

Perancangan Sistem Monitoring dan Evaluasi Kelembaban Tanah pada Tanaman Pot Berbasis Esp32

Akmar Spto Pamungkas¹, Agusma Wajiansyah², dan Didi Susilo Budi Utomo^{3*}

¹²³Politeknik Negeri Samarinda; Jl. Dr. Cipto Mangunkusumo, Samarinda 75131

Email: saptopamungkasakmar@gmail.com(1); agusma.wajiansyah@gmail.com(2); dsbudiutomo10@gmail.com(3)

*Penulis Korespondensi: Didi Susilo Budi Utomo

Abstract: Caring for potted plants in urban environments requires close attention to water needs, given the characteristics of planting media that experience moisture changes more quickly than open land. Uncontrolled soil moisture can cause plants to experience water stress, either from lack or excess of water, which affects plant health and growth. This research aims to design and build an IoT-based soil moisture monitoring system for strawberry and aloe vera potted plants using the ESP32 microcontroller integrated with the ThingSpeak platform. The system includes two YL-69 soil moisture sensors placed in strawberry and aloe vera pots to detect soil moisture conditions. The YL-69 sensor outputs analog soil moisture values in the range 0–100%, classified as dry (0–37%), moist (37–61%), and wet (61–85%). Values from both sensors can be read in real-time on a 0.96-inch OLED display. In addition to the local display, the system also transmits data to the ThingSpeak IoT platform via Wi-Fi, enabling users to remotely monitor soil moisture conditions through the ThingSpeak website, the ThingView application on a smartphone, or a Web Monitoring interface on a browser. Testing results showed a mean sensor error rate of 1.9%, which is below the 5% tolerance threshold for analog sensor-based monitoring systems. Data transmission latency averaged between 1.1 and 1.6 seconds, which is within the acceptable range for IoT monitoring systems.

Keywords: *Soil Moisture; Internet of Things; Microcontroller; Monitoring; YL-69 Sensor*

Abstrak: Merawat tanaman dalam pot di lingkungan perkotaan Samarinda membutuhkan perhatian khusus terhadap kebutuhan air, mengingat karakteristik media tanam yang mengalami perubahan kelembapan lebih cepat daripada lahan terbuka. Kelembapan tanah yang tidak terkontrol dapat menyebabkan tanaman mengalami stres air, baik karena kekurangan maupun kelebihan air, yang memengaruhi kesehatan dan pertumbuhan tanaman. Penelitian ini bertujuan merancang bangun sistem monitoring kelembapan tanah pada tanaman stroberi dan lidah buaya dalam pot berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan platform ThingSpeak. Sistem mencakup dua sensor soil moisture YL-69 untuk mendeteksi kondisi kelembapan tanah, dengan nilai kelembapan ditampilkan secara real-time pada layar OLED 0,96 inci dan dikirimkan ke platform ThingSpeak melalui koneksi WiFi. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata tingkat kesalahan sensor sebesar 1,9%, yang masih di bawah ambang toleransi 5% untuk sistem monitoring berbasis sensor analog. Latensi pengiriman data rata-rata berkisar antara 1,1 hingga 1,6 detik, yang masih dalam batas normal untuk sistem monitoring IoT.

Kata kunci: *Kelembaban; Internet of Things; Mikrokontroler; Monitoring; Sensor YL-69*

Diterima: 17 April 2026
Direvisi: 15 Mei 2026
Diterima: 20 Mei 2026
Diterbitkan: 31 Mei 2026
Versi sekarang: Mei 2026



Hak cipta: © 2025 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Pertanian modern saat ini telah mengalami transformasi signifikan dengan adanya integrasi teknologi IoT (Internet of Things) dalam berbagai aspek pengelolaan tanaman. Pemantauan kondisi tanaman secara tradisional yang mengandalkan inspeksi visual dan estimasi manual dinilai kurang efektif dalam memenuhi kebutuhan pertanian presisi yang semakin berkembang [1]. Ketidakakuratan dalam pemantauan kondisi tanah dapat mengakibatkan pemberian air yang berlebihan atau kekurangan, yang keduanya sama-sama berdampak negatif terhadap kesehatan tanaman dan efisiensi penggunaan sumber daya air.

Tanaman pot memiliki karakteristik khusus yang membedakannya dari tanaman yang ditanam langsung di lahan pertanian. Media tanam dalam pot memiliki volume yang terbatas, sehingga perubahan kelembaban tanah terjadi lebih cepat dibandingkan dengan tanaman di lahan terbuka [2]. Kondisi ini memerlukan pemantauan yang lebih intensif untuk memastikan tanaman mendapatkan pasokan air yang optimal. Tanaman seperti lidah buaya (*Aloe vera*) dan stroberi (*Fragaria × ananassa*) memiliki kebutuhan air yang berbeda, sehingga pemantauan kelembaban tanah yang akurat menjadi sangat penting untuk mendukung pertumbuhan optimal kedua jenis tanaman tersebut.

Lidah buaya merupakan tanaman sukulen yang dikenal memiliki kemampuan menyimpan air dalam daunnya, sehingga umumnya memerlukan penyiraman yang lebih jarang dibandingkan tanaman lain. Sebaliknya, stroberi merupakan tanaman yang membutuhkan kelembaban tanah yang relatif tinggi dan konsisten untuk mendukung pembentukan buah yang berkualitas [3]. Perbedaan kebutuhan air antara kedua jenis tanaman ini menjadikan pemantauan kelembaban tanah sebagai aspek krusial dalam pengelolaannya.

Perkembangan teknologi mikrokontroler seperti ESP32 telah membuka peluang baru untuk mengembangkan sistem pemantauan yang terjangkau dan mudah diimplementasikan. ESP32 menawarkan kemampuan konektivitas WiFi terintegrasi yang memungkinkan pengiriman data ke platform cloud tanpa memerlukan modul tambahan [4]. Platform ThingSpeak sebagai salah satu layanan IoT populer menyediakan fasilitas untuk visualisasi data secara real-time tanpa memerlukan biaya pengembangan server yang signifikan [5].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk (1) merancang dan membangun sistem monitoring kelembaban tanah berbasis ESP32 dan sensor YL-69 yang terintegrasi dengan platform ThingSpeak; (2) menguji akurasi pembacaan sensor dalam berbagai kondisi tanah; serta (3) mengevaluasi performa transmisi data secara real-time. Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan sistem monitoring yang sederhana, ekonomis, dan mudah diimplementasikan pada skala rumah tangga maupun pertanian perkotaan.

2. Tinjauan Literatur

Penelitian mengenai efektivitas sensor kelembaban tanah dalam sistem IoT telah banyak dilakukan. Silva et al. [6] membandingkan kinerja sensor dalam memonitor kelembaban tanah dan menyimpulkan bahwa sensor kapasitif memiliki keandalan yang cukup baik untuk aplikasi pemantauan tanaman dalam pot dengan media tanam standar. Temuan ini diperkuat oleh Singh dan Patel [7] yang menyatakan bahwa meskipun sensor sensitif terhadap variasi suhu dan salinitas media tanam, penempatan probe pada kedalaman yang tepat dalam pot dapat meningkatkan stabilitas pembacaan data secara signifikan.

2.1. Platform IoT dan Transmisi Data

Dari sisi transmisi data, MathWorks [5] menyoroti keunggulan platform ThingSpeak dalam menangani permintaan data real-time dengan kapasitas penyimpanan yang memadai untuk aplikasi pemantauan jangka panjang. Hal ini sejalan dengan penelitian Hasan et al. [8] yang mengembangkan sistem monitoring parameter lingkungan, di mana kontinuitas pencatatan data menjadi indikator

keberhasilan utama sistem dalam mengidentifikasi pola kelembaban dari waktu ke waktu. Namun, Rahman et al. [9] dalam pengujian User Acceptance Testing (UAT) pada aplikasi pemantauan menemukan bahwa pengguna seringkali kesulitan menentukan tindakan yang tepat jika hanya disuguhkan nilai numerik tanpa informasi kontekstual yang jelas.

2.2 Mikrokontroler ESP32 dan Research Gap

Espressif Systems [4] menekankan pentingnya pemilihan mikrokontroler yang tepat seperti ESP32 untuk mendukung konektivitas dan efisiensi daya pada perangkat IoT pertanian. Ariwibowo et al. [10] telah mengembangkan sistem pemantau kelembaban tanah berbasis ESP32 yang menunjukkan performa yang baik dalam kondisi lapangan. Maulidda et al. [11] juga mengembangkan sistem kontrol monitoring penyiram tanaman menggunakan sensor soil moisture berbasis IoT yang mampu melakukan penyiraman otomatis.

Berdasarkan kajian literatur tersebut, terdapat research gap pada aspek penyajian informasi kontekstual untuk pemantauan tanaman pot. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan sistem monitoring kelembaban tanah berbasis ESP32 dengan sensor YL-69 yang terintegrasi dengan ThingSpeak dan OLED display 0,96 inci, solusi yang belum banyak diterapkan secara spesifik untuk kasus pemantauan tanaman pot dengan dua jenis tanaman berbeda yaitu lidah buaya dan stroberi.

3. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan jenis penelitian eksperimen terapan (applied research). Penelitian dilakukan untuk menguji kinerja sistem monitoring kelembaban tanah berbasis IoT dalam memberikan informasi secara real-time. Mengingat kendala teknis untuk menunggu kondisi kelembaban tanah yang bervariasi secara alami dalam waktu singkat, proses penelitian dilaksanakan menggunakan metode simulasi terkontrol.

3.1. Alat dan Bahan Penelitian

Perancangan perangkat keras (hardware) difokuskan pada integrasi yang bersifat modular agar mudah dipasang di lapangan. Komponen utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

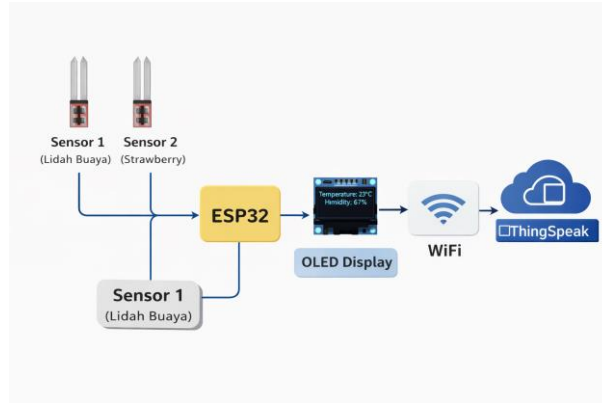
- NodeMCU ESP32-C: Sebagai mikrokontroler utama dan modul Wi-Fi dengan kemampuan konektivitas terintegrasi.
- Sensor Soil Moisture YL-69: Sebagai pendeteksi kelembaban tanah dengan output analog 0–100%.
- OLED Display 0,96 Inchi Berbasis I2C: Sebagai tampilan lokal nilai kelembaban secara real-time.
- Kabel Jumper dan Breadboard: Sebagai media penghubung sirkuit.

3.2. Pemformatan Komponen Matematika

Perancangan perangkat lunak (software) menggunakan logika kondisional berbasis threshold untuk menentukan status kelembaban tanah. Algoritma diprogram menggunakan Arduino IDE dengan struktur perulangan (loop) untuk membaca data sensor secara berkala, mengonversi nilai analog menjadi persentase, serta mengklasifikasikan kondisi tanah ke dalam kategori sebelum ditampilkan pada OLED dan dikirim ke ThingSpeak melalui WiFi.

Sistem bekerja dengan dua sensor soil moisture yang terhubung ke pin analog ESP32, masing-masing dipasang pada tanaman lidah buaya (GPIO34) dan stroberi (GPIO35). Sensor membaca kadar kelembaban tanah dalam bentuk sinyal analog yang kemudian diproses oleh ADC 12-bit pada ESP32.

OLED display menggunakan komunikasi I2C, di mana pin SDA dihubungkan ke GPIO21 dan pin SCL ke GPIO22. Data yang telah diproses ditampilkan pada OLED dan dikirimkan ke platform ThingSpeak melalui koneksi WiFi.



Gambar. 1. Blok diagram sistem monitoring kelembaban tanah berbasis ESP32.

3.3. Algoritma Sistem

Algoritma 1. Klasifikasi Kondisi Kelembaban Tanah

MASUKAN: Nilai ADC dari sensor YL-69 (Sensor1, Sensor2)

KELUARAN: Status kelembaban (Kering/Lembab/Basah)

1. Inisialisasi ESP32, sensor, OLED, WiFi, ThingSpeak
2. Baca nilai analog dari Sensor1 dan Sensor2
3. Konversi nilai ADC ke persen kelembaban (%)
4. JIKA kelembaban $\leq 30\%$ MAKA status = "Kering"
 JIKA $30\% < \text{kelembaban} \leq 70\%$ MAKA status = "Lembab"
 JIKA kelembaban $> 70\%$ MAKA status = "Basah"
5. Tampilkan persentase dan status pada OLED display
6. Kirim data ke ThingSpeak melalui WiFi
7. Ulang dari langkah 2 secara terus-menerus

3.4. Tahapan Pengujian

Pengujian sistem dilakukan melalui beberapa tahapan skenario untuk memvalidasi kinerja alat dalam membaca, mengolah, dan mengirim data kelembaban tanah secara akurat dan real-time:

- Kalibrasi Sensor Soil Moisture: Sensor ditancapkan pada kondisi tanah sangat kering untuk memperoleh nilai ADC minimum, kemudian diuji pada kondisi jenuh air untuk memperoleh nilai ADC maksimum sebagai acuan konversi persentase.
- Pengujian Akurasi Pembacaan: Media tanam pada pot lidah buaya dan stroberi disiram secara bertahap. Hasil pembacaan dibandingkan dengan kondisi fisik tanah menggunakan alat ukur referensi.
- Pengujian Transmisi Data ke ThingSpeak: Sistem diuji dengan memonitor apakah data yang dibaca sensor berhasil dikirim dan ditampilkan pada grafik ThingSpeak dengan memperhatikan interval pengiriman data.
- Pengujian Waktu Respons (Delay Sistem): Pengujian dilakukan dengan mengukur selisih waktu antara perubahan kondisi tanah hingga perubahan nilai dan status muncul pada OLED dan grafik ThingSpeak menggunakan stopwatch.

- Pengujian Stabilitas Sistem: Sistem dijalankan secara terus-menerus selama beberapa jam untuk memastikan alat bekerja stabil tanpa restart, error koneksi WiFi, atau kegagalan pembacaan sensor.

3.5. Analisis dan Evaluasi Data

Data yang diperoleh dari tahapan pengujian dianalisis secara deskriptif kuantitatif. Evaluasi dilakukan dengan menghitung persentase tingkat kesalahan (error rate) pembacaan sensor soil moisture dibandingkan dengan kondisi kelembaban aktual berdasarkan pengamatan manual.

$$\text{Kelembaban Aktual (\%)} = [(\text{Nilai Sensor} - \text{Nilai Referensi}) / \text{Nilai Referensi}] \times 100\%$$

(1)

$$\text{Selisib (\%)} = \text{Kelembaban Aktual} - \text{Kelembaban Sistem}$$

(2)

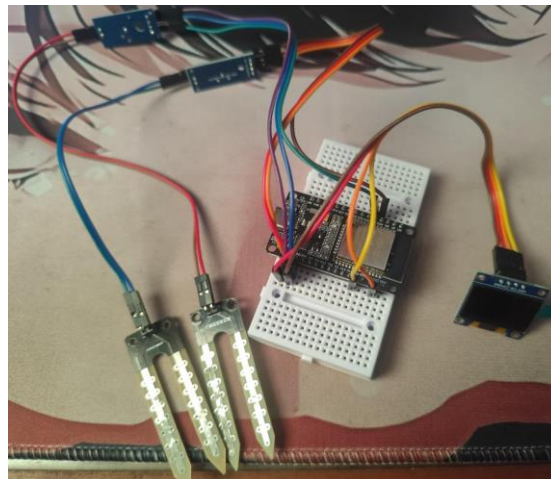
$$\text{Error (\%)} = [\text{Selisib} / \text{Kelembaban Aktual}] \times 100\%$$

(3)

4. Hasil dan Pembahasan

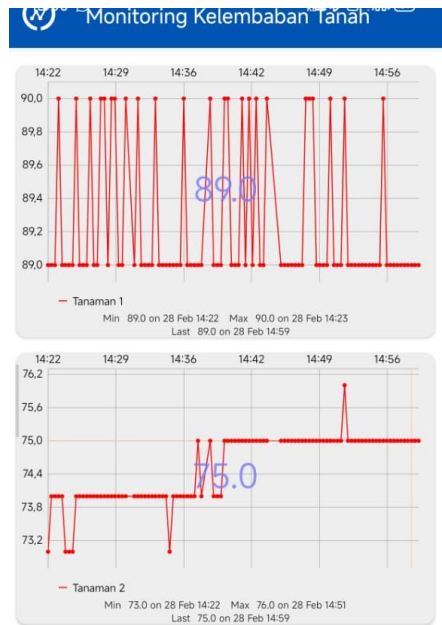
4.1 . Implementasi Sistem

Perangkat utama yang terdiri dari ESP32 dan dua sensor soil moisture telah berhasil dirakit menjadi satu purwarupa (prototipe) sistem monitoring kelembaban tanah. Seluruh komponen dirangkai menggunakan kabel jumper pada breadboard dan disusun secara terstruktur agar sensor dapat tertanam langsung pada media tanam. Sistem dilengkapi dengan OLED display sebagai media tampilan lokal serta modul WiFi internal ESP32 untuk pengiriman data ke platform ThingSpeak.

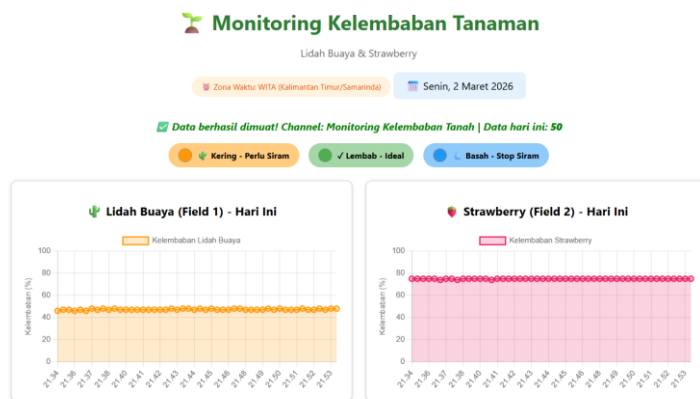


Gambar 2. Bentuk prototipe pendeteksi kelembaban tanah berbasis ESP32.

Dari sisi perangkat lunak, sistem dihubungkan ke platform cloud ThingSpeak dan dimonitor melalui aplikasi ThingView pada smartphone atau pada web browser. Antarmuka aplikasi telah dikonfigurasi untuk menampilkan grafik persentase kelembaban tanah, nilai pembacaan sensor secara real-time, serta status kondisi tanah (Kering, Lembab, atau Basah).



Gambar. 3. Tampilan antarmuka ThingView pada smartphone.



Gambar. 4. Tampilan antarmuka Web Monitoring pada browser.

4.2. Skenario Pengujian Lapangan

Pengujian dilakukan menggunakan metode simulasi terkontrol pada media tanam tanaman Lidah Buaya dan Stroberi. Sistem monitoring ditempatkan di dekat pot tanaman, dengan sensor soil moisture ditancapkan langsung ke dalam tanah. Pengujian dilakukan dengan menyiram tanah secara bertahap untuk mensimulasikan perubahan kondisi dari kering menjadi lembab dan basah.



Gambar. 5. Proses pengujian sistem pada tanaman lidah buaya dan stroberi.

4.3. Hasil Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian pertama bertujuan untuk memvalidasi akurasi pembacaan kelembaban tanah oleh sensor soil moisture dibandingkan dengan kondisi aktual tanah berdasarkan pengamatan fisik dan alat ukur referensi. Data diambil pada beberapa kondisi tanah (kering, lembab, dan basah) untuk melihat tingkat persentase kesalahan (error rate) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar. 6. Contoh tampilan OLED sesuai status kelembaban tanah.

Tabel 1. Hasil Pengujian Akurasi Sensor Soil Moisture

No	Kelembaban Aktual (%)	Kelembaban Sistem (%)	Selisih (%)	Error (%)
1	32% (Kering)	32%	0%	0%
2	49% (Lembab)	49%	1%	2%
3	54% (Lembab)	54%	2%	3,7%
4	77% (Basah)	75%	2%	2,6%
5	86% (Basah)	85%	1%	1,2%
Rata-rata Tingkat Kesalahan (Mean Error)				1,9%

4.4. Hasil Pengujian Logika Status dan Latensi

Pengujian kedua berfokus pada sisi perangkat lunak, yaitu menguji apakah algoritma klasifikasi kelembaban tanah yang diprogram pada ESP32 berhasil menentukan status kondisi tanah secara akurat serta menampilkan data ke platform ThingSpeak, aplikasi ThingView, dan web monitoring dengan waktu respons yang cepat. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Logika Status dan Latensi Transmisi Data

Kelembaban (%)	Status Sistem	Waktu Jeda	Hasil
30%	Kering	1,1 detik	Berhasil
45%	Lembab	1,3 detik	Berhasil
60%	Lembab	1,2 detik	Berhasil
75%	Basah	1,5 detik	Berhasil
85%	Basah	1,6 detik	Berhasil

4.5. Pembahasan

Berdasarkan data pada Tabel 1, rata-rata tingkat kesalahan (mean error) sistem berada pada nilai 1,9%, yang masih dalam batas toleransi sistem monitoring berbasis sensor analog (di bawah 5%). Hasil ini menunjukkan bahwa sensor soil moisture yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dalam membaca perubahan kadar air tanah pada media pengujian [6][7].

Selisih pembacaan yang muncul pada beberapa titik pengujian dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis. Pertama, karakteristik media tanah yang digunakan tidak sepenuhnya homogen. Perbedaan kepadatan, tekstur, dan distribusi air dalam tanah menyebabkan nilai resistansi yang terbaca sensor sedikit berfluktuasi. Kedua, metode penyiraman yang dilakukan secara manual dapat menimbulkan distribusi air yang tidak merata, sehingga sensor membaca kadar kelembaban yang sedikit berbeda dari kondisi rata-rata tanah secara keseluruhan.

Sensor soil moisture tipe resistif cenderung sensitif terhadap noise listrik dan perubahan kecil pada tegangan suplai, yang dapat menyebabkan variasi pembacaan dalam skala kecil [3][7]. Namun demikian, perbedaan nilai tersebut tidak berdampak signifikan terhadap fungsi utama sistem. Secara fungsional, sistem tetap mampu mengklasifikasikan kondisi tanah dengan benar ke dalam kategori Kering, Lembab, dan Basah.

Hasil pengujian latensi pada Tabel 2 menunjukkan bahwa sistem mampu memperbarui data dan status kondisi tanah dengan delay rata-rata antara 1,1 hingga 1,6 detik, yang masih dalam batas toleransi komunikasi jaringan WiFi untuk sistem monitoring IoT [8][5]. Perubahan status terjadi tepat saat nilai kelembaban melewati ambang batas yang telah ditentukan dalam program.

5. Perbandingan

Dibandingkan dengan penelitian terdahulu, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki beberapa keunggulan. Ariwibowo et al. [10] mengembangkan sistem pemantau kelembaban berbasis ESP32 tetapi hanya menggunakan satu sensor dan satu jenis tanaman. Penelitian ini mengintegrasikan dua sensor untuk dua jenis tanaman yang berbeda (lidah buaya dan stroberi) secara bersamaan, sehingga memberikan kemampuan monitoring yang lebih komprehensif.

Maulidda et al. [11] mengembangkan sistem kontrol dengan fokus pada penyiraman otomatis, sementara penelitian ini berfokus pada monitoring dan evaluasi kondisi tanah dengan penyajian informasi kontekstual melalui klasifikasi status (Kering/Lembab/Basah) yang ditampilkan secara real-time. Majumder et al. [12] melakukan penilaian sensor kapasitif berbiaya rendah, sedangkan penelitian ini membuktikan bahwa sensor resistif YL-69 dengan kalibrasi yang tepat juga dapat mencapai tingkat akurasi yang memadai (mean error 1,9%) untuk aplikasi monitoring tanaman pot.

6. Kesimpulan

Sistem monitoring kelembaban tanah berbasis IoT telah berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor soil moisture YL-69 yang terintegrasi dengan platform ThingSpeak, aplikasi ThingView, dan Web Monitoring. Hasil pengujian membuktikan bahwa sistem ini layak digunakan sebagai alat pemantauan kondisi tanah secara real-time pada skala rumah tangga maupun pertanian perkotaan.

Hasil pengujian akurasi menunjukkan mean error sebesar 1,9%, yang masih di bawah ambang toleransi 5% untuk sistem monitoring berbasis sensor analog. Sistem mampu mengklasifikasikan kondisi tanah menjadi tiga kategori (Kering, Lembab, Basah) dengan benar sesuai ambang batas yang telah diprogram, dan berhasil mengirimkan data ke ThingSpeak dengan latensi rata-rata 1,1–1,6 detik.

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan: (1) mengganti sensor resistif dengan sensor kapasitif yang lebih tahan terhadap korosi; (2) mengintegrasikan sistem penyiraman otomatis berbasis pompa dan relay; (3) menambahkan sensor suhu dan kelembaban udara (DHT22) untuk monitoring lingkungan yang lebih komprehensif; (4) mengembangkan sumber daya mandiri menggunakan panel surya; dan (5) merancang casing pelindung yang lebih baik untuk penggunaan di luar ruangan.

Kontribusi Penulis: Konseptualisasi: ASP dan AW; Metodologi: ASP; Perangkat Lunak: ASP; Validasi: ASP, AW, dan DSBU; Analisis formal: ASP; Investigasi: ASP; Sumber daya: DSBU; Kurasi data: ASP; Penulisan—persiapan draf asli: ASP; Penulisan—peninjauan dan penyuntingan: AW dan DSBU; Supervisi: DSBU.

Pendanaan: Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

Pernyataan Ketersediaan Data: Data hasil pengujian sistem tersedia atas permintaan kepada penulis yang sesuai.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Samarinda atas dukungan fasilitas dan sarana penelitian.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Referensi

- [1] L. Da Xu, W. He, dan S. Li, "Internet of Things in industries: A survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, hlm. 2233–2243, 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2300753.
- [2] A. Kamilaris dan F. X. Prenafeta-Boldú, "Deep learning in agriculture: A survey," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 147, hlm. 70–90, 2018, doi: 10.1016/j.compag.2018.02.016.
- [3] S. Majumder et al., "Assessing low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT-ready monitoring systems," *International Journal of Environment and Climate Change*, vol. 13, no. 11, hlm. 2233–2242, 2023.
- [4] Espressif Systems, "ESP32 Technical Reference Manual," 2023. [Online]. Tersedia: <https://www.espressif.com>.
- [5] MathWorks, "ThingSpeak IoT Analytics Platform," 2023. [Online]. Tersedia: <https://thingspeak.com>.

-
- [6] R. Silva, P. Gomes, dan J. Almeida, "Performance analysis of soil moisture sensors in IoT-based smart agriculture systems," *International Journal of Smart Agriculture*, vol. 4, no. 1, hlm. 12–19, 2020.
- [7] A. Singh dan R. Patel, "Evaluation of capacitive and resistive soil moisture sensors for precision farming applications," *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 58, no. 3, hlm. 201–209, 2021.
- [8] M. Hasan, T. Rahman, dan A. Karim, "IoT-based environmental monitoring system using cloud platform," *Journal of Information Technology Research*, vol. 13, no. 2, hlm. 88–97, 2020.
- [9] M. Rahman et al., "User Acceptance Testing pada aplikasi pemantauan berbasis IoT," *Journal of Technology and Innovation*, vol. 8, no. 1, hlm. 45–56, 2020.
- [10] M. R. Ariwibowo, L. A. Setiawan, dan A. Iman, "Sistem pemantau kelembapan tanah menggunakan ESP32 berbasis Internet of Things," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 2, hlm. 155–163, 2024.
- [11] R. Maulidda et al., "Sistem kontrol monitoring penyiram tanaman menggunakan sensor soil moisture berbasis IoT," *Jurnal Ampere*, vol. 10, no. 1, hlm. 44–54, 2025.
- [12] S. Majumder et al., "Assessing low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT-ready monitoring systems," *International Journal of Environment and Climate Change*, vol. 13, no. 11, hlm. 2233–2242, 2023.