

© Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional
Terjemahan artikel 10.22146/jnteti.v15i1.23124

Sistem Irigasi dan Pemupukan Cerdas Berbasis IoT dengan Integrasi *Cloud Database*

Eko Win Kenali¹, Dani Rofianto¹, Khusnatul Amaliah¹, Jaka Fitra¹, Halim Fathoni², Tiara Kurnia Khoerunnisa³, Hevia Purnama Sari⁴

¹ Program Studi Teknologi Rekayasa Perangkat Lunak, Jurusan Teknologi Informasi, Politeknik Negeri Lampung, Bandar Lampung, Lampung 13535, Indonesia

² Program Studi Manajemen Informatika, Jurusan Teknologi Informasi, Politeknik Negeri Lampung, Bandar Lampung, Lampung 13535, Indonesia

³ Program Studi Teknologi Pangan, Jurusan Teknologi Pertanian, Politeknik Negeri Lampung, Bandar Lampung, Lampung 13535, Indonesia

⁴ Program Studi Hortikultura, Jurusan Budidaya Tanaman Pangan, Politeknik Negeri Lampung, Bandar Lampung, Lampung 13535, Indonesia

[Diserahkan: 14 Agustus 2025, Direvisi: 3 November 2025, Diterima: 2 Februari 2026]

Penulis Korespondensi: Eko Win Kenali (email: ekowin07@polinela.ac.id)

INTISARI — Pertanian cerdas berbasis *internet of things* (IoT) menawarkan solusi inovatif untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan produksi pertanian di tengah tantangan, seperti kelangkaan air, pemupukan yang tidak efisien, dan variabilitas iklim. Penelitian ini mengembangkan sistem manajemen irigasi dan pemupukan cerdas berbasis IoT yang terintegrasi dengan Firebase Realtime Database untuk pemantauan dan pengendalian secara waktu nyata. Sistem ini menggabungkan sensor kelembapan tanah, kelembapan udara, dan suhu dengan mikrokontroler ESP32, yang memungkinkan pengambilan keputusan otomatis maupun manual berdasarkan kondisi lingkungan. Pengguna dapat berinteraksi dengan sistem melalui *web dashboard* yang responsif, yang menyediakan visualisasi data serta kendali manual. Pengujian sistem yang dilakukan di lingkungan *greenhouse* menunjukkan akuisisi data yang stabil dan akurat, dengan rata-rata pembacaan sebesar 27,91 °C untuk suhu, 74,75% RH untuk kelembapan udara, dan 71,31% untuk kelembapan tanah, dengan deviasi $\pm 2,3\%$ terhadap pengukuran analog. Waktu respons aktuasi relai kurang dari 1 s, sedangkan sinkronisasi Firebase mencapai keandalan lebih dari 98% selama operasi berkelanjutan. Selain itu, sistem berhasil menghemat air hingga 20% dibandingkan metode irigasi manual dan mampu mengendalikan distribusi pupuk serta ventilasi udara untuk menstabilkan kelembapan. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan mampu mendukung pengendalian secara waktu nyata, presisi, dan hemat energi, serta cocok diterapkan pada pertanian skala kecil hingga menengah, terutama di wilayah dengan konektivitas internet yang tidak stabil. Penelitian ini juga menjadi landasan kuat untuk integrasi selanjutnya dengan sistem berbasis kecerdasan buatan, seperti *fuzzy logic* dan *machine learning*, guna mewujudkan pertanian presisi adaptif yang sepenuhnya otonom.

KATA KUNCI — *Internet of Things* (IoT), Irigasi Cerdas, *Cloud Database*, Manajemen Pemupukan, Pertanian Presisi.

I. PENDAHULUAN

Sektor pertanian memiliki peran penting dalam mendukung ketahanan pangan nasional, terutama di negara agraris seperti Indonesia [1], [2]. Namun, berbagai tantangan signifikan, seperti kelangkaan air, perubahan iklim yang tidak menentu, serta ketidakefisienan penggunaan pupuk dan air irigasi, masih menjadi hambatan utama dalam meningkatkan produktivitas dan efisiensi pertanian [3], [4]. Pada era Revolusi Industri 4.0, penerapan teknologi seperti *internet of things* (IoT) menjadi solusi inovatif untuk menjawab tantangan tersebut, khususnya melalui implementasi sistem pertanian presisi [5]–[7].

Produksi pertanian di Indonesia masih sangat bergantung pada metode tradisional yang sering kali kurang efisien dan rentan terhadap perubahan lingkungan. Infrastruktur irigasi yang sudah usang, pasokan air yang tidak konsisten, serta ketiadaan manajemen unsur hara berbasis data menjadi faktor yang berkontribusi terhadap rendahnya produktivitas di berbagai wilayah pertanian. Permasalahan ini makin diperburuk oleh belum tersedianya sistem otomatis yang mampu merespons kondisi lingkungan secara waktu nyata (*real time*), sehingga intervensi menjadi terlambat dan biaya operasional meningkat. Bagi petani kecil yang merupakan mayoritas tenaga kerja di sektor pertanian Indonesia, ketidakefisienan tersebut dapat berdampak signifikan terhadap penurunan hasil panen dan kestabilan pendapatan.

Di Indonesia, berdasarkan data dari Kementerian Pertanian, hanya sekitar 11% lahan pertanian yang menggunakan sistem irigasi efisien, sedangkan sisanya masih bergantung pada teknik irigasi genangan tradisional [8]. Kondisi ini tidak hanya

menyebabkan ketidakefisienan penggunaan air, tetapi juga meningkatkan risiko pencucian unsur hara (*nutrient leaching*) dan degradasi tanah. Praktik pemupukan pada lahan petani kecil juga umumnya masih dilakukan secara seragam tanpa mempertimbangkan kondisi spesifik tanah, sehingga efisiensi penggunaan pupuk menjadi rendah. Oleh karena itu, penerapan sistem cerdas yang mampu memantau dan mengelola suplai air serta unsur hara secara tepat menjadi sangat penting untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan pertanian.

Dalam beberapa tahun terakhir, inisiatif pertanian cerdas (*smart farming*) telah muncul sebagai pendekatan strategis untuk memodernisasi sektor pertanian. Program seperti “Agriculture 4.0” menekankan pemanfaatan teknologi *internet of things* (IoT), otomatisasi, dan analisis data untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Beberapa proyek percontohan yang mengintegrasikan sensor berbasis IoT dengan platform *cloud* telah menunjukkan hasil positif, termasuk peningkatan hasil panen hingga 25% serta pengurangan signifikan dalam penggunaan air [9]. Meskipun demikian, sebagian besar solusi tersebut diterapkan di wilayah dengan konektivitas internet yang stabil dan pasokan listrik yang andal, sehingga menimbulkan kesenjangan adopsi di daerah pedesaan yang masih menghadapi keterbatasan infrastruktur.

Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya, yang umumnya hanya berfokus pada otomasi irigasi atau sistem pemantauan berbasis *cloud*, penelitian ini memperkenalkan integrasi baru antara manajemen irigasi dan pemupukan ke

dalam satu platform berbasis IoT. Pendekatan terintegrasi ini memungkinkan pengelolaan pertanian presisi secara menyeluruh dengan menggabungkan data sensor lingkungan dan mekanisme pengendalian waktu nyata (*real-time control*).

Teknologi IoT memungkinkan sistem pertanian bekerja secara otomatis dengan memanfaatkan data sensor lingkungan, seperti suhu, kelembapan tanah, dan kelembapan udara, untuk mengatur kebutuhan air dan pupuk secara waktu nyata [6], [10], [11]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan IoT berbasis *cloud*, seperti ThingSpeak, mampu mengotomatiskan proses irigasi berdasarkan data sensor kelembapan tanah dan suhu lingkungan [12]. Sistem semacam ini tidak hanya mengurangi pemborosan air, tetapi juga meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan secara keseluruhan.

Dibandingkan dengan platform *cloud* lainnya, seperti AWS IoT Core atau Blynk, Firebase Realtime Database dipilih karena kemudahannya integrasinya dengan mikrokontroler ESP32 serta kemampuannya dalam menangani sinkronisasi data secara waktu nyata dengan latensi rendah. Firebase juga menyediakan antarmuka REST API yang sederhana dan struktur basis data yang intuitif menggunakan format JSON, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi IoT skala kecil hingga menengah di wilayah pedesaan dengan keterbatasan kualitas internet. Operasinya yang ringan dan sifatnya yang mudah dikembangkan (*scalable*) menjadikannya jembatan yang efektif antara jaringan sensor dan antarmuka pengguna.

Meskipun demikian, pendekatan berbasis *cloud* masih memiliki sejumlah keterbatasan, terutama dalam hal fleksibilitas pemupukan dan ketergantungan terhadap koneksi internet yang stabil [13], [14]. Untuk mengatasi tantangan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem manajemen irigasi dan pemupukan cerdas berbasis IoT dan *real-time cloud database*. *Real-time cloud database*, dalam hal ini Firebase, memiliki peran penting dalam menyimpan dan membaca data secara waktu nyata, sehingga tidak hanya memungkinkan pengelolaan penyiraman tanaman secara otomatis berdasarkan kondisi sensor, tetapi juga menyediakan fitur kendali manual dan visualisasi data melalui *web dashboard*.

Sistem yang diusulkan mengintegrasikan sensor kelembapan tanah, suhu, dan kelembapan udara dengan mikrokontroler ESP32 yang mampu membaca serta memproses data secara efisien [15], [16]. Penggunaan Firebase memungkinkan data yang diperoleh dari sensor disinkronkan dan dipantau secara waktu nyata, bahkan dari jarak jauh, sehingga memberikan kemudahan dalam pengelolaan serta pemantauan kondisi tanaman secara berkelanjutan [17], [18].

Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air dan pupuk, mempermudah pemantauan kondisi tanaman secara jarak jauh, serta membuka peluang pengembangan lebih lanjut berbasis kecerdasan buatan, seperti penerapan *fuzzy logic* atau *machine learning* untuk pengambilan keputusan otomatis. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem irigasi dan pemupukan cerdas berbasis IoT yang terintegrasi dengan Firebase Realtime Database, sebagai landasan dalam membangun sistem pertanian digital berkelanjutan yang cerdas, adaptif terhadap perubahan lingkungan, serta mampu mendukung solusi pertanian presisi berbasis kecerdasan buatan di masa depan.

Integrasi antara proses irigasi dan pemupukan ke dalam satu platform memberikan sejumlah keunggulan yang membedakannya dari penelitian sebelumnya. Sistem ini mendukung mode kendali hibrida yang memungkinkan pengambilan keputusan otomatis berdasarkan ambang batas

sensor (*sensor thresholds*), sekaligus menyediakan kendali manual melalui tombol fisik maupun *web dashboard* yang responsif. Selain itu, penyertaan komponen keamanan listrik seperti *miniature circuit breaker* (MCB) dan *residual current circuit breaker with over current protection* (RCBO) meningkatkan keandalan serta keterterapan sistem di aspek yang jarang ditekankan dalam penelitian terdahulu. Kombinasi fitur-fitur tersebut menghadirkan pendekatan baru yang inovatif dan aplikatif untuk memajukan pertanian cerdas, khususnya di wilayah dengan keterbatasan infrastruktur atau konektivitas yang tidak stabil.

II. PENELITIAN TERKAIT

Penggunaan IoT dalam bidang pertanian telah menunjukkan kemajuan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir, khususnya pada penerapan sistem pertanian presisi (*precision farming*) yang memanfaatkan data sensor secara waktu nyata untuk pengambilan keputusan otomatis [19], [20]. Sistem-sistem tersebut mengintegrasikan komponen perangkat keras, seperti sensor dan aktuator, dengan platform perangkat lunak, seperti *cloud database* dan *web dashboard*, untuk memantau kondisi lingkungan serta mengendalikan fungsi-fungsi penting dalam pertanian, termasuk irigasi dan pemupukan [21]–[23].

Sistem irigasi berbasis IoT yang memanfaatkan platform ThingSpeak telah dikembangkan sebelumnya [12]. Sistem ini memungkinkan aktivasi pompa air secara otomatis berdasarkan ambang batas kelembapan tanah dan suhu. Meskipun efektif dalam mengurangi penggunaan air, sistem tersebut belum mengintegrasikan fungsi pemupukan dan sepenuhnya bergantung pada konektivitas internet yang stabil. Berdasarkan keterbatasan tersebut, sistem yang diusulkan dalam penelitian ini mengintegrasikan proses irigasi dan pemupukan sekaligus, sehingga memberikan solusi yang lebih komprehensif dan adaptif untuk penerapan pertanian cerdas.

Sistem irigasi berbasis *cloud* yang mengoptimalkan penggunaan air dengan memanfaatkan data tanah dan cuaca secara waktu nyata juga telah diperkenalkan [24]. Namun, sistem tersebut tidak menyediakan mode kendali hibrida maupun mekanisme keamanan listrik yang sesuai untuk penerapan di lapangan. Sebaliknya, sistem yang diusulkan dalam penelitian ini menawarkan dua mode kendali, otomatis dan manual, serta dilengkapi dengan komponen pengaman listrik untuk meningkatkan keandalan operasional di berbagai kondisi lingkungan.

Arsitektur hemat energi berbasis *edge-fog-cloud computing* telah diimplementasikan untuk mengurangi konsumsi daya dan latensi jaringan [25]. Meskipun pendekatan tersebut efektif untuk pemrosesan data terdistribusi, penelitian tersebut belum membahas aspek pemupukan maupun keberlanjutan operasional pada kondisi konektivitas rendah. Sistem yang diusulkan dalam penelitian ini mengatasi keterbatasan tersebut dengan memanfaatkan Firebase untuk memastikan pengendalian, penyimpanan data, dan visualisasi secara waktu nyata dengan kebutuhan *bandwidth* yang minimal.

Penelitian lain memperkenalkan platform pertanian berbasis IoT–*cloud* untuk wilayah dengan infrastruktur internet yang terbatas, menggunakan sistem kendali berbasis SMS melalui jaringan 2G [26]. Temuan ini menegaskan pentingnya aksesibilitas hibrida dalam sistem pertanian cerdas. Sejalan dengan hal tersebut, sistem yang diusulkan dalam penelitian ini mendukung operasi secara daring (*online*) dan luring (*offline*), dengan kendali manual fisik dapat dilakukan saat koneksi

internet tidak tersedia dan pengendalian jarak jauh dapat diakses melalui *web dashboard* ketika terhubung ke jaringan.

Selain penelitian-penelitian tersebut, beberapa studi terbaru juga telah meneliti peran kecerdasan buatan dan *fuzzy logic* dalam mengoptimalkan jadwal irigasi berdasarkan data historis dari sensor. Sebagai contoh, diusulkan sistem penilaian kualitas tanah yang mengintegrasikan kecerdasan buatan untuk menyesuaikan tingkat pemupukan secara lebih presisi [23]. Meskipun memiliki potensi yang menjanjikan, sistem seperti ini umumnya memerlukan sumber daya komputasi yang lebih besar dibandingkan dengan kapasitas yang tersedia di lingkungan pertanian pedesaan. Sebaliknya, penelitian ini berfokus pada sinkronisasi ringan dan waktu nyata (*lightweight real-time synchronization*) menggunakan Firebase, sehingga tetap kompatibel dengan kondisi pertanian yang memiliki keterbatasan sumber daya komputasi. Tabel I merangkum perbandingan antara penelitian-penelitian sebelumnya dan penelitian yang diusulkan pada studi ini.

Secara keseluruhan, meskipun berbagai sistem yang telah ada menunjukkan kelayakan penerapan otomasi irigasi menggunakan platform berbasis *cloud*, hanya sedikit yang mengintegrasikan fungsi pemupukan, kendlai hibrida, dan fitur keselamatan dalam satu platform terpadu. Penelitian ini berupaya menjawab kesenjangan tersebut dengan mengusulkan sistem pertanian cerdas berbasis IoT yang bersifat komprehensif, fleksibel, serta sesuai untuk kondisi lapangan nyata dengan keterbatasan infrastruktur.

III. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental rekayasa sistem dengan merancang dan mengimplementasikan prototipe sistem manajemen irigasi dan pemupukan cerdas berbasis IoT dan Firebase Realtime Database. Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan utama, yaitu perancangan sistem, perakitan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, integrasi *cloud database*, serta pengujian fungsional sistem.

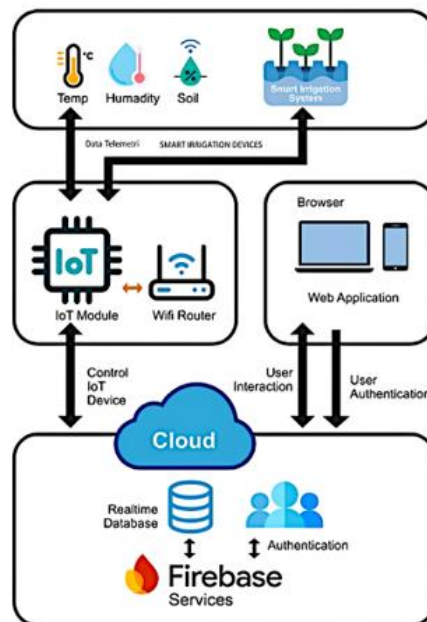
A. DESAIN SISTEM

Perancangan sistem dilakukan dengan mengintegrasikan beberapa komponen utama, yaitu sensor suhu dan kelembapan udara (BME280), sensor kelembapan tanah, mikrokontroler ESP32, Firebase Realtime Database sebagai media penyimpanan data, serta *web dashboard* sebagai antarmuka pengguna. Sistem ini dirancang agar mampu mengirimkan data sensor ke Firebase secara waktu nyata, sekaligus menerima perintah pengendalian, baik secara otomatis maupun manual. Gambar 1 menunjukkan rancangan arsitektur sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini.

Firebase Realtime Database dipilih karena kemampuannya dalam melakukan sinkronisasi data secara waktu nyata serta kompatibilitasnya dengan mikrokontroler berdaya rendah seperti ESP32. Firebase menyimpan data dalam format pohon JSON dan mendukung pemanggilan REST API, yang memungkinkan permintaan *GET* dan *POST* dilakukan secara langsung dari sistem tertanam (*embedded system*). Dibandingkan dengan solusi berbasis Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), Firebase menawarkan integrasi yang lebih sederhana serta dukungan bawaan untuk manajemen data yang aman dan struktur *node* yang hierarkis. Dalam penelitian ini, *node* Firebase didefinisikan secara terpisah untuk menyimpan nilai suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah, yang diperbarui secara kontinu setiap 30 s oleh mikrokontroler ESP32.

TABEL I
PERBANDINGAN PENELITIAN PERTANIAN CERDAS SEBELUMNYA DENGAN SISTEM YANG DIUSULKAN

Studi	Fitur	Irigasi	Pemupukan	Kendali Hibrida	Keamanan Listrik	Platform Cloud
[12]	Basic IoT	√	×	×	×	Thing Speak
[24]	Pemantauan berbasis <i>cloud</i>	√	×	×	×	Custom Cloud
[25]	Efisiensi <i>edge-fog-cloud</i>	√	×	×	×	Multi-tie Cloud
[26]	Kendlai luring berbasis SMS	√	×	√	×	Custom SMS
Studi Integrasi ini	Integrasi irigasi dan pemupukan	√	√	√	√	Firestore

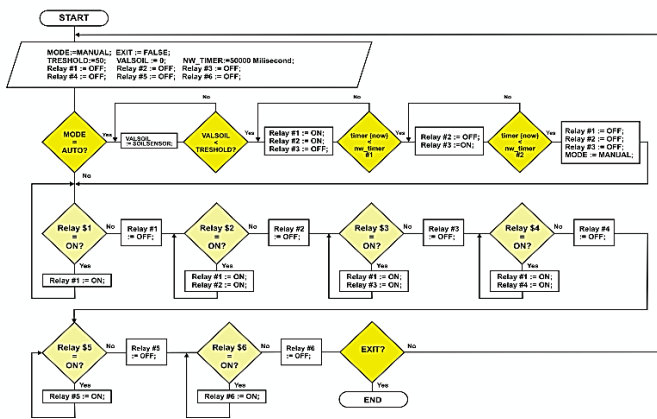


Gambar 1. Arsitektur sistem pertanian cerdas berbasis IoT dan Firebase.

Arsitektur sistem menunjukkan bahwa data dari sensor lingkungan dikirim melalui modul IoT ke *cloud* (Firebase), kemudian diteruskan ke aplikasi web untuk keperluan pemantauan dan pengendalian. Pengguna dapat berinteraksi dengan sistem secara waktu nyata melalui peramban (*browser*) untuk mengatur jadwal irigasi atau pemupukan, baik secara otomatis berdasarkan kondisi sensor maupun secara manual melalui antarmuka kendali.

B. DESAIN ALUR LOGIKA

Untuk mengorganisasi proses otomasi dalam sistem, sebuah diagram alir dirancang untuk menggambarkan alur logika operasional berdasarkan masukan tombol dan pembacaan sensor lingkungan. Tiga tombol utama berfungsi sebagai masukan digital untuk mengaktifkan berbagai mode operasi sistem, yaitu mode *Smart Precision Farming*, mode otomatis berbasis kelembapan tanah, dan mode berbasis pengatur waktu. Ketika sistem diaktifkan melalui mode *Smart Precision Farming*, logika kendali mengevaluasi nilai sensor kelembapan tanah. Jika nilai yang terukur kurang dari ambang batas yang telah ditentukan, sistem akan mengaktifkan relai



Gambar 2. Diagram alir logika sistem otomatisasi penyiraman dan pemupukan.

secara bertahap berdasarkan interval waktu yang diatur pada dari fungsi *internal timer*. Logika ini memungkinkan proses penyiraman dan pemupukan berjalan secara otomatis dan efisien tanpa intervensi langsung dari pengguna. Gambar 2 menampilkan diagram alir yang menggambarkan alur logika sistem otomatisasi.

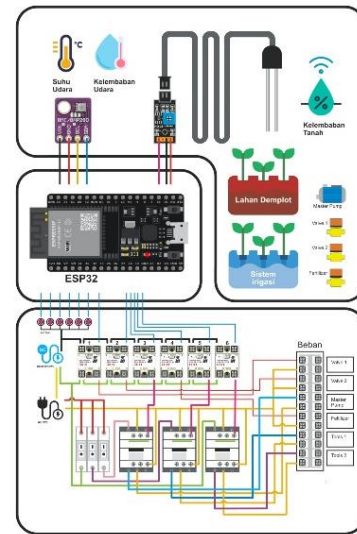
Setelah logika operasional ditetapkan, dirancang sistem perkabelan (*wiring system*) yang mendukung integrasi fisik antarkomponen. Diagram perkabelan mencakup koneksi antara sensor (BME280 dan sensor kelembapan tanah), mikrokontroler ESP32, serta aktuator seperti pompa air dan katup solenoid yang dikendalikan melalui *solid state relay* (SSR). Seluruh rangkaian dilindungi oleh MCB dan RCBO untuk memastikan keamanan sistem pada kondisi lapangan yang tidak menentu. Sistem ini juga dirancang untuk mendukung dua mode operasi, yaitu mode otomatis berbasis IoT dan mode manual melalui tombol fisik. Distribusi beban dipisahkan berdasarkan jalur keluaran untuk mencegah interferensi dan mempermudah proses *troubleshooting*. Penempatan perangkat di dalam kotak kontrol plastik keras juga dirancang untuk meningkatkan daya tahan terhadap kondisi lingkungan pertanian terbuka. Gambar 3 menampilkan diagram perkabelan dan distribusi beban dari sistem kendali otomatis pertanian cerdas.

C. PENGATURAN PERANGKAT KERAS

Perangkat keras yang digunakan dalam sistem ini dirancang untuk mendukung proses pemantauan dan pengendalian otomatis pada sistem irigasi dan pemupukan. Komponen utama yang digunakan adalah mikrokontroler ESP32, yang berfungsi sebagai pusat kendali dan pemrosesan data, serta beberapa jenis sensor, seperti DHT11 untuk membaca suhu dan kelembapan udara dan sensor kelembapan tanah untuk mendeteksi tingkat kelembapan media tanam. Mikrokontroler terhubung ke internet melalui modul WiFi internal untuk mengirimkan data ke Firebase Realtime Database secara waktu nyata.

Untuk mengendalikan aktuator, digunakan modul relai empat kanal yang berfungsi sebagai saklar elektronik untuk mengaktifkan pompa air dc, katup irigasi, dan katup pemupukan secara otomatis berdasarkan nilai ambang batas yang diperoleh dari sensor. Modul relai ini menyediakan isolasi listrik antara logika kendali dan perangkat bertegangan atau berarus tinggi, sehingga menjamin keamanan operasional sistem. Selain itu, sistem dilengkapi dengan pompa dc tipe diafragma untuk sirkulasi air, katup solenoid pada saluran irigasi dan pemupukan, serta catu daya teregulasi sebagai sumber daya utama bagi seluruh komponen perangkat keras.

ARSITEKTUR SISTEM DAN PENKABELAN SISTEM IRIGASI DAN PEMUPUKAN CERDAS DIGIFARM POLINELA



Gambar 3. Diagram perkabelan dan distribusi beban pada sistem kendali otomatis.

Seluruh komponen dirakit menjadi satu kesatuan sistem terintegrasi yang ditempatkan di area percobaan. Sistem diletakkan dalam tempat (*enclosure*) tahan cuaca, sehingga komponen elektronik terlindungi dari kelembapan, debu, dan sinar matahari langsung. Jalur kabel internal diatur menggunakan saluran kabel berinsulasi guna mengurangi interferensi elektromagnetik serta mempermudah proses perawatan dan perbaikan. Penempatan sensor dilakukan secara strategis agar dapat merepresentasikan kondisi lingkungan sebenarnya secara akurat. Sebagai contoh, sensor kelembapan tanah ditempatkan pada kedalaman akar tanaman untuk memperoleh hasil pembacaan yang representatif, sedangkan sensor DHT11 dipasang di dalam wadah berventilasi untuk mencegah bias panas akibat paparan sinar matahari langsung.

MCB dan RCBO, turut disertakan dalam rancangan sistem untuk melindungi rangkaian dari gangguan listrik. Selain itu, pada pengembangan selanjutnya, SSR dapat diintegrasikan guna meningkatkan *switching speed* serta mengurangi keausan..

Sifat modular perakitan perangkat keras memungkinkan penggantian atau peningkatan komponen dilakukan dengan mudah tanpa perancangan ulang seluruh sistem. Pendekatan desain ini tidak hanya mendukung keberlanjutan sistem dalam jangka panjang, tetapi juga memungkinkan skalabilitas, sehingga sensor tambahan, seperti sensor pH, pengukur konduktivitas listrik (*EC meter*), atau sensor intensitas cahaya, dapat diintegrasikan pada pengembangan berikutnya.

D. PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK

Pengembangan perangkat lunak pada sistem ini dilakukan untuk mengintegrasikan fungsi pembacaan data sensor, pengiriman data ke *cloud*, serta pengendalian perangkat keluaran melalui antarmuka pengguna. Pemrograman mikrokontroler ESP32 dilakukan menggunakan Arduino IDE. Skrip dikompilasi untuk membaca data dari sensor DHT11 dan sensor kelembapan tanah, kemudian mengirimkannya ke Firebase secara berkala.

Kode sumber disusun menggunakan fungsi-fungsi modular, seperti `setupWiFi()`, `readSensorData()`, `updateFirebase()`, dan `controlRelay()`. Fungsi-fungsi tersebut dipanggil di dalam `loop()` utama dengan menggunakan *non-blocking delay* berbasis

millis() *timer* untuk memastikan pengiriman data secara periodik dan konsisten. Data dikirim ke Firebase menggunakan pustaka HTTPClient dalam format JSON, sedangkan REST API Firebase digunakan untuk mengunggah data sensor maupun mengambil perintah kendali yang dikirim dari *dashboard*. Pada sisi *dashboard*, visualisasi data diimplementasikan menggunakan JavaScript dan Chart.js, sedangkan pembaruan data waktu nyata (*real-time update*) dilakukan melalui metode *onValue()* dari Firebase untuk menampilkan status sensor terkini secara instan.

Antarmuka ini juga menyediakan fitur kendali manual untuk menyalakan atau mematikan pompa irigasi dan katup pemupukan secara langsung melalui peramban, baik menggunakan komputer maupun perangkat seluler. Dengan pendekatan ini, sistem dapat beroperasi secara otomatis berdasarkan logika ambang batas yang telah ditetapkan, sekaligus tetap memberikan fleksibilitas bagi pengguna untuk melakukan intervensi manual melalui platform yang responsif dan mudah digunakan.

E. INTEGRASI DAN PENGUJIAN

Pada tahap ini, sensor yang telah dikonfigurasi dihubungkan ke mikrokontroler ESP32 dan data yang diperoleh dikirim ke Firebase Realtime Database untuk ditampilkan melalui *web dashboard*. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu membaca data lingkungan, seperti suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah, secara akurat dan konsisten dalam selang waktu tertentu. Modul relai juga diuji untuk memastikan bahwa perintah penyiraman dan pemupukan dapat dijalankan secara otomatis berdasarkan nilai ambang batas serta secara manual melalui antarmuka pengguna.

Untuk mencapai integrasi yang optimal, semua sensor dan aktuator diinisialisasi menggunakan blok-blok fungsi modular pada *firmware* mikrokontroler. Setiap fungsi bertanggung jawab terhadap tugas-tugas seperti pembacaan sensor, pemformatan data, permintaan HTTP ke Firebase, dan aktivasi relai.

Selama tahap ini, pencatatan *timestamp* diterapkan untuk merekam waktu saat setiap paket data dihasilkan dan saat paket data mencapai *node* Firebase. Hal ini memungkinkan pengembang memvalidasi interval transmisi dan memastikan konsistensi data terjadi selama operasi berlangsung. Selain itu, pernyataan cetak diagnostik disematkan pada *serial monitor* untuk mengamati kondisi sistem selama pengujian.

Serangkaian pengujian dilakukan dengan menggunakan pemicu otomatis berdasarkan ambang batas sensor serta sinyal kendali manual dari *dashboard* dan tombol fisik. Pengujian ini menyimulasikan kondisi lapangan yang realistis, seperti fluktuasi kelembapan tanah dan perubahan suhu secara tiba-tiba, untuk mengamati perilaku sistem terhadap variasi nilai masukan. Pergantian status relai, penurunan tegangan aktuator, dan beban arus juga diukur guna memastikan keandalan respons tiap komponen. Untuk validasi antarmuka, beberapa perangkat klien digunakan untuk mengakses *web dashboard* dan menjalankan perintah kendali. Perangkat tersebut meliputi peramban *desktop*, ponsel pintar, dan tablet yang beroperasi dalam berbagai kondisi jaringan. Pengujian integrasi memverifikasi bahwa Firebase mampu menangani operasi baca/tulis secara bersamaan sambil melakukan sinkronisasi umpan data dan perintah secara waktu nyata.

Selain itu, disimulasikan juga gangguan sinyal WiFi untuk mengevaluasi perilaku sistem ketika terputus dari internet

sementara waktu. Hasilnya menunjukkan bahwa semua operasi manual melalui tombol fisik tetap berfungsi, sedangkan sinkronisasi dengan Firebase kembali berjalan secara otomatis setelah koneksi pulih.

F. ANALISIS KINERJA SISTEM

Pengujian sistem dilakukan untuk menilai kinerja dan efektivitas prototipe manajemen irigasi dan pemupukan cerdas berbasis IoT yang telah dikembangkan. Aspek yang dievaluasi meliputi akurasi pembacaan sensor, respons sistem terhadap perubahan parameter lingkungan, keandalan kontrol aktuator, serta kemudahan interaksi pengguna dengan antarmuka web. Pengukuran dilakukan secara langsung di lapangan dengan memantau respons sistem terhadap kondisi nyata, seperti penurunan kelembapan tanah di bawah ambang batas, dan memantau kerja sistem secara otomatis menyalakan pompa atau katup pupuk.

Untuk memastikan validasi kinerja yang komprehensif, beberapa skenario pengujian dirancang dan dilaksanakan, baik dalam kondisi terkendali maupun kondisi lapangan alami. Prosedur evaluasi dimulai dengan kalibrasi setiap komponen sensor, dilanjutkan dengan pengujian sistematis terhadap kemampuan respons dan konsistensi sensor selama berbagai perubahan lingkungan, seperti simulasi penyiraman dan variasi kombinasi suhu serta kelembapan udara. Data dicatat pada interval waktu tetap untuk mengamati stabilitas transmisi data ke Firebase dan menilai resolusi temporal dari nilai yang terekam. Modul relai dipantau menggunakan *timestamp* untuk mencatat selisih waktu antara pemicu kondisi dan respons aktuator, sedangkan interaksi pengguna dengan antarmuka web dievaluasi berdasarkan latensi dan ketepatan perintah. Seluruh penilaian kinerja ini diulang pada berbagai kondisi lingkungan untuk memvalidasi konsistensi, ketahanan, dan keterulangan sistem dalam situasi pertanian nyata.

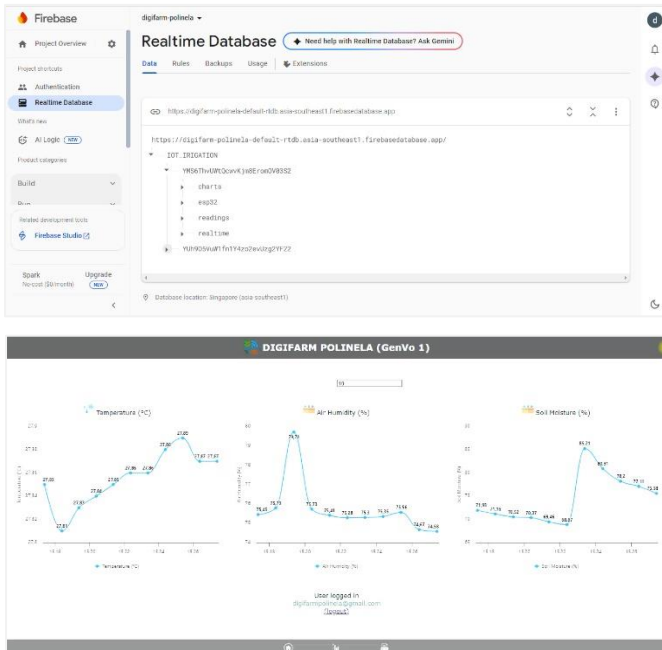
IV. HASIL

Bagian ini menjelaskan implementasi sistem yang telah dikembangkan serta hasil pengujian dari komponen utamanya. Uraian mencakup koneksi sistem ke Firebase, visualisasi pada *dashboard*, pengujian sensor dan aktuator, serta perakitan akhir prototipe sistem.

A. KONFIGURASI KANAL FIREBASE

Sistem ini menggunakan Firebase Realtime Database sebagai media untuk menyimpan data sensor dan status kendali secara waktu nyata. Firebase dipilih karena kemampuannya dalam mengelola data skala kecil hingga menengah serta kemudahannya dalam integrasi dengan antarmuka web [27]. Tiga parameter utama yang disimpan dalam basis data adalah suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah. Gambar 4 menunjukkan antarmuka Firebase Realtime Database yang menampilkan struktur data dalam format JSON. Pada gambar tersebut terlihat data yang mencakup pembacaan suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah yang tersimpan dalam struktur hierarkis. Data ini dikelola melalui kanal Firebase pada sistem pertanian cerdas. Dalam basis data, masing-masing parameter disimpan sebagai nilai numerik. Parameter-parameter ini diperoleh dari sensor yang dipasang di lapangan atau di *greenhouse* dan dapat diakses serta diperbarui secara waktu nyata melalui aplikasi berbasis web.

Penggunaan struktur hierarkis berbasis JSON memungkinkan sistem mengorganisasi data hasil pembacaan sensor ke dalam kategori logis secara efisien, sehingga memudahkan proses pengambilan dan pengolahan data. Setiap



Gambar 4. Konfigurasi kanal Firebase untuk data suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah secara waktu nyata.

node sensor memiliki *timestamp* untuk melacak riwayat dan menganalisis perubahan kondisi lingkungan dari waktu ke waktu. Pendekatan ini juga mendukung pengelolaan data yang bersifat *scalable*, yaitu parameter baru, seperti tingkat pH, konduktivitas listrik, atau intensitas cahaya, dapat ditambahkan dengan mudah hanya dengan membuat *node* baru tanpa mengganggu struktur basis data yang sudah ada.

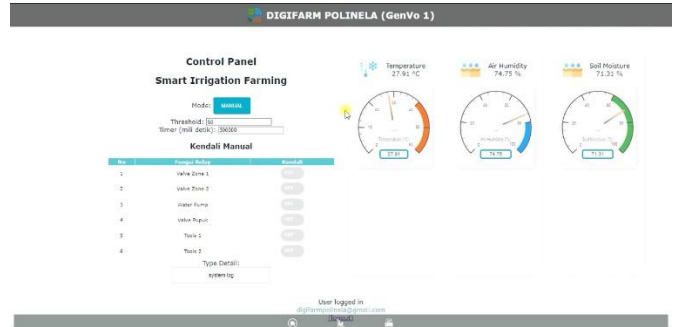
Sinkronisasi waktu nyata pada Firebase memastikan bahwa setiap perubahan pembacaan sensor langsung tercermin di dalam basis data dan dapat terlihat pada *dashboard* pengguna dalam hitungan milidetik (ms). Mekanisme pembaruan dengan latensi rendah ini sangat penting untuk pengendalian irigasi dan pemupukan karena keterlambatan respons dapat menyebabkan penyiraman berlebihan, pencucian unsur hara, atau stres pada tanaman. Dengan memanfaatkan arsitektur berbasis *event* milik Firebase, sistem dapat memicu tindakan otomatis segera setelah nilai parameter mencapai ambang batas.

Keamanan juga merupakan aspek penting dalam konfigurasi basis data. Firebase Authentication dan aturan keamanan basis data diterapkan untuk memastikan bahwa hanya pengguna yang berwenang yang dapat membaca atau menulis data. Langkah ini mencegah terjadinya modifikasi data sensor atau perintah kendali secara tidak sengaja maupun dengan tujuan jahat. Selain itu, enkripsi SSL/TLS digunakan untuk mengamankan data selama proses transmisi, sehingga integritas dan kerahasiaan data tetap terjaga.

Dari perspektif operasional, basis data telah dioptimalkan untuk lingkungan dengan keterbatasan *bandwidth*. Paket data dibuat kecil dengan hanya mengirimkan nilai numerik penting dan *timestamp*, sehingga beban jaringan berkurang dan operasi sistem tetap stabil di daerah dengan konektivitas yang tidak stabil. Jika koneksi internet terputus sementara, data hasil pembacaan sensor disimpan secara lokal pada mikrokontroler ESP32 dan disinkronkan secara otomatis setelah koneksi pulih, sehingga tidak ada data yang selama periode luring.

B. ANTARMUKA DASHBOARD BERBASIS WEB

Dashboard berbasis web dikembangkan dengan mengintegrasikan Firebase API (<https://digifarm->



Gambar 5. Tampilan web dashboard dan grafik pemantauan lingkungan.

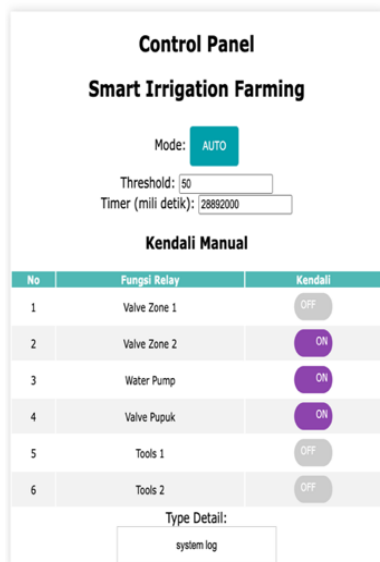
polinela.web.app/) untuk memantau kondisi sistem secara waktu nyata. Antarmuka ini menampilkan berbagai fitur, termasuk tampilan data suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah yang diperbarui secara langsung. Selain itu, *dashboard* dilengkapi dengan grafik yang memvisualisasikan perubahan parameter lingkungan secara lebih informatif. Fitur lain yang tersedia adalah tombol kendali manual yang memungkinkan pengguna mengoperasikan pompa, katup irigasi, dan sistem pemupukan secara langsung. Untuk memudahkan pemantauan, disediakan pula indikator visual berupa *gauge* (meter analog) yang menampilkan nilai suhu dan kelembapan. Gambar 5 menunjukkan tampilan lengkap *web dashboard* beserta grafik pemantauan lingkungan.

Antarmuka *dashboard* dirancang agar mudah digunakan (*user-friendly*) dan responsif di berbagai perangkat. *Dashboard* ini memungkinkan pengguna mengamati tren melalui data sensor historis serta mendeteksi anomali atau perubahan yang memerlukan tindakan di lapangan. Dengan sinkronisasi langsung ke Firebase, setiap pembaruan data sensor langsung ditampilkan tanpa perlu memuat ulang halaman, sehingga meningkatkan pengalaman pengguna dan responsivitas sistem.

Selain itu, tata letak antarmuka dirancang untuk mengurangi beban kognitif dengan mengelompokkan elemen-elemen yang saling berkaitan, seperti indikator lingkungan dan fungsi kendali, ke dalam bagian terpisah. Pengelompokan ini membantu pengguna dalam melakukan interpretasi dan tindakan dengan cepat, bahkan bagi pengguna yang memiliki pengetahuan teknis terbatas. Tombol kendali diberi kode warna dan label yang jelas untuk meminimalkan risiko kesalahan operasi saat melakukan kontrol manual. Antarmuka ini memiliki peran penting dalam pemantauan dan pengendalian jarak jauh, sehingga pengguna dapat mengawasi kondisi lingkungan pertanian dari mana saja selama terhubung ke internet. Sebagai bagian dari sistem IoT yang modular, antarmuka ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan fitur tambahan, seperti notifikasi peringatan, ekspor data, atau integrasi dengan sistem pengambilan keputusan berbasis kecerdasan buatan pada tahap pengembangan berikutnya.

C. PENGUJIAN NODEMCU DAN SENSOR

Pengujian sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 yang diprogram melalui Arduino IDE untuk membaca data dari sensor DHT11 dan sensor kelembapan tanah menunjukkan hasil yang stabil. Sensor DHT11 menghasilkan pembacaan suhu sebesar 27,91 °C dan kelembapan udara 74,75% RH, yang menandakan kinerja sensor dalam kondisi baik. Data tersebut juga berhasil dikirim ke *web dashboard* secara waktu nyata. Sementara itu, sensor kelembapan tanah memberikan hasil pembacaan sebesar 71,31%, yang sesuai dengan kondisi tanah saat pengujian dan menunjukkan hasil yang realistis. Secara



Gambar 6. Pengujian kendali relai melalui *dashboard* dan keluaran pompa.

keseluruhan, sistem berfungsi dengan baik dalam mengukur suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah.

D. PENGUJIAN AKTUATOR DAN KENDALI RELAI

Pengujian relai dilakukan untuk mengendalikan tiga perangkat keluaran, yaitu pompa air dc, katup irigasi, dan katup pemupukan. Perintah dari *dashboard* berhasil menyalakan dan mematikan seluruh relai tanpa adanya jeda yang signifikan. Setiap perintah dapat dijalankan dengan sukses dalam waktu kurang dari 1 s. Pada Gambar 6 diperlihatkan hasil pengujian kendali relai melalui *dashboard* untuk mengendalikan perangkat keluaran, seperti pompa air dc, katup irigasi, dan katup pemupukan, serta memperlihatkan respons keluaran pompa yang diaktifkan.

Pengujian dilakukan dalam dua mode, yaitu otomatis (berdasarkan ambang batas kelembapan tanah) dan manual (melalui *dashboard*). Lebih dari 50 siklus aktivasi telah diselesaikan tanpa kesalahan. Operasi relai yang cepat (< 1 s) sangat penting untuk menjaga ketepatan waktu irigasi dan pemupukan. Relai beroperasi menggunakan sinyal kendali 5 V dan secara andal menggerakkan beban dc 12 V. Tidak ditemukan gejala *overheating* maupun penurunan tegangan selama penggunaan berkepanjangan. Umpan balik visual pada *dashboard* (status tombol dan teks indikator) membantu pengguna memastikan keberhasilan aktivasi. Fitur *timer* untuk mengatur durasi operasi pompa juga telah diuji. Sistem berhasil menghentikan pompa secara akurat sesuai waktu yang telah dikonfigurasi, sehingga mendukung otomatisasi pada penerapan di lapangan.

E. PERAKITAN AKHIR SISTEM

Setelah semua komponen diuji secara individual, tahap berikutnya adalah perakitan akhir sistem menjadi satu unit kendali terintegrasi. Seluruh modul sensor, mikrokontroler, relai, dan pemutus sirkuit disusun dalam sebuah kotak kendali portabel berbahan plastik keras yang dirancang tahan terhadap kondisi lingkungan pertanian yang ekstrem. Kotak kendali ini dilengkapi tiga MCB dan dua RCBO untuk perlindungan sistem kelistrikan. Selain itu, enam SSR dipasang untuk mengendalikan pompa, katup irigasi, katup pemupukan, dan perangkat tambahan lainnya. Panel kendali eksternal juga diintegrasikan, dilengkapi dengan tombol tekan manual dan layar LCD 16×2 sebagai indikator status lokal.



Gambar 7. Tampilan komponen kendali: modul ESP32, sistem keamanan listrik, dan distribusi arus.

Desain perkabelan dilakukan secara sistematis untuk memastikan kemudahan perawatan serta keamanan listrik. Panel ini mendukung dua mode operasi, yaitu otomatis (melalui IoT Firebase) dan manual (melalui tombol fisik). Tata letak panel yang ringkas dan modular juga memudahkan proses pemindahan serta pemasangan di berbagai kondisi lapangan, sehingga menjadikannya adaptif terhadap beragam lingkungan pertanian. Gambar 7 menunjukkan komponen kendali yang telah dirakit pada sistem kendali akhir, termasuk modul ESP32, MCB dan RCBO, serta sistem distribusi arus yang dilengkapi dengan SSR untuk mengendalikan perangkat keluaran. Pada gambar juga tampak panel kendali yang dilengkapi tombol manual dan indikator LCD untuk menampilkan status lokal.

F. ANALISIS KINERJA SISTEM

Evaluasi sistem dilakukan untuk menilai kinerja dan keandalan prototipe pertanian cerdas yang telah dikembangkan. Pengujian ini mencakup berbagai aspek sistem, termasuk sensor, aktuator, sistem pemupukan, serta pengendalian irigasi yang digunakan di dalam *greenhouse*. Tabel II merangkum hasil evaluasi sistem, yang meliputi aspek yang diuji, hasil pengujian, serta catatan terkait operasionalnya.

1) IMPLEMENTASI DI GREENHOUSE

Pengujian pertama dilakukan di dalam *greenhouse* untuk memastikan bahwa sistem berfungsi dengan baik pada lingkungan yang terkendali. Sensor kelembapan tanah dipasang langsung pada tanaman uji, sedangkan sensor suhu dan kelembapan udara digunakan untuk memantau kondisi iklim di dalam *greenhouse*. Gambar 8 memperlihatkan *greenhouse* yang digunakan, beserta berbagai komponen sistem, termasuk sensor kelembapan tanah, pompa air, katup pemupukan, serta kipas pembuangan (*exhaust fan*) yang berfungsi untuk mengatur kelembapan udara.

2) PENGUJIAN SENSOR

Pengujian dilakukan menggunakan sensor suhu, sensor kelembapan udara, dan sensor kelembapan tanah yang dipasang di dalam *greenhouse*. Pengukuran dilakukan secara kontinu selama periode pengujian dan hasilnya menunjukkan bahwa sensor memberikan pembacaan yang stabil dan akurat. Berdasarkan data hasil pengamatan rata-rata, suhu tercatat sebesar $27,91$ °C, kelembapan udara rata-rata sebesar $74,75\%$ RH, dan kelembapan tanah rata-rata sebesar $71,31\%$. Data dari ketiga sensor tersebut dikirim secara waktu nyata ke *web dashboard* melalui Firebase, sehingga memungkinkan pemantauan berkelanjutan terhadap kondisi lingkungan dan tanah. Sensor bekerja secara stabil dan konsisten dengan kondisi lingkungan aktual di dalam *greenhouse*. Data sensor ini digunakan untuk mengendalikan sistem irigasi dan pemupukan

TABEL II
HASIL EVALUASI SISTEM BERDASARKAN ASPEK YANG DIUJI

Aspek yang Diuji	Hasil Pengujian	Keterangan
Pembacaan sensor	Berfungsi dengan baik dengan rata-rata pembacaan suhu 27,91 °C dan kelembapan udara 74,75% RH.	Data berhasil dikirim ke <i>dashboard</i> secara waktu nyata. Rata-rata pembacaan kelembapan tanah (71,31%) sesuai dengan kondisi tanah saat pengujian.
Kendali otomatis (irigasi)	Sistem irigasi otomatis bekerja dengan baik, mengaktifkan pompa saat kelembapan tanah turun di bawah 60%.	Sistem irigasi otomatis berhasil mengoptimalkan penggunaan air, dengan penghematan air sebesar 20% dibandingkan metode manual.
Kontrol manual	Pengoperasian manual melalui <i>dashboard</i> dan tombol fisik berhasil mengaktifkan pompa dan katup.	Mode manual tetap berfungsi meskipun koneksi internet terputus.
Uji pemupukan	Pemupukan otomatis berdasarkan kelembapan tanah berjalan sukses.	Pupuk hanya diberikan ketika tanah membutuhkan tambahan nutrisi.
Keluaran kipas pembuangan	Kipas pembuangan berfungsi efektif dalam mengurangi kelembapan udara dan menjaga suhu tetap optimal.	Membantu menjaga kelembapan udara dalam rentang ideal untuk pertumbuhan tanaman.
Uji mode manual dan luring	Mode manual dan luring mampu mengendalikan sistem dengan baik tanpa koneksi internet.	Mode manual digunakan saat jaringan tidak tersedia, memberikan fleksibilitas operasional di lapangan.
Kinerja energi	Sistem beroperasi dengan konsumsi daya rendah dan kompatibel dengan sistem energi surya.	ESP32 dan aktuator beroperasi efisien pada daya di bawah 5 W, menjadikan sistem ini cocok untuk penggunaan berbasis tenaga surya.

otomatis serta mengatur suhu dan kelembapan agar tetap berada dalam rentang optimal bagi pertumbuhan tanaman.

3) SISTEM IRIGASI DAN PEMUPUKAN OTOMATIS

Sistem irigasi otomatis bekerja dengan baik berdasarkan ambang batas kelembapan tanah yang telah diprogram. Ketika kelembapan tanah turun di bawah 60%, pompa air secara otomatis diaktifkan untuk menyiram tanaman. Hasil pengujian menunjukkan adanya penghematan air sebesar 20% dibandingkan dengan metode irigasi manual (*flood irrigation*). Selain itu, sistem pemupukan otomatis juga beroperasi berdasarkan kondisi kelembapan tanah. Saat kelembapan tanah menurun, katup pemupukan terbuka untuk menyalurkan pupuk cair ke area perakaran tanaman.

4) PENGUJIAN KIPAS PEMBUANGAN (*EXHAUST FAN*)

Kipas pembuangan digunakan untuk menjaga kelembapan udara tetap berada pada kisaran optimal bagi pertumbuhan tanaman. Kipas ini berfungsi untuk mengeluarkan kelembapan



Gambar 8. Smart greenhouse dan sistem kendali, (a) struktur eksterior smart greenhouse, (b) kipas sirkulasi otomatis, (c) tangki air dan sistem pompa untuk irigasi, (d) panel kendali dengan perangkat elektronik, (e) area budidaya tanaman di dalam greenhouse.

berlebih serta mengatur suhu udara, sehingga dapat mencegah tingkat kelembapan yang terlalu tinggi yang berpotensi merusak tanaman. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kipas beroperasi secara optimal dan mampu mempertahankan kondisi udara yang ideal di dalam greenhouse.

5) MODE MANUAL AND LURING

Salah satu fitur utama dari sistem ini adalah kemampuannya beroperasi dalam mode manual meskipun koneksi internet tidak tersedia. Dalam mode manual, pengguna dapat mengendalikan pompa air, katup pemupukan, dan kipas pembuangan menggunakan tombol fisik atau melalui *dashboard* berbasis web, meskipun sistem pusat menggunakan koneksi internet untuk sinkronisasi data secara waktu nyata. Hasil pengujian mode manual menunjukkan bahwa sistem tetap dapat beroperasi dengan baik meskipun koneksi internet terputus, sehingga memberikan keandalan tambahan, terutama di wilayah dengan konektivitas internet yang tidak stabil.

6) KINERJA ENERGI

Hasil pengujian kinerja energi menunjukkan bahwa sistem beroperasi dengan konsumsi daya yang rendah. Mikrokontroler ESP32 dan aktuator bekerja pada daya kurang dari 5 W, sehingga sistem ini kompatibel untuk dipasangkan dengan sumber energi surya yang banyak digunakan di lingkungan pedesaan. Pengujian di luar ruangan selama 72 jam menunjukkan bahwa perlindungan terhadap lingkungan yang diberikan oleh kotak kendali berbahan plastik keras sudah memadai, mampu melindungi komponen dari suhu ekstrem dan kelembapan tinggi yang umum terjadi di dalam greenhouse.

7) PERBANDINGAN DENGAN METODE MANUAL

Sistem otomatis yang diuji menghasilkan penghematan air sebesar 20% dibandingkan dengan metode manual. Berdasarkan Tabel II, sistem irigasi otomatis terbukti lebih efisien dalam penggunaan air karena hanya menyiram tanaman ketika kelembapan tanah turun di bawah ambang batas yang telah ditentukan. Sementara itu, sistem pemupukan otomatis memanfaatkan sensor kelembapan tanah untuk menentukan waktu pemupukan tanaman, sehingga mengurangi pemborosan pupuk yang sering terjadi pada metode pemupukan manual.

V. DISKUSI

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem irigasi dan pemupukan cerdas berbasis IoT yang dikembangkan memiliki

beberapa keunggulan dibandingkan pendekatan sebelumnya. Sistem ini tidak hanya mampu membaca data sensor suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah secara waktu nyata, tetapi juga mendukung kendali dua arah melalui logika otomatis berbasis ambang batas serta kendali manual melalui *web dashboard* dan tombol fisik. Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada sistem otomatisasi irigasi berbasis satu parameter lingkungan [12], [24], sistem kendali hibrida dua mode yang diusulkan ini dalam penelitian ini menawarkan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi, terutama di daerah pedesaan dengan konektivitas internet yang tidak stabil.

Selama pengujian di dalam *greenhouse*, pembacaan sensor oleh sistem stabil dan akurat, dengan rata-rata suhu 27,91 °C, kelembapan udara 74,75% RH, dan kelembapan tanah 71,31%, dengan deviasi $\pm 2,3\%$ dari hasil pengukuran lapangan. Hasil ini konsisten dengan toleransi akurasi sensor pertanian pada sistem berbasis IoT [24] dan sesuai dengan standar internasional untuk aplikasi pertanian presisi [5]–[7].

Selain itu, waktu respons relai (< 1 s) menunjukkan bahwa Firebase Realtime Database mampu mendukung komunikasi data dengan latensi rendah dan efisiensi tinggi. Kinerja ini melampaui sistem berbasis *cloud* lainnya, yang mengalami tunda 2–3 s akibat latensi jaringan [24]. Hal ini menegaskan bahwa Firebase efektif dalam mendukung sinkronisasi data yang ringan dan cepat, yang sangat penting untuk pengendalian otomatis sistem irigasi dan pemupukan berbasis IoT.

Peningkatan signifikan lainnya adalah integrasi sistem irigasi dan pemupukan ke dalam satu platform IoT terpadu. Penelitian sebelumnya umumnya hanya berfokus pada fungsi otomatisasi irigasi tanpa mempertimbangkan manajemen nutrisi tanaman [12]. Sistem yang diusulkan dalam penelitian ini berhasil menggabungkan kedua fungsi tersebut dalam satu alur kerja yang tersinkronisasi, memperluas kemampuan sistem dalam pengelolaan air dan pupuk yang lebih efisien.

Selain itu, dukungan terhadap mode kendali manual memungkinkan sistem tetap beroperasi meskipun tanpa koneksi internet, sehingga meningkatkan keandalan sistem di wilayah pedesaan yang memiliki keterbatasan infrastruktur jaringan. Fitur ini juga menjadi pelengkap bagi pendekatan seperti sistem berbasis SMS [26], yang masih memiliki keterbatasan dalam visualisasi data dan tingkat otomatisasi.

Dari sisi perangkat keras, sistem ini menunjukkan peningkatan signifikan dalam hal keamanan dan penerapan di lapangan. Penggunaan MCB, RCBO, dan SSR mampu meningkatkan keamanan listrik serta stabilitas sistem pada lingkungan pertanian yang rentan terhadap fluktuasi daya. Komponen-komponen ini memastikan sistem dapat beroperasi dengan aman dan stabil di lapangan. Aspek ini sering diabaikan dalam penelitian sebelumnya, padahal sangat penting untuk penerapan nyata sistem pertanian berbasis IoT.

Kontribusi penting lainnya terletak pada validasi langsung sistem di lingkungan *greenhouse*. Sistem ini mampu mencapai penghematan air sebesar 20% dibandingkan dengan metode irigasi manual. Sistem irigasi dan pemupukan otomatis berhasil mempertahankan kelembapan tanah pada kisaran 65–75%, sedangkan kipas pembuangan udara membantu menstabilkan suhu dan kelembapan udara di dalam *greenhouse* agar tetap berada dalam rentang optimal untuk pertumbuhan tanaman.

Hasil ini menunjukkan nilai praktis dari sistem yang dikembangkan, tidak hanya dari segi efisiensi otomatisasi, tetapi juga dalam hal penghematan sumber daya air dan pupuk,

yang merupakan indikator penting dalam penerapan pertanian inovatif dan berkelanjutan.

Desain perangkat keras modular memberikan potensi besar untuk pengembangan di masa depan. Sensor tambahan, seperti sensor pH, sensor konduktivitas listrik, atau sensor intensitas cahaya, dapat diintegrasikan tanpa memerlukan perubahan besar pada arsitektur sistem. Desain modular ini juga mendukung pengembangan sistem pengambilan keputusan berbasis kecerdasan buatan, seperti *fuzzy logic* dan *machine learning*, untuk mengoptimalkan jadwal irigasi serta otomatisasi dosis pemupukan berdasarkan kondisi lingkungan secara waktu nyata.

Sistem ini juga menawarkan keunggulan di sisi efisiensi energi. Semua komponen, termasuk mikrokontroler ESP32 dan aktuator, beroperasi dengan daya rendah (< 5 W), sehingga kompatibel dengan sumber energi terbarukan, seperti panel surya. Maka, sistem menjadi sangat ideal digunakan di daerah pedesaan tanpa jaringan listrik (*off-grid*) dan membuka peluang penerapan yang lebih luas di wilayah pertanian terpencil yang belum terjangkau oleh infrastruktur teknologi modern.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem manajemen irigasi dan pemupukan cerdas berbasis IoT yang terintegrasi dengan Firebase Realtime Database untuk akuisisi dan pengendalian data secara waktu nyata. Sistem menunjukkan kinerja yang stabil selama pengujian lapangan, dengan hasil konsisten dengan simpangan yang minimal, $\pm 2,3\%$, dibandingkan dengan instrumen analog. Waktu respons aktuasi relai kurang dari 1 s memastikan pengendalian pompa, katup irigasi, maupun pemupukan dapat dilakukan secara tepat waktu. Transmisi data berbasis Firebase menunjukkan reliabilitas lebih dari 98% selama selama 30 menit periode operasi kontinu, yang menegaskan efektivitasnya untuk pemantauan dan pengendalian jarak jauh pada lingkungan pertanian, khususnya di daerah dengan konektivitas internet yang tidak stabil. Fitur operasi otomatis dan manual memberikan fleksibilitas penggunaan di lapangan, memungkinkan sistem tetap berfungsi secara optimal meskipun terjadi gangguan jaringan secara intermiten. Penambahan komponen keamanan listrik makin meningkatkan keandalan dan keamanan sistem di lingkungan pertanian yang tidak dapat diprediksi. Kemampuan sistem dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air dan pupuk sekaligus memperbaiki responsivitas kendali membuktikan bahwa sistem ini layak diterapkan pada sistem pemantauan pertanian modern berbasis *cloud*.

Sistem ini menjadi landasan yang kuat untuk integrasi di masa depan dengan teknologi kecerdasan buatan, seperti *fuzzy logic* atau *machine learning*, sehingga memungkinkan terciptanya sistem pertanian presisi yang sepenuhnya otonom dan adaptif. Dengan demikian, sistem ini dapat makin mengoptimalkan pengelolaan sumber daya serta meningkatkan keberlanjutan dalam sektor pertanian modern.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan antara para penulis maupun dengan objek penelitian yang dibahas dalam makalah ini. Semua penulis menegaskan bahwa penulis tidak memiliki afiliasi keuangan, profesional, maupun pribadi yang dapat memengaruhi hasil penelitian yang dilaporkan. Penelitian ini dilakukan secara independen dan seluruh hasil yang disajikan berdasarkan pada observasi ilmiah serta evaluasi sistem tanpa adanya campur

tangan atau bias dari pihak eksternal. Dukungan institusional yang diterima terbatas pada fasilitasi kegiatan penelitian dan tidak memengaruhi objektivitas hasil temuan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Eko Win Kenali dan Dani Rofianto; metodologi, Eko Win Kenali dan Dani Rofianto; perangkat lunak, Jaka Fitra dan Hevia Purnama Sari; validasi dan pengujian, Khusnatul Amaliah, Jaka Fitra, dan Tiara Kurnia Khoerunnisa; analisis formal, Dani Rofianto; investigasi, Dani Rofianto; sumber daya, Dani Rofianto, Eko Win Kenali, dan Khusnatul Amaliah; kurasi data, Eko Win Kenali dan Tiara Kurnia Khoerunnisa; penulisan—persiapan draf asli, Dani Rofianto; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Eko Win Kenali, Khusnatul Amaliah, dan Jaka Fitra; visualisasi, Tiara Kurnia Khoerunnisa dan Hevia Purnama Sari; supervisi, Eko Win Kenali; manajemen proyek, Dani Rofianto, Eko Win Kenali, dan Khusnatul Amaliah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Program Katalisator Berdikari dari Direktorat Jenderal Pendidikan Vokasi, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, yang telah memberikan dukungan terhadap penelitian ini melalui sumber pendanaan dari Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP). Dukungan pendanaan tersebut memiliki peran penting dalam kelancaran seluruh proses penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Lampung atas fasilitas dan dukungan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Nikmah, M. Taufik, dan F. Ilyas, "Intensity, profitability and disclosure of biological assets of agricultural companies," *J. Akunt.*, vol. 12, no. 1, hal. 51–62, Feb. 2022, doi: 10.33369/j.akuntansi.12.1.51-62.
- [2] R. Abbasi, P. Martinez, dan R. Ahmad, "The digitization of agricultural industry – A systematic literature review on agriculture 4.0," *Smart Agric. Technol.*, vol. 2, hal. 1–24, Des. 2022, doi: 10.1016/j.atech.2022.100042.
- [3] T. Laureti, I. Benedetti, dan G. Branca, "Water use efficiency and public goods conservation: A spatial stochastic frontier model applied to irrigation in Southern Italy," *Socio-Econ. Plan. Sci.*, vol. 73, hal. 1–11, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.seps.2020.100856.
- [4] W.U.H. Shah dkk., "The impact of climate change and production technology heterogeneity on China's agricultural total factor productivity and production efficiency," *Sci. Total Environ.*, vol. 907, hal. 1–17, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.168027.
- [5] V.K. Quy dkk., "IoT-enabled smart agriculture: Architecture, applications, and challenges," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 7, hal. 1–19, Apr. 2022, doi: 10.3390/app12073396.
- [6] R. Agrawal dkk., "Sustainable development with Industry 4.0: A study with design, features and challenges," *J. Integr. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 2, hal. 1–10, Okt. 2024.
- [7] A. Jarašūnienė, K. Čižiūnienė, dan A. Čereška, "Research on impact of IoT on warehouse management," *Sensors*, vol. 23, no. 4, hal. 1–30, Feb. 2023, doi: 10.3390/s23042213.
- [8] "Laporan Kinerja Kementerian Pertanian 2021," Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2022.
- [9] R.R. Rachmawati, "Smart farming 4.0 untuk mewujudkan pertanian Indonesia maju, mandiri, dan modern," *Forum Penelit. Agro Ekon.*, vol. 38, no. 2, hal. 137–154, Des. 2020, doi: 10.21082/fae.v38n2.2020.137-154.
- [10] P. Sarma, A. ul Islam, dan T. Bayan, "IoT-based agriculture environment and security monitoring system," *Period. Tchē Quim.*, vol. 20, no. 44, hal. 15–31, Jul. 2023, doi: 10.52571/ptq.v20.n44.2023_02_atowar_pgs_15_31.pdf
- [11] P. Shrivastava, V.K. Tewari, C. Gupta, dan G. Singh, "IoT and radio telemetry based wireless engine control and real-time position tracking system for an agricultural tractor," *Discov. Internet Things*, vol. 3, hal. 1–14, Jun. 2023, doi: 10.1007/s43926-023-00035-4.
- [12] P. Ganesan, T. Hameed, dan M. Maruthakutti, "Cloud-based Internet of things approach for smart irrigation system," *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 13, no. 12, hal. 19–24, Nov. 2024, doi: 10.35940/ijitee.L9995.13121124.
- [13] M. Salimian, M. Ghobaei-Arani, dan A. Shahidinejad, "An evolutionary multi-objective optimization technique to deploy the IoT services in fog-enabled networks: An autonomous approach," *Appl. Artif. Intell.*, vol. 36, no. 1, hal. 1–34, Jan. 2022, doi: 10.1080/08839514.2021.2008149.
- [14] M.K. Anwar dan Tjahjanto, "Perancangan database IoT berbasis cloud dengan restful API," *Techno.Com*, vol. 20, no. 2, hal. 268–279, Mei 2021, doi: 10.33633/te.v20i2.4322.
- [15] N.H.A. Rahim, F.N. Ahmad Zaki, dan A.S.M. Noor, "Smart app for gardening monitoring system using IoT technology," *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 4, hal. 7375–7384, Jul. 2020.
- [16] N. Ulpah, L. Kamelia, dan T. Prabowo, "Rancang bangun penyiraman otomatis berbasis IoT menggunakan smartphone," dalam *Proc. Semin. Nas. Tek. Elekt. UIN Sunan Gunung Djati Bdg. (SENTER 2020)*, 2020, hal. 279–286.
- [17] P. Megantoro dkk., "Instrumentation system for data acquisition and monitoring of hydroponic farming using ESP32 via Google Firebase," *Indones. J. Elect. Eng. Comput. Sci.*, vol. 27, no. 1, hal. 52–61, Jul. 2022, doi: 10.11591/ijeecs.v27.i1.pp52-61.
- [18] A. Bora, J. Basistha, B. Purkayastha, dan I. Mazumder, "Monitoring and control of water requirements as part of an agricultural management system using Internet of things (IoT)," dalam *2022 7th Int. Conf. Math. Comput. Sci. Ind. (MCSI)*, 2022, hal. 115–120, doi: 10.1109/MCSI55933.2022.00025.
- [19] A. Morchid, R. El Alami, A.A. Raetzah, dan Y. Sabbar, "Applications of Internet of things (IoT) and sensors technology to increase food security and agricultural sustainability: Benefits and challenges," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, no. 3, hal. 1–15, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.asej.2023.102509.
- [20] O.V. Priya dan R. Sudha, "Impact of Internet of things (IoT) in smart agriculture," dalam *Recent Trends in Intensive Computing.*, vol. 39, M. Rajesh dkk., (Eds.), Amsterdam, Belanda: IOS Press BV, 2021.
- [21] S.T. Kunnumpurathu, H.M. Wilson, dan T.J. Kuriakose, "Design and implementation of an IoT-based farmland monitoring system," *J. Electron. Des. Eng.*, vol. 9, no. 2, hal. 22–27, Jan. 2023, doi: 10.46610/joede.2023.v09i02.004.
- [22] S. Kaunkid dan A. Aurasopon, "Efficient solar-powered IoT drip irrigation for tomato yield and quality: An evaluation of the effects of irrigation and fertilizer frequency," *J. Exp. Biol. Agric. Sci.*, vol. 11, no. 5, hal. 845–853, Nov. 2023, doi: 10.18006/2023.11(5).845.853.
- [23] J.P. Nyakuri, J. Bizimana, A. Bigirabagabo, dan J.B. Kalisa, "IoT and AI based smart soil quality assessment for data-driven irrigation and fertilization," *Am. J. Comput. Eng.*, vol. 5, no. 2, hal. 1–14, Okt. 2022, doi: 10.47672/ajce.1232.
- [24] V.S. Reddy, S. Harivardhagini, dan G. Sreelakshmi, "IoT and cloud based sustainable smart irrigation system," dalam *Int. Conf. Renew. Energy Green Comput. Sustain. Dev. (ICREGCSD 2023)*, 2024, hal. 1–12, doi: 10.1051/e3sconf/202447201026.
- [25] H.A. Alharbi dan M. Aldossary, "Energy-efficient edge-fog-cloud architecture for IoT-based smart agriculture environment," *IEEE Access*, vol. 9, hal. 110480–110492, Jul. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3101397.
- [26] S.A. Okoh dkk., "Development of IoT cloud-based platform for smart farming in the sub-saharan Africa with implementation of smart-irrigation as test-case," *Int. J. Inf. Technol. Comput. Sci.*, vol. 15, no. 2, hal. 1–14, Apr. 2023, doi: 10.5815/ijitcs.2023.02.01.
- [27] P. Chougale, V. Yadav, dan A.T. Gaikwad, "Firebase - Overview and usage," *Int. Res. J. Mod. Eng. Technol. Sci.*, vol. 3, no. 12, hal. 178–1183, Des. 2021.