoRa SX1278, data tersebut langsung dikirimkan ke *Google Sheets* menggunakan *library* *ESP Google Sheet Client* melalui protokol HTTPS dengan autentikasi *Google Service Account*. Proses pengiriman data ini berlangsung secara otomatis setiap interval 5 menit tanpa memerlukan interaksi pengguna secara langsung, sesuai dengan konsep *Internet of Things* yang diterapkan pada sistem ini.

Data yang tersimpan di *Google Sheets* mencakup tujuh parameter sekaligus dalam setiap baris, yaitu waktu pencatatan (*timestamp*), suhu baterai dalam satuan °C, *Shunt Voltage* dalam satuan mV, *Battery Voltage* dalam satuan V, *Current* dalam satuan mA, *Power* dalam satuan mW, *Load Voltage*, RSSI, SoC dan SoH. *Timestamp* yang dicantumkan pada setiap baris data diperoleh dari server NTP (*Network Time Protocol*) dengan server `id.pool.ntp.org` dan *offset* zona waktu WIB (UTC+7), sehingga setiap data yang tersimpan memiliki cap waktu yang akurat dan terverifikasi.

2.2.19 Blynk

Menurut penelitian [28] “A Sensor based IoT Monitoring System for Electrical Devices using Blynk framework” Blynk merupakan platform Internet of Things (IoT) yang memanfaatkan Blynk Server sebagai media komunikasi antara perangkat keras (mikrokontroler dan sensor) dengan aplikasi pada smartphone. Platform ini memungkinkan pengguna melakukan pemantauan (monitoring) dan pengendalian (control) perangkat dari jarak jauh melalui koneksi internet secara real-time. Sistem bekerja dengan mengirimkan data sensor ke server Blynk, kemudian informasi tersebut ditampilkan pada aplikasi Android sehingga pengguna dapat memantau kondisi perangkat tanpa harus berada di lokasi.

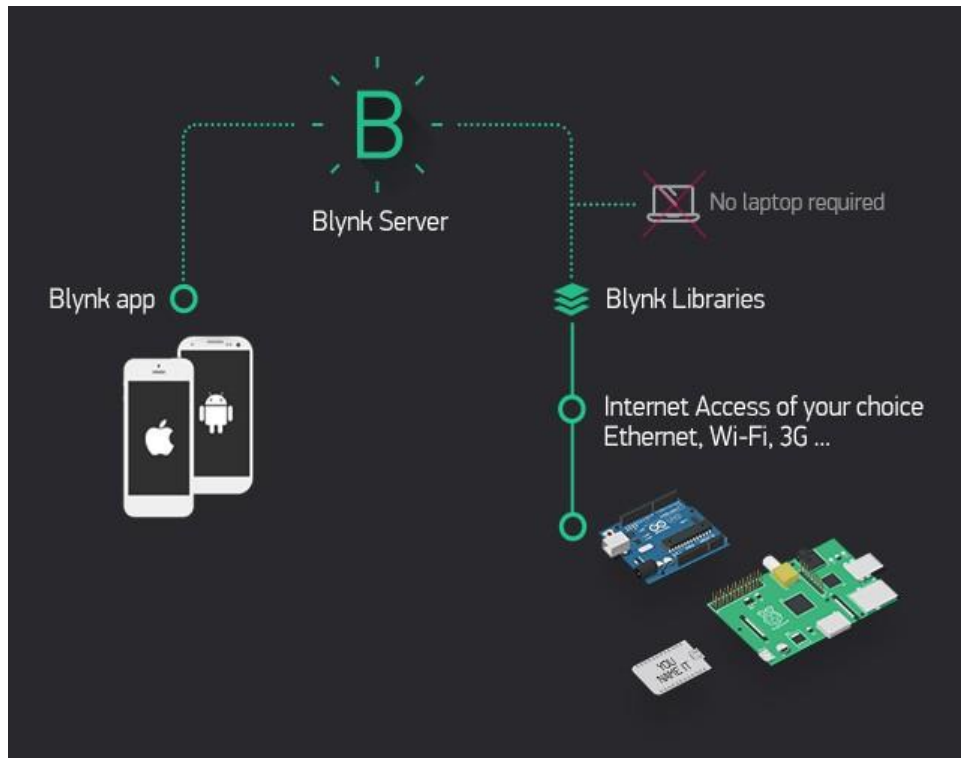


Gambar 2.23 *Blynk*

Blynk IoT adalah platform Internet of Things berbasis cloud yang memungkinkan pengguna memantau dan mengelola perangkat secara real-time melalui aplikasi smartphone maupun web dashboard tanpa perlu berada di lokasi perangkat. Pada pengembangan sistem monitoring baterai LiFePO₄ ini, Blynk IoT ditambahkan sebagai output ketiga selain LCD I2C 16x2 dan Google Spreadsheet untuk memberikan kemudahan akses monitoring secara real-time melalui aplikasi smartphone.

Pada Aplikasi Blynk sebagai pendukung IoT dapat diunduh melalui Google Play untuk pengguna Android dan melalui App Store bagi pengguna iOS. Blynk

mendukung berbagai macam hardware yang dapat digunakan untuk project Internet of Things. Blynk adalah dashboard digital dengan fasilitas antar muka grafis dalam pembuatan project-nya.



Gambar 2.24 *Blynk Cloud Server*

Terdapat 3 komponen utama Blynk:

1. Blynk Apps

Blynk Apps memungkinkan untuk membuat project interface dengan berbagai macam komponen Input & output yang mendukung untuk pengiriman maupun penerimaan data serta merepresentasikan data sesuai dengan komponen yang dipilih. Representasi data dapat berbentuk visual angka maupun grafik.

2. Blynk Server

Blynk server merupakan fasilitas Backend Service berbasis Cloud yang bertanggung jawab untuk mengatur komunikasi antara aplikasi smartphone dengan lingkungan hardware. Kemampuan untuk menangani puluhan hardware pada saat yang bersamaan semakin memudahkan bagi para pengembang sistem IoT.

3.Blynk Library

Blynk Library dapat digunakan untuk membantu pengembangan code. Blynk library tersedia pada banyak platform perangkat keras sehingga memudahkan para pengembang IoT dengan fleksibilitas hardware yang didukung oleh lingkungan Blynk.