

RANCANG BANGUN SISTEM MONITORING DAN KONTROL PH TANAH OTOMATIS UNTUK MENCEGAH PENYAKIT KUNING PADA TANAMAN CABAI DI GREENHOUSE

Muhammad Diaz Nur Farizki

Fakultas Teknologi Industri, Program Studi Teknik Elektro
Universitas Islam Sultan Agung Semarang
Email: mdiaznurfar23@std.unissula.ac.id

Iqbaal Syaifudin

Fakultas Teknologi Industri, Program Studi Teknik Elektro
Universitas Islam Sultan Agung Semarang
Email: iqbaalsyaifudin04@std.unissula.ac.id

Agus Adhi Nugroho

Fakultas Teknologi Industri, Program Studi Teknik Elektro
Universitas Islam Sultan Agung Semarang
Email: agusadhi@unissula.ac.id

ABSTRAK

Penyakit kuning pada tanaman cabai (*Capsicum annum L.*) merupakan salah satu kendala utama yang menyebabkan kerugian panen signifikan, yang mana salah satu pemicu utamanya adalah kondisi pH tanah yang tidak optimal, terutama pH dan kelembapan. Ketidakseimbangan pH mengganggu penyerapan nutrisi esensial oleh tanaman, sehingga menurunkan imunitas dan produktivitasnya [1]. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem monitoring dan kontrol pH tanah serta kelembapan tanah otomatis untuk menjaga kondisi tanah pada rentang ideal bagi pertumbuhan tanaman cabai. Metode yang digunakan adalah sistem kontrol *loop* tertutup berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor pH tanah, sensor kelembapan tanah resistif dan kapasitif, pompa larutan asam sitrat untuk menurunkan pH, pompa larutan dolomit untuk menaikkan pH, serta pompa air untuk penyiraman. Pengujian sistem dilakukan untuk mengukur akurasi, waktu respons, dan stabilitas kontrol pH. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu merespons perubahan pH dengan cepat (waktu respons 30 detik). Meskipun terdapat tantangan kapasitas penyangga tanah yang memperlambat perubahan kimiawi, sistem terbukti efektif mengondisikan pH tanah bergerak menuju rentang ideal (5.9-7.0). Sistem ini berpotensi menjadi solusi teknologi untuk menjaga parameter tanah tetap kondusif bagi tanaman cabai guna meminimalisir risiko penyakit kuning di *greenhouse*.

Kata kunci: ph tanah, monitoring otomatis, tanaman cabai, penyakit kuning, ESP32, *greenhouse*.

ABSTRACT

Yellow disease in chili plants (Capsicum annum L.) is a primary constraint causing significant crop yield losses, often triggered by suboptimal soil conditions, particularly regarding pH and moisture. A pH imbalance disrupts the absorption of essential nutrients by the plant, thereby reducing its immunity and productivity [1]. This research aims to design and develop an automatic soil pH and moisture monitoring and control system to maintain soil conditions within the ideal range for chili plant growth. The method employed is a closed-loop control system based on the ESP32 microcontroller, integrated with a soil pH sensor, resistive and capacitive soil moisture sensors, a citric acid solution pump to lower pH, a dolomite solution pump to raise pH, and a water pump for irrigation. System testing was conducted to evaluate accuracy, response time, and pH control stability. The results indicate that the system is capable of responding rapidly to pH deviations (30-second response time). Despite the challenges posed by soil buffer capacity, which delays chemical reactions, the system proved effective in conditioning soil pH to trend towards the ideal range (5.9–7.0). This system demonstrates potential as a technological solution to maintain conducive soil parameters for chili plants, thereby minimizing the risk of yellow disease in greenhouse.

Keywords: soil pH, automatic monitoring, chili, yellow disease, ESP32, *greenhouse*.

1. PENDAHULUAN

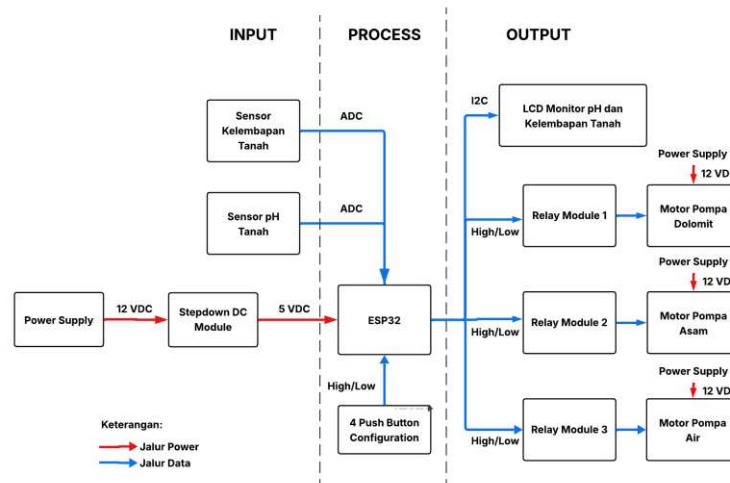
Indonesia merupakan negara agraris dengan sektor pertanian yang memegang peranan strategis dalam perekonomian nasional. Sektor ini tidak hanya berkontribusi terhadap Produk Domestik Bruto (PDB), tetapi juga menyerap tenaga kerja dalam jumlah besar dan menjadi sumber mata pencaharian utama bagi sebagian besar masyarakat pedesaan [2]. Salah satu komoditas hortikultura strategis di Indonesia adalah cabai (*Capsicum annuum L.*). Tanaman ini tidak hanya berfungsi sebagai bumbu dapur yang esensial dalam kuliner Indonesia, tetapi juga sebagai bahan baku industri makanan dan farmasi [3]. Meskipun demikian, produktivitas cabai seringkali terkendala oleh penyakit kuning yang menurunkan hasil panen secara drastis. Pemicu utama penyakit ini adalah kondisi tanah yang tidak ideal, terutama pH tanah [1]. Hal ini karena pH memegang peranan krusial dalam ketersediaan unsur hara, di mana tanaman cabai tumbuh optimal pada rentang pH 6.0 hingga 7.0. Akibatnya, di luar rentang tersebut, penyerapan nutrisi akan terhambat, menyebabkan tanaman stres dan rentan terhadap patogen [4].

Saat ini, upaya pengendalian pH tanah oleh petani umumnya masih bersifat manual, sehingga kurang efektif dan tidak memberikan respons secara *real-time*. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem monitoring dan kontrol pH tanah otomatis untuk mengatasi masalah tersebut. Sistem ini dirancang untuk menjaga pH tanah dalam rentang ideal dengan mengaplikasikan larutan asam sitrat untuk menurunkan pH basa dan suspensi dolomit untuk menaikkan pH asam secara otomatis. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang, membangun, dan menguji kinerja sistem tersebut sebagai solusi pencegahan penyakit kuning pada budidaya cabai di *greenhouse*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

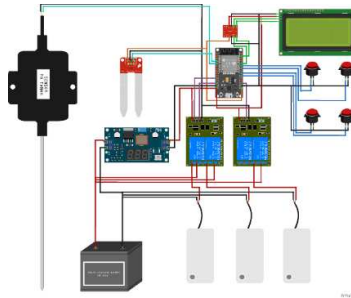
Penelitian ini menggunakan metode perancangan sistem (*system design*) dengan pendekatan kontrol *loop* tertutup. Arsitektur sistem dibagi menjadi tiga bagian utama: *input*, proses, dan *output*.

2.1. Arsitektur Perangkat Keras



Gambar 1. Arsitektur Perangkat

Arsitektur sistem dibangun dari tiga blok utama. Blok *input* menggunakan sensor pH tanah tipe elektroda (rentang 0-14, akurasi ± 0.1 pH) [1]. Sinyal analog ini kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32-WROOM32, yang dipilih karena memiliki konektivitas Wi-Fi/Bluetooth terintegrasi dan ADC 12-bit untuk pembacaan presisi. Blok *output* terdiri dari dua aktuator pompa DC 12V (untuk larutan asam sitrat dan dolomit) yang dikendalikan oleh modul relay 4-kanal. Sebagai antarmuka pengguna lokal, digunakan modul LCD 20x4 I2C untuk menampilkan nilai pH dan status sistem. Rancangan rangkaian elektronik sistem monitoring dan kontrol pH tanah secara detail disajikan pada gambar. Sistem ini terdiri dari beberapa blok fungsional utama:



Gambar 2. Skema Rangkaian Elektronik

Tabel 1. Spesifikasi Alat

Komponen	Spesifikasi	Voltase DC
Baterai	Lead-Acid	12V
Mikrokontroler	ESP32 Dev Kit	3.3V (input via VIN 12V)
Modul Relay	2-Channel Relay Module (2 unit)	12V
Step-Down Converter	Dengan Voltmeter Digital	Input: 12V, Output: Variable
Sensor pH Tanah	Analog pH Sensor	3.3V
Sensor Kelembapan Tanah	Resistive Soil Moisture Sensor	3.3V
Pompa Asam	DC Water Pump	12V
Pompa Air	DC Water Pump	12V
Pompa Dolomit	DC Water Pump	12V
LCD Display	20x4 LCD dengan I2C Backpack	5V
Logic Level Shifter	Bi-directional Level Converter	Input: 3.3V, Output: 5V
Push Button	Tactile Push Button (4 unit)	3.3V

2.2. Logika Kontrol Perangkat Lunak

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C++. Logika kontrol yang diimplementasikan adalah *on-off control* dengan *hysteresis* untuk mencegah osilasi sistem (pompa terlalu sering hidup-mati). Batas bawah pH ditetapkan pada 5.8 dan batas atas pada 7.0.

Durasi aktivasi pompa disesuaikan secara proporsional oleh pengguna sehingga mudah untuk dikalibrasi. Sistem melakukan pengukuran pH setiap 5 menit untuk memberikan jeda waktu bagi larutan untuk bereaksi dengan tanah.

```
// Pseudocode Logika Kontrol Utama
```

```
// Fungsi ini dijalankan secara periodik (misalnya setiap 5 menit)
PROSEDUR HandleModeOtomatis()
```

```
// 1. Baca nilai sensor terbaru
ph_saat_ini = BacaSensorpH()
kelembapan_saat_ini = BacaSensorKelembapan()
```

```
// 2. Logika Kontrol pH (Prioritas Utama)
JIKA ph_saat_ini < 5.8 MAKA
// Kondisi terlalu asam, aktifkan pompa dolomit
Aktifkan_PompaDolomit(durasi_terkonfigurasi)
```

```
// Aktifkan pompa air untuk membantu penyerapan
Aktifkan_PompaAir(durasi = 15_detik)
```

```
ATAU JIKA ph_saat_ini > 7.0 MAKA
// Kondisi terlalu basa, aktifkan pompa asam sitrat
Aktifkan_PompaAsam(durasi_terkonfigurasi)
```

```
// Aktifkan pompa air untuk membantu penyerapan
```

```

Aktifkan_PompaAir(durasi = 15_detik)

LAIN JIKA (ph_saat_ini >= 5.8 DAN ph_saat_ini <= 7.0) MAKA
// Kondisi pH ideal, pompa koreksi mati

// 3. Logika Penyiraman (Prioritas Terpisah)
// Hanya berjalan jika pH stabil (pompa koreksi tidak bekerja)

JIKA kelembapan_saat_ini < 50 MAKA
    Aktifkan_PompaAir(durasi_penyiraman_terkonfigurasi)
AKHIR JIKA

AKHIR JIKA

AKHIR PROSEDUR

```

Sistem beroperasi dalam siklus monitoring berkelanjutan. Setelah inisialisasi, sistem secara berkala mengukur pH tanah. Jika pH terdeteksi di bawah 5.8 (asam), pompa dolomit akan aktif; jika terdeteksi di atas 7 (basa), pompa asam sitrat akan aktif. Uniknya, sistem juga akan menyalakan pompa air selama 15 detik segera setelah tindakan koreksi pH (baik asam maupun basa) untuk membantu penyerapan larutan. Logika penyiraman (irigasi) utama memiliki prioritas terpisah: pompa air hanya akan aktif untuk mengatasi kelembapan rendah jika pH tanah sedang stabil (pompa koreksi tidak bekerja). Durasi penyiraman ini dapat dikonfigurasi oleh pengguna melalui panel 4-tombol.

2.3. Prosedur Pengujian Kinerja

Kinerja sistem diuji melalui beberapa parameter. Pertama, dilakukan validasi terhadap komponen sensor kunci. Akurasi sensor pH diverifikasi dengan membandingkan pembacaannya dengan pH meter standar menggunakan media tanah basah. Selain itu, dilakukan analisis kinerja komparatif kuantitatif antara sensor kelembapan resistif dan kapasitif untuk mengevaluasi stabilitas dan keandalannya, dengan merekam data ADC pada kondisi kering (udara) dan basah (air jenuh). Kedua, fungsionalitas sistem kontrol secara keseluruhan diuji dalam skenario kondisi awal tanah yang asam (pH 5.0) dan basa (pH 8.0). Parameter yang diukur pada pengujian fungsional ini adalah waktu respons (waktu dari deteksi deviasi hingga aktuasi pompa) dan stabilitas sistem dalam mempertahankan pH pada rentang target selama periode pengujian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini berisi hasil *prototype* dan analisis kuantitatif dari hasil pengujian sistem untuk memvalidasi kerjanya berdasarkan parameter yang telah ditetapkan.

3.1. Hasil Perancangan Sistem Kontrol pH Tanah



Gambar 3. Prototype Kontrol pH Tanah

3.2. Pengujian Akurasi Sensor pH

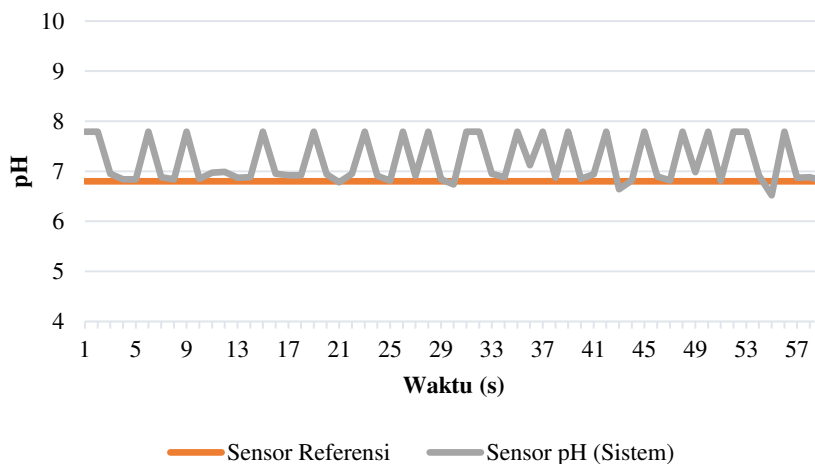
Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi akurasi sensor pH yang digunakan dengan membandingkannya terhadap pH meter standar. Pengujian dilakukan dengan menempatkan sensor referensi dan sensor sistem bersamaan menggunakan media tanah basah. Toleransi kesalahan yang diterima adalah ± 0.1 pH.

Tabel 2. Hasil Pengujian Akurasi Sensor pH Sistem dan Referensi

Detik ke-	Sensor Referensi	Sensor pH (Sistem)
1	6,8	7,79
2	6,8	7,79
3	6,8	6,95
4	6,8	6,84
5	6,8	6,84
6	6,8	7,79
7	6,8	6,88
8	6,8	6,84
9	6,8	7,79
10	6,8	6,85
....
Rata-rata ($N = 60$)	6,8	7,20

Catatan:

$N =$ Banyaknya Sampel data



Gambar 4. Grafik Perbandingan Sensor pH Sistem dan Referensi

Tabel 3. Hasil Parameter Data

Parameter	Error (%)	Akurasi (%)	Deviasi
pH	5,88%	94,12%	0,42

Evaluasi akurasi sensor pH diperluas melalui analisis statistik terhadap 60 data sampel yang dibandingkan dengan pH meter standar terkalibrasi. Jika pada pengujian awal ditetapkan batas toleransi ideal sebesar ± 0.1 , hasil pengujian lapangan menunjukkan dinamika yang lebih kompleks dengan rata-rata kesalahan (*mean error*) sebesar 5,88% (akurasi 94,12%) dan simpangan baku (*standard deviation*) 0,42. Meskipun fluktuasi data (± 0.42) sedikit melampaui toleransi ideal sensor laboratorium (± 0.1), deviasi ini dinilai masih dalam batas wajar mengingat karakteristik heterogenitas media tanah fisik yang tidak sehomogen larutan cair. Dengan demikian, sensor tetap dinyatakan valid sebagai instrumen monitoring indikatif untuk pertanian presisi.

3.3. Pengujian Fungsionalitas Sensor Kelembapan Tanah Resistif dan Kapasitif

Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi fungsionalitas dan responsivitas sensor kelembapan tanah resistif dan kapasitif yang digunakan. Pengujian dilakukan dengan melakukan kalibrasi nilai pembacaan sensor pada dua kondisi ekstrem (kering dan basah) serta mengamati responsnya terhadap perubahan kadar air.

Tabel 4. Hasil Pengujian Akurasi Kelembapan Tanah Resistif

No	Kondisi Media Uji	Nilai ADC mentah (ESP32)	Hasil Konversi Kelembapan (%)	Keterangan
1	Udara	4096 (Stabil)	0%	Batas Bawah Kalibrasi
2	Air Jenuh	699-1779 (Fluktuatif)	100%	Batas Atas Kalibrasi

Kalibrasi sensor kelembapan resistif dilakukan dengan memetakan nilai ADC pada dua titik ekstrem: udara kering (0%) dan air jenuh (100%). Hasil pengujian menunjukkan karakteristik yang sangat kontras. Pada kondisi kering, sensor stabil pada nilai ADC maksimum 4095, yang ditetapkan sebagai 0% kelembapan. Sebaliknya, pada kondisi air jenuh, sensor menunjukkan ketidakstabilan yang signifikan. Pembacaan ADC berfluktuasi secara masif (rentang 690–1779) dan mengalami *drift gradual* seiring waktu. Fenomena ini disebabkan oleh proses elektrolisis yang terjadi pada permukaan sensor. Dari 33 data uji, nilai rata-rata 1451 ADC ditetapkan sebagai batas atas (100% kelembapan).

Tabel 5. Hasil Pengujian Akurasi Kelembapan Tanah Kapasitif

No	Kondisi Media Uji	Nilai ADC mentah (ESP32)	Hasil Konversi Kelembapan (%)	Keterangan
1	Udara	2535-2559	0%	Batas Bawah Kalibrasi
2	Air Jenuh	947-1073	100%	Batas Atas Kalibrasi

Sebagai pembandingan, kalibrasi sensor kelembapan kapasitif juga dilakukan pada kondisi udara kering (0%) dan air jenuh (100%). Hasilnya menunjukkan stabilitas yang jauh lebih unggul dibandingkan sensor resistif. Pada kondisi kering, sensor memberikan pembacaan yang sangat konsisten dengan nilai ADC rata-rata 2550 (rentang 2535–2559). Saat di air jenuh, sensor merespons dengan cepat dan stabil pada nilai ADC rata-rata 996 (rentang 947–1073). Tidak seperti sensor resistif, sensor kapasitif tidak mengalami *drift* karena prinsip kerjanya yang mengukur kapasitansi dan memiliki elektroda terisolasi, sehingga mencegah korosi serta elektrolisis serta menghasilkan data yang jauh lebih andal.

3.4. Analisis Komparatif Kinerja Sensor Kelembapan

Sensor kelembapan resistif awalnya dipilih karena pertimbangan efisiensi biaya, tetapi hasil pengujian membuktikan bahwa kelemahan inherennya, yaitu ketidakstabilan pembacaan akibat korosi menjadi faktor pembatas utama untuk keandalan sistem jangka panjang. Analisis menyimpulkan bahwa sensor kapasitif merupakan alternatif yang jauh lebih unggul.

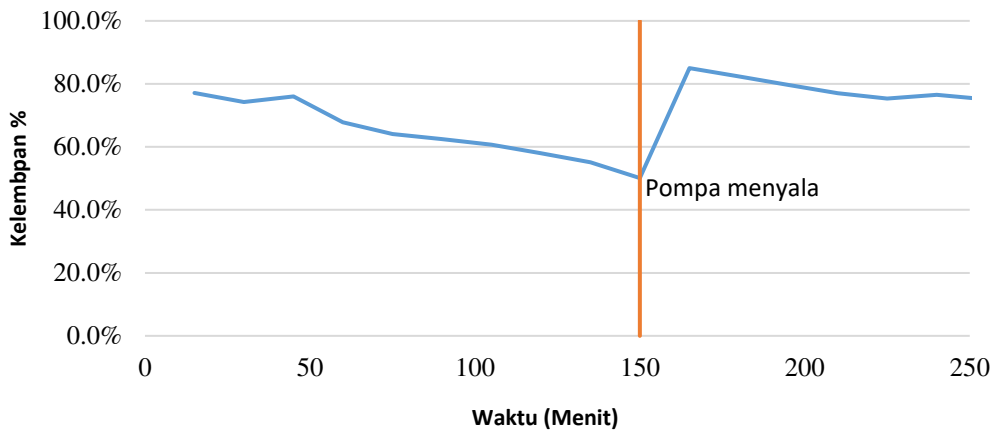
Tabel 6. Tabel Perbandingan Kuantitatif Sensor Resistif dan Kapasitif

Kondisi Pengujian	Parameter Uji	Sensor Resistif	Sensor Kapasitif
Kondisi Kering (Udara)	Rentang ADC	4095	2535 - 2559
	Lebar Rentang	0	24
	Simpangan Baku	0.0	7.33

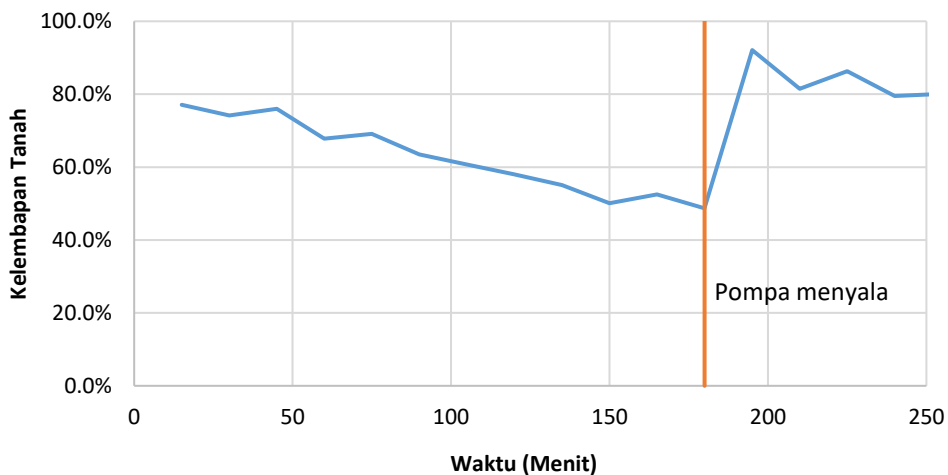
Kondisi Pengujian	Parameter Uji	Sensor Resistif	Sensor Kapasitif
Kondisi Basah (Air Jenuh)	Rentang ADC	690 - 1779	947 - 1073
	Lebar Rentang	1089	126
	Simpangan Baku	240.43	18.47

3.5. Analisis Fungsi Penyiraman Otomatis Berbasis Sensor Resistif dan Kapasitif

Pengujian fungsi penyiraman otomatis dirancang untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja sensor kelembapan resistif dan kapasitif dalam menjaga target kelembapan tanah. Metode pengujian dilakukan dengan membiarkan tanah mengering hingga ambang batas bawah, lalu mengamati respons pompa. Pengujian ini sekaligus memvalidasi logika prioritas sistem.



Gambar 5. Grafik Hasil Pengujian Penyiraman Otomatis dengan Sensor Resistif



Gambar 6. Hasil Pengujian Penyiraman Otomatis dengan Sensor Kapasitif

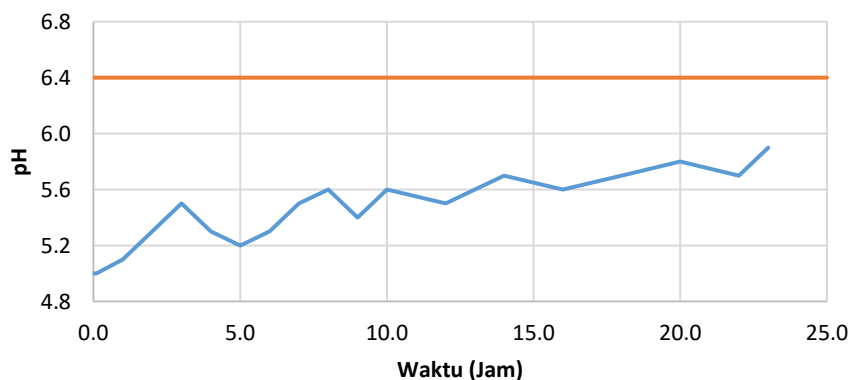
Pengujian penyiraman otomatis membuktikan bahwa sistem berhasil mengaktifkan pompa air saat sensor kapasitif maupun resistif mendeteksi kelembapan turun di bawah ambang batas 50%. Durasi penyiraman yang diatur terbukti cukup untuk menaikkan kembali kelembapan ke tingkat ideal (misalnya, di atas 80%). Pengujian ini juga memvalidasi logika prioritas krusial yang dirancang dalam sistem. Fungsi *handleAutoMode* terkonfirmasi hanya mengizinkan pompa air menyala jika pompa koreksi pH (asam dan dolomit) sedang tidak aktif. Logika ini berhasil mencegah proses penyiraman mengganggu stabilisasi pH atau menyebabkan dilusi larutan koreksi yang sedang diaplikasikan.

Tabel 7. Rekapitulasi Kinerja Penyiraman Otomatis dengan Sensor Resistif dan Kapasitif

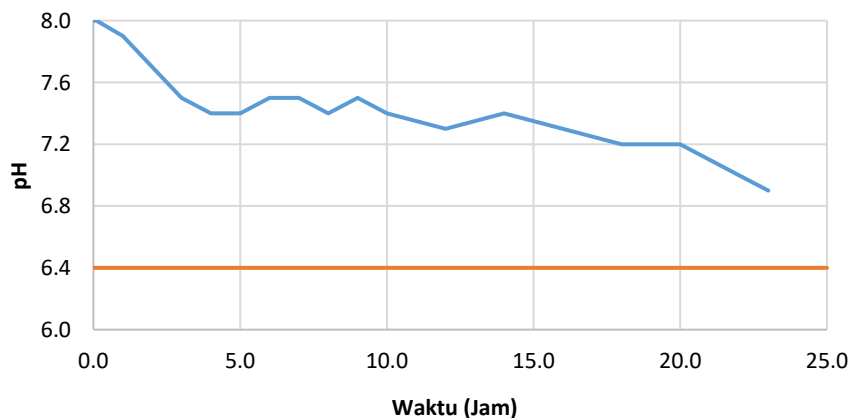
Parameter Kinerja	Hasil Pengukuran Sensor Resistif	Hasil Pengukuran Sensor Kapasitif
Ambang Batas Aktivasi	Aktif di bawah 50%	Aktif di bawah 50%
Stabilitas Pembacaan	Berfluktuasi, teramati adanya noise	Sangat stabil dan konsisten
Kelembapan Setelah Penyiraman	Meningkat hingga ~75% lalu melambat (non-linear)	Meningkat secara proporsional hingga mendekati jenuh

3.6. Pengujian Fungsionalitas Sistem Kontrol

Pengujian ini mengukur kemampuan sistem dalam menjaga pH tanah pada rentang ideal (6.0 - 6.8) melalui skenario uji pada waktu 24 jam. Parameter yang diukur meliputi akurasi kontrol, waktu respons, dan stabilitas.



Gambar 7. Hasil Uji Stabilitas Sistem pada Kondisi Awal Asam (pH 5.0)



Gambar 8. Hasil Uji Stabilitas Sistem pada Kondisi Awal Basa (pH 8.0)

Tabel 8. Rekapitulasi Kinerja Sistem Kontrol

Parameter Kinerja	Target	Hasil Pengukuran	Keterangan
Efektivitas Koreksi pH	Terjadi tren perbaikan nilai pH menuju rentang ideal (6.0 - 7.0)	Sistem berhasil menaikkan pH dari 5.0 ke 5.9 (Asam) dan menurunkan pH dari 8.0 ke 6.9 (Basa) secara konsisten.	Efektif
Waktu Respons	≤ 60 detik	Waktu dari deteksi hingga aktivasi pompa adalah 30 detik	Terpenuhi
Stabilitas Sistem	Stabil tanpa osilasi (hunting) pasca-koreksi	Logika histeresis berhasil memutus kerja pompa tepat waktu. Tidak terjadi osilasi (nyala-mati berulang) setelah injeksi larutan.	Terpenuhi

Pengujian fungsionalitas sistem dilakukan pada dua skenario ekstrem untuk mengevaluasi responsivitas kontrol dan efektivitas logika histeresis. Pada skenario kondisi basa (pH awal 8.0), sistem menunjukkan respons cepat dengan mengaktifkan pompa koreksi (asam sitrat) dalam waktu 30 detik pasca-deteksi. Data menunjukkan penurunan pH yang signifikan sebesar 0,9 unit (dari 8.0 menjadi 7.1) dalam 4 jam pertama, dengan laju penurunan rata-rata 0,225 unit pH per jam. Setelah mencapai batas histeresis pada jam ke-4, sistem berhasil memutus aktivitas pompa untuk mencegah *over-correction*. Meskipun pH tidak langsung stabil dan mengalami penurunan inersia hingga 6.9 pada jam ke-12, nilai tersebut berhasil dipertahankan stabil dalam zona subur (6.9–7.3) tanpa adanya osilasi nyala-mati pompa yang berlebihan.

Sebaliknya, pada skenario kondisi asam (pH awal 5.0), respons sistem terlihat lebih gradual. Setelah injeksi larutan dolomit, pH mengalami kenaikan sebesar 0.5 unit dalam 3 jam pertama (laju rata-rata 0,175 unit pH per jam). Perbedaan laju reaksi ini ($\pm 0,175$ dan $\pm 0,225$) mengindikasikan bahwa reaksi kimia dolomit pada tanah memerlukan waktu pelarutan dan difusi yang lebih lama dibandingkan asam sitrat. Sistem berhasil menaikkan pH total sebesar 0,7–0,8 unit dalam periode 24 jam, membawa kondisi tanah dari status "Sangat Masam" mendekati ambang batas "Agak Masam" (pH 5.9).

Meskipun sistem kontrol elektronik berfungsi secara responsif, dinamika perubahan pH tanah menunjukkan pola pergerakan progresif menuju rentang ideal, alih-alih mencapai titik setpoint presisi (pH 6.4) secara instan dalam 24 jam. Fenomena kelambatan respons kimiawi ini disebabkan oleh faktor utama yaitu Kapasitas Penyangga Tanah (*Soil Buffer Capacity*). Kompleksitas koloid tanah memberikan resistensi alami terhadap perubahan ionik, sehingga membutuhkan waktu stabilisasi yang dinamis, terkadang melebihi 30 menit pasca-injeksi sebelum nilai pH aktual terukur stabil. Hal ini diperkuat oleh proyeksi tren data yang mengindikasikan bahwa untuk mengonvergensi nilai pH sepenuhnya ke titik target dari kondisi ekstrem, sistem membutuhkan estimasi waktu 3–5 hari dengan laju reaksi saat ini.

Selain itu, ditemukan variabilitas pada variabel teknis lapangan. Pengujian mengungkap adanya tantangan pada konsistensi konsentrasi larutan koreksi akibat pencampuran manual serta inkonsistensi debit yang keluar dari pompa akibat faktor jarak instalasi selang, yang berdampak pada fluktuasi laju perubahan pH (*rate of change*). Selain itu, validasi instrumentasi menunjukkan karakteristik alami sensor pH tipe elektroda logam (*metal electrode*) yang rentan terhadap oksidasi permukaan dan penurunan sensitivitas seiring waktu penggunaan. Meskipun demikian, algoritma kontrol umpan balik (*feedback loop*) yang diterapkan terbukti mampu memitigasi ketidakpastian variabel-variabel tersebut. Dengan mekanisme berbasis *event-driven*, sistem tidak bergantung pada asumsi volume atau waktu statis, melainkan terus melakukan koreksi adaptif berdasarkan pembacaan sensor *real-time* hingga tren pH bergerak konsisten menuju rentang ideal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Sistem monitoring dan kontrol pH tanah otomatis telah berhasil dirancang dan dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor pH, sensor kelembapan, dan tiga pompa aktuatur. Sistem mampu membaca data sensor dan menjalankan logika kontrol yang telah diprogramkan.

- b. Sistem kontrol otomatis terbukti fungsional dan responsif. Sistem berhasil mendeteksi kondisi pH di luar rentang ideal (pH 5.0 dan 8.0) dan secara otomatis mengaktifkan pompa yang sesuai (dolomit/kapur atau asam sitrat/amonium sulfat). Waktu respons elektronik sistem, dari deteksi hingga aktivasi pompa, tercatat sangat cepat (sekitar 30 detik), sehingga memenuhi target kinerja yang ditetapkan.
- c. Meskipun target pH 6.4 belum tercapai penuh dalam 24 jam, sistem terbukti efektif mengarahkan pH tanah menuju rentang ideal, dengan perbaikan terukur dari 5.0 ke 5.9 dan 8.0 ke 6.9. Selain itu, logika histeresis berhasil menjaga stabilitas sistem dengan mencegah osilasi maupun over-correction selama proses koreksi.
- d. Analisis komparatif sensor kelembapan secara kuantitatif membuktikan bahwa sensor kapasitif jauh lebih superior daripada sensor resistif. Sensor kapasitif menunjukkan stabilitas yang sangat tinggi (Simpangan Baku: 18.47) dibandingkan sensor resistif yang sangat tidak stabil dan mengalami drift (Simpangan Baku: 240.43), atau 13 kali lebih tidak stabil saat diuji di air.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Sebayang, *Teknik Pengendalian Penyakit Kuning Pada Tanaman Cabai*. Medan: Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Sumatera Utara, 2013.
- [2] S. I. Kusumaningrum, "Pemanfaatan Sektor Pertanian Sebagai Penunjang Pertumbuhan Perekonomian Indonesia," *Transaksi*, vol. 11, no. 1, pp. 80–89, Aug. 2019.
- [3] D. Sukmawati, "Fluktuasi Harga Cabai Merah Keriting (*Capsicum Annum L*) di Sentra Produksi Dan Pasar Induk (Tinjauan Harga Cabai Merah Keriting di Kecamatan Cikajang dan Pasar Induk Kramat Jati Jakarta)," *Mimbar Agribisnis : Jurnal Pemikiran Masyarakat Ilmiah Berwawasan Agribisnis*, vol. 1, no. 2, pp. 165–172, Apr. 2017, doi: 10.25157/MA.V1I2.58.
- [4] A. Hamid and M. Haryanto, *Bertanam Cabai Hibrida untuk Industri*. Jakarta: PT AgroMedia Pustaka, 2011.