

Prototipe Sistem Pertanian Terpadu Mendorong Modernisasi Pertanian dan Pemanfaatan Lahan Berbasis IoT

Integrated Farming System Prototype to Promote Agricultural Modernization and IoT-Based Land Utilization

Iqbal Faturachman Usman*
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Ichsan Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
iblusman16@gmail.com

Syamsir
Program Studi Agribisnis
Universitas Ichsan Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
ancyagri@gmail.com

Stephan A. Hulukati
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Ichsan Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
stephanhulukati17@gmail.com

Abdul Majid Gaffar
Program Studi Sistem Informasi
Universitas Pohuwato
Gorontalo, Indonesia
abdulmajidgaffar@unipo.ac.id

Diterima : November 2025
Disetujui : Januari 2026
Dipublikasi : Januari 2026

Abstrak— Penelitian ini merancang dan menguji prototipe pertanian terpadu berbasis Internet of Things (IoT) untuk mengatasi keterbatasan lahan serta meningkatkan efisiensi penggunaan air pada skala kecil. Sistem memanfaatkan mikrokontroler ESP32-S3 yang terintegrasi dengan sensor kelembapan tanah (SEN0308), suhu air (DS18B20), suhu-kelembapan udara (DHT11), pH, TDS, dan flowmeter YF-B1. Data dibaca secara periodik dan dikirim real-time ke Google Spreadsheet melalui Google Apps Script Web App guna pencatatan dan visualisasi dashboard. Strategi kendali menggunakan logika histeresis: katup solenoid diaktifkan (ON) ketika kelembapan tanah kurang dari 50% dan dinonaktifkan (OFF) ketika lebih dari 55%, disertai pembatasan durasi aliran untuk mencegah siklus hidup-mati yang cepat. Pengujian selama 8 hari menunjukkan bahwa sistem beroperasi dengan stabil. Rata-rata suhu air tercatat 29,01°C (rentang 22,34–35,94°C), kelembapan udara mencapai 73,52%, dan kelembapan tanah berada di angka 52,47%; pH 6,35 (4,13–7,00), TDS 664 ppm (583–760 ppm), serta laju alir 0,36 L/menit dengan distribusi total sekitar 4.190 L. Sistem secara konsisten menyalakan solenoid saat kelembapan tanah berada di bawah ambang ON (<50%) dan mematikannya saat melewati ambang OFF (>55%), sehingga kelembapan tanah terjaga pada kisaran kerja yang diinginkan. Dibandingkan metode manual pada periode pengujian yang sama (6.588,08 L), sistem menurunkan konsumsi air sebesar 36,4% (menjadi 4.190,00 L). Kontribusi utama penelitian ini adalah penerapan logika histeresis sederhana yang terbukti stabil dan efisien untuk irigasi tetes pada sistem pertanian terpadu skala kecil. Temuan ini menegaskan bahwa teknologi IoT efektif dalam melakukan modernisasi pertanian terpadu di lahan yang terbatas, sekaligus mendukung pertanian sirkular dan ketahanan pangan melalui pemantauan berbasis data dan pengambilan keputusan otomatis..

Kata Kunci— *Internet of Things; Irigasi Tetes Otomatis; Katup Solenoid; Google Apps Script; Pertanian Sirkular..*

Abstract— *This study designs and evaluates an Internet of Things (IoT)-based integrated farming prototype to address limited land*

availability and improve water-use efficiency at a small scale. The system employs an ESP32-S3 microcontroller integrated with soil moisture (SEN0308), water temperature (DS18B20), air temperature-humidity (DHT11), pH, TDS, and a YF-B1 flowmeter sensors. Measurements are acquired periodically and transmitted in real time to Google Sheets via a Google Apps Script Web App for logging and dashboard visualization. Irrigation control is implemented using a hysteresis strategy: the solenoid valve is activated (ON) when soil moisture falls below 50% and deactivated (OFF) when it exceeds 55%, with an additional flow-duration limit to prevent rapid ON-OFF cycling. An 8-day experiment shows stable system operation. The average water temperature was 29.01°C (range 22.34–35.94°C), air humidity reached 73.52%, and soil moisture averaged 52.47%; pH was 6.35 (4.13–7.00), TDS was 664 ppm (583–760 ppm), and the flow rate was 0.36 L/min with a total distributed volume of approximately 4,190 L. The system consistently turns the solenoid ON when soil moisture is below the ON threshold (<50%) and turns it OFF when it exceeds the OFF threshold (>55%), thereby maintaining soil moisture within the intended operating range. Compared with manual irrigation over the same testing period (6,588.08 L), the proposed system reduced water consumption by 36.4% (to 4,190.00 L). The main contribution of this work is the application of a simple hysteresis logic that is proven stable and efficient for drip irrigation in a small-scale integrated farming system. These findings confirm that IoT technology can modernize integrated farming on limited land while supporting circular agriculture and food resilience through data-driven monitoring and automated decision-making.

Keywords— *Internet of Things; Automatic Drip Irrigation; Solenoid Valve; Google Apps Script; Circular Agriculture.*

I. PENDAHULUAN

Pertanian terpadu merupakan salah satu pendekatan strategis yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi sumber daya melalui integrasi antara komponen pertanian, peternakan, dan akuakultur dalam satu sistem yang saling mendukung. Di tengah tantangan perubahan iklim,

keterbatasan lahan, dan penurunan ketersediaan air, sistem ini berpotensi mendorong modernisasi sektor pertanian, terutama di daerah yang mengalami tekanan tinggi akibat alih fungsi lahan, seperti Provinsi Gorontalo[1], [2]. Data BPS menunjukkan lahan sawah di Provinsi Gorontalo hanya sekitar 2,41% dari luas wilayah, sehingga pengembangan produksi pada lahan kecil dan non-sawah menjadi semakin relevan. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, pertanian terpadu tidak hanya difokuskan pada produktivitas, tetapi juga pada optimalisasi pemanfaatan limbah antar komponen ekosistem pertanian agar tercipta siklus produksi yang efisien dan ramah lingkungan.

Transformasi digital di sektor pertanian menjadi katalis utama dalam penerapan konsep smart farming, di mana teknologi berbasis Internet of Things (IoT) memungkinkan pengawasan dan pengendalian lingkungan secara waktu nyata. Penerapan sistem berbasis IoT memberikan kemudahan bagi petani untuk memantau parameter penting seperti suhu, kelembapan tanah, pH, dan kualitas air melalui sensor yang terintegrasi dengan sistem kendali otomatis[3],[4]. Dengan demikian, pengambilan keputusan dapat dilakukan secara presisi berdasarkan data aktual di lapangan, bukan hanya berdasarkan pengalaman subjektif petani. Secara teknis, pendekatan berbasis data ini mengurangi over-irrigation dan meningkatkan repeatability proses budidaya, karena keputusan penyiraman bergantung pada pembacaan sensor dan logika kontrol yang konsisten[5],[6]. Namun, banyak solusi yang dilaporkan masih menitikberatkan pada pemantauan atau menggunakan strategi kendali yang relatif kompleks/mahal sehingga adopsinya pada sistem terpadu skala kecil di daerah seperti Gorontalo masih terbatas[1],[2],[7]. Selain itu, pendekatan pemantauan skala luas berbasis drone dan analitik citra menawarkan kemampuan observasi yang baik, tetapi umumnya menuntut biaya dan kompleksitas operasional yang lebih tinggi [8]–[10]. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan prototipe sistem pertanian terpadu berbasis IoT yang tetap sederhana namun andal untuk pemantauan dan pengendalian otomatis pada skala kecil

Penelitian ini berfokus pada pengembangan prototipe sistem pertanian terpadu berbasis IoT yang terdiri atas kandang ayam, kolam ikan, sistem hidroponik, dan pot tanaman cabai. Sistem mengintegrasikan mikrokontroler ESP32-S3 dengan sensor DS18B20, DHT11, soil moisture, pH, TDS, dan flowmeter untuk memantau kondisi lingkungan secara real-time, sebagaimana pendekatan pemantauan multi-parameter pada sistem hidroponik/akuaponik berbasis IoT yang banyak dibahas pada penelitian terkini. Pemilihan ESP32-S3 didasarkan pada kebutuhan arsitektur multi-sensor-multi-aktuator yang menuntut ketersediaan GPIO dan periferi yang memadai serta konektivitas nirkabel yang stabil. Secara implementasi, sistem ini memerlukan akuisisi beberapa sinyal analog dari sensor (misalnya kelembapan tanah, pH, dan TDS), pembacaan sinyal pulsa dari flowmeter untuk menghitung debit/volume, serta keluaran digital untuk mengendalikan relay dan katup solenoid pada irigasi tetes.

Seluruh data pengukuran dikirim melalui komunikasi Wi-Fi ke platform cloud (Google Spreadsheet) agar pemantauan dan pencatatan dapat dilakukan secara real-time tanpa perlu server tambahan. Pengiriman data dilakukan melalui Google Apps Script Web App. Hasil pengukuran

kelembapan tanah digunakan sebagai dasar logika kendali otomatis relay-solenoid yang mengatur irigasi tetes (drip irrigation) secara presisi. Untuk meningkatkan stabilitas kontrol, penelitian ini menerapkan logika histeresis (rentang ON/OFF yang berbeda) agar aktuator tidak beresilasi cepat (chattering) saat nilai sensor berada di sekitar ambang. Kontribusi utama penelitian ini adalah penerapan logika histeresis sederhana yang terbukti stabil dan efisien untuk irigasi tetes pada sistem pertanian terpadu skala kecil.

Hasil uji awal menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan kelembapan tanah pada kisaran 50-55%, suhu air rata-rata 29°C, serta pH 6,3 - semuanya berada dalam rentang ideal untuk budidaya cabai dan sistem akuaponik. Kinerja sistem ini sejalan dengan temuan penelitian terdahulu bahwa otomasi penyiraman berbasis sensor dapat mengurangi pemborosan air lebih dari 30%. Selain itu, penelitian ini memperkuat konsep circular agriculture, di mana limbah organik dari peternakan dapat dimanfaatkan untuk pemupukan tanaman, sementara air kolam ikan berfungsi sebagai sumber nutrisi bagi sistem hidroponik.

Walaupun berbagai studi telah melaporkan prototipe IoT untuk pemantauan pertanian dan hidroponik/akuaponik, sebagian besar masih diuji pada skala terbatas, fokus pada satu subsistem, atau belum menekankan kemudahan replikasi dan evaluasi stabilitas aktuator pada kondisi lapangan. Kondisi ini membuat kebutuhan solusi low-cost yang terintegrasi, mudah diadopsi petani skala kecil, serta sesuai dengan karakteristik lahan terbatas di Gorontalo menjadi semakin jelas. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pertanian terpadu berbasis IoT yang mampu melakukan pemantauan dan pengendalian otomatis terhadap faktor lingkungan pertanian melalui arsitektur multi-sensor dan pencatatan berbasis cloud yang sederhana. Hasilnya diharapkan dapat berkontribusi nyata dalam mendorong transformasi menuju pertanian modern yang berdaya saing tinggi, efisien, dan berkelanjutan pada wilayah dengan keterbatasan sumber daya.

II. METODE

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahap utama untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem pertanian terpadu berbasis Internet of Things (IoT). Tahapan tersebut meliputi analisis masalah, pengumpulan data, perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, pengujian, serta evaluasi.

Diagram alur prosedur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1, yang menggambarkan aliran kegiatan mulai dari identifikasi kebutuhan hingga tahap validasi hasil sistem monitoring dan irigasi otomatis. Pada tahap perancangan–implementasi, dilakukan kalibrasi sensor kelembapan tanah dan penetapan ambang kontrol histeresis sebagai dasar keputusan ON/OFF solenoid.



Gambar 1. Diagram alur prosedur penelitian sistem pertanian terpadu berbasis IoT (meliputi identifikasi kebutuhan, pemilihan perangkat, perancangan arsitektur multi-sensor, kalibrasi soil moisture, penetapan ambang histeresis, implementasi, dan pengujian lapangan)

Analisis Masalah

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi permasalahan utama petani di Gorontalo, yaitu keterbatasan lahan, rendahnya efisiensi penyiraman manual, serta minimnya integrasi antar komponen produksi. Sistem irigasi konvensional sering kali tidak efisien karena penyiraman dilakukan tanpa memperhitungkan kondisi kelembapan tanah. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem otomatis yang mampu menyesuaikan volume dan durasi penyiraman berdasarkan data sensor secara real-time.

Pada tahap ini juga ditetapkan kriteria pemilihan perangkat: (i) mampu menangani multi-sensor (analog, digital, dan pulsa) secara bersamaan, (ii) memiliki konektivitas Wi-Fi terintegrasi untuk pengiriman data real-time ke cloud, (iii) biaya implementasi rendah dan mudah direplikasi, serta (iv) dukungan library/komunitas memadai untuk mempercepat pengembangan. Berdasarkan kriteria tersebut, ESP32-S3 dipilih dibanding mikrokontroler lain (misalnya Arduino Uno yang memerlukan modul Wi-Fi tambahan, atau platform dengan keterbatasan kanal ADC/periferal), karena lebih sesuai untuk arsitektur multi-sensor-multi-aktuator dan konektivitas nirkabel yang stabil

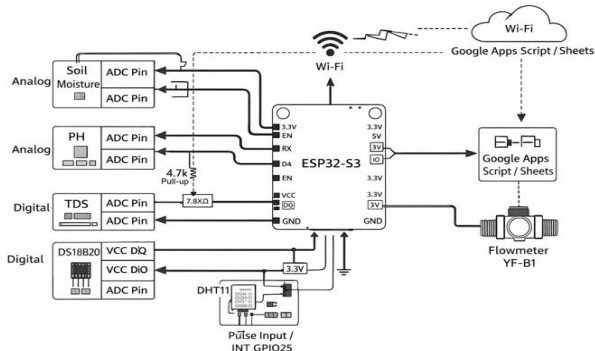
Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui dua pendekatan:

1. Studi literatur, yang digunakan untuk meninjau penelitian terdahulu terkait *smart farming*, irigasi otomatis, dan pemanfaatan sensor lingkungan.
2. Observasi lapangan, yang dilakukan untuk memperoleh data empiris mengenai kondisi lingkungan (suhu, kelembapan udara, kelembapan tanah, pH, dan TDS) serta menyesuaikan rancangan sistem dengan kebutuhan tanaman cabai pada lahan terbatas.

Perancangan Sistem

Sistem pertanian terpadu yang dikembangkan terdiri atas sensor node dan aktuator node yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32-S3. Komponen sensor meliputi:



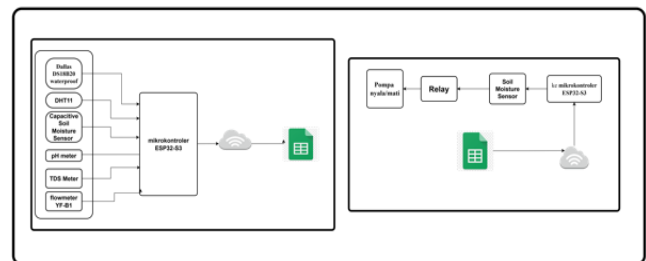
Gambar 2. Skema sensor node sistem pertanian terpadu (sensor node membaca multi-parameter; nilai kelembapan tanah menjadi input utama modul kendali histeresis, sedangkan pH-TDS-suhu air mendukung pemantauan kualitas air akuaponik/hidroponik).

- Dallas DS18B20 – sensor suhu air [12],
- DHT11 – sensor suhu dan kelembapan udara [13],
- Capacitive Soil Moisture Sensor SKU SEN0308 – sensor kelembapan tanah [11],
- pH Sensor Haosi – pengukur keasaman larutan,

- TDS Sensor DFRobot SEN0244 – pengukur padatan terlarut,
- Flowmeter YF-B1 – pengukur laju alir air.

Seluruh sensor dihubungkan ke ESP32-S3 melalui pin analog-digital dan memperoleh catu daya 5 V. Data sensor dikirim melalui koneksi Wi-Fi menggunakan metode HTTP POST ke Google Apps Script Web App [14], kemudian disimpan dan divisualisasikan secara real-time di Google Spreadsheet.

Pemilihan sensor didasarkan pada kesesuaian fungsi dan kondisi lapangan: DS18B20 dipilih karena pembacaan suhu air stabil dan mudah diintegrasikan secara digital; DHT11 digunakan karena kebutuhan monitoring udara bersifat pendukung dan cukup untuk prototipe; SEN0308 (kapasitif) dipilih untuk mengurangi risiko korosi dibanding sensor resistif; sensor pH dan TDS diperlukan untuk memantau kualitas air pada komponen akuaponik/hidroponik; sedangkan flowmeter YF-B1 digunakan untuk mengukur debit/volume agar evaluasi efisiensi penggunaan air dapat dihitung secara kuantitatif.

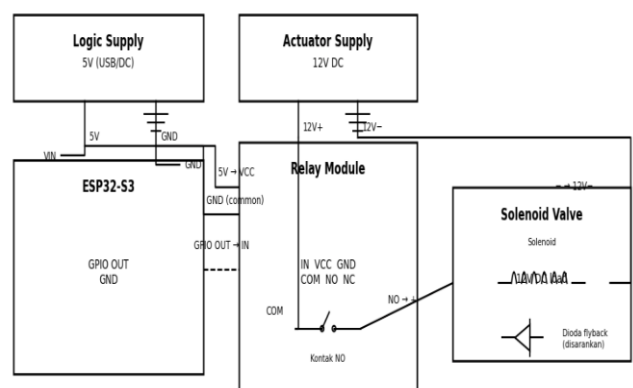


Gambar 3. Blok diagram sistem monitoring dan penyiraman otomatis berbasis ESP32-S3 (alur data: sensor → ESP32-S3 → Wi-Fi → Google Apps Script → Google Spreadsheet; alur kontrol lokal: soil moisture → logika histeresis + pembatas durasi → relay → solenoid).

Untuk menentukan interval kategori kelembapan tanah digunakan rumus:

$$Interval = \frac{Air\ Value - Water\ Value}{n} \quad (1)$$

Sistem irigasi tetes (*drip irrigation*) menggunakan katup solenoid 12 volt yang dihubungkan ke relay modul dan dikendalikan melalui logika histeresis.



Gambar 4. Skema aktuator node (pompa dan relay pengendali solenoid) (relay berfungsi sebagai saklar daya solenoid 12 V; status relay ditentukan oleh logika histeresis dan dibatasi durasi aktif untuk menghindari switching cepat dan pemborosan air).

Katup aktif ketika kelembapan tanah < 50 % dan nonaktif ketika kelembapan > 55 %. Penetapan ambang 50–55% bertujuan menjaga kelembapan tanah pada kisaran kerja yang diinginkan untuk media pot cabai sekaligus membentuk “deadband” 5% agar sistem stabil (tidak mudah chattering) ketika nilai sensor berfluktuasi di sekitar ambang. Ambang bawah (50%) berperan sebagai indikator awal kebutuhan air, sedangkan ambang atas (55%) dipilih untuk menghentikan penyiraman setelah kelembapan kembali naik, sehingga mencegah kondisi terlalu basah dan mengurangi pemborosan air. Nilai ambang ini bersifat tunable dan dapat disesuaikan berdasarkan hasil kalibrasi sensor pada jenis media tanam dan debit dripper yang digunakan[15]. Sistem ini menjadi solusi potensial untuk mendorong modernisasi sektor pertanian, terutama di daerah dengan tekanan tinggi terhadap alih fungsi lahan seperti Provinsi Gorontalo, Mekanisme ini mencegah siklus nyala-mati yang berulang dan menjaga kondisi tanah tetap optimal untuk pertumbuhan tanaman.

Secara operasional, aturan histeresis dapat dijelaskan sebagai berikut: (1) jika soil moisture < 50% maka relay = ON (solenoid membuka); (2) jika soil moisture > 55% maka relay = OFF (solenoid menutup); (3) jika $50\% \leq \text{soil moisture} \leq 55\%$ maka status relay mengikuti status sebelumnya (tetap), sehingga sistem tidak bolak-balik ON–OFF pada nilai batas. Pembatas durasi aliran digunakan sebagai pengaman tambahan agar setiap siklus ON tidak berlangsung melebihi durasi yang ditentukan.

Logika kendali sistem diatur sebagai berikut:

$$S(t) = \begin{cases} 1, & \text{jika } M(t) < M_{low} \\ 0, & \text{jika } M(t) > M_{high} \end{cases} \quad (2)$$

Implementasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Perangkat keras dipasang pada sistem pertanian terpadu yang terdiri atas pot cabai, kolam ikan, instalasi hidroponik, dan kandang ayam. Mikrokontroler ESP32-S3 diprogram menggunakan Arduino IDE dengan pustaka *OneWire*, *DallasTemperature*, dan *DHT*. Setiap sensor mengirimkan data melalui Wi-Fi ke Google Spreadsheet secara waktu nyata.

Program utama terdiri atas:

1. Pembacaan sensor secara berurutan.
2. Pengiriman data ke API Google Apps Script dengan metode HTTP POST berformat JSON[14].
3. Logika kendali yang menyalakan relay ketika nilai soil moisture di bawah 50 % dan mematikannya kembali setelah melebihi 55 %.
4. Pembatasan durasi aliran untuk menjaga efisiensi energi dan air.

Pengujian Sistem

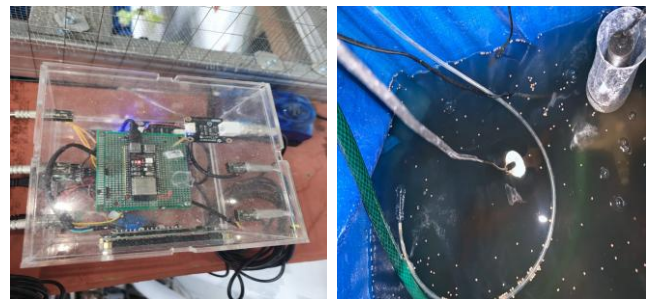
Pengujian dilakukan selama delapan hari dengan pemantauan berkelanjutan terhadap enam parameter utama: suhu air, kelembapan udara, kelembapan tanah, pH, TDS, dan laju alir air. Pengujian difokuskan pada:

- Akurasi pembacaan sensor,
- Respons katup solenoid terhadap logika histeresis,
- Kestabilan transmisi data ke cloud, serta
- Efisiensi penggunaan air irigasi.

Selain pengujian hardware, dilakukan pula uji software untuk memastikan proses pengiriman data ke Google Spreadsheet berjalan tanpa error.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar ini menampilkan implementasi prototipe sistem IoT pertanian terpadu: (a) unit kontrol berbasis mikrokontroler dan rangkaian sensor/aktuator yang ditempatkan dalam kotak pelindung transparan, dan (b) pemasangan sensor pada media air/kolam (misalnya untuk pemantauan suhu/kualitas air) dengan kabel dan probe yang terhubung ke unit kontrol.



(a) (b)
Gambar 5. Implementasi sistem pertanian terpadu berbasis IoT di lapangan

Implementasi Sistem

Prototipe sistem pertanian terpadu berbasis Internet of Things (IoT) telah berhasil diimplementasikan menggunakan mikrokontroler ESP32-S3 sebagai pusat kendali. Sistem ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu sensor node dan aktuator node.



Gambar 6. Implementasi sensor node dan aktuator node sistem pertanian terpadu

Pada sensor node dipasang enam jenis sensor: DS18B20 untuk suhu air, DHT11 untuk suhu dan kelembapan udara, Capacitive Soil Moisture Sensor SKU SEN0308 untuk kelembapan tanah, pH Sensor Haosi, TDS Sensor DFRobot SEN0244, dan Flowmeter YF-B1 untuk laju alir air.

Seluruh sensor dihubungkan ke ESP32-S3 melalui pin analog–digital dan memperoleh catu daya 5 V. Data sensor dikirim melalui koneksi Wi-Fi menggunakan metode HTTP POST ke Google Apps Script Web App, kemudian disimpan dan divisualisasikan secara real-time di Google Spreadsheet. Hal ini memungkinkan pemantauan parameter lingkungan dari komputer maupun perangkat seluler tanpa perlu perangkat server tambahan.

Sementara itu, aktuator node terdiri dari katup solenoid 12 V tipe ½ inci yang dikendalikan melalui relay modul, berfungsi membuka dan menutup aliran air pada jaringan irigasi tetes. Sistem dirancang agar bekerja otomatis berdasarkan logika histeresis: katup aktif (ON) saat

kelembapan tanah < 50 % dan nonaktif (OFF) saat kelembapan > 55 %. Pendekatan ini memastikan kelembapan tanah tetap berada pada kondisi optimal tanpa siklus nyala-mati yang terlalu cepat.

Pengujian Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Pengujian sistem dilakukan selama **delapan hari** untuk memastikan integrasi antar-komponen berjalan stabil. Setiap sensor diuji pada kondisi lingkungan berbeda untuk memperoleh rentang pembacaan yang representatif terhadap variasi suhu, kelembapan, dan pH.

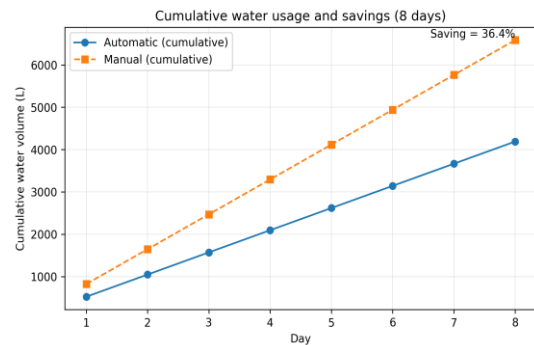
Hasil uji menunjukkan seluruh sensor berfungsi sesuai spesifikasinya. Nilai rata-rata yang diperoleh adalah sebagai berikut:

- Suhu air: 29,01 °C (rentang 22,34 – 35,94 °C)
- Kelembapan udara: 73,52 %
- Kelembapan tanah: 52,47 %
- pH: 6,35 (rentang 4,13 – 7,00)
- TDS: 664 ppm (rentang 583 – 760 ppm)
- Laju alir: 0,36 L/menit dengan total distribusi ± 4 190 L selama pengujian

Nilai-nilai pengukuran yang diperoleh selama pengujian berada dalam rentang yang mendukung pertumbuhan tanaman cabai sekaligus menjaga kelangsungan sistem akuaponik dan hidroponik. Secara agronomis, kestabilan ini penting karena cabai peka terhadap fluktuasi kelembapan tanah, sedangkan pada akuaponik/hidroponik, perubahan kualitas air yang tajam dapat mengganggu ketersediaan nutrisi serta kesehatan organisme budidaya. Pengujian perangkat lunak menunjukkan kinerja komunikasi yang stabil: data sensor dikirim setiap 15 detik dalam format JSON ke Google Spreadsheet tanpa kehilangan paket data, sehingga deret waktu yang terekam memiliki kontinuitas yang memadai untuk analisis tren. Dashboard memvisualisasikan tiap parameter dalam bentuk line chart, memungkinkan observasi perubahan lingkungan secara kontinu dan memudahkan identifikasi hubungan sebab-akibat antara kondisi tanah dan keputusan penyiraman.

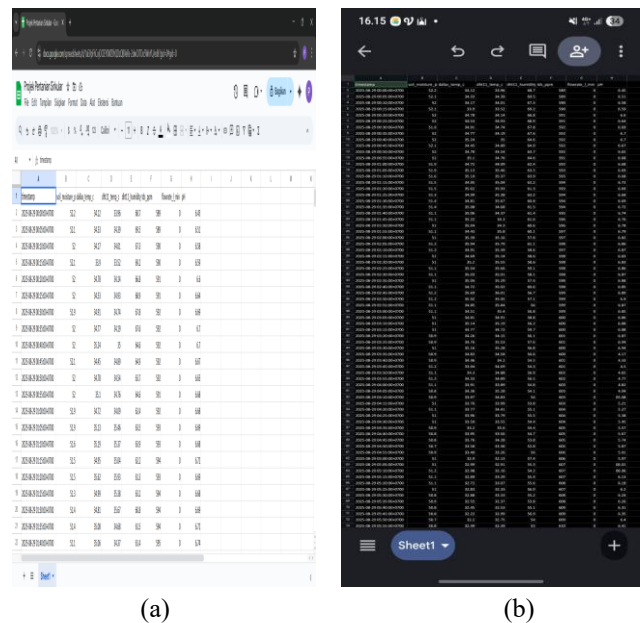
Gambar penggunaan air kumulatif selama 8 hari menunjukkan kurva penyiraman manual (garis oranye) konsisten lebih tinggi dibanding irigasi otomatis (garis biru). Selisih kurva yang semakin melebar mengindikasikan bahwa sistem otomatis menekan pemborosan air secara progresif, terutama karena penyiraman hanya diaktifkan ketika kelembapan tanah turun di bawah ambang ON dan dihentikan setelah kelembapan melampaui ambang OFF; zona histeresis juga menahan status aktuator pada rentang transisi sehingga mengurangi switching cepat akibat noise sensor. Dengan mekanisme ini, sistem mengurangi over-irrigation yang umum terjadi pada penyiraman berbasis kebiasaan, dan pada akhir hari ke-8 tercapai penghematan total 36,4% dibanding metode manual. Integrasi flowmeter juga memungkinkan verifikasi kuantitatif bahwa penurunan volume air bukan sekadar persepsi visual, melainkan hasil akumulasi debit aktual yang tercatat. Temuan ini menguatkan bahwa kendali berbasis ambang ganda dapat menjadi opsi praktis pada perangkat berdaya komputasi terbatas, selama kalibrasi sensor dilakukan konsisten pada media tanam yang sama. Variasi cuaca harian tetap perlu dipertimbangkan dalam interpretasi efisiensi. Meskipun reliabilitas pengiriman data selama uji lapangan tinggi, monitoring berbasis cloud tetap bergantung pada kualitas koneksi internet; oleh karena itu,

studi lanjutan perlu memperpanjang durasi pengujian serta menambahkan mode pencatatan lokal/offline sebagai mitigasi ketika jaringan tidak stabil, bisa dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan konsumsi air penyiraman manual dan irigasi otomatis selama 8 hari (penghematan 36,4%).

Data hasil pembacaan sensor dikirim secara real-time ke Google Spreadsheet melalui Google Apps Script dan ditampilkan dalam bentuk tabel serta dashboard. Setiap baris data dilengkapi *timestamp* sehingga perubahan parameter dapat dipantau berurutan dari waktu ke waktu. Dashboard ini dapat diakses melalui komputer maupun smartphone untuk memudahkan pemantauan kondisi sistem, dapat di lihat pada gambar 8.



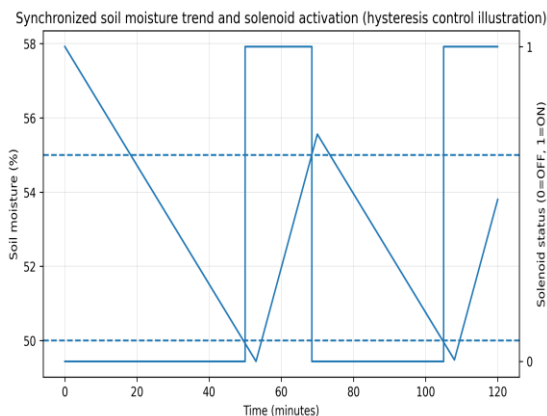
Gambar 8. Tampilan antarmuka dashboard Google Spreadsheet untuk pemantauan sensor

Kinerja Logika Histeresis pada Irigasi Otomatis

Hasil kalibrasi sensor kelembapan tanah digunakan untuk menetapkan tiga kategori kondisi tanah, yaitu Kering (0 – 33,33 %), Basah (33,33 – 66,67 %), dan Sangat Basah (> 66,67 %). Berdasarkan kategori tersebut, sistem melakukan aksi otomatis terhadap katup solenoid sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Kelembapan Tanah dan Aksi Kendali Solenoid

Kategori	Rentang (%)	Aksi Relay	Status Solenoid
Sangat Basah	66,67 – 100	LOW	OFF
Basah	33,33–66,67	LOW	OFF
Kering	0 – 33,33	HIGH	ON



Gambar 8. Ilustrasi sinkronisasi tren kelembapan tanah dan status solenoid pada kontrol histeresis (ON < 50%, OFF > 55%).

Dari hasil pengujian, respon sistem terhadap perubahan kelembapan menunjukkan kesesuaian 100 % dengan aturan logika. Saat tanah berada pada kondisi kering, relay aktif sehingga solenoid membuka aliran air. Ketika kondisi berubah menjadi basah atau sangat basah, relay nonaktif dan solenoid menutup aliran. Mekanisme ini memastikan penyiraman berlangsung tepat waktu dan volume air digunakan secara efisien.

Analisis Hasil Pengujian

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan kelembapan tanah dalam rentang ideal secara konsisten. Secara kuantitatif, efisiensi ini tercermin pada penghematan air sebesar 36,4% (4.190 L) dibanding penyiraman manual (6.588,08 L) selama 8 hari, karena penyiraman hanya diaktifkan saat kelembapan < 50% dan dihentikan saat > 55% sehingga mengurangi over-irrigation serta mencegah osilasi (*chattering*) di sekitar ambang. Berbeda dari Basri [1] yang menggabungkan IoT dan *machine learning* serta Hermawan et al. [2] yang menerapkan *fuzzy rule-based* untuk otomatis irigasi, penelitian ini menunjukkan bahwa logika histeresis sederhana tetap mampu menghasilkan penghematan air yang terukur pada irigasi tetes skala kecil. Selain itu, integrasi sensor pH dan TDS memberikan manfaat tambahan dalam pemantauan kualitas air yang memengaruhi penyerapan nutrisi tanaman.

Dari aspek *connectivity* dan stabilitas, pengiriman data ke cloud menunjukkan tingkat keberhasilan > 98 % tanpa delay signifikan. Tingkat keberhasilan ini mendukung pemantauan real-time (*dashboard*) dan mengurangi risiko keterlambatan pembaruan data; namun pada kondisi lapangan dengan Wi-Fi yang fluktuatif, monitoring berbasis *cloud* berpotensi mengalami jeda meskipun kendali lokal (ON/OFF solenoid) tetap berjalan berdasarkan pembacaan sensor. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi antara ESP32-S3 dan Google

Apps Script dapat diandalkan sebagai solusi low-cost cloud monitoring bagi sistem pertanian kecil-menengah.

Temuan penelitian ini juga memperkuat konsep pertanian sirkular (*circular agriculture*), di mana limbah organik dari kandang ayam dapat dimanfaatkan sebagai pupuk tanaman, sedangkan air kolam ikan menjadi sumber nutrisi bagi sistem hidroponik. Integrasi lintas-komponen ini memperluas manfaat sistem dari sekadar otomatis irigasi menjadi peningkatan efisiensi sumber daya (air–nutrisi) pada keseluruhan ekosistem pertanian terpadu.

Pembahasan

Dari hasil implementasi, sistem pertanian terpadu berbasis IoT terbukti mampu meningkatkan efisiensi air dan memberikan kemudahan dalam pemantauan lingkungan secara real-time. Peningkatan efisiensi air dibuktikan melalui perbandingan konsumsi air kumulatif, di mana irigasi otomatis menghasilkan penghematan 36,4% dibanding metode manual pada akhir hari ke-8. Pendekatan ini relevan bagi daerah yang memiliki keterbatasan sumber daya dan belum sepenuhnya mengadopsi teknologi digital di sektor pertanian. Selain manfaat teknis, penerapan sistem ini juga memiliki implikasi sosial-ekonomi, yakni mendorong petani kecil untuk mengadopsi inovasi digital tanpa investasi besar.

Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan IoT pada sistem pertanian terpadu tidak hanya berfungsi sebagai alat pengendali otomatis, tetapi juga sebagai sistem pendukung keputusan (*decision-support system*) yang mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan. Dari sisi pendekatan kontrol, penggunaan histeresis (ON < 50% dan OFF > 55%) bersifat ringan secara komputasi dan praktis untuk perangkat *low-cost*, sehingga layak sebagai alternatif ketika pendekatan berbasis model (mis. *machine learning*) atau aturan kompleks (mis. *fuzzy rule-based*) tidak menjadi prioritas implementasi di lapangan.

Keterbatasan sistem ini terletak pada durasi pengujian yang relatif singkat dan ketergantungan pada koneksi internet untuk monitoring berbasis cloud. Walaupun keberhasilan transmisi data tercatat > 98% selama pengujian, reliabilitas monitoring tetap dipengaruhi kualitas jaringan; karena itu, pengujian jangka lebih panjang dan mekanisme pencatatan *offline* saat koneksi tidak stabil penting untuk memperkuat validitas dan kesiapan implementasi lapangan.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan prototipe sistem pertanian terpadu berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu melakukan pemantauan dan penyiraman otomatis pada lahan pertanian skala kecil. Sistem berbasis mikrokontroler ESP32-S3 terintegrasi dengan enam jenis sensor lingkungan—DS18B20, DHT11, soil moisture, pH, TDS, dan flowmeter—yang berfungsi untuk mengukur parameter suhu, kelembapan, pH, dan kualitas air secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa logika histeresis yang diterapkan mampu menjaga kelembapan tanah pada rentang 50–55% serta meningkatkan efisiensi penggunaan air dibandingkan metode penyiraman manual. Katup solenoid aktif pada kondisi kering dan nonaktif saat kelembapan mencapai kondisi basah, sehingga penyiraman berlangsung sesuai kebutuhan aktual tanaman. Selain itu, pengiriman data

berbasis cloud melalui Google Apps Script Web App berjalan stabil dan mendukung pemantauan jarak jauh melalui komputer maupun perangkat seluler. Dari aspek fungsionalitas dan efisiensi, sistem ini tidak hanya berperan sebagai perangkat monitoring, tetapi juga sebagai sistem pengambilan keputusan otomatis yang mendukung praktik smart farming berkelanjutan. Temuan ini sejalan dengan konsep pertanian sirkular, di mana komponen seperti kolam ikan, kandang ayam, dan hidroponik dapat diintegrasikan untuk mendukung efisiensi sumber daya dan peningkatan produktivitas. Meski demikian, sistem masih memiliki beberapa keterbatasan, antara lain pengujian yang dilakukan masih pada skala prototipe dan rentang waktu terbatas, serta ketergantungan pada ketersediaan koneksi internet untuk pemantauan berbasis cloud. Selain itu, penggunaan aktuator induktif (solenoid) berpotensi menimbulkan gangguan elektrik jika aspek proteksi dan pemisahan catu daya tidak dirancang optimal. Ke depan, pengembangan dapat diarahkan pada perluasan skala implementasi dan durasi uji lapangan, penambahan mekanisme pencatatan *offline* saat koneksi internet tidak stabil, serta peningkatan ketahanan energi melalui integrasi panel surya dan sistem penyimpanan baterai sebagai sumber daya mandiri. Dengan pengembangan tersebut, sistem diharapkan semakin andal untuk diterapkan pada wilayah dengan keterbatasan lahan dan sumber daya, serta memberikan kontribusi lebih kuat terhadap efisiensi air, produktivitas berkelanjutan, dan ketahanan pangan lokal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia atas dukungan pendanaan melalui program Hibah Penelitian Dosen Pemula (PDP) Tahun 2025 dengan nomor kontrak 0070/C3/AL.04/2025. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Ihsan Gorontalo atas fasilitasi dan dukungan administratif selama proses penelitian berlangsung. Penulis mengapresiasi bantuan seluruh rekan dosen dan mahasiswa di Program Studi Teknik Elektro serta Fakultas Pertanian Universitas Ihsan Gorontalo yang turut berkontribusi dalam proses kalibrasi sensor, pengujian perangkat keras, dan integrasi sistem monitoring berbasis Google Spreadsheet. Dukungan dari berbagai pihak tersebut telah memungkinkan penelitian ini terlaksana dengan baik dan menghasilkan kontribusi nyata dalam pengembangan teknologi Internet of Things (IoT) untuk sistem pertanian terpadu yang efisien dan berkelanjutan

REFERENSI

- [1] H. Basri, "Implementasi Sistem Irigasi Cerdas Berbasis IoT dan Machine Learning pada Pembibitan Pala di Papua Barat," *Jurnal Ilmiah Edutic: Pendidikan dan Informatika*, vol. 8, no. 2, pp. 89–96, 2022, doi: 10.21107/edutic.v8i2.12393.
- [2] I. Hermawan, D. A. Fachrudin, A. Setiawan, and N. T. Sulthanh, "Rancang Bangun Sistem Irigasi Cerdas Menggunakan Metode Fuzzy Rule-Based untuk Otomatisasi Pintu Air dan Pendeteksian Endapan," *Jurnal Komputer Terapan*, vol. 8, no. 2, pp. 152–161, 2022, doi: 10.35143/jkt.v8i2.5342.
- [3] D. Darto, A. Suprpto, and W. Dirgantara, "Pendampingan Penerapan IoT untuk Monitoring dan Kontrol Listrik untuk Petani Hidroponik Desa Kanigoro Malang," *Abdimas: Jurnal Pengabdian Masyarakat Universitas Merdeka Malang*, vol. 6, no. 3, pp. 315–325, 2021, doi: 10.26905/abdimas.v6i3.5107.
- [4] M. A. Kamali, K. Amiroh, H. Widyantara, and M. D. Hariyanto, "Pembuatan Smart Urban Farming Berbasis Internet of Things untuk Kelompok Tani," *Jurnal Inovasi Hasil Pengabdian Masyarakat (JIPEMAS)*, vol. 6, no. 2, pp. 201–214, 2023, doi: 10.33474/jipemas.v6i2.19289.
- [5] T. Bandara, W. Mudiyansele, and M. Raza, "Smart Farm and Monitoring System for Measuring the Environmental Condition using Wireless Sensor Network – IoT Technology in Farming," in *Proc. 5th Int. Conf. Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA)*, 2020, pp. 1–7, doi: 10.1109/CITISIA50690.2020.9371830.
- [6] P. N. Indah, Z. Munawar, R. Komalasari, D. W. Toro, and F. Ukri, "Prototipe Digital Farming System Untuk Kelompok Tani," *Darma Abdi Karya*, vol. 2, no. 1, pp. 21–30, 2023, doi: 10.38204/darmaabdikarya.v2i1.1350.
- [7] A. Prasetyo, A. Fajaryanto, Y. Litananda, A. R. Yusuf, M. B. Setyawan, and A. R. Rahmatika, "Irigasi Tanaman Agriculture dengan Logika Fuzzy Terintegrasi Internet of Things," in *Prosiding Seminar Nasional Sistem Informasi dan Teknologi (SISFOTEK)*, vol. 6, no. 1, pp. 141–144, 2022.
- [8] S. A. Shah, G. M. Lakho, H. A. Keerio, M. N. Sattar, G. Hussain, M. Mehdi, R. B. Vistro, E. A. Mahmoud, and H. O. Elansary, "Application of Drone Surveillance for Advanced Agriculture Monitoring by Android Application Using Convolution Neural Network," *Agronomy*, vol. 13, no. 7, Art. no. 1764, 2023, doi: 10.3390/agronomy13071764.
- [9] V. Jayakumar, A. B. K. Mohideen, M. H. Saeed, H. Alsulami, A. Hussain, and M. Saeed, "Development of Complex Linear Diophantine Fuzzy Soft Set in Determining a Suitable Agri-Drone for Spraying Fertilizers and Pesticides," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 9031–9041, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3239675.
- [10] T. Mursitan, M. W. Aninditya, and J. Nurcholis, "Optimizing Weed Control: A Study on the Influence of Drone Sprayer Altitude in Herbicide Application," *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem*, vol. 12, no. 1, pp. 1–8, 2024, doi: 10.21776/ub.jkpb.2024.012.01.01.
- [11] DFRobot, "Gravity: Analog Waterproof Capacitive Soil Moisture Sensor (SKU SEN0308)," DFRobot Wiki. [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Waterproof_Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0308. Accessed: Jan. 17, 2026.
- [12] Analog Devices (Maxim Integrated), "DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer," Datasheet, Rev. 6, Jul. 2019. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS18B20.pdf>. Accessed: Jan. 17, 2026.
- [13] Aosong (Guangzhou) Electronics Co., Ltd., "DHT11 Humidity & Temperature Sensor," Datasheet. [Online]. Available: <https://www.lcsc.com/datasheet/C117051.pdf>. Accessed: Jan. 17, 2026.
- [14] Google Developers, "Web Apps," Google Apps Script Documentation. [Online]. Available: <https://developers.google.com/apps-script/guides/web>. Accessed: Jan. 17, 2026.
- [15] M. Raj and M. Prahadeeswaran, "Revolutionizing agriculture: a review of smart farming technologies for a sustainable future," *Discover Applied Sciences*, vol. 7, Art. no. 937, 2025, doi: 10.1007/s42452-025-07561-6