SAINTEKES: JURNAL SAINS, TEKNOLOGI DAN KESEHATAN
LPPM Institut Teknologi Dan Kesehatan Aspirasi
E-ISSN: 2963-0959

PENGEMBANGAN SISTEM MULTISENSOR BERBASIS IOT UNTUK PEMANTAUAN KELEMBAPAN TANAH DAN KONDISI IKLIM MIKRO SECARA REAL-TIME PADA BUDIDAYA CABAI

Muhammad Haeru Mahendra[1], Abdul Hafiz[2]
[1]Institut Teknologi dan Kesehatan Aspirasi, Lombok Timur, Indonesia
[2]Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

Article Information

Article history:
Received September 23, 2026
Approved

Keywords:
IoT-Based Multisensor System; Soil Moisture; Microclimate Conditions

ABSTRACT

Chili cultivation is highly sensitive to fluctuations in soil moisture and local microclimate, while manual observation provides limited temporal resolution for irrigation decisions. This study developed and evaluated an Internet of Things (IoT)-based multisensor system for real-time monitoring of soil moisture and microclimate conditions in chili cultivation. The prototype integrates an ESP32 DevKit V1 as the processing and communication unit, a Capacitive Soil Moisture Sensor V2 for soil moisture measurement, a DHT22 for air temperature and relative humidity, and a DS18B20 for soil temperature. Sensor readings are processed locally, displayed through an LCD interface, and transmitted through a wireless network to an IoT monitoring platform. A quantitative experimental approach was used to evaluate sensor response under dry, moist, and wet soil conditions and to characterize microclimate measurements. The soil moisture tests produced mean readings of 8.33% for dry soil, 63.00% for moist soil, and 97.67% for wet soil, demonstrating clear separation among the predefined moisture classes. Soil temperature measurements ranged from 27–31 °C with a mean of 28.8 °C, while DHT22 measurements produced a mean air temperature of 29.6 °C and relative humidity of 60.6%. These results indicate that the multisensor architecture can provide continuous, interpretable environmental information for chili cultivation. The system offers a practical foundation for data-driven irrigation management and can be extended with automated actuation, cloud analytics, and predictive models. The integrated approach reduces dependence on periodic manual inspection and supports timely identification of moisture deviations early.

© 2024 SAINTEKES

**Corresponding author email: muhammadhaerumahendra@gmail.com*

PENDAHULUAN

Cabai (*Capsicum annuum* L.) merupakan komoditas hortikultura bernilai ekonomi tinggi yang produktivitasnya berkaitan erat dengan ketersediaan air dan iklim mikro di sekitarnya. Kelembapan tanah menentukan jumlah air yang tersedia bagi akar, sedangkan suhu udara dan

kelembapan relatif memengaruhi kebutuhan penguapan serta hubungan air pada tanaman. Pada budidaya skala kecil, variabel tersebut masih sering diamati secara visual dan berkala, sehingga perubahan cepat di sekitar perakaran sulit dikenali. Penelitian pertanian presisi kini semakin memanfaatkan sensor Internet of Things (IoT) untuk mengumpulkan data tanah dan iklim secara berkelanjutan serta membantu petani mengambil keputusan irigasi melalui perangkat terhubung (Shahab et al., 2024; Pascoal et al., 2024; Ranjan & Saini, 2022). Peralihan ke pemantauan kontinu sangat relevan di wilayah dengan keterbatasan air irigasi, tenaga kerja, dan infrastruktur teknis.

Kelembapan tanah merupakan salah satu variabel utama pengelolaan irigasi karena menggambarkan kondisi air di zona perakaran. Namun, pembacaan kelembapan dipengaruhi oleh sifat tanah dan kondisi atmosfer. Respons sensor dapat dipengaruhi tekstur, kepadatan isi, salinitas, suhu, kedalaman pemasangan, serta prosedur kalibrasi; sementara kebutuhan irigasi juga dipengaruhi evapotranspirasi dan pertumbuhan tanaman. Zhang et al. (2024) mengulas teknologi pemantauan kelembapan tanah dan menekankan keragaman prinsip pengukuran serta penerapan lapangan. Hamouda et al. (2024) menunjukkan bahwa jaringan sensor kelembapan tanah nirkabel dapat mendukung pengelolaan irigasi pada skala lahan, sedangkan Dong et al. (2024) menunjukkan keterkaitan pengamatan kelembapan tanah dengan irigasi presisi melalui arsitektur IoT lapangan. Temuan tersebut menunjukkan pentingnya sensor yang andal dan informasi lingkungan yang kontekstual.

Penelitian IoT pertanian terkini telah beralih dari pengukuran satu parameter menuju arsitektur sensor terintegrasi. Shahab et al. (2024) menggambarkan pertanian cerdas sebagai perpaduan penginderaan, komunikasi, analisis, dan integrasi sistem, sedangkan Faqir et al. (2024) menekankan meningkatnya pemanfaatan sensor tanah dan tanaman untuk pengamatan real-time. Chourlias et al. (2025) menunjukkan bahwa jaringan sensor fisik dapat menyediakan data untuk pengembangan sensor virtual dan pembelajaran mesin. Implikasinya, analitik canggih tidak dapat menggantikan pengukuran dasar yang lemah atau tanpa konteks. Karena itu, simpul multisensor yang mencatat kelembapan dan suhu tanah serta suhu dan kelembapan relatif udara memberikan dasar lebih informatif bagi sistem pendukung keputusan dibandingkan sensor kelembapan tunggal (Shahab et al., 2024; Faqir et al., 2024; Bakthavatchalam et al., 2022).

Penelitian IoT pada tanaman cabai di Indonesia telah menunjukkan kelayakan pemantauan terhubung dan penyiraman otomatis. Riyadi (2023) mengembangkan kebun cerdas menggunakan sensor kelembapan tanah, DHT11, ESP8266, dan Telegram. Romadan et al. (2024) mengintegrasikan pengukuran tanah, suhu, dan kelembapan melalui NodeMCU, Blynk, ThingSpeak, dan logika fuzzy. Martani et al. (2025) mengembangkan prototipe berbasis

IoT dan Android yang menggabungkan kelembapan tanah, kelembapan udara, dan suhu tanah untuk penyiraman cabai jarak jauh. Penelitian tersebut memberikan landasan teknis, tetapi banyak implementasinya menekankan fungsi kendali atau platform komunikasi tertentu. Penelitian ini berfokus pada lapisan penginderaan, yaitu pengembangan sistem multisensor ringkas dan karakterisasi kelembapan tanah serta iklim mikro sebelum sistem diperluas ke irigasi mandiri.

Kesenjangan penelitian terletak pada integrasi perangkat keras berbiaya rendah dengan pengukuran lingkungan yang mudah ditafsirkan. Sistem dapat berhasil mengirim data tetapi tetap kurang bermanfaat bagi pertanian jika pembacaan sensor tidak terkalibrasi atau tidak disertai variabel kontekstual. Sebaliknya, algoritma irigasi yang kompleks memerlukan aliran data lapangan yang andal. Penelitian irigasi cerdas semakin memadukan kelembapan tanah dengan informasi cuaca, layanan komputasi awan, dan model prediktif (Preite & Vignali, 2024; Togneri et al., 2022; Abioye et al., 2022; Ramachandran et al., 2022). Penelitian ini sengaja memulai dari arsitektur lebih sederhana untuk memperoleh dasar pengukuran yang transparan. Pendekatan ini sesuai bagi pengembangan prototipe karena setiap sensor dapat diuji secara terpisah dan kemudian ditafsirkan bersama sebelum prediksi atau otomatisasi yang lebih kompleks diterapkan.

Sistem yang diusulkan menggunakan ESP32 DevKit V1 sebagai pengendali utama sekaligus unit komunikasi. Capacitive Soil Moisture Sensor V2 mengukur kelembapan tanah, DS18B20 mengukur suhu tanah, dan DHT22 mengukur suhu udara serta kelembapan relatif. Data sensor diproses oleh mikrokontroler, ditampilkan pada LCD, lalu dikirim melalui Wi-Fi ke lingkungan pemantauan IoT. Rancangan ini mengikuti arsitektur berlapis sistem IoT pertanian yang menghubungkan penginderaan fisik dengan komunikasi dan visualisasi (Shahab et al., 2024). Rancangan ini juga mempertimbangkan anjuran bahwa pemasangan sensor, akuisisi data, dan tujuan pengukuran harus direncanakan secara terpadu (Pascoal et al., 2024).

Prototipe dievaluasi melalui pengukuran terkendali pada tanah kering, lembap, dan basah serta pengamatan berulang terhadap suhu tanah, suhu udara, dan kelembapan udara. Hasilnya digunakan untuk menentukan kategori kelembapan lokal dan menggambarkan iklim mikro saat pengujian. Penelitian ini tidak menganggap ambang kelembapan yang dipilih sebagai batas agronomis universal, sebab nilainya bergantung pada karakteristik tanah, fase pertumbuhan tanaman, kedalaman perakaran, dan strategi irigasi. Ambang tersebut diperlakukan sebagai nilai operasional prototipe sekaligus titik awal kalibrasi lanjutan. Hal ini sejalan dengan literatur yang menekankan penafsiran kelembapan tanah berdasarkan konteks fisik dan agronomis (Dafonte et al., 2024; Zhang et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi sistem multisensor berbasis IoT yang mampu menyediakan informasi kelembapan tanah dan kondisi iklim mikro secara real-time pada budidaya cabai. Secara khusus, penelitian mengintegrasikan komponen sensor dan komunikasi, mengidentifikasi respons kelembapan tanah pada kondisi kering, lembap, dan basah, mengukur suhu tanah dan udara serta kelembapan relatif, dan menafsirkan manfaat pengukuran gabungan bagi pemantauan yang berorientasi irigasi. Kontribusinya adalah kerangka penginderaan berbiaya rendah dan transparan yang dapat menjadi landasan irigasi otomatis, analitik awan, dan pemodelan prediktif di masa mendatang. Penyusunan lapisan pengukuran fisik terlebih dahulu menghubungkan pengembangan prototipe praktis dengan pertanian cerdas berbasis data.

METODE

Penelitian menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif yang berfokus pada pengembangan dan evaluasi fungsional prototipe multisensor berbasis IoT. Proses pengembangan mencakup identifikasi kebutuhan, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, perakitan, kalibrasi, pengujian sensor, pengujian komunikasi nirkabel, dan interpretasi hasil pengukuran. Menurut Sugiyono (2019), penelitian kuantitatif sesuai ketika variabel dapat diamati dan diukur secara sistematis, sedangkan penelitian dan pengembangan dapat digunakan untuk menghasilkan serta menguji suatu produk. Kelembapan tanah, suhu tanah, suhu udara, dan kelembapan relatif diperlakukan sebagai keluaran sistem yang dapat diukur. Evaluasi menekankan respons sensor dan fungsi pemantauan, bukan pengujian hasil panen jangka panjang. Lingkungan uji berupa media budidaya cabai dengan kondisi tanah yang disiapkan untuk mewakili keadaan kering, lembap, dan basah.

Perangkat keras meliputi ESP32 DevKit V1, Capacitive Soil Moisture Sensor V2, sensor suhu tahan air DS18B20, sensor suhu dan kelembapan DHT22, LCD I2C 16×2, breadboard, kabel jumper, catu daya, dan komponen pelindung. ESP32 berfungsi sebagai unit pemrosesan dan komunikasi Wi-Fi. Sensor kelembapan dipasang pada media tanam, DS18B20 ditempatkan untuk mengukur suhu tanah, dan DHT22 diletakkan di atas permukaan tanah untuk mewakili kondisi udara lokal. Data diperoleh melalui firmware yang dikembangkan menggunakan Arduino IDE dan pustaka perangkat terkait. Alur pengukuran terdiri atas inisialisasi sensor, akuisisi data, konversi menjadi nilai operasional, penayangan di LCD, dan pengiriman nirkabel ke antarmuka pemantauan. Arsitektur ini mengikuti alur umum dari sensor menuju dasbor pada penelitian IoT pertanian (Shahab et al., 2024; Pascoal et al., 2024).

Pengujian dilakukan dengan mencatat nilai kelembapan pada tiga kondisi terkendali, yaitu kering, lembap, dan basah. Ambang klasifikasi prototipe ditetapkan sebesar 0–60% untuk

kering, 60–80% untuk lembap, dan 80–100% untuk basah. Sebanyak lima pengamatan digunakan untuk suhu tanah serta suhu dan kelembapan relatif dari DHT22. Analisis deskriptif dilakukan melalui perhitungan rata-rata setiap variabel dan perbandingan hasil antarkondisi. Rata-rata dihitung menggunakan $\bar{x} = \Sigma x/n$, dengan x sebagai nilai sensor dan n sebagai jumlah pengamatan. Hasil ditafsirkan sebagai indikator pada tingkat prototipe, bukan pengukuran laboratorium absolut terhadap kadar air volumetrik. Pendekatan ini sejalan dengan kebutuhan kalibrasi lokal dalam literatur sensor tanah serta memungkinkan perbandingan dengan instrumen acuan pada penelitian berikutnya (Zhang et al., 2024; Dafonte et al., 2024; Phasinam et al., 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Prototipe dirakit menggunakan ESP32 DevKit V1 karena pengendali ini memiliki kemampuan pemrosesan memadai dan komunikasi Wi-Fi terintegrasi untuk simpul lapangan. Lapisan penginderaan mencakup Capacitive Soil Moisture Sensor V2, sensor suhu tanah DS18B20, serta DHT22 untuk suhu dan kelembapan relatif udara. Pengukuran dibaca secara berkala, dikonversi menjadi nilai yang dapat ditafsirkan, kemudian dikirim ke antarmuka pemantauan. Arsitektur tersebut mengikuti pola IoT pertanian yang menghubungkan penginderaan, pemrosesan lokal, konektivitas, penyimpanan, dan visualisasi dalam satu alur data (Shahab et al., 2024). Pemilihan sensor juga perlu disesuaikan dengan variabel agronomis yang diamati dan kondisi pemasangan, bukan sekadar ketersediaan perangkat (Pascoal et al., 2024).

Tabel 1. Hasil pengukuran kelembapan tanah dan klasifikasi operasional.

Kondisi	Rata-rata Kelembapan Tanah (%)	Kelas Operasional	Interpretasi
Kering	8.33	0–60%	Kelembapan rendah
Lembap	63.00	60–80%	Kelembapan sedang
Basah	97.67	80–100%	Kelembapan tinggi

Percobaan kelembapan tanah memperlihatkan pemisahan yang jelas antara tiga kondisi yang telah ditentukan. Tanah kering menghasilkan kelembapan rata-rata 8,33%, tanah lembap 63,00%, dan tanah basah 97,67%. Urutan ini menunjukkan respons sensor yang konsisten terhadap peningkatan ketersediaan air dalam rentang pengujian. Prototipe menggunakan kelas kering 0–60%, lembap 60–80%, dan basah 80–100%. Klasifikasi berbasis ambang ini sesuai dengan prinsip sistem irigasi cerdas yang menerjemahkan pengukuran berkelanjutan menjadi kategori untuk membantu keputusan pengairan (Romadan et al., 2024). Namun, ambang tersebut bukan batas agronomis universal, melainkan aturan lokal yang masih perlu disesuaikan dengan karakteristik tanah dan fase pertumbuhan tanaman.

Rata-rata 8,33% pada tanah kering memberikan titik acuan bawah. Pada kondisi tersebut, keluaran sensor menunjukkan ketersediaan air yang terbatas dan menjadi sinyal kuat perlunya irigasi. Rata-rata 63,00% pada tanah lembap berada di rentang menengah

dan memperlihatkan kemampuan sistem membedakannya dari kondisi kering maupun sangat basah. Rata-rata 97,67% pada tanah basah merupakan titik acuan atas. Pola tiga titik ini bermanfaat untuk validasi prototipe karena menunjukkan respons yang berurutan, bukan keluaran acak. Penelitian sensor tanah berbiaya rendah juga menekankan kalibrasi dan penafsiran spesifik lokasi karena pengukuran dipengaruhi karakteristik tanah, kedalaman pemasangan, dan distribusi air (Zhang et al., 2024).

Selisih rata-rata kondisi kering dan lembap sebesar 54,67 poin persentase, sedangkan kondisi lembap dan basah berbeda 34,67 poin persentase. Perbedaan tersebut memperlihatkan transisi kondisi yang dapat diukur, bukan hasil yang saling berimpit. Pemisahan kering ke lembap yang lebih besar dapat membantu mendeteksi kebutuhan irigasi, meskipun ambang tidak boleh ditetapkan berdasarkan pemisahan pembacaan sensor saja. Pertimbangan agronomis seperti kapasitas lapang, kedalaman perakaran, fase perkembangan tanaman, dan evapotranspirasi juga perlu diperhitungkan. Hamouda et al. (2024) menunjukkan bahwa pengelolaan irigasi berbasis kelembapan tanah dapat mempertahankan status air dalam rentang tertentu, sedangkan Zhang et al. (2024) menekankan perbedaan prinsip dan konteks penggunaan teknologi pemantauan. Oleh sebab itu, ambang prototipe perlu dipandang sebagai parameter keputusan yang harus dikalibrasi, bukan standar universal.

Pengukuran suhu tanah menggunakan DS18B20 menghasilkan nilai 27, 30, 27, 29, dan 31 °C dengan rata-rata 28,8 °C. Rentang variasi 4 °C menunjukkan adanya perubahan suhu jangka pendek pada zona perakaran yang dipantau. Pencatatan suhu tanah bersama kelembapan memberikan konteks yang tidak tersedia dari sensor kelembapan tunggal. Nilai kelembapan 60%, misalnya, dapat memiliki makna berbeda karena suhu memengaruhi penguapan dan kebutuhan air tanaman. Penelitian sensor pertanian mendukung penggabungan variabel tanah dan lingkungan alih-alih memandangnya sebagai pengamatan yang terpisah (Faqir et al., 2024). DS18B20 berperan sebagai sensor pelengkap yang memperkaya deskripsi kondisi fisik sekitar akar cabai.

Sensor DHT22 menghasilkan rata-rata suhu udara 29,6 °C dari lima pembacaan. Pengukuran kelembapan relatif sebesar 63%, 60%, 60%, 61%, dan 59% memberikan rata-rata 60,6%. Rentang kelembapan yang sempit menunjukkan kondisi atmosfer relatif stabil, sedangkan suhu udara hanya bervariasi sekitar 1 °C. Pengukuran ini menegaskan manfaat penginderaan iklim mikro untuk menafsirkan dinamika kelembapan tanah. Variabel atmosfer memengaruhi kebutuhan evaporasi dan laju penurunan air tanah. Pascoal et al. (2024) menempatkan pemantauan iklim sebagai komponen penting pertanian presisi berbasis IoT, sementara Dong

et al. (2024) mengaitkan pengamatan sensor dengan keputusan irigasi operasional. Data atmosfer tersebut melengkapi interpretasi kelembapan tanah.

Tabel 2. Pengamatan suhu tanah dan kondisi iklim mikro atmosfer.

Pengamatan	Suhu Tanah (°C)	Suhu Udara (°C)	Kelembapan Relatif (%)
1	27	29	63
2	30	30	60
3	27	29	60
4	29	30	61
5	31	30	59
Rata-rata	28.8	29.6	60.6

Penggabungan kelembapan tanah, suhu tanah, suhu udara, dan kelembapan relatif menghasilkan catatan yang lebih informatif dibandingkan satu parameter saja. Pada prototipe ini, kelembapan tanah menggambarkan ketersediaan air; DS18B20 menggambarkan keadaan termal zona perakaran; dan DHT22 menggambarkan kondisi atmosfer. Konfigurasi tersebut memungkinkan antarmuka menyajikan tanah dan iklim mikro sebagai pengamatan yang saling berkaitan. Integrasi ini sejalan dengan arsitektur pertanian cerdas yang menghimpun berbagai variabel lingkungan untuk mendukung keputusan (Chourlias et al., 2025). Pendekatan ini juga mengatasi keterbatasan sejumlah sistem cabai terdahulu yang lebih menekankan pemantauan kelembapan atau penyiraman otomatis tanpa memadukan beberapa pengukuran lingkungan (Riyadi, 2023; Martani et al., 2025).

Alur pemantauan real-time penting karena kondisi pertanian dapat berubah di antara dua inspeksi manual. ESP32 membaca, mengolah, dan mengirim nilai sensor melalui Wi-Fi sehingga pengguna dapat memantau kondisi tanpa harus terus-menerus mendatangi lokasi budidaya. Arsitektur ini mengubah simpul sensor menjadi sistem pemantauan terhubung. Pendekatan tersebut sejalan dengan penelitian IoT yang menunjukkan bahwa resolusi waktu lebih tinggi meningkatkan kegunaan informasi kelembapan tanah untuk analisis irigasi (Togneri et al., 2022). Penelitian budidaya cabai lainnya juga menggunakan antarmuka seluler atau awan untuk pemantauan dan pengendalian jarak jauh (Romadan et al., 2024; Martani et al., 2025). Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi data kelembapan dan iklim mikro dalam satu simpul ringkas untuk pengguna skala kecil.

Arsitektur pemantauan dapat menjadi landasan otomatisasi irigasi karena kelas kelembapan dapat diubah menjadi aturan kendali. Implementasi mendatang dapat mengaktifkan pompa ketika nilai turun di bawah ambang bawah terkalibrasi dan menghentikannya pada ambang atas tertentu. Namun, kemampuan kendali otomatis belum dapat disimpulkan dari pengukuran saat ini karena penelitian belum menghitung volume irigasi, efisiensi penggunaan air, hasil panen, atau respons tanaman jangka panjang. Pembedaan ini penting dalam penafsiran hasil. Preite dan Vignali (2024) menunjukkan bahwa sistem irigasi lebih maju dapat menggabungkan data tanah, lingkungan, dan prakiraan dalam kerangka prediktif, sedangkan Anoop dan Josemin Bala (2023) menekankan pentingnya

integrasi perangkat, komunikasi, penyimpanan, dan metode pengambilan keputusan.

Kategori kelembapan yang diamati juga dapat dibandingkan dengan penelitian di Indonesia. Romadan et al. (2024) mengembangkan prototipe pemantauan kelembapan tanah cabai menggunakan NodeMCU, Blynk, ThingSpeak, dan logika fuzzy. Riyadi (2023) memadukan pemantauan kelembapan tanah dan suhu dalam kebun cabai berbasis IoT. Martani et al. (2025) menggabungkan kelembapan tanah, kelembapan udara, suhu tanah, dan pemantauan jarak jauh untuk penyiraman cabai. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan perkembangan sistem budidaya terhubung. Prototipe penelitian ini melanjutkan arah tersebut melalui penyatuan penginderaan kelembapan tanah dan iklim mikro serta pelaporan rentang klasifikasi lokal. Evaluasinya menekankan pembedaan keadaan sensor dan karakterisasi lingkungan, bukan klaim kinerja irigasi otomatis.

Pengukuran iklim mikro memberikan konteks tambahan terhadap hasil kelembapan tanah. Rata-rata suhu udara 29,6 °C dan kelembapan relatif 60,6% menggambarkan keadaan atmosfer selama pengamatan. Karena evapotranspirasi dipengaruhi kebutuhan atmosfer dan ketersediaan air tanah, pemantauan kelembapan tanah saja dapat mengabaikan informasi penjelas. Pascoal et al. (2024) menyebut suhu, kelembapan, dan variabel tanah sebagai parameter penting dalam pemantauan pertanian berbasis IoT, sedangkan Shahab et al. (2024) menggambarkan penginderaan multiparameter sebagai bagian dari pertanian cerdas terintegrasi. Meski mendukung pengamatan multisensor, hasil penelitian ini belum membuktikan hubungan kuantitatif antara iklim mikro dan pertumbuhan cabai karena pengukuran fisiologi tanaman berada di luar lingkup pengujian.

Dari perspektif perancangan sistem, prototipe menunjukkan manfaat pemisahan fungsi penginderaan, pemrosesan, komunikasi, dan visualisasi. ESP32 menyediakan kendali utama, sensor menghasilkan pengamatan beragam, dan antarmuka nirkabel memberikan akses ke hasil pengukuran. Susunan modular memungkinkan penggantian atau penambahan sensor tanpa mengubah konsep pemantauan. Literatur juga menggambarkan pertanian cerdas sebagai arsitektur terintegrasi, bukan sekadar aplikasi satu perangkat; lapisan penginderaan, komunikasi, analitik, dan pendukung keputusan saling terkait (Shahab et al., 2024). Pendekatan modular cocok untuk budidaya skala kecil karena pengukuran curah hujan, intensitas cahaya, konduktivitas listrik, atau pH dapat ditambahkan kemudian. Hasil saat ini menjadi dasar perangkat sensor sebelum pengembangan lebih lanjut, dengan kompleksitas awal yang lebih rendah.

Kalibrasi sensor merupakan persoalan utama dalam menafsirkan persentase hasil pengukuran. Nilai 8,33%, 63,00%, dan 97,67% berasal dari kondisi kering, lembap, dan basah, tetapi tidak dapat langsung disamakan dengan kadar air volumetrik laboratorium. Sensor kapasitif

menghasilkan respons listrik yang dipengaruhi komposisi tanah, kepadatan isi, salinitas, suhu, penempatan probe, dan metode kalibrasi. Zhang et al. (2024) mengulas tantangan tersebut dalam teknologi pemantauan kelembapan tanah, sedangkan Dafonte et al. (2024) menunjukkan manfaat sensor proksimal berbiaya rendah ketika diintegrasikan dengan tepat ke sistem irigasi. Oleh karena itu, persentase pada penelitian ini lebih tepat ditafsirkan sebagai indikator sistem yang memerlukan kalibrasi. Validasi mendatang sebaiknya membandingkan pembacaan sensor dengan metode gravimetri atau metode acuan kadar air tanah pada berbagai tekstur dan tingkat kelembapan.

Temuan saat ini juga menunjukkan keterbatasan evaluasi prototipe. Kumpulan data terdiri atas lima pengamatan suhu tanah dan DHT22, sedangkan rata-rata kelembapan mewakili tiga kondisi terkendali. Karena itu, hasil membuktikan kemampuan membedakan kondisi dan memantau lingkungan, tetapi belum cukup untuk menetapkan keandalan jangka panjang, pengaruh terhadap tanaman, atau penghematan air. Keterbatasan ini selaras dengan literatur bahwa sistem IoT lapangan perlu diterapkan lebih lama pada kondisi bervariasi (Hamouda et al., 2024; Dong et al., 2024). Eksperimen selanjutnya perlu meningkatkan frekuensi pengamatan, memantau beberapa titik zona perakaran, mencatat kejadian irigasi, dan menghubungkan data sensor dengan indikator pertumbuhan tanaman. Langkah tersebut akan memperkuat validasi lintas musim dan peralihan dari demonstrasi prototipe menuju pendukung keputusan agronomis.

Secara keseluruhan, sistem multisensor yang diusulkan mampu mengubah pengamatan kondisi tanah dan iklim mikro menjadi informasi terstruktur untuk pemantauan cabai secara real-time. Sensor kelembapan menghasilkan rata-rata yang jelas berbeda pada kondisi kering, lembap, dan basah; DS18B20 dan DHT22 memberikan data termal dan atmosfer sebagai pelengkap. Kombinasi ini menjadi dasar model keputusan irigasi. Penelitian terkini berkembang menuju analitik prediktif, sensor virtual, dan sistem pertanian terintegrasi berbasis awan, tetapi seluruh pendekatan tersebut membutuhkan landasan pengukuran fisik yang andal (Chourlias et al., 2025; Preite & Vignali, 2024; Shahab et al., 2025). Sistem ini merupakan tahap awal penginderaan, bukan platform pengelolaan pertanian otonom yang lengkap. Nilai utamanya adalah penggabungan multisensor berbiaya rendah, konektivitas IoT, dan klasifikasi kelembapan lokal yang transparan.

KESIMPULAN

Prototipe yang dikembangkan berhasil mengintegrasikan pengukuran kelembapan tanah, suhu tanah, suhu udara, dan kelembapan relatif dengan komunikasi Wi-Fi berbasis ESP32. Sistem menghasilkan kategori kelembapan yang dapat ditafsirkan beserta pengamatan iklim mikro pelengkap melalui jalur pemantauan terhubung. Arsitektur ini

menyediakan dasar praktis pemantauan budidaya cabai ketika pengamatan lingkungan secara kontinu lebih dibutuhkan daripada inspeksi manual berkala.

Rata-rata kelembapan tanah 8,33%, 63,00%, dan 97,67% membedakan dengan jelas kondisi uji kering, lembap, dan basah. Suhu tanah rata-rata mencapai 28,8 °C, sedangkan suhu udara dan kelembapan relatif masing-masing rata-rata 29,6 °C dan 60,6%. Temuan ini mendukung penggunaan simpul multisensor sebagai instrumen pemantauan lokal, tetapi ambang kelembapan yang dipilih tetap perlu dikalibrasi terhadap pengukuran acuan dan kondisi agronomis.

Sistem dapat dikembangkan menuju irigasi otomatis, analitik berbasis awan, dan dukungan keputusan prediktif. Penelitian mendatang perlu memperpanjang durasi dan memperluas cakupan spasial pengukuran lapangan, memvalidasi sensor kapasitif terhadap metode acuan kadar air tanah, mencatat volume irigasi serta indikator pertumbuhan tanaman, dan menguji keandalan komunikasi jangka panjang. Upaya tersebut akan memperkuat pengembangan prototipe fungsional menjadi platform irigasi cerdas yang tervalidasi di lapangan pada budidaya cabai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih atas dukungan akademik dan teknis selama pengembangan serta pengujian prototipe, serta atas ketersediaan fasilitas untuk kegiatan budidaya dan pengujian sensor.

DAFTAR PUSTAKA

Sugiyono. (2019). Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D (2nd ed.). Alfabeta.

Anoop, E. G., & Bala, G. J. (2023). IoT and ML-based automatic irrigation system for smart agriculture system. Agronomy Journal, 116(3), 1187–1203. https://doi.org/10.1002/agj2.21344

Abioye, E. A., Hensel, O., Esau, T. J., Olakunle, E., Abidin, M. S. Z., Ayobami, A. S., Yerima, O., & Nasirahmadi, A. (2022). Precision irrigation management using machine learning and digital farming solutions. AgriEngineering, 4(1), 70–103. https://doi.org/10.3390/agriengineering4010006

Bakthavatchalam, K., Karthik, B., Thiruvengadam, V., Muthal, S., Jose, D., Kotecha, K., & Varadarajan, V. (2022). IoT framework for measurement and precision agriculture: Predicting the crop using machine learning algorithms. Technologies, 10(1), 13. https://doi.org/10.3390/technologies10010013

Ranjan, P., & Saini, V. (2022). Smart irrigation system using IoT. In Agri-Food 4.0: Innovations, challenges and strategies. Emerald Publishing. https://doi.org/10.1108/S1877-636120220000027009

Ramachandran, V., Ramalakshmi, R., Kavin, B. P., Hussain, I., Almaliki, A. H., Almaliki, A. A., Elnaggar, A. Y., & Hussein, E. E. (2022). Exploiting IoT and its enabled technologies for irrigation needs in agriculture. Water, 14(5), 719. https://doi.org/10.3390/w14050719

Phasinam, K., Kassanuk, T., Shinde, P. P., Thakar, C. M., Sharma, D. K., Mohiddin, M. K., & Rahmani, A. W. (2022). Application of IoT and cloud computing in automation of agriculture irrigation. Journal of Food Quality, 2022, 1–8. https://doi.org/10.1155/2022/8285969

Togneri, R. M., dos Santos, D. F., Camponogara, G., Nagano, H., Custódio,

G., Prati, R. C., Fernandes, S., & Kamienski, C. (2022). Soil moisture forecast for smart irrigation: The primetime for machine learning. Expert Systems with Applications, 207, 117653. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117653

Riyadi, M. (2023). Sistem cerdas untuk monitoring pengukuran suhu dan kelembapan tanah pada tanaman cabai berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan aplikasi Telegram. Jurnal Teknologi Elektro, 14(2). https://doi.org/10.22441/jte.2023.v14i2.008

Shahab, H., Iqbal, M., Sohaib, A., Khan, F. U., & Waqas, M. (2024). IoT-based agriculture management techniques for sustainable farming: A comprehensive review. Computers and Electronics in Agriculture, 220, 108851. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108851

Faqir, Y., Qayoom, A., Erasmus, E., Schutte-Smith, M., & Visser, H. G. (2024). A review on the application of advanced soil and plant sensors in the agriculture sector. Computers and Electronics in Agriculture, 226, 109385. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109385

Preite, L., & Vignali, G. (2024). Artificial intelligence to optimize water consumption in agriculture: A predictive algorithm-based irrigation management system. Computers and Electronics in Agriculture, 223, 109126. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109126

Hamouda, F., Puig-Sirera, À., Bonzi, L., Remorini, D., Massai, R., & Rallo, G. (2024). Design and validation of a soil moisture-based wireless sensors network for the smart irrigation of a pear orchard. Agricultural Water Management, 305, 109138. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109138

Dong, Y., Werling, B., Cao, Z., & Li, G. (2024). Implementation of an in-field IoT system for precision irrigation management. Frontiers in Water, 6, 1353597. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1353597

Dafonte, J., González, M. Á., Comesaña, E., Teijeiro, M. T., & Cancela, J. J. (2024). Soil water status monitoring system with proximal low-cost sensors and LoRa technology for smart water irrigation in woody crops. Sensors, 24(24), 8104. https://doi.org/10.3390/s24248104

Zhang, X., Feng, G., & Sun, X. (2024). Advanced technologies of soil moisture monitoring in precision agriculture: A review. Journal of Agriculture and Food Research, 18, 101473. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101473

Pascoal, D., Silva, N., Adão, T., Lopes, R. D., Peres, E., & Morais, R. (2024). A technical survey on practical applications and guidelines for IoT sensors in precision agriculture and viticulture. Scientific Reports, 14, 29793. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80924-y

Romadan, D. P., Arinal, V., Sarimole, F. M., & Tundo, T. (2024). Prototipe sistem monitoring kelembapan tanah pada tanaman cabai berbasis Internet of Things dengan metode fuzzy logic menggunakan NodeMCU ESP8266, Blynk dan ThingSpeak. MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science, 5(1), 130–140. https://doi.org/10.57152/malcom.v5i1.1600

Martani, A., Perdana, A. L., & Anugrah, M. (2025). Prototype of Internet of Things (IoT) and Android-based chilli plant watering monitoring and control tool. Journal of System and Computer Engineering, 6(1). https://doi.org/10.61628/jsce.v6i1.1601

Chourlias, A., Violos, J., & Leivadeas, A. (2025). Virtual sensors for smart farming: An IoT- and AI-enabled approach. Internet of Things, 32, 101611. https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101611

Shahab, H., Naeem, M., Iqbal, M., Aqeel, M., & Ullah, S. S. (2025). IoT-driven smart

agricultural technology for real-time soil and crop optimization. Smart Agricultural Technology, 10, 100847. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100847