

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan proses pengeringan biji kopi. Pendekatan yang digunakan meliputi penjemuran konvensional, penggunaan ruang pengering, serta penerapan mikrokontroler dan *Internet of Things* (IoT). Pengembangan tersebut dilakukan untuk mempercepat proses pengeringan, mempertahankan mutu biji kopi, dan mempermudah pemantauan selama proses berlangsung.

Metode penjemuran konvensional masih banyak diterapkan karena relatif sederhana. Penelitian mengenai pengurangan kadar air biji kopi Robusta menggunakan media aspal dan terpal menunjukkan adanya perbedaan waktu pengeringan. Kadar air rata-rata 12,32% dapat dicapai dalam waktu sekitar 3,91 hari pada media aspal [5]. Penggunaan media terpal membutuhkan waktu yang lebih lama. Penelitian lain menggunakan *solar dryer dome* dan *sun drying* sebagai metode pengeringan. Hasilnya menunjukkan bahwa *solar dryer dome* dapat mempercepat proses pengeringan dibandingkan *sun drying* [6]. Namun, kedua kondisi tersebut menunjukkan bahwa proses pengeringan masih bergantung pada intensitas penyinaran matahari sehingga efektivitasnya dipengaruhi oleh kondisi cuaca.

Penerapan teknologi IoT telah digunakan untuk meningkatkan kemudahan pemantauan proses pengeringan. Sistem berbasis ESP32 dan sensor DHT22 digunakan untuk membaca temperatur dan kelembapan ruang pengering. Data hasil pembacaan kemudian dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi menuju platform ThingSpeak [4]. Penelitian lain menggunakan ESP32, sensor DHT22, dan Blynk sebagai media pemantauan melalui *smartphone*. Sistem tersebut juga telah dilengkapi pengendalian elemen pemanas menggunakan metode *on-off* [7].

Selain sistem *monitoring*, metode pengendalian temperatur juga menjadi bagian penting dalam pengembangan alat pengering. Penelitian yang membandingkan kendali relay dan PID pada oven pengering menunjukkan adanya

perbedaan respons temperatur. Kendali PID menghasilkan overshoot dan osilasi yang lebih kecil dibandingkan kendali relay pada kondisi pengujian yang dilakukan [8]. Meskipun diterapkan pada objek pengeringan yang berbeda, hasil tersebut menunjukkan bahwa pemilihan metode kendali memengaruhi karakteristik respons suhu selama proses pengeringan.

Berdasarkan penelitian terdahulu, pengembangan pengering kopi telah dilakukan menggunakan berbagai metode, mulai dari penjemuran hingga sistem berbasis mikrokontroler dan IoT [4], [5]. Pemanfaatan ESP32 dan IoT juga telah digunakan untuk melakukan *monitoring* dan pengendalian pada proses pengeringan [6], [7]. Sementara itu, penggunaan PID dapat memberikan respons temperatur yang lebih terkontrol dibandingkan kendali relay pada penelitian oven pengering [8]. Penelitian ini mengembangkan pendekatan tersebut melalui penggunaan oven listrik yang dimodifikasi dengan ESP32 sebagai pusat kendali. Sistem dilengkapi sensor SHT30, pengendalian suhu menggunakan PID *trial-error*, SSR sebagai pengendali elemen pemanas, serta OLED, joystick, dan Blynk sebagai media antarmuka dan *monitoring*.

2.2 Dasar Teori

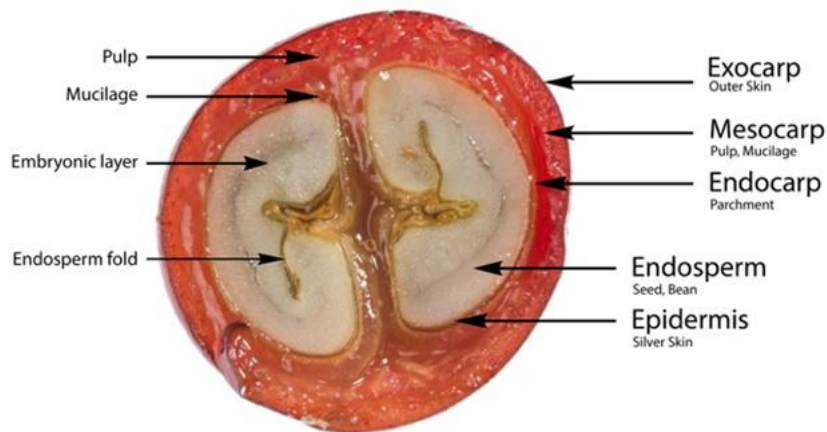
Pada penelitian ini, sejumlah teori digunakan sebagai landasan dalam perancangan dan pengembangan sistem pengering biji kopi berbasis mikrokontroler ESP32. Landasan teori tersebut dimanfaatkan untuk menjelaskan prinsip kerja setiap komponen beserta metode yang diterapkan sehingga sistem yang dirancang memiliki dasar ilmiah yang dapat dipertanggungjawabkan. Melalui pembahasan teori tersebut, diharapkan pemahaman mengenai keterkaitan antara perangkat keras, perangkat lunak, dan metode pengendalian yang digunakan dalam penelitian ini dapat diperoleh.

2.2.1 Kopi Robusta

Kopi robusta merupakan salah satu jenis kopi yang banyak dibudidayakan dan secara ilmiah diklasifikasikan sebagai *Coffea canephora*. Kopi robusta memiliki karakteristik tanaman dan biji yang berbeda dengan kopi arabika. Perbedaan karakteristik tersebut perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi sifat bahan selama proses pascapanen. Di Indonesia, kopi menjadi salah satu

komoditas perkebunan yang dibudidayakan di berbagai wilayah, dengan sebagian besar pengusahaannya dilakukan oleh perkebunan rakyat [1].

Buah kopi yang telah mencapai tingkat kematangan tertentu dikenal sebagai *coffee cherry*. Di dalam buah tersebut terdapat biji kopi yang digunakan sebagai bagian utama dalam proses pengolahan kopi. Struktur buah kopi tersusun atas beberapa lapisan dengan karakteristik yang berbeda dan tidak hanya dibatasi oleh kulit serta biji. Secara umum, struktur buah kopi terdiri atas *exocarp*, *mesocarp*, *mucilage*, *endocarp* atau *parchment*, *silverskin*, dan *endosperm* [9]. Susunan lapisan tersebut berperan dalam melindungi biji selama perkembangan buah hingga memasuki tahap pascapanen.



Gambar 2.1 Anatomi Gelondong *Cherry* Kopi

Struktur buah kopi yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 dapat digunakan untuk mengidentifikasi bagian-bagian buah yang mengalami perubahan selama proses pengolahan. Bagian terluar buah disebut *exocarp* dan berfungsi sebagai lapisan pelindung. Di bawah *exocarp* terdapat *mesocarp* yang merupakan bagian berdaging pada buah. Pada lapisan ini terkandung air, gula, serta berbagai komponen lain yang terdapat pada jaringan buah [9].

Lapisan selanjutnya berupa *mucilage* yang memiliki tekstur berlendir dan terdapat di sekitar lapisan pelindung biji. Setelah *mucilage*, terdapat *endocarp* atau *parchment* yang memiliki struktur lebih keras dan berfungsi untuk melindungi biji. Pada bagian dalam *endocarp* terdapat *silverskin* yang berupa lapisan tipis dan menyelimuti biji, sedangkan bagian utama biji disebut *endosperm*. *Endocarp*,

silverskin, dan *endosperm* merupakan bagian yang masih terdapat pada bahan setelah proses pengolahan basah selesai [9]

Untuk memperjelas susunan tersebut, karakteristik setiap bagian buah kopi dirangkum pada Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Struktur Buah Kopi

No	Bagian	Istilah	Karakteristik
1	Kulit buah	<i>Exocarp</i>	Lapisan terluar yang melindungi bagian dalam buah.
2	Daging buah	<i>Mesocarp</i>	Bagian berdaging yang berada di bawah kulit buah.
3	Lendir	<i>Mucilage</i>	Lapisan berlendir yang berada di sekitar kulit tanduk.
4	Kulit tanduk	<i>Endocarp/Parchment</i>	Lapisan keras yang melindungi biji.
5	Kulit ari	<i>Silverskin</i>	Lapisan tipis yang menyelimuti bagian biji.
6	Biji	<i>Endosperm</i>	Bagian utama yang berkembang menjadi biji kopi

Selain struktur buah, tingkat kematangan juga perlu diperhatikan dalam penentuan bahan kopi yang akan digunakan pada proses pascapanen. Selama perkembangan buah, perubahan warna pada lapisan luar terjadi seiring dengan perubahan komponen pigmen yang terkandung di dalamnya. Buah yang pada awalnya berwarna hijau secara bertahap berubah menjadi kuning dan selanjutnya menjadi merah ketika tingkat kematangan meningkat. Perubahan warna tersebut dipengaruhi oleh perubahan kandungan klorofil, karotenoid, dan antosianin pada kulit buah [9]. Tingkat kematangan menjadi salah satu faktor yang berkaitan dengan karakteristik bahan sebelum proses pengolahan dilakukan.

Buah kopi yang telah dipanen dari pohon tidak dapat langsung dikonsumsi atau disimpan, melainkan perlu melalui serangkaian tahapan pengolahan pascapanen terlebih dahulu. Tujuan dari pengolahan pascapanen adalah memisahkan biji kopi dari lapisan-lapisan buah yang menyelimutinya serta menurunkan kadar air biji hingga mencapai nilai yang sesuai untuk penyimpanan. Secara umum, buah kopi terdiri atas beberapa lapisan, yaitu kulit luar (*exocarp*), daging buah (*mesocarp*), lapisan lendir (*mucilage*), kulit tanduk (*parchment*), kulit ari (*silverskin*), dan biji kopi (*green bean*) di bagian paling dalam [2], [9].

Terdapat beberapa metode pengolahan pascapanen yang umum digunakan di industri kopi, di antaranya metode natural (*dry process*), *full washed* (*washed process*), *semi washed* (*wet-hulled*), *honey process*, dan *anaerobic* [10]. Pada metode natural, buah kopi yang telah dipetik langsung dijemur secara utuh di bawah sinar matahari tanpa pengupasan terlebih dahulu. Pengeringan dilakukan hingga seluruh lapisan buah mengering, kemudian kulit luar dan daging buah dikupas untuk memperoleh biji kopi. Metode ini menghasilkan cita rasa yang cenderung manis dengan aroma buah yang kuat, namun memerlukan waktu pengeringan yang lebih lama dan pengawasan yang ketat untuk menghindari fermentasi yang tidak diinginkan [10].

Pada metode *semi washed* atau yang dikenal dengan istilah giling basah (*wet-hulled*), kulit buah kopi dikupas terlebih dahulu namun sebagian lapisan lendir dibiarkan menempel pada biji. Biji kemudian dikeringkan secara singkat sebelum dilakukan pengupasan basah untuk menghilangkan sisa lendir yang masih menempel, dilanjutkan dengan pengeringan hingga mencapai kadar air yang diinginkan. Metode ini banyak digunakan di Indonesia dan menghasilkan karakteristik rasa yang kaya dengan perpaduan manis dan *earthy* [10]. Sementara itu, pada metode *honey process*, kulit buah dikupas namun sejumlah lapisan lendir sengaja dibiarkan menempel pada biji selama proses pengeringan. Jumlah lendir yang disisakan menentukan jenis *honey process* yang dihasilkan, mulai dari *white honey* hingga *black honey*, yang masing-masing memberikan profil rasa berbeda [10].

Metode *anaerobic* merupakan teknik pengolahan yang relatif baru dalam industri kopi. Pada metode ini, buah kopi yang telah dipetik dimasukkan ke dalam wadah tertutup yang kedap udara sehingga proses fermentasi berlangsung tanpa kehadiran oksigen. Wadah tersebut biasanya dilengkapi dengan *airlock* untuk mengeluarkan gas hasil fermentasi tanpa membiarkan udara masuk. Metode ini menghasilkan cita rasa yang unik dan kompleks, namun memerlukan peralatan khusus serta pengawasan yang ketat terhadap suhu dan waktu fermentasi [10].

Pada metode *full washed*, tahapan pengolahan diawali dengan proses pengupasan kulit buah (*pulping*) untuk memisahkan kulit luar dan daging buah dari biji. Proses pengupasan dapat dilakukan secara mekanis menggunakan mesin *pulper* maupun secara manual. Biji kopi yang telah dikupas masih memiliki lapisan lendir (*mucilage*) yang menempel pada permukaan kulit tanduk (*parchment*). Lapisan lendir tersebut kemudian diuraikan melalui proses fermentasi yang dilakukan dengan merendam biji di dalam air selama beberapa jam. Setelah proses fermentasi selesai, biji dicuci menggunakan air bersih hingga seluruh sisa lendir terangkat dari permukaan biji [2] [10].

Hasil dari tahapan pengupasan, fermentasi, dan pencucian tersebut menghasilkan biji dalam kondisi yang dikenal sebagai *wet parchment*. Pada kondisi ini, biji kopi telah bersih dari lapisan lendir namun masih diselimuti oleh kulit tanduk dan memiliki kadar air yang tinggi, umumnya masih berada di atas 40% [2], [11]. Kadar air tersebut jauh melebihi standar maksimal 12,5% yang ditetapkan untuk penyimpanan biji kopi [3], sehingga diperlukan proses pengeringan untuk menurunkan kadar air hingga mencapai nilai yang sesuai. Pemahaman mengenai kondisi bahan sebelum pengeringan diperlukan agar metode dan parameter pengeringan yang diterapkan dapat disesuaikan dengan karakteristik bahan yang akan dikeringkan

2.2.2 Pengeringan Biji Kopi

Pengeringan biji kopi merupakan salah satu tahapan penting dalam proses pascapanen yang bertujuan untuk mengurangi kandungan air pada biji hingga mencapai kondisi yang sesuai untuk penyimpanan. Penurunan kadar air diperlukan untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme dan mengurangi

perubahan mutu selama penyimpanan [2], [3]. Selain itu, proses pengeringan yang tidak tepat dapat memengaruhi komponen bioaktif dalam biji kopi, yang pada akhirnya berdampak terhadap karakteristik cita rasa produk akhir [9]. Dengan demikian, proses pengeringan tidak hanya berkaitan dengan pengurangan massa air, tetapi juga berhubungan erat dengan upaya mempertahankan mutu biji kopi setelah proses pascapanen.

Biji kopi yang memasuki tahap pengeringan masih mengandung air dalam jumlah cukup tinggi. Pada awal proses pengeringan, kadar air biji kopi dapat mencapai sekitar 55–60% basis basah dan perlu dikeringkan hingga mendekati 12% basis basah [2]. Kondisi awal tersebut menyebabkan proses pengeringan menjadi tahapan penting sebelum biji kopi dapat disimpan atau diproses lebih lanjut.

Pada metode *full washed*, kondisi tersebut terdapat pada *wet parchment* yang diperoleh setelah proses pengupasan, fermentasi, dan pencucian. Proses pengeringan berlangsung melalui perpindahan air dari bagian dalam biji menuju permukaan. Air yang mencapai permukaan kemudian dilepaskan ke udara di sekitar bahan. Pada tahap awal, air lebih mudah berpindah sehingga penurunan kadar air berlangsung relatif cepat. Seiring proses berlangsung, air yang tersisa semakin sulit berpindah sehingga laju pengeringan cenderung menurun [2].

Beberapa faktor memengaruhi proses pengeringan, terutama temperatur, kelembapan relatif, waktu pengeringan, dan karakteristik bahan. Temperatur berkaitan dengan energi panas yang diterima bahan, sedangkan kelembapan relatif memengaruhi kemampuan udara dalam menerima uap air. Kondisi kedua parameter tersebut akan memengaruhi laju pelepasan air selama proses pengeringan [2], [12].

Metode pengeringan biji kopi dapat dilakukan dengan memanfaatkan energi matahari maupun menggunakan sumber panas buatan. *Natural drying* relatif sederhana, tetapi prosesnya dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan lingkungan. Penggunaan sumber panas buatan memungkinkan kondisi temperatur ruang pengering diatur dengan lebih terarah. Penelitian Suherman dkk. menggunakan

temperatur 40°C, 50°C, dan 60°C pada pengeringan kopi serta menunjukkan adanya perbedaan karakteristik proses pada kondisi temperatur yang berbeda [12].

Kondisi akhir pengeringan perlu disesuaikan dengan standar mutu biji kopi. Berdasarkan SNI 01-2907-2008, kadar air maksimum biji kopi ditetapkan sebesar 12,5% basis basah [3]. Nilai tersebut menjadi salah satu acuan untuk menentukan apakah biji kopi telah mencapai kondisi yang sesuai untuk penyimpanan.

2.2.3 Oven listrik

Oven listrik merupakan perangkat yang digunakan untuk menghasilkan panas di dalam ruang tertutup dengan memanfaatkan energi listrik. Panas dihasilkan oleh elemen pemanas yang bekerja ketika oven mendapatkan suplai tegangan listrik. Temperatur ruang pemanas kemudian dapat diatur menggunakan sistem pengaturan yang tersedia pada oven. Karakteristik tersebut membuat oven listrik dapat digunakan sebagai ruang pemanas pada proses pengeringan.

Pada penelitian ini digunakan oven listrik merek Samono tipe SW-EOG12 sebagai ruang pengering. Oven memiliki kapasitas 12 liter dengan dua elemen pemanas yang masing-masing memiliki daya 375 W. Tegangan kerja oven berada pada rentang 220–240V AC dengan arus terukur sebesar 3,41 A dan frekuensi 50 Hz. Oven juga dilengkapi pengatur suhu dengan rentang 60–230°C serta *timer* dengan durasi maksimum 60 menit [13].



Gambar 2.2 Tampilan Fisik Oven SW-EOG12

Oven listrik yang digunakan sebagai ruang pengering ditunjukkan pada Gambar 2.2 Ruang bagian dalam oven digunakan sebagai tempat peletakan bahan

selama proses pengeringan. Pada bagian dalam tersebut terdapat elemen pemanas yang berfungsi menghasilkan panas selama oven beroperasi.

Spesifikasi lengkap oven yang digunakan disajikan pada Tabel 2.2 yang digunakan pada penelitian.

Tabel 2-2 Spesifikasi Oven Listrik Samono SW-EOG12

No	Parameter	Nilai
1	Merek dan Tipe	Samono SW-EOG12
2	Kapasitas	12 Liter
3	Daya	375W+375W
4	Tegangan	220-240V AC
5	Arus	3,41 A
6	Frekuensi	50Hz
7	Rentang pengaturan suhu	60–230 °C
8	Durasi <i>timer</i> maksimum	60 menit
9	Jumlah elemen pemanas	2 (atas dan bawah)
10	Dimensi (P×L×T)	336×235×205 mm
11	Berat	2,5 kg

Berdasarkan spesifikasi tersebut, oven memiliki daya pemanas total sebesar 750 W yang berasal dari dua elemen pemanas. Pengaturan suhu dan *timer* pada kondisi awal dilakukan menggunakan kontrol bawaan oven. Namun, pengaturan tersebut tidak digunakan dalam sistem yang dikembangkan karena pengendalian temperatur dilakukan menggunakan sistem kendali eksternal.

Pada penelitian ini, kontrol bawaan untuk pengaturan suhu dan *timer* dilepas dari sistem. Fungsi pengaturan tersebut kemudian digantikan oleh sistem kendali yang dirancang menggunakan ESP32. Dengan demikian, elemen pemanas tidak lagi bekerja berdasarkan pengaturan bawaan oven, tetapi dikendalikan berdasarkan hasil pembacaan temperatur dan keluaran sistem kendali yang digunakan.

Modifikasi tersebut memungkinkan oven listrik digunakan sebagai ruang pengering yang terintegrasi dengan sistem kendali temperatur. Dengan kapasitas

12 liter dan dua elemen pemanas, oven digunakan sebagai bagian utama dari ruang pengering pada prototipe yang dikembangkan.

2.2.4 Penentuan Kadar Air dengan Metode Gravimetri

Kadar air merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengetahui jumlah air yang masih terdapat di dalam biji kopi setelah proses pengeringan. Nilai kadar air dapat digunakan untuk menilai kondisi biji dan kesesuaiannya terhadap persyaratan mutu. Berdasarkan SNI 01-2907-2008, kadar air maksimum biji kopi yang dipersyaratkan adalah 12,5% fraksi massa [3].

Salah satu metode penentuan kadar air adalah metode gravimetri. Metode ini didasarkan pada perubahan massa sampel akibat proses pemanasan. Sampel ditimbang sebelum pengeringan untuk memperoleh massa awal, kemudian dipanaskan sehingga kandungan air yang dapat diuapkan mengalami pengurangan. Selisih massa sebelum dan setelah pemanasan digunakan sebagai dasar untuk menentukan kadar air sampel.

Penentuan kadar air kopi dengan prinsip kehilangan massa terdapat dalam ISO 1447:1978, *Green coffee — Determination of moisture content (Routine method)*. Standar tersebut menggunakan pemanasan dalam oven pada temperatur $130 \pm 2^\circ\text{C}$ dan menentukan kadar air berdasarkan kehilangan massa sampel setelah proses pengeringan [14]. ISO 1447 juga menetapkan persyaratan terhadap oven yang digunakan, antara lain kemampuan mempertahankan temperatur udara dan rak di sekitar sampel pada $130 \pm 2^\circ\text{C}$ serta kemampuan kembali mencapai temperatur tersebut setelah sampel dimasukkan.

Persyaratan tersebut menunjukkan bahwa metode standar tidak hanya menentukan temperatur pengujian, tetapi juga mempertimbangkan kestabilan kondisi pemanasan selama pengujian. Oleh karena itu, penggunaan temperatur 130°C pada penelitian ini mengacu pada kondisi pemanasan dalam ISO 1447, sedangkan penerapan metode menggunakan peralatan yang tersedia pada penelitian dan tidak dinyatakan sebagai pengujian yang sepenuhnya memenuhi seluruh persyaratan peralatan ISO 1447.

Secara umum, kadar air berdasarkan perubahan massa sampel dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.1).

$$KA = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2.1)$$

dengan:

KA = Kadar Air (%)

m_1 = massa sampel sebelum pengeringan (g)

m_2 = massa sampel setelah pengeringan (g)

Persamaan tersebut menunjukkan perbandingan antara massa yang hilang selama proses pemanasan dengan massa awal sampel. Semakin besar penurunan massa yang terjadi, semakin besar pula kehilangan massa yang terukur selama proses pengeringan. Dalam penentuan kadar air dengan metode gravimetri, hasil pengukuran massa menjadi dasar untuk memperoleh nilai kadar air sampel.

Hasil penentuan kadar air selanjutnya dapat dibandingkan dengan persyaratan mutu biji kopi yang ditetapkan dalam SNI 01-2907-2008. Dengan demikian, metode gravimetri dapat digunakan untuk memperoleh nilai kadar air berdasarkan perubahan massa sekaligus mengevaluasi kondisi biji kopi terhadap batas kadar air yang dipersyaratkan [3], [14].

2.2.5 Mikrokontroler ESP32

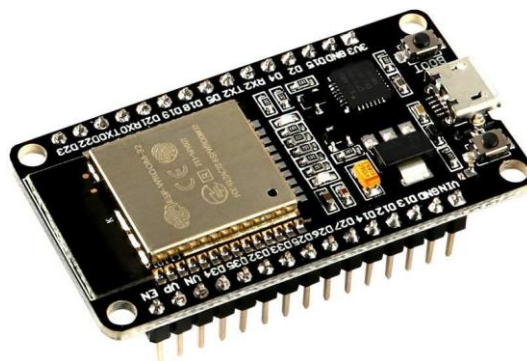
ESP32 merupakan mikrokontroler yang dikembangkan oleh Espressif Systems dan banyak digunakan pada aplikasi sistem tertanam (*embedded system*) serta *Internet of Things* (IoT). Mikrokontroler ini dirancang dengan arsitektur prosesor dual-core 32-bit Xtensa LX6 yang memungkinkan dua proses dijalankan secara bersamaan, sehingga cocok diterapkan pada sistem yang memerlukan pemrosesan data sensor dan komunikasi jaringan secara paralel [15].

Salah satu keunggulan utama ESP32 dibandingkan mikrokontroler sejenis adalah tersedianya modul Wi-Fi dan Bluetooth yang telah terintegrasi di dalam satu chip[15]. Dengan adanya modul komunikasi bawaan tersebut, proses pengiriman data ke platform berbasis *cloud* dapat dilakukan tanpa memerlukan

modul tambahan. Hal ini menjadikan rangkaian perangkat keras lebih sederhana dan biaya implementasi lebih rendah.

ESP32 menyediakan beberapa jenis antarmuka komunikasi yang dapat digunakan untuk menghubungkan mikrokontroler dengan perangkat lain. UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) merupakan antarmuka komunikasi serial asinkron yang umum digunakan untuk pertukaran data antar perangkat secara dua arah. SPI (*Serial Peripheral Interface*) merupakan protokol komunikasi serial sinkron berkecepatan tinggi yang biasa digunakan untuk berkomunikasi dengan perangkat seperti modul kartu memori atau layar. I2C (*Inter-Integrated Circuit*) merupakan protokol komunikasi serial sinkron yang hanya memerlukan dua jalur kabel, yaitu jalur data (SDA) dan jalur *clock* (SCL), sehingga cocok digunakan untuk menghubungkan beberapa perangkat pada satu bus yang sama. PWM (*Pulse Width Modulation*) merupakan teknik pengaturan lebar pulsa sinyal digital yang digunakan untuk mengendalikan daya atau kecepatan aktuator seperti motor dan elemen pemanas [15].

Pada penelitian ini, modul ESP32 DOIT DevKit V1 versi 30 pin digunakan sebagai pusat kendali sistem. Tampilan fisik modul tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.3.

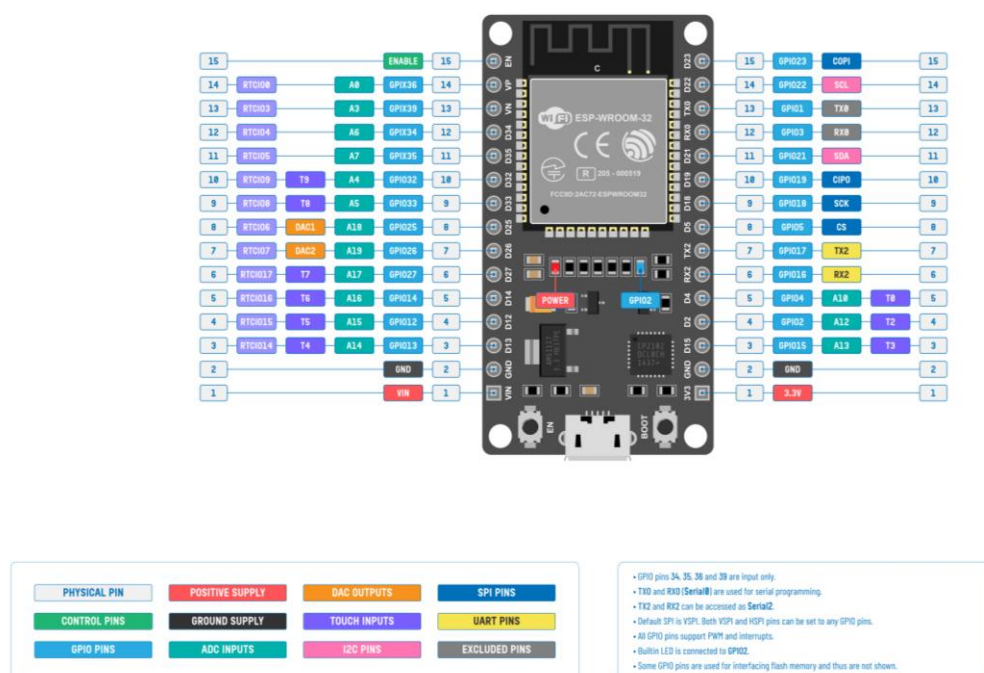


Gambar 2.3 ESP32 DOIT Devkit V1 30 Pin

Berdasarkan Gambar 2.3 dapat dilihat bahwa modul ESP32 DOIT DevKit V1 30 pin memiliki susunan 15 pin pada masing-masing sisi papan, dengan port micro-USB pada salah satu ujungnya yang berfungsi untuk pemrograman maupun catu daya [15]. Modul ini dipilih karena memiliki jumlah pin *input/output* yang memadai untuk mengakomodasi seluruh komponen yang digunakan pada

penelitian ini, serta kompatibel dengan *framework* Arduino sehingga proses pemrograman dapat dilakukan menggunakan bahasa C/C++. Protokol I2C pada modul ini juga mendukung penggunaan lebih dari satu jalur bus secara bersamaan, sehingga beberapa perangkat I2C dengan alamat yang sama dapat dioperasikan pada jalur bus yang berbeda tanpa terjadi konflik komunikasi.

Diagram pinout ESP32 DOIT DevKit V1 30 pin yang menunjukkan fungsi dari setiap pin ditampilkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pinout ESP32 DOIT DevKit V1 30 Pin

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.4 setiap pin pada modul ESP32 DOIT DevKit V1 30 pin memiliki fungsi yang dapat dikonfigurasi sesuai kebutuhan, baik sebagai pin digital, pin analog, maupun pin komunikasi serial [15]. Penjelasan lebih lanjut mengenai spesifikasi teknis ESP32 disajikan pada Tabel 2-3.

Tabel 2-3 Spesifikasi ESP32

No	Parameter	Spesifikasi
1	Mikrokontroler	ESP32 Dual-Core Xtensa LX6
2	Arsitektur	32-bit
3	Frekuensi CPU	Hingga 240 MHz
4	Tegangan Operasi	3,3 V
5	SRAM	520 KB
6	Resolusi ADC	12-bit
7	Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n
8	Bluetooth	Bluetooth Classic dan BLE
9	Antarmuka Komunikasi	UART, SPI, I2C, PWM
10	Bahasa Pemrograman	C/C++

ESP32 memiliki kemampuan pemrosesan dan komunikasi yang mendukung penerapannya pada sistem kendali dan IoT. Prosesor 32-bit, GPIO, antarmuka I²C, SPI, UART, PWM, serta konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth memungkinkan ESP32 digunakan untuk pembacaan sensor, pengolahan data, dan pengendalian perangkat [15].

2.2.6 HLKPM-01

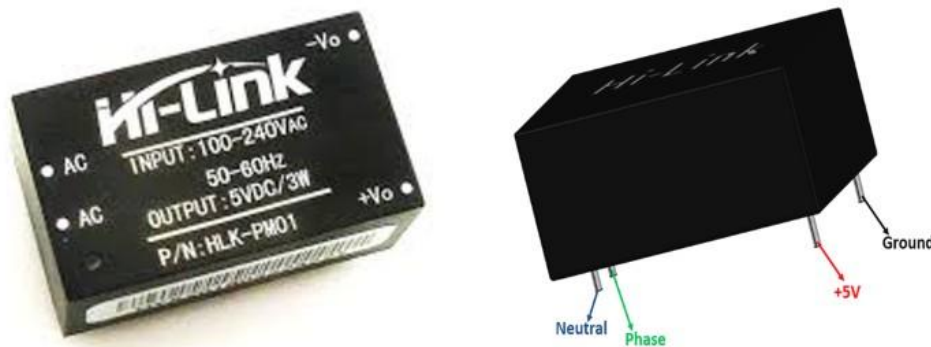
Sistem berbasis mikrokontroler memerlukan sumber tegangan searah (DC) yang stabil untuk dapat beroperasi dengan baik. Namun, sumber listrik yang tersedia secara umum di Indonesia berupa tegangan bolak-balik (AC) sebesar 220 V dengan frekuensi 50 Hz. Oleh karena itu, diperlukan suatu rangkaian konversi daya yang mampu mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC sesuai dengan kebutuhan perangkat elektronik yang digunakan. Proses konversi ini dikenal sebagai konversi AC-DC dan umumnya dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu penyearahan (*rectifying*), penyaringan (*filtering*), dan regulasi tegangan (*regulating*) [16].

Secara umum, terdapat dua jenis rangkaian konverter AC-DC yang banyak digunakan, yaitu konverter linear dan konverter *switching*. Konverter linear

bekerja dengan menurunkan tegangan AC melalui transformator frekuensi rendah (50/60 Hz) kemudian disearahkan dan distabilkan menggunakan regulator tegangan. Konverter jenis ini menghasilkan keluaran yang bersih dari gangguan (*noise*), namun memiliki ukuran fisik yang besar dan efisiensi yang relatif rendah karena sebagian energi terbuang dalam bentuk panas. Sebaliknya, konverter *switching* bekerja dengan terlebih dahulu menyearahkan tegangan AC secara langsung, kemudian mengkonversinya menjadi tegangan DC melalui proses *switching* berfrekuensi tinggi (puluhan hingga ratusan kilohertz). Frekuensi kerja yang tinggi tersebut memungkinkan penggunaan transformator berukuran jauh lebih kecil, sehingga modul konverter *switching* dapat dibuat dalam dimensi yang sangat kompak dengan efisiensi konversi yang lebih tinggi.

Pada penerapan sistem *Internet of Things* (IoT) yang terhubung langsung dengan jaringan listrik PLN, faktor keamanan menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan modul catu daya. Isolasi galvanik antara sisi AC dan sisi DC diperlukan untuk mencegah tegangan tinggi dari jaringan listrik merambat ke rangkaian mikrokontroler maupun sensor. Tanpa adanya isolasi, gangguan pada jaringan listrik berpotensi merusak komponen elektronik bertegangan rendah yang terhubung dalam sistem.

Pada penelitian ini, modul HLK-PM01 digunakan sebagai catu daya utama untuk menyuplai tegangan DC pada seluruh rangkaian kendali. Modul ini termasuk dalam kategori konverter *switching* terisolasi yang mengubah tegangan masukan AC pada rentang 100 hingga 240V menjadi tegangan keluaran DC sebesar 5V dengan daya maksimum 3W. Tampilan fisik modul HLK-PM01 ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Modul Catu Daya HLK-PM01

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.5, modul HLK-PM01 memiliki ukuran yang kompak sehingga dapat dipasang langsung pada papan rangkaian tanpa memerlukan ruang yang besar. Modul ini memiliki empat terminal, yaitu dua terminal pada sisi masukan untuk jalur AC (*line* dan *neutral*) serta dua terminal pada sisi keluaran untuk jalur DC positif dan negatif. Isolasi antara sisi AC dan sisi DC telah tersedia di dalam modul, sehingga keamanan rangkaian mikrokontroler terhadap tegangan tinggi dari jaringan listrik PLN dapat terjaga [16]. Spesifikasi teknis modul HLK-PM01 disajikan pada Tabel 2-4.

Tabel 2-4 Spesifikasi Modul Catu Daya HLK-PM01

No	Parameter	Spesifikasi
1	Tipe	HLK-PM01
2	Jenis Konverter	AC-DC Switching Terisolasi
3	Tegangan Masukan	100-240 V AC
4	Frekuensi Masukan	50-60 Hz
5	Tegangan Keluaran	5V DC
6	Daya Keluaran	3W
7	Arus Keluaran Maksimum	600 mA
8	Efisiensi	> 70%
9	Isolasi	Tersedia (AC-DC terisolasi)

Modul catu daya ini dipilih karena mampu mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC 5 V tanpa memerlukan adaptor eksternal. Dengan kapasitas

keluaran hingga 600 mA, modul dapat digunakan untuk menyuplai rangkaian kontrol dan komponen elektronik dalam sistem.

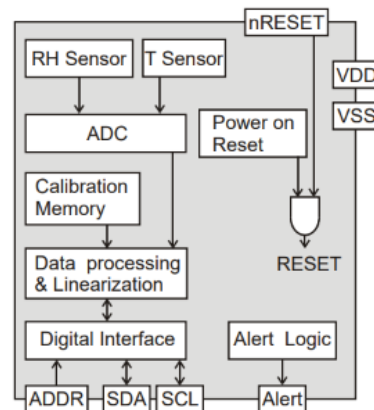
2.2.7 Sensor Suhu dan Kelembapan SHT30

Sensor SHT30 merupakan sensor digital yang dikembangkan oleh Sensirion untuk mengukur suhu dan kelembapan relatif (Relative Humidity/RH) secara bersamaan. Sensor ini termasuk dalam keluarga SHT3x dan menggunakan antarmuka komunikasi Inter-Integrated Circuit (I²C) untuk mengirimkan data hasil pengukuran ke mikrokontroler. Komunikasi I²C menggunakan dua jalur utama, yaitu Serial Data (SDA) sebagai jalur pertukaran data dan Serial *Clock* (SCL) sebagai jalur sinyal *clock* [17]. Bentuk sensor SHT30 yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Sensor SHT30

Prinsip pengukuran SHT30 dilakukan menggunakan elemen penginderaan suhu dan kelembapan yang terintegrasi dalam satu chip. Data dari elemen penginderaan tersebut diproses melalui ADC dan rangkaian pemrosesan internal. Sensor juga dilengkapi dengan memori kalibrasi untuk mendukung pengolahan hasil pengukuran sebelum data dikirimkan ke mikrokontroler melalui antarmuka I²C [17]. Diagram blok internal sensor SHT30 ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Functional Block Diagram Sensor SHT30

SHT30 memiliki rentang pengukuran suhu -40°C hingga 125°C dan kelembapan relatif $0-100\%$ RH. Akurasi suhu tipikal sebesar $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ pada rentang $0-65^{\circ}\text{C}$, sedangkan akurasi kelembapan relatif tipikal sebesar $\pm 2\%$ RH. Sensor memiliki resolusi sebesar $0,01^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $0,01\%$ RH untuk kelembapan [17]. Spesifikasi utama sensor SHT30 ditunjukkan pada Tabel 2-5.

Tabel 2-5 Spesifikasi Sensor SHT30

No	Parameter	Spesifikasi
1	Tegangan Operasi	2,15–5,5 V
2	Rentang Suhu	-40°C hingga 125°C
3	Akurasi Suhu	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
4	Rentang Kelembapan	$0-100\%$ RH
5	Akurasi RH	$\pm 2\%$ RH
6	Resolusi suhu	$0,01^{\circ}\text{C}$
7	Resolusi RH	$0,01\%$ RH
8	Antarmuka Komunikasi	I ² C
9	Alamat I ² C	0x44 atau 0x45

Selain parameter pengukuran, modul SHT30 memiliki empat pin utama yang digunakan untuk catu daya dan komunikasi. Pin VIN digunakan sebagai masukan tegangan catu daya sensor, sedangkan GND digunakan sebagai referensi ground. Pin SDA dan SCL digunakan sebagai jalur komunikasi I²C, dengan SDA

berfungsi sebagai jalur data dan SCL sebagai jalur *clock* [17]. Fungsi masing-masing pin ditunjukkan pada Tabel 2-6.

Tabel 2-6 Konfigurasi Pin Sensor SHT30

No	Pin	Fungsi
1	VIN	Masukan tegangan catu daya
2	GND	Referensi ground
3	SDA	Jalur data komunikasi I ² C
4	SCL	Jalur <i>clock</i> komunikasi I ² C

2.2.8 Solid State Relay

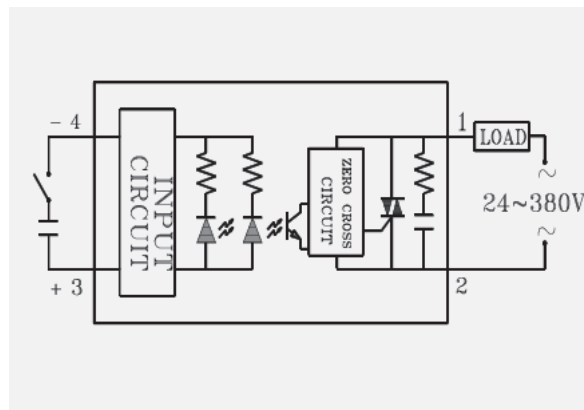
Solid State Relay (SSR) merupakan perangkat elektronika yang berfungsi sebagai saklar untuk mengendalikan beban listrik secara elektronik tanpa menggunakan kontak mekanis. SSR terdiri atas sisi masukan sebagai bagian pengendali dan sisi keluaran sebagai bagian yang terhubung dengan beban. Pemisahan kedua sisi tersebut memungkinkan sinyal kendali bertegangan rendah digunakan untuk mengendalikan beban dengan tegangan yang lebih tinggi. Salah satu karakteristik SSR adalah proses penyaklarannya tidak menggunakan kontak mekanis sehingga tidak terjadi keausan akibat perpindahan kontak selama proses operasi [18].

Bentuk fisik SSR-25DAH ditunjukkan pada Gambar 2.8. Tipe tersebut termasuk dalam seri *single phase solid state module* dengan masukan DC dan keluaran AC. Penamaan tipe pada seri SSR FOTEK menunjukkan karakteristik utama modul, yaitu angka 25 menunjukkan kapasitas arus keluaran sebesar 25 A, huruf D menunjukkan jenis masukan DC, huruf A menunjukkan keluaran AC, sedangkan akhiran H menunjukkan tipe tegangan keluaran tinggi (*high voltage type*) [18].



Gambar 2.8 Solid state relay (SSR)

SSR-25DAH menggunakan metode pengendalian *zero-cross*. Pada metode ini, keluaran SSR dinyalakan atau dimatikan ketika gelombang sinus tegangan AC berada pada titik nol (*zero point*). Proses penyaklaran pada titik tersebut dapat mengurangi gangguan elektromagnetik berupa *Electromagnetic Interference* (EMI) dan *Radio Frequency Interference* (RFI). Metode *zero-cross* juga dinyatakan sesuai untuk mengendalikan beban resistif, kapasitif, dan beban induktif yang tidak mengalami saturasi [18].



Gambar 2.9 Prinsip Zero-cross Trigger pada Solid State Relay

Karakteristik SSR-25DAH dapat dilihat dari parameter sisi input dan sisi *output*. Sisi input memiliki tegangan kerja 4–32 VDC, dengan tegangan *turn-off* kurang dari 3,5 VDC dan arus pemicu maksimum 12 mA. Sementara itu, SSR-25DAH tipe *high voltage* memiliki tegangan keluaran 90–480 VAC dengan arus

beban maksimum 25 A. Modul ini memiliki metode kontrol *zero-cross* dan waktu respons sebesar 8,3 ms pada frekuensi 60 Hz [18].

Karakteristik utama SSR yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2-7.

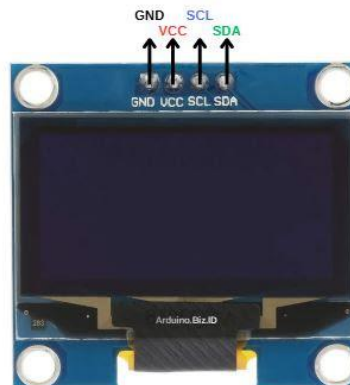
Tabel 2-7 Karakteristik SSR-25DAH

No	Parameter	Spesifikasi
1	Model	SSR-25DAH
	Jenis	<i>Single phase DC to AC solid state module</i>
2	Tegangan input	4–32 VDC
3	Tegangan <i>output</i>	90–480 VAC
4	Arus beban maksimum	25 A
5	Waktu respons	8,3 ms (60 Hz)
6	Kekuatan isolasi	100 M Ω / 500 VDC
7	Metode kontrol	<i>Zero-cross</i>

Selain karakteristik elektrik, FOTEK mencantumkan beberapa karakteristik perlindungan pada seri SSR, seperti kekuatan dielektrik lebih dari 4 kV, kekuatan isolasi lebih dari 100 M Ω pada 500 VDC, rangkaian perlindungan terhadap panas berlebih pada sekitar 120°C, serta kemampuan menahan arus dan tegangan transien [18].

Dalam penggunaannya, kapasitas arus yang tercantum pada SSR mengacu pada beban resistif. FOTEK juga memberikan catatan bahwa penggunaan pada jenis beban lain perlu mempertimbangkan arus masuk (*inrush current*) dan tegangan transien (*surge voltage*) ketika beban dinyalakan atau dimatikan. Oleh karena itu, pemilihan SSR tidak hanya didasarkan pada nilai arus nominal, tetapi juga mempertimbangkan karakteristik beban yang dikendalikan [18].

2.2.9 Display OLED SH1106



Gambar 2.10 Modul OLED 1,3 Inci Berbasis SH1106

Organic Light Emitting Diode (OLED) merupakan teknologi tampilan yang menggunakan material organik sebagai elemen pemancar cahaya. OLED dapat digunakan sebagai media untuk menampilkan informasi secara visual pada sistem elektronika. Modul OLED yang digunakan memiliki ukuran 1,3 inci dan menggunakan IC SH1106 sebagai *driver* dan *controller* tampilan. Bentuk fisik modul OLED yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.10.

SH1106 merupakan IC *OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller* yang dirancang untuk mengendalikan tampilan berbasis OLED. IC ini memiliki 132 *segment* dan 64 *common*, sehingga mampu mendukung panel dengan resolusi maksimum 132×64 dot. SH1106 juga dilengkapi Display Data RAM berukuran 132×64 bit yang digunakan untuk menyimpan data tampilan [19].

Struktur internal SH1106 terdiri atas beberapa blok yang mendukung proses pengolahan dan pengendalian tampilan. Blok tersebut meliputi I/O buffer, *command decoder*, Display Data RAM, *page address register*, *column address decoder*, *display timing generator*, *segment driver*, *common driver*, *oscillator*, dan *charge pump* [19].

SH1106 menyediakan beberapa pilihan antarmuka komunikasi untuk terhubung dengan mikrokontroler, yaitu 8-bit 6800-series parallel interface, 8-bit 8080-series parallel interface, 3-wire serial interface, 4-wire serial interface, dan I²C. Pada antarmuka I²C, komunikasi dilakukan melalui dua jalur utama, yaitu

SCL sebagai jalur *clock* dan SDA sebagai jalur data. Antarmuka I²C pada SH1106 dapat beroperasi dengan kecepatan hingga 400 kHz [19].

Pada mode I²C, pin D0 digunakan sebagai SCL, sedangkan pin D1 digunakan sebagai SDA. Pin D2 hingga D7 berada dalam kondisi high impedance. Konfigurasi tersebut memungkinkan komunikasi antara mikrokontroler dan SH1106 dilakukan melalui dua jalur komunikasi serial tersebut [19].

Data yang diterima oleh SH1106 dibedakan menjadi data tampilan dan data perintah. Data tampilan digunakan untuk menentukan pola yang akan ditampilkan pada OLED, sedangkan data perintah digunakan untuk mengatur fungsi internal driver. Data tampilan disimpan pada Display Data RAM sebelum digunakan oleh *segment driver* dan *common driver* untuk mengendalikan elemen tampilan [19].

SH1106 memiliki beberapa fungsi pengaturan tampilan, antara lain pengaturan kontras hingga 256 tingkat, pengaturan multiplex ratio, row and column remapping, vertical scrolling, dan on-chip *oscillator*. IC ini memiliki tegangan logika VDD1 sebesar 1,65–3,5 V serta rentang suhu operasi –40°C hingga +85°C [19]

Karakteristik utama SH1106 yang berkaitan dengan kemampuan tampilan dan komunikasi ditunjukkan pada Tabel 2-8.

Tabel 2- 8 Spesifikasi OLED SH1106

No.	Parameter	Spesifikasi
1	Jenis IC	OLED/PLED Segment/ <i>Common driver</i> with Controller
2	Resolusi maksimum	132 × 64 dot
3	Display Data RAM	132 × 64 bit
4	Antarmuka komunikasi	6800, 8080, 3-wire SPI, 4-wire SPI, I ² C
5	Kecepatan I ² C	Maks. 400 kHz
6	Tegangan logika VDD1	1,65–3,5 V
7	Tegangan VDD2	3,0–4,2 V
8	Pengaturan kontras	256 tingkat

No.	Parameter	Spesifikasi
9	Suhu operasi	-40°C hingga +85°C

2.2.10 Joystick KY-023

Joystick KY-023 merupakan modul masukan yang digunakan untuk membaca posisi gerakan pada dua sumbu, yaitu sumbu X dan Y. Modul ini menghasilkan sinyal analog melalui pin VRx dan VRy yang menunjukkan posisi masing-masing sumbu. Selain kedua keluaran analog tersebut, joystick dilengkapi tombol tekan yang menghasilkan perubahan kondisi logika pada pin SW ketika tuas ditekan [20].

Bentuk fisik dan susunan terminal joystick KY-023 ditunjukkan pada Gambar 2.11



Gambar 2.11 Joystick KY-023

Pergerakan tuas pada sumbu X dan Y menghasilkan perubahan tegangan analog pada pin VRx dan VRy. Nilai keluaran tersebut dapat dibaca oleh masukan analog mikrokontroler untuk mengetahui arah dan posisi pergerakan joystick. Dengan demikian, dua keluaran analog pada modul dapat digunakan untuk merepresentasikan pergerakan horizontal dan vertikal [20].

Selain keluaran analog, KY-023 memiliki fungsi tombol tekan yang diaktifkan dengan menekan tuas joystick. Berdasarkan manual Joy-IT, kondisi pada pin SW berubah dari LOW menjadi HIGH ketika tombol ditekan. Keluaran tersebut dapat dibaca sebagai sinyal digital sehingga joystick tidak hanya

memberikan informasi posisi, tetapi juga dapat memberikan masukan berupa perintah tekan [20].

Modul KY-023 memiliki beberapa terminal utama yang terdiri atas GND, +5V, VRx, VRy, dan SW. GND digunakan sebagai referensi ground, sedangkan +5V merupakan terminal catu daya pada contoh penggunaan yang diberikan oleh Joy-IT. Pin VRx dan VRy masing-masing menghasilkan sinyal analog dari sumbu X dan Y, sedangkan SW merupakan keluaran digital dari tombol tekan [20].

Tabel 2-9 Konfigurasi Pin Joystick KY-023

No.	Pin	Fungsi
1	GND	Ground
2	+5V	Catu daya
3	VRx	Keluaran analog sumbu X
4	VRy	Keluaran analog sumbu Y
5	SW	Keluaran digital tombol tekan

Karakteristik keluaran joystick KY-023 memungkinkan pergerakan pada dua sumbu dibaca sebagai perubahan tegangan analog. Berdasarkan spesifikasi produk Joy-IT, rentang tegangan keluarannya adalah 0–5 V, sedangkan tegangan operasi modul yang dicantumkan produsen adalah 3,3 V. Modul memiliki dimensi $34 \times 39 \times 26$ mm [20].

Karakteristik utama joystick KY-023 ditunjukkan pada Tabel 2-10.

Tabel 2-10 Spesifikasi Joystick

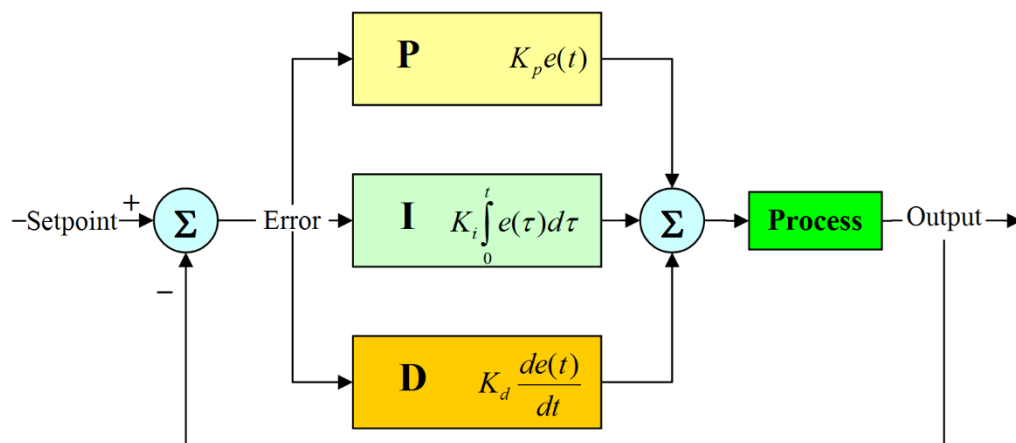
No.	Parameter	Spesifikasi
1	Model	COM-KY023JM
2	Fungsi	Pembacaan posisi sumbu X dan Y
3	Keluaran sumbu X	Analog
4	Keluaran sumbu Y	Analog
5	Tombol tekan	Digital
6	Rentang tegangan keluaran	0–5 V
7	Tegangan operasi	3,3 V

8	Dimensi	$34 \times 39 \times 26 \text{ mm}$
9	Berat	12 g

2.2.11 Sistem Kendali PID

Sistem kendali merupakan sistem yang digunakan untuk mengatur suatu proses agar keluarannya dapat mengikuti nilai yang diinginkan. Pada sistem kendali temperatur, nilai temperatur yang ingin dicapai ditentukan sebagai *setpoint*, sedangkan temperatur aktual diperoleh melalui pengukuran sensor. Kedua nilai tersebut dibandingkan untuk memperoleh selisih atau *error*. Nilai *error* kemudian digunakan sebagai dasar untuk menentukan besarnya sinyal pengendalian sehingga keluaran sistem dapat diarahkan menuju *setpoint* [8]

Sistem kendali PID bekerja menggunakan prinsip umpan balik (*feedback*). Nilai keluaran dari suatu proses diukur dan dikembalikan ke bagian pembanding untuk dibandingkan dengan *setpoint*. Hasil perbandingan tersebut menghasilkan *error* yang menjadi masukan bagi pengendali PID. Sinyal keluaran pengendali kemudian diberikan kepada proses, sedangkan hasil proses kembali diukur sebagai umpan balik. Hubungan antara *setpoint*, pengendali PID, proses, dan umpan balik ditunjukkan pada Gambar 2.12 [8].



Gambar 2.12 Diagram Blok Sistem Kendali PID

Berdasarkan Gambar 2.12, nilai *setpoint* dibandingkan dengan keluaran sistem pada titik pembanding sehingga diperoleh nilai *error*. Nilai tersebut kemudian diproses melalui tiga bagian pengendalian, yaitu kontrol Proporsional

(P), kontrol Integral (I), dan kontrol Derivatif (D). Keluaran dari ketiga kontrol tersebut dijumlahkan untuk menghasilkan sinyal kendali yang diberikan kepada *process*. Keluaran *process* selanjutnya digunakan sebagai umpan balik untuk proses pengendalian berikutnya [8].

Nilai *error* pada sistem kendali dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

Dengan:

$$e(t) = \text{error}$$

$$r(t) = \text{setpoint}$$

$$y(t) = \text{nilai keluaran aktual}$$

Nilai *error* menunjukkan besarnya penyimpangan keluaran sistem terhadap nilai yang diinginkan. Apabila keluaran belum mencapai *setpoint*, kontroler akan menghasilkan sinyal kendali berdasarkan nilai *error* tersebut.

1. Kontrol Proporsional (P)

Kontrol proporsional menghasilkan sinyal kendali yang besarnya sebanding dengan nilai *error* yang terjadi. Besarnya pengaruh kontrol proporsional ditentukan oleh konstanta K_p . Semakin besar nilai *error*, semakin besar pula kontribusi kontrol proporsional terhadap sinyal kendali. Hubungan kontrol proporsional dapat dinyatakan sebagai:

$$u_p(t) = K_p e(t)$$

Dengan $u_p(t)$ merupakan keluaran kontrol proporsional dan K_p merupakan konstanta penguatan proporsional [8].

2. Kontrol Integral (I)

Kontrol integral bekerja berdasarkan akumulasi *error* terhadap waktu. Berbeda dengan kontrol proporsional yang hanya merespons nilai *error* saat ini, kontrol integral mempertimbangkan kesalahan yang berlangsung selama proses. Hubungan kontrol integral dapat dinyatakan dengan:

$$u_i(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

dengan $u_i(t)$ merupakan keluaran kontrol integral dan K_i merupakan konstanta penguatan integral. Komponen integral digunakan untuk membantu

mengurangi kesalahan yang masih tersisa ketika keluaran sistem belum mencapai *setpoint* [8]

3. Kontrol Derivatif (D)

Kontrol derivatif bekerja berdasarkan perubahan *error* terhadap waktu. Komponen ini mempertimbangkan seberapa cepat nilai *error* berubah sehingga dapat memberikan respons terhadap kecenderungan perubahan keluaran sistem. Kontrol derivatif dapat dinyatakan dengan:

$$u_D(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

dengan $u_D(t)$ merupakan keluaran kontrol derivatif dan K_d merupakan konstanta penguatan derivatif. Besarnya kontribusi kontrol derivatif ditentukan oleh perubahan *error* yang terjadi terhadap waktu.

4. Pengendali Proportional–Integral–Derivative (PID)

Kontrol proporsional, integral, dan derivatif dapat digabungkan menjadi satu pengendali PID. Ketiga kontrol tersebut menghasilkan keluaran masing-masing berdasarkan karakteristik *error*, kemudian seluruh keluaran dijumlahkan untuk menghasilkan sinyal kendali. Dengan demikian, pengendali PID mempertimbangkan nilai *error* saat ini, akumulasi *error*, serta perubahan *error* terhadap waktu.

Persamaan umum pengendali PID dapat dituliskan sebagai:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

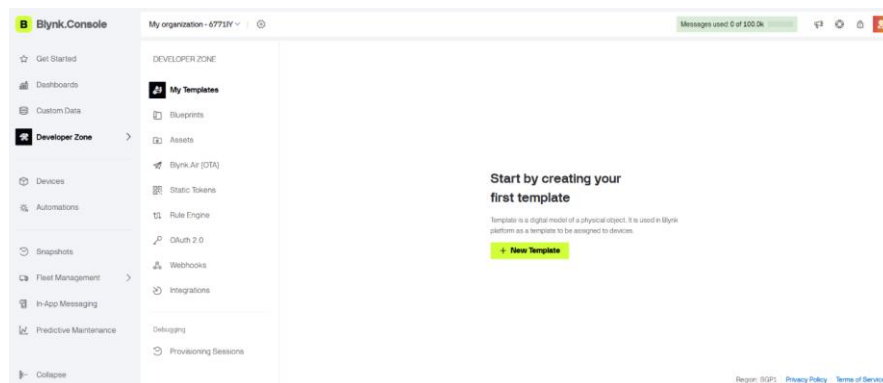
dengan $u(t)$ merupakan sinyal keluaran pengendali, $e(t)$ merupakan *error*, sedangkan K_p , K_i , dan K_d masing-masing merupakan konstanta penguatan proporsional, integral, dan derivatif.

Pada sistem pengendalian temperatur, proses pengendalian dilakukan dengan menjadikan temperatur sebagai variabel yang diukur. Sensor memberikan nilai temperatur aktual sebagai umpan balik, kemudian nilai tersebut dibandingkan dengan *setpoint* untuk memperoleh *error*. Pengendali PID selanjutnya menentukan sinyal kendali berdasarkan nilai *error* tersebut. Sinyal

kendali digunakan untuk mengatur proses pemanasan sehingga temperatur dapat diarahkan dan dipertahankan mendekati nilai *setpoint*.

Karakteristik respons sistem dipengaruhi oleh nilai K_p , K_i , dan K_d . Nilai K_p menentukan pengaruh *error* terhadap respons kontrol proporsional, K_i menentukan pengaruh akumulasi *error*, sedangkan K_d menentukan pengaruh perubahan *error* terhadap keluaran pengendali. Oleh karena itu, ketiga parameter tersebut perlu disesuaikan dengan karakteristik proses yang dikendalikan agar sistem dapat menghasilkan respons temperatur yang sesuai.

2.2.12 Platform Blynk



Gambar 2.13 Tampilan Blynk

Blynk merupakan platform *Internet of Things* (IoT) yang digunakan untuk menghubungkan perangkat dengan aplikasi melalui jaringan internet. Platform ini dapat digunakan untuk menerima, menampilkan, dan memantau data yang dikirimkan oleh perangkat berbasis mikrokontroler. Blynk menyediakan antarmuka yang memungkinkan informasi dari perangkat ditampilkan kepada pengguna dalam bentuk yang lebih mudah dipahami. Penggunaan Blynk sebagai media *monitoring* juga telah diterapkan pada sistem pengering biji kopi berbasis mikrokontroler dan IoT [7].

Komunikasi pada Blynk melibatkan perangkat mikrokontroler, jaringan Wi-Fi, dan aplikasi Blynk. Data dari sensor terlebih dahulu dibaca dan diproses oleh mikrokontroler. Data tersebut kemudian dikirim melalui jaringan Wi-Fi menuju platform Blynk dan diteruskan ke aplikasi untuk ditampilkan kepada

pengguna. Dengan mekanisme tersebut, data kondisi perangkat dapat dipantau tanpa harus melakukan pengamatan secara langsung pada perangkat [7].

Blynk menyediakan berbagai komponen antarmuka (*widget*) yang dapat digunakan untuk menampilkan informasi dari perangkat. Data sensor dapat ditampilkan dalam bentuk nilai maupun grafik sesuai dengan kebutuhan pemantauan. Penggunaan tampilan tersebut membantu pengguna mengamati perubahan parameter yang dikirimkan oleh mikrokontroler selama proses berlangsung. Pada sistem pengering biji kopi berbasis IoT, Blynk digunakan untuk menampilkan parameter seperti suhu dan kelembapan sehingga kondisi proses pengeringan dapat dipantau secara real-time [7].

Parameter utama yang berkaitan dengan Blynk sebagai platform *monitoring* ditunjukkan pada Tabel 2-11.

Tabel 2-11 Karakteristik Platform Blynk

No.	Parameter	Keterangan
1	Platform	Blynk IoT
2	Fungsi	<i>Monitoring</i> perangkat berbasis IoT
3	Koneksi perangkat	Wi-Fi/Internet
4	Mikrokontroler	ESP32 dan perangkat IoT yang kompatibel
5	Antarmuka pengguna	Aplikasi Blynk
6	Data <i>monitoring</i>	Suhu, kelembapan, dan parameter sistem
7	Penyajian data	Nilai numerik dan grafik
8	Pemantauan	<i>Real-time</i> melalui jaringan

2.2.13 Arduino IDE

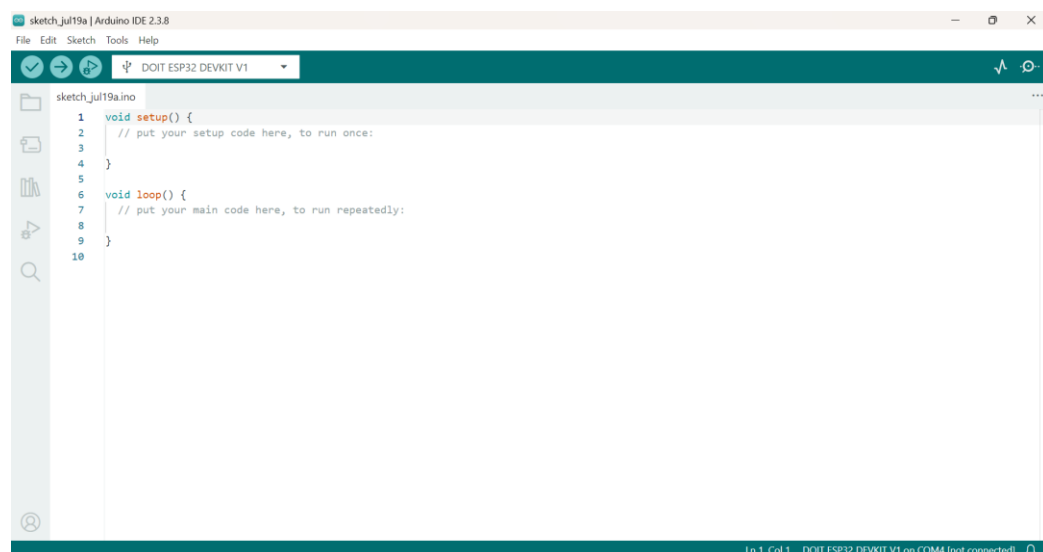
Arduino IDE (Integrated Development Environment) merupakan perangkat lunak yang digunakan sebagai media pengembangan program pada berbagai jenis papan mikrokontroler, termasuk Arduino dan ESP32. Melalui Arduino IDE, proses penulisan kode program, kompilasi, serta pengunggahan (*upload*) program ke dalam memori mikrokontroler dapat dilakukan dalam satu lingkungan pengembangan. Perangkat lunak ini dikembangkan dengan antarmuka yang sederhana sehingga mudah digunakan dalam proses pengembangan sistem

tertanam (*embedded system*). Bahasa pemrograman yang digunakan mengacu pada bahasa C/C++ dengan penyederhanaan sintaks sehingga lebih mudah dipahami dan diimplementasikan.

Antarmuka Arduino IDE terdiri atas beberapa bagian utama, yaitu *Menu Bar*, *Toolbar*, *Sketch editor*, *Output window*, dan *Serial Monitor*. *Menu Bar* digunakan untuk mengakses berbagai fungsi pengelolaan proyek, konfigurasi, serta pengaturan perangkat lunak. *Toolbar* menyediakan tombol pintas seperti Verify, Upload, New Sketch, Open, Save, dan *Serial Monitor*. *Sketch editor* digunakan sebagai area penulisan program, sedangkan *Output window* berfungsi menampilkan informasi proses kompilasi maupun kesalahan (*error*) yang terjadi selama program dijalankan. Selain itu, *Serial Monitor* digunakan untuk menampilkan data komunikasi serial yang dikirimkan oleh mikrokontroler sehingga proses pengujian dan debugging dapat dilakukan dengan lebih mudah. Adapun langkah-langkah penggunaan Arduino IDE adalah sebagai berikut.

1. Membuka halaman utama Arduino IDE

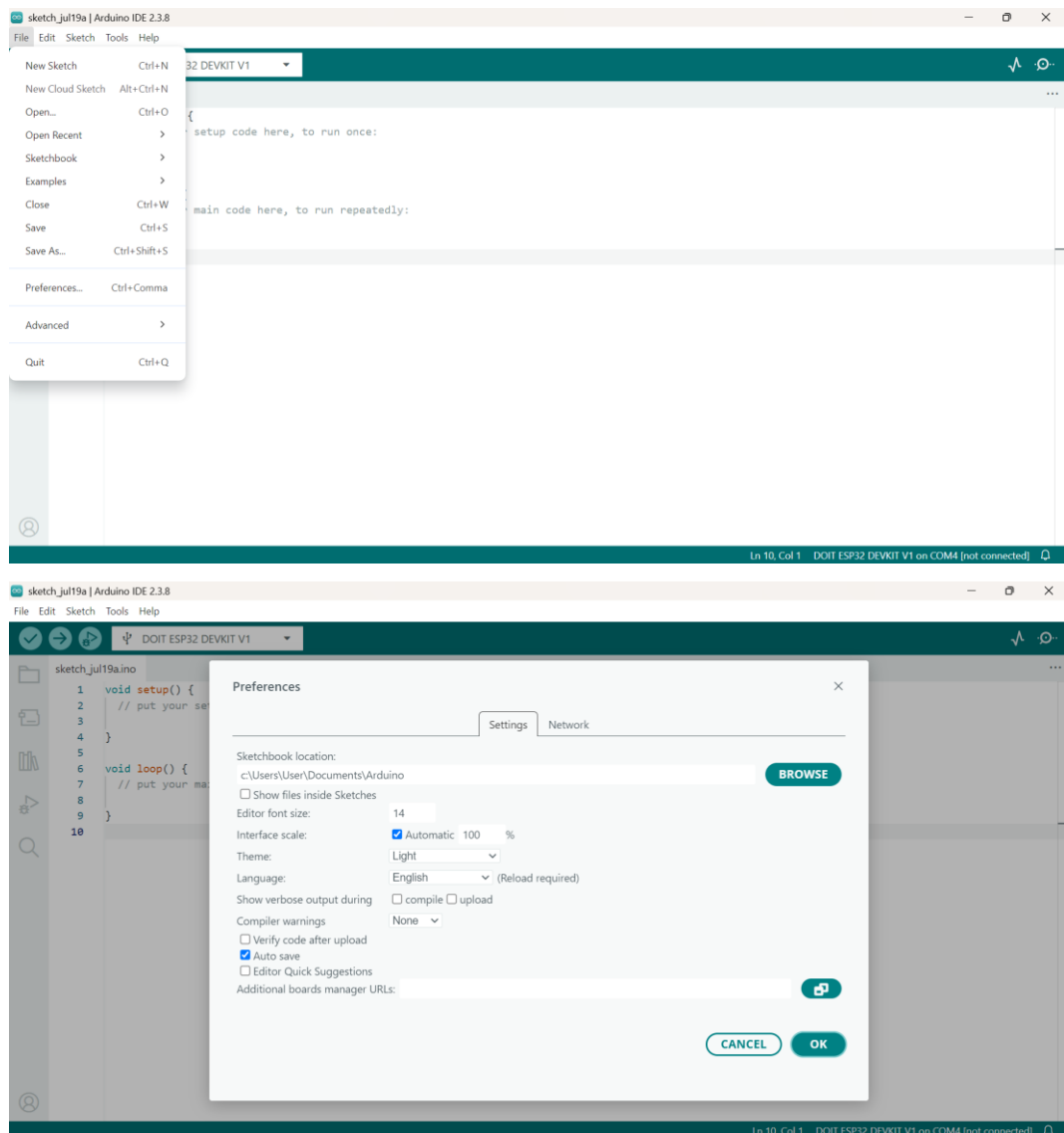
Langkah pertama dilakukan dengan membuka aplikasi Arduino IDE yang telah terpasang pada komputer. Setelah aplikasi dijalankan, akan ditampilkan halaman utama Arduino IDE yang terdiri atas *Menu Bar*, *Toolbar*, *Sketch editor*, *Output*, dan *Serial Monitor* yang digunakan selama proses pemrograman.



Gambar 2.14 Halaman Utama Arduino IDE

2. Mengatur Preferences Arduino IDE

Sebelum proses pemrograman dilakukan, pengaturan awal Arduino IDE dilakukan melalui menu **File** → **Preferences**. Pada penelitian ini fitur **Autosave** diaktifkan dan nilai **Automatic Save** diatur menjadi **100%** agar program dapat tersimpan secara otomatis selama proses penulisan sehingga risiko kehilangan data akibat kesalahan yang tidak diinginkan dapat diminimalkan.

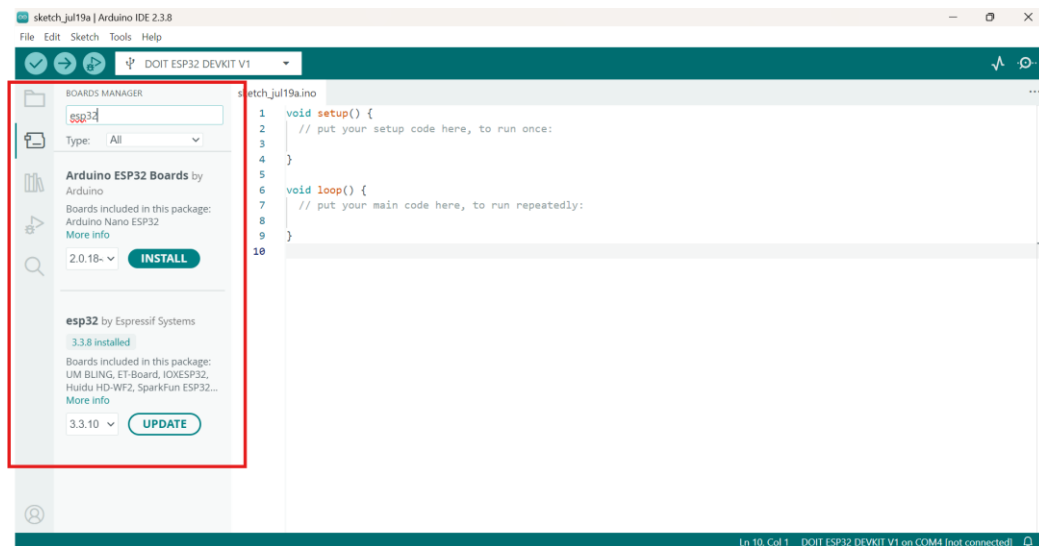


Gambar 2.15 Pemilihan Board ESP32

3. Memilih jenis board ESP32 dan port komunikasi

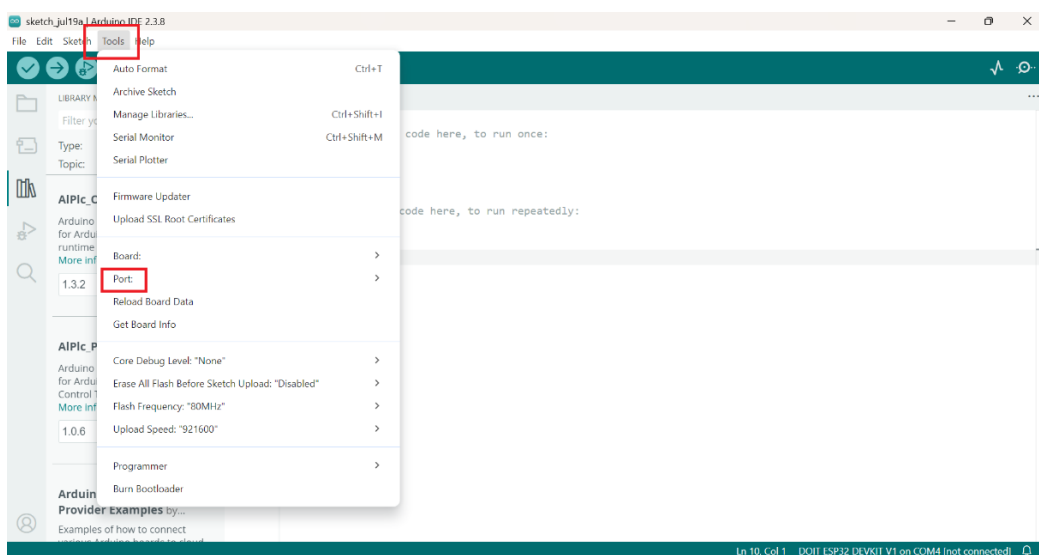
Setelah pengaturan awal selesai dilakukan, jenis papan mikrokontroler dipilih melalui menu **Tools** → **Board** → **ESP32 Arduino** → **DOIT ESP32**

DEVKIT V1. Pemilihan *board* yang sesuai diperlukan agar proses kompilasi dan pengunggahan program dapat dilakukan sesuai dengan spesifikasi perangkat yang digunakan.



Gambar 2.16 Pemilihan *Board* ESP32

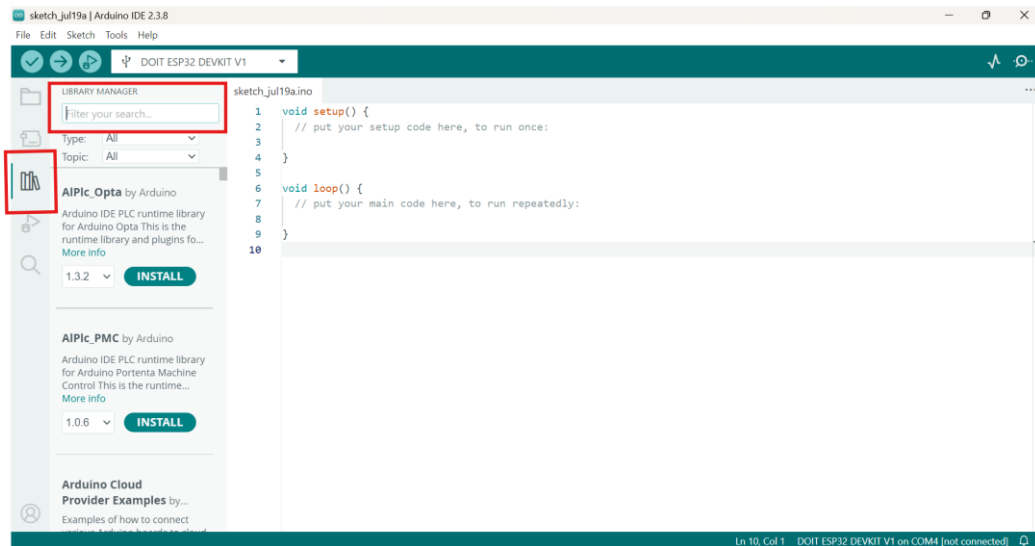
Setelah jenis *board* ditentukan, langkah berikutnya adalah memilih port komunikasi melalui menu **Tools** → **Port**. Port yang dipilih merupakan port serial yang terdeteksi ketika ESP32 dihubungkan ke komputer menggunakan kabel USB. Pemilihan port yang sesuai diperlukan agar Arduino IDE dapat melakukan komunikasi dengan mikrokontroler pada saat proses pengunggahan program.



Gambar 2.17 Pemilihan Port Komunikasi ESP32

4. Menambahkan *library* yang diperlukan

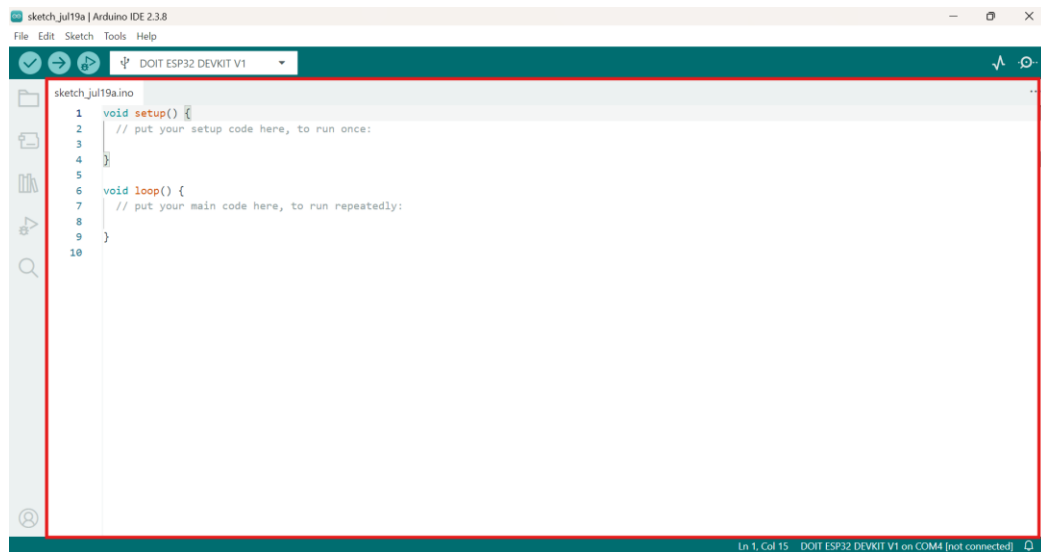
Library yang digunakan dalam penelitian ditambahkan melalui menu **Sketch** → **Include Library** → **Manage Libraries**. *Library* tersebut digunakan untuk mendukung komunikasi ESP32 dengan sensor SHT30, OLED SH1106, Blynk, serta *library* lain yang diperlukan dalam pengembangan sistem.



Gambar 2.18 Penambahan *Library*

5. Menuliskan program pada *Sketch editor*

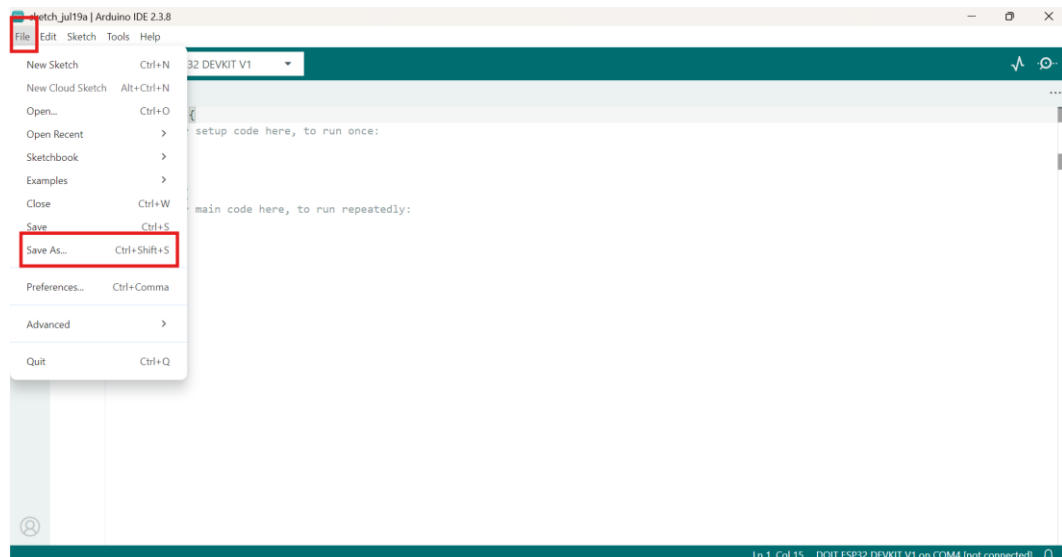
Program kemudian ditulis pada area *Sketch editor* menggunakan bahasa pemrograman C/C++. Program yang dibuat meliputi pembacaan sensor SHT30, penerapan kontrol PID, pengendalian SSR, komunikasi dengan Blynk, penyimpanan data ke Google Spreadsheet, serta penampilan informasi pada OLED.

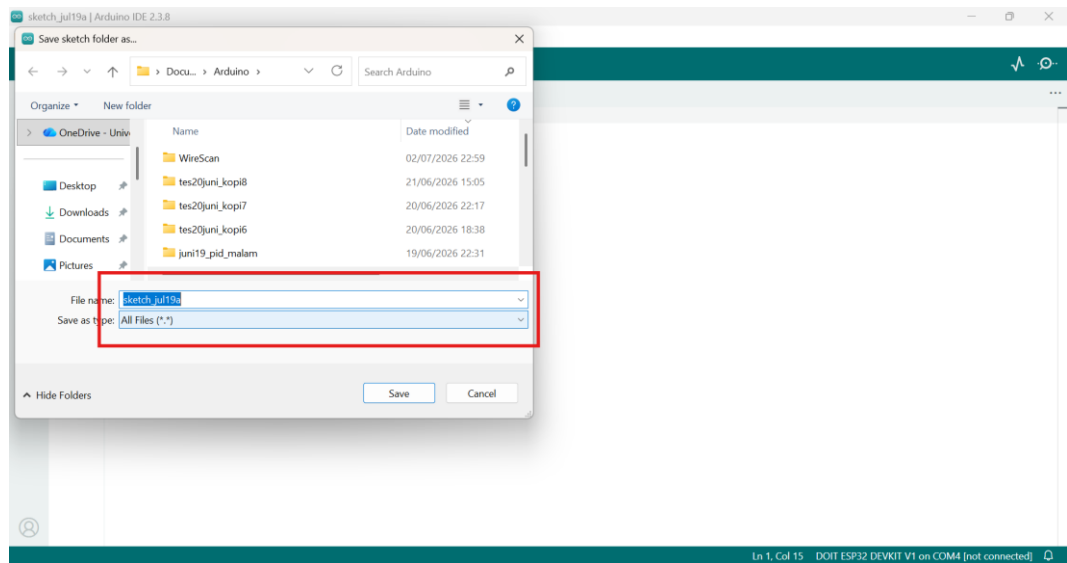


Gambar 2.19 Penulisan Program

6. Menyimpan program

Setelah program selesai ditulis, file disimpan melalui menu **File** → **Save As**. Selanjutnya nama file ditentukan sesuai dengan kebutuhan agar program dapat tersimpan dengan baik dan memudahkan proses pengelolaan maupun pengembangan program pada tahap berikutnya.





Gambar 2.20 Penyimpanan Program