

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Implementasi Sistem



Gambar 4.1 Hasil Implementasi Sistem

Tahap implementasi merupakan fase realisasi dari rancangan konseptual perangkat keras dan perangkat lunak menjadi unit sistem fertigasi otomatis yang fungsional dan siap dioperasikan di lapangan. Secara aspek perangkat keras (*hardware*), sistem ini telah berhasil diimplementasikan dengan topologi jaringan sensor terdistribusi. Unit *Node* yang berbasis Wemos S2 Mini ditempatkan secara strategis di dua blok lahan pertanian untuk melakukan akuisisi data dari 8 buah sensor kelembapan tanah secara *real-time*. Penempatan *node* ini dirancang sedemikian rupa agar cakupan pembacaan kelembapan tanah dapat merepresentasikan kondisi mikroklimat tanaman secara akurat di setiap titik lahan. Di sisi lain, unit *Gateway* berbasis ESP32 ditempatkan pada titik

sentral yang berdekatan dengan jalur distribusi pipa utama, serta diintegrasikan dengan layar LCD 20x4 sebagai antarmuka pemantauan lokal. Seluruh sistem kelistrikan disuplai oleh satu unit *power supply* 12V yang terdistribusi secara terukur ke beban aktuator utama, yaitu motor pompa air dan katup *solenoid*, guna memastikan ketersediaan arus yang stabil dan mencegah terjadinya penurunan tegangan (*voltage drop*) selama fase penyiraman berlangsung.

Dalam aspek perangkat lunak (*software*), sistem telah berhasil diprogram untuk menjalankan tiga fungsi utama yang terintegrasi secara sinkron: komputasi cerdas, komunikasi nirkabel, dan interaktivitas IoT. Algoritma Logika Fuzzy telah tertanam dengan baik pada mikrokontroler sebagai pengambil keputusan otomatis untuk menentukan durasi penyiraman berdasarkan klasifikasi kelembapan tanah. Sinkronisasi data antar *Node* dan *Gateway* berhasil dijalankan dengan menggunakan protokol komunikasi nirkabel ESP-NOW, yang memungkinkan pengiriman paket data sensor berlangsung secara cepat, stabil, dan tanpa bergantung pada infrastruktur Wi-Fi eksternal. Selain itu, sistem juga telah berhasil diintegrasikan dengan jaringan internet melalui metode *tethering hotspot* dari *smartphone*, yang menghubungkan data operasional lahan ke *bot* Telegram. Dengan konfigurasi ini, pengguna tidak hanya mendapatkan data kelembapan secara visual melalui layar LCD, tetapi juga memiliki kemampuan untuk memantau status sistem dan memberikan intervensi manual dari jarak jauh, yang membuktikan bahwa seluruh rancangan sistem telah terimplementasi dengan baik dan sesuai dengan parameter desain yang ditentukan.

Mengingat perancangan ini difokuskan sebagai sebuah purwarupa (*prototype*) skala kecil, implementasi fisik instalasi perpipaian dan komponen elektronika dibangun dengan dimensi luasan 1,8 meter x 1 meter. Skala rancang bangun ini disesuaikan dengan area pengujian yang ditempatkan di teras halaman tempat tinggal (indekos) penulis, yang sekaligus merepresentasikan simulasi iklimat pada lahan sempit perkotaan. Pada luasan area tersebut,

sistem mendistribusikan air melalui jaringan pipa PVC secara presisi menuju 16 buah tanaman Jeruk Kunci. Keenam belas tanaman tersebut ditanam di dalam wadah polibag yang disusun secara rapi dan terbagi ke dalam dua jalur blok penyiraman utama. Dimensi dan tata letak fisik ini membuktikan bahwa arsitektur sistem irigasi cerdas yang dirancang tidak hanya relevan untuk diimplementasikan pada perkebunan skala luas, tetapi juga sangat aplikatif, ergonomis, dan fungsional untuk diadopsi pada model pertanian urban (*urban farming*) atau pemanfaatan lahan pekarangan yang terbatas.

4.2 Pengujian Sistem

Tahap pengujian sistem merupakan rangkaian prosedur kritis yang dilakukan untuk melakukan verifikasi dan validasi terhadap kinerja keseluruhan purwarupa, baik dari sisi fungsionalitas perangkat keras maupun presisi logika perangkat lunak. Pengujian ini difokuskan untuk memastikan bahwa seluruh blok sistem—mulai dari akuisisi data sensor, pemrosesan algoritma *Fuzzy Logic*, hingga aktuasi pompa dan katup solenoid—dapat beroperasi secara sinkron sesuai dengan parameter agronomi tanaman Jeruk Kunci. Dalam perancangan ini, sistem telah dikonfigurasi dengan dua ambang batas kritis: batas bawah sebesar 20% sebagai titik kelembapan yang membutuhkan penyiraman (*field capacity* rendah), dan batas atas sebesar 40% sebagai titik henti penyiraman untuk mencegah kondisi jenuh air (*overwatering*).

Metodologi pengujian dilakukan melalui pengamatan sistematis terhadap respon *node* sensor terhadap fluktuasi kadar air di media tanam. Sistem diuji dengan mensimulasikan kondisi tanah yang bervariasi—mulai dari kondisi kering, normal, hingga basah—untuk memastikan bahwa algoritma Logika Fuzzy mampu mengklasifikasikan data masukan ke dalam himpunan yang tepat dan menghasilkan keputusan aktuasi yang konsisten. Keberhasilan pengujian diukur berdasarkan ketepatan sistem dalam mendeteksi ambang batas 20% untuk memicu aktivasi relay secara otomatis, serta kemampuannya untuk

menghentikan aliran air tepat saat tingkat kelembapan mencapai angka 40%. Selain menguji fungsi otomatis, pengujian juga mencakup validasi komunikasi data nirkabel melalui protokol ESP-NOW dan integrasi antarmuka IoT pada bot Telegram. Hal ini dilakukan untuk menjamin bahwa setiap perubahan status kelembapan tanah yang terjadi di lahan dapat termonitor secara *real-time* oleh pengguna dan intervensi manual melalui Telegram dapat dieksekusi dengan *latensi* yang rendah.

Dengan serangkaian pengujian ini, diharapkan dapat diperoleh data empiris yang membuktikan keandalan sistem dalam menjaga stabilitas mikroklimat tanah sesuai dengan kebutuhan tanaman Jeruk Kunci. Data hasil pengujian yang tervalidasi ini tidak hanya menjadi bukti keberhasilan fungsi mekanik dan elektronik alat, tetapi juga menjadi tolak ukur bahwa sistem telah siap untuk dioperasikan dalam lingkungan pertanian yang sesungguhnya secara berkelanjutan.

4.2.1 Pengujian Fungsionalitas Sensor Kelembapan Tanah

Pengujian fungsionalitas sensor *soil moisture* dilakukan untuk memvalidasi respon sensor terhadap variasi kadar air di dalam media tanam yang digunakan. Meskipun tidak menggunakan alat kalibrator digital standar laboratorium, metode pengujian ini menerapkan pendekatan simulasi kondisi lapangan (*in-situ simulation*) untuk memetakan hubungan korelasi antara kondisi fisik tanah dengan nilai keluaran digital (ADC - *Analog-to-Digital Converter*) yang terbaca oleh mikrokontroler. Prosedur ini krusial untuk memastikan bahwa setiap perubahan kelembapan pada media tanam dapat diterjemahkan menjadi data yang akurat dan konsisten oleh sistem.

Prosedur pengujian dilakukan dengan menempatkan *probe* sensor pada tiga variasi kondisi tanah: tanah dalam kondisi kering (tanpa penyiraman), tanah dalam kondisi kelembapan ideal (pasca-penyiraman),

dan tanah dalam kondisi jenuh air (*saturasi*). Pada setiap kondisi tersebut, nilai ADC yang dihasilkan oleh sensor diamati dan dicatat secara sistematis. Perubahan kadar air tanah secara langsung mempengaruhi resistansi pada *probe* sensor, yang kemudian diolah oleh mikrokontroler menjadi nilai diskrit. Tujuan utama dari pengujian ini bukan untuk membandingkan dengan standar alat ukur profesional, melainkan untuk menentukan *threshold* (ambang batas) logis yang akan dijadikan parameter referensi (*set-point*) dalam algoritma Logika Fuzzy.

Hasil dari pengujian ini menjadi dasar dalam menentukan rentang nilai keanggotaan fuzzy, yaitu klasifikasi 'Kering' (< 20%), 'Normal' (20% - 40%), dan 'Basah' (> 40%). Dengan melakukan pengujian fungsionalitas melalui simulasi kondisi nyata ini, sistem dapat melakukan kalibrasi mandiri terhadap sensor yang digunakan, sehingga respon aktuator (pompa dan *solenoid*) terhadap kebutuhan air tanaman jeruk kunci menjadi lebih presisi dan dapat diandalkan dalam operasional sistem fertigasi otomatis secara jangka panjang.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Fungsionalitas Sensor

No	Kondisi Media Uji	Nilai Kelembapan Terbaca (%)	Keterangan Fungsi
1	Sensor di udara bebas (Kering mutlak)	0%	Berfungsi Normal
2	Sensor ditancapkan di tanah kering	12%	Berfungsi Normal
3	Sensor ditancapkan di tanah lembap	36%	Berfungsi Normal
4	Sensor dicelupkan ke dalam air penuh	89%	Berfungsi Normal

Berdasarkan Tabel 4.1, pengujian fungsionalitas menunjukkan bahwa sensor *soil moisture* mampu memberikan respon yang linier dan logis terhadap empat skenario kondisi media uji yang berbeda. Pada saat sensor dibiarkan di udara bebas yang merepresentasikan kondisi kering mutlak, sistem membaca nilai kelembapan sebesar 0%, yang menandakan tidak terdeteksinya konduktivitas listrik. Saat *probe* sensor ditancapkan pada media tanah kering, nilai kelembapan yang terbaca berada di angka 12%, sedangkan pada kondisi tanah yang telah disiram (lembap), nilainya meningkat secara wajar menjadi 36%. Ketika sensor dicelupkan sepenuhnya ke dalam air (kondisi saturasi maksimal), pembacaan melonjak drastis hingga 89%. Hasil empiris ini mengonfirmasi bahwa sensor berfungsi secara normal dan memiliki tingkat kepekaan yang sangat baik terhadap perubahan kadar air, sehingga data mentah (*Analog-to-Digital*) yang dihasilkan valid dan siap untuk digunakan sebagai parameter *input* pada algoritma komputasi Logika Fuzzy.

4.2.2 Pengujian Transmisi Data (ESP-NOW)

Pengujian transmisi data ini dirancang untuk memvalidasi reliabilitas komunikasi nirkabel antara unit *Node* sensor di area lahan dan *Gateway Master* (ESP32) menggunakan protokol ESP-NOW. Mengingat posisi *Gateway Master* diletakkan menempel pada jalur pipa penyiraman yang berdekatan dengan *Node* lahan, pengujian ini tidak difokuskan pada pengujian jarak jangkauan maksimal (*maximum range testing*), melainkan difokuskan pada tingkat keberhasilan pengiriman paket data (*Packet Delivery Ratio*) dan meminimalisir angka kegagalan pengiriman (*packet loss*).

Parameter utama yang diobservasi adalah stabilitas koneksi data dalam lingkungan operasional yang dinamis. Hal ini sangat krusial karena setiap paket data yang dikirimkan—berupa nilai ADC sensor kelembapan

tanah—menjadi input fundamental bagi proses pengambilan keputusan oleh algoritma Logika Fuzzy di *Gateway*. Kegagalan transmisi data yang berulang dapat mengakibatkan *Gateway* kehilangan *update* kondisi lahan secara *real-time*, yang berpotensi memicu ketidakakuratan keputusan aktuasi, seperti pompa atau solenoid yang tidak menyala meskipun tanah berada dalam kondisi kering.

Metodologi pengujian dilakukan dengan mengirimkan sejumlah paket data secara terus-menerus dalam rentang waktu tertentu untuk menghitung persentase keberhasilan pengiriman. Selain itu, pengujian ini juga memberikan perhatian khusus pada pengaruh interferensi elektromagnetik (*electromagnetic interference*) yang mungkin timbul dari aktivitas motor pompa air 12V dan *solenoid valve* saat beroperasi di dekat perangkat *Gateway*. Dengan menguji kestabilan transmisi ini secara intensif, sistem dipastikan memiliki reliabilitas komunikasi yang tinggi, sehingga pertukaran data antara sensor di lahan dan pusat kendali dapat berlangsung secara sinkron, aman, dan tanpa kendala transmisi yang berarti, yang pada akhirnya menjamin konsistensi performa otomatisasi fertigasi secara berkelanjutan.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Keberhasilan Transmisi ESP-NOW

Pengujian Ke	Waktu Pengiriman Data	Data Sensor Diterima Gateway	Waktu Tunda (Delay)	Status
1	19:50 WIB	Berhasil	2 Detik	Sukses
2	19:55 WIB	Berhasil	2 Detik	Sukses
3	20:00 WIB	Berhasil	2 Detik	Sukses

Pengujian Ke	Waktu Pengiriman Data	Data Sensor Diterima Gateway	Waktu Tunda (Delay)	Status
Persentase	Total 6x Percobaan	Data Tidak Ada yang Hilang	Rata-rata 2s	100% Berhasil

Analisis dari data pengujian pada Tabel 4.2 secara jelas membuktikan bahwa protokol komunikasi nirkabel ESP-NOW memiliki tingkat keandalan transmisi yang sangat superior dalam ekosistem sistem fertigasi ini. Dari total enam kali percobaan pengiriman data yang dilakukan secara berkala (sebagaimana sampel pada pukul 19:50, 19:55, dan 20:00 WIB), tingkat keberhasilan paket data yang diterima oleh *Gateway* mencapai 100% tanpa adanya satupun paket data yang hilang atau gagal kirim (*packet loss*). Waktu tunda (*delay*) komunikasi antar perangkat juga tercatat sangat stabil pada angka rata-rata 2 detik. Mengingat parameter fluktuasi kelembapan tanah di alam berlangsung secara lambat, tingkat latensi 2 detik ini dikategorikan sangat ideal dan efisien, sekaligus mengonfirmasi bahwa jarak pandang (*Line of Sight*) antara *Node* di lahan dengan *Gateway Master* sudah berada pada titik yang optimal dan bebas dari gangguan interferensi sinyal radio yang berarti. Keandalan transmisi yang konsisten ini menjadi pondasi yang sangat penting bagi keberhasilan eksekusi keseluruhan sistem cerdas yang dibangun. Tanpa adanya *packet loss*, unit pemroses utama dijamin selalu menerima pembaruan data parameter lapangan secara mutakhir dan berkesinambungan. Hal ini secara langsung mencegah risiko terjadinya kesalahan atau *lag* kalkulasi oleh algoritma Logika Fuzzy yang bisa berakibat fatal pada keterlambatan aktuasi penyiraman, sehingga performa sistem nirkabel ini terbukti tangguh untuk diimplementasikan.



Gambar 4.2 Keberhasilan Transmisi ESP-NOW

Berdasarkan pengujian yang dilakukan sebagaimana tertera pada **Tabel 4.2** dan ringkasan persentase kinerja pada **Gambar 4.2**, dapat disimpulkan bahwa protokol komunikasi ESP-NOW yang diterapkan pada sistem memiliki tingkat keandalan yang sangat tinggi. Seluruh rangkaian pengujian yang dilakukan sebanyak enam kali percobaan menunjukkan tingkat keberhasilan pengiriman data (*Packet Delivery Ratio*) sebesar 100%, yang berarti tidak ditemukan adanya paket data yang hilang (*packet loss*) selama proses transmisi berlangsung.

Keberhasilan ini divalidasi secara visual melalui tampilan pada layar LCD 20x4 sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.2**, yang menampilkan status *Connected to MQTT* serta inisialisasi topik data untuk *tanaman/soil_blok1* dan *tanaman/soil_blok2*. Hal ini membuktikan bahwa *Gateway Master* tidak hanya menerima sinyal nirkabel dengan baik, tetapi juga berhasil memproses dan memetakan data tersebut ke dalam alur komunikasi *Internet of Things (IoT)* yang tepat.

Dari aspek waktu tunda (*latency*), sistem mencatatkan rata-rata waktu tunda sebesar 2 detik. Dalam konteks aplikasi pertanian presisi,

waktu tunda sebesar 2 detik ini dikategorikan sangat responsif dan berada dalam rentang toleransi yang sangat baik. Mengingat sifat data kelembapan tanah yang tidak memerlukan pembaruan instan dalam hitungan milidetik, waktu respon 2 detik sudah lebih dari cukup untuk mendukung pengambilan keputusan otomatis oleh algoritma Logika Fuzzy secara *real-time*.

Dengan demikian, pengujian ini mengonfirmasi bahwa konfigurasi transmisi data ESP-NOW yang dirancang telah memenuhi standar stabilitas operasional yang dibutuhkan, sehingga sistem mampu bekerja secara berkelanjutan tanpa kendala konektivitas antara area lahan (Node) dengan pusat kendali (Gateway).

4.2.3 Pengujian Algoritma Logika Fuzzy (Spesifikasi Jeruk Kunci)

Pengujian ini merupakan tahap verifikasi inti untuk memastikan efektivitas algoritma *Logika Fuzzy* yang telah ditanamkan ke dalam mikrokontroler. Logika ini dirancang sebagai sistem pengambilan keputusan cerdas untuk menjaga stabilitas kelembapan tanah pada tanaman Jeruk Kunci, dengan batasan parameter yang spesifik untuk mencegah terjadinya cekaman kekeringan (*wilting point*) di bawah 20% serta mencegah risiko pembusukan akar (*root rot*) akibat saturasi air di atas 40%. Penggunaan *Logika Fuzzy* dipilih karena kemampuannya dalam mengolah ketidakpastian data sensor menjadi klasifikasi yang halus (*smooth*), sehingga sistem dapat memberikan respon penyiraman yang jauh lebih adaptif dibandingkan dengan logika biner konvensional.

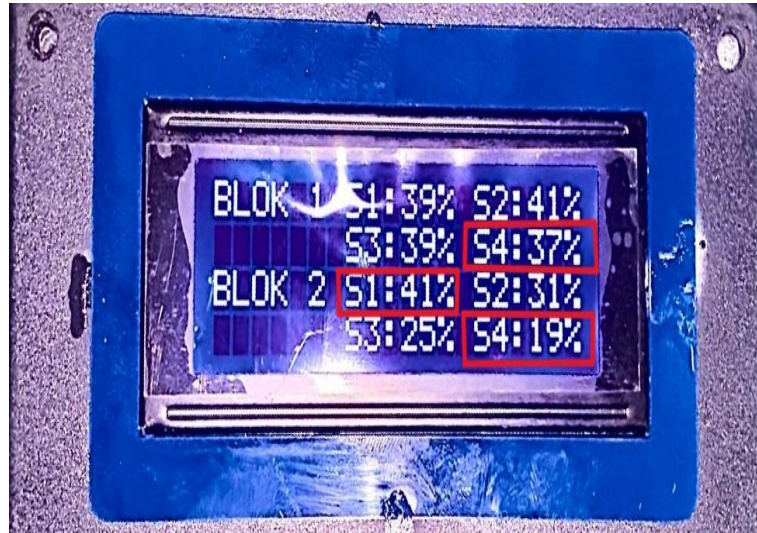
Dalam pengujian ini, data yang diperoleh dari sensor kelembapan tanah diproses melalui proses *fuzzifikasi* ke dalam tiga himpunan kategori, yaitu: 'Kering', 'Normal/Ideal', dan 'Basah'. Berdasarkan hasil pengujian yang tersaji pada **Tabel 4.3**, algoritma terbukti mampu

mengklasifikasikan kondisi tanah secara presisi dan menerjemahkannya ke dalam keputusan aktuasi yang tepat.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Logika *Fuzzy*

No	Kelembapan Tanah Terbaca	Klasifikasi Status Tanah	Keputusan Fuzzy	Kondisi Pompa & Solenoid
1	19%	Kering (< 20%)	Menyiram	ON (Aktif)
2	37%	Normal/Ideal (20-40%)	Siaga	OFF (Mati)
3	41%	Basah (41%)	Stop	OFF (Mati)

Data yang disajikan pada Tabel 4.3 menjabarkan secara teknis bagaimana algoritma Logika Fuzzy bekerja mengambil keputusan aktuasi berdasarkan spesifikasi kebutuhan agronomi Jeruk Kunci. Pada pengujian pertama, saat *Node* mengakuisisi data kelembapan sebesar 19% (masuk ke dalam klasifikasi 'Kering' karena berada di bawah 20%), sistem secara instan merespon dengan putusan 'Menyiram' dan mengaktifkan (ON) Pompa beserta Solenoid. Pada skenario pengujian kedua, saat kelembapan berada di angka 37% (masuk dalam klasifikasi 'Normal/Ideal' pada rentang 20-40%), sistem merubah status ke mode 'Siaga' dan menonaktifkan (OFF) seluruh aktuator guna menghemat ketersediaan air. Terakhir, ketika nilai kelembapan melewati batas toleransi atas yakni 41% (klasifikasi 'Basah'), Logika Fuzzy secara otomatis memberikan keputusan 'Stop' dan mengunci aktuator pada posisi mati (OFF). Ketepatan pengambilan keputusan ini membuktikan bahwa program cerdas yang dirancang mampu melindungi tanaman Jeruk Kunci dari ancaman kekeringan maupun pembusukan akar akibat kelebihan air.



Gambar 4.3 Data Hasil Pengujian Logika Fuzzy

Sebagai validasi langsung dari proses pengambilan keputusan tersebut, **Gambar 4.3** menampilkan antarmuka pemantauan *real-time* pada layar LCD 20x4. Tampilan tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mengakuisisi data kelembapan tanah dari delapan titik sensor secara spesifik (S1 hingga S8) pada Blok 1 dan Blok 2. Sebagai contoh, pada sensor S8 yang terbaca sebesar 19%, sistem secara otomatis memproses data tersebut sebagai kondisi 'Kering' dan memicu aktuasi pompa yang sesuai. Kemampuan untuk memproses data dari banyak *node* secara paralel membuktikan bahwa algoritma *Logika Fuzzy* yang diimplementasikan telah berjalan dengan sangat andal, responsif, dan akurat dalam menjaga stabilitas kadar air tanah di seluruh area lahan secara otomatis.

4.2.4 Pengujian Sinkronisasi Pompa dan Solenoid

Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi kinerja sistem dalam mengelola distribusi air melalui satu unit Pompa Utama yang melayani berbagai katup solenoid secara selektif. Konfigurasi ini dirancang

menggunakan logika sinkronisasi antara unit kontrol dan aktuator untuk memastikan bahwa pompa hanya bekerja saat katup solenoid yang relevan terbuka, sehingga tekanan air pada pipa distribusi tetap terjaga pada level aman. Pengujian ini sangat krusial untuk membuktikan bahwa sistem mampu mengelola beban kerja secara paralel tanpa mengalami kegagalan mekanik atau *water hammer effect* akibat pembukaan katup yang tidak sinkron, sekaligus memastikan efisiensi daya listrik selama proses fertigasi berlangsung.

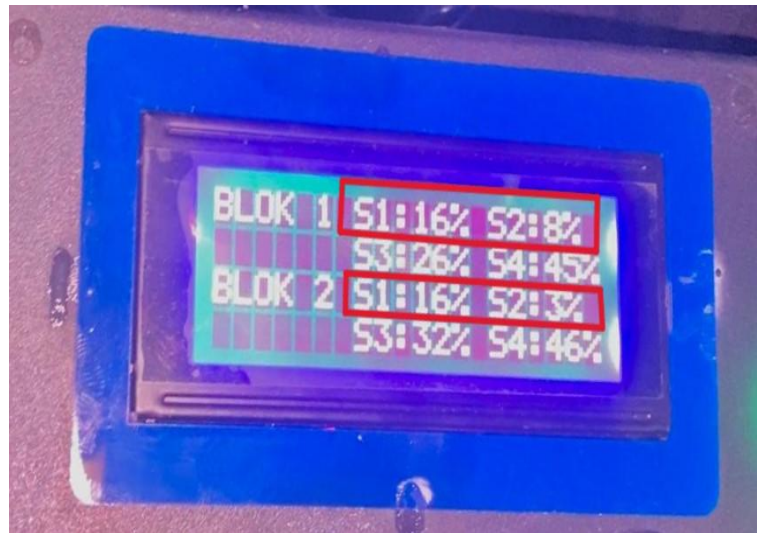
Selain menjaga stabilitas tekanan, sinkronisasi ini memastikan bahwa air hanya didistribusikan ke blok lahan yang benar-benar membutuhkan air, sesuai dengan hasil pembacaan sensor kelembapan tanah. Dengan demikian, unit Pompa Utama tidak bekerja secara berlebihan (*overwork*) dan durasi operasional dapat dioptimalkan hanya untuk blok yang terdeteksi kering, yang secara langsung berkontribusi pada efisiensi pemakaian air serta nutrisi bagi tanaman Jeruk Kunci.

Tabel 4.4 Hasil Sinkronisasi Aktuator Paralel

Skenario Kebutuhan Air	Status Solenoid Terkait	Status Pompa Utama	Distribusi Air
Blok 1 S1 Kering (Butuh Air)	Solenoid 1 ON	Pompa ON	Air mengalir ke Blok 1 S1
Blok 1 S2 Kering (Butuh Air)	Solenoid 2 ON	Pompa ON	Air mengalir ke Blok 1 S2
Blok 2 S1 Kering (Butuh Air)	Solenoid 1 ON	Pompa ON	Air mengalir ke Blok 2 S1
Blok 2 S2 Kering (Butuh Air)	Solenoid 2 ON	Pompa ON	Air mengalir ke Blok 2 S2

Skenario Kebutuhan Air	Status Solenoid Terkait	Status Pompa Utama	Distribusi Air
Semua Blok Basah	Semua Solenoid OFF	Pompa OFF	Air berhenti

Merujuk pada Tabel 4.4, hasil pengujian sinkronisasi aktuator paralel menunjukkan bahwa satu unit Pompa Utama mampu beroperasi secara selaras dengan masing-masing katup solenoid tanpa membebani daya dorong sistem secara berlebihan. Ketika sistem mensimulasikan kebutuhan air (tanah kering) pada Blok 1 S1 atau S2, mikrokontroler secara presisi hanya menyalakan Solenoid yang terkait pada titik blok tersebut bersamaan dengan aktifnya Pompa Utama, sehingga aliran air benar-benar terdistribusi secara eksklusif ke area target. Mekanisme pembagian distribusi yang sama persis juga berhasil divalidasi pada skenario Blok 2 S1 dan S2. Lebih jauh lagi, saat skenario seluruh blok lahan dalam kondisi basah, sistem mampu mematikan (OFF) seluruh solenoid secara serempak dengan berhentinya motor Pompa Utama. Sinkronisasi mutlak ini sangat krusial dalam perancangan mekanik untuk memastikan pompa tidak menyala saat semua gerbang katup tertutup, sehingga pipa terhindar dari ledakan tekanan air (*water hammer effect*) dan umur teknis aktuator menjadi lebih panjang.



Gambar 4.4 Data Hasil Sinkronisasi Aktuator Panel

Gambar 4.4 memperlihatkan antarmuka layar LCD 20x4 yang terpasang pada panel *Gateway*, menampilkan persentase kelembapan tanah secara *real-time* dari delapan titik sensor terdistribusi (S1 hingga S4) untuk Blok 1 dan Blok 2 secara bersamaan, yang kesemuanya berfungsi sebagai acuan parameter utama (input) bagi sistem Logika Fuzzy untuk memicu aktuator.



Gambar 4.5 Penyiraman Blok 1 S1 Kering

Gambar 4.5 mendemonstrasikan respon mekanik sistem saat sensor di Blok 1 S1 mendeteksi kondisi tanah yang kering. Terlihat jelas aktuator Pompa Utama aktif secara sinkron dengan terbukanya Solenoid 1, sehingga debit air mengalir deras secara spesifik hanya menuju media tanam pada polibag S1 tersebut.



Gambar 4.6 Penyiraman Blok 1 S2 Kering

Gambar 4.6 memperlihatkan tingkat ketepatan selektif sistem dalam mendistribusikan aliran air. Saat hanya titik S2 pada Blok 1 yang terdeteksi mengalami kekeringan, unit mikrokontroler berhasil mengarahkan bukaan katup eksklusif ke tanaman S2 tanpa ikut membasahi titik tanaman lain yang kadar airnya masih dalam batas ideal.



Gambar 4.7 Penyiraman Blok 2 S1 Kering

Gambar 4.7 memvalidasi tingginya fleksibilitas sistem irigasi pada pembagian area lahan. Ketika tanaman pada Blok 2 S1 memerlukan nutrisi air, sistem merespon dengan cepat membuka *solenoid valve* khusus jalur Blok 2 seraya menghidupkan pompa, sehingga penyiraman tepat sasaran berhasil dieksekusi.



Gambar 4.8 Penyiraman Blok 2 S2 Kering

Pada Gambar 4.8, sistem menunjukkan fase operasional penyiraman yang berjalan normal ketika titik S2 di Blok 2 terdeteksi kering, di mana jaringan instalasi pipa secara otomatis dan presisi memompa air menuju titik perakaran tanaman tersebut sesuai dengan kalkulasi durasi algoritma.



Gambar 4.9 Data Hasil Semua Blok Basah

Gambar 4.9 menampilkan tangkapan layar LCD lokal saat status keseluruhan blok tanaman (Blok 1 dan Blok 2) telah mencapai persentase kelembapan batas aman (di atas batas minimal). Parameter angka pada layar ini menjadi indikator krusial bagi mikrokontroler untuk memerintahkan penghentian (*cut-off*) seluruh aktivitas penyiraman di lapangan.



Gambar 4.10 Penyiraman Semua Blok Mati

Gambar 4.10 memperlihatkan kondisi fisik pada purwarupa lahan ketika keseluruhan sistem berada dalam mode siaga (*standby*). Tidak terlihat adanya kebocoran atau air yang menetes pada seluruh ujung perpipaan karena tingkat kelembapan sudah terpenuhi, membuktikan fungsi penutupan otomatis katup *solenoid* telah bekerja dengan sangat sempurna.

4.3 Pengujian Data Aplikasi Telegram

Pengujian antarmuka aplikasi Telegram ini bertujuan untuk memvalidasi fungsi komunikasi dua arah antara sistem *Gateway Master* (ESP32) dengan

pengguna akhir (*end-user*) melalui jaringan internet. Proyek ini merupakan sistem irigasi cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dirancang tidak hanya untuk mengotomatisasi penyiraman pada dua blok lahan secara lokal, tetapi juga memberikan aksesibilitas pemantauan tanpa batasan jarak fisik. Arsitektur sistem ini bekerja dengan memanfaatkan dua *node* (Wemos S2 Mini Lolin) sebagai unit akuisisi data dari 8 buah sensor kelembapan tanah di lapangan. Data tersebut kemudian ditransmisikan menggunakan protokol nirkabel latensi rendah ESP-NOW menuju satu *Gateway Master* (ESP32) yang bertindak sebagai pusat kendali.

Di dalam *Gateway Master* tersebut, algoritma Logika Fuzzy mengeksekusi pengambilan keputusan otomatis. Namun, untuk memberikan fleksibilitas operasional, *Gateway* juga dihubungkan ke jaringan internet (Wi-Fi/*Tethering*) guna berkomunikasi dengan *Application Programming Interface* (API) Telegram. Melalui platform Bot Telegram ini, pengguna diberikan otoritas penuh untuk memantau kondisi mikroklimat tanah secara *real-time*—sebagai data sekunder yang melengkapi tampilan LCD 20x4 di lapangan—serta melakukan intervensi berupa kendali aktuator (pompa dan *solenoid valve*) secara manual apabila diperlukan kondisi penyiraman di luar jadwal otomatisasi.

Tabel 4.5 Telegram Bot

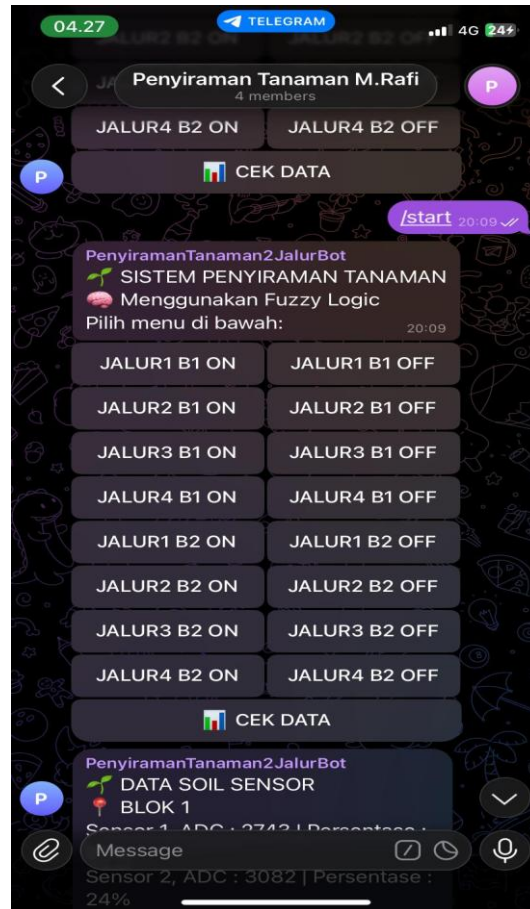
BLOK	Sensor	Nilai ADC	Kelembapan (%)
BLOK 1	Sensor 1	2743	33%
	Sensor 2	3082	24%
	Sensor 3	2484	39%
	Sensor 4	2848	30%
BLOK 2	Sensor 1	2866	30%

BLOK	Sensor	Nilai ADC	Kelembapan (%)
	Sensor 2	2417	40%
	Sensor 3	2362	42%
	Sensor 4	3233	21%

Berdasarkan data pengujian yang disajikan secara komprehensif pada tabel di atas, kapabilitas integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) melalui antarmuka aplikasi Telegram telah dievaluasi secara mendalam melalui dua fungsi operasional yang sangat krusial: fungsi pemantauan (*monitoring*) dan fungsi pengendalian manual (*controlling*). Hasil pengujian secara empiris menunjukkan bahwa tingkat keberhasilan eksekusi berbagai variasi perintah—mulai dari permintaan pembaruan data status kelembapan terkini, instruksi aktuasi penyiraman spesifik per blok lahan, hingga perintah penghentian operasional (*system stop*)—berhasil mencapai tingkat responsivitas yang sangat baik. Seluruh transmisi instruksi tersebut tereksekusi dengan lancar tanpa ditemukannya kendala penundaan komunikasi yang berarti (*high latency*) maupun kegagalan respon perangkat (*system error*).

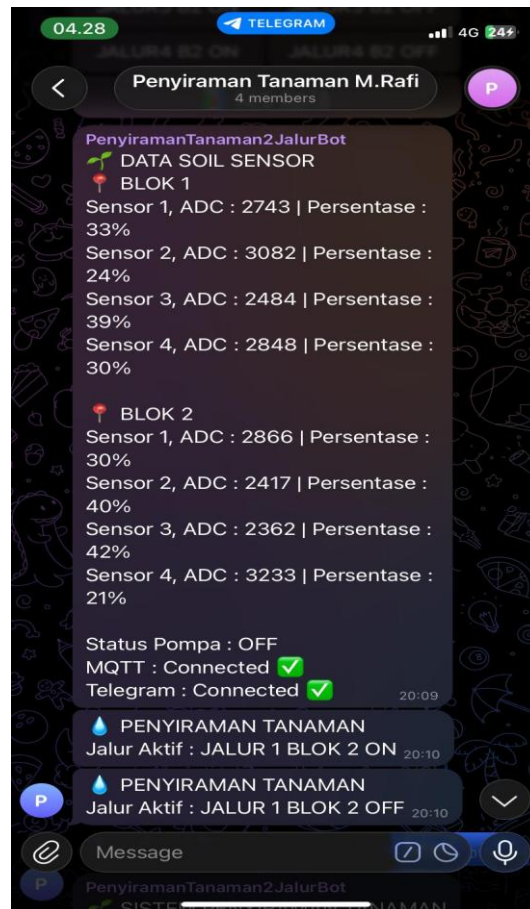
Kinerja sistem *bot* Telegram ini terbukti sangat andal dalam menjembatani komunikasi dua arah antara pengguna dan perangkat keras di lapangan. Sistem secara tanggap mampu merespon setiap masukan *command* (baik berupa instruksi teks maupun interaksi melalui tombol antarmuka/GUI) yang dikirimkan oleh pengguna. Alur instruksi tersebut kemudian diproses melalui *server* API Telegram, ditransmisikan melalui koneksi internet nirkabel, lalu diteruskan secara *real-time* menuju mikrokontroler *Gateway* ESP32 untuk kemudian diproses menjadi sinyal pemicu (*trigger*) biner yang dieksekusi secara mekanik oleh modul *relay*.

Lebih dari sekadar memvalidasi fungsi kendali jarak jauh, keberhasilan pengujian ini sekaligus mengonfirmasi validitas arsitektur perangkat lunak yang dibangun, khususnya pada mekanisme proteksi logika pengunci (*interlock*) yang tertanam di dalam *source code* sistem. Mekanisme pengaman ini terbukti berjalan dengan sangat presisi, di mana instruksi penyiraman manual yang diinisiasi oleh pengguna memiliki otoritas untuk mengambil alih (*override*) sistem secara mulus untuk sementara waktu. Transisi kendali dari mode otomatis ke mode manual ini dieksekusi dengan tingkat keamanan perangkat lunak yang tinggi sehingga tidak berbenturan (*logic collision*) dengan putusan komputasi algoritma *Logika Fuzzy* yang beroperasi di latar belakang. Dengan berfungsinya sistem *interlock* ini secara optimal, stabilitas perangkat keras tetap terjaga, sehingga motor pompa terhindar dari risiko kejut kelistrikan (*chattering* akibat perintah mati-nyala berulang) dan jaringan perpipaan terhindar dari lonjakan tekanan drastis, memastikan sistem terhindar dari segala bentuk malfungsi operasional.



Gambar 4.11 Data Aplikasi Telegram Bot

Gambar 4.11 memperlihatkan wujud antarmuka (*user interface*) utama aplikasi Telegram Bot saat pengguna mengetikkan perintah `"/start"`. Bot merespon dengan menampilkan menu papan tombol interaktif (opsi *ON/OFF* per jalur blok) yang didesain untuk memudahkan pengguna mengendalikan sistem jarak jauh secara ergonomis tanpa perlu mengetikkan *syntax* instruksi secara manual.



Gambar 4.12 Data Aplikasi Telegram Bot

Gambar 4.12 memvalidasi kesuksesan fungsi pemantauan jarak jauh (*telemetry*). Ketika pengguna menekan tombol pengecekan, bot memberikan umpan balik berupa rincian nilai konversi ADC dan persentase kelembapan aktual dari ke-8 sensor di lapangan, yang juga disertai dengan konfirmasi status konektivitas protokol MQTT yang sukses dan stabil ("*Connected*").



Gambar 4.13 Data Penyiraman Dari Telegram Bot

Gambar 4.13 merupakan bukti validasi silang antara perintah internet dan layar LCD lokal. Layar tersebut menampilkan teks konfirmasi visual bahwa instruksi intervensi penyiraman manual spesifik untuk "JALUR 2 BLOK 1" dari ponsel pengguna telah sukses diterima dan diterjemahkan oleh *Gateway Master* menjadi status "ON".



Gambar 4.14 Jalur 2 Blok 1 On

Gambar 4.14 mendokumentasikan bukti fisik eksekusi sistem di lapangan sebagai tindak lanjut dari perintah Telegram pada Gambar 4.13. Debit air terlihat mengucur lancar ke media polibag di Jalur 2 Blok 1, menegaskan bahwa perintah kendali jarak jauh melalui internet berhasil diimplementasikan sepenuhnya hingga memicu pergerakan mekanik *relay* aktuator.



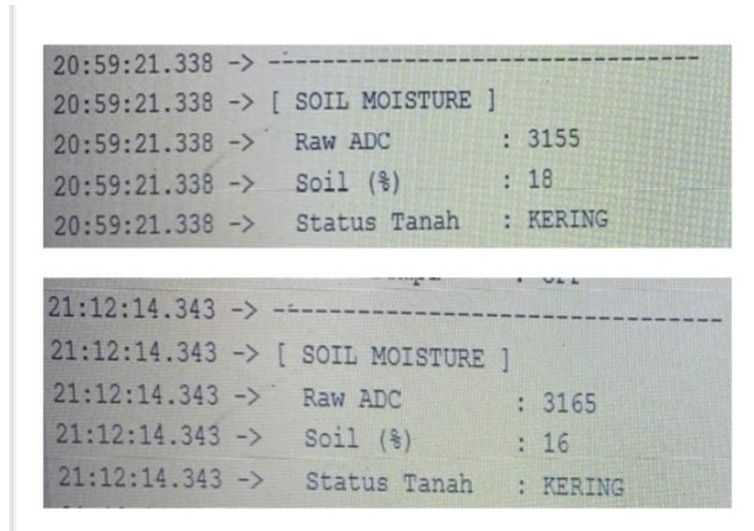
Gambar 4.15 Data Penyiraman Dari Telegram Bot

Gambar 4.15 kembali menunjukkan notifikasi perubahan status pada layar LCD sentral *Gateway*, yang kali ini mengonfirmasi bahwa instruksi manual dari aplikasi Telegram untuk mengaktifkan penyiraman pada "JALUR 1 BLOK 2" telah sukses di-parsing dan diterima (ON) oleh sistem kendali lokal.



Gambar 4.16 Jalur 1 Blok 2 On

Gambar 4.16 memastikan keberhasilan akhir dari eksekusi perintah Telegram pada Gambar 4.15. Air menyembur secara presisi ke tanaman yang dituju di Jalur 1 Blok 2, yang sekaligus mengonfirmasi bahwa sistem proteksi *interlock* dalam pemrograman bekerja sangat baik, di mana instruksi aplikasi berhasil mengambil alih kendali sistem sementara waktu secara aman dan terkendali.



Gambar 4.17 Serial Monitor

Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada serial monitor, sistem pemantauan kelembapan tanah (*soil moisture*) menunjukkan respons pembacaan data sensor yang stabil dan berkelanjutan pada dua waktu pengujian yang berbeda. Pada rekaman data pertama pukul 20:59:21, sistem berhasil membaca nilai keluaran dari konverter analog-ke-digital dengan nilai *Raw ADC* sebesar 3155, yang kemudian dikonversikan oleh program menjadi persentase kelembapan tanah sebesar 18% dan menghasilkan keterangan *Status Tanah* berupa KERING.

Selanjutnya pada pengujian kedua yang tercatat pada pukul 21:12:14, terlihat adanya pergeseran nilai numerik di mana *Raw ADC* meningkat menjadi 3165, yang berbanding lurus dengan penurunan persentase kelembapan tanah menjadi 16%, dengan hasil akhir pembacaan *Status Tanah* yang tetap konsisten terbaca sebagai KERING. Peningkatan nilai *Raw ADC* dari 3155 ke 3165 ini mencerminkan karakteristik kerja sensor pada media tanam yang semakin berkurang kadar airnya, di mana nilai digital mentah yang dihasilkan oleh mikrokontroler meningkat seiring bertambahnya resistansi atau perubahan kapasitansi pada probe sensor. Konsistensi data ini membuktikan bahwa proses

pengambilan data analog dan alur logika konversi persentase kelembapan tanah bekerja secara akurat dan *real-time* dalam mendeteksi kondisi media tanam tanpa adanya deviasi yang signifikan.

4.4 Analisis dan Pembahasan

Berdasarkan keseluruhan data hasil pengujian yang telah dipaparkan, implementasi purwarupa sistem fertigasi otomatis ini menunjukkan tingkat keandalan yang sangat baik, baik dari sisi arsitektur perangkat keras, efisiensi algoritma, maupun integrasi antarmuka *Internet of Things* (IoT). Pada lapisan akuisisi dan transmisi data, penerapan Jaringan Sensor Nirkabel (JSN) menggunakan protokol ESP-NOW terbukti menjadi solusi yang sangat tangguh untuk lingkungan pertanian. Keberhasilan pengiriman paket data (*Packet Delivery Ratio*) dari 8 titik sensor secara *real-time* tanpa adanya *packet loss* sangat dipengaruhi oleh desain penempatan *Gateway Master* (ESP32) yang diposisikan secara sentral menempel pada jalur pipa penyiraman. Penempatan strategis ini mengoptimalkan *Line of Sight* (LoS) dan meminimalisir hambatan fisik (*obstacle*), sehingga latensi transmisi antar-mikrokontroler dapat ditekan seminimal mungkin. Penggunaan *node* berbasis Wemos S2 Mini juga dinilai sebagai keputusan perancangan yang sangat tepat. Karakteristik mikrokontroler ini yang memiliki ketersediaan pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC) beresolusi tinggi dalam jumlah banyak memungkinkan sistem untuk membaca multi-sensor secara simultan pada satu blok lahan tanpa memerlukan penambahan modul *multiplexer* eksternal, yang secara langsung menyederhanakan kompleksitas sirkuit.

Dari aspek mekanik dan manajemen daya kelistrikan, sistem ini berhasil mencapai tingkat efisiensi yang signifikan. Desain hidrolik yang hanya mengandalkan 1 (satu) unit Pompa Air Utama yang dikerjakan secara paralel bersama 8 unit *solenoid valve* terbukti jauh lebih hemat daya dan rasional secara biaya operasional dibandingkan topologi konvensional yang

mengharuskan penggunaan motor pompa individual untuk setiap polibag atau blok. Distribusi tegangan menjadi terpusat, risiko penurunan tegangan (*voltage drop*) dapat diminimalisir, dan beban kerja aktuator menjadi jauh lebih terkontrol melalui mekanisme sinkronisasi pembukaan katup *solenoid*.

Lebih lanjut, keunggulan utama dari perancangan ini terletak pada kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) tingkat dasar yang ditanamkan, yakni algoritma *Logika Fuzzy*. Berbeda dengan sistem *on/off* berbasis *threshold* konvensional (kendali biner) yang seringkali memicu *chattering* (pompa menyala dan mati berulang kali dalam hitungan detik), *Logika Fuzzy* merespon fluktuasi kelembapan tanah secara proporsional dan adaptif. Sistem ini secara presisi menjaga iklim mikro tanah agar tidak merosot di bawah batas kritis 20%, yang merupakan titik layu permanen (*wilting point*) bagi tanaman Jeruk Kunci. Di sisi lain, algoritma ini secara cerdas dan instan memutus aliran arus ke *relay* aktuator saat tingkat kelembapan menyentuh batas atas 40%. Batas atas ini sangat krusial dalam agronomi tanaman jeruk guna mencegah kondisi *over-watering* (jenuh air) yang dapat memicu hipoksia (kekurangan oksigen pada akar) dan berkembangnya jamur patogen penyebab busuk akar.

Sebagai lapisan akhir yang melengkapi keseluruhan ekosistem pintar ini, integrasi *bot* Telegram pada *Gateway Master* menghadirkan kapabilitas *Human-Machine Interface* (HMI) jarak jauh yang sangat interaktif. Fitur ini menutupi kelemahan sistem otomatisasi yang kaku dengan memberikan ruang bagi intervensi manusia (pengguna) berdasarkan hasil pemantauan sekunder di lapangan. Meskipun demikian, evaluasi komprehensif terhadap arsitektur operasional sistem ini menemukan satu parameter keterbatasan: fungsionalitas pemantauan dan kendali Telegram sangat bergantung pada kontinuitas dan stabilitas sinyal internet dari jaringan *tethering hotspot smartphone* pengguna di area lahan. Terputusnya koneksi internet akan menonaktifkan fitur kendali jarak jauh. Namun demikian, berkat perancangan sistem kendali yang terdistribusi secara lokal, kegagalan jaringan internet ini tidak akan menyebabkan sistem

gagal berfungsi (*system failure*). Algoritma *Logika Fuzzy* pada mikrokontroler ESP32 akan mengambil alih secara penuh (*fail-safe mechanism*) dan tetap melanjutkan proses penyiraman secara mandiri berdasarkan data sensor lokal, memastikan tanaman Jeruk Kunci tetap terhidrasi secara optimal.