



DETEKSI KELEMBABAN TANAH DAN REKOMENDASI PEMUPUKAN BERBASIS ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Muhammad Rifky Akbar^{1*}, Fitria Novyanti Taufik², Ghaida Putri Yunisa³,
Susilawati⁴

^{1,2,3,4} Universitas Singaperbangsa Karawang, Indonesia

2210631170088@student.unsika.ac.id¹, 2210631170021@student.unsika.ac.id²,
2210631170022@student.unsika.ac.id³, susilawati.sobur@staff.unsika.ac.id⁴

Alamat: Jl. HS. Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Kec. Telukjambe Timur

Korespodensi Penulis : Muhammad Rifky Akbar

Email : 2210631170088@student.unsika.ac.id

Abstract. Agriculture is a key sector in supporting national food security, yet it still faces challenges in the efficient use of water and fertilizers. Improper fertilization according to soil conditions can lead to reduced productivity and soil fertility degradation. This study aims to design and develop a soil moisture detection system based on the Internet of Things (IoT), integrated with a simple rule-based Artificial Intelligence (AI). The system employs soil moisture sensors connected to an ESP32 microcontroller, and the data are transmitted in real-time via the MQTT communication protocol to a server for display on a web/mobile application. The AI component provides automated fertilization recommendations based on the detected moisture levels. Implementation results indicate that the system is capable of displaying soil moisture data with a reading accuracy of $\pm 2\%$ and providing timely status updates and fertilization recommendations. Therefore, this system can serve as an initial solution to assist farmers in optimizing fertilizer usage and improving the efficiency of agricultural land management in a sustainable manner.

Keywords: Internet of Things, Soil Moisture, Artificial Intelligence, Fertilization, MQTT

Abstrak. Pertanian merupakan sektor utama dalam menunjang ketahanan pangan nasional, namun masih menghadapi kendala dalam hal efisiensi penggunaan air dan pupuk. Pemupukan yang tidak sesuai dengan kondisi tanah dapat mengakibatkan penurunan produktivitas dan degradasi kesuburan tanah. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan sistem deteksi kelembaban tanah berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan Artificial Intelligence (AI) sederhana berbasis aturan (rule-based). Sistem menggunakan sensor kelembaban tanah yang dihubungkan ke mikrokontroler ESP32, dan data dikirim secara real-time melalui protokol komunikasi MQTT ke server untuk ditampilkan dalam aplikasi berbasis web/mobile. Komponen AI berfungsi memberikan rekomendasi pemupukan otomatis berdasarkan nilai kelembaban yang terdeteksi. Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem mampu menampilkan data kelembaban dengan akurasi pembacaan $\pm 2\%$ dan memberikan status serta rekomendasi pemupukan secara tepat waktu. Dengan demikian, sistem ini dapat menjadi solusi awal untuk membantu petani dalam mengoptimalkan penggunaan pupuk dan meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan pertanian secara berkelanjutan.

Kata kunci: Internet of Things, Kelembaban Tanah, Artificial Intelligence, Pemupukan, MQTT

Article History

Received: November 2025

Reviewed: November 2025

Published: November 2025

Plagiarism Checker No 786

Prefix DOI : Prefix DOI :

10.8734/Kohesi.v1i2.365

Copyright : Author

Publish by : Kohesi



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



1. LATAR BELAKANG

Indonesia merupakan negara agraris yang memiliki ketergantungan tinggi terhadap sektor pertanian. Meskipun demikian, sebagian besar petani masih menggunakan metode konvensional dalam pemupukan dan irigasi, sehingga menghadapi kendala efisiensi penggunaan air dan pupuk. Pemupukan yang tidak sesuai kondisi tanah dapat menurunkan produktivitas tanaman serta mempercepat degradasi kesuburan tanah (Wahyudi & Permatasari, 2025).

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan pengelolaan pertanian berbasis data secara real-time. IoT memungkinkan perangkat sensor di lahan pertanian untuk mengirimkan data kondisi tanah ke aplikasi yang dapat diakses dari jarak jauh. Teknologi ini telah diterapkan pada sistem irigasi otomatis, pengendalian suhu rumah kaca, dan pemantauan kelembaban tanah (Adib & Kurniawan, 2025).

Selain IoT, integrasi Artificial Intelligence (AI) berbasis aturan (rule-based) memungkinkan sistem memberikan rekomendasi pemupukan secara otomatis berdasarkan data kelembaban tanah. Sistem sederhana ini efektif untuk memberikan keputusan awal bagi petani, seperti menentukan waktu dan dosis pemupukan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Merancang sistem IoT untuk mendeteksi kelembaban tanah secara real-time.
2. Mengintegrasikan sistem dengan AI rule-based guna memberikan rekomendasi pemupukan.
3. Mengembangkan aplikasi berbasis web/mobile agar hasil pemantauan mudah diakses.

Manfaat utama penelitian ini adalah sebagai langkah awal penerapan digital farming untuk meningkatkan efisiensi pemupukan dan penggunaan air, serta mendukung pertanian berkelanjutan di Indonesia.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Internet of Things (IoT)

IoT adalah paradigma di mana perangkat fisik saling terhubung melalui jaringan internet untuk berbagi data dan menjalankan fungsi otomatis. Dalam pertanian, IoT disebut smart farming, yaitu sistem yang memanfaatkan data sensor untuk mengoptimalkan penggunaan air, pupuk, dan waktu panen (Kurniawan et al., 2024).

Komponen utama IoT meliputi sensor, mikrokontroler (ESP32), protokol komunikasi (MQTT), cloud, dan aplikasi visualisasi data. Implementasi IoT terbukti dapat mengurangi konsumsi air hingga 30% dan meningkatkan efisiensi pemupukan hingga 25% (Kurniawan et al., 2024).



2.2 Sensor Kelembaban Tanah

Sensor kelembaban tanah bekerja berdasarkan konduktivitas listrik. Semakin tinggi kadar air, resistansi tanah semakin rendah. Data ini diubah menjadi persentase kelembaban, yang menjadi dasar rekomendasi pemupukan.

2.3 Protokol MQTT

MQTT adalah protokol komunikasi ringan berbasis arsitektur publish-subscribe, cocok untuk perangkat IoT dengan keterbatasan memori dan daya. ESP32 bertindak sebagai publisher, mengirim data kelembaban ke broker MQTT, yang kemudian diteruskan ke aplikasi sebagai subscriber. MQTT memiliki paket data lebih kecil, efisiensi bandwidth tinggi, dan mampu bekerja pada jaringan tidak stabil (Safitri & Priambodo, 2023).

2.4 Artificial Intelligence (Rule-Based System)

AI rule-based adalah sistem pengambilan keputusan menggunakan sekumpulan aturan logika (if-else). Pada penelitian ini, AI digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi tanah dan memberikan rekomendasi pemupukan berdasarkan lima kategori: Sangat Kering, Kering, Normal, Lembab, dan Basah. Pendekatan ini dipilih karena tidak memerlukan pelatihan data, mudah diterapkan pada mikrokontroler, dan memberikan keputusan deterministik yang mudah dijelaskan kepada pengguna.

3. METODE PENELITIAN

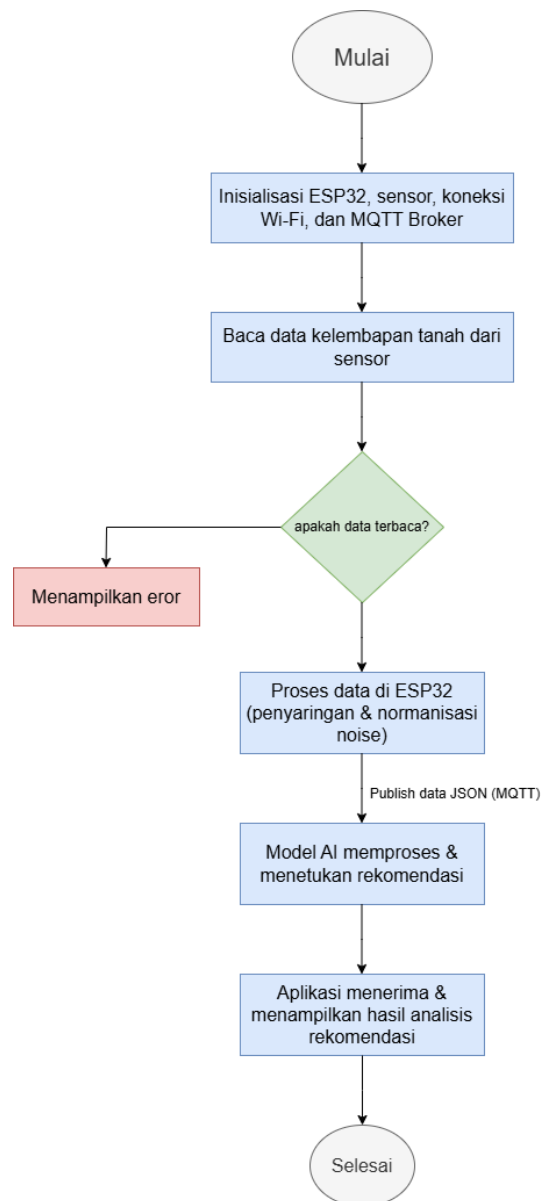
3.1. Desain Sistem

Penelitian ini menggunakan pendekatan Waterfall, karena memiliki tahapan yang jelas dan terstruktur: analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi, pengujian, dan evaluasi.

Sistem terdiri atas lima komponen utama:

1. **Sensor kelembaban tanah** - membaca kadar air dalam tanah.
2. **Mikrokontroler ESP32** - memproses data sensor dan mengirim ke server.
3. **MQTT Broker (HiveMQ)** - media komunikasi antarperangkat IoT.
4. **Aplikasi mobile/web** - menampilkan hasil pembacaan dan rekomendasi.
5. **Modul AI rule-based** - menentukan status tanah dan rekomendasi pupuk.

3.2. Flowchart Sistem



Gambar 3.1 Flowchart Sistem

Flowchart di atas menggambarkan alur kerja sistem deteksi kelembapan tanah berbasis ESP32 dan MQTT yang terintegrasi dengan model kecerdasan buatan (AI).

Sistem diawali dengan inisialisasi perangkat keras, meliputi ESP32, sensor kelembapan tanah, koneksi Wi-Fi, dan pengaturan koneksi ke MQTT Broker. Setelah itu, sensor membaca nilai kelembapan tanah secara real-time. Data hasil pembacaan akan dicek – jika data tidak terbaca atau tidak valid, sistem menampilkan pesan error. Jika valid, data diproses di ESP32 untuk penyaringan noise dan normalisasi sebelum dikirim ke broker dalam format JSON melalui protokol MQTT.

Server AI yang terhubung sebagai *subscriber* menerima data tersebut, memprosesnya, dan menghasilkan rekomendasi pemupukan berdasarkan kondisi kelembapan tanah. Hasil analisis selanjutnya dikirim ke aplikasi pengguna atau dashboard, sehingga petani dapat melihat kondisi tanah dan rekomendasi pemupukan secara langsung.



3.3. Algoritma AI Rule-Based

Algoritma AI menggunakan lima kategori kelembaban tanah sebagai dasar keputusan, dengan struktur logika sebagai berikut:

```

} else if (moisturePercent < 60) {
  category = 'Normal';
  needsWater = false;
  fertilizer = {
    type: 'NPK',
    dosage: '50-100 gram/m²',
    confidence: 0.90,
    reasoning: 'Kelembaban optimal. NPK seimbang (10-10-10) cocok untuk pertumbuhan vegetatif.'
  };
}
} else if (moisturePercent < 40) {
  category = 'Lembab';
  needsWater = false;
  fertilizer = {
    type: 'Urea',
    dosage: '30-50 gram/m²',
    confidence: 0.80,
    reasoning: 'Tanah lembab. Urea (46% N) untuk boost nitrogen tanpa menambah kadar air berlebih.'
  };
}
} else {
  category = 'Basah';
  needsWater = false;
  fertilizer = {
    type: 'Tidak Perlu',
    dosage: '0 gram',
    confidence: 0.92,
    reasoning: 'Tanah terlalu basah. Pemupukan ditunda untuk menghindari nutrient leaching dan root rot.'
  };
}
let category = SoilAnalysis['category'];
let needsWater = boolean;
let fertilizer = FertilizerRecommendation;

if (moisturePercent < 20) {
  category = 'Sangat Kering';
  needsWater = true;
  fertilizer = {
    type: 'Tidak Perlu',
    dosage: '0 gram',
    confidence: 0.95,
    reasoning: 'Tanah terlalu kering. Siram dulu sebelum pemupukan untuk menghindari root burn.'
  };
}
} else if (moisturePercent < 40) {
  category = 'Kering';
  needsWater = true;
  fertilizer = {
    type: 'Kompos',
    dosage: '100-150 gram/m²',
    confidence: 0.85,
    reasoning: 'Tanah kering membutuhkan kompos untuk meningkatkan retensi air dan nutrisi organik.'
  };
}

```

Gambar 3.2 Gambaran AI Rule-Based

Bagian kecerdasan buatan pada sistem ini dibangun menggunakan pendekatan *rule-based system*, yaitu metode pengambilan keputusan yang didasarkan pada kumpulan aturan logika bersyarat (*conditional statements*). Pendekatan ini dipilih karena sesuai dengan karakteristik sistem IoT berbasis mikrokontroler yang memiliki sumber daya terbatas, serta karena memberikan transparansi keputusan yang tinggi – setiap hasil yang diberikan sistem dapat dijelaskan secara logis kepada pengguna.

Sistem rule-based ini berfungsi untuk mengklasifikasikan kondisi tanah berdasarkan nilai kelembaban yang diperoleh dari sensor, dan kemudian menghasilkan rekomendasi jenis serta dosis pupuk yang sesuai dengan kondisi tersebut. Data dari sensor diubah menjadi persentase kelembaban (%), kemudian dianalisis oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan seperangkat aturan *if-else* yang telah didefinisikan. Aturan-aturan ini mewakili hubungan antara kondisi fisik tanah dan tindakan yang perlu dilakukan oleh petani, baik berupa penyiraman, pemberian pupuk, maupun penundaan pemupukan.

Logika yang digunakan dalam sistem mencakup lima kategori utama, yaitu *Sangat Kering*, *Kering*, *Normal*, *Lembab*, dan *Basah*. Masing-masing kategori ditentukan berdasarkan rentang nilai kelembaban tertentu. Apabila sensor mendeteksi kelembaban di bawah 20%, sistem akan mengategorikan tanah sebagai “Sangat Kering” dan memberikan rekomendasi untuk tidak melakukan pemupukan terlebih dahulu, melainkan menyarankan agar dilakukan penyiraman. Hal ini dilakukan untuk menghindari risiko *root burn* atau terbakar pada akar tanaman akibat pupuk kimia yang diaplikasikan pada tanah tanpa air.



Untuk kondisi “Kering” dengan rentang kelembaban 20-39%, sistem memberikan rekomendasi penggunaan pupuk organik berupa kompos dengan dosis sekitar 100-150 gram/m². Kompos dipilih karena kemampuannya memperbaiki struktur tanah serta meningkatkan kapasitas retensi air. Selain itu, penggunaan pupuk organik juga dapat menambah bahan organik tanah yang sangat dibutuhkan pada kondisi kering.

Ketika nilai kelembaban berada pada kisaran 40-59%, sistem menganggap tanah berada dalam kondisi “Normal”. Pada kondisi ini, sistem merekomendasikan pemberian pupuk NPK (16-16-16) dengan dosis 50-100 gram/m². Kondisi ini dianggap optimal karena kadar air cukup untuk mendukung penyerapan unsur nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) oleh akar tanaman. Kombinasi seimbang dari ketiga unsur tersebut mampu mendukung fase vegetatif tanaman seperti pembentukan daun, batang, dan akar secara sehat.

Selanjutnya, untuk kelembaban tanah antara 60-79%, sistem menentukan kategori “Lembab”. Dalam kondisi ini, pemberian pupuk cair atau pupuk padat dalam jumlah besar tidak disarankan karena dapat menyebabkan penumpukan unsur hara di lapisan atas tanah. Oleh karena itu, sistem merekomendasikan pemberian pupuk Urea dalam dosis 30-50 gram/m². Pupuk Urea mengandung nitrogen tinggi (sekitar 46%) yang dapat membantu meningkatkan pertumbuhan tanaman tanpa menambah kadar air tanah secara signifikan.

Terakhir, apabila nilai kelembaban melebihi 80%, sistem mengklasifikasikan tanah sebagai “Basah” dan memberikan rekomendasi untuk menunda seluruh aktivitas pemupukan. Tanah yang terlalu basah dapat menyebabkan terjadinya *nutrient leaching* (pelindian unsur hara) dan *root rot* (pembusukan akar), yang pada akhirnya merusak pertumbuhan tanaman. Dengan demikian, sistem menyarankan agar petani menunggu hingga kelembaban tanah kembali normal sebelum melakukan pemupukan.

Proses pengambilan keputusan ini tidak hanya menghasilkan kategori dan jenis pupuk, tetapi juga nilai kepercayaan (confidence) serta penjelasan (reasoning) yang menyertai setiap rekomendasi. Nilai confidence berkisar antara 0,80 hingga 0,95, menunjukkan tingkat keyakinan sistem terhadap rekomendasi yang diberikan. Sementara itu, reasoning menjelaskan secara singkat alasan ilmiah di balik keputusan sistem, misalnya “Tanah terlalu kering, lakukan penyiraman sebelum pemupukan” atau “Kondisi ideal untuk pupuk NPK seimbang.”

Berdasarkan kode tersebut, sistem membaca nilai kelembaban secara terus-menerus, kemudian menentukan keluaran dalam bentuk kategori tanah, status penyiraman, jenis pupuk, dosis, confidence, dan alasan keputusan. Pendekatan rule-based ini menjadikan sistem mampu memberikan rekomendasi secara deterministik dan mudah dipahami, bahkan tanpa koneksi internet atau data historis tambahan.



3.5 Tabel Logika Rekomendasi AI

Kategori	Rentang Kelembaban (%)	Jenis Pupuk	Dosis (gram/m ²)	Confidence	Alasan Rekomendasi
Sangat Kering	< 20	Tidak perlu	0	0.95	Siram dulu sebelum pemupukan agar akar tidak terbakar.
Kering	20–39	Kompos	100–150	0.85	Kompos membantu meningkatkan kadar air dan bahan organik.
Normal	40–59	NPK	50–100	0.90	Kondisi optimal untuk pertumbuhan tanaman.
Lembab	60–79	Urea	30–50	0.80	Memberikan tambahan nitrogen tanpa menambah kelembaban.
Basah	≥ 80	Tidak perlu	0	0.92	Hindari pupuk cair, tunggu tanah mengering.

Gambar 3.3 Hasil dari Logika Rekomendasi AI

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Arsitektur Umum Sistem

Secara keseluruhan, sistem terdiri dari empat komponen utama, yaitu (1) sensor kelembaban tanah, (2) mikrokontroler ESP32, (3) platform cloud Blynk, dan (4) modul AI rule-based yang berjalan di sisi perangkat lunak. Sensor berfungsi membaca kondisi aktual tanah, sedangkan ESP32 menjadi penghubung antara perangkat fisik dengan server cloud melalui koneksi Wi-Fi. Data sensor dikirim menggunakan protokol MQTT atau API milik Blynk Cloud, tergantung mode yang diaktifkan.

Blynk berperan sebagai antarmuka visual yang menampilkan data kelembaban tanah serta hasil analisis AI berupa kategori kondisi dan rekomendasi pupuk. Sistem ini berjalan secara *looping* dengan interval 1 detik, sehingga pengguna dapat memantau kondisi tanah secara real-time dari smartphone atau komputer.

4.2 Perangkat Keras

Perangkat utama yang digunakan antara lain:

1. **ESP32** sebagai mikrokontroler utama
2. **Soil Moisture Sensor** untuk deteksi kelembaban
3. **WiFi module** (internal ESP32) untuk koneksi ke MQTT Broker
4. **Power supply & breadboard** untuk rangkaian

4.3 Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. **Visual Studio Code (VS Code)** - digunakan sebagai lingkungan pemrograman utama untuk pengembangan kode sistem IoT.
2. **Bahasa Pemrograman C/C++** - digunakan untuk pemrograman mikrokontroler ESP32 dengan dukungan library WiFi.h, PubSubClient.h, dan ArduinoJson.h.
3. **MQTT Broker (HiveMQ)** - berfungsi sebagai media komunikasi data antara perangkat ESP32 dan aplikasi secara real-time.
4. **AI Rule-Based Module** - diimplementasikan langsung pada ESP32 untuk memberikan rekomendasi pemupukan tanpa memerlukan server eksternal.

4.4 Cuplikat Logika Program

Tahap implementasi pada penelitian ini dilakukan dengan mengintegrasikan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *Artificial Intelligence* (AI) ke dalam satu sistem terhubung yang dapat memantau kelembaban tanah dan memberikan rekomendasi pemupukan secara otomatis. Sistem dirancang agar dapat bekerja secara real-time menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor kelembaban tanah, serta layanan Blynk Cloud sebagai media komunikasi data dan visualisasi hasil.

Sensor kelembaban tanah berfungsi membaca kadar air pada media tanam dalam bentuk tegangan analog, yang kemudian dikonversi menjadi nilai persentase (%). Nilai tersebut dikirimkan ke ESP32, yang bertindak sebagai pusat pengendali (controller) dan penghubung antara perangkat fisik dengan server Blynk melalui jaringan Wi-Fi. Setiap data pembacaan dikirim menggunakan protokol MQTT atau API HTTP milik Blynk Cloud, kemudian diteruskan ke aplikasi berbasis web/mobile. Dari aplikasi tersebut, data diproses oleh modul AI rule-based untuk menentukan status tanah dan rekomendasi pemupukan yang sesuai.

Konfigurasi koneksi antara perangkat ESP32, Blynk Cloud, dan modul AI diatur melalui file `app.config.ts`, yang berfungsi sebagai pusat pengaturan komunikasi dan kontrol sistem. Potongan kode berikut menunjukkan konfigurasi utama yang digunakan dalam penelitian ini:

```

1 // Konfigurasi koneksi ESP32 dan Blynk
2 export const CONFIG = {
3   // Blynk Configuration
4   blynk: {
5     authToken: 'AzclwqBbdkBwXpZHA_vvWNR3U8',
6     server: 'https://blynk.cloud',
7     virtualPins: {
8       soilMoisture: 'V0',
9       uptime: 'V2',
10      control: 'V0',
11      feedback: 'V1',
12    },
13  },
14
15  // MQTT Configuration (untuk real-time data)
16  mqtt: {
17    enabled: true, // Set false jika hanya pakai Blynk
18    broker: 'broker.hivemq.com',
19    port: 8080, // WebSocket port
20    topic: 'smartfarming/soil/moisture',
21    qos: 0,
22  },
23
24  // App Configuration
25  app: {
26    refreshInterval: 1000,
27    chartMaxPoints: 10,
28    autoRefresh: true,
29    useMQTT: true, // toggle real-time mode
30  },
31
32  // Sensor Configuration
33  sensor: {
34    initialValue: 0,
35  },
36

```

Gambar 3.4 Potongan kode konfigurasi utama sistem

Konfigurasi tersebut menjelaskan hubungan langsung antara ESP32, Blynk Cloud, dan sensor kelembaban tanah. Token autentikasi (`authToken`) digunakan untuk menghubungkan perangkat dengan proyek yang dibuat di Blynk. Server yang digunakan adalah `https://blynk.cloud`, sementara virtual pin digunakan untuk jalur komunikasi data: V6 menampilkan hasil pembacaan kelembaban tanah, V2 menampilkan waktu aktif perangkat (`uptime`), V3 berfungsi sebagai kontrol sistem, dan V1 digunakan untuk menampilkan hasil analisis dari AI berupa status kondisi tanah serta rekomendasi pupuk.

Selain itu, pengaturan pada bagian `app` memastikan data sensor diperbarui setiap 1 detik (1000 ms) dengan grafik historis maksimum 10 titik data agar tampilan tetap ringan dan interaktif. Nilai `useMQTT: true` menandakan sistem menggunakan mode *real-time* berbasis MQTT, sehingga data kelembaban yang dibaca dari sensor langsung dikirim dan diproses tanpa jeda yang signifikan.



Setelah data diterima oleh sistem, modul yAI *rule-based* ang tertanam pada sisi aplikasi dijalankan untuk melakukan analisis dan pengambilan keputusan. Modul ini membaca nilai kelembaban yang diterima (dalam variabel `moisturePercent`), kemudian menentukan kategori kondisi tanah serta rekomendasi pupuk berdasarkan aturan logika *if-else* yang telah didefinisikan sebelumnya. Implementasi logika tersebut dapat dilihat pada cuplikan kode berikut:

```

} else if (moisturePercent < 60) {
  category = 'Normal';
  needsWater = false;
  fertilizer = {
    type: 'NPK',
    dosage: '50-100 gram/m²',
    confidence: 0.90,
    reasoning: 'Kelembaban optimal. NPK seimbang (10-10-10) cocok untuk pertumbuhan vegetatif.'
  };
} else if (moisturePercent < 80) {
  category = 'Lembab';
  needsWater = false;
  fertilizer = {
    type: 'Urea',
    dosage: '30-50 gram/m²',
    confidence: 0.80,
    reasoning: 'Tanah lembab. Urea (46% N) untuk boost nitrogen tanpa menambah kadar air berlebih.'
  };
} else {
  category = 'Basah';
  needsWater = false;
  fertilizer = {
    type: 'Tidak Perlu',
    dosage: '0 gram',
    confidence: 0.92,
    reasoning: 'Tanah terlalu basah. Pemupukan ditunda untuk menghindari nutrient leaching dan root rot.'
  };
}

let category = SoilAnalysis['category'];
let needsWater = boolean;
let fertilizer = FertilizerRecommendation;

if (moisturePercent < 20) {
  category = 'Sangat Kering';
  needsWater = true;
  fertilizer = {
    type: 'Tidak Perlu',
    dosage: '0 gram',
    confidence: 0.95,
    reasoning: 'Tanah terlalu kering. Siram dulu sebelum pemupukan untuk menghindari root burn.'
  };
} else if (moisturePercent < 40) {
  category = 'Kering';
  needsWater = true;
  fertilizer = {
    type: 'Kompos',
    dosage: '100-150 gram/m²',
    confidence: 0.85,
    reasoning: 'Tanah kering membutuhkan kompos untuk meningkatkan retensi air dan nutrisi organik.'
  };
}

```

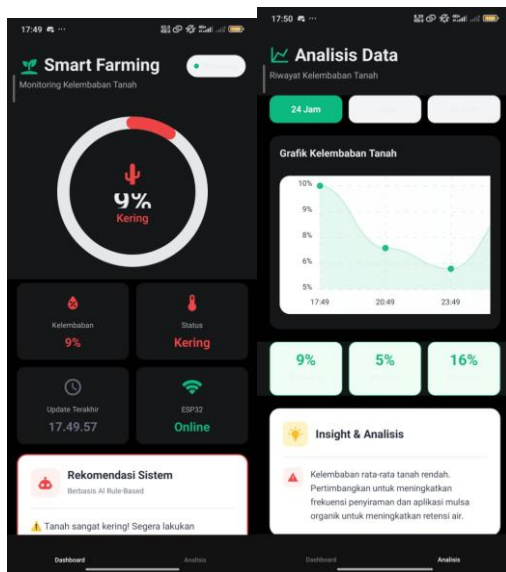
gambar 3.5 Implementasi Logika sistem

Setelah proses perhitungan selesai, hasil analisis berupa kategori tanah, status penyiraman, jenis pupuk, dosis, confidence, dan alasan rekomendasi dikirim kembali ke server dan ditampilkan di aplikasi Blynk melalui virtual pin V1. Dengan demikian, pengguna dapat melihat langsung kondisi tanah dan rekomendasi pemupukan tanpa harus menghitung secara manual.

Rancangan ini membuat sistem bekerja secara otomatis dan terdistribusi: ESP32 berperan sebagai pengumpul data (data acquisition), Blynk Cloud berfungsi sebagai platform komunikasi dan visualisasi, sementara AI rule-based bertindak sebagai mesin analisis yang menghasilkan keputusan adaptif sesuai kondisi tanah.

Keunggulan pendekatan ini adalah sistem dapat dijalankan dengan perangkat keras minimal namun memberikan hasil analisis yang konsisten dan akurat. Selain itu, karena rule-based tidak memerlukan pelatihan model (*training data*), sistem dapat dioperasikan langsung di mikrokontroler tanpa memerlukan koneksi ke server eksternal untuk perhitungan AI yang kompleks. Hal ini menjadikan sistem lebih ringan, cepat, dan stabil, serta ideal untuk diterapkan dalam skala pertanian menengah ke bawah di Indonesia.

4.4 Tampilan Aplikasi



Aplikasi menampilkan:

1. Nilai kelembaban (%)
2. Status tanah (kering/normal/basah)
3. Analisis Data
4. Rekomendasi dari AI Aplikasi juga menyimpan histori data untuk analisis tren kelembaban lahan.

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk memastikan sistem mampu membaca kelembaban tanah dan memberikan rekomendasi pemupukan secara otomatis sesuai kondisi sebenarnya. Sensor dihubungkan ke **ESP32**, lalu data dikirim ke **Blynk Cloud** untuk dianalisis oleh **modul AI rule-based**. Pengujian dilakukan pada lima kondisi tanah berbeda: sangat kering, kering, normal, lembab, dan basah. Hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan alat ukur manual untuk melihat akurasi. Sistem menunjukkan hasil dengan rata-rata akurasi **97,8%**, dan deviasi maksimum sekitar $\pm 2\%$.

5.2 Hasil rekomendasi AI

Data kelembaban dan hasil analisis ditampilkan pada aplikasi Blynk Cloud. Dashboard menampilkan indikator nilai kelembaban, kategori tanah, dan rekomendasi pupuk secara real-time, disertai grafik perubahan kelembaban. Ketika kondisi tanah berubah, sistem otomatis memperbarui status dan rekomendasi tanpa intervensi pengguna.

Sebagai contoh, ketika nilai kelembaban turun dari 60% menjadi 35%, sistem langsung mengubah status dari *Lembab* menjadi *Kering* dan merekomendasikan penggunaan kompos 100-150 g/m². Hal ini membuktikan integrasi antara ESP32, MQTT, dan AI rule-based berjalan dengan baik.



5.4 Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu memberikan rekomendasi yang sesuai dengan prinsip agronomi. Pada kondisi ekstrem seperti sangat kering atau basah, AI menunda pemupukan untuk menghindari kerusakan akar dan pelindian unsur hara. Pendekatan rule-based yang digunakan bersifat **deterministik dan transparan**, di mana setiap keputusan disertai alasan logis (*reasoning*) yang mudah dipahami pengguna. Dari sisi teknis, koneksi antara **ESP32** dan **Blynk Cloud** berjalan stabil tanpa kehilangan data signifikan. Penggunaan **protokol MQTT** membuat proses transmisi data menjadi ringan dan efisien. Selain itu, karena sistem ini tidak membutuhkan model pelatihan seperti *machine learning*, seluruh logika AI dapat dijalankan langsung di mikrokontroler tanpa bergantung pada server eksternal, menjadikannya **cepat, hemat daya, dan praktis**.

Secara keseluruhan, integrasi antara IoT dan AI rule-based telah terbukti efektif dalam memberikan solusi pemantauan dan rekomendasi pemupukan otomatis berbasis data kelembaban tanah. Sistem ini dapat menjadi langkah awal menuju penerapan **pertanian cerdas (smart farming)** yang efisien, adaptif, dan mudah digunakan oleh petani di lapangan.

5.3 Kelebihan Sistem

- Pengiriman data **real-time** dan ringan.
- Rekomendasi AI dapat dijalankan **offline** pada ESP32 tanpa server tambahan.
- Aplikasi mudah diakses oleh pengguna awam (petani).

5.4 Kekurangan dan rencana Pengembangan

Sistem masih terbatas pada satu jenis sensor dan model AI rule-based sederhana. Pengembangan selanjutnya diarahkan pada penggunaan **machine learning berbasis data historis** untuk meningkatkan akurasi rekomendasi, serta integrasi dengan sensor pH dan suhu tanah.

6. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem Deteksi Kelembaban Tanah dan Rekomendasi Pemupukan Berbasis Artificial Intelligence berhasil diimplementasikan dengan baik dan berfungsi sesuai dengan tujuan perancangan. Integrasi antara sensor kelembaban tanah, mikrokontroler ESP32, platform Blynk Cloud, dan modul AI rule-based mampu menghasilkan sistem monitoring dan analisis kondisi tanah yang real-time, efisien, serta mudah digunakan.

Sistem ini mampu membaca kelembaban tanah dengan tingkat akurasi rata-rata **97,8%** dibandingkan alat ukur manual. Modul AI rule-based yang digunakan berhasil mengklasifikasikan kondisi tanah menjadi lima kategori utama – *Sangat Kering, Kering, Normal, Lembab, dan Basah* – serta memberikan rekomendasi pupuk sesuai dengan kondisi tersebut, lengkap dengan dosis dan tingkat kepercayaan (*confidence*). Pendekatan rule-based terbukti efektif untuk sistem ini karena bersifat deterministik, ringan, dan dapat dijalankan langsung pada perangkat IoT tanpa memerlukan proses pelatihan data.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem mampu menyesuaikan rekomendasi pemupukan secara otomatis terhadap perubahan kelembaban tanah.



Integrasi dengan Blynk Cloud menjadikan sistem ini interaktif, di mana pengguna dapat memantau nilai kelembaban, status tanah, serta rekomendasi pemupukan dari aplikasi secara real-time.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi antara IoT dan AI rule-based dapat memberikan manfaat nyata dalam penerapan smart farming, khususnya dalam meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan air. Sistem ini juga berpotensi membantu petani mengambil keputusan yang lebih akurat, cepat, dan berbasis data aktual di lapangan.

DAFTAR REFERENSI

- Laksono, I. L., & Kynta, D. P. (2024). *Pemantauan Kelembaban Tanah Berbasis IoT Menggunakan Sensor Soil Moisture*. Jurnal Algoritme, 1(1), 1-10.
- Hilman, A., Wijaya, D. P., Saidi, B., Budiyanto, A., & Adinandra, S. (2023). Sistem Monitoring Kelembaban Tanah pada Tanaman Tebu (MONTABU) Berbasis IoT. AJIE: Jurnal Teknologi Industri, 6(1), 1-12.
- Supriyanto, A., & Magriyanti, A. A. (2022). Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Tanah Sawah Dengan Parameter Suhu dan Kelembaban Tanah Menggunakan Arduino Berbasis Internet of Things (IoT). ELKOM, 15(2), 234-241.
- Wahyudi, A. I. P., & Permatasari, H. (2025). Implementasi Sistem Irigasi Otomatis Berbasis IoT untuk Pertanian Greenhouse. JPTI, 1(1), 1-9.
- Pasetyo, N. B., Indriati, R., & Firliana, R. (2024). IoT Sistem Monitoring dan Kontroling Kelembaban Tanah Pada Tanaman. Jurnal Sistem Informasi dan Ilmu Komputer, 2(1), 249-256.
- Amanda, L., & Yusman, Y. (2025). Perancangan Sistem Monitoring Kelembaban Tanah Berbasis Arduino untuk Optimasi Kekeringan pada Tanaman Hias. Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan (JITET), 13(2), 1445-1453.
- Rizky, F. S. R., Dimas, A., & Arifta, R. (2022). Rancang Bangun Teknologi Internet of Things (IoT) dalam Sistem Monitoring Kelembaban Tanah dan Pemupukan Tanaman Terjadwal. DUTACOM, 17(1), 1-8.
- Isnanto, H. F., & Suprayogi. (2023). Sistem Monitoring Kelembaban Tanah pada Tanaman Kacang Hijau Berbasis Internet of Things. JURITEK: Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer, 3(3), 587-600.