JURNAL ELTEK
Vol. 24, No. 1, April 2026, hal. 50~59
p-ISSN: 1693 – 4024 | e-ISSN: 2355-0740
DOI: 10.33795/eltek.v24i1.9865

Implementasi sistem penyemprotan herbisida cerdas berbasis *wireless sensor network* untuk pertanian presisi

Nailul Muna[1], Norma Ningsih[2], Nanang Syahroni[3], Ekananda Sulistyo Putra[4], Muhammad Naufal Asyam Muflih[5], Muhamad Nur Afriza Farkhan[6]
e-mail: nailul@pens.ac.id, norma@pens.ac.id, nanang@pens.ac.id, ekanandaputra@ppns.ac.id, naufalasyam@te.student.pens.ac.id, farkhan@te.student.pens.ac.id
[1,2,3,5,6]Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia
[4]Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 10 Mei 2026
Direvisi 2 Juni 2026
Diterbitkan 23 Juni 2026

Kata kunci:

IoT
Pertanian Presisi
Raspberry Pi
Smart Spraying
Wireless Sensor Network

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan sistem penyemprotan herbisida otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Wireless Sensor Network* (WSN) untuk mendukung pertanian presisi. Sistem terdiri atas dua node penyemprotan yang dilengkapi Raspberry Pi 5, ESP32, IP Camera, sensor ultrasonik, sensor waterflow, relay, dan pompa penyemprot. Raspberry Pi digunakan sebagai *edge processing unit*, sedangkan ESP32 berfungsi sebagai pengendali sensor dan aktuator. Sistem menggunakan SSD-MobileNet-V2 FPNLite untuk mendeteksi keberadaan gulma sebagai mekanisme pendukung pengambilan keputusan penyemprotan otomatis. Seluruh data monitoring dikirimkan ke Firebase dan divisualisasikan melalui website secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata akurasi sensor ultrasonik setelah kalibrasi mencapai 97,53% pada Node 1 dan 97,59% pada Node 2, sedangkan sensor waterflow mencapai 95,94% pada Node 1 dan 97,43% pada Node 2. Pengujian komunikasi data menunjukkan rata-rata *latency* sebesar 1,9 detik. Selain itu, seluruh perangkat keras dan website monitoring berhasil beroperasi dengan baik selama pengujian sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mengintegrasikan proses monitoring, komunikasi data, dan penyemprotan herbisida secara otomatis

Keywords:

IoT
Precision Agriculture
Raspberry Pi
Smart Spraying
Wireless Sensor Network

ABSTRACT

An automatic herbicide spraying hardware system based on the Internet of Things (IoT) and Wireless Sensor Network (WSN) was developed to support precision agriculture. The system consists of two spraying nodes equipped with Raspberry Pi 5, ESP32, IP Camera, ultrasonic sensor, waterflow sensor, relay, and spraying pump. Raspberry Pi functions as the edge processing unit, while ESP32 serves as the sensor and actuator controller. The system utilizes SSD-MobileNet-V2 FPNLite to detect weeds as a supporting mechanism for automatic spraying decision-making. All monitoring data are transmitted to Firebase and visualized through a real-time monitoring website. Experimental results show that the average error of the calibrated ultrasonic sensor reached 2.47% on Node 1 and 2.41% on Node 2, while the waterflow sensor achieved 4.06% on Node 1 and 2.57% on Node 2. Data communication testing showed an average latency of 1.9 seconds. In addition, all hardware components and the monitoring website operated properly during system testing. The experimental results demonstrate that the developed system can integrate monitoring, data communication, and automatic herbicide spraying processes.

Penulis Korespondensi:
Nailul Muna,
Jurusan Teknik Elektro,
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya,
Jl. Raya ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur
Email: nailul@pens.ac.id

1. PENDAHULUAN

Sektor pertanian memiliki peran penting dalam mendukung ketahanan pangan dan perekonomian di Indonesia. Namun, produktivitas pertanian masih menghadapi berbagai tantangan, salah satunya adalah keberadaan gulma pada lahan pertanian. Gulma merupakan tanaman pengganggu yang dapat menurunkan hasil panen karena bersaing dengan tanaman utama dalam penyerapan unsur hara, air, cahaya matahari, dan ruang tumbuh . Selain itu, gulma juga dapat menjadi tempat berkembangnya hama dan penyakit tanaman sehingga berdampak pada penurunan kualitas hasil pertanian. Menurut Badan Pusat Statistik (BPS), luas panen padi di Indonesia pada tahun 2023 mengalami penurunan dibandingkan tahun sebelumnya, sehingga diperlukan inovasi teknologi untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan pertanian[1], [2].

Salah satu metode yang umum digunakan untuk pengendalian gulma adalah penyemprotan herbisida. Namun, proses penyemprotan pada sebagian besar lahan pertanian masih dilakukan secara manual dan menyeluruh sehingga menyebabkan penggunaan herbisida yang berlebihan, pemborosan biaya operasional, serta potensi pencemaran lingkungan. Selain itu, metode konvensional juga memiliki keterbatasan dalam efisiensi waktu dan ketepatan penyemprotan, terutama pada area pertanian yang luas. Oleh karena itu, diperlukan sistem penyemprotan herbisida yang mampu bekerja secara otomatis, tepat sasaran, dan dapat dipantau secara *real-time* [3], [4], [5].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *Wireless Sensor Network* (WSN) memberikan peluang besar dalam pengembangan sistem pertanian presisi. WSN memungkinkan beberapa node sensor bekerja secara terintegrasi untuk melakukan monitoring kondisi lahan dan komunikasi data secara nirkabel. Implementasi WSN pada bidang pertanian telah banyak digunakan untuk mendukung monitoring kelembaban tanah, kondisi lingkungan, serta komunikasi data antarperangkat secara *real-time*. Integrasi IoT dan WSN memungkinkan sistem pertanian memiliki kemampuan monitoring dan kontrol yang lebih efektif, khususnya pada sistem otomatisasi penyemprotan herbisida [6], [7], [8].

Selain sistem komunikasi dan monitoring, perkembangan teknologi *edge computing* juga memungkinkan implementasi pengolahan data secara langsung pada perangkat *embedded* seperti Raspberry Pi [9], [10]. Raspberry Pi memiliki kemampuan komputasi yang cukup baik untuk menjalankan sistem monitoring dan pengendalian perangkat keras secara *real-time* [11], [12], [13]. Pada penelitian ini, Raspberry Pi 5 digunakan sebagai *edge processing unit* yang bertugas mengelola komunikasi data, monitoring sistem, dan menerima hasil deteksi gulma berbasis deep learning. Sementara itu, ESP32 digunakan sebagai pengendali node untuk membaca sensor dan mengendalikan aktuator penyemprotan.

Penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem deteksi gulma menggunakan metode SSD-MobileNet-V2 FPNLite dan EfficientDet-D0 berbasis Raspberry Pi untuk mendukung pertanian cerdas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model SSD-MobileNet-V2 FPNLite mampu mencapai akurasi klasifikasi sebesar 92,8% pada implementasi berbasis Raspberry Pi. Namun, penelitian tersebut masih berfokus pada proses klasifikasi gulma dan belum membahas implementasi hardware sistem penyemprotan otomatis berbasis *Wireless Sensor Network* secara terintegrasi [14], [15].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini berfokus pada implementasi hardware sistem penyemprotan herbisida cerdas berbasis *Wireless Sensor Network* untuk pertanian presisi. Sistem yang dikembangkan terdiri atas dua node penyemprotan yang dilengkapi dengan Raspberry Pi 5, ESP32, IP Camera, sensor ultrasonik, sensor waterflow, relay, dan pompa penyemprot. Sistem dirancang untuk melakukan monitoring volume herbisida, pengendalian aktuator, komunikasi data antar node, serta monitoring real-time melalui website berbasis Firebase. Dengan adanya sistem ini, diharapkan proses penyemprotan herbisida dapat dilakukan secara lebih efisien, otomatis, dan tepat sasaran sehingga mendukung penerapan pertanian presisi yang lebih modern dan berkelanjutan.

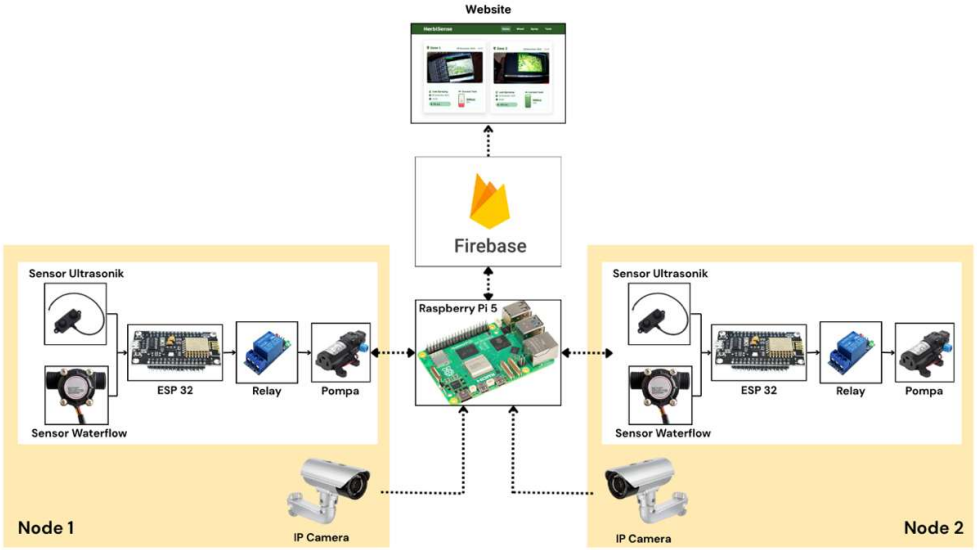
2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian pada sistem penyemprotan herbisida cerdas ini meliputi desain sistem dan alur kerja sistem yang dibangun.

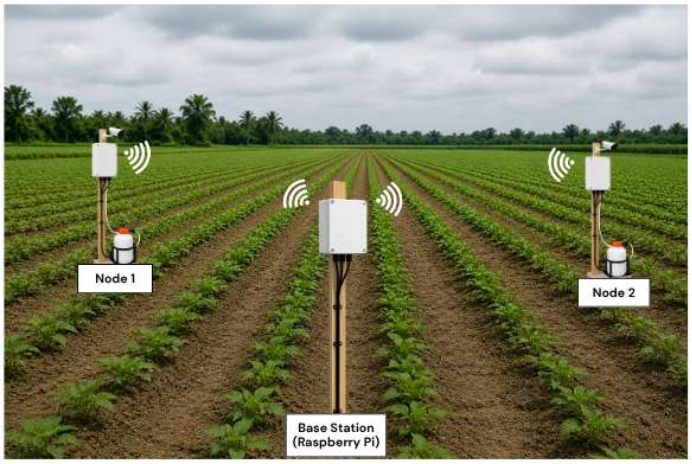
2.1. Desain Sistem

Penelitian ini mengembangkan hardware sistem penyemprotan herbisida cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Wireless Sensor Network* (WSN) untuk mendukung pertanian presisi. Sistem terdiri atas dua

node penyemprotan yang saling terhubung melalui jaringan nirkabel. Setiap node dilengkapi dengan Raspberry Pi 5, ESP32, IP Camera, sensor ultrasonik, sensor waterflow, relay, dan pompa penyemprot. Raspberry Pi 5 digunakan sebagai edge processing unit untuk menerima hasil deteksi gulma, mengelola komunikasi data, dan mengirimkan data monitoring ke Firebase. ESP32 berperan sebagai pengendali node yang bertugas melakukan akuisisi data sensor dan pengendalian aktuator. Sistem menggunakan SSD-MobileNet-V2 FPNLite sebagai mekanisme pendukung deteksi gulma untuk menentukan proses penyemprotan otomatis. Sensor ultrasonik digunakan untuk memonitor volume herbisida dalam tangki, sedangkan sensor waterflow digunakan untuk mengukur volume cairan herbisida yang disemprotkan. Seluruh data monitoring dikirimkan ke Firebase dan divisualisasikan melalui website secara real-time. Desain system penyemprotan herbisida ditampilkan pada Gambar 1.

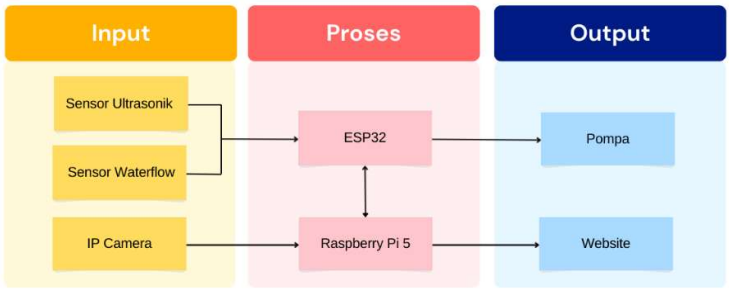


Gambar 1. Arsitektur sistem penyemprotan herbisida



Gambar 2. Ilustrasi implementasi sistem pada lahan pertanian

Gambar 2 menunjukkan ilustrasi penempatan perangkat sistem penyemprotan herbisida berbasis *Wireless Sensor Network* (WSN) pada lahan pertanian. Pada skenario ini, sistem terdiri atas satu Base Station berbasis Raspberry Pi dan dua node penyemprotan yang ditempatkan pada beberapa titik pengamatan. Setiap node dilengkapi dengan kamera, modul kontrol, tangki herbisida, dan sprayer yang digunakan untuk mendukung proses monitoring dan penyemprotan secara otomatis. Komunikasi data antara node dan Base Station dilakukan secara nirkabel sehingga data hasil pemantauan dapat diterima dan ditampilkan pada website monitoring secara real-time. Gambar ini disajikan sebagai ilustrasi skenario penerapan sistem di lingkungan pertanian dan tidak merepresentasikan hasil implementasi maupun pengujian lapangan yang dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 3. Diagram input, proses, dan output

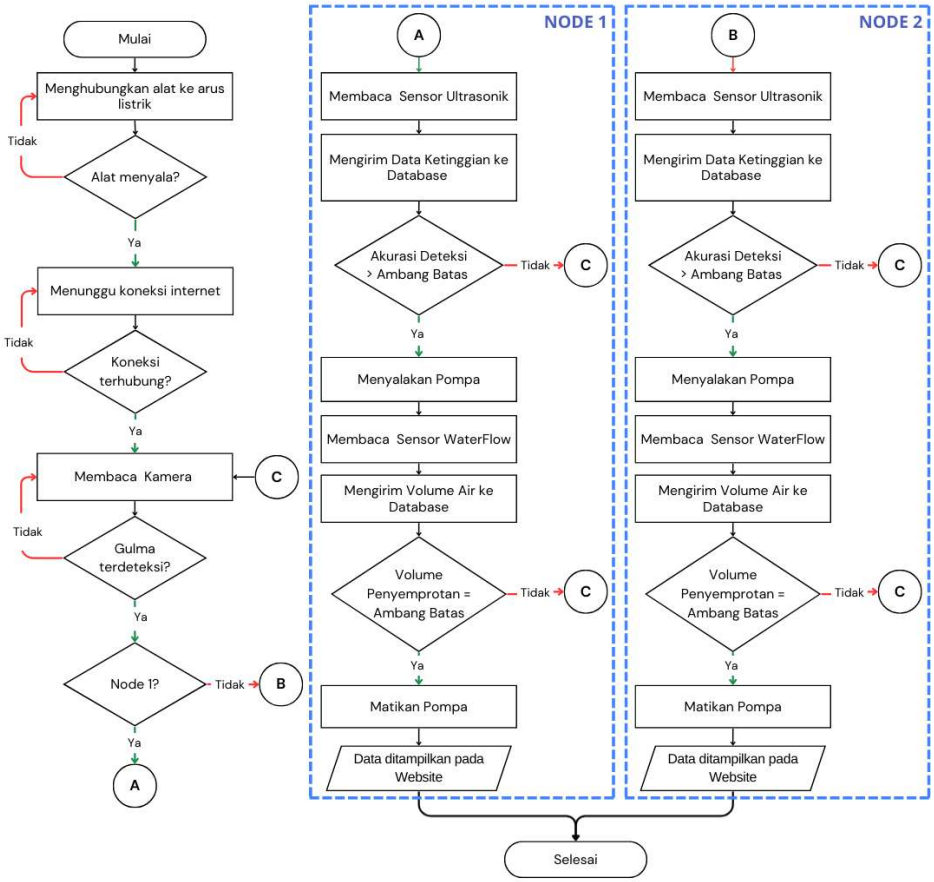
Gambar 3 menunjukkan blok diagram sistem penyemprotan herbisida cerdas yang terdiri atas tiga bagian utama yaitu input, proses, dan output. Pada bagian input, sistem menggunakan sensor ultrasonik untuk memonitor volume herbisida pada tangki, sensor waterflow untuk mengukur volume cairan herbisida yang disemprotkan, serta IP Camera untuk melakukan akuisisi citra area lahan. Data dari sensor dan kamera kemudian diproses menggunakan ESP32 dan Raspberry Pi 5. ESP32 berfungsi sebagai pengendali node yang bertugas membaca sensor dan mengendalikan aktuator, sedangkan Raspberry Pi 5 digunakan sebagai *edge processing* unit untuk menerima hasil deteksi gulma dan mengelola komunikasi data sistem. Hasil pemrosesan digunakan untuk mengendalikan pompa penyemprot secara otomatis serta menampilkan data monitoring pada website secara *real-time*. Integrasi antara sensor, *embedded system*, dan website monitoring memungkinkan sistem bekerja secara otomatis dan terhubung melalui jaringan *Internet of Things* (IoT).

2.2. Alur Kerja Sistem

Alur kerja sistem penyemprotan herbisida cerdas dirancang untuk mendukung proses monitoring dan penyemprotan otomatis secara real-time yang ditunjukkan pada Gambar 4. Alur kerja sistem penyemprotan herbisida otomatis berbasis Wireless Sensor Network yang terdiri atas dua node penyemprotan. Proses dimulai ketika perangkat terhubung ke sumber daya dan jaringan internet. Selanjutnya, kamera menangkap citra area lahan yang kemudian diproses oleh Raspberry Pi 5 menggunakan model deteksi citra untuk mendeteksi keberadaan gulma. Jika gulma terdeteksi, Raspberry Pi menentukan node penyemprotan yang sesuai berdasarkan area deteksi. Pada masing-masing node, ESP32 membaca sensor ultrasonik untuk memonitor volume herbisida dalam tangki dan mengirimkan data ke Raspberry Pi. Apabila hasil deteksi memenuhi ambang batas akurasi yang ditentukan, Raspberry Pi mengirimkan perintah ke ESP32 untuk mengaktifkan pompa penyemprot. Selama proses penyemprotan berlangsung, sensor waterflow mengukur volume herbisida yang dikeluarkan hingga mencapai batas yang ditentukan, kemudian pompa dimatikan secara otomatis. Selain pengendalian penyemprotan, Raspberry Pi juga mengirimkan data sensor dan hasil deteksi citra ke database Firebase untuk ditampilkan pada website monitoring secara real-time. Seluruh proses berlangsung secara berulang selama sistem aktif sehingga pengguna dapat memantau kondisi sistem dan riwayat penyemprotan secara terintegrasi.

Pada penelitian ini, pengujian sensor ultrasonik dan sensor waterflow dilakukan menggunakan 10 variasi volume acuan, yaitu 100 mL hingga 1000 mL dengan interval 100 mL. Data sensor dibaca dan dikirimkan oleh ESP32 menuju Raspberry Pi dan Firebase secara periodik setiap 5 detik untuk mendukung monitoring secara real-time. Sebelum digunakan pada sistem, sensor ultrasonik dan sensor waterflow dikalibrasi dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap volume referensi yang diukur menggunakan gelas ukur. Tingkat akurasi sensor dihitung berdasarkan perbandingan antara nilai hasil pembacaan sensor dan nilai referensi, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1). $V_{referensi}$ menunjukkan volume acuan yang diukur menggunakan gelas ukur (mL) dan V_{sensor} merupakan volume hasil pembacaan sensor (mL).

$$Akurasi\ (\%) = \left(1 - \left|\frac{V_{referensi} - V_{sensor}}{V_{referensi}}\right| \times 100\right) \quad (1)$$



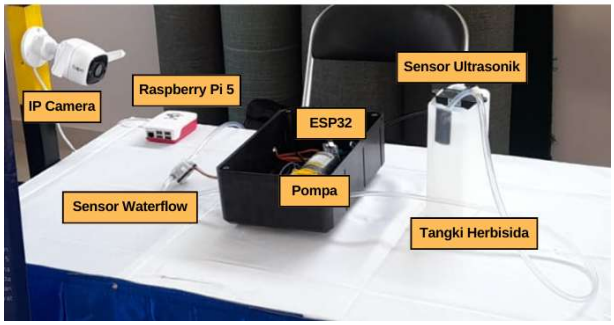
Gambar 4. Alur kerja sistem

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahap ini dilakukan implementasi dan pengujian sistem penyemprotan herbisida cerdas berbasis Wireless Sensor Network yang telah dirancang. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem yang mencakup implementasi hardware, implementasi website, pengujian sensor ultrasonik dan waterflow, pengujian komunikasi data, serta evaluasi fungsionalitas sistem secara keseluruhan.

3.1. Implementasi Hardware

Pada bagian ini akan menampilkan implementasi hardware yang menunjukkan konfigurasi perangkat keras yang digunakan dalam pengembangan sistem penyemprotan gulma otomatis berbasis deteksi citra dan komunikasi IoT yang ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 5. Implementasi Hardware

Gambar 5 menunjukkan seluruh komponen dirangkai dalam sebuah prototipe untuk dilakukan pengujian kinerja dan validasi sistem. Setiap perangkat memiliki peran fungsional yang saling terintegrasi dalam proses akuisisi data, pemrosesan, pengendalian aktuator, serta pengiriman informasi ke server. Secara

keseluruhan menampilkan hubungan fungsional antar perangkat keras yang digunakan dalam sistem. Integrasi antara IP Camera, Raspberry Pi 5, ESP32, sensor water flow, sensor ultrasonik, pompa, dan tangki herbisida memungkinkan sistem menjalankan proses deteksi gulma, pengendalian penyemprotan, serta pemantauan kondisi cairan secara otomatis dan terstruktur. Rangkaian perangkat keras ini menjadi dasar dari implementasi sistem penyemprotan gulma berbasis teknologi cerdas yang dikembangkan pada penelitian ini.

3.2. Implementasi Website

Tampilan keseluruhan website ditunjukkan pada Gambar 5 yang terdiri atas lima halaman utama, yaitu Dashboard, Weed Records Node 1, Weed Records Node 2, Spray Records, dan Tank Fill. Halaman Dashboard berfungsi sebagai pusat informasi utama yang menampilkan kondisi terkini setiap zona, meliputi hasil deteksi gulma terakhir, waktu monitoring, riwayat penyemprotan, serta sisa volume herbisida seperti pada Gambar 5(a). Halaman Weed Records menampilkan riwayat hasil deteksi gulma beserta timestamp dan gambar hasil deteksi pada masing-masing zona, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5(b) dan Gambar 5(c). Selanjutnya, halaman Spray Records pada Gambar 5(d) menampilkan riwayat tindakan penyemprotan otomatis yang meliputi waktu penyemprotan dan volume herbisida yang digunakan. Selain itu, halaman Tank Fill pada Gambar 5(e) digunakan untuk memonitor sisa volume herbisida pada tangki setiap zona. Informasi tersebut memungkinkan pengguna memantau kondisi sistem dan memastikan proses penyemprotan otomatis dapat berjalan secara optimal dan real-time.



(a) (b) (c) (d) (e)

Gambar 6. Tampilan Website (a) Dashboard; (b) Riwayat Hasil Deteksi Gulma pada Node 1; (c) Riwayat Hasil Deteksi Gulma pada Node 2; (d) Riwayat Penyemprotan; (e) Sisa Volume Herbisida

3.3. Pengujian Hardware

3.3.1. Pengujian Sensor Ultrasonik

Pada bagian ini menyajikan hasil pengujian sensor ultrasonik dalam mengukur volume cairan pada tangki herbisida**.** Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi hasil sensor ultrasonik pada Node 1 dan Node 2 yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Sensor Ultrasonik Node 1 dan Node 2

No	Volume Acuan (mL)	Node 1		Node 2	
		Output Sensor (mL)	Akurasi (%)	Output Sensor (mL)	Akurasi (%)
1	100	98	98,00%	103	97,00%
2	200	205.7	97,15%	195	97,50%
3	300	303	99,00%	305	98,33%
4	400	414	96,50%	388	97,00%
5	500	458	91,60%	510	98,00%
6	600	608	98,67%	585	97,50%
7	700	711	98,43%	709	98,57%
8	800	790	98,75%	823	96,00%
9	900	913	98,56%	891	99,00%
10	1000	1013.8	98,62%	970	97,00%
Rata-rata		—	**97,53%**	—	**97,59%**

Berdasarkan hasil pengujian, sensor waterflow pada kedua node menunjukkan performa pengukuran yang baik dengan rata-rata akurasi sebesar 97,53% pada Node 1 dan 97,59% pada Node 2. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu mengukur volume penyemprotan herbisida secara cukup akurat dan stabil pada berbagai variasi volume pengujian. Secara keseluruhan, sensor waterflow layak digunakan untuk mendukung monitoring volume penyemprotan pada sistem penyemprotan herbisida otomatis berbasis WSN.

3.3.2. Pengujian Sensor Waterflow

Pengujian sensor waterflow dilakukan dengan memberikan volume acuan tertentu (dalam mL) sebagai nilai referensi, kemudian membandingkannya dengan output sensor waterflow. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor Waterflow

No	Volume Acuan (mL)	Node 1		Node 2	
		Output Sensor (mL)	Akurasi (%)	Output Sensor (mL)	Akurasi (%)
1	100	120	80,00%	104	96,00%
2	200	198	99,00%	205	97,50%
3	300	287	95,67%	292	97,33%
4	400	391	97,75%	386	96,50%
5	500	510	98,00%	519	96,20%
6	600	615	97,50%	587	97,83%
7	700	715	97,86%	711	98,43%
8	800	811	98,63%	791	98,88%
9	900	880	97,78%	921	97,67%
10	1000	1028	97,20%	980	98,00%
Rata-rata		—	**95,94%**	—	**97,43%**

Berdasarkan hasil pengujian, sensor waterflow pada Node 1 menghasilkan rata-rata akurasi sebesar 95,94%, sedangkan Node 2 mencapai 97,43%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu melakukan pengukuran volume penyemprotan dengan tingkat akurasi yang cukup baik pada berbagai variasi volume pengujian.

3.4. Pengujian Komunikasi Data

3.4.1. Pengujian Delay Pengiriman Data Hasil Deteksi

Pada bagian ini menampilkan hasil pengukuran *delay* pengiriman data dari Raspberry Pi ke Firebase pada dua Node kamera. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui performa komunikasi data terutama terkait kecepatan transfer data dan konsistensi waktu respons. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian *Delay* Pengiriman Data Hasil Deteksi Node 1 dan Node 2

Percobaan Ke-	Delay Node 1 (detik)	Delay Node 2 (detik)
1	1	2
2	3	1
3	3	2
4	1	3
5	3	1
6	1	1
7	1	2
8	1	2
9	4	2
10	1	3
Rata-rata	**1,9**	**1,9**

Berdasarkan Tabel 3, delay komunikasi memiliki nilai minimum sebesar 1 detik dan maksimum sebesar 4 detik pada kedua node dengan rata-rata 1,9 detik. Variasi delay yang relatif kecil menunjukkan bahwa komunikasi data antara Raspberry Pi dan Firebase berlangsung secara stabil. Nilai delay tersebut masih memadai untuk mendukung aplikasi monitoring dan pengendalian penyemprotan herbisida secara real-time.

3.4.2. Pengujian Delay Tindakan Penyemprotan Herbisida

Pengujian *Delay* tindakan penyemprotan herbisida dilakukan untuk mengukur waktu respons sistem mulai proses deteksi gulma oleh Raspberry Pi sampai tindakan penyemprotan yang di tampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengujian delay penyemprotan herbisida Node 1 dan Node 2

Percobaan Ke-	Delay Node 1 (menit)	Delay Node 2 (menit)
1	4	2
2	2	1
3	1	4
4	3	2
5	4	2
6	2	1
7	3	4
8	1	6
9	4	2
10	0	2
Rata-rata	**2,4**	**2,6**

Berdasarkan hasil pengujian delay tindakan penyemprotan herbisida, diperoleh rata-rata delay sebesar 2,4 menit pada Node 1 dan 2,6 menit pada Node 2. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan proses penyemprotan secara otomatis dalam waktu yang relatif stabil setelah proses deteksi gulma dilakukan. Variasi delay pada beberapa percobaan dipengaruhi oleh kondisi komunikasi data, waktu pemrosesan sistem, serta respons perangkat aktuator saat menerima perintah penyemprotan. Secara keseluruhan sistem masih mampu bekerja secara real-time dan terintegrasi.

3.5. Pengujian Fungsionalitas Sistem

3.5.1. Pengujian Fungsionalitas

Pada bagian ini menyajikan hasil pengujian fungsionalitas hardware yang digunakan dalam sistem penyemprotan gulma otomatis dan *Internet of Things* (IoT). Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengujian fungsionalitas hardware

No.	Parameter Uji	Kriteria Keberhasilan	Hasil Pengujian	Status
1.	Kemampuan kendali dan komunikasi	ESP32 mampu membaca sensor, mengendalikan relay, dan mengirim data	Seluruh fungsi berjalan normal	Valid
2.	Pengukuran volume herbisida	Sensor ultrasonik mampu mengukur volume herbisida	Pengukuran berhasil dilakukan	Valid
3.	Pengukuran volume keluaran herbisida	Sensor waterflow mampu mengukur volume penyemprotan	Pengukuran berhasil dilakukan	Valid
4.	Pengendalian aktuator	Relay mampu mengendalikan pompa sesuai perintah	Pompa aktif dan nonaktif sesuai perintah	Valid
5.	Keluaran cairan Herbisida	Pompa mampu menyemprotkan herbisida	Aliran herbisida berjalan normal	Valid
6	Stabilitas catu daya	Power supply mampu menyuplai daya sistem	Tegangan dan arus stabil	Valid

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5, seluruh parameter yang diuji menunjukkan status valid dengan tingkat keberhasilan sebesar 100%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki stabilitas operasional yang baik, dimana proses pembacaan sensor, komunikasi data, pengendalian aktuator, penyemprotan herbisida, dan penyediaan daya dapat berjalan sesuai dengan fungsi yang dirancang.

3.5.2. Pengujian Fungsionalitas Website

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa setiap menu dan fitur pada Website dapat menampilkan data yang diterima dari Firebase sesuai dengan desain sistem. Hasil pengujian fungsionalitas website ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pengujian fungsionalitas website

No.	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Kesimpulan
1.	Pengguna membuka Tab Home.	Menampilkan data volume tangki saat ini, last spraying, dan gambar gulma terbaru dari Firebase diperbarui dan divisualisasikan secara real-time.	Valid
2.	Pengguna membuka Tab Weed Camera 1	Menampilkan tabel yang berisi semua riwayat gambar deteksi gulma yang bersumber dari CAM_1, diurutkan dari waktu yang terbaru.	Valid
3.	Pengguna membuka Tab Weed Camera 2	Menampilkan tabel yang berisi semua riwayat gambar deteksi gulma yang bersumber dari CAM_2, diurutkan dari waktu yang terbaru.	Valid
4.	Pengguna membuka Tab Spray.	Menampilkan dua tabel riwayat (Zone 1 dan Zone 2) yang memuat semua catatan volume penyemprotan, diurutkan dari yang terbaru.	Valid
5.	Pengguna membuka Tab Tank.	Menampilkan catatan sisa herbisida pada Tangki (TANK_1 dan TANK_2).	Valid

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 6, seluruh fitur pada antarmuka Website dapat berfungsi sesuai dengan hasil yang diharapkan. Hal ini menunjukkan bahwa sinkronisasi data antara perangkat keras dan Website berjalan dengan baik.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan hardware sistem penyemprotan herbisida cerdas berbasis Wireless Sensor Network untuk mendukung pertanian presisi. Sistem yang dikembangkan mampu

mengintegrasikan Raspberry Pi 5, ESP32, sensor ultrasonik, sensor waterflow, IP Camera, dan website monitoring secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor ultrasonik dan sensor waterflow memiliki tingkat akurasi yang baik setelah proses kalibrasi, dengan rata-rata akurasi di atas 95%. Selain itu, sistem komunikasi data dan mekanisme penyemprotan otomatis mampu bekerja secara stabil dengan rata-rata delay penyemprotan sebesar 2,4 menit pada Node 1 dan 2,6 menit pada Node 2. Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian, sistem yang dikembangkan mampu mendukung proses monitoring dan penyemprotan herbisida secara otomatis, real-time, dan terintegrasi

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Elektronika Negeri Surabaya yang telah memberikan dukungan pendanaan pada penelitian ini melalui program penelitian lokal sehingga penelitian dan pengembangan sistem dapat terlaksana dengan baik.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] E. Y. Dewi, E. Yuliani, and B. Rahman, "Analisis Peran Sektor Pertanian Terhadap Pertumbuhan Perekonomian Wilayah," *Jurnal Kajian Ruang*, vol. 2, no. 2, p. 229, 2022, doi: 10.30659/jkr.v2i2.20961.

[2] H. Tazkiyya Fitriani, A. Syarbaini, and U. Djuanda Bogor Korespondensi, "Analisis Peramalan Jumlah Produksi Padi Di Jawa Barat Menggunakan Metode Single Exponential Smoothing," 2024.

[3] Guntur and Muh. Agus, "Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Penyemprotan Gulma Rumput Padi Berbasis Android," vol. 12, no. 1, pp. 1–9, 2022.

[4] M. Darbyshire, A. Salazar-Gomez, J. Gao, E. I. Sklar, and S. Parsons, "Towards practical object detection for weed spraying in precision agriculture," *Front. Plant Sci.*, vol. 14, Nov. 2023, doi: 10.3389/fpls.2023.1183277.

[5] B. Liu and R. Bruch, "Weed Detection for Selective Spraying: a Review," *Current Robotics Reports*, vol. 1, no. 1, pp. 19–26, 2020, doi: 10.1007/s43154-020-00001-w.

[6] N. Ambarwati, "Analisis Implementasi Wireless Sensor Network (WSN) pada Smart Agriculture untuk Pemantauan Tanaman: Kajian Literatur," *Karapan Network Journal*, vol. I, No.I, 2025, doi: 10.20473/KNJ.I.I.286-307.

[7] N. H. Titiani and N. M. Apriyani, "Pemanfaatan IoT berbasis WSN untuk sistem irigasi cerdas yang efisien dan hemat air di tingkat desa," *Karapan Network Journal*, vol. I, No.I, 2025, doi: 10.20473/KNJ.X.X.47-58.

[8] A. Maulana and A. Rosyid, "Desain Jaringan Sensor Nirkabel Berbasis ESP32 dengan Adaptasi Dinamis terhadap Gangguan Lingkungan untuk Monitoring Presisi," *Karapan Network Journal*, vol. I, No.I, 2025, doi: 10.20473/KNJ.X.X.36-46.

[9] P. Dhiman, A. Kaur, Y. Hamid, E. Alabdulkreem, H. Elmannai, and N. Ababneh, "Smart Disease Detection System for Citrus Fruits Using Deep Learning with Edge Computing," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 5, Mar. 2023, doi: 10.3390/su15054576.

[10] M. C. Fariña García, V. L. De Nicolás De Nicolás, J. L. Yagüe Blanco, and J. L. Fernández, "Semantic network analysis of sustainable development goals to quantitatively measure their interactions," *Environ. Dev.*, vol. 37, no. October, 2021, doi: 10.1016/j.envdev.2020.100589.

[11] Faizal Rahmansyah, Prihadi Murdiyat, and Rusda, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Pertanian Cerdas Berbasis LoRa Untuk Pemantauan Kondisi Persawahan Secara Real-Time," *PoliGrid*, vol. 6, no. 1, Jun. 2025, doi: 10.46964/poligrid.v6i1.62.

[12] I. A. Pratama, "PERBANDINGAN PEMROSESAN KINERJA SERVER RASPBERRY DAN PC UNTUK OPTIMALISASI SMART FARMING BERBASIS IOT," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i1.3930.

[13] L. Patria and A. Sambas, "Image Processing Technology for Edge Detection Based on Vision and Raspberry Pi," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1115, no. 1, p. 012044, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1115/1/012044.

[14] Nailul Muna, Norma Ningsih, Nanang Syahroni, Abd. Malik Syamlan, Vina Larasati, and Karimatun Nisa', "Implementasi Algoritma EfficientDet-D0 dan SSD-MobileNet-V2 FPNLite untuk Sistem Deteksi Gulma," *Indonesian Journal of Computer Science*, vol. 13, no. 1, pp. 1324–1333, 2024, doi: 10.33022/ijcs.v13i1.3723.

[15] Nailul Muna, Nanang Syahroni, Karimatun Nisa, Natty Novia Ramadhani, and Dimas Ade Firmanda, "Perancangan Sistem Penyemprotan Gulma Otomatis Berdasarkan Deteksi Citra Gulma Berbasis IoT," *The Indonesian Journal of Computer Science*, vol. 13, no. 6, Dec. 2024, doi: 10.33022/ijcs.v13i6.4550.