

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Sistem penyiraman otomatis merupakan teknologi yang memungkinkan tanaman mendapatkan suplai air secara otomatis berdasarkan data yang dikumpulkan oleh sensor [1]. Untuk menerapkan sistem penyiraman otomatis yang lebih akurat dan efisien, perlu dilakukan pendekatan pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) yang didasarkan pada tren historis dari data sensor. Teknologi ini bertujuan untuk mengoptimalkan efisiensi penggunaan air, mengurangi tenaga kerja, serta memastikan tanaman mendapatkan air dalam jumlah yang cukup sesuai kebutuhannya. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32 yang terhubung ke jaringan internet, memungkinkan pemantauan dan pengendalian penyiraman secara jarak jauh melalui aplikasi. Untuk mengembangkan sistem penyiraman otomatis berbasis IoT yang lebih akurat dan efisien, perlu dilakukan pemahaman terhadap penelitian-penelitian sebelumnya yang memiliki relevansi dengan penelitian ini.

1. Penelitian yang dilakukan oleh M. D. Prasetyo, B. Kurniawan, dan T. Wijaya dalam e-Proceeding of Engineering (2022) dengan judul “Sistem Monitoring Kelembapan Tanah dan Suhu Udara Berbasis IoT untuk Optimasi Penyiraman Tanaman”, membahas implementasi sensor DHT22 dan *Soil Moisture* sensor dalam sistem monitoring kelembapan tanah. Penelitian ini menggunakan NodeMCU ESP8266 untuk menghubungkan sistem dengan aplikasi pemantauan berbasis web. Hasil penelitian menunjukkan bahwa monitoring secara real-time dapat membantu pengguna dalam menentukan waktu penyiraman yang lebih akurat. Namun, sistem ini masih bergantung pada keputusan manual pengguna untuk mengaktifkan atau menonaktifkan pompa air.

2. Penelitian yang dilakukan oleh R. Firmansyah, R. H. Sari, dan A. F. Saputra dalam Jurnal Teknik Informatika (2023) dengan judul “Rancang Bangun Sistem Irigasi Cerdas Berbasis IoT Menggunakan Mikrokontroler ESP32”, membahas sistem penyiraman otomatis menggunakan sensor kelembapan tanah yang dikendalikan oleh ESP32 dan aplikasi Blynk. Penelitian ini hanya menggunakan logika threshold, yaitu menyiram ketika nilai sensor di bawah batas tertentu. Penelitian ini belum menggunakan metode prediktif. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah pada pendekatan prediktifnya. Sistem yang dirancang dalam tugas akhir ini menggunakan metode *Moving Average* untuk menganalisis tren data historis kelembapan tanah dan lingkungan, sehingga dapat memprediksi kebutuhan penyiraman sebelum tanah benar-benar kering. Dengan begitu, penyiraman menjadi lebih efisien dan tanaman tidak kekurangan air secara tiba-tiba.
3. Selanjutnya, penelitian dilakukan oleh A. Wibowo dan E. Kurniawan (2022) dengan judul “Monitoring Suhu dan Kelembapan Tanaman Menggunakan ESP32 dan Sensor DHT22 dengan Integrasi Cloud”. Penelitian ini berfokus pada pemantauan lingkungan tanaman dengan sensor suhu dan kelembapan, yang datanya dikirimkan ke Google Sheet melalui ESP32. Penelitian ini tidak membahas penyiraman otomatis atau metode prediktif.
4. Penelitian oleh A. N. Rachman dan D. Ramadhani (2021) dalam jurnal Smart Agriculture System berjudul “Implementasi Machine Learning untuk Prediksi Penyiraman Tanaman Berbasis IoT” menunjukkan bahwa pendekatan prediksi dapat meningkatkan efisiensi air, namun metode yang digunakan adalah klasifikasi Machine Learning. Tugas akhir ini mengambil pendekatan yang berbeda, yaitu metode statistik sederhana *Moving Average* yang lebih ringan untuk diimplementasikan pada mikrokontroler seperti ESP32.

2.2 Dasar Teori

Sistem penyiraman otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) merupakan solusi modern dalam bidang pertanian yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air serta mengoptimalkan pertumbuhan tanaman [2]. Dalam metode konvensional, penyiraman tanaman masih mengandalkan tenaga manusia, yang sering kali menyebabkan ketidakkonsistenan dalam jumlah air yang diberikan, terutama ketika faktor seperti kelembapan tanah dan suhu udara tidak diperhitungkan secara akurat.

Selain itu, penyiraman manual juga memerlukan tenaga kerja yang lebih banyak serta waktu yang tidak efisien, terutama pada skala pertanian yang luas. Untuk mengatasi permasalahan ini, dikembangkanlah sistem penyiraman otomatis berbasis mikrokontroler ESP32, yang dapat mengontrol penyiraman berdasarkan sensor kelembapan tanah, suhu udara, dan sensor cahaya BH1750.

Sistem ini bekerja dengan membaca data dari sensor, kemudian menganalisis apakah tanaman memerlukan penyiraman atau tidak. Namun, pendekatan berbasis real-time saja masih memiliki keterbatasan, karena hanya mempertimbangkan kondisi saat ini tanpa memperhitungkan prediksi kondisi ke depan. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem penyiraman otomatis yang tidak hanya berbasis data sensor real-time, tetapi juga mampu memprediksi kebutuhan air tanaman dalam dua hari ke depan, sehingga keputusan penyiraman menjadi lebih optimal dan efisien.

2.2.1. Penyiraman Otomatis Berbasis Mikrokontroler

Penyiraman otomatis merupakan salah satu bentuk pemanfaatan teknologi mikrokontroler untuk meningkatkan efisiensi dalam bidang pertanian, khususnya dalam proses irigasi. Sistem ini dirancang untuk dapat bekerja tanpa campur tangan manusia secara langsung, dengan cara membaca kondisi lingkungan melalui sensor

dan secara otomatis mengaktifkan pompa atau aktuator air saat dibutuhkan[3]. Teknologi ini dinilai mampu mengatasi tantangan penyiraman manual seperti ketidakkonsistenan waktu, pemborosan air, dan beban kerja manusia yang tinggi.



Gambar 2. 1 Penyiraman Otomatis

Inti dari sistem ini adalah mikrokontroler, yang berfungsi sebagai pusat pemrosesan data dan pengambilan keputusan. Sensor kelembaban tanah akan mengukur kadar air di media tanam, dan hasil pengukurannya dikirim ke mikrokontroler seperti ESP32. Berdasarkan logika yang telah diprogram, mikrokontroler akan menentukan apakah kondisi tersebut memerlukan penyiraman atau tidak. Jika iya, maka sistem akan memicu pompa air atau membuka solenoid valve untuk mengalirkan air ke tanaman.

Komponen utama dalam sistem ini meliputi sensor kelembaban tanah (baik resistif maupun kapasitif), mikrokontroler ESP32, pompa air atau katup elektromagnetik, serta sumber daya listrik. Dalam beberapa sistem, ditambahkan pula koneksi internet agar data sensor dapat dikirim ke platform cloud seperti ThingSpeak untuk dianalisis lebih lanjut atau dipantau secara jarak jauh.

Keunggulan dari sistem penyiraman otomatis berbasis mikrokontroler dibanding penyiraman manual cukup signifikan. Sistem ini mampu menghemat penggunaan air dengan menyiram secara selektif, memastikan konsistensi waktu

penyiraman, serta mengurangi keterlibatan manusia dalam tugas berulang. Hal ini tentu sangat membantu terutama dalam skala pertanian yang luas atau pada lahan dengan kebutuhan penyiraman khusus.

2.2.2. Internet of Things (IoT)



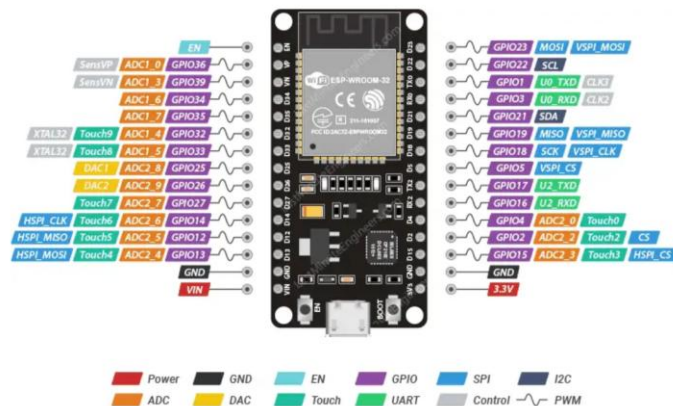
Gambar 2. 2 Internet of Things

Internet of Things (IoT) merupakan konsep teknologi yang menghubungkan perangkat fisik ke jaringan internet sehingga dapat saling berkomunikasi, mengirim, dan menerima data secara otomatis tanpa interaksi langsung dari manusia. Perangkat-perangkat ini dilengkapi dengan sensor, aktuator, dan modul komunikasi yang memungkinkan mereka memantau kondisi lingkungan dan menjalankan perintah berdasarkan informasi yang diperoleh. Dalam konteks sistem otomasi, termasuk penyiraman tanaman, IoT memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi, akurasi, dan keterpantauan jarak jauh[4].

Mikrokontroler seperti ESP32 menjadi komponen inti dalam implementasi IoT karena memiliki kemampuan koneksi Wi-Fi dan Bluetooth yang memungkinkan integrasi dengan platform cloud seperti ThingSpeak. Dengan adanya IoT, proses pengambilan keputusan dapat diotomatisasi secara real-time, memungkinkan tindakan seperti penyiraman atau perawatan dilakukan berdasarkan kondisi aktual yang

terpantau, bukan hanya berdasarkan jadwal tetap. Hal ini menjadikan IoT sebagai solusi yang sangat potensial dalam bidang pertanian presisi, smart farming, dan sistem monitoring lingkungan secara cerdas dan adaptif.

2.2.3. Mikrokontroler ESP32



Gambar 2. 3 ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler yang memiliki fitur Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, sehingga cocok digunakan dalam proyek berbasis IoT. ESP32 memiliki kemampuan pemrosesan yang tinggi dengan konsumsi daya rendah, sehingga ideal untuk sistem penyiraman otomatis berbasis IoT. Mikrokontroler ini berfungsi sebagai pusat kendali yang menerima data dari berbagai sensor dan mengontrol mosfet untuk mengaktifkan pompa air.

ESP32 memiliki hingga 30 GPIO pin yang dapat dikonfigurasi untuk berbagai fitur seperti :

1. Digital Input/Output: Untuk membaca dan mengontrol sinyal digital
2. PWM (Pulse Width Modulation): Untuk mengontrol perangkat seperti motor dan lampu LED dengan sinyal gelombang lebar pulsa.

3. ADC (Analog to Digital Converter): Membaca sinyal analog dari sensor, seperti sensor suhu, kelembapan, atau cahaya.
4. DAC (Digital to Analog Converter): Menghasilkan sinyal analog dari data digital.
5. I2C, SPI, dan UART: Untuk komunikasi serial dengan perangkat eksternal seperti sensor, display, atau modul komunikasi.

Tabel 2. 1 Spesifikasi ESP-32

Kategori	Spesifikasi
Mikrokontroller	ESP32
CPU	Dual-core Xtensa® 32-bit LX6
Kecepatan Clock	Hingga 240 MHz
Memori RAM	520 KB SRAM
Memori ROM	448 KB
Konektivitas	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth (Classic dan BLE)
GPIO (General Purpose I/O)	34 pin GPIO yang dapat dikonfigurasi untuk berbagai fungsi
Tegangan Operasi	3,3V (tegangan kerja)
Arus Maksimum per Pin	Sekitar 12 mA per pin
ADC (Analog-to-Digital Converter)	12-bit resolusi, hingga 18 saluran ADC (tergantung model)

DAC (Digital-to-Analog Converter)	8-bit resolusi, 2 saluran DAC
PWM (Pulse Width Modulation)	Ya, hingga 16 saluran PWM
SPI (Serial Peripheral Interface)	Ya, hingga 4 saluran SPI (tergantung model)
I2C (<i>Inter-Integrated Circuit</i>)	Ya, 2 saluran I2C
UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)	Ya, hingga 3 saluran UART
Regulator Internal	Regulator 3.3V terintegrasi

2.2.4. Sensor Kelembapan Tanah (*Soil Moisture Sensor*)



Gambar 2. 4 Soil Moisture

Sensor kelembapan tanah digunakan untuk mengukur kadar air dalam tanah. Sensor ini berfungsi dengan mendeteksi resistansi atau kapasitansi tanah dan mengonversinya menjadi nilai kelembapan. Dalam sistem ini, data dari sensor

kelembapan tanah akan digunakan sebagai salah satu parameter utama untuk menentukan kebutuhan penyiraman tanaman. Pada saat kondisi tanah :

- Basah : tegangan output akan turun
- Kering : tegangan output akan naik

Tabel 2. 2 Spesifikasi Capacitive Soil Moisture

Operating Voltage	3.3 – 5.5 V
Operating Current	< 5mA
Output Voltage at 5V	1.5 – 3 V
Sensor Probe L x W (PCB)	98 x 23mm (3.86 x 0.91)
Cable Lenght	20 cm

Tabel 2. 3 Pinout Capacitive Soil Moisture

Pin	ESP32 pin
VCC	3.3 V ESP32
Analog Output	GPIO34
GND	GND ESP32

2.2.5. Sensor Suhu dan Kelembapan Udara (DHT22)



Gambar 2. 5 Sensor DHT22

Sensor DHT22 adalah sensor yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara. Suhu dan kelembapan udara sangat mempengaruhi tingkat penguapan air dari tanah, sehingga menjadi faktor penting dalam prediksi kebutuhan air tanaman. Data dari sensor ini akan digunakan sebagai bagian dari sistem pengambilan keputusan dalam penyiraman otomatis.

Tabel 2. 4 Spesifikasi Sensor Suhu DHT-22

Tegangan input	3,3 – 6 VDC
Sistem komunikasi	Serial (single – Wire Two Way)
Range suhu	-40 ⁰ C – 80 ⁰ C
Range kelembapan	0% - 100% RH
Akurasi	±2°C (temperature) ±5% RH (humidity)

Tabel 2. 5 Pinout DHT-22

Pin	Fungsi	Hubungkan ke ESP32
VCC	Power 3.3V/5V	3.3V (atau 5V)
Data	Data digital	GPIO 15
GND	Ground	GND

2.2.6. Sensor Cahaya BH1750



Gambar 2. 6 Sensor Cahaya BH1750

Sensor cahaya BH1750 merupakan sensor cahaya berbasis digital yang digunakan untuk mengukur intensitas cahaya dalam satuan lux. Sensor ini mengubah intensitas cahaya yang diterimanya menjadi data digital yang kemudian dapat dibaca langsung oleh mikrokontroler seperti ESP32. Berbeda dengan sensor cahaya analog seperti LDR, BH1750 memberikan hasil pembacaan yang lebih akurat dan stabil. RTC (Real-Time Clock)

BH1750 bekerja dengan prinsip fotodiode yang dikombinasikan dengan penguat sinyal dan analog-to-digital converter (ADC) internal. Intensitas cahaya yang diterima akan diubah menjadi sinyal listrik, lalu dikonversi menjadi data digital 16bit.

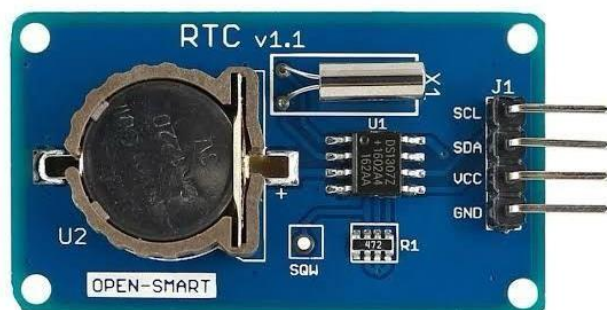
Data ini dikirimkan ke mikrokontroler melalui protokol komunikasi I2C, yang menggunakan dua jalur utama: SDA (data) dan SCL (clock).

Tabel 2. 6 Pimout BHI750

VCC	Menghidupkan sensor (3.3V atau 5V)
GND	Ground
SCL	Pin SCL untuk Komunikasi I2 C
SDA (Data)	Pin SDA untuk komunikasi I2 C
ADD	Memilih alamat

Pin ADD digunakan untuk mengatur alamat sensor I2C. Jika tegangan pada pin tersebut kurang dari 0.7VCC (pin dibiarkan melayang atau dihubungkan ke GND), alamat I2C adalah 0x23. Namun, jika tegangan lebih tinggi dari 0.7xVCC (pin dihubungkan ke VCC), alamatnya adalah 0 x 5C. Ringkasannya adalah sebagai berikut:

2.2.7. RTC (Real-Time Clock)



Gambar 2. 7 Real-Time Clock

Modul RTC (Real-Time Clock) digunakan untuk menyimpan waktu dan tanggal secara akurat meskipun sistem mengalami mati daya. RTC memungkinkan sistem untuk memprediksi kebutuhan air tanaman berdasarkan pola penyiraman sebelumnya serta mencatat data historis kelembapan tanah untuk analisis lebih lanjut.

Tabel 2. 7 Pin RTC DS3231

Nama Pin	Deskripsi
VCC	Hubungkan ke sumber
GND	Hubungkan ke Ground
SDA	Serial Data pin (I2C interface)
SCL	Serial Clock Pin (I2C interface)

2.2.8. Mosfet dan Pompa Air DC



Gambar 2. 8 Mosfet

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) adalah salah satu jenis transistor yang paling banyak digunakan dalam dunia elektronika, khususnya sebagai saklar atau penguat sinyal dalam rangkaian digital dan analog. MOSFET

memiliki tiga terminal utama yaitu Gate (G), Drain (D), dan Source (S). MOSFET dikendalikan oleh tegangan yang diberikan pada terminal Gate. Tegangan pada Gate ini akan mengatur apakah arus dapat mengalir antara Drain dan Source, sehingga MOSFET sangat cocok digunakan sebagai saklar elektronik berkecepatan tinggi.

Tabel 2. 8 Pinout Mosfet

Pin	Pin ESP-32
Gate	GPIO 27 ESP32
Drain	Positif Pompa
Source	GND ESP32 / GND Pompa

Cara kerja MOSFET dalam sistem penyiraman otomatis adalah sebagai pengendali aliran arus ke pompa air. Ketika mikrokontroler mengirimkan sinyal logika tinggi ke Gate MOSFET, kanal antara Drain dan Source terbuka, sehingga arus listrik dapat mengalir dan mengaktifkan pompa. Sebaliknya, ketika sinyal logika rendah diberikan ke Gate, kanal tertutup dan arus tidak dapat mengalir, sehingga pompa akan berhenti.



Gambar 2. 9 Pompa DC

Selain itu, MOSFET juga mendukung pengaturan daya secara dinamis melalui sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) dari ESP32. Hal ini memungkinkan sistem

untuk tidak hanya menghidupkan atau mematikan pompa, tetapi juga mengatur kecepatan atau intensitas penyiraman sesuai dengan kebutuhan. Sebagai contoh, pada kondisi kelembapan tanah yang hanya sedikit menurun, sistem dapat memberikan penyiraman ringan; sementara pada kondisi yang sangat kering, penyiraman bisa lebih kuat. Dengan demikian, penggunaan MOSFET dalam sistem pot pintar memberikan fleksibilitas dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan saklar mekanik biasa. Pompa air akan aktif secara otomatis ketika sensor kelembapan tanah mendeteksi kadar air berada di bawah ambang batas tertentu, dan akan berhenti saat kelembapan mencapai tingkat optimal.

2.2.9. Adaptor 12 V



Gambar 2. 10 Adaptor 12 V

Adaptor adalah perangkat yang berfungsi untuk mengubah tegangan dari sumber listrik utama (AC 220V) menjadi tegangan DC yang lebih rendah dan stabil yang dibutuhkan oleh rangkaian elektronika. Dalam perancangan sistem pot pintar berbasis ESP32, adaptor 12V DC digunakan sebagai sumber daya utama untuk menyuplai arus ke berbagai komponen sistem.

Adaptor 12V dipilih karena memiliki kapasitas daya yang cukup untuk menjalankan ESP32, pompa DC, serta modul-modul lainnya secara bersamaan.

Namun, karena tidak semua komponen dapat menerima tegangan sebesar 12V, maka perlu dilakukan proses penyesuaian tegangan.

2.2.10. Buck Converter



Gambar 2. 11 Buck Converter

Buck Converter merupakan rangkaian konversi tegangan DC ke DC yang berfungsi untuk menurunkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih rendah secara efisien. Dalam sistem pot pintar berbasis ESP32, *Buck Converter* dimanfaatkan untuk menurunkan tegangan dari adaptor 12 Volt menjadi 5 Volt, yang kemudian digunakan untuk memberi daya pada mikrokontroler dan sensor-sensor pendukung seperti sensor suhu dan kelembapan (DHT22), sensor intensitas cahaya (BH1750), serta modul lainnya.

Tabel 2. 9 Pinout Buck Converter

Pin	Pin ESP-32
Vin	Adaptor 12 V DC
GND	GND Adaptor & ESP32

SCA/SCL	VCC Pompa, LCD
---------	----------------

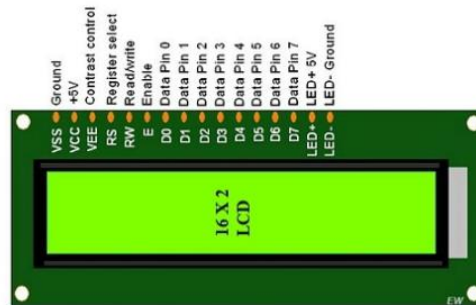
Cara kerja *Buck Converter* memanfaatkan teknik switching, di mana MOSFET dikendalikan oleh sinyal PWM (Pulse Width Modulation). Saat MOSFET aktif (ON), arus mengalir melalui induktor dan energi disimpan dalam bentuk medan magnet. Ketika MOSFET tidak aktif (OFF), energi dari induktor dilepaskan ke beban dan kapasitor output untuk menjaga tegangan tetap stabil. Dengan siklus switching ini, *Buck Converter* mampu mengatur besar kecilnya tegangan output berdasarkan rasio antara waktu ON dan OFF (duty cycle).

Dalam perancangan alat ini, tegangan 12V dari adaptor diturunkan menjadi 5V melalui *Buck Converter* agar semua komponen memperoleh suplai tegangan yang sesuai. Tegangan yang stabil sangat diperlukan agar sistem bekerja optimal, mencegah kerusakan akibat tegangan berlebih, dan menjaga kinerja dari sensor serta mikrokontroler. Dengan penerapan *Buck Converter*, efisiensi daya meningkat dan kestabilan sistem prediksi penyiraman otomatis dapat terjaga.

Tabel 2. 10 Spesifikasi Buck Converter LM2596

Iout (max) (A)	3 A
Vin (max) (V)	40 V
Vin (min) (V)	4.5 V
Vout (max) (V)	37 V
Vout (min) (V)	3.3 V
Duty cycle (max) (100 %)	100 %

2.2.11. LCD 16x2



Gambar 2. 12 LCD 16x2

LCD 16×2 adalah modul layar karakter yang mampu menampilkan enam belas kolom dan dua baris teks. Sebagian besar modul ini menggunakan pengendali HD44780 atau yang kompatibel, sehingga perintah, timing, dan tata cara pemrogramannya relatif seragam lintas merek. Tiap karakter dirender dalam matriks 5×8 dot (tersedia juga mode 5×10 pada beberapa varian), dengan memori internal yang terdiri atas DDRAM untuk data tampilan, CGROM untuk font bawaan, serta CGRAM yang memungkinkan pembuatan hingga delapan karakter kustom. Pemetaan alamat umumnya menempatkan baris pertama pada rentang 0x00–0x0F dan baris kedua pada 0x40–0x4F, sementara posisi kursor diatur melalui instruksi Set DDRAM Address.

Tabel 2. 11 Spesifikasi LCD 16x2

Tegangan yang diterima	4,7V – 5,3V
Ukuran Layar	72 x 25mm
Arua	1mA
Ukuran PCB modul	80L x 36W x 10H mm
Jumlah pin LCD	16

Kolom & Baris	32
---------------	----

Tabel 2. 12 Pinout LCD 16x2

Pin	Pin ESP-32
VCC	5V Buck Converter
GND	GND Buch Converter
SCA / SCL	GPIO 21/22

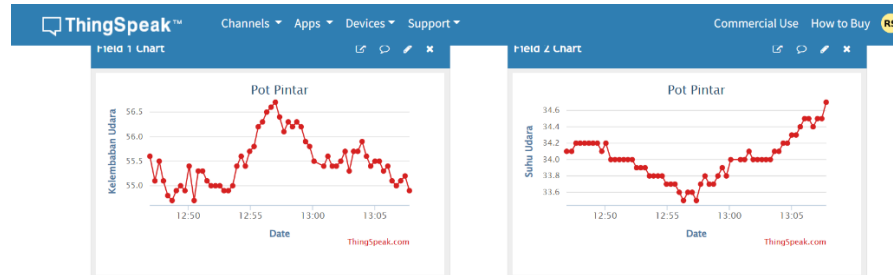
2.2.12. Aplikasi Blynk



Gambar 2. 13 Blynk

Aplikasi Blynk digunakan sebagai antarmuka pemantauan jarak jauh berbasis IoT. Dengan Blynk, pengguna dapat melihat data sensor secara real-time, mengontrol pompa air secara manual, serta menerima notifikasi jika tanaman memerlukan penyiraman[5].

2.2.13. Analisis Deret Waktu (Time Series)



Gambar 2. 14 Time Series

Analisis deret waktu adalah metode statistik yang digunakan untuk menganalisis urutan data yang dikumpulkan secara berkala berdasarkan waktu. Dalam konteks sistem pot pintar berbasis ESP32 ini, deret waktu digunakan untuk memahami perubahan lingkungan tanaman dari waktu ke waktu, sehingga dapat diterapkan metode prediktif berbasis *Moving Average*.

Penerapan analisis deret waktu ini memungkinkan sistem tidak hanya merespon kondisi saat ini, tetapi juga melakukan prediksi berdasarkan pola sebelumnya. Dengan demikian, sistem menjadi lebih adaptif dan efisien dalam melakukan penyiraman secara otomatis.

2.2.14. Kelembapan Tanah Tanaman Cabai

Kelembapan tanah merupakan salah satu faktor lingkungan yang sangat memengaruhi pertumbuhan dan produktivitas tanaman cabai (*Capsicum annuum* L.). Kelembapan tanah yang optimal diperlukan untuk memastikan ketersediaan air bagi proses fisiologis seperti fotosintesis, transpirasi, dan transportasi hara. Tanah yang terlalu kering akan menyebabkan tanaman mengalami cekaman air (water stress), sedangkan tanah yang terlalu basah dapat mengakibatkan gangguan aerasi, pembusukan akar, dan perkembangan penyakit tular tanah.

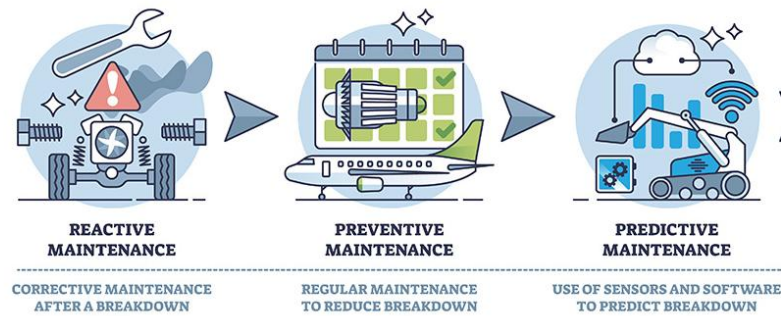
Menurut Yadav dan Kashyap (2018), tingkat kelembapan tanah yang sesuai untuk pertumbuhan optimal tanaman cabai berada pada kisaran 60–80% kapasitas lapang (field capacity)[6]. Pada kelembapan di bawah 40%, tanaman mulai menunjukkan gejala cekaman air seperti layu pada siang hari, penurunan laju fotosintesis, dan perlambatan pertumbuhan. Sementara itu, kelembapan di atas 85–90% dalam jangka waktu lama dapat memicu pertumbuhan jamur patogen dan mengganggu sistem perakaran.

Tabel 2. 13 Batas Aman Kelembapan

Kondisi Kelembapan	Persen Kelembapan (%)	Dampak Pada Tanaman
Sangat Kering	<40%	Layu, cekaman air, penurunan fotosintesis, pertumbuhan terhambat
Optimal	60-80%	Pertumbuhan maksimal, produktivitas tinggi
Terlalu Basah	>80%	Risiko pembusukan akar, penyakit tular tanah, gangguan aerasi

Penelitian oleh Singh et al. (2020) juga menegaskan bahwa kelembapan tanah yang stabil di kisaran 60–70% mampu meningkatkan produksi buah cabai dan mempertahankan kualitasnya. Sebaliknya, kelembapan yang berfluktuasi secara ekstrem akan memengaruhi pembentukan bunga dan menyebabkan kerontokan buah muda.

2.2.15. Predictive Maintenance & Control System



Gambar 2. 15 Predictive Maintenance

Predictive Maintenance adalah suatu metode pemeliharaan yang dilakukan dengan memprediksi waktu terjadinya kerusakan atau penurunan kinerja sistem berdasarkan data pemantauan kondisi aktual[7]. Tujuannya adalah melakukan tindakan sebelum masalah terjadi, sehingga mencegah kerugian atau kerusakan yang lebih besar.

Berbeda dengan preventive maintenance yang menjadwalkan perawatan berdasarkan interval waktu tetap, *Predictive Maintenance* memanfaatkan data sensor, analisis tren, dan algoritma prediksi untuk menentukan kapan perawatan atau tindakan diperlukan. Dengan demikian, tindakan hanya dilakukan ketika benar-benar dibutuhkan, sehingga penggunaan sumber daya menjadi lebih efisien.

Tabel 2. 14 Jenis Pemeliharaan

Corrective Maintenance	Perbaikan Setelah Kerusakan[8]
Preventive Maintenance	Perawatan rutin berdasarkan jadwal waktu/jam kerja[9]
Predictive Maintenance	Berdasarkan data/indicator kondisi untuk memprediksi kerusakan[10]

Dalam bidang pertanian, *Predictive maintenance* dapat diterapkan untuk memantau kondisi lingkungan dan media tanam guna mencegah stres tanaman. Contohnya adalah memprediksi kapan kelembapan tanah akan turun di bawah ambang batas tertentu, sehingga sistem penyiraman dapat dilakukan sebelum tanaman mengalami kekurangan air. Pendekatan ini mengandalkan teknologi *Internet of Things* (IoT), sensor lingkungan, dan metode analisis data *Moving Average* untuk membuat keputusan secara otomatis.

Sistem kontrol adalah suatu mekanisme yang digunakan untuk mengatur dan mengendalikan suatu proses atau perangkat agar dapat berjalan sesuai dengan tujuan yang ditetapkan. Sistem ini bekerja dengan cara membandingkan keluaran (*output*) terhadap masukan acuan (*setpoint*), kemudian melakukan tindakan koreksi apabila terjadi penyimpangan. Dengan demikian, sistem kontrol sangat penting dalam otomasi karena mampu menjaga stabilitas, efisiensi, dan keandalan suatu proses.

Tabel 2. 15 Jenis Sistem Kontrol

Closed Loop Control	Sistem ini bekerja dengan umpan balik. Output dibandingkan dengan setpoint, dan sistem melakukan koreksi jika ada perbedaan[11].
Open Loop Control	Sistem ini bekerja tanpa umpan balik dari sensor. Aksi kendali dilakukan hanya berdasarkan waktu yang ditentukan[11].
Predictive Control	Sistem ini menggunakan data historis untuk memprediksi kondisi mendatang, kemudian menentukan aksi kendali sebelum penyimpangan terjadi[12].

Tabel 2.15 menunjukkan perbedaan mendasar dari tiga jenis sistem kontrol yang umum digunakan. Open Loop Control bekerja berdasarkan waktu yang telah ditentukan tanpa melibatkan sensor, sehingga tidak ada umpan balik dari kondisi aktual. Sebaliknya, Closed Loop Control menggunakan sensor sebagai umpan balik untuk membandingkan output dengan setpoint, lalu melakukan koreksi apabila terjadi penyimpangan. Sementara itu, Prediction Control lebih maju karena memanfaatkan data historis untuk memprediksi kondisi mendatang dan menentukan aksi kendali sebelum terjadi penyimpangan. Dengan demikian, Prediction Control bersifat antisipatif dan lebih efisien dalam menjaga stabilitas sistem dibandingkan dua metode sebelumnya.

2.2.16. *Moving Average*

Moving Average (MA) adalah metode perataan data yang digunakan untuk mengurangi fluktuasi jangka pendek dan menonjolkan tren jangka panjang dari suatu data deret waktu (time series)[13]. Metode ini bekerja dengan cara menghitung nilai rata-rata dari sejumlah data sebelumnya dalam suatu periode tertentu, kemudian periode tersebut “bergeser” (moving) seiring masuknya data baru.

$$M A_t = \frac{X_t + X_{t-1} + X_{t-2} + \dots + X_{t-(n-1)}}{n} \quad (2.1)$$

Keterangan:

- $M A_t$: nilai *Moving Average* pada waktu ke-t
- X_t : data pada waktu ke-t
- n : jumlah data dalam periode perhitungan rata-rata

Dalam penelitian ini, metode *Moving Average* digunakan untuk memprediksi kelembapan tanah pada 30 menit ke depan berdasarkan rata-rata kelembapan tanah saat ini, 30 menit sebelumnya, dan 60 menit sebelumnya, dengan rumus:

$$y' = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \quad (2.2)$$

Keterangan:

- y' : Nilai Prediksi
- x_2 : Kelembapan tanah saat ini
- x_3 : Kelembapan tanah 30 menit sebelumnya
- x_3 : Kelembapan tanah 60 menit sebelumnya

Dengan metode ini, nilai prediksi menjadi lebih stabil dan tidak terpengaruh oleh noise yang mungkin terjadi pada pembacaan sensor. Prediksi ini digunakan untuk menentukan kapan pompa penyiraman harus diaktifkan agar kelembapan tanah tidak turun di bawah batas minimal yang telah ditentukan, sehingga mendukung prinsip *predictive maintenance*.