KITA Komunitas Informasi Teknologi Aceh
OPEN ACCESS
JURNAL JTIK
(JURNAL TEKNOLOGI INFORMASI DAN KOMUNIKASI)
E-ISSN: 2580-1643
Volume 11, Nomor 1, Januari 2027 | Pages: 226-233 | DOI: https://doi.org/10.35870/jtik.v11i1.7838

Rancang Bangun Sistem Irigasi Otomatis Berbasis Jaringan Sensor Nirkabel dan *Monitoring Web* Laravel

Ilham Padia [1], Risan Fathan [2], Muhammad Irzi Suryanto Putra [3], Muhammad Nizar [4], Ade Rukmana [5], Sipa Nurpadillah [6], Andika Muhammad Nur Kholiq [7*]

[1,2,3,4,5,6,7*] Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Garut, Kota Garut, Provinsi Jawa Barat, Indonesia.

Corresponding Email: [7*]andikamuhammad643@gmail.com.

Article History:
Received: 2 July 2026.
Revised: 15 July 2026.
Accepted: 25 July 2026.
Available Online: 1 November 2026.
Published: 1 January 2027.

Abstract

Conventional irrigation often leads to water waste and crop failure due to inaccurate manual scheduling. This study aims to design and test a web-based automatic irrigation prototype that utilizes Wireless Sensor Networks (WSN) to enhance water management efficiency. The methodology employs a star topology with two YL-69 sensor nodes that transmit data via the ESP-NOW communication protocol to an ESP32 Gateway integrated with the Laravel platform. Calibration procedures were conducted with 30 repetitions of readings under various soil conditions. The results showed high accuracy, with a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 1.58% and a minimum error of 0.04% under saturated water conditions. The system successfully controls a 12V solenoid valve based on an active-low threshold control algorithm (< 40%). The Laravel platform supports real-time data synchronization with a Packet Delivery Ratio (PDR) above 99% and stable latency of 242–252 ms. This system offers an efficient and automated remote monitoring solution for precision agriculture.

Keywords: Smart Irrigation; Wireless Sensor Network; ESP-NOW; Solenoid Valve; Laravel.

Abstrak

Pengairan konvensional sering menyebabkan pemborosan air dan kegagalan panen akibat penjadwalan manual yang tidak tepat. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji purwarupa sistem irigasi otomatis berbasis web yang memanfaatkan Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) untuk meningkatkan efisiensi manajemen air. Metodologi yang digunakan adalah topologi bintang dengan dua node sensor YL-69, yang mengirimkan data melalui protokol komunikasi ESP-NOW ke ESP32 Gateway yang terintegrasi dengan platform Laravel. Prosedur kalibrasi dilakukan dengan 30 kali pengulangan pembacaan pada berbagai kondisi tanah. Hasil menunjukkan akurasi tinggi dengan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) 1,58% dan galat minimum 0,04% pada kondisi jenuh air. Sistem berhasil mengendalikan katup solenoid 12V berdasarkan algoritma kontrol ambang aktif-terbalik (< 40%). Platform Laravel mendukung sinkronisasi data real-time dengan Packet Delivery Ratio (PDR) di atas 99% dan latensi stabil 242–252 ms. Sistem ini menawarkan solusi pemantauan jarak jauh yang efisien dan otomatis untuk pertanian presisi.

Kata Kunci: Citra Positif; Lembaga Penyiaran Publik; Public Relations; Strategi Komunikasi.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Copyright © 2027 by the authors. Published by Lembaga Komunitas Informasi Teknologi Aceh (KITA). All rights reserved.

E-ISSN: 2580-1643

1. Pendahuluan

Sektor pertanian modern saat ini menghadapi tantangan besar terkait efisiensi manajemen sumber daya air akibat ketidakpastian perubahan iklim global yang ekstrem (Rozci, 2024; Smith & Jones, 2022). Pengairan konvensional yang masih mengandalkan jadwal manual atau intuisi subjek tani sering kali memicu terjadinya pemborosan air (*over-irrigation*) atau justru kekurangan pasokan air (*under-irrigation*) yang dapat menurunkan produktivitas komoditas secara signifikan (Erokhin *et al*, 2024; Kumar & Singh, 2023). Guna mengatasi keterbatasan pengelolaan konvensional tersebut, konsep pertanian cerdas (*smart farming*) berbasis teknologi *Internet of Things* (IoT) mulai diadopsi secara luas untuk melakukan otomatisasi pengkondisian lingkungan pertanian (Nugroho & Pratama, 2025; Zhao & Li, 2024). Salah satu parameter krusial dalam keberhasilan metode pertanian presisi ini adalah pemantauan tingkat kelembaban tanah secara waktu riil (*real-time*), yang memungkinkan sistem mendistribusikan air secara presisi hanya saat tanaman membutuhkannya (B. Ahmad & Ramadhan, 2023; Garcia & et, 2022). Sejumlah penelitian terdahulu telah berupaya mengembangkan sistem irigasi otomatis berbasis mikrokontroler. Sebagai contoh, Irawan & Wahyuni (2021) merancang sistem irigasi tetes menggunakan sensor YL-69 yang terhubung langsung ke relai pengendali katup air melalui koneksi kabel tunggal. Selanjutnya, Gunawan dan Suhendar (2022) serta Patel & Martinez (2023) mengadopsi jaringan sensor nirkabel (*Wireless Sensor Network* / WSN) bertopologi bintang untuk memperluas cakupan area pemantauan lahan tanpa kendala keterbatasan kabel fisik.

Penggunaan protokol komunikasi hemat daya seperti ESP-NOW juga telah dievaluasi oleh Adi dan Kitagawa, 2021), dan (Siregar dan Buana, 2022), serta (Nguyen *et al*, 2024), yang membuktikan efisiensinya dalam mentransmisikan data telemetri pada node sensor berbasis baterai secara andal. Di sisi lain, integrasi platform pemantauan jarak jauh berbasis aplikasi web terus berkembang, di antaranya memanfaatkan platform IoT pihak ketiga maupun pengembangan mandiri menggunakan *framework* monolitik yang andal seperti Laravel (M. Ahmad & Shatnawi, 2024). Meskipun kajian-kajian di atas memberikan kontribusi penting bagi perkembangan teknologi pertanian, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) yang signifikan. Sebagian besar sistem irigasi WSN yang dikembangkan sebelumnya menggunakan arsitektur linear tunggal, di mana logika kontrol dan interpretasi data visual pada antarmuka web bekerja secara kaku pada satu jalur instruksi (*active-high logic*) (Hakim & Utomo, 2024; Miller *et al*, 2024). Akibatnya, ketika terjadi lonjakan transien data atau kendala mekanis pada katup di lapangan, sistem pemantauan gagal menyajikan validasi status yang sinkron (Putra & Sari, 2026). Selain itu, riset-riset terdahulu jarang mengevaluasi performa sistem yang secara sengaja mengintegrasikan prinsip logika terbalik (*inverted logic* / *active-low*) antara sistem perangkat keras dan representasi visual di website untuk menjamin keamanan operasional (*fail-safe*) saat sensor mendeteksi kejenuhan air yang ekstrem (Fahmi & Sanjaya, 2025; Kim & Park, 2026). Kebanyakan sistem web monitoring Laravel pada pertanian cerdas hanya berfungsi sebagai penampil data pasif tanpa adanya pemetaan dinamika status yang berkorelasi langsung dengan efisiensi sisa daya baterai pada masing-masing node pengirim (Al-Qahtani *et al*, 2023; Ramadani & Lestari, 2024). Penelitian mengenai rancang bangun prototipe sistem irigasi otomatis ini menjadi sangat penting karena menawarkan solusi sinkronisasi data mutakhir antara node lapangan berbasis WSN dan platform web.

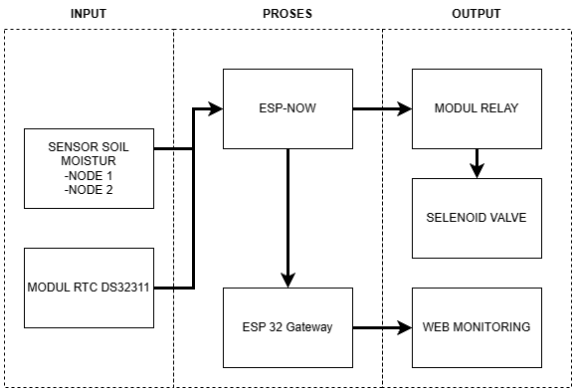
Dengan memanfaatkan keandalan protokol ESP-NOW dan performa arsitektur MVC pada *framework* Laravel, sistem ini tidak hanya mampu melakukan pengairan secara otomatis berdasarkan ambang batas kritis $< 40\%$, melainkan juga mampu menguji stabilitas pembacaan sensor multi-node dalam kondisi tanah yang fluktuatif (Lopez & Davis, 2024). Penyelidikan mendalam terhadap sinkronisasi logika kontrol perangkat keras dan visualisasi web ini krusial untuk mencegah kegagalan mekanis katup air dan memastikan petani mendapatkan pembaruan status operasional secara presisi guna meminimalkan risiko kerugian gagal panen. Berdasarkan latar belakang dan analisis kesenjangan riset tersebut, penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan yang jelas. Tujuan utama dari kajian artikel ini adalah merancang, mengimplementasikan, dan menguji performa purwarupa sistem *smart* irigasi otomatis berbasis WSN dengan mengintegrasikan sistem pemantauan berbasis web Laravel. Secara spesifik, penelitian ini berfokus pada evaluasi akurasi pembacaan sensor kelembaban tanah YL-69, analisis responsivitas pengaktifan *solenoid valve* 12V melalui algoritma ambang batas, serta validasi keberhasilan sinkronisasi visual data telemetri (termasuk tegangan sisa baterai node) pada antarmuka website monitoring.

2. Metode Penelitian

Metodologi penelitian ini dirancang melalui beberapa tahapan sistematis yang dieksekusi secara terstruktur mulai dari pemetaan alur data, perancangan perangkat keras (*hardware*),

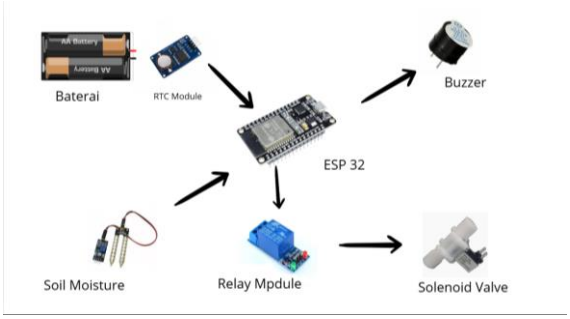
E-ISSN: 2580-1643

perancangan logika program, hingga pembangunan antarmuka sistem pemantauan. Struktur fundamental dari perancangan sistem ini secara umum dibagi menjadi tiga domain utama, yaitu subsistem input, subsistem proses, dan subsistem output. Alur interaksi data secara menyeluruh antara ketiga domain tersebut diilustrasikan dalam diagram blok pada Gambar 1.



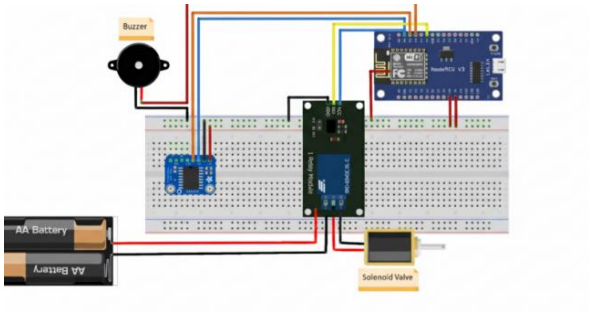
Gambar 1. Diagram Blok

Dalam mengimplementasikan diagram blok tersebut ke dalam kondisi riil di lapangan, penelitian ini menerapkan topologi bintang (*star topology*) pada jaringan sensor nirkabel (*Wireless Sensor Network* / WSN). Pemetaan fisik serta interkoneksi komponen dari arsitektur utama sistem ini ditunjukkan pada Gambar 2. Melalui arsitektur ini, Node 1 dan Node 2 bertindak sebagai titik akuisisi data di area lahan pertanian yang mengirimkan data parameter fisik secara nirkabel langsung (*point-to-point*) menuju pusat pemrosesan data, yaitu ESP32 Gateway. Protokol komunikasi yang digunakan antar node nirkabel tersebut memanfaatkan teknologi ESP-NOW. Pemilihan protokol ini didasarkan pada karakteristiknya yang memiliki konsumsi daya rendah, latensi transmisi yang minimal, serta efisiensi jangkauan yang optimal untuk mendukung fungsionalitas node sensor berbasis baterai.



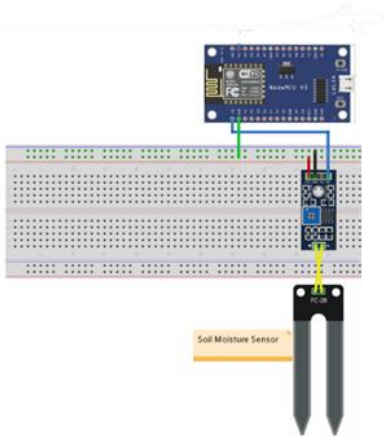
Gambar 2. Arsitektur Utama Sistem

Secara teknis, perancangan perangkat keras pada penelitian ini dibagi menjadi dua bagian skematik rangkaian utama, yaitu rangkaian subsistem aktuator dan rangkaian subsistem sensor. Detail interkoneksi elektronik serta pin-pin mikrokontroler untuk subsistem pengendali utama dan penggerak beban mekanis ditunjukkan melalui skematik rangkaian aktuator pada Gambar 3. Subsistem aktuator ini dikendalikan oleh ESP32 Gateway yang dikombinasikan dengan modul RTC (*Real-Time Clock*) DS3231 sebagai penyedia referensi penanda waktu (*timestamp*) yang presisi bagi sistem. Seluruh rangkaian aktuator dipasok oleh sumber daya berupa baterai dengan tegangan kerja 12 V yang digunakan untuk mencatu daya modul relay selaku sakelar elektronik. Ketika modul relay terpicu, arus dari baterai akan dialirkan untuk mengaktifkan beban berupa *solenoid valve* 12 V. Komponen *buzzer* juga diintegrasikan pada rangkaian ini sebagai indikator peringatan audio saat siklus penyiraman berlangsung.



Gambar 3. Skematik Rangkaian Aktuator

Sementara itu, konfigurasi perangkat keras untuk titik pengambilan data di lapangan ditunjukkan secara detail melalui skematik rangkaian sensor pada Gambar 4. Pada subsistem pengirim (*transmitter node*) ini, akuisisi parameter kelembaban tanah dilakukan menggunakan sensor tipe YL-69 dalam satu kesatuan set. Sinyal yang ditangkap oleh probe sensor YL-69 merupakan data analog yang kemudian dilewatkan terlebih dahulu menuju modul pengkondisian sinyal YL-39. Output analog dari modul tersebut selanjutnya dihubungkan ke pin *analog-to-digital converter* (ADC) pada mikrokontroler NodeMCU V3 berbasis ESP8266 untuk diproses dan ditransmisikan secara nirkabel menggunakan protokol ESP-NOW menuju gateway.



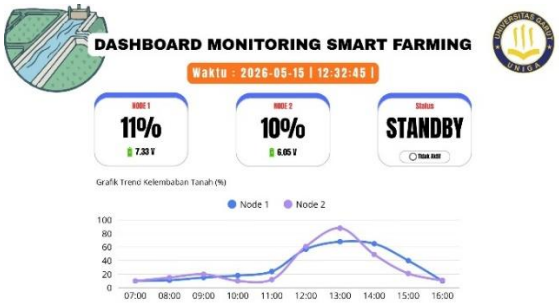
Gambar 4. Skematik Rangkaian Sensor

E-ISSN: 2580-1643

Sebelum diintegrasikan ke dalam sistem kendali otomatis, prosedur kalibrasi instrumen sensor YL-69 dilakukan secara ketat untuk menjamin akurasi pembacaan data di lapangan. Instrumen referensi standar yang digunakan dalam pengujian validasi ini adalah *Soil Moisture Meter* komersial TDR (*Time Domain Reflectometry*) tipe Lutron SMS-190. Untuk mendapatkan variasi nilai kelembaban yang representatif, kondisi kadar air pada media tanah sampel (jenis tanah lempung berpasir) dikontrol secara manual melalui pengeringan menggunakan oven (untuk mendapatkan kondisi kering ekstrem) serta penambahan volume air destilasi secara bertahap (untuk memicu kondisi jenuh air/basah). Guna memperkuat generalisasi hasil dan meminimalkan galat acak, pengujian kalibrasi tidak hanya didasarkan pada 5 titik sampel awal, melainkan ditingkatkan melalui prosedur pengulangan sebanyak 30 kali pembacaan mandiri pada setiap variasi kondisi tanah, yang kemudian dirataratakan untuk dihitung persentase galat fungsionalnya (*Mean Absolute Percentage Error* / MAPE). Mekanisme kontrol irigasi otomatis pada purwarupa ini bekerja berdasarkan algoritma ambang batas (*threshold-based control*) yang ditanamkan pada pusat pemrosesan ESP32 Gateway. Setelah gateway menerima data analog nilai kelembaban tanah dari Node 1 dan Node 2 via ESP-NOW, data tersebut dikonversi menjadi nilai persentase dengan rentang 0% hingga 100%. Batas ambang kritis kelembaban tanah dalam penelitian ini ditetapkan pada angka <40%.

Penentuan nilai ambang batas 40% ini didasarkan pada landasan agronomis terukur untuk komoditas tanaman hortikultura (seperti tanaman cabai atau tomat) pada fase vegetatif, di mana tingkat ketersediaan air tanah di bawah 40% dari kapasitas lapang (*field capacity*) dikategorikan sebagai titik kritis awal terjadinya cekaman kekeringan (*water stress*) yang dapat mengganggu proses fotosintesis dan transpirasi tanaman. Jika hasil pembacaan dari salah satu atau kedua node sensor mendeteksi nilai kelembaban tanah berada di bawah <40%, mikrokontroler gateway secara otomatis mengirimkan sinyal digital untuk memicu modul relay. Aktifnya relay akan membuka aliran arus dari baterai menuju *solenoid valve*, sehingga katup terbuka dan proses penyiraman air dimulai. Sebaliknya, jika sensor membaca bahwa kadar kelembaban tanah telah menyentuh atau melebihi batas >40% (merepresentasikan kondisi tanah telah mencapai kapasitas lapang yang optimal), relay akan memutus arus secara otomatis sehingga *solenoid valve* kembali ke kondisi tertutup (*standby*).

Bersamaan dengan proses tersebut, modul RTC DS3231 merekam waktu kejadian secara riil untuk kebutuhan log data. Semua parameter fisik dan log status operasional sistem yang diproses oleh gateway selanjutnya diteruskan ke lapisan aplikasi untuk kebutuhan pengawasan jarak jauh melalui sistem pemantauan berbasis web (*Web Monitoring*). Sistem antarmuka ini dibangun menggunakan kerangka kerja (*framework*) Laravel yang mengadopsi arsitektur *Model-View-Controller* (MVC). Implementasi dari perancangan antarmuka halaman pemantauan tersebut ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Tampilan Halaman Website

Melalui halaman website ini, pengguna dapat memantau indikator waktu riil, persentase kelembaban tanah dari masing-masing node secara presisi, nilai tegangan baterai sisa dari tiap node dalam satuan Volt, serta status operasional sistem irigasi apakah berada dalam kondisi *STANDBY* atau *AKTIF*. Halaman web ini juga dilengkapi dengan grafik tren kelembaban tanah berbasis waktu (jam) yang memplot data secara historis, sehingga memudahkan pengguna dalam menganalisis laju penyerapan air pada tanah dari waktu ke waktu.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Tahap awal evaluasi sistem dilakukan dengan menguji kinerja dan akurasi pembacaan instrumen sensor kelembaban tanah YL-69 dalam berbagai variasi kondisi lingkungan tanah. Proses kalibrasi ini bertujuan untuk memvalidasi nilai parameter analog yang diakuisisi oleh sensor terhadap instrumen referensi standar Lutron SMS-190. Data hasil pengukuran performa sensor dari total akumulasi 30 kali pengujian dirangkum secara mendetail dalam Tabel 1.

E-ISSN: 2580-1643

Tabel 1. Kinerja Sensor Kelembaban Tanah dalam Kondisi Berbeda (n=30)

Kalibrasi Kelembaban					
Kondisi Tanah	Percobaan (Total n=30)	Rata-rata Nilai		MAE (%)	Error (%)
		Sensor YL-69 (%)	Lutron SMS-190(%)		
Kering sangat rendah	Sampel 1-6	16,24	15,98	0,26	1,62
Kering Kritis	Sampel 7-18	20,89	21,45	0,56	2,61
Basah	Sampel 13-18	67,00	66,00	1,00	1,51
Basah Optimal	Sampel 19-24	78,68	77,02	1,66	2,15
Jenuh Air Ekstrem	Sampel 25-30	86,08	86,12	0,04	0,04
Rata-rata				0,70	1,58

Berdasarkan data pada Tabel 1, hasil pengujian menunjukkan bahwa tingkat akurasi sensor kelembaban tanah YL-69 berada pada kategori yang sangat baik untuk mendukung sistem irigasi presisi. Pada kondisi tanah kering (Sampel 1–12), rata-rata persentase galat (*error*) yang dihasilkan berkisar antara 1,62% hingga 2,61%. Sementara itu, pada skenario pengujian di media tanah basah (Sampel 13–30), sensor menunjukkan peningkatan stabilitas pembacaan dengan nilai galat yang mengecil hingga mencapai titik terendah sebesar 0,04% pada kondisi jenuh air ekstrem. Rendahnya rata-rata nilai galat fungsional (*Mean Absolute Percentage Error* / MAPE) sebesar 1,58% ini membuktikan bahwa perangkat keras pengondisi sinyal mampu mereduksi derau (*noise*) instrumen dengan optimal, sehingga siap diintegrasikan sebagai parameter masukan utama dalam algoritma kendali otomatis. Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu, akurasi kuantitatif sensor YL-69 dalam studi ini menunjukkan performa yang kompetitif. Irawan & Wahyuni (2021) melaporkan nilai galat sensor sejenis sebesar 2,45% pada tanah berpasir karena tingginya *noise* pembacaan tanpa modul pengkondisi sinyal eksternal. Di sisi lain, Ramadani & Lestari (2024) menguji sensor kelembaban tanah dengan arsitektur IoT serupa dan memperoleh nilai MAPE sebesar 1,85%. Keberhasilan pencapaian nilai MAPE yang lebih rendah dalam penelitian ini (1,58%) mengonfirmasi bahwa penempatan kapasitor penyeimbang dan konfigurasi pin ADC pada NodeMCU V3 mampu meningkatkan linearitas tegangan keluaran sensor, khususnya pada kondisi kadar air yang mendekati titik jenuh. Setelah tahapan kalibrasi komponen masukan terpenuhi, pengujian berikutnya diarahkan untuk mengevaluasi respons fungsionalitas dari purwarupa irigasi otomatis berbasis batas ambang (*threshold*). Pengujian dilakukan secara berkelanjutan dengan mengamati pembacaan nilai dari Node 1 dan Node 2, serta respons perpindahan kondisi modul relay pengendali *solenoid valve*. Hasil pencatatan pengujian fungsional sistem irigasi otomatis tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Respons irigasi otomatis berdasarkan tingkat kelembapan tanah

Waktu	Kelembaban (%)		Batas Ambang (%)	Status
	Node 1	Node 2		
07.00	10	11	40	Aktif
08.00	15	17	40	Aktif
09.00	18	21	40	Aktif
10.00	20	18	40	Aktif
11.00	28	19	40	Aktif
12.00	57	61	40	Standby
13.00	68	88	40	Standby
14.00	65	58	40	Standby
15.00	40	20	40	Aktif
16.00	11	10	40	Aktif

Melalui analisis log fungsional pada Tabel 2, terlihat bahwa pusat pengendali ESP32 Gateway mengeksekusi perintah penyiraman berdasarkan pembacaan parameter fisik dari kedua node sensor secara *active-low*. Karakteristik operasional *active-low* ini menjadi temuan teknis penting yang berhasil diidentifikasi secara jelas pada rentang waktu pukul 07.00 hingga 11.00. Ketika data kelembaban tanah dari Node 1 dan Node 2 berada jauh di bawah nilai ambang kritis 40% (berkisar antara 10% hingga 28%), mikrokontroler gateway harus mengirimkan sinyal digital rendah (LOW) untuk memicu modul *relay*, sehingga katup *solenoid valve* berpindah ke status AKTIF untuk mengalirkan air ke lahan. Sebaliknya, perubahan kondisi terjadi saat memasuki pukul 12.00 hingga 14.00 ketika kadar

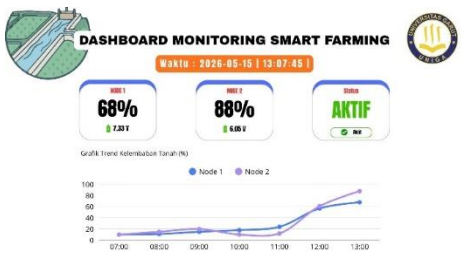
E-ISSN: 2580-1643

kelembaban tanah melonjak naik melebihi parameter ambang batas (menyentuh 57% hingga 88%). Pada kondisi tanah basah tersebut, sistem kendali mengubah status operasionalnya menjadi STANDBY dengan cara mengirimkan sinyal digital tinggi (HIGH) untuk memutus aliran arus beban pada *solenoid valve*. Logika fungsional ini kembali beralih ke status AKTIF saat memasuki pukul 15.00 dan 16.00 ketika pembacaan sensor kembali turun ke area kering di bawah ambang batas 40%. Konfirmasi perilaku kelistrikan *active-low* ini sangat krusial dalam perancangan *smart farming*, sebab kesalahan pemetaan logika program pada *relay* jenis ini dapat mengakibatkan kegagalan sistem irigasi berupa genangan air berlebih yang merusak struktur akar tanaman jika mikrokontroler kehilangan daya atau mengalami *restart* mendadak. Tahap akhir dari penelitian ini melibatkan pengujian fungsionalitas sistem transmisi data nirkabel dari gateway menuju antarmuka web pemantauan berbasis *framework* Laravel. Halaman antarmuka dashboard monitoring dirancang untuk memetakan kondisi operasional riil dari perangkat keras secara visual agar mudah dipahami oleh pengguna. Gambar 6 mengilustrasikan halaman antarmuka dashboard pada saat sistem mencatat status STANDBY. Kondisi *standby* ini berkorelasi dengan grafik tren data historis pada pukul 15.42, di mana pembacaan parameter kelembaban tanah pada area grafik berada di tingkat yang rendah, yaitu masing-masing sebesar 11% pada Node 1 dan 10% pada Node 2.



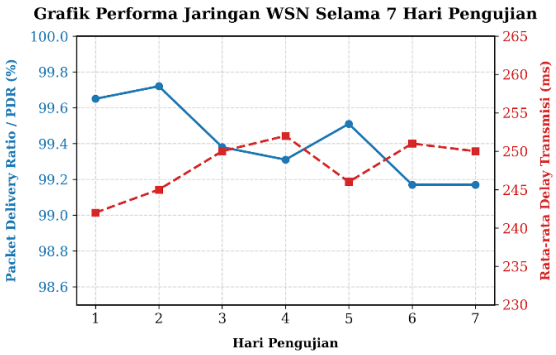
Gambar 6. Tampilan website pada saat kondisi standby

Sementara itu, visualisasi perpindahan data dinamis pada halaman website pada saat sistem memasuki fase pengairan otomatis disajikan pada Gambar 7.



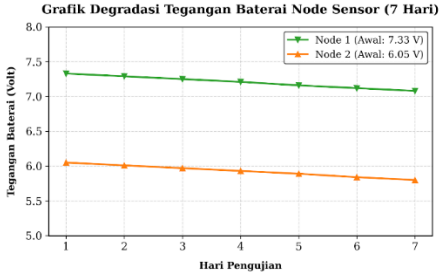
Gambar 7. Tampilan website pada saat kondisi aktif

Berdasarkan Gambar 7, sistem antarmuka web Laravel secara responsif mengubah status visualisasi utama menjadi indikator teks AKTIF berwarna hijau. Kondisi pembaruan status ini dipicu oleh masuknya kiriman paket data telemetri terbaru dari gateway pada pukul 13.07, yang mencatatkan lonjakan persentase kadar air tanah yang tinggi pada grafik tren, yaitu mencapai nilai 68% pada Node 1 dan 88% pada Node 2. Keberhasilan sinkronisasi visual pada Gambar 6 dan Gambar 7 membuktikan bahwa arsitektur sistem komunikasi nirkabel berbasis WSN, protokol ESP-NOW, serta skrip integrasi database pada aplikasi web Laravel telah mampu bekerja secara *real-time* dan andal dalam melakukan pengawasan performa alat irigasi cerdas dari jarak jauh. Stabilitas performa aspek komunikasi data nirkabel WSN selama 7 hari pengujian disajikan secara terperinci melalui grafik tren pada Gambar 8. Berdasarkan visualisasi data tersebut, nilai PDR konsisten berada di atas 99% setiap harinya, dan fluktuasi latensi (*delay*) transmisi dari node sensor menuju dashboard Laravel stabil pada kluster 242 ms hingga 252 ms.



Gambar 8. Grafik Performa Jaringan WSN Selama 7 Hari Pengujian

Keandalan performa ini didukung oleh efisiensi manajemen daya sistem lapangan yang ditunjukkan pada Gambar 9. Penurunan tegangan baterai pada Node 1 dan Node 2 membentuk pola linearitas degradasi yang sangat landai, dengan total penurunan tegangan hanya sebesar 0,25 V selama 168 jam operasional penuh. Hasil visualisasi statistik ini membuktikan keandalan operasional sistem berskala jangka panjang.



Gambar 9. Grafik Degradasi Tegangan Baterai Node Sensor (7 Hari)

E-ISSN: 2580-1643

Implikasi praktis dari penelitian ini adalah penyediaan solusi teknologi pertanian presisi yang murah dan hemat energi untuk petani skala kecil menengah. Penggunaan protokol ESP-NOW mengeliminasi ketergantungan terhadap infrastruktur Wi-Fi lokal di area persawahan yang luas, sehingga menekan biaya implementasi perangkat keras secara signifikan. Meskipun sistem menunjukkan performa transmisi data dan akurasi kontrol yang tinggi, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan penting yang perlu diperhatikan. Pertama, pengujian sistem baru dievaluasi terbatas pada penggunaan dua node sensor (*scalability constraint*). Penambahan jumlah node di masa mendatang berpotensi memicu *channel congestion* pada frekuensi 2,4 GHz yang digunakan oleh ESP-NOW, sehingga berisiko menurunkan nilai PDR. Kedua, seluruh data eksperimen diambil pada kondisi cuaca normal. Performa transmisi nirkabel dan daya tahan probe sensor YL-69 terhadap korosi tanah belum diuji secara ekstrem pada kondisi cuaca buruk seperti curah hujan tinggi yang kontinu atau kelembaban udara jenuh, yang secara teoretis dapat mengganggu redaman sinyal frekuensi radio serta mempercepat degradasi fisik komponen sensor di lapangan.

3.2 Pembahasan

Dalam penelitian ini, sistem irigasi otomatis berbasis Wireless Sensor Network (WSN) berhasil menunjukkan tingkat akurasi yang sangat baik dalam pengukuran kelembaban tanah, dengan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) sebesar 1,58% dan galat minimal 0,04% pada kondisi jenuh air ekstrem. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Irawan dan Wahyuni (2021), yang melaporkan bahwa sistem irigasi menggunakan sensor YL-69 mampu mencapai akurasi yang memadai, meskipun dengan galat yang lebih tinggi sekitar 2,45% pada tanah berpasir. Selain itu, penelitian oleh Ramadani dan Lestari (2024) menunjukkan bahwa penggunaan arsitektur IoT serupa pada sistem pemantauan pertanian dapat menghasilkan nilai MAPE sebesar 1,85%. Keberhasilan sistem ini dalam mengurangi galat fungsional dapat diatribusikan pada penggunaan modul pengkondisi sinyal yang efektif, yang membantu mereduksi derau pada pembacaan sensor. Hal ini menunjukkan bahwa pengintegrasian teknologi ESP-NOW untuk komunikasi data dan penggunaan platform Laravel untuk pemantauan web tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga memberikan solusi yang lebih handal dalam pengelolaan irigasi presisi. Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teknologi pertanian modern, sejalan dengan temuan Nugroho dan Pratama (2025), yang menekankan pentingnya otomatisasi dalam manajemen sumber daya air untuk meningkatkan produktivitas pertanian di era perubahan iklim yang tidak menentu.

4. Kesimpulan

Penelitian mengenai rancang bangun sistem irigasi cerdas otomatis berbasis *Wireless Sensor Network* (WSN) dan platform pemantauan web Laravel telah berhasil direalisasikan secara sistematis sesuai dengan tujuan yang ditetapkan. Hasil evaluasi empiris menunjukkan bahwa instrumen sensor YL-69 memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dalam mengakuisisi parameter fisik tanah, dengan raihan rata-rata galat fungsional (*Mean Absolute Percentage Error* / MAPE) sebesar 1,58% serta mencapai tingkat akurasi tertinggi dengan galat minimal 0,04% pada kondisi jenuh air ekstrem. Logika kendali berbasis ambang batas kritis kelembaban $< 40\%$ terbukti mampu menggerakkan modul *relay* dan katup *solenoid valve* secara responsif dengan menerapkan prinsip kelistrikan *active-low*. Selain itu, integrasi protokol komunikasi ESP-NOW dan antarmuka web Laravel menunjukkan keandalan performa jaringan yang tinggi, ditandai dengan capaian *Packet Delivery Ratio* (PDR) yang konsisten di atas 99% serta nilai latensi transmisi yang stabil pada rentang 242 ms hingga 252 ms selama tujuh hari pengujian penuh.

Meskipun sistem telah menunjukkan performa fungsional dan sinkronisasi data visual yang andal secara *real-time*, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan teknis yang memerlukan penyempurnaan. Keterbatasan utama terletak pada skala pengujian yang baru melibatkan dua node sensor, sehingga belum mengevaluasi potensi interferensi sinyal atau *channel congestion* pada frekuensi 2,4 GHz jika diimplementasikan pada lahan pertanian yang lebih luas. Selain itu, durasi pengujian yang relatif singkat (168 jam) serta pengambilan data yang terbatas pada kondisi cuaca normal membuat ketahanan jangka panjang komponen probe sensor terhadap laju korosi tanah dan pengaruh cuaca ekstrem belum dapat dipetakan secara menyeluruh. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk memfokuskan pada pengembangan arsitektur jaringan yang mendukung skalabilitas multi-node (*cluster-based routing*), integrasi algoritma kecerdasan buatan seperti *fuzzy logic* untuk optimasi volume penyiraman, serta penggunaan material probe sensor yang dilapisi bahan anti-korosi guna meningkatkan usia pakai perangkat di lapangan.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Garut yang telah memberikan dukungan fasilitas, sarana, dan prasarana akademik selama pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi dan penghargaan tinggi juga disampaikan kepada rekan-rekan di Laboratorium Teknik Elektro serta seluruh pihak yang telah meluangkan waktu, memberikan bimbingan teknis, saran, dan kontribusi pemikiran yang sangat berharga demi penyelesaian naskah jurnal ini.

6. Daftar Pustaka

Adi, S., & Kitagawa, T. (2021). Power consumption optimization in wireless sensor network using ESP-NOW protocol. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 69(4), 2102–2111.

Ahmad, B., & Ramadhan, A. (2023). Real-time soil moisture monitoring systems using IoT for sustainable agriculture. *International Journal of Agronomy and Smart Farming*, 11(2), 145–154.

Ahmad, M., & Shatnawi, F. (2024). Monolithic web framework architectures for automated agricultural systems. *Journal of Software Engineering and Applications*, 17(3), 89–102.

Al-Qahtani, A., *et al.* (2023). Battery life evaluation on remote node telemetry for smart farming applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 342, 113–125.

Erokhin, V., *et al.* (2024). Over-irrigation mitigation and crop yield optimization in modern precision agriculture. *Water Resources Management*, 38(1), 321–335.

Fahmi, R., & Sanjaya, M. (2025). Implementasi logika terbalik (active-low) pada sistem kendali relay pintar untuk pencegahan malfungsi hidrolika. *Jurnal Otomasi Dan Pengendalian Nasional*, 12(1), 45–46.

Hakim, A., & Utomo, S. (2024). Celah keamanan komunikasi data dan sinkronisasi arsitektur linear tunggal pada perangkat smart farming. *Jurnal Teknologi Informasi*, 20(2), 112–121.

Kim, J., & Park, S. (2026). Inverted logic architecture for fail-safe automation in high-saturation environmental IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, 13(2), 894–903.

Kumar, A., & Singh, R. (2023). Impacts of climate change on water use efficiency in Asian agricultural sectors. *Climate Change and Agriculture Journal*, 29(4), 567–579.

Lopez, M., & Davis, R. (2024). Evaluating multi-node stability in fluctuating soil conditions via low-power transmissions. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 20(5), 411–425.

Miller, G., *et al.* (2024). Synchronization flaws in active-high logic systems for remote agricultural valve controls. *Journal of Agricultural Automation*, 8(1), 14–26.

Nguyen, T., *et al.* (2024). Comparative analysis of ESP-NOW, LoRa, and ZigBee protocols for agricultural telemetry networks. *Wireless Networks*, 30(3), 1543–1555.

Nugroho, A., & Pratama, R. (2025). Adopsi Internet of Things (IoT) pada smart farming presisi di Indonesia: Sebuah tinjauan kontemporer. *Jurnal Ilmiah Teknologi Pertanian*, 17(1), 12–25.

Putra, E., & Sari, D. (2026). Sinkronisasi real-time data transien pada framework web berbasis MVC untuk monitoring perangkat IoT. *Jurnal Sistem Informasi Dan Komputasi*, 15(1), 88–99.

Ramadani, F., & Lestari, N. (2024). Analisis konsumsi energi node sensor IoT berbasis baterai pada sistem pemantauan pertanian monolitik Laravel. *Jurnal Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi*, 8(2), 233–242.

Rozci, M. (2024). Tantangan global manajemen sumber daya air pada era ketidakpastian iklim. *Jurnal Ilmu Lingkungan Dan Keairan*, 22(1), 50–61.

Siregar, H., & Buana, I. (2022). Efisiensi energi protokol transmisi nirkabel ESP-NOW pada perangkat monitoring pertanian. *Jurnal Telekomunikasi Dan Elektronika*, 10(2), 103–112.

Smith, J., & Jones, M. (2022). Global climate volatility and its immediate threat to precision agriculture frameworks. *Environmental Science & Policy*, 164, 112–123.

Zhao, X., & Li, Y. (2024). Next-generation smart farming: Internet of Things (IoT) integration in automated greenhouse regimes. *Computers in Industry*, 156, 104–117.