

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

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

- 1) Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Achmad Ridho'i, Kukuh Setyadjit, dan Bayu Era Yordhan pada Jurnal FORTECH dengan judul “Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban Pada Budidaya Jamur Tiram Menggunakan ESP32” dijelaskan bahwa dalam penelitian ini, peneliti merancang alat berbasis ESP32 yang dilengkapi sensor DHT22 untuk memonitor suhu dan kelembaban dalam budidaya jamur tiram. Data diproses oleh ESP32 dan ditampilkan secara *real-time* melalui aplikasi Blynk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga suhu sekitar 28°C dan kelembaban 60 % RH secara otomatis dengan mengaktifkan *exhaust fan* dan pompa air setelah melewati ambang batas tertentu. Kelebihan dari sistem ini telah terbukti efektif dan praktis untuk pengawasan jarak jauh oleh petani. Namun, terdapat beberapa kekurangan yang perlu diperhatikan dalam penelitian ini hanya menggunakan kontrol ON/OFF sederhana, sehingga presisinya terbatas dibanding penggunaan metode kontrol PID. Meskipun demikian, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dan menjadi dasar kuat dalam desain sistem monitoring berbasis ESP32 dan Blynk, serta relevan sebagai pembandingan untuk peningkatan dengan kontrol PID[1].
- 2) Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Tholib Hariono, Zulfikar, dan M. Rizqi Putra Pradana pada Jurnal Cybernetic Inovatif dengan judul “Perancangan Monitoring pH, Kelembaban, dan Suhu pada Tanah Berbasis IoT ESP32” dijelaskan bahwa alat yang dibangun menggunakan ESP32, sensor YL69 untuk kelembaban tanah, dan sensor DHT11 untuk suhu dan kelembaban udara. Data dikirim menggunakan Blynk, dengan pengendalian *exhaust fan* dan pompa air berdasarkan pelampauan *setpoint*. Kelebihan dari sistem ini adalah

kemampuannya menggabungkan pengukuran suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah dalam satu sistem IoT; implementasi aplikasi Blynk juga berhasil memudahkan pengendalian jarak jauh. Namun, terdapat beberapa kekurangan yaitu kontrol masih bersifat ON/OFF, tanpa metode tuning seperti PID, sehingga cenderung menimbulkan *overshoot* atau *undershoot* pada variabel lingkungan. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan untuk memberikan dasar pengembangan sistem multi-parameter yang dapat ditingkatkan presisinya dengan metode PID[2].

- 3) Berdasarkan penelitian oleh Hassan, F.R.H. Ghada M. Medany, S.D. Abou Hussein. budidaya jamur tiram raja (*Pleurotus eryngii*) di Mesir, sebuah negara dengan kondisi iklim panas dan kering, mirip dengan karakteristik lingkungan di kawasan Arab lainnya. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemilihan media tanam serta pengendalian suhu dan kelembapan sangat menentukan hasil panen. Substrat berbasis limbah pertanian lokal seperti serbuk gergaji, jerami kedelai, jerami padi, dan ampas tebu terbukti dapat dimanfaatkan sebagai media tumbuh. Dari berbagai kombinasi, serbuk gergaji dengan suplementasi dedak gandum 25% menghasilkan pertumbuhan miselium paling cepat serta produktivitas tertinggi dengan *biological efficiency* (BE) mencapai 65,22%. Selain itu, penelitian tersebut juga menekankan bahwa inkubasi membutuhkan suhu stabil pada kisaran 25–27 °C, sedangkan fase pembentukan tubuh buah memerlukan kelembapan relatif 85–90% dengan ventilasi yang baik. Kondisi ini menunjukkan bahwa tanpa adanya sistem pengendalian yang memadai, fluktuasi suhu tinggi dan kelembapan rendah pada iklim kering dapat menghambat pertumbuhan miselium, memperpanjang masa inkubasi, dan menurunkan hasil panen.[3]

Berdasarkan hasil kajian pustaka terhadap tiga penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan berbasis mikrokontroler ESP32 dan *platform* IoT seperti Blynk memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengendalian lingkungan pada berbagai aplikasi, termasuk budidaya jamur. Dari tiga penelitian tersebut sepakat bahwa integrasi antara sensor seperti DHT22 dengan ESP32

mampu menyediakan data suhu dan kelembapan secara real-time, yang sangat membantu dalam proses pemantauan dan pengambilan keputusan.

Namun demikian, terdapat beberapa keterbatasan dalam penerapan sistem tersebut. Di antaranya adalah masih banyaknya penelitian yang menggunakan sistem kontrol sederhana berbasis logika ON/OFF, yang kurang presisi dalam menjaga kestabilan suhu dan kelembapan. Selain itu, keandalan sistem sangat bergantung pada kestabilan koneksi Wi-Fi, yang menjadi kendala di lokasi dengan akses internet terbatas. Penggunaan sensor dengan akurasi rendah seperti DHT11 juga menjadi salah satu keterbatasan pada beberapa penelitian.

Secara keseluruhan, seluruh penelitian menunjukkan arah pengembangan sistem monitoring berbasis IoT yang terus mengalami kemajuan yang signifikan, namun optimalisasi sistem melalui penerapan metode kontrol yang lebih presisi seperti PID, peningkatan akurasi sensor, serta pengembangan sistem monitoring *multiplatform* (misalnya *web-based* selain Blynk) sangat direkomendasikan untuk menjawab keterbatasan-keterbatasan yang ada. Hal ini sejalan dengan tujuan penelitian ini dalam membangun sistem yang tidak hanya dapat memantau tetapi juga mengatur suhu dan kelembapan secara presisi pada inkubator jamur tiram berbasis ESP32 dengan kontrol PID.

2.2 Dasar Teori

Pengendalian lingkungan mikro pada proses inkubasi jamur tiram menjadi aspek yang sangat krusial dalam budidaya modern. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa parameter suhu dan kelembapan udara memiliki peran vital dalam menentukan keberhasilan pertumbuhan miselium dan pembentukan tubuh buah jamur[4]. Tingkat kelembapan relatif lingkungan sekitar harus mencapai 80–95 % agar jamur dapat berkembang dengan baik. Tekanan suhu yang tidak sesuai dapat menyebabkan pertumbuhan terlambat atau bahkan kematian miselium. Sebagai contoh, budidaya *Hericium erinaceus* memerlukan suhu stabil pada 25–26 °C dan kelembapan relatif mencapai 85–90 % agar dapat tumbuh optimal. Oleh karena itu, penting untuk merancang sistem yang mampu menjamin kestabilan dua variabel utama tersebut yaitu suhu dan kelembapan.

Seiring berkembangnya teknologi IoT dan mikrokontroler, kemampuan untuk memantau dan mengendalikan lingkungan secara otomatis semakin terbuka. Pada praktik budidaya jamur modern, peran alat otomatis ini tidak hanya terbatas pada pemantauan data. Sistem yang mengintegrasikan sensor dan aktuasi berkemampuan tinggi mampu melakukan fungsi koreksi secara *real-time*. Dalam satu studi internasional[5]. Menggunakan sistem *fuzzy logic* berbasis ESP32 untuk lingkungan budidaya jamur, dan melaporkan akurasi sekitar 86 %, dengan respon adaptif terhadap perubahan parameter lingkungan . Sedangkan sistem yang lebih sederhana berbasis DHT11 dan Arduino UNO, walaupun bermanfaat, hanya mampu menjaga kondisi terkendali tanpa memberikan presisi optimal karena penerapannya yang semata logic ON/OFF.

Dalam konteks pengendalian presisi, kontrol otomatis berbasis algoritma PID (Proportional-Integral-Derivative) telah lama dikenal sebagai solusi efektif dalam sistem kendali tertutup. Algoritma ini mampu meminimalkan error (perbedaan antara nilai *setpoint* dan nilai aktual) secara adaptif. Dengan adanya tiga parameter utama yaitu Kp (*Proportional*), Ki (*Integral*), dan Kd (*Derivative*). Sistem PID tidak hanya bereaksi terhadap kesalahan saat ini, tetapi juga menganalisa akumulasi kesalahan dan proyeksi perubahan ke depannya. Menyoroti bagaimana kombinasi ketiga parameter ini membuat response sistem menjadi cepat, stabil, dan minim *overshoot*.

Pada sistem kontrol inkubator jamur dan pemantauan *real-time* parameter suhu oleh sensor digital seperti DHT22, yang memiliki akurasi 0.5 °C serta kestabilan tinggi, memungkinkan perhitungan error akurat. Dengan mikrokontroler ESP32 sebagai otak sistem, nilai error disalurkan melalui blok PID yang menghitung sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*). Output PWM ini kemudian mengendalikan kecepatan *exhaust fan* dan Peltier secara proporsional, sehingga dapat menurunkan suhu secara perlahan dan akurat yang sangat berpengaruh terhadap efisiensi aktuasi dan kesinambungan suhu ideal. Perbandingan penggunaan logika ON/OFF dengan kontrol bertahap telah didemonstrasikan dalam berbagai literatur, hasilnya menunjukkan bahwa sistem bertahap (PID/fuzzy)

mengurangi fluktuasi suhu, meningkatkan efisiensi, dan memperpanjang umur aktuator seperti pompa dan kipas.

Studi pada rumah jamur tropis oleh Desnanjaya dan Sugiartawan (2022) menunjukkan efek signifikan dari otomatisasi berbasis DHT11 dan Arduino UNO; meskipun berfungsi dengan baik, sistem ini belum mampu memberikan stabilitas lingkungan yang optimal seperti yang ditawarkan sistem PID[6]. Namun, keberhasilan kontrol otomatis ini membuka jalan penerapan metode PID. Selain itu, data nasional mengenai gagal panen akibat fluktuasi suhu dan kelembapan seperti dilaporkan oleh Moxley et al. (2022) dan Setiawati et al. (2021) menegaskan urgensi penggunaan sistem pengendalian cerdas untuk menjamin keberlanjutan produksi.[7]

ESP32 sendiri menjadi pilihan tepat dalam era IoT saat ini karena fitur konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth yang terintegrasi, konsumsi daya rendah, serta harga relatif terjangkau. Kombinasi antara ESP32 dan *platform* IoT seperti Blynk atau Arduino Cloud memungkinkan pengguna memantau dan melakukan penyesuaian atau pengaturan ulang terhadap parameter sistem secara *real-time* melalui smartphone. Hal ini selaras dengan tren *global Industry 4.0*, di mana sistem kontrol dan pemantauan jarak jauh melalui dashboard IoT dapat meningkatkan respons terhadap bahaya dan ketidakstabilan lingkungan secara signifikan.

Secara sinergis, penggunaan sensor DHT22, aktuator *fan*, peltier dan pompa, ESP32, dan algoritma PID membentuk sebuah *closed-loop control system* yang cerdas dan ekonomis. Sistem ini tidak sekadar memantau namun mampu mengoreksi dan menstabilkan lingkungan budidaya agar sesuai dengan parameter ideal sebuah revolusi dari pendekatan manual dan ON/OFF menjadi sistem otomatis yang presisi dan adaptif. Pemantauan suhu dan kelembapan yang terus menerus juga membantu pemilihan waktu panen, penghematan energi, serta pengurangan risiko kontaminasi dan kerusakan miselium akibat kondisi ekstrem.

Kesimpulannya, landasan teori penggunaan kontrol PID dalam budidaya jamur didukung oleh temuan nasional mengenai kebutuhan suhu 22–30 °C dan kelembapan 80–95 % untuk berbagai spesies jamur. Mikrokontroler ESP32 memberikan *platform* ideal untuk aplikasi IoT kontrol ini, dengan performa kuat

dan biaya rendah. Oleh karena itu, sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan otomatis berbasis PID tidak hanya relevan, tetapi sangat diperlukan dalam konteks teknologi dan industri pertanian modern, khususnya untuk meningkatkan kualitas dan produktivitas budidaya jamur secara signifikan[8].

2.2.1 Jamur Tiram

Jamur tiram (*Pleurotus ostreatus*) merupakan salah satu jenis jamur konsumsi yang populer dan banyak dibudidayakan di Indonesia karena rasanya yang khas, kandungan gizi yang tinggi, serta nilai ekonominya yang stabil. Tubuh buah jamur ini berbentuk menyerupai cangkang tiram dengan warna putih hingga abu-abu dan tekstur yang lembut. Pertumbuhan jamur tiram sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan mikro, terutama suhu, kelembapan udara, sirkulasi udara, dan pencahayaan.

Pada fase inkubasi, miselium jamur tiram tumbuh optimal pada suhu 22–28 °C, sedangkan pada fase pembentukan tubuh buah atau fruktifikasi suhu ideal berada pada kisaran 20–27 °C. Suhu yang terlalu tinggi dapat memperlambat pertumbuhan bahkan menimbulkan kontaminasi, sementara suhu yang terlalu rendah menyebabkan pembentukan tubuh buah menjadi lambat. Selain itu, kelembapan udara juga berperan sangat penting, dengan kebutuhan relatif antara 80–95 %. Jika kelembapan terlalu rendah, tubuh buah akan kering dan ukurannya kecil, sedangkan kelembapan yang terlalu tinggi dapat memicu pertumbuhan hama dan penyakit.

Selain suhu dan kelembapan, sirkulasi udara menjadi faktor pendukung penting karena jamur tiram memerlukan pasokan oksigen yang cukup untuk respirasi. Kadar karbon dioksida yang tinggi akibat kurangnya ventilasi dapat menghambat pembentukan tudung jamur. Sementara itu, cahaya meskipun tidak dibutuhkan untuk fotosintesis, tetap berfungsi sebagai pemicu pembentukan tubuh buah. Intensitas cahaya rendah sudah cukup untuk mendukung proses ini, biasanya berasal dari cahaya alami yang masuk ke dalam ruang budidaya.

Jamur tiram umumnya ditanam pada media berbasis lignoselulosa seperti serbuk gergaji kayu yang dicampur dengan bekatul dan kapur (CaCO_3) sebagai

bahan tambahan. Media ini menyediakan nutrisi utama yang dibutuhkan untuk perkembangan miselium. Dengan demikian, keberhasilan budidaya jamur tiram sangat bergantung pada pengendalian suhu dan kelembapan yang tepat. Pemanfaatan sistem otomasi berbasis mikrokontroler dengan sensor dan aktuator menjadi solusi modern untuk menjaga stabilitas lingkungan, sehingga proses pertumbuhan jamur tiram dapat berlangsung optimal dan risiko kegagalan panen dapat diminimalkan. Adapun gambar Jamur Tiram dapat dilihat dibawah ini.



Gambar 2. 1 Jamur Tiram

2.2.2 Suhu dan Kelembapan

Suhu merupakan besaran fisik yang menunjukkan tingkat panas atau dingin suatu benda atau lingkungan. Dalam konteks biologi dan pertanian, suhu memiliki peran krusial karena memengaruhi kecepatan reaksi metabolisme organisme, termasuk jamur. Pada budidaya jamur tiram, suhu lingkungan yang tidak stabil dapat menghambat pertumbuhan miselium atau menyebabkan tubuh buah berkembang tidak sempurna. Suhu yang terlalu tinggi cenderung memicu kontaminasi mikroorganisme lain, sedangkan suhu yang terlalu rendah memperlambat laju pertumbuhan. Oleh karena itu, pengendalian suhu yang stabil dalam kisaran 20–28 °C sangat penting agar proses pertumbuhan jamur berlangsung optimal.

Kelembapan adalah kandungan uap air yang terdapat di udara pada kondisi tertentu. Kelembapan relatif (%RH) merupakan parameter yang paling sering

digunakan, yaitu perbandingan antara jumlah uap air yang ada dengan jumlah maksimum uap air yang dapat ditampung udara pada suhu tertentu. Kelembapan udara yang terlalu rendah akan menyebabkan tubuh buah jamur kering, kecil, dan mudah retak. Sebaliknya, kelembapan yang terlalu tinggi berpotensi menimbulkan pertumbuhan hama dan jamur liar (kontaminan) yang dapat merusak miselium. Jamur tiram membutuhkan kelembapan relatif udara pada kisaran 80–95 % agar tubuh buah dapat tumbuh dengan baik.

Interaksi antara suhu dan kelembapan saling memengaruhi. Suhu udara yang meningkat akan menurunkan kelembapan relatif, sedangkan suhu yang menurun dapat meningkatkan kelembapan relatif. Hubungan ini menegaskan bahwa pengendalian kedua parameter tidak dapat dipisahkan. Dalam praktik modern, pengendalian suhu dilakukan dengan pendingin atau sirkulasi udara seperti exhaust fan dan peltier, sedangkan kelembapan dijaga dengan pelembap berupa pompa air dan nozzle kabut. Dengan adanya sistem monitoring dan kontrol otomatis, kondisi suhu dan kelembapan dapat dijaga agar tetap sesuai dengan setpoint yang dibutuhkan jamur tiram, sehingga produktivitas dan kualitas panen dapat ditingkatkan.

2.2.3 Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah komputer mini dalam bentuk sebuah chip yang menggabungkan unit pemrosesan data (CPU), memori (RAM dan ROM), serta perangkat input dan output (I/O) dalam satu rangkaian. Mikrokontroler dirancang untuk mengendalikan perangkat elektronik atau sistem mekanik secara otomatis. Pada dasarnya, mikrokontroler berfungsi sebagai otak sistem tertanam (embedded system) yang menerima data dari sensor, memprosesnya sesuai algoritma tertentu, dan memberikan perintah atau respons melalui aktuator atau media komunikasi lain[8].

Salah satu jenis mikrokontroler adalah ESP32, yang merupakan pengembangan dari ESP8266 dengan fitur yang lebih lengkap dan kemampuan yang lebih baik. ESP32 adalah mikrokontroler berbasis system on chip (SoC) yang dibuat oleh Espressif Systems. Mikrokontroler ini dirancang untuk mendukung

berbagai aplikasi *Internet of Things* (IoT), karena sudah dilengkapi dengan koneksi WiFi dan Bluetooth dalam satu modul. ESP32 bekerja sebagai pengendali utama dalam sistem, yang membaca dan memproses data dari perangkat luar seperti sensor dan aktuator, lalu mengirimkan data tersebut ke jaringan melalui koneksi WiFi atau Bluetooth[9]. Adapun gambar, table pin out dan spesifikasi pada ESP32 dapat dilihat dibawah ini.



Gambar 2. 2 ESP 32 DEVKITV1

Tabel 2. 1 Pin Out ESP32 Devkit V1[10]

Pin	Nama	Fungsi Utama	Keterangan
3V3	3.3V Output	Catu daya 3.3V	Output dari regulator internal
GND	Ground	Ground (tanah)	Sambungan ke ground sistem
EN	Enable	Reset/Enable	Aktifkan modul saat diberi HIGH, matikan jika LOW

Pin	Nama	Fungsi Utama	Keterangan
GPIO 0	Input/Output	GPIO, ADC2, Touch, Strapping	Mode boot jika LOW saat reset
GPIO 2	Input/Output	GPIO, ADC2, Touch, PWM, DAC	LED default di sebagian board
GPIO 4	Input/Output	GPIO, ADC2, Touch, PWM, DAC	Bisa digunakan untuk I2C SDA
GPIO 5	Input/Output	GPIO, ADC2, Touch, PWM, DAC, HSPI CS0	Biasa digunakan untuk kontrol
GPIO 12	Input/Output	GPIO, ADC2, Touch, PWM, MTDI (Strapping Pin)	Strapping pin, hati-hati penggunaannya
GPIO 13	Input/Output	GPIO, ADC2, Touch, PWM, HSPI MOSI	Biasanya digunakan untuk SPI
GPIO 14	Input/Output	GPIO, ADC2, Touch, PWM, HSPI CLK	Clock SPI
GPIO 15	Input/Output	GPIO, ADC2, Touch, PWM, HSPI CS	Biasanya digunakan untuk SPI CS
GPIO 16	Input/Output	GPIO, PWM, UART2 RX	Umumnya untuk komunikasi serial
GPIO 17	Input/Output	GPIO, PWM, UART2 TX	UART TX
GPIO 18	Input/Output	GPIO, PWM, VSPI CLK	Clock SPI default
GPIO 19	Input/Output	GPIO, PWM, VSPI MISO	Data masuk SPI
GPIO 21	Input/Output	GPIO, PWM, I2C SDA	Default SDA I2C
GPIO 22	Input/Output	GPIO, PWM, I2C SCL	Default SCL I2C

Pin	Nama	Fungsi Utama	Keterangan
GPIO 23	Input/Output	GPIO, PWM, VSPI MOSI	Data keluar SPI
GPIO 25	Input/Output	GPIO, PWM, DAC1	DAC analog output
GPIO 26	Input/Output	GPIO, PWM, DAC2	DAC analog output
GPIO 27	Input/Output	GPIO, PWM, ADC2, Touch	Umum digunakan
GPIO 32	Input/Output	GPIO, PWM, ADC1, Touch	ADC1 channel
GPIO 33	Input/Output	GPIO, PWM, ADC1, Touch	ADC1 channel
GPIO 34	Input (ADC)	ADC1, input-only	Tidak mendukung output digital
GPIO 35	Input (ADC)	ADC1, input-only	Tidak mendukung output digital
GPIO 36	Input (ADC)	ADC1, input-only (VP sensor)	Hanya input, ADC channel
GPIO 39	Input (ADC)	ADC1, input-only (VN sensor)	Hanya input, ADC channel
TX0	UART0 TX	Output komunikasi serial	Untuk upload kode dan komunikasi serial
RX0	UART0 RX	Input komunikasi serial	Untuk upload kode dan komunikasi serial
VIN	Tegangan Input	Input 5V untuk catu daya board	Input tegangan (biasanya dari USB)

Tabel 2. 2 Spesifikasi ESP32 Devkit V1[10]

Spesifikasi	Keterangan
Prosesor	Dual-core Tensilica Xtensa LX6, hingga 240 MHz
Memori	520 KB SRAM internal, hingga 16 MB flash eksternal (umumnya 4 MB di modul standar)

Spesifikasi	Keterangan
Konektivitas	Wi-Fi 802.11 b/g/n (2,4 GHz), Bluetooth v4.2 BR/EDR dan BLE
Voltase Operasi	3,0 V – 3,6 V (umumnya 3,3 V)
Tegangan Logika I/O	3,3 V
Jumlah Pin I/O Digital	34 pin (GPIO0 – GPIO39), dengan sebagian mendukung fungsi ADC, PWM, I2C, SPI, UART
Jumlah Kanal ADC	18 kanal ADC 12-bit
Jumlah Kanal DAC	2 kanal DAC 8-bit (GPIO25 dan GPIO26)
Antarmuka Komunikasi	SPI, I2C, I2S, UART, PWM, SDIO
Fitur Tambahan	Hall sensor, sensor suhu internal, deep sleep mode, RTC
Konsumsi Daya (Sleep Mode)	Sekitar 10 μ A (deep sleep)
Konsumsi Daya (Aktif)	Sekitar 160–240 mA tergantung beban
Dimensi Modul	18 mm x 25,5 mm x 3,1 mm
Sertifikasi	FCC/CE/IC/TELEC/KCC
Suhu Operasional	-40°C hingga +85°C

Arduino IDE adalah perangkat lunak khusus yang digunakan untuk membuat, menulis, dan mengirimkan program ke papan mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32. Dengan Arduino IDE, pengguna dapat menulis kode program menggunakan bahasa pemrograman yang mudah dipahami, kemudian mengunggah kode tersebut langsung ke papan mikrokontroler melalui kabel USB. Arduino IDE mendukung berbagai sistem operasi, termasuk Windows, macOS, dan Linux, sehingga dapat digunakan secara luas oleh banyak pengguna[11]. Fitur-fitur penting dari Arduino IDE meliputi editor teks dengan penyorotan warna untuk mempermudah membaca kode, pemeriksa kesalahan pada program, serta tombol khusus untuk mengunggah kode secara langsung ke mikrokontroler. Selain itu, Arduino IDE memiliki manajer pustaka dan manajer papan yang membantu

pengguna menambahkan berbagai modul perangkat keras (seperti sensor dan aktuator) dan pustaka perangkat lunak tambahan sesuai dengan kebutuhan proyek mereka.

Arduino IDE juga mendukung banyak jenis papan selain Arduino, seperti ESP8266 dan ESP32, yang sering digunakan dalam proyek *Internet of Things* (IoT). Kelebihan Arduino IDE terletak pada antarmukanya yang sederhana dan dokumentasinya yang lengkap, sehingga cocok digunakan oleh pemula maupun pengembang profesional dalam bidang elektronika dan pemrograman mikrokontroler[12]. Adapun gambar dari Arduino IDE dapat dilihat pada Gambar 2. 2.



Gambar 2. 3 Arduino IDE

2.2.4 Power Supply

Power supply atau catu daya merupakan perangkat elektronik yang berfungsi untuk menyediakan energi listrik kepada seluruh komponen dalam suatu sistem agar dapat beroperasi sesuai dengan spesifikasi dayanya. Secara umum, power supply bekerja dengan mengubah sumber tegangan listrik AC (arus bolak-balik) dari jaringan listrik menjadi tegangan DC (arus searah) yang dibutuhkan oleh rangkaian elektronik. Transformasi ini dapat dilakukan melalui beberapa tahap, seperti penyearahan (rectification), penyaringan (filtering), dan pengaturan tegangan (regulation). Terdapat berbagai jenis power supply yang digunakan dalam sistem elektronika, antara lain linear power supply, switching power supply (SMPS), dan power supply berbasis baterai. Pada sistem berbasis mikrokontroler dan IoT, penggunaan switching power supply sering menjadi pilihan utama karena

efisiensinya yang tinggi, ukuran yang lebih ringkas, serta kemampuannya untuk memberikan arus tinggi dengan kestabilan tegangan yang baik[13].

Dalam konteks sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan pada inkubator jamur tiram berbasis ESP32, digunakan power supply dengan spesifikasi 12V 5A sebagai sumber utama energi listrik. Tegangan 12V dipilih karena sesuai dengan kebutuhan operasional komponen aktuator dalam sistem, seperti pompa DC 12V dan exhaust fan 12V, yang membutuhkan arus cukup besar untuk beroperasi secara optimal. Arus maksimum sebesar 5 Ampere memberikan margin keamanan dan fleksibilitas ketika seluruh komponen bekerja secara bersamaan, sehingga menghindari penurunan tegangan (voltage drop) atau kelebihan beban pada power supply. Pemilihan power supply eksternal 12V 5A ini juga mempertimbangkan efisiensi dan kepraktisan sistem. Tegangan 12V dari power supply dapat diturunkan menggunakan modul step-down seperti buck converter untuk memberikan tegangan 5V atau 3.3V ke mikrokontroler ESP32 dan sensor-sensor yang memerlukan tegangan lebih rendah. Dengan demikian, satu unit power supply mampu melayani berbagai tingkat kebutuhan tegangan secara efisien dalam satu sistem terintegrasi.

Kelebihan lainnya adalah stabilitas daya yang diberikan power supply switching tipe ini cenderung tinggi meskipun beban berubah-ubah[14]. Selain itu, desainnya yang compact dan banyak tersedia di pasaran menjadikannya pilihan yang ekonomis dan mudah diimplementasikan dalam sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan pada inkubator jamur tiram skala kecil hingga menengah. Adapun gambar dan karakteristik teknis umum dari power supply 12V 5A dapat dilihat pada Gambar dan Tabel 2. 3 berikut ini:



Gambar 2. 4 Power Supply 12V DC

Tabel 2. 3 Spesifikasi Power Supply[14]

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Masukan (Input)	100–240V AC, 50/60Hz
Tegangan Keluaran (Output)	12V DC
Arus Maksimal	5A
Daya Maksimal	60 Watt
Jenis	Switching Power Supply
Perlindungan	Overload, Overvoltage, Short Circuit

2.2.5 PID (*Proportional-Integral-Derivative*)

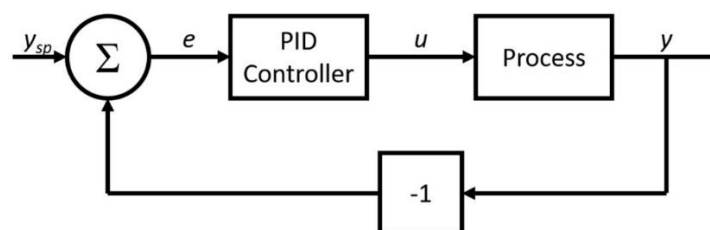
Metode kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative) merupakan salah satu algoritma pengendalian umpan balik tertutup yang paling umum digunakan dalam sistem otomasi. PID digunakan untuk mengontrol suatu variabel fisik, seperti suhu, kelembapan, tekanan, dan lainnya, agar tetap stabil pada nilai yang diinginkan (setpoint)[15]. Dalam konteks sistem inkubator jamur ini, metode kontrol PID digunakan untuk mengatur suhu udara di dalam ruang inkubasi secara presisi dan

bertahap. Mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai pusat pengendali yang menjalankan algoritma PID, sedangkan sensor DHT22 digunakan untuk membaca nilai suhu dan kelembapan aktual dalam ruang inkubator.

Secara umum, kontrol PID bekerja dengan menghitung selisih (error) antara nilai setpoint yang telah ditentukan dan nilai aktual yang terbaca oleh sensor. Algoritma PID kemudian mengolah error tersebut melalui tiga komponen, yaitu *Proportional (P)*, *Integral (I)*, dan *Derivative (D)*. Komponen proportional menghasilkan respon yang sebanding dengan besar error saat ini. Semakin besar error, maka semakin besar pula output kontrol yang diberikan. Komponen integral berfungsi menghilangkan error yang tersisa dalam jangka waktu lama dengan menjumlahkan nilai error dari waktu ke waktu. Sementara itu, komponen derivative bertindak sebagai prediktor yang menganalisis laju perubahan error, sehingga dapat meredam osilasi dan mempercepat proses stabilisasi.

Dalam penerapannya pada sistem ini, PID digunakan untuk mengatur kinerja *exhaust fan* dan peltier secara bertahap berdasarkan kondisi suhu udara di dalam inkubator. Jika suhu udara melebihi nilai setpoint 24°C , maka sistem akan menghitung besarnya error dan menghasilkan sinyal kontrol berupa nilai PWM (Pulse Width Modulation) yang kemudian digunakan untuk mengatur kecepatan *fan* dan peltier. Semakin besar error, maka semakin cepat *fan* dan peltier berputar untuk menurunkan suhu. Sebaliknya, jika suhu sudah mendekati setpoint, maka *fan* dan peltier akan berputar lebih lambat, bahkan berhenti jika suhu telah stabil.

Pendekatan ini menjadikan sistem kontrol lebih efisien, tidak bekerja secara ON/OFF, dan mengurangi fluktuasi suhu yang tajam, yang dapat berdampak buruk terhadap pertumbuhan miselium jamur.



Gambar 2. 5 PID (Proportional (P), Integral (I), dan Derivative (D))

Untuk mencapai kinerja kontrol yang optimal, nilai konstanta PID (K_p , K_i , dan K_d) harus ditentukan melalui proses tuning[16]. Tuning dapat dilakukan secara manual trial and eror atau menggunakan metode tertentu seperti Ziegler-Nichols. Sebagai contoh, dalam proses percobaan pada alat ini, digunakan nilai $K_p = 2.0$, $K_i = 5.0$, dan $K_d = 1.0$, yang telah disesuaikan berdasarkan karakteristik lingkungan inkubator. Selain itu, nilai suhu, output PWM aktuator, dan error PID dapat dipantau secara *real-time* melalui aplikasi Blynk yang terhubung ke ESP32 via koneksi WiFi. Hal ini memberikan kemudahan kepada pengguna untuk mengamati kondisi inkubator dan kinerja sistem kontrol secara langsung melalui smartphone.

Rumus Dasar PID :

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

Di mana:

- $u(t)$ adalah dorongan yang datang dari Controller, ke dalam Proses, pada waktu t
- $e(t) = y_{sp}(t) - y(t)$ adalah perbedaan antara setpoint dan variabel proses yang diukur pada waktu t
- K_p , K_i , K_d masing-masing adalah konstanta P , I , dan D

Dengan diterapkannya metode kontrol PID dalam sistem ini, suhu inkubator dapat dijaga agar tetap stabil dan ideal, yang sangat penting dalam proses inkubasi jamur tiram. Sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga meningkatkan kualitas pertumbuhan jamur karena lingkungan inkubasi yang lebih terkontrol dan konsisten.

2.2.6 Logika Kontrol 2 Posisi

Logika kontrol 2 posisi (On–Off Control) merupakan metode pengendalian paling sederhana yang banyak diterapkan dalam sistem otomasi. Prinsip utamanya adalah aktuator hanya bekerja dalam dua kondisi, yaitu menyala (ON) atau mati (OFF), tanpa adanya variasi tingkat daya. Peralihan antara kondisi ON dan OFF

ditentukan oleh batas setpoint minimum dan setpoint maksimum, sehingga membentuk mekanisme histeresis. Histeresis ini berfungsi untuk mencegah switching terlalu sering yang dapat memperpendek umur aktuator.

Pada sistem inkubator jamur berbasis ESP32, logika kontrol 2 posisi digunakan untuk mengendalikan aktuator berupa pompa air DC 12V yang terhubung dengan nozzle kabut sebagai pelembap. Mekanismenya adalah sebagai berikut:

- Kondisi ON (menyalakan pompa): Pompa akan aktif apabila kelembapan udara turun di bawah setpoint minimum. Pada kondisi ini, pompa bekerja untuk menaikkan kelembapan hingga mendekati batas optimal.
- Kondisi OFF (mematikan pompa): Pompa akan berhenti bekerja ketika kelembapan udara telah mencapai atau melebihi setpoint maksimum. Setelah pompa mati, meskipun kelembapan udara turun namun masih berada dalam rentang antara setpoint minimum dan maksimum, pompa tetap tidak menyala. Pompa hanya akan aktif kembali jika kelembapan turun lebih rendah dari setpoint minimum..

Dengan prinsip kerja tersebut, sistem mampu menjaga kelembapan udara pada kisaran yang stabil sesuai kebutuhan jamur tiram. Penggunaan logika kontrol 2 posisi ini menawarkan kelebihan berupa kesederhanaan implementasi, konsumsi energi yang efisien, serta perawatan sistem yang relatif mudah. Namun, karena hanya memiliki dua kondisi kerja, fluktuasi parameter masih mungkin terjadi di sekitar batas setpoint, sehingga metode ini cocok digunakan untuk aplikasi sederhana atau dikombinasikan dengan metode kontrol lain seperti PID untuk meningkatkan presisi.

2.2.7 Sensor Suhu DHT22

Sensor suhu merupakan perangkat elektronik yang berfungsi untuk mendeteksi dan mengukur suhu suatu objek atau lingkungan, yang bekerja dengan cara mendeteksi perubahan sifat fisik akibat perubahan suhu, seperti resistansi, tegangan, atau kapasitansi. Sensor suhu umumnya terbagi menjadi dua jenis, yaitu sensor analog dan sensor digital. Sensor analog seperti thermistor dan LM35

menghasilkan sinyal tegangan yang sebanding dengan suhu, sedangkan sensor digital seperti DHT11, DHT22, dan DS18B20 menghasilkan data dalam bentuk digital yang langsung dapat diproses oleh mikrokontroler. Dalam sistem kontrol dan monitoring suhu berbasis Internet of Things (IoT), sensor digital lebih sering digunakan karena keakuratannya yang lebih tinggi serta kemudahan dalam integrasi dengan perangkat mikrokontroler[17].

Pada sistem ini digunakan sensor DHT22 sebagai komponen utama untuk memantau suhu dan kelembapan secara real-time. Pemilihan sensor DHT22 didasarkan pada keunggulannya dibandingkan sensor sejenis, seperti DHT11. DHT22 memiliki tingkat akurasi pengukuran suhu yang lebih tinggi, yaitu $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ dengan rentang pengukuran suhu antara -40°C hingga $+80^{\circ}\text{C}$, serta mampu mengukur kelembapan dengan akurasi $\pm 2-5\%$ pada rentang $0-100\%$ RH. Keunggulan lainnya adalah sensor ini mampu mengukur dua parameter sekaligus, yaitu suhu dan kelembapan, sehingga lebih efisien dalam penggunaan pin mikrokontroler dan komponen perangkat keras.

Untuk mengetahui sejauh mana ketelitian data yang dihasilkan sensor DHT22, dilakukan proses pengujian dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur standar, misalnya Thermo-Hygrometer. Nilai perbedaan hasil pengukuran dapat dihitung menggunakan persamaan galat sebagai berikut:

Persamaan rumus galat absolute (selisih)

$$Ea = |Xi - Xp|$$

Persamaan rumus rata-rata galat relatif (2.1)

$$Er = \frac{Ea}{Xp} \times 100 = \frac{|Xi - Xp|}{Xp} 100$$

Dimana:

Ea = galat absolute Xi = nilai dari sensor DHT22

Er = galat relatif% Xp = nilai dari Thermo-Hygrometer

Dengan menggunakan kedua rumus ini, akurasi sensor DHT22 dapat dianalisis secara kuantitatif sehingga memudahkan peneliti dalam menilai tingkat keandalan sensor untuk digunakan dalam aplikasi tertentu.

Oleh karena itu, DHT22 menjadi pilihan yang tepat dan efisien dalam implementasi sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan pada budidaya jamur berbasis ESP32. Adapun gambar, table pin out dan spesifikasi pada Sensor DHT22 dapat dilihat dibawah ini.



Gambar 2. 6 Sensor DHT22

Tabel 2. 4 Pin Out Sensor DHT22[18]

Nama Pin	Fungsi	Deskripsi
VCC	Catu Daya	Pin untuk memberikan tegangan catu daya ke sensor (biasanya 3,3 V- 6 V DC).
DATA	Jalur Data Digital	Pin ini mengirimkan data suhu dan kelembapan dalam bentuk sinyal digital ke mikrokontroler.
NC	Tidak Digunakan	Pin ini tidak terhubung ke sirkuit internal sensor. Sering kali dihilangkan pada modul tertentu.
GND	Ground	Pin ini dihubungkan ke ground sistem (massa) untuk menyelesaikan sirkuit.

Tabel 2. 5 Spesifikasi DHT22[18]

Kategori	Spesifikasi
Tegangan Kerja	3.3V – 6.0V DC
Konsumsi Arus	Maksimal 1.5 mA saat pengambilan data
Rentang Pengukuran Suhu	-40°C hingga +80°C
Akurasi Suhu	±0.5°C
Rentang Kelembapan	0% hingga 100% RH
Akurasi Kelembapan	±2% hingga ±5% RH
Resolusi	Suhu: 0.1°C, Kelembapan: 0.1% RH
Interval Pembacaan Data	Minimum 2 detik (0.5 Hz sampling rate)
Output Data	40-bit data digital (16 bit RH, 16 bit suhu, 8 bit checksum)
Protokol Komunikasi	Digital satu kabel (single-wire digital interface)
Dimensi Sensor	Sekitar 28 mm × 12 mm × 10 mm

2.2.8 MOSFET

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) adalah salah satu jenis transistor daya yang umum digunakan dalam rangkaian elektronik untuk fungsi saklar (switching) maupun penguat sinyal (amplification). MOSFET bekerja berdasarkan prinsip pengendalian aliran arus antara drain dan source melalui tegangan yang diberikan pada gerbang (gate). MOSFET terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu MOSFET kanal-N dan kanal-P, di mana MOSFET kanal-N lebih sering digunakan karena memiliki resistansi internal ($R_{ds(on)}$) yang lebih rendah dan efisiensi konduksi yang lebih baik. MOSFET banyak digunakan dalam sistem berbasis mikrokontroler karena mampu mengendalikan beban arus tinggi seperti motor, pompa, atau aktuator dengan sinyal logika bertegangan rendah dari mikrokontroler seperti ESP32 atau Arduino[19].

Pada sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan pada inkubator jamur tiram berbasis ESP32 ini, dipilih komponen MOSFET tipe N IRLZ44N untuk mengontrol beban berupa pompa air dan exhaust fan. Pemilihan IRLZ44N didasarkan pada beberapa keunggulan yang dimilikinya, yaitu kemampuannya untuk dikendalikan langsung menggunakan sinyal logika 3.3V dari ESP32 (karena IRLZ44N merupakan logic-level MOSFET), arus drain maksimum yang tinggi (hingga sekitar 47A), serta tegangan drain-source maksimum yang cukup besar (sekitar 55V), menjadikannya sangat ideal untuk beban 12V seperti pompa DC dan *fan*. Selain itu, IRLZ44N memiliki nilai $R_{ds(on)}$ yang rendah, sehingga panas yang dihasilkan saat beroperasi pun minimal, meningkatkan efisiensi dan mengurangi kebutuhan pendinginan tambahan. Penggunaan MOSFET dalam sistem ini memungkinkan pengendalian beban secara efisien, cepat, dan dengan konsumsi daya rendah, sekaligus memberikan fleksibilitas dalam otomatisasi perangkat berdasarkan pembacaan sensor secara real-time.[20]

Adapun gambar, table pin out dan spesifikasi pada Mosfet dapat dilihat dibawah ini.



Gambar 2. 7 MOSFET

Tabel 2. 6 Pin Out MOSFET[21]

Nama Pin	Fungsi	Deskripsi
Gate (G)	Input Kontrol	Menerima sinyal tegangan dari mikrokontroler (misalnya ESP32) untuk mengatur ON/OFF MOSFET.

Nama Pin	Fungsi	Deskripsi
Drain (D)	Jalur Beban	Terhubung ke salah satu sisi beban (misalnya kipas). Arus mengalir dari beban menuju Source saat Gate aktif.
Source (S)	Ground/Negatif	Dihubungkan ke ground sistem. Merupakan jalur kembalinya arus ke sumber daya.

Tabel 2. 7 Spesifikasi MOSFET[21]

Kategori	Spesifikasi
Tipe	N-Channel Enhancement Mode Power MOSFET
Tegangan Drain-Source (V_{ds})	100 V
Arus Drain Maksimum (I_d)	33 A
Tegangan Gate Threshold ($V_{gs(th)}$)	2.0 – 4.0 V
Resistansi ON ($R_{ds(on)}$)	0.077 ohm (maksimum pada $V_{gs} = 10V$)
Daya Disipasi Maksimum (P_d)	130 W
Kecepatan Switching	TO-220
Tipe Kemasan	$\pm 1^\circ C$ dari kapasitas (misal 2A untuk 2000 mAh)
Suhu Operasional	-55°C hingga +175°C
Aplikasi Umum	Driver motor, pemanas, LED daya tinggi, switching daya DC

2.2.9 IC Optocoupler PC817

PC817 adalah sebuah *optocoupler* atau *photocoupler* yang berfungsi sebagai isolator listrik antara dua sirkuit berbeda dengan memanfaatkan sinyal cahaya sebagai media penghubung non-kontak. Komponen ini terdiri atas satu LED inframerah (IR LED) dan satu fototransistor yang dikemas dalam satu kemasan tertutup. Ketika arus listrik mengalir melalui LED, cahaya inframerah yang

dipancarkan akan diterima oleh fototransistor, sehingga mengaktifkan sisi output dari rangkaian tanpa adanya koneksi fisik langsung. Hal ini memungkinkan transfer sinyal listrik secara aman dan efektif sambil tetap mempertahankan isolasi galvanik antara input dan output[22].

IC ini diproduksi oleh berbagai perusahaan elektronik seperti Sharp, Lite-On, dan Toshiba, dan banyak digunakan dalam aplikasi mikrokontroler termasuk sistem berbasis ESP32, seperti alat sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan pada inkubator jamur tiram. PC817 sangat berguna untuk mengendalikan perangkat daya tinggi atau sistem dengan tegangan berbeda, misalnya saat menghubungkan ESP32 3.3V dengan aktuator 5V atau 12V. Keunggulan utama dari PC817 adalah kemampuannya dalam memberikan proteksi sistem terhadap lonjakan arus, *ground loop*, dan gangguan elektromagnetik, yang sering terjadi dalam lingkungan industri atau pertanian berbasis sensor otomatis.

Secara teknis, PC817 menawarkan tegangan isolasi hingga 5.000 Volt RMS, waktu respon cepat (beberapa mikrodetik), serta kemampuan *switching* frekuensi tinggi. Dengan karakteristik tersebut, PC817 banyak dimanfaatkan sebagai antarmuka isolasi antara mikrokontroler dan modul relai, inverter daya, serta komponen switching lainnya dalam sistem kendali otomatis. Dalam alat inkubator jamur berbasis ESP32, PC817 digunakan untuk menghubungkan sinyal logika dari mikrokontroler ke sirkuit kontrol beban seperti *exhaust fan*, peltier atau pompa, tanpa risiko interferensi listrik yang dapat merusak sistem utama.

Penggunaan PC817 juga mendukung stabilitas sistem kendali berbasis PID karena mengurangi kemungkinan fluktuasi sinyal akibat gangguan dari beban induktif. Dengan demikian, sistem tetap dapat mempertahankan presisi dalam pengaturan suhu dan kelembapan inkubator jamur tiram secara otomatis. Kinerja dari optocoupler ini juga dapat ditingkatkan melalui pemberian resistor pembatas arus pada sisi input untuk mengatur intensitas cahaya LED internal secara optimal, serta penggunaan transistor eksternal untuk memperkuat arus jika dibutuhkan pada beban besar.

Adapun gambar, tabel pin out, dan spesifikasi teknis dari IC PC817 dapat dilihat pada bagian berikut ini:



Gambar 2. 8 IC Optocoupler

Tabel 2. 8 Pin Out IC Optocoupler[23]

Nama Pin	Fungsi	Deskripsi
Pin 1 (Anoda)	Input Positif LED	Dihubungkan ke sumber arus melalui resistor pembatas
Pin 2 (Katoda)	Input Negatif LED	Dihubungkan ke ground pada sisi input
Pin 3 (Emitor)	Output Negatif dari Fototransistor	Biasanya dihubungkan ke ground atau sebagai jalur return sinyal
Pin 4 (Kolektor)	Output Positif dari Fototransistor	Menghasilkan sinyal output yang akan dibaca oleh beban atau sistem mikrokontroler

Tabel 2. 9 Spesifikasi IC Optocoupler[23]

Kategori	Spesifikasi
Tegangan Maksimal Input	1.2V (V_F max)
Tegangan Maksimal Output	80V (V_{CEO})
Arus Input LED Maksimum	50 mA
Tegangan Isolasi Galvanik	5.000 Vrms (antara input dan output)
Waktu Turn-On	4 μ s

Kategori	Spesifikasi
Waktu Turn-Off	3 μ s
Tipe Transistor Output	NPN (Phototransistor)
Panjang Gelombang IR LED	940 nm
Tipe Kemasan	DIP-4 (Dual Inline Package dengan 4 pin)

Dengan mengintegrasikan IC PC817 ke dalam sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan berbasis ESP32, perangkat menjadi lebih andal dan aman dalam mengendalikan komponen eksekusi (aktuator), serta lebih tahan terhadap gangguan eksternal yang dapat mengganggu kestabilan kontrol suhu dan kelembapan. Hal ini sangat penting dalam konteks budidaya jamur, di mana lingkungan yang stabil dan presisi menjadi kunci utama keberhasilan pertumbuhan dan hasil panen jamur tiram yang optimal.

2.2.10 Exhaust Fan

Exhaust fan merupakan salah satu jenis aktuator yang memiliki peranan penting dalam sistem pengendalian iklim mikro pada inkubator budidaya jamur. Aktuator ini bekerja sebagai sistem ventilasi aktif yang berfungsi mengeluarkan udara panas dan lembap dari dalam inkubator, serta menjaga sirkulasi udara agar tetap segar dan sesuai dengan kondisi optimal yang dibutuhkan oleh miselium jamur. Dalam konteks sistem yang dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 dan metode kontrol PID, *exhaust fan* menjadi salah satu komponen vital dalam menjaga kestabilan suhu dan kelembapan secara dinamis dan presisi.

Secara prinsip kerja, *exhaust fan* dikendalikan oleh sinyal digital berupa Pulse Width Modulation (PWM) yang dihasilkan dari mikrokontroler ESP32. Ketika sistem mendeteksi bahwa suhu atau kelembapan dalam ruang inkubator melebihi nilai ambang yang telah ditetapkan sebagai setpoint, maka ESP32 akan mengaktifkan *exhaust fan* dengan kecepatan tertentu berdasarkan hasil perhitungan algoritma kontrol PID. Sinyal PWM ini dikirim ke driver atau komponen saklar

elektronik seperti MOSFET yang kemudian mengatur besar kecilnya tegangan yang mengalir ke motor kipas. Dengan demikian, kecepatan putaran kipas dapat dikendalikan secara bertahap dan proporsional terhadap besarnya deviasi parameter suhu atau kelembapan dari nilai idealnya[24].

Fungsi utama dari *exhaust fan* dalam sistem ini adalah menjaga kualitas udara di dalam inkubator agar tetap kondusif bagi pertumbuhan jamur, khususnya jenis jamur tropis seperti jamur tiram (*Pleurotus ostreatus*) yang sangat peka terhadap perubahan suhu dan kelembapan ekstrem. Suhu yang terlalu tinggi dapat menghambat pertumbuhan miselium bahkan menyebabkan kematian kultur, sementara kelembapan yang terlalu tinggi dan stagnan dapat meningkatkan risiko pertumbuhan jamur kontaminan atau bakteri. Dengan menggunakan exhaust fan, sistem mampu membuang udara yang tidak sehat sekaligus mengatur sirkulasi sehingga kadar oksigen tetap terjaga.

Data dari Food and Agriculture Organization (FAO) menunjukkan bahwa kontrol iklim mikro yang efektif dalam budidaya jamur mampu meningkatkan produktivitas hingga 35% dan menurunkan angka kegagalan panen akibat kontaminasi mikroorganisme hingga 50%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *exhaust fan* sebagai bagian dari sistem kendali otomatis berkontribusi signifikan terhadap keberhasilan proses produksi jamur. Selain itu, studi oleh Widiyanto et al. (2021) pada sistem inkubator berbasis mikrokontroler menunjukkan bahwa penggunaan *exhaust fan* dengan pengaturan kecepatan berbasis PID mampu menurunkan fluktuasi suhu sebesar 20% dibandingkan pengaturan on-off konvensional[25], [26]

Pentingnya penggunaan *exhaust fan* dalam inkubator jamur juga sejalan dengan tren automasi dan efisiensi energi dalam teknologi pertanian modern. Dengan kontrol berbasis PID, *exhaust fan* hanya bekerja saat diperlukan dan dengan kecepatan yang sesuai dengan kondisi lingkungan, sehingga penggunaan energi menjadi lebih efisien dan sistem bekerja secara optimal tanpa intervensi manual. Mikrokontroler ESP32 yang digunakan dalam sistem ini memberikan fleksibilitas dalam pemrograman dan komunikasi data, sehingga *exhaust fan* dapat dikontrol

secara *real-time* berdasarkan pembacaan sensor dan juga dikombinasikan dengan aplikasi monitoring seperti Blynk.

Dengan demikian, *exhaust fan* bukan sekadar kipas buang biasa, melainkan sebuah aktuator cerdas yang memainkan peran penting dalam menjaga kestabilan kondisi lingkungan mikro inkubator jamur. Keberadaan *exhaust fan* yang dikontrol secara presisi oleh algoritma PID dan mikrokontroler ESP32 merupakan langkah signifikan dalam integrasi teknologi IoT dan automasi dalam dunia pertanian jamur yang menuntut akurasi dan kestabilan tinggi dalam proses inkubasi dan pertumbuhan miselium.



Gambar 2. 9 *Exhaust Fan* 12V DC

Tabel 2- 18 Pin out *Exhaust fan* 12v DC[26]

Nama Pin	Fungsi	Deskripsi
VCC (+)	Tegangan Input Positif	Digunakan untuk menghubungkan sumber daya positif (biasanya +12V atau +24V DC)
GND (-)	Ground	Jalur ground (negatif) dari catu daya, berfungsi sebagai referensi tegangan
PWM (opsional)*	Kontrol Kecepatan (PWM)	Beberapa model fan memiliki pin PWM untuk pengaturan kecepatan secara digital

Tabel 2. 10 Spesifikasi Exhaust Fan[26]

Kategori	Spesifikasi
Tegangan Operasional	12V DC atau 24V DC (tergantung tipe fan yang digunakan)
Arus Maksimum	0.1 A – 0.5 A (tergantung ukuran kipas dan spesifikasi motor)
Daya Listrik	$\pm 1.2 \text{ W} - 6 \text{ W}$
Diameter Fan	80 mm, 92 mm, atau 120 mm (umum dipakai untuk ventilasi kecil)
Kecepatan Putaran	1800 – 3200 RPM
Aliran Udara (Air Flow)	$\pm 25 - 70 \text{ CFM}$ (Cubic Feet per Minute)
Tingkat Kebisingan	$\pm 20 - 35 \text{ dB}$
Umur Operasional	$\pm 30.000 - 50.000 \text{ jam}$
Tipe Motor	Brushless DC (BLDC)
Material Kipas	Plastik tahan panas (ABS/PC)
Metode Pendinginan	Pendinginan aktif berbasis sirkulasi udara

2.2.11 Pompa 12V DC

Pompa air 12V DC merupakan salah satu jenis aktuator elektromekanis yang bekerja dengan memanfaatkan prinsip elektromagnetik dalam motor DC untuk menggerakkan mekanisme pemompaan cairan, dalam hal ini air yang digunakan untuk menghasilkan kabut mikro melalui nozzle sprinkler. Komponen ini menjadi bagian penting dalam sistem pengaturan kelembapan otomatis inkubator jamur karena mampu mengontrol suplai air secara presisi, sesuai dengan sinyal perintah dari mikrokontroler ESP32 yang sudah dikonfigurasi dengan sistem kontrol 2 posisi. Dalam konteks otomasi modern, pompa 12V DC menawarkan keunggulan berupa efisiensi energi, dimensi kompak, dan kemampuan responsif terhadap perubahan logika kontrol digital, menjadikannya sangat kompatibel dengan sistem

Internet of Things (IoT) yang semakin berkembang pesat di sektor pertanian dan budidaya mikroorganisme seperti jamur.

Cara kerja pompa 12V DC dimulai ketika mikrokontroler ESP32 membaca nilai kelembapan udara melalui sensor DHT22. Ketika nilai kelembapan aktual turun di bawah ambang batas setpoint minimum, mikrokontroler akan memberikan perintah ON sehingga pompa aktif dengan output penuh ($\text{pumpPower} = \text{PUMP_PWM_POWER}$). Sebaliknya, ketika nilai kelembapan mencapai atau melebihi setpoint maksimum, mikrokontroler akan mematikan pompa (OFF) dengan output nol. Mekanisme ini termasuk dalam kategori kontrol 2 posisi dengan histeresis, karena peralihan ON dan OFF ditentukan oleh dua batas setpoint yang berbeda untuk menghindari kerja pompa yang terlalu sering akibat fluktuasi kecil pada kelembapan. Dengan logika sederhana namun efektif ini, sistem mampu mempertahankan kelembapan inkubator tetap berada pada rentang yang sesuai dengan kebutuhan jamur.

Fungsi utama dari pompa 12V DC dalam sistem ini tidak hanya terbatas pada pemompaan air, tetapi juga sebagai aktuator responsif yang bekerja dalam dua kondisi ekstrem, ON dan OFF, untuk menyesuaikan durasi penyemprotan sesuai kebutuhan lingkungan inkubator jamur. Hal ini penting karena jamur sangat sensitif terhadap fluktuasi kelembapan. Spesies seperti *Pleurotus ostreatus* (jamur tiram) memerlukan rentang kelembapan optimal antara 80–90% untuk fase pertumbuhan dan pembentukan tubuh buah. Pengendalian lingkungan budidaya yang tidak stabil dapat menyebabkan penurunan produksi hingga 40% akibat stres fisiologis pada jamur. Dengan kontrol 2 posisi berbasis histeresis, sistem dapat menjaga kelembapan pada nilai yang konstan dengan mekanisme sederhana, sekaligus memperpanjang umur pompa karena mengurangi siklus switching berlebihan[27].

Dengan demikian, pompa 12V DC dalam sistem inkubator jamur bukan hanya berfungsi sebagai alat bantu mekanis, tetapi juga sebagai komponen integral dalam arsitektur kontrol otomatis berbasis mikrokontroler. Kombinasi antara input sensor, pengolahan sinyal dengan logika kontrol 2 posisi, dan penggerak aktuator ini menciptakan sistem yang adaptif dan presisi terhadap dinamika lingkungan inkubator, sesuai tuntutan teknologi pertanian presisi masa kini. Keandalan pompa

dalam menghasilkan kelembapan yang stabil dan terdistribusi merata menjadi jaminan penting bagi keberhasilan proses budidaya jamur yang optimal, baik dari segi hasil panen maupun efisiensi sumber daya yang digunakan.

Adapun gambar dan spesifikasi pada Sensor Pompa 12v DC dapat dilihat dibawah ini.



Gambar 2. 10 Pompa 12V DC

Tabel 2. 11 Spesifikasi Pompa 12V DC[28]

Kategori	Spesifikasi
Tegangan Operasional	12V DC
Arus Operasional	0.3 – 1.0 A (tergantung beban)
Daya Maksimum	±12 Watt
Debit Aliran Air	1 – 3 Liter/menit (tergantung tipe dan tekanan)
Tinggi Tekanan Maksimum	±2 meter (head lift)
Dimensi Fisik	Sekitar 9 cm × 4 cm × 3 cm (bervariasi per merek)
Bahan Casing	Plastik ABS tahan air dan korosi

2.2.12 Peltier Cooler

Peltier Cooler merupakan salah satu perangkat termoelektrik yang bekerja berdasarkan prinsip Peltier Effect, yaitu fenomena perpindahan panas yang terjadi ketika arus listrik dialirkan melalui sambungan dua material semikonduktor berbeda. Pada dasarnya, Peltier Cooler terdiri dari susunan pasangan semikonduktor tipe-N dan tipe-P yang dihubungkan secara seri listrik dan paralel termal, lalu dijepit di antara dua pelat keramik. Ketika arus listrik mengalir, satu sisi modul akan menyerap panas (menjadi dingin), sementara sisi lainnya melepaskan panas (menjadi panas). Perbedaan suhu inilah yang dimanfaatkan untuk keperluan pendinginan maupun pemanasan, tergantung arah arus listrik yang diberikan[29].

Dalam konteks sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan inkubator jamur tiram berbasis ESP32, Peltier Cooler dapat digunakan sebagai aktuator pengendali suhu yang presisi dan responsif. Saat sensor suhu DHT22 mendeteksi bahwa suhu lingkungan inkubator melebihi setpoint yang telah ditentukan dalam algoritma kendali PID (Proportional-Integral-Derivative), mikrokontroler akan mengaktifkan modul Peltier. Arus listrik yang dialirkan ke Peltier menyebabkan sisi dingin menyerap panas dari ruang inkubator, sementara sisi panas melepaskannya ke luar melalui *heat sink* dan kipas pendingin untuk menjaga efisiensi kerja. Dengan cara ini, suhu inkubator dapat dijaga stabil dalam rentang yang ideal untuk pertumbuhan jamur, yakni sekitar 22–28 °C.

Dari sisi teknis, Peltier Cooler menawarkan keunggulan berupa ukuran yang kompak, tidak menghasilkan suara bising karena tidak ada komponen mekanis yang bergerak (selain kipas tambahan untuk pembuangan panas), serta mampu dikendalikan langsung melalui logika digital mikrokontroler. Kelemahannya adalah efisiensi termal yang relatif lebih rendah dibandingkan sistem pendingin kompresi, sehingga membutuhkan *heat sink* dan kipas tambahan agar kinerja pendinginan tetap optimal. Namun, untuk aplikasi kecil dan spesifik seperti inkubator jamur skala laboratorium atau rumah tangga, Peltier Cooler sangat ideal karena konsumsi energinya relatif rendah dan mudah diintegrasikan dengan sistem Internet of Things (IoT).

Dalam implementasi berbasis ESP32 dan Blynk, kinerja Peltier Cooler dapat dipantau secara real-time melalui aplikasi seluler. Hal ini memungkinkan pengguna untuk melihat suhu inkubator secara langsung. Dengan dukungan otomasi ini, kestabilan suhu inkubator dapat dijaga dengan lebih efisien, yang pada akhirnya meningkatkan produktivitas budidaya jamur tiram.

Dengan demikian, Peltier Cooler dalam sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan inkubator jamur berperan sebagai aktuator pendingin sekaligus pengatur suhu yang adaptif, bekerja seiring dengan sensor dan mikrokontroler untuk menciptakan lingkungan yang stabil. Integrasi teknologi ini selaras dengan konsep pertanian presisi modern yang menekankan efisiensi, kontrol lingkungan berbasis data, serta adopsi perangkat IoT dalam budidaya skala kecil maupun menengah. Adapun gambar dan spesifikasi dari Peltier Cooler dapat dilihat pada bagian berikutnya.



Gambar 2. 11 Peltier Cooler

Tabel 2. 12 Table Spesifikasi Peltier Cooler[30]

Kategori	Spesifikasi
Tegangan Nominal	12 V DC

Kategori	Spesifikasi
Tegangan Maksimal	15.4 V DC
Arus Maksimal	6 A (pada Vmax, sisi panas ter-heatsink dengan baik)
Daya Pindah Panas Maksimum (Qmax)	$\pm 60 \text{ W @ } \Delta T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Perbedaan Suhu Maksimum (ΔT_{max})	65–67 $^{\circ}\text{C}$ (antara sisi panas & dingin, tanpa beban panas)
Resistansi Internal	$\sim 1.7\text{--}2.2 \text{ } \Omega$ (typ. $\approx 1.9\text{--}2.0 \text{ } \Omega$)
Dimensi Modul	40 × 40 × 3.6 mm (L × W × T)
Berat	$\pm 25 \text{ g}$
Suhu Operasi	−30 $^{\circ}\text{C}$ hingga +70 $^{\circ}\text{C}$ (modul)
Suhu Penyimpanan	−40 $^{\circ}\text{C}$ hingga +85 $^{\circ}\text{C}$

Dengan mengintegrasikan modul Peltier TEC1-12706 ke dalam sistem otomatisasi berbasis ESP32, perangkat mampu melakukan pengendalian suhu secara lebih presisi melalui prinsip efek termoelektrik. Modul ini dapat menghasilkan perbedaan suhu yang signifikan antara sisi panas dan sisi dingin, sehingga memungkinkan sistem untuk menurunkan suhu ruang inkubasi atau menjaga kestabilan suhu sesuai setpoint yang telah ditentukan. Pemanfaatan Peltier sangat penting dalam konteks budidaya jamur tiram, karena kondisi suhu yang terlalu tinggi dapat menghambat pertumbuhan miselium dan menurunkan kualitas hasil panen. Dengan dukungan kontrol PID yang terintegrasi, penggunaan Peltier tidak hanya meningkatkan stabilitas lingkungan inkubasi, tetapi juga memastikan efisiensi energi dan umur pakai perangkat lebih panjang. Hal ini menjadikan sistem monitoring dan kontrol berbasis ESP32 lebih andal dalam menjaga lingkungan tumbuh yang optimal bagi jamur tiram.

2.2.13 Nozzle Spray

Nozzle spray merupakan komponen mekanik berbasis tekanan fluida yang dirancang untuk menghasilkan semprotan air dalam bentuk partikel mikro, menyerupai kabut. Komponen ini bekerja dengan cara menyemburkan air bertekanan yang dihasilkan oleh pompa melalui lubang kecil berdiameter sangat sempit yang terletak pada ujung nozzle. Tekanan dari pompa 12V DC menyebabkan air terdorong dengan kecepatan tinggi, dan ketika air keluar dari celah sempit tersebut, ia mengalami atomisasi yakni proses pemecahan partikel fluida menjadi butiran sangat kecil yang tersebar sebagai kabut halus. Proses ini tidak hanya membantu distribusi air merata, tetapi juga meningkatkan efisiensi pelembapan udara di dalam ruang tertutup seperti inkubator budidaya jamur.

Dalam sistem inkubator jamur yang dirancang, nozzle spray kabut berfungsi sebagai output aktuator yang secara langsung berkorelasi dengan pompa DC 12V. Ketika sistem mendeteksi bahwa tingkat kelembapan berada di bawah ambang batas yang telah ditentukan, mikrokontroler ESP32 akan mengaktifkan pompa. Aliran air yang ditransmisikan oleh pompa kemudian diarahkan menuju nozzle, yang menyebarkan air menjadi kabut ke seluruh ruang inkubator. Ini memungkinkan peningkatan kelembapan secara bertahap namun merata, tanpa menimbulkan genangan air yang dapat mengganggu pertumbuhan jamur atau memicu pertumbuhan mikroorganisme patogenik.

Pemanfaatan nozzle spray kabut dalam sistem kontrol ini sangat relevan dalam konteks pertanian presisi dan teknologi modern. Kelembapan udara yang konsisten dan tersebar merata merupakan salah satu faktor lingkungan mikro paling krusial dalam fase pertumbuhan miselium jamur. Dengan mengintegrasikan metode kontrol PID, sistem ini mampu menghitung dan meminimalkan selisih antara kelembapan aktual dan target, sehingga pompa dan nozzle hanya bekerja bila diperlukan, yang tidak hanya hemat energi tetapi juga menjaga kondisi lingkungan tetap stabil.

Penggunaan nozzle spray kabut secara teknis memiliki beberapa keunggulan dibanding metode konvensional seperti penyiraman langsung atau sistem kabut ultrasonik. Selain konsumsi daya yang lebih rendah, efektivitas

penyebaran kelembapan yang dihasilkan juga lebih tinggi karena kabut mampu mengisi ruang dengan cepat tanpa merusak struktur jamur muda yang sensitif terhadap air dalam bentuk tetesan besar. Oleh karena itu, nozzle spray kabut menjadi solusi optimal dalam sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan inkubator jamur otomatis berbasis mikrokontroler ESP32 yang membutuhkan presisi kelembapan tinggi dan respons cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan internal inkubator.



Gambar 2. 12 Nozzle Spray Kabut

2.2.14 Sistem Monitoring

Dalam era transformasi digital dan pertanian presisi (*precision agriculture*), integrasi teknologi monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) telah menjadi komponen esensial dalam menunjang keberhasilan budidaya jamur yang bergantung pada stabilitas suhu dan kelembapan. Sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan pada inkubator jamur berbasis mikrokontroler ESP32 yang dikembangkan dalam penelitian ini merupakan solusi cerdas yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian parameter lingkungan secara *real-time* dan presisi. Penggunaan *platform* Blynk sebagai antarmuka monitoring berbasis aplikasi memperkuat kapabilitas sistem dalam mendukung automasi dan pengawasan jarak jauh melalui jaringan internet.

Sistem ini bekerja dengan membaca data suhu dan kelembapan menggunakan sensor DHT22 yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32. Sensor ini mampu mengukur suhu dengan rentang -40°C hingga $+80^{\circ}\text{C}$ dan kelembapan dengan akurasi $\pm 2\text{--}5\%$ RH, yang sangat sesuai untuk keperluan inkubasi jamur yang

membutuhkan kisaran suhu antara 22–28°C dan kelembapan relatif di atas 80% untuk menjaga kelembapan media tanam serta mempercepat pertumbuhan miselium. Seluruh data dari sensor dikirim secara nirkabel ke aplikasi Blynk melalui konektivitas Wi-Fi yang terhubung dengan ESP32.

Blynk berperan sebagai pusat monitoring yang memvisualisasikan data suhu dan kelembapan dalam bentuk display gauge, indikator angka (value display), dan kontrol interaktif (slider dan button). Melalui aplikasi ini, pengguna dapat memantau kondisi inkubator secara *real-time* kapan pun dan di mana pun selama terhubung ke jaringan internet. Keunggulan utama sistem ini terletak pada kemampuannya untuk memberikan akses pemantauan berkelanjutan terhadap fluktuasi suhu dan kelembapan serta memungkinkan intervensi pengguna melalui Blynk untuk mengatur setpoint suhu atau mengaktifkan pompa penyemprot kabut secara manual apabila diperlukan. Dengan demikian, keterlibatan manusia dalam pengawasan langsung dapat diminimalkan, sejalan dengan tren automasi pertanian cerdas (smart farming)[31].

Secara teknis, mikrokontroler ESP32 tidak hanya berperan sebagai pusat pemrosesan data sensor, tetapi juga mengimplementasikan algoritma kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative) untuk menjaga suhu tetap stabil pada nilai setpoint. Output dari PID digunakan untuk mengatur kecepatan kipas exhaust secara bertahap menggunakan sinyal PWM. Pemanfaatan PID memberikan pengendalian yang lebih presisi dan efisien dibandingkan metode on-off konvensional. Sistem kontrol berbasis PID pada inkubator tanaman terbukti mampu mengurangi deviasi suhu hingga 40% dibandingkan sistem manual. Dengan kombinasi sistem monitoring dan kontrol yang terintegrasi ini, stabilitas parameter lingkungan dalam inkubator jamur dapat dicapai dengan optimal[32].

Dengan demikian, sistem kontrol dan monitoring berbasis ESP32 dan aplikasi Blynk dalam penelitian ini bukan hanya menjadi alat bantu teknis, tetapi juga menjadi representasi dari kemajuan teknologi pertanian modern yang mampu meningkatkan produktivitas, efisiensi energi, dan konsistensi hasil panen melalui pengendalian parameter lingkungan yang terotomatisasi dan berbasis data. Sistem

ini dapat terus dikembangkan untuk mendukung keberlanjutan sektor pertanian digital di masa depan.

2.2.15 Aplikasi Blynk

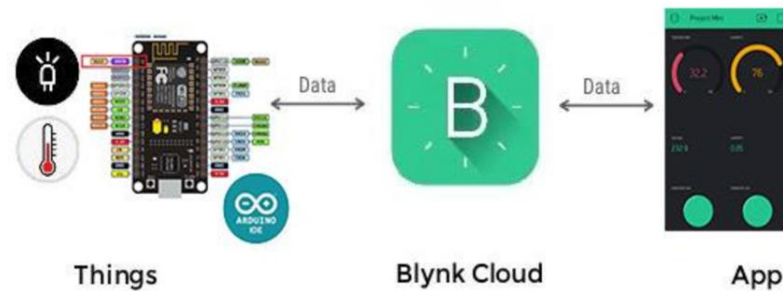
Blynk merupakan salah satu *platform Internet of Things* (IoT) berbasis cloud yang dirancang untuk memungkinkan pengguna mengontrol dan memantau perangkat keras seperti mikrokontroler melalui aplikasi mobile secara real-time. *Platform* ini mendukung berbagai jenis mikrokontroler termasuk ESP32, dan memungkinkan komunikasi dua arah antara perangkat dan smartphone melalui koneksi internet. Blynk menyediakan antarmuka pengguna (UI) yang intuitif dalam bentuk widget seperti tombol, grafik, LCD virtual, slider, dan lainnya, yang dapat disusun langsung dari aplikasi tanpa perlu pemrograman antarmuka yang kompleks. Komunikasi data antara mikrokontroler dan server Blynk dilakukan menggunakan protokol TCP/IP atau HTTP, yang menjadikan proses pemantauan menjadi efisien dan mudah diakses dari mana saja.

Dalam perancangan sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan pada inkubator budidaya jamur tiram ini, Blynk berperan sebagai media kontrol dan pemantauan data lingkungan secara *real-time* melalui smartphone. Mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan sensor DHT22 akan membaca parameter suhu serta kelembapan udara secara berkala, lalu mengirimkan data tersebut ke server Blynk melalui koneksi WiFi. Informasi ini kemudian ditampilkan secara visual pada aplikasi Blynk dalam bentuk gauge dan indikator digital, sehingga pengguna dapat memantau kondisi inkubator secara langsung tanpa perlu berada di lokasi.

Keunggulan utama Blynk dalam sistem ini adalah kemudahan integrasi dengan ESP32 serta kemampuannya menyajikan data secara cepat dan responsif. Selain itu, Blynk juga mendukung fitur notifikasi yang memungkinkan sistem memberikan peringatan otomatis jika suhu atau kelembapan berada di luar ambang batas yang telah ditentukan. Hal ini sangat penting dalam budidaya jamur, di mana perubahan kondisi lingkungan sekecil apa pun dapat berdampak signifikan pada hasil panen. Dengan menggunakan Blynk, pengguna dapat melakukan evaluasi dan

intervensi lebih cepat terhadap kondisi inkubator yang pada akhirnya meningkatkan efektivitas dan efisiensi proses budidaya.

Dengan integrasi Blynk dalam sistem berbasis ESP32 ini, pengendalian suhu dan kelembapan inkubator jamur tidak hanya menjadi otomatis dan presisi melalui algoritma PID, tetapi juga menjadi sistem yang terhubung (connected), cerdas (smart), dan adaptif terhadap dinamika lingkungan. Keberadaan Blynk menjadikan sistem ini sangat relevan dalam konteks perkembangan teknologi digital dan IoT saat ini, di mana keterhubungan dan kendali jarak jauh menjadi standar baru dalam sistem otomasi modern.



Gambar 2. 13 Blynk