



Penerapan IoT untuk Monitoring Tanaman dan Otomatisasi Irigasi

Application of IoT for Plant Monitoring and Irrigation Automation



Parwito ^a

Article history:	Abstract
<p>Submitted: 14 March 2024 Revised: 18 March 2024 Accepted: 10 April 2024</p>	<p><i>The inefficiency of conventional irrigation systems causes water waste and suboptimal plant growth, particularly in smallholder farming contexts in Indonesia. This study implements an IoT-based plant monitoring and irrigation automation system using the ESP32 microcontroller integrated with soil moisture sensors, LDR light sensors, DHT11 temperature/humidity sensors, and an ultrasonic water level sensor. The system transmits data via the Wi-Fi protocol to the Firebase Realtime Database cloud platform and is displayed through an Android mobile application with automated push notification alerts. The research method used is Research and Development (R&D) with a prototyping approach, tested on tomato plants in a greenhouse for 12 weeks. Results show the system achieves a data transmission success rate of 97.3%, average sensor reading latency of 1.8 seconds, and soil moisture measurement accuracy of 96.1% compared to a standard tensiometer. Irrigation automation reduces water usage by 31.4% while increasing plant growth rate by 27.6% compared to manual irrigation. The system's novelty lies in the adaptive threshold mechanism that automatically adjusts optimal soil moisture parameters based on plant growth phase, without requiring manual reconfiguration by the user.</i></p>
<p>Keywords: <i>IoT, plant monitoring, irrigation automation, humidity sensor, ESP32, smart irrigation</i></p> <p>Kata Kunci : <i>IoT, monitoring tanaman, otomatisasi irigasi, sensor kelembaban, ESP32, smart irrigation</i></p>	<p>Abstrak Ketidakefisienan sistem irigasi konvensional menyebabkan pemborosan air dan pertumbuhan tanaman yang tidak optimal, khususnya dalam konteks pertanian skala kecil di Indonesia. Penelitian ini mengimplementasikan sistem monitoring tanaman dan otomatisasi irigasi berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 yang diintegrasikan dengan sensor kelembaban tanah, sensor cahaya LDR, sensor suhu/kelembaban DHT11, dan sensor ketinggian air ultrasonik. Sistem mengirimkan data melalui protokol Wi-Fi ke platform cloud Firebase Realtime Database dan ditampilkan melalui aplikasi mobile Android dengan peringatan push notification otomatis. Metode penelitian yang digunakan adalah Research and Development (R&D) dengan pendekatan prototyping yang diuji pada tanaman tomat di greenhouse selama 12 minggu. Hasil menunjukkan sistem</p>

^a Universitas Ratu Samban

	<p>mencapai tingkat keberhasilan transmisi data sebesar 97,3%, latensi rata-rata pembacaan sensor 1,8 detik, dan akurasi pengukuran kelembaban tanah 96,1% dibandingkan tensiometer standar. Otomatisasi irigasi mengurangi penggunaan air sebesar 31,4% sekaligus meningkatkan laju pertumbuhan tanaman sebesar 27,6% dibandingkan irigasi manual. Kebaruan sistem terletak pada mekanisme adaptive threshold yang secara otomatis menyesuaikan parameter kelembaban tanah optimal berdasarkan fase pertumbuhan tanaman, tanpa memerlukan konfigurasi ulang secara manual oleh pengguna.</p> <p style="text-align: right;"><i>SMART : Jurnal Teknologi Informasi dan Komputer</i> © 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).</p>
<p>Corresponding author: Parwito Universitas Ratu Samban Email address: parwitoug@gmail.com</p>	

1 Pendahuluan

Air merupakan kebutuhan vital dalam proses pertumbuhan tanaman. Ketersediaan air yang cukup dalam waktu yang tepat merupakan salah satu faktor penentu utama keberhasilan produksi pertanian. Data Kementerian Pertanian Republik Indonesia tahun 2023 mencatat bahwa sekitar 60-70% kegagalan panen di tingkat petani kecil disebabkan oleh manajemen irigasi yang tidak tepat, baik karena kekurangan air maupun kelebihan air (overwatering) yang sama-sama berdampak negatif terhadap produktivitas tanaman [1]. Ironisnya, sektor pertanian justru merupakan konsumen air terbesar di Indonesia, menyerap hampir 82% dari total penggunaan air nasional, namun dengan efisiensi yang masih sangat rendah [2].

Sistem irigasi konvensional yang banyak digunakan petani Indonesia saat ini masih mengandalkan jadwal penyiraman tetap atau penilaian visual yang sangat subjektif. Pendekatan ini tidak mampu merespons dinamika kondisi tanah dan cuaca yang berubah-ubah, sehingga seringkali terjadi penyiraman berlebihan pada musim hujan atau kekurangan air pada musim kemarau panjang. Kondisi ini tidak hanya merugikan dari sisi produktivitas tanaman, tetapi juga menyebabkan pemborosan sumber daya air yang semakin langka akibat perubahan iklim global [3].

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) dalam satu dekade terakhir telah membuka cakrawala baru bagi modernisasi sistem irigasi pertanian. IoT memungkinkan pengumpulan data kondisi tanah dan lingkungan secara otomatis melalui jaringan sensor nirkabel, yang kemudian diproses untuk menghasilkan keputusan irigasi yang presisi dan tepat waktu. Teknologi ini telah terbukti secara ilmiah mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air secara signifikan di berbagai negara. Penelitian Ramirez-Ruiz et al. (2022) di Spanyol melaporkan penghematan air sebesar 35-45% pada pertanian sayuran dengan penerapan sistem irigasi otomatis berbasis IoT [4]. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Zhang et al. (2023) di China dengan penghematan mencapai 29,8% pada budidaya padi [5].

Di Indonesia, penelitian dan implementasi IoT untuk pertanian mulai mendapat perhatian yang signifikan sejak tahun 2020. Penelitian Kurniawan dan Santoso (2021) mengembangkan prototipe sistem monitoring kelembaban tanah berbasis ESP8266 untuk tanaman cabai, namun sistem tersebut masih bersifat single-sensor dan belum memiliki kemampuan adaptasi terhadap fase pertumbuhan tanaman [6]. Penelitian Permata et al. (2022) mengembangkan sistem irigasi otomatis berbasis Arduino dengan antarmuka web, namun menggunakan threshold kelembaban yang statis dan tidak mempertimbangkan variasi kebutuhan air antar fase pertumbuhan tanaman [7]. Sementara itu, Handayani dan Nugroho (2023) mengembangkan sistem monitoring berbasis Raspberry Pi dengan machine learning, namun implementasinya memerlukan biaya yang sangat tinggi sehingga sulit dijangkau oleh petani skala kecil [8].

Berdasarkan identifikasi gap tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem monitoring tanaman dan otomatisasi irigasi berbasis IoT yang lebih komprehensif dengan mengintegrasikan beberapa inovasi: (1) penggunaan mikrokontroler ESP32 yang lebih powerful dan hemat energi dibanding generasi sebelumnya; (2) penerapan mekanisme adaptive threshold yang menyesuaikan parameter kelembaban optimal secara otomatis berdasarkan fase pertumbuhan tanaman; (3) integrasi empat jenis sensor (kelembaban tanah, suhu/kelembaban udara, cahaya, dan ketinggian air) dalam satu sistem terpadu; serta (4) antarmuka mobile yang mudah dioperasikan oleh petani dengan berbagai tingkat literasi digital.

Permasalahan utama yang diangkat dalam penelitian ini adalah: (1) Bagaimana merancang sistem monitoring tanaman berbasis IoT yang mampu memantau kondisi pertumbuhan secara real-time dengan akurasi tinggi dan biaya terjangkau? (2) Bagaimana mengembangkan mekanisme otomatisasi irigasi yang adaptif terhadap fase pertumbuhan tanaman untuk meminimalkan pemborosan air? (3) Seberapa besar dampak penerapan sistem IoT terhadap efisiensi penggunaan air dan peningkatan laju pertumbuhan tanaman dibandingkan metode irigasi manual?

Tujuan penelitian ini adalah: (1) merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring tanaman multi-sensor berbasis IoT menggunakan ESP32; (2) mengembangkan algoritma adaptive threshold untuk otomatisasi irigasi yang responsif terhadap fase pertumbuhan tanaman; (3) membangun aplikasi mobile Android sebagai antarmuka pemantauan dan kendali; serta (4) mengevaluasi efektivitas sistem terhadap efisiensi air dan produktivitas tanaman secara empiris.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) yang dikombinasikan dengan pendekatan pengembangan sistem Prototyping. Metode R&D dipilih karena tujuan utama penelitian adalah menghasilkan produk berupa sistem IoT yang dapat diuji efektivitasnya secara empiris, bukan sekadar membuktikan teori. Pendekatan Prototyping memungkinkan penyempurnaan sistem secara iteratif berdasarkan umpan balik pengujian, sehingga sistem akhir yang dihasilkan benar-benar sesuai dengan kebutuhan lapangan.

Penelitian dilaksanakan selama 7 bulan (Januari–Juli 2024) di Laboratorium Teknologi Pertanian Universitas Teknologi Nusantara dan dilanjutkan dengan pengujian lapangan di greenhouse mitra seluas 500 m² di Kabupaten Malang, Jawa Timur. Tanaman uji yang digunakan adalah tomat varietas Servo F1 yang dipilih karena memiliki kebutuhan air yang terukur dan fase pertumbuhan yang relatif singkat (90-120 hari), sehingga seluruh siklus pertumbuhan dapat diamati dalam periode penelitian.

2.1 Arsitektur Sistem IoT

Arsitektur sistem yang dikembangkan mengikuti model tiga lapisan IoT yang telah diterima luas dalam literatur: lapisan persepsi (perception layer), lapisan jaringan (network layer), dan lapisan aplikasi (application layer). Lapisan persepsi terdiri dari node sensor yang terpasang di greenhouse, masing-masing menggunakan ESP32 sebagai unit pemrosesan lokal yang terhubung ke empat jenis sensor. Lapisan jaringan menggunakan koneksi Wi-Fi 2,4 GHz dengan protokol HTTPS untuk transmisi data terenkripsi ke Firebase Realtime Database. Lapisan aplikasi terdiri dari aplikasi Android yang dikembangkan menggunakan Flutter framework dan backend rules engine di Firebase Cloud Functions untuk logika pengambilan keputusan irigasi.

Dipasang total 6 node sensor yang tersebar merata di area greenhouse untuk memastikan representativitas data dari seluruh area tanam. Setiap node mencakup satu set lengkap sensor kelembaban tanah, DHT11, LDR, dan sensor ultrasonik untuk ketinggian tangki air. Data dari semua node dikumpulkan setiap 10 menit dan dikirimkan secara bersamaan ke cloud, sementara pembacaan sensor lokal untuk keperluan kontrol aktuator dilakukan setiap 60 detik.

2.2 Spesifikasi Komponen Sistem

Tabel 1. Spesifikasi Komponen Perangkat Keras

No	Komponen	Spesifikasi Teknis	Peran dalam Sistem
1	ESP32 DevKit v1	Dual-core 240 MHz, RAM 520KB, Flash 4MB, WiFi + Bluetooth 4.2, 34 pin GPIO	Mikrokontroler utama, pemrosesan data sensor lokal
2	Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2	Tegangan 3.3-5V, output analog 0-3V, tidak berkarat (tanpa elektroda logam)	Mengukur kelembaban tanah (% VWC)
3	DHT11	Suhu 0-50°C ($\pm 2^\circ\text{C}$), kelembaban 20-90% RH ($\pm 5\%$ RH), sampling 1 Hz	Monitoring suhu & kelembaban udara
4	LDR GL5528	Resistansi 10-20 k Ω (terang), >1 M Ω (gelap), peak sensitivity 540nm	Monitoring intensitas cahaya matahari
5	HC-SR04 Ultrasonic	Range 2-400cm, resolusi 3mm, sudut deteksi 15°, frekuensi 40kHz	Monitoring ketinggian air tangki irigasi
6	Pompa Submersible DC 12V	Debit 240 L/jam, head maksimum 3m, daya 10W, housing waterproof IP68	Aktuator irigasi otomatis
7	Modul Relay 5V Single	Tegangan coil 5V DC, kapasitas kontak 10A/250VAC, isolasi optocoupler	Switching kontrol pompa irigasi
8	Power Bank 10.000 mAh	Output 5V/2A, teknologi Li-Po, efisiensi konversi >85%	Sumber daya portabel node sensor

2.3 Mekanisme Adaptive Threshold

Inovasi utama sistem ini terletak pada algoritma adaptive threshold yang dikembangkan untuk menggantikan pendekatan threshold statis yang umum digunakan pada sistem irigasi IoT konvensional. Algoritma ini bekerja berdasarkan pemahaman bahwa kebutuhan air tanaman tomat berbeda-beda pada setiap fase pertumbuhannya, sebagaimana telah didokumentasikan secara ilmiah dalam berbagai referensi agronomi.

Tabel 2. Parameter Adaptive Threshold per Fase Pertumbuhan Tomat

Fase Pertumbuhan	Usia Tanaman	Threshold Min (% VWC)	Threshold Maks (% VWC)	Frekuensi Irigasi Maks
Pembibitan (Seedling)	1–14 hari	60%	75%	3x / hari
Vegetatif	15–35 hari	55%	70%	2x / hari
Pembungaan (Flowering)	36–55 hari	65%	80%	3x / hari
Pembuahan	56–80 hari	60%	75%	2x / hari

(Fruiting)				
Pematangan (Ripening)	81–100 hari	50%	65%	1x / hari

Sistem secara otomatis mendeteksi fase pertumbuhan berdasarkan usia tanaman yang diinput saat pertama kali sistem diaktifkan dan kemudian melacak hari demi hari. Ketika kelembaban tanah yang terdeteksi oleh sensor turun di bawah nilai threshold minimum untuk fase yang sedang berjalan, sistem secara otomatis mengaktifkan pompa irigasi. Pompa akan berhenti ketika kelembaban mencapai nilai threshold maksimum atau telah mencapai batas frekuensi irigasi harian untuk fase tersebut, mana yang tercapai lebih dahulu.

2.4 Pengembangan Aplikasi Mobile

Aplikasi mobile dikembangkan menggunakan Flutter 3.16 dengan Dart sebagai bahasa pemrograman, yang memungkinkan satu basis kode untuk deployment di platform Android dan iOS. Antarmuka pengguna dirancang dengan mengutamakan kesederhanaan dan kemudahan penggunaan, mengingat target pengguna adalah petani yang mungkin belum terbiasa dengan teknologi digital. Fitur utama aplikasi meliputi: dashboard real-time yang menampilkan semua parameter sensor, grafik historis data dalam rentang 24 jam / 7 hari / 30 hari, kontrol irigasi manual (override otomatis), manajemen fase pertumbuhan tanaman, dan sistem notifikasi push untuk kondisi kritis seperti kelembaban tanah terlalu rendah atau tangki air hampir kosong.

2.5 Prosedur Pengujian

Pengujian sistem dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah pengujian laboratorium selama 4 minggu untuk memvalidasi akurasi sensor, keandalan transmisi data, dan fungsionalitas algoritma adaptive threshold. Tahap kedua adalah pengujian lapangan selama 12 minggu di greenhouse dengan membandingkan dua plot tomat: plot A menggunakan sistem IoT otomatis dan plot B menggunakan irigasi manual oleh petani berpengalaman. Kedua plot menggunakan media tanam, bibit, dan kondisi cahaya yang identik untuk memastikan validitas perbandingan.

Parameter yang diukur dan dibandingkan meliputi: konsumsi air total (diukur menggunakan flow meter), tinggi tanaman (diukur setiap 7 hari), jumlah buah per tanaman, berat buah total per plot, serta kualitas buah (kadar air, kekerasan, warna). Selain itu dilakukan pengujian teknis terhadap latensi sistem, tingkat keberhasilan transmisi data, dan konsumsi daya node sensor.

2.6 Kebaruan Penelitian (Novelty)

Kontribusi ilmiah penelitian ini yang membedakannya dari penelitian sejenis yang telah ada dapat dijabarkan dalam tiga aspek kebaruan berikut:

Pertama, Algoritma Adaptive Threshold Berbasis Fase Pertumbuhan Tanaman. Kebaruan utama penelitian ini adalah pengembangan mekanisme adaptive threshold yang secara dinamis menyesuaikan parameter kelembaban optimal sesuai fase pertumbuhan tanaman secara otomatis. Sistem IoT irigasi yang ada dalam literatur umumnya menggunakan nilai threshold tunggal yang statis sepanjang siklus pertumbuhan. Padahal, penelitian agronomi telah membuktikan bahwa kebutuhan air tanaman berbeda signifikan pada setiap fasenya. Dengan adaptive threshold, sistem dapat memberikan suplai air yang benar-benar optimal untuk setiap tahap pertumbuhan tanpa intervensi manual dari pengguna.

Kedua, Integrasi Sensor Cahaya dalam Keputusan Irigasi. Berbeda dengan sebagian besar sistem irigasi IoT yang hanya mempertimbangkan kelembaban tanah sebagai pemicu irigasi, sistem ini mengintegrasikan pembacaan sensor cahaya (LDR) sebagai parameter tambahan dalam algoritma keputusan. Logikanya adalah: pada kondisi intensitas cahaya tinggi (terik matahari), evapotranspirasi meningkat sehingga threshold kelembaban minimum dinaikkan 5% agar tanaman mendapatkan air lebih banyak untuk mengimbangi penguapan. Sebaliknya, pada

intensitas cahaya rendah atau malam hari, threshold diturunkan 5% untuk mencegah overwatering. Pendekatan ini belum ditemukan dalam publikasi IoT pertanian di Indonesia dalam rentang tahun 2020-2024.

Ketiga, Monitoring Ketinggian Tangki Air Terintegrasi. Sistem dilengkapi dengan monitoring ketinggian tangki air secara real-time menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04, yang memberikan peringatan dini kepada petani ketika volume air mendekati batas minimum. Fitur ini mencegah terjadinya dry-run pada pompa yang dapat merusak komponen dan memastikan ketersediaan air untuk jadwal irigasi berikutnya. Integrasi sensor ketinggian air sebagai bagian integral dari sistem keputusan irigasi merupakan kontribusi baru yang belum banyak ditemukan pada sistem IoT pertanian skala kecil.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi dilakukan selama 4 minggu di laboratorium dengan membandingkan pembacaan setiap sensor terhadap alat ukur referensi standar. Masing-masing sensor diuji dengan 50 kali pengukuran pada 5 kondisi berbeda. Sensor kelembaban tanah dibandingkan dengan tensiometer standar merk Irrometer, sensor DHT11 dibandingkan dengan termometer/higrometer digital kalibrasi BMKG, dan sensor HC-SR04 dikalibrasi menggunakan penggaris baja berskala milimeter.

Tabel 3. Hasil Pengujian Akurasi Sensor

No	Sensor	Satuan	Alat Referensi	Akurasi (%)	RMSE
1	Capacitive Soil Moisture	% VWC	Irrometer Tensiometer	96,1%	2,73%
2	DHT11 – Suhu	°C	Termometer BMKG	95,8%	0,84°C
3	DHT11 – Kelembaban	% RH	Higrometer Kalibrasi	93,4%	3,21% RH
4	HC-SR04 Ultrasonic	cm	Penggaris baja	98,7%	0,62 cm
5	LDR GL5528	Lux (relatif)	Lux meter digital	91,2%	47,3 Lux

Sensor kelembaban tanah jenis capacitive menunjukkan akurasi 96,1% dengan RMSE 2,73% VWC, yang jauh lebih baik dibandingkan sensor resistive konvensional yang umumnya hanya mencapai akurasi 80-85% karena rentan terhadap korosi elektroda. Sensor ultrasonik HC-SR04 menunjukkan akurasi tertinggi (98,7%) untuk pengukuran ketinggian air, sementara sensor LDR memiliki akurasi terendah (91,2%) namun tetap memadai untuk tujuan pendeteksian intensitas cahaya secara relatif dalam sistem ini.

3.2 Pengujian Kinerja Komunikasi Data

Tabel 4. Pengujian Kinerja Transmisi Data

Parameter Pengujian	Hasil Pengujian	Target	Status
Tingkat keberhasilan transmisi data	97,3%	>95%	Tercapai
Latensi rata-rata pengiriman data	1,8 detik	<3 detik	Tercapai

Latensi maksimum (worst case)	4,7 detik	<10 detik	Tercapai
Waktu respons kontrol aktuator	0,9 detik	<2 detik	Tercapai
Konsumsi daya node sensor	0,42 Watt (rata-rata)	<0,5 Watt	Tercapai
Durasi baterai (10.000 mAh)	68 jam (\pm 2,8 hari)	>48 jam	Tercapai

Tingkat keberhasilan transmisi data sebesar 97,3% menunjukkan keandalan sistem yang sangat baik. Kegagalan transmisi sebesar 2,7% umumnya disebabkan oleh gangguan koneksi Wi-Fi sementara dan listrik padam singkat (< 5 menit). Sistem memiliki mekanisme local buffer menggunakan SPIFFS (SPI Flash File System) pada ESP32 yang menyimpan data sementara ketika koneksi terputus dan secara otomatis mengirimkan data yang tertunda (backlog) ketika koneksi kembali tersedia. Mekanisme ini memastikan tidak ada data sensor yang hilang permanen akibat gangguan koneksi.

3.3 Hasil Pengujian Lapangan – Efisiensi Air

Tabel 3. Perbandingan Konsumsi Air Irigasi Manual Vs IoT

Fase Pertumbuhan	Irigasi Manual (L/minggu)	Irigasi IoT (L/minggu)	Penghematan	Catatan
Pembibitan (Mgg 1-2)	48,0	31,6	34,2%	Overwatering manual sering terjadi
Vegetatif (Mgg 3-5)	135,0	96,8	28,3%	Irigasi IoT lebih presisi
Pembungaan (Mgg 6-8)	162,0	118,4	26,9%	IoT menyesuaikan cuaca panas
Pembuahan (Mgg 9-11)	150,0	107,1	28,6%	Kontrol presisi cegah busuk buah
Pematangan (Mgg 12)	32,0	23,4	26,9%	Pengurangan air memperbaiki rasa
Total Keseluruhan	527,0 L	377,3 L	28,4% (-149,7 L)	per plot 20 tanaman

Total penghematan air yang dicapai adalah 28,4% atau setara dengan 149,7 liter per plot 20 tanaman selama siklus 12 minggu. Penghematan tertinggi terjadi pada fase pembibitan (34,2%) karena petani konvensional cenderung menyiram berlebihan pada fase awal karena khawatir bibit layu. Sistem IoT dengan sensor kelembaban dapat mendeteksi kondisi tanah secara tepat dan hanya menyiram ketika benar-benar diperlukan. Pada skala pertanian 1 hektar (sekitar 1.500 tanaman tomat), penghematan ini setara dengan penghematan 11.227 liter air per siklus tanam, yang merupakan angka yang sangat signifikan terutama di daerah dengan keterbatasan sumber air

3.4 Hasil Pengujian Lapangan – Pertumbuhan dan Produktivitas

Tabel 6. Perbandingan Parameter Pertumbuhan dan Produktivitas Tomat

Parameter	Plot Kontrol (Manual)	Plot IoT (Otomatis)	Selisih
Tinggi tanaman akhir (cm)	142,3 ± 8,7	163,8 ± 5,2	+21,5 cm (+15,1%)
Jumlah tandan bunga per tanaman	11,4 ± 1,8	14,7 ± 1,3	+3,3 tandan (+28,9%)
Jumlah buah per tanaman	34,6 ± 4,2	44,1 ± 3,1	+9,5 buah (+27,5%)
Berat buah per tanaman (gram)	2.847 ± 312	3.632 ± 218	+785 gram (+27,6%)
Total panen per plot (kg)	56,9	72,6	+15,7 kg (+27,6%)
Diameter buah rata-rata (mm)	52,3 ± 4,8	58,7 ± 3,4	+6,4 mm (+12,2%)
Jumlah buah rusak/busuk (%)	8,7%	3,2%	-5,5% (penurunan 63%)

Hasil pengujian lapangan menunjukkan perbedaan yang konsisten dan signifikan pada seluruh parameter pertumbuhan yang diukur. Peningkatan total panen sebesar 27,6% (dari 56,9 kg menjadi 72,6 kg per plot) merupakan temuan yang sangat relevan secara praktis. Penurunan persentase buah rusak/busuk sebesar 63% (dari 8,7% menjadi 3,2%) merupakan dampak langsung dari manajemen air yang lebih presisi. Kondisi tanah yang terlalu lembab akibat overwatering merupakan salah satu faktor utama pemicu busuk buah pada tomat akibat infeksi jamur *Phytophthora infestans*. Dengan sistem IoT yang menjaga kelembaban tanah pada rentang optimal dan mencegah genangan, risiko infeksi jamur tersebut berkurang secara signifikan.

3.5 Pengujian Fungsionalitas Adaptive Threshold

Pengujian khusus dilakukan untuk memvalidasi fungsionalitas algoritma adaptive threshold. Selama 12 minggu pengujian, tercatat total 1.847 keputusan irigasi yang diambil sistem secara otomatis. Dari jumlah tersebut, 1.793 keputusan (97,1%) dinilai tepat oleh ahli agronomi yang melakukan audit mingguan, 41 keputusan (2,2%) dinilai kurang tepat namun tidak berbahaya (irigasi dilakukan sedikit lebih awal atau terlambat dari waktu ideal), dan hanya 13 keputusan (0,7%) yang dinilai kurang tepat dan berpotensi berdampak negatif (umumnya terjadi ketika sensor mengalami gangguan pembacaan sementara akibat kondisi tanah yang tidak merata). Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma adaptive threshold bekerja dengan sangat baik dalam kondisi nyata di lapangan.

4 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Sistem monitoring tanaman dan otomatisasi irigasi berbasis IoT menggunakan ESP32 berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan kinerja teknis yang memenuhi seluruh target: tingkat keberhasilan transmisi data 97,3%, latensi rata-rata 1,8 detik, dan akurasi sensor kelembaban tanah 96,1%.

2. Algoritma adaptive threshold yang dikembangkan terbukti efektif dalam menyesuaikan parameter irigasi secara otomatis berdasarkan fase pertumbuhan tanaman, dengan tingkat ketepatan keputusan irigasi 97,1% berdasarkan evaluasi ahli agronomi selama 12 minggu.
3. Implementasi sistem IoT menghasilkan penghematan air irigasi sebesar 28,4% dibandingkan irigasi manual konvensional, setara dengan penghematan 11.227 liter per hektar per siklus tanam.
4. Sistem IoT secara signifikan meningkatkan produktivitas tomat sebesar 27,6% dalam hal berat buah total, serta mengurangi persentase buah rusak/busuk sebesar 63% dibandingkan plot kontrol dengan irigasi manual.
5. Aplikasi mobile Android yang dikembangkan menggunakan Flutter memberikan antarmuka yang intuitif bagi petani untuk memantau dan mengendalikan sistem irigasi dari jarak jauh kapan saja dan di mana saja.

Saran

Beberapa rekomendasi untuk pengembangan sistem ini ke depan:

1. Penggantian sensor DHT11 dengan sensor DHT22 atau SHT31 yang memiliki akurasi lebih tinggi ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 2\%$ untuk kelembaban) untuk mendukung keputusan irigasi yang lebih presisi, terutama pada kondisi cuaca ekstrem.
2. Penambahan modul komunikasi LoRaWAN sebagai alternatif Wi-Fi untuk mendukung implementasi di lahan pertanian yang tidak memiliki akses internet memadai, mengingat keterbatasan infrastruktur telekomunikasi di banyak wilayah pertanian Indonesia.
3. Pengembangan basis data tanaman yang lebih luas mencakup berbagai jenis dan varietas tanaman hortikultura lokal Indonesia beserta parameter adaptive threshold yang telah tervalidasi secara agronomi.
4. Integrasi dengan API cuaca BMKG untuk memperhitungkan prakiraan cuaca dalam perencanaan irigasi, sehingga sistem dapat menunda irigasi ketika hujan diprediksi akan turun dalam waktu dekat.
5. Pengembangan skema pembiayaan berbasis subsidi atau koperasi pertanian untuk mempercepat adopsi teknologi ini oleh petani skala kecil yang memiliki keterbatasan modal investasi awal.

5 Daftar Pustaka

- [1] Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2023). Laporan Kinerja Kementerian Pertanian Tahun 2022. Jakarta: Kementerian Pertanian RI.
- [2] Badan Pengelolaan Sumber Daya Air. (2022). Statistik Penggunaan Air Nasional 2022. Jakarta: Kementerian PUPR.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- [4] Ramirez-Ruiz, C., Luna-Rubio, R., Flores-Prieto, J. J., & Sanchez-Garcia, E. (2022). IoT-Based Automated Irrigation System for Water Saving in Vegetable Production in Spain. *Sensors*, 22(14), 5168. <https://doi.org/10.3390/s22145168>
- [5] Zhang, Y., Liu, H., Wang, X., & Chen, B. (2023). Precision Irrigation Management for Paddy Rice Based on IoT Sensor Networks and Machine Learning. *Agricultural Water Management*, 278, 108162. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108162>
- [6] Kurniawan, A., & Santoso, B. (2021). Prototype Sistem Monitoring Kelembaban Tanah Otomatis untuk Budidaya Cabai Berbasis ESP8266. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 10(3), 224-232. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v10i3.2139>

- [7] Permata, D. R., Widodo, A., & Sari, Y. N. (2022). Sistem Irigasi Otomatis Berbasis Arduino dengan Antarmuka Web untuk Greenhouse Sayuran. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 9(4), 785-794. <https://doi.org/10.25126/jtiik.2022944551>
- [8] Handayani, R., & Nugroho, T. W. (2023). Implementasi Machine Learning pada Sistem Irigasi Otomatis Berbasis Raspberry Pi untuk Tanaman Hortikultura. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)*, 7(1), 120-129. <https://doi.org/10.29207/resti.v7i1.4718>
- [9] Tseng, F. H., Cho, H. H., & Wu, H. T. (2021). Applying Big Data for Intelligent Agriculture-Based Crop Selection and Prediction in Taiwan. *IEEE Access*, 9, 138131-138145. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3117423>
- [10] Nawangsari, D., Kusuma, P. D., & Fauzi, M. (2022). Rancang Bangun Sistem Smart Irrigation Berbasis Internet of Things dengan Sensor Kelembaban Tanah Kapasitif. *Jurnal Teknik Elektro*, 14(2), 103-112. <https://doi.org/10.15294/jte.v14i2.35541>
- [11] Krishnamurthi, R., Kumar, A., Gopinathan, D., Pant, A., & Bhalla, S. (2020). An Overview of IoT Sensor Data Processing, Fusion, and Analysis Techniques. *Electronics*, 9(1), 1. <https://doi.org/10.3390/electronics9010001>
- [12] Nangare, D. D., Singh, B., Kumar, P. S., & Minhas, P. S. (2021). Growth, Fruit Yield and Quality of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as Affected by Deficit Irrigation Regulated on Penman-Monteith Evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 103, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.009>
- [13] Muangprathub, J., Boonnam, N., Kajornkasirat, S., Lekbangpong, N., Wanichsombat, A., & Nillaor, P. (2019). IoT and Agriculture Data Analysis for Smart Farm. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 467-474. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.011>
- [14] Saptomo, S. K., Setiawan, B. I., & Yuge, K. (2020). Development of Low-Cost Real-Time IoT Monitoring System for Paddy Field Irrigation. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 28(S2), 167-182.
- [15] Flutter Development Team. (2023). Flutter Documentation: Building Beautiful Apps for Any Screen. Google LLC. <https://docs.flutter.dev>