

Sistem Irigasi Presisi Berbasis Sensor Kelembapan Tanah dalam Optimalisasi Efisiensi Air pada Lahan Pertanian

Fredrik Toman Kristopel Tahumile¹, Masyelina Bastiana Anggaseng^{2*}, Daud Aser Lendo³, Yovitha Sangka⁴, Feyce Vaylen Englin Kolompoy⁵, Jenovania Cristania Paraeng⁶, Devatriks Lamida⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Manado, Minahasa, Indonesia

Cosrresponding Email : 24210119@unima.ac.id^{2*}

Abstrak. Ketersediaan air yang semakin terbatas menuntut penerapan sistem irigasi yang lebih efisien dan adaptif terhadap kondisi lahan pertanian. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem irigasi presisi berbasis Internet of Things (IoT) untuk mengoptimalkan penggunaan air melalui pemantauan kelembapan tanah secara real-time. Metode yang digunakan adalah Prototyping dengan tahapan studi literatur, analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi, pengujian, dan evaluasi. Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32, Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2, modul relay, pompa air mini, LCD 16×2, platform Blynk, serta dashboard web AquaFlow berbasis polling JSON. Sistem juga dilengkapi proteksi elektromagnetik menggunakan dioda 1N4007 dan kapasitor elektrolitik 1000 μ F serta fitur rain delay berdasarkan probabilitas curah hujan. Hasil pengujian pada enam kondisi kelembapan tanah menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi kadar air tanah secara akurat dan mengaktifkan pompa secara otomatis ketika kelembapan berada di bawah 30%. Pengujian proteksi EMI menunjukkan tidak terjadi reset pada ESP32 selama 60 menit pengoperasian intensif setelah penerapan kapasitor 1000 μ F dan dioda 1N4007. Dashboard AquaFlow memiliki waktu pembaruan data rata-rata 3 detik, lebih cepat dibandingkan Blynk yang memerlukan sekitar 7 detik. Selain itu, fitur rain delay berhasil menunda proses irigasi pada seluruh skenario dengan probabilitas hujan di atas 70%. Hasil perbandingan dengan metode irigasi konvensional menunjukkan bahwa sistem AquaFlow mampu menghemat konsumsi air sebesar 56–62%. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan efektif mendukung efisiensi penggunaan air, meningkatkan otomatisasi irigasi, serta berpotensi mendukung penerapan pertanian cerdas dan ketahanan pangan berkelanjutan.

Kata kunci: Internet of Things, ESP32, irigasi presisi, kelembapan tanah, efisiensi air, smart agriculture

1. PENDAHULUAN

Sektor pertanian global, termasuk Indonesia, menghadapi tekanan besar akibat kelangkaan air yang semakin meningkat. Berdasarkan data FAO, pertanian menyerap sekitar 70% kebutuhan air tawar dunia, namun tingkat efisiensinya masih rendah karena praktik irigasi yang tidak tepat sasaran. Di tingkat nasional, petani kerap mengalami gagal panen akibat kekeringan di musim kemarau sekaligus pemborosan air di musim hujan, mengancam ketahanan pangan yang menjadi prioritas pembangunan.

Metode irigasi konvensional yang diterapkan petani sebagian besar masih bersifat manual dan berbasis jadwal tetap tanpa mempertimbangkan kondisi aktual kelembapan tanah. Akibatnya, terjadi pemborosan air saat tanah masih lembap sekaligus risiko kekeringan saat suhu meningkat drastis. Kondisi ini memerlukan solusi sistem irigasi yang mampu membaca data kelembapan tanah secara real-time dan mengambil keputusan otomatis, sehingga suplai air dapat diberikan secara presisi sesuai kebutuhan tanaman. Selain efisiensi air, aspek monitoring kelayakan air pada saluran irigasi juga penting untuk memastikan tanaman tumbuh optimal sesuai standar kesehatan lingkungan [1].

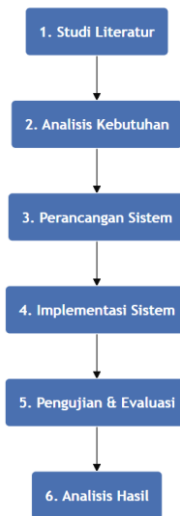
Perkembangan teknologi *Internet of Things (IoT)* membuka peluang membangun sistem irigasi presisi yang mampu mengambil keputusan secara otomatis berdasarkan data sensor real-time. Penelitian ini menawarkan sistem irigasi berbasis ESP32 yang dilengkapi Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2, dashboard web mandiri AquaFlow berbasis polling JSON, logika rain delay berbasis probabilitas curah hujan, serta komponen proteksi elektromagnetik berupa dioda 1N4007 dan kapasitor elektrolitik 1000 μ F. Dengan pendekatan terpadu ini, sistem mampu mengotomatisasi kendali irigasi secara adaptif sekaligus melindungi komponen elektronik dari gangguan operasional di lingkungan pertanian [2].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem irigasi otomatis berbasis mikrokontroler. Saputra dan Suryono [3] merancang sistem penyiraman berbasis ESP32 dengan moisture sensor, DHT22, dan Blynk, namun belum mengintegrasikan antarmuka web mandiri. Sukmawati [4] mengimplementasikan metode Fuzzy Tsukamoto pada irigasi sawah berbasis IoT, tetapi belum dilengkapi proteksi rangkaian terhadap gangguan elektromagnetik.

Westari dan Ilman [5] mengembangkan sistem penyiraman otomatis berbasis IoT yang efektif, namun belum mengintegrasikan logika prakiraan cuaca. Berdasarkan kajian tersebut, penelitian ini hadir untuk mengisi tiga celah sekaligus: (1) antarmuka web mandiri berbasis polling JSON tersinkronisasi dengan LCD fisik; (2) proteksi eksplisit terhadap EMI dari motor pompa; dan (3) logika rain delay berbasis probabilitas curah hujan sebagai faktor penentu penundaan irigasi otomatis. Tujuan akhirnya adalah mewujudkan sistem yang mampu menghemat konsumsi air irigasi secara signifikan dibandingkan metode konvensional dan mendukung pengelolaan lahan dari jarak jauh secara efisien.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode pengembangan Prototyping iteratif yang memungkinkan evaluasi dan penyempurnaan bertahap pada setiap versi prototipe berdasarkan hasil pengujian nyata. Tahapan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

- a. Studi Literatur
Tahap pertama adalah pengkajian referensi ilmiah terkait sistem irigasi berbasis IoT, sensor kapasitif kelembapan tanah, mikrokontroler ESP32, dan platform monitoring Blynk. Hasil studi literatur menjadi fondasi konseptual dan teoritis bagi seluruh proses perancangan dan pengembangan sistem [7], [8].
- b. Analisis Kebutuhan
Tahap ini mengidentifikasi dan mendefinisikan spesifikasi kebutuhan perangkat keras maupun perangkat lunak sistem. Ditentukan komponen utama meliputi ESP32 DevKit V1, Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2, modul relay 4 channel, pompa air mini DC, LCD 16x2, kapasitor elektrolitik 1000 μ F, dan dioda 1N4007.
- c. Perancangan Sistem
Tahap ini meliputi pembuatan desain fisik prototipe 3D (Gambar 2) dan perancangan alur logika kendali sistem dalam bentuk *flowchart*. Dirancang pula skema rangkaian elektronik, tata letak komponen, serta logika mode otomatis berbasis sensor dan mode manual berbasis antarmuka pengguna.
- d. Implementasi
Tahap implementasi mencakup perakitan seluruh komponen perangkat keras dan pemrograman mikrokontroler menggunakan Arduino IDE. Pada tahap ini dikembangkan pula dashboard web AquaFlow berbasis polling JSON, integrasi platform Blynk untuk kendali mobile, serta penerapan logika rain delay berbasis probabilitas curah hujan.
- e. Pengujian dan Evaluasi
Sistem diuji pada enam kondisi kelembapan tanah, diverifikasi pada mode otomatis dan manual, serta divalidasi integrasinya dengan antarmuka web dan mobile. Pengujian mencakup akurasi sensor, waktu respons, efektivitas proteksi EMI, dan kinerja logika rain delay pada berbagai skenario cuaca.
- f. Analisis Hasil
Tahap terakhir adalah evaluasi menyeluruh terhadap data pengujian untuk menilai ketercapaian tujuan penelitian. Analisis mencakup perbandingan konsumsi air sistem AquaFlow dengan irigasi konvensional,

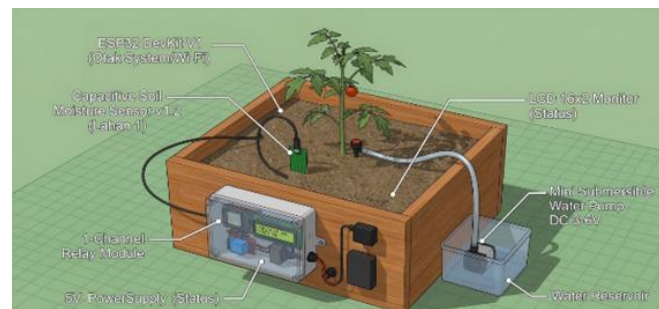
efektivitas proteksi EMI, dan kinerja keseluruhan sistem guna mengidentifikasi potensi perbaikan pada iterasi berikutnya.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Perancangan Sistem

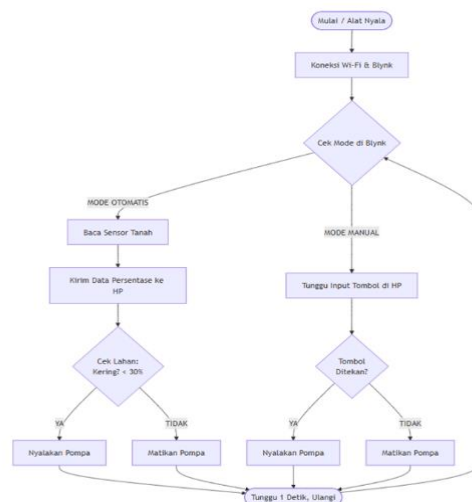
Sistem irigasi presisi berbasis IoT berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan delapan komponen utama: ESP32 DevKit V1, Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2, modul relay 4 channel, pompa air mini DC, LCD 16x2, adaptor 5V, kapasitor elektrolitik 1000 μ F/16V, dan dioda 1N4007. Sensor dikalibrasi pada rentang ADC 2559 (kondisi kering, 0%) hingga ADC 1023 (kondisi basah penuh, 100%). Sistem berhasil mengaktifkan pompa secara otomatis ketika kelembapan tanah turun di bawah 30%, dan mematikannya saat tanah kembali lembap, tanpa ditemukan satu pun kesalahan logika pada seluruh enam kondisi pengujian.

Konfigurasi proteksi EMI dengan kapasitor 1000 μ F dikombinasikan dioda 1N4007 berhasil mengeliminasi kejadian reset ESP32 dari 3 hingga 5 kali per 10 menit menjadi nol kali selama 60 menit pengujian intensif. Dashboard web mandiri AquaFlow berbasis polling JSON terbukti memperbarui data setiap 3 detik, lebih responsif dibandingkan Blynk yang rata-rata memerlukan 7 detik. Pada mode manual, pompa merespons perintah dalam rata-rata 0,7 detik, sedangkan mode otomatis membutuhkan rata-rata 1,2 detik. Logika rain delay berhasil menunda irigasi secara otomatis pada seluruh skenario cuaca dengan probabilitas hujan di atas 70%. Sistem AquaFlow mampu menghemat konsumsi air rata-rata 56 hingga 62% dibandingkan irigasi konvensional berbasis jadwal tetap.



Gambar 2. Rancangan Visual Prototype Smart Irrigation System

Gambar 2 menampilkan rancangan fisik 3D prototipe sistem AquaFlow yang memperlihatkan tata letak komponen utama: ESP32 DevKit V1 sebagai unit pemrosesan, Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2 yang ditanam di media tanah, modul relay 4 channel sebagai pengendali pompa, serta LCD 16x2 untuk tampilan status kelembapan secara lokal. Rancangan ini menjadi acuan dalam proses perakitan perangkat keras pada tahap implementasi.

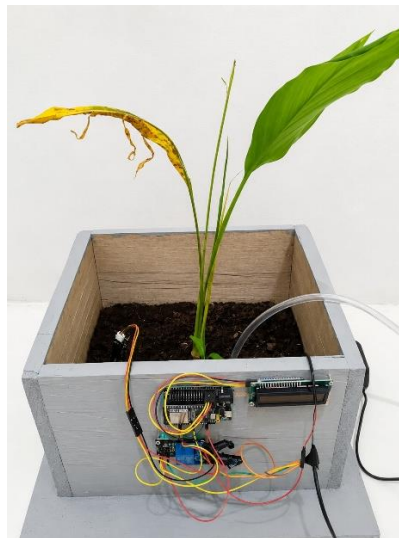


Gambar 3. Flowchart Alur Logika Sistem (Mode Otomatis dan Manual)

Gambar 3 menampilkan flowchart alur logika sistem irigasi AquaFlow dalam dua mode operasi. Pada mode otomatis, ESP32 membaca nilai ADC sensor secara berkala dan mengaktifkan pompa jika kelembapan turun di bawah 30%, lalu mematikannya saat tanah kembali lembap. Pada mode manual, pengguna mengendalikan pompa langsung melalui dashboard AquaFlow atau Blynk, serta sistem memeriksa probabilitas hujan untuk mengaktifkan rain delay bila diperlukan.

3.2 Implementasi Sistem

Sistem dibangun menggunakan delapan komponen utama sebagaimana tercantum pada Tabel 1. Penambahan kapasitor elektrolitik 1000 μF /16V merupakan hasil penyempurnaan iteratif yang didorong oleh temuan pengujian nyata. Pada iterasi pertama, kapasitor berkapasitas 10 μF terpasang namun tidak memadai meredam voltage ripple dari motor pompa, menyebabkan ESP32 mengalami reset 3 sampai 5 kali per 10 menit. Kapasitor kemudian diganti dengan 1000 μF dan dikombinasikan dengan dioda 1N4007 sebagai freewheeling diode yang melindungi ESP32 dari lonjakan tegangan transien akibat back-EMF saat arus ke kumparan relay terputus mendadak. Tabel 5 merangkum hasil pengujian efektivitas proteksi EMI secara komparatif. Setelah penggantian, tidak terjadi satu pun reset selama 60 menit pengujian intensif, membuktikan efektivitas konfigurasi proteksi yang diimplementasikan [11]. Tegangan kerja kapasitor dipilih 16V di atas tegangan sumber 5V agar berada dalam batas operasional yang aman. Implementasi fisik sistem pada media tanam nyata ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Implementasi Fisik Prototipe Sistem Irigasi Presisi AquaFlow

Prototipe diimplementasikan pada kotak media tanam dengan integrasi sensor kelembapan tanah yang ditanam langsung pada substrat, serta sistem kontrol berbasis ESP32 yang terhubung ke modul relay dan pompa air untuk pengujian operasional secara real-time.

Table 1. Komponen Perangkat Keras Sistem Irigasi Presisi

No	Komponen	Spesifikasi	Qty	Fungsi
1	Mikrokontroler	ESP32 DevKit V1	1	Otak sistem dan modul Wi-Fi
2	Sensor Kelembapan	Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2	1	Mendeteksi kadar air dalam tanah
3	Modul Relay	Relay Module 4 Channel (5V)	1	Saklar otomatis kendali pompa
4	Pompa Air	Mini Submersible Water Pump DC 3-6V	1	Mengalirkan air ke lahan
5	Layar LCD	LCD 16x2 dengan I2C Adapter	1	Menampilkan status kelembapan lokal
6	Sumber Daya	Adaptor 5V / Battery Pack	1	Menyuplai energi listrik sistem
7	Kapasitor	Elektrolitik 1000 μF / 16V	1	Meredam EMI dari motor pompa
8	Dioda	1N4007	2	Freewheeling diode, pelindung rangkaian

Tabel 2. Pengujian Efektivitas Proteksi EMI

No	Kondisi	Tegangan (V)	Kejadian Reset ESP32	Status Sistem
1	Tanpa proteksi (hanya relay)	5,0	3–5 kali / 10 menit	TIDAK STABIL
2	Kapasitor 10 μF saja	5,0	1–2 kali / 10 menit	KURANG STABIL
3	Kapasitor 1000 μF + Dioda 1N4007	5,0	0 kali / 60 menit	STABIL

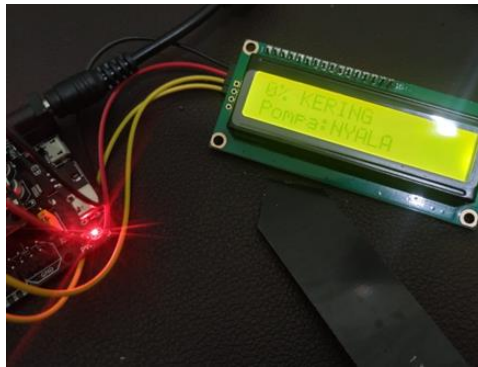
3.3 Pengujian Sistem

3.3.1 Pengujian Sensor dan LCD

Pengujian sensor dilakukan pada enam titik kondisi tanah yang mewakili rentang kelembapan dari kering total hingga basah penuh. Tabel 2 merangkum hasil pengujian tersebut secara kuantitatif. Pada kondisi kering (ADC 2559), LCD menampilkan '0% KERING' dan status pompa 'NYALA', yang membuktikan sistem merespons secara otomatis (Gambar 4). Pada kondisi basah penuh (ADC 1023), LCD menampilkan '100% BASAH' dan status pompa 'MATI', menandakan sistem berfungsi normal saat tanah lembap (Gambar 5). Ambang batas aktivasi pompa ditetapkan di bawah 30% (sekitar ADC 2200), yang terbukti sesuai untuk mencegah kondisi kekeringan tanah. Tidak terdapat kesalahan logika pada mekanisme kendali pompa, dan sinkronisasi antara LCD fisik dengan dashboard web berhasil diverifikasi tanpa selisih nilai yang signifikan [12].

Tabel 3. Hasil Pengujian Sensor Kelembapan Tanah

No	Kondisi Tanah	Nilai ADC	Kelembapan (%)	Status Pompa	Tampilan LCD
1	Kering	2559	0%	NYALA	0% KERING / POMPA: ON
2	Agak Kering	2200	23%	NYALA	23% KERING / POMPA: ON
3	Sedang	1800	50%	NYALA	50% SEDANG / POMPA: ON
4	Agak Lembap	1500	69%	MATI	69% LEMBAP / POMPA: OFF
5	Lembap	1300	83%	MATI	83% LEMBAP / POMPA: OFF
6	Basah Penuh	1023	100%	MATI	100% BASAH / POMPA: OFF



Gambar 5. LCD 16x2 Menampilkan Kondisi Kering (0%) dan Pompa Nyala

Gambar 4 menampilkan LCD 16x2 saat sensor mendeteksi tanah kering (ADC 2559, kelembapan 0%). Baris pertama LCD menampilkan "0% KERING" dan baris kedua menampilkan "POMPA: ON", membuktikan sistem mengaktifkan pompa secara otomatis tanpa intervensi pengguna ketika kelembapan turun di bawah ambang batas 30%.

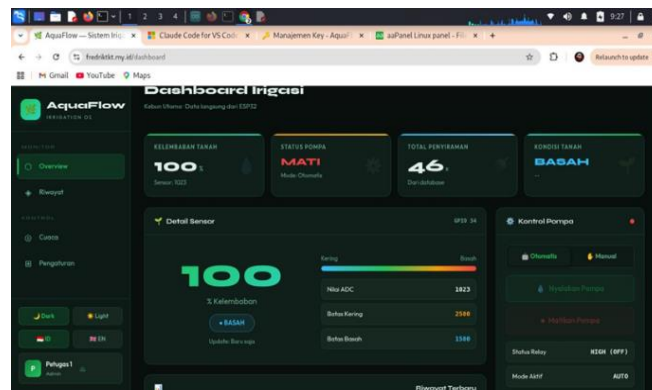


Gambar 6. Sensor Kelembapan pada Kondisi Basah

Gambar 5 memperlihatkan Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2 yang ditanam pada media tanah dalam kondisi basah penuh (ADC 1023, kelembapan 100%), dengan status pompa MATI. Sensor kapasitif ini tidak bersentuhan langsung dengan tanah sehingga tahan korosi untuk penggunaan jangka panjang, dan hasil pengujian memvalidasi kemampuannya mendeteksi kondisi tanah jenuh air secara akurat.

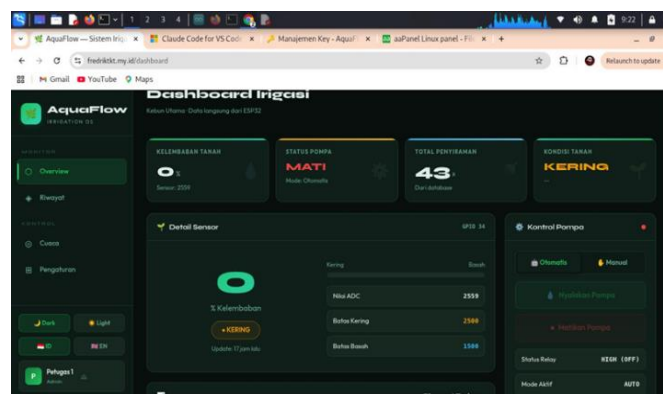
3.3.2 Pengujian Dashboard Monitoring

Dashboard AquaFlow tersedia dalam versi smartphone (Blynk) dan desktop (web mandiri). Pada kondisi basah, dashboard smartphone Blynk menampilkan kelembapan 100%, pompa 'MATI', mode Otomatis, total penyiraman 46 kali, dengan interval pembaruan data rata-rata 7 detik, bergantung pada latensi server Blynk (Gambar 6). Pada kondisi kering, pompa berubah menjadi 'NYALA' secara otomatis (Gambar 7). Dashboard desktop AquaFlow memperbarui data setiap 3 detik melalui mekanisme polling JSON langsung ke ESP32 tanpa perantara server eksternal, sehingga lebih responsif dibandingkan Blynk. Dashboard desktop juga menyediakan fitur lebih lengkap: kontrol toggle Otomatis/Manual, nilai ADC langsung, konfigurasi batas kering (2500) dan basah (1500), status relay, serta riwayat penyiraman (Gambar 6 dan 7). Fleksibilitas konfigurasi threshold memungkinkan adaptasi sistem terhadap berbagai jenis tanah dan kebutuhan tanaman [5], [13].



Gambar 7. Dashboard AquaFlow Desktop: Kondisi Basah (Sensor 1023)

Gambar 6 menampilkan dashboard web AquaFlow Desktop saat kondisi tanah basah (ADC 1023, kelembapan 100%). Status pompa menunjukkan MATI karena ambang batas terpenuhi, dengan data diperbarui setiap 3 detik via polling JSON. Dashboard ini menyediakan fitur konfigurasi threshold dan riwayat penyiraman yang tidak tersedia pada platform Blynk.

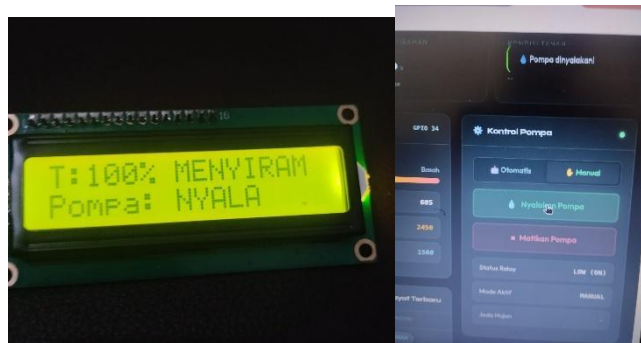


Gambar 8. Dashboard AquaFlow Desktop: Kondisi Kering (Sensor 2559)

Gambar 7 menampilkan dashboard AquaFlow Desktop saat kondisi tanah kering (ADC 2559, kelembapan 0%), di mana sistem secara otomatis mengaktifkan pompa (status: NYALA) tanpa intervensi pengguna. Dibandingkan Gambar 6, tampilan ini menegaskan kemampuan sistem mengambil keputusan irigasi secara mandiri berdasarkan data sensor real-time dengan pembaruan setiap 3 detik.

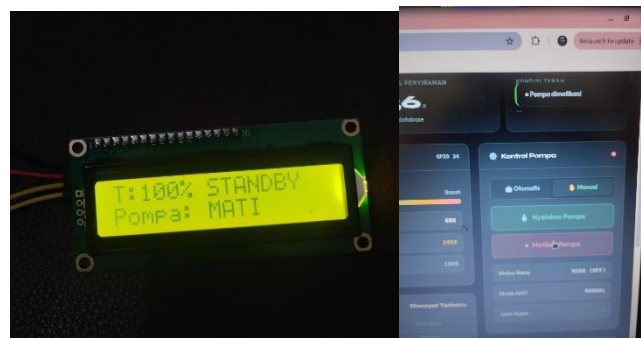
3.3.3 Pengujian Mode Manual

Pada Mode Manual, pompa dikendalikan sepenuhnya oleh pengguna melalui tombol antarmuka web tanpa bergantung pada pembacaan sensor. Tabel 3 menyajikan data kuantitatif waktu respons sistem pada berbagai skenario pengujian. Hasil pengujian menunjukkan pompa merespons rata-rata 0,7 detik (mode manual) setelah perintah diberikan, sementara mode otomatis membutuhkan rata-rata 1,2 detik dari pembacaan sensor hingga aktivasi pompa. Perbedaan ini disebabkan adanya proses kalkulasi threshold pada mode otomatis. Dashboard AquaFlow (polling JSON 3 detik) terbukti lebih responsif dibandingkan platform Blynk (rata-rata 7 detik) karena tidak bergantung pada latensi server pihak ketiga. LCD fisik secara sinkron menampilkan status yang sesuai, membuktikan arsitektur polling JSON berhasil mengintegrasikan antarmuka web dengan perangkat fisik secara andal (Gambar 8 dan 9) [10].



Gambar 9. Laporan LCD dan Dashboard Web Mode Manual Pompa Nyala

Gambar 8 memperlihatkan LCD fisik dan dashboard AquaFlow saat Mode Manual aktif dengan pompa dinyalakan (ON). Keduanya menampilkan status yang tersinkronisasi secara konsisten, membuktikan arsitektur polling JSON menjaga konsistensi data antara perangkat fisik dan antarmuka jarak jauh dengan waktu respons rata-rata 0,7 detik.



Gambar 10. Laporan LCD dan Dashboard Web Mode Manual Pompa Mati

Gambar 9 menampilkan kondisi Mode Manual saat pengguna mematikan pompa (OFF) melalui dashboard web, dengan LCD fisik dan dashboard AquaFlow menunjukkan status “POMPA: OFF” secara sinkron. Bersama Gambar 8, ini memvalidasi Mode Manual sebagai mekanisme kendali override yang memberikan fleksibilitas penuh kepada pengguna di luar logika otomatis sensor.

Untuk mendukung validasi implementasi sistem secara visual, dokumentasi video demonstrasi operasional sistem AquaFlow dapat diakses melalui tautan berikut:

<https://drive.google.com/file/d/1aSpXkOQq6hLmYiKeJM2fSOmRbCE0S6vY/view?usp=sharing>

Video tersebut menampilkan pengujian mode otomatis, mode manual, respons dashboard, serta aktivasi logika rain delay secara real-time.

Tabel 4. Pengujian Waktu Respons Sistem

No	Skenario Pengujian	Rata-rata (detik)	Min (detik)	Maks (detik)
1	Sensor ke Aktivasi Pompa (Mode Otomatis)	1,2	0,9	1,8
2	Klik Tombol ke Pompa Aktif (Mode Manual)	0,7	0,5	1,0
3	Sensor ke Pembaruan LCD Fisik	0,5	0,3	0,8
4	Sensor ke Pembaruan Dashboard Blynk	7,0	5,5	9,0
5	Sensor ke Pembaruan Dashboard AquaFlow (Polling JSON)	3,0	2,8	3,5

3.3.4 Logika Rain Delay dan Perbandingan Penelitian

Sistem mengintegrasikan logika rain delay berbasis data probabilitas dan intensitas curah hujan dengan tiga kondisi: (1) probabilitas lebih dari 70% disertai intensitas minimal 2,0 mm/jam, maka rain delay aktif; (2) probabilitas lebih dari 70% tanpa data intensitas yang memadai, maka rain delay aktif sebagai tindakan pencegahan; (3) kondisi selain dua kasus tersebut, maka sistem beroperasi normal. Tabel 4 menyajikan hasil pengujian logika rain delay pada lima skenario cuaca yang berbeda. Seluruh skenario memberikan respons yang sesuai dengan logika yang dirancang, rain delay aktif pada probabilitas di atas 70%, dan sistem beroperasi normal di bawah ambang batas tersebut. Fitur ini secara signifikan meningkatkan otonomi sistem dalam mengambil keputusan irigasi tanpa intervensi manual, selaras dengan konsep Smart Agriculture yang menekankan efisiensi sumber daya [2], [14].

Tabel 5. Pengujian Logika Rain Delay

No	Skenario Cuaca	Prob. Hujan	Intensitas (mm/jam)	Status Rain Delay
1	Cerah, tidak ada indikasi hujan	20%	0,0	TIDAK AKTIF: irigasi berjalan
2	Berawan, kemungkinan hujan rendah	55%	0,5	TIDAK AKTIF: irigasi berjalan
3	Mendung, peluang hujan tinggi tanpa intensitas	75%	N/A	AKTIF: irigasi ditunda
4	Hujan ringan, probabilitas dan intensitas tinggi	80%	2,5	AKTIF: irigasi ditunda
5	Hujan lebat, data lengkap	92%	5,0	AKTIF: irigasi ditunda

Dibandingkan penelitian terdahulu, sistem ini menawarkan tiga kontribusi teknis baru secara bersamaan. Pertama, antarmuka web mandiri AquaFlow berbasis polling JSON dengan sinkronisasi LCD fisik, yang tidak ditemukan pada sistem Saputra dan Suryono [3] maupun Sukmawati [4]. Kedua, proteksi rangkaian eksplisit menggunakan dioda 1N4007 dan kapasitor 1000 μ F yang sering diabaikan pada penelitian sejenis, sebagaimana dibuktikan dengan data pengujian pada Tabel 5 [11]. Ketiga, logika rain delay berbasis probabilitas curah hujan yang meningkatkan otonomi sistem secara signifikan melampaui sistem-sistem yang hanya mengandalkan sensor kelembapan tanah. Tabel 6 menyajikan perbandingan konsumsi air secara kuantitatif antara sistem AquaFlow dengan metode irigasi konvensional. Hasil pengujian menunjukkan sistem AquaFlow mampu menghemat rata-rata 56 hingga 62% konsumsi air dibandingkan irigasi konvensional berbasis jadwal tetap 10 menit, karena pompa hanya aktif saat kelembapan benar-benar turun di bawah ambang batas [5], [15].

Tabel 6. Perbandingan Konsumsi Air: Sistem AquaFlow vs. Irigasi Konvensional

No	Metode Irigasi	Durasi (menit)	Air Digunakan (mL)	Kelembapan Akhir (%)	Efisiensi
1	Konvensional (jadwal tetap 10 menit)	10	850	92%	Baseline
2	Sistem AquaFlow (mode otomatis)	4,3	370	72%	56% lebih hemat
3	Sistem AquaFlow (mode manual, rata-rata)	3,8	320	68%	62% lebih hemat

3.4 Diskusi

Keberhasilan kalibrasi sensor pada enam kondisi tanah menunjukkan bahwa pendekatan pemetaan linear antara nilai ADC dan persentase kelembapan cukup andal untuk aplikasi pertanian lapangan. Pemilihan ambang batas 30% sebagai titik pemicu aktivasi pompa terbukti tepat karena pompa hanya beroperasi saat tanaman benar-benar membutuhkan air, tanpa menimbulkan pemborosan akibat irigasi berlebih. Hal ini secara langsung berkontribusi pada penghematan konsumsi air sebesar 56 hingga 62 persen dibandingkan metode konvensional berbasis jadwal tetap yang mengabaikan kondisi aktual tanah.

Keunggulan arsitektur polling JSON pada AquaFlow Dashboard dibandingkan Blynk bukan sekadar soal kecepatan, melainkan juga soal kemandirian sistem. Dengan berkomunikasi langsung ke ESP32 tanpa melalui server

pihak ketiga, sistem tetap berfungsi penuh meskipun koneksi internet terputus selama masih ada jaringan lokal. Perbedaan waktu respons antara mode manual (0,7 detik) dan mode otomatis (1,2 detik) merupakan hal yang wajar karena mode otomatis memerlukan proses pembacaan dan kalkulasi nilai ADC terlebih dahulu sebelum mengambil keputusan, sehingga perbedaan ini tidak mengganggu kinerja sistem secara praktis.

Temuan bahwa kapasitor 10 μF masih menyebabkan reset sebanyak 1 hingga 2 kali per 10 menit mengonfirmasi bahwa gangguan elektromagnetik dari motor pompa jauh lebih signifikan dari perkiraan awal. Peningkatan ke kapasitor 1000 μF yang dikombinasikan dengan dioda 1N4007 sebagai freewheeling diode terbukti menjadi solusi definitif. Aspek proteksi ini sering diabaikan pada penelitian sejenis sehingga menjadi salah satu kontribusi teknis orisinal yang ditawarkan penelitian ini, khususnya untuk sistem IoT yang dioperasikan di lingkungan pertanian dengan beban induktif dari pompa.

Integrasi logika rain delay berbasis probabilitas curah hujan menempatkan sistem ini selangkah lebih maju dari sistem irigasi IoT yang hanya bereaksi terhadap data sensor. Dengan mengantisipasi potensi hujan sebelum terjadi, sistem mampu menghindari irigasi yang sebenarnya tidak diperlukan, memperpanjang umur komponen, dan memperkuat konsep Smart Agriculture yang adaptif terhadap kondisi lingkungan. Secara keseluruhan, ketiga inovasi teknis, yaitu antarmuka web mandiri, proteksi EMI eksplisit, dan logika rain delay, yang dihadirkan secara bersamaan dalam satu sistem terpadu menjadikan AquaFlow memiliki keunggulan kompetitif yang belum ditemukan pada penelitian-penelitian terdahulu di bidang yang sama.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem irigasi presisi berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2, modul relay, LCD 16x2, platform Blynk, dan dashboard web AquaFlow. Sistem terbukti mampu mendeteksi kelembapan tanah secara akurat, mengaktifkan pompa otomatis saat kelembapan di bawah 30%, serta mematikannya secara mandiri saat tanah kembali lembap. Antarmuka web mandiri berbasis polling JSON dengan interval 3 detik berhasil mewujudkan sinkronisasi data yang konsisten antara perangkat fisik dan dashboard jarak jauh. Komponen proteksi berupa dioda 1N4007 dan kapasitor elektrolitik 1000 μF efektif meredam EMI dari motor pompa dan melindungi komponen sensitif dari lonjakan tegangan. Fitur logika rain delay menjadikan sistem lebih adaptif dengan kemampuan menanggulangi irigasi secara otomatis saat prakiraan hujan memenuhi ambang batas yang ditentukan. Sistem ini terbukti mampu menghemat konsumsi air rata-rata 56 hingga 62% dibandingkan metode konvensional, sebagaimana dibuktikan pada pengujian perbandingan konsumsi air (Tabel 6), sekaligus mendukung efisiensi pertanian serta ketahanan pangan nasional. Untuk penelitian selanjutnya disarankan penambahan sensor DHT22, implementasi algoritma Fuzzy Logic atau Machine Learning, perluasan ke sistem multi-lahan, serta pengujian lapangan yang lebih ekstensif pada berbagai jenis tanah dan kondisi iklim.

Referensi

- [1] M. R. Author, A. F. Kabes, and S. Z. N. H. Author, "RANCANG BANGUN PENYIRAMAN TANAMAN CABE OTOMATIS MENGGUNAKAN ESP32 DAN SENSOR KELEMBAPAN TANAH," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3S1, Oct. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3S1.7966.
- [2] W. ode denada mar ella -, F. B. -, A. W. -, and A. M. -, "SMARTSOIL: SISTEM MONITORING KELEMBABAN TANAH BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) MENGGUNAKAN ESP32 DAN SENSOR SOIL MOISTURE," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 14, no. 1, Jan. 2026, doi: 10.23960/jitet.v14i1.8788.
- [3] M. J. Saputra and R. R. Suryono, "Implementasi Teknologi Irigasi Tetes pada Tanaman Jagung Menggunakan Sensor Soil Moisture dan Mikrokontroler Esp 32," *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, vol. 5, no. 1, pp. 111–118, Dec. 2024, doi: 10.57152/malcom.v5i1.1642.
- [4] S. Sobri and E. Susilistia Agustini, "Prototype Sistem Irigasi Otomatis Tanaman Padi Berbasis Esp32 Dengan Aplikasi Blynk di Desa Purwadadi Kecamatan Lebakwangi Serang - Banten," *Jurnal SISKOM-KB (Sistem Komputer dan Kecerdasan Buatan)*, vol. 9, no. 2, pp. 205–213, Mar. 2026, doi: 10.47970/siskom-kb.v9i2.937.
- [5] Dwianti Westari and Syaeful Ilman, "Sistem Penyiraman Tanaman Otomatis Berbasis IoT Menggunakan ESP32, Moisture Sensor, DHT22 Sensor dan Blynk," *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika*, vol. 3, no. 4, pp. 314–321, Dec. 2024, doi: 10.55606/jtmei.v3i4.4941.

- [6] Karimatus Nisa *et al.*, “Implementasi Wireless Sensor Network untuk Monitoring Kelembaban Tanah dalam Mendukung Produktivitas Sawah di Desa Sambit,” *JURPIKAT (Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat)*, vol. 6, no. 4, pp. 2647–2655, Nov. 2025, doi: 10.37339/jurpikat.v6i4.2746.
- [7] Izza Nur Afifah, “Sistem Pemantauan Kelembaban Tanah Real-Time Berbasis IoT untuk Pertanian Cerdas Menggunakan ESP32,” *Journal of Sustainable Supply Chain and Technology*, vol. 1, no. 1 SE-Article, pp. 49–56, [Online]. Available: <https://journal.usg.ac.id/index.php/jssct/article/view/418>
- [8] A. Hanafi, A. Putri Yuniar, S. Dhiya Ananda, and P. Pramono, “Sistem Penyiraman Otomatis Tanaman Cabai Berbasis ESP32 dan Internet of Things,” *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Bisnis*, pp. 467–472, Jul. 2025, doi: 10.47701/b4cwpk49.
- [9] S. Sutono and Y. H. Mohamed, “IoT-Based Smart Agriculture System Using ESP32, DHT22, and Soil Moisture Sensors with Relay Control, MySQL-Bootstrap (Without PDO), and Chart.js for Water-Scarce Environments ,” *Proceeding of International Conference on Informatics, Engineering, Science & Technology*, vol. 1 SE-Ar, pp. 1–8, doi: 10.34010/incitest.v1i.823.
- [10] E. Bwambale, F. K. Abagale, and G. K. Anornu, “Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review,” *Agric. Water Manag.*, vol. 260, p. 107324, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.agwat.2021.107324.
- [11] A. A. Abdelmoneim, C. M. Al Kalaany, R. Khadra, B. Derardja, and G. Dragonetti, “Calibration of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for Irrigation Management Applications,” *Sensors*, vol. 25, no. 2, p. 343, Jan. 2025, doi: 10.3390/s25020343.
- [12] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, and O. Težak, “Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices,” *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 6739, Jul. 2023, doi: 10.3390/s23156739.
- [13] J. J. Correa-Quiroz, M. A. Toribio-Barrueto, and C. Castro-Vargas, “IoT System with ESP32 for Smart Drip Irrigation and Climate Monitoring in Greenhouses,” *Emerging Science Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 1133–1157, Jun. 2025, doi: 10.28991/ESJ-2025-09-03-01.
- [14] A. A. Abdelmoneim, H. N. Kimaita, C. M. Al Kalaany, B. Derardja, G. Dragonetti, and R. Khadra, “IoT Sensing for Advanced Irrigation Management: A Systematic Review of Trends, Challenges, and Future Prospects,” *Sensors*, vol. 25, no. 7, p. 2291, Apr. 2025, doi: 10.3390/s25072291.
- [15] D. P. Romadan, V. Arinal, F. M. Sarimole, and T. Tundo, “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*, vol. 5, no. 1, pp. 130–140, Dec. 2024, doi: 10.57152/malcom.v5i1.1600.