

Rancang Bangun Alat Penyemprotan Pestisida Organik Dalam Perkebunan Cabai Menggunakan Tenaga Surya

Rifqi Ahmad Afandi^{1*}, Sandy Ikhwanul Attar², Anivan Aditia³, MS Hendriyawan A.⁴,
Ikrima Alfi⁵

¹²³⁴⁵Universitas Teknologi Yogyakarta, Indonesia

Jl. Siliwangi, Jombor Lor, Sendangadi, Kec. Mlati, Kabupaten Sleman, DI Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding author e-mail : rifqiahmadafandi@gmail.com

ABSTRAK

Perkebunan cabai di Indonesia berkontribusi signifikan pada sektor hortikultura, tetapi sering menghadapi tantangan penggunaan pestisida yang tidak efisien, yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Penggunaan pestisida yang tidak terkontrol dapat menimbulkan dampak buruk terhadap lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem penyemprotan pestisida otomatis berbasis tenaga surya dan *Internet of Things* (IoT). Sistem ini menggunakan panel surya sebagai sumber energi utama, sensor ultrasonik untuk deteksi cairan, dan mikrokontroler WeMos D1 R1 yang dikendalikan melalui protokol MQTT untuk monitoring jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem penyemprotan pestisida otomatis beroperasi secara efisien dalam kondisi cuaca yang mendukung. Rata-rata tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan panel surya selama tujuh hari percobaan masing-masing mencapai 13 Volt, 0,289 Ampere, dan 3,96 Watt. *Fluktuasi output* terjadi akibat variasi kondisi cuaca di Yogyakarta, seperti cerah, mendung, dan hujan, dengan *output* tertinggi tercatat pada hari ketujuh. Selain itu, akurasi sensor ultrasonik HY-SR04 dan ketepatan respon sensor mencapai tingkat keakuratan 100%, menunjukkan kinerja optimal alat sesuai desain. Sistem ini menawarkan solusi berkelanjutan bagi petani dengan efisiensi yang tinggi, meskipun masih memerlukan pengembangan energi cadangan untuk mengurangi ketergantungan pada cahaya matahari.

Kata kunci : Penyemprotan Pestisida, Otomatisasi, Tenaga Surya, Internet of Things, Pertanian.

ABSTRACT

Chili plantations in Indonesia contribute significantly to the horticultural sector but often face challenges in inefficient pesticide use, which negatively impacts the environment. Uncontrolled pesticide application can cause serious environmental harm. Therefore, this study focuses on developing an automatic pesticide spraying system powered by solar energy and integrated with the Internet of Things (IoT). The system utilizes solar panels as the primary energy source, ultrasonic sensors for liquid detection, and a WeMos D1 R1 microcontroller controlled via the MQTT protocol for remote monitoring. The testing results indicate that the automatic pesticide spraying system operates efficiently under favorable weather conditions. Over seven days of testing, the solar panel produced an average voltage, current, and power output of 13 Volts, 0.289 Amperes, and 3.96 Watts, respectively. Output fluctuations occurred due to varying weather conditions in Yogyakarta, including sunny, cloudy, and rainy days, with the highest output recorded on the seventh day. Additionally, the ultrasonic sensor HY-SR04 demonstrated a 100% accuracy rate in liquid level detection and response precision, confirming the system's optimal performance as designed. This system offers a sustainable solution for farmers with high efficiency, although further development of backup energy sources is needed to reduce dependency on sunlight.

Keywords: Pesticide Spraying, Automation, Solar Energy, Internet of Things, Agriculture

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan sektor pertanian di Indonesia sangat erat kaitannya dengan komoditas hortikultura seperti cabai. Sebagai salah satu tanaman yang memiliki nilai ekonomi tinggi, cabai membutuhkan perawatan intensif agar hasil panen dapat optimal

[1][2]. Salah satu masalah yang sering dihadapi adalah penggunaan pestisida yang tidak efisien, terutama pada perkebunan cabai, yang merupakan salah satu komoditas utama di Indonesia [3][4][5]. Penggunaan pestisida kimia secara berlebihan tidak hanya berdampak buruk bagi lingkungan, seperti pencemaran tanah dan air, tetapi juga dapat

mempengaruhi kesehatan konsumen akibat residu berbahaya yang tersisa pada hasil panen [6][7][8].

Metode penyemprotan manual membutuhkan tenaga kerja besar dan sering kali tidak efisien, terutama di daerah terpencil dengan akses teknologi terbatas [9][10]. Oleh karena itu, muncul kebutuhan untuk menciptakan metode penyemprotan pestisida yang lebih ramah lingkungan dan efisien, terutama di tengah tantangan yang dihadapi oleh para petani di daerah terpencil yang minim akses listrik [11][12].

Seiring perkembangan teknologi, penerapan energi terbarukan dan otomatisasi di sektor pertanian menjadi semakin relevan. Teknologi tenaga surya dan *Internet of Things* (IoT) merupakan solusi potensial untuk mengatasi permasalahan efisiensi dan pengendalian pestisida. Tenaga surya, sebagai sumber energi terbarukan, memiliki keunggulan karena melimpah di Indonesia [13][14][15]. Sementara itu, IoT memungkinkan sistem pertanian dikendalikan dan dipantau secara otomatis dan jarak jauh, memberikan kemudahan bagi petani yang beroperasi di daerah terpencil [16][17][18].

Penerapan teknologi ini tidak hanya menawarkan solusi yang lebih efisien dari segi biaya dan energi, tetapi juga memungkinkan otomatisasi proses pertanian. Sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja manual. Berdasarkan kebutuhan ini, penelitian tentang alat penyemprotan pestisida otomatis berbasis energi surya menjadi relevan untuk dikembangkan [19][20].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem penyiraman dan penyemprotan otomatis yang menggunakan tenaga surya dan IoT. Penelitian terdahulu mengembangkan sistem penyiraman otomatis berbasis metode *Simple Additive Weighting* (SAW) yang diterapkan pada tanaman cabai [21]. Di sisi lain, penelitian lain menunjukkan pemanfaatan tenaga surya untuk irigasi otomatis, yang mampu mengurangi ketergantungan pada energi fosil serta memberikan solusi ramah lingkungan [22][23]. Temuan lain juga mengembangkan sistem penyemprotan pestisida otomatis berbasis IoT dengan menggunakan metode *Fuzzy Tsukamoto*, yang berhasil meningkatkan efisiensi penggunaan pestisida di lahan pertanian yang lebih luas [24][25].

Meskipun banyak inovasi otomatisasi pertanian, integrasi penuh teknologi IoT dan tenaga surya untuk sistem penyemprotan pestisida pada perkebunan kecil di daerah terpencil Indonesia masih minim dieksplorasi [26][27]. Penelitian ini bertujuan mengatasi kesenjangan tersebut dengan mengembangkan sistem penyemprotan pestisida organik otomatis berbasis tenaga surya dan IoT, yang efisien, hemat energi, dan ramah lingkungan. Sistem ini diharapkan dapat memberikan solusi yang efisien, hemat energi, dan ramah lingkungan bagi petani di

daerah terpencil, di mana sumber daya listrik dan tenaga kerja terbatas.

Penelitian ini juga berkontribusi pada pengembangan pertanian berkelanjutan di Indonesia, dengan meminimalkan dampak lingkungan dari penggunaan pestisida kimia dan mengurangi biaya operasional petani. Sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini dirancang untuk mengoptimalkan penggunaan pestisida secara otomatis, sehingga pestisida hanya disemprotkan sesuai kebutuhan tanaman. Penelitian ini diharapkan tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga memberikan solusi jangka panjang untuk pengelolaan lahan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini mengembangkan sistem penyemprotan pestisida organik otomatis berbasis tenaga surya dan IoT yang mampu memenuhi kebutuhan efisiensi penggunaan pestisida di perkebunan cabai. Sistem ini dirancang untuk membantu petani dalam mengelola penyemprotan pestisida secara otomatis, sehingga penggunaan pestisida lebih terukur dan hemat. Selain itu, melalui integrasi dengan teknologi IoT, petani dapat memantau dan mengendalikan proses penyemprotan dari jarak jauh menggunakan perangkat lunak yang terhubung pada sistem, memberikan fleksibilitas dan kemudahan operasional, terutama bagi petani di daerah terpencil dengan akses terbatas terhadap sumber energi konvensional.

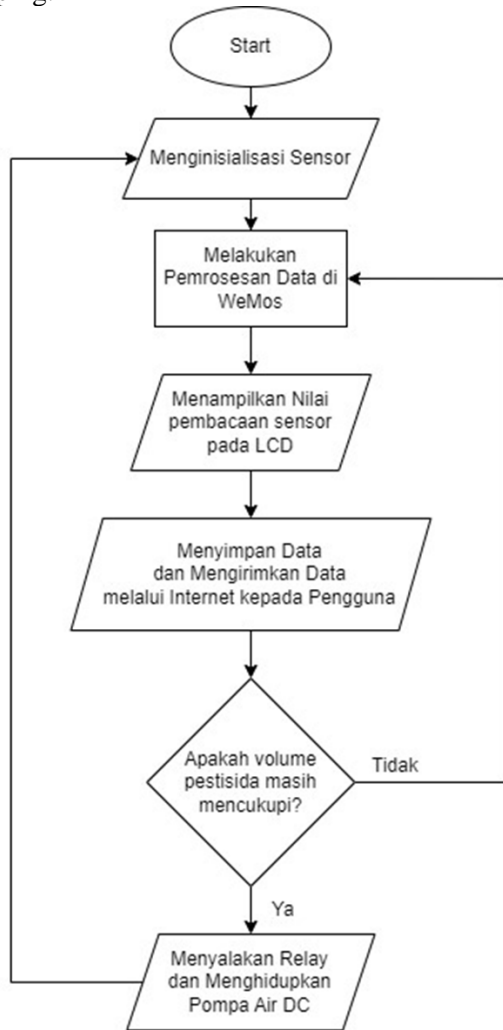
II. METODE

A. Rancangan Sistem

Sistem penyemprotan pestisida otomatis dirancang dengan memanfaatkan teknologi tenaga surya sebagai sumber energi utama dan teknologi *Internet of Things* (IoT) untuk pengendalian jarak jauh. Komponen utama yang digunakan dalam sistem meliputi panel surya, mikrokontroler WeMos D1 R1, sensor ultrasonik HY-SR04, dan pompa air DC. Sensor ultrasonik digunakan untuk mendeteksi tingkat cairan pestisida dalam tangki, sementara mikrokontroler bertugas mengolah data sensor untuk mengaktifkan pompa air secara otomatis. Data pemantauan juga dikirimkan melalui protokol MQTT, memungkinkan pengguna memantau status sistem secara *real-time* melalui perangkat mobile. Desain sistem ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dan akurasi penyemprotan, dengan meminimalkan intervensi manual serta memanfaatkan sumber daya terbarukan untuk mendukung praktik pertanian berkelanjutan.

Gambar 1 menunjukkan penggunaan sensor ultrasonik sebagai satu-satunya sensor untuk mendeteksi tingkat cairan pestisida. Sensor ini akan mendeteksi tingkat pestisida dalam penyimpanan lalu hasil dari pembacaan sensor

akan dikirimkan ke mikrokontroler WeMos D1 R1 untuk dilakukan pemrosesan data. Hasil dari pemrosesan data akan ditampilkan ke dalam LCD dan akan dikirimkan kepada pengguna melalui Internet. Apabila tingkat pestisida masih dalam kondisi cukup maka pengguna dapat menyalakan pompa melalui perangkatnya dan pompa akan otomatis menyala. Sistem ini dirancang untuk berjalan secara terus-menerus melalui proses looping.

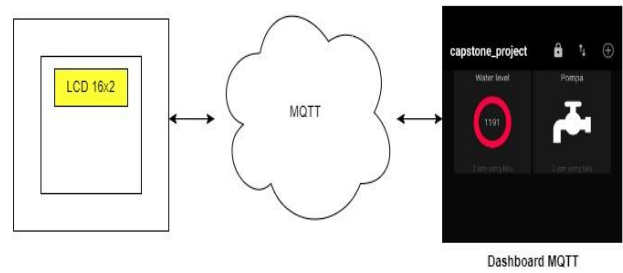


Gambar 1. Rancangan sistem

B. Arsitektur Utama Sistem

Sistem utama yang akan diterapkan pada alat mempunyai gambaran kecil seperti yang tertampil pada Gambar 2 di bawah. Dari tiga gambaran blok di bawah, ketiganya akan saing berkomunikasi. *Hardware* akan menerima data dari hasil pembacaan sensor ultrasonic, kemudian data tersebut akan diproses dan hasil keluaran dari *hardware* selanjutnya akan ditampilkan ke dalam LCD. Setelah itu data akan dikirimkan menuju server MQTT untuk sinkronisasi data, lalu apabila data tersebut sudah masuk dan sudah tersinkronisasi maka data tersebut akan dikirimkan ke *dashboard* MQTT dan akan tertampil untuk

status perubahan yang terbaru pada ponsel pengguna.

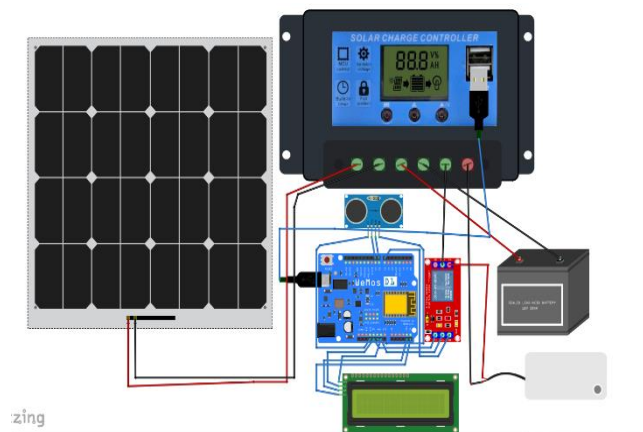


Gambar 2. Arsitektur utama sistem

C. Rancangan Elektronik

Penelitian ini mempunyai rancangan untuk mengembangkan sistem penyemprotan pestisida organik berbasis tenaga surya dan teknologi IoT seperti yang ditampilkan dalam Gambar 3. Alat ini dirancang menggunakan WeMos D1 R1 sebagai mikrokontroler, yang mengontrol proses penyemprotan melalui konektivitas *Internet of Things* (IoT) dengan protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). Sistem ini juga memanfaatkan energi surya yang disimpan dalam baterai sebagai sumber tenaga utama untuk mengoperasikan pompa air. Penggunaan sensor ultrasonik membantu mendeteksi level cairan pestisida di dalam tangki, sedangkan layar *Liquid Crystal Display* (LCD) digunakan untuk memberikan informasi status sistem kepada pengguna.

Panel surya berfungsi mengonversi energi matahari menjadi energi listrik yang disimpan dalam aki (baterai) melalui *Solar Charge Controller* (SCC). Pengaturan arus listrik dari panel surya ke baterai diatur oleh SCC untuk menghindari *overcharging*, menjaga agar sistem tetap stabil dan aman. Desain sistem dirancang untuk mengurangi intervensi manual dari petani, sehingga mereka dapat memantau dan mengendalikan alat ini dari jarak jauh menggunakan perangkat *mobile*.



Gambar 3. Diagram blok sistem

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Rancang Bangun Alat Penyemprotan Pestisida Otomatis

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem penyemprotan pestisida organik otomatis berbasis tenaga surya yang dikontrol menggunakan teknologi IoT. Alat yang dibangun terdiri dari panel surya sebagai sumber daya utama, mikrokontroler WeMos D1 R1 untuk pengendalian sistem, sensor ultrasonik untuk mendeteksi ketinggian cairan pestisida, dan pompa air DC untuk penyemprotan. Sistem ini juga dilengkapi dengan LCD untuk menampilkan status sistem dan modul MQTT yang memungkinkan monitoring dan kontrol jarak jauh melalui aplikasi mobile.

Berikut disajikan hasil dari pembuatan alat:

1. **Error! Reference source not found.** menunjukkan bagian luar dari kotak pelindung perangkat. Pada *box shield* ini terdapat sebuah layar LCD pada bagian depan yang digunakan untuk menampilkan keadaan pada saat perangkat digunakan.
2. Gambar 5 menunjukkan bagian dalam *box shield*, yang berisi komponen elektronik seperti mikrokontroler WeMos D1 R1, LCD dan kabel penghubung. Komponen ini dirancang dan disusun untuk menjalankan fungsi utama alat.



Gambar 4. Tampak luar *box shield*



Gambar 5. Tampak dalam *box shield*

B. Pengujian dan Pembahasan Hasil

Berikut merupakan hasil dan pembahasan dari pengujian alat yang telah dilakukan:

1. Pengujian Prototipe Alat Penyemprotan Pestisida Otomatis

Berikut disajikan hasil dari pengujian alat yang telah dilakukan:

- a. Gambar 6 menunjukkan tampilan depan prototipe sistem penyemprotan pestisida otomatis berbasis tenaga surya. Pada panel kontrol terdapat *box shield* dari mikrokontroler, modul sensor ultrasonik, aki, dan lampu indikator operasi yang terpasang di box panel untuk melindungi komponen dari paparan cuaca dan lingkungan.
- b. Gambar 7 menunjukkan pengujian prototipe alat di lapangan. Alat diposisikan di area perkebunan untuk memantau dan mengukur kinerjanya dalam kondisi lingkungan nyata, termasuk intensitas cahaya matahari dan kondisi cuaca.
- c. Gambar 8 menunjukkan pemasangan *nozzle* penyemprotan di area perkebunan cabai. *Nozzle* ini dirancang untuk mendistribusikan pestisida secara merata ke tanaman, memastikan efisiensi penggunaan pestisida.



Gambar 6. Tampak depan alat



Gambar 7. Tampak samping pengujian alat

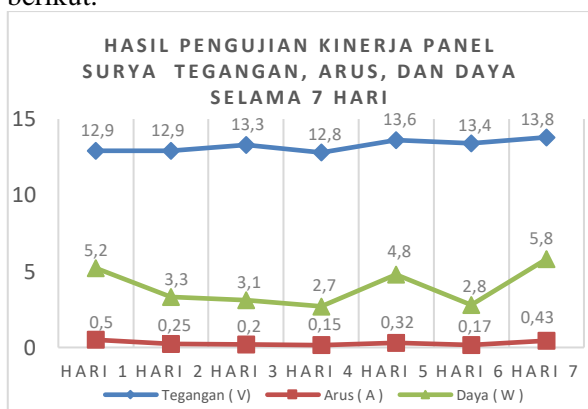


Gambar 8. Pemasangan nozzle penyemprotan

2. Pengujian Kinerja Panel Surya pada Prototipe Alat Penyemprotan Pestisida Otomatis

Pengujian dilakukan untuk mengukur kinerja alat dalam berbagai kondisi cuaca, meliputi cahaya matahari penuh, mendung, serta kondisi campuran (transisi dari cerah ke mendung). Setiap pengukuran dilakukan dalam rentang waktu 30 menit hingga 1 jam. Kondisi ini dipilih untuk merepresentasikan situasi nyata yang mungkin dihadapi alat selama pengoperasian di lapangan.

Panel Surya yang digunakan memiliki kinerja cukup stabil. Pengujian ini dilakukan selama 7 hari dengan mengukur hasil dari tegangan, daya dan arus yang dihasilkan oleh panel surya. Hasil pengujian dari kinerja panel surya dapat dilihat dalam grafik pada Gambar 9 berikut.



Gambar 9. Hasil pengujian kinerja panel surya

Dari hasil pengujian dengan menguji dan mengambil data sampel selama 7 hari maka didapatkan hasil sebagai berikut:

- Jumlah tegangan tertinggi yang didapatkan: 13,8 Volt
- Jumlah arus tertinggi yang didapatkan: 0,5 Ampere

- Jumlah daya tertinggi yang didapatkan: 5,8 Watt
- Waktu dengan hasil output tertinggi: hari ke-7 percobaan

Rangkuman dari hasil pengujian panel surya disajikan dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Ringkasan hasil pengujian kinerja panel surya

Hari	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
1	12,9	0,5	5,2
2	12,9	0,25	3,3
3	13,3	0,2	3,1
4	12,8	0,15	2,7
5	13,6	0,32	4,8
6	13,4	0,17	2,8
7	13,8	0,43	5,8
Rata-rata	13,3 V	0,2886 A	3,9571 W

Rata-rata yang dihasilkan selama 7 hari percobaan dapat disimpulkan dalam perhitungan berikut:

$$\begin{aligned} \text{a. Rata-rata tegangan yang dihasilkan:} \\ \frac{(12,9+13,3+13,3+12,8+13,6+13,4+13,8)}{7 \text{ hari percobaan}} \quad (1) \\ = 13,3 \text{ Volt} = 13 \text{ Volt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. Rata-rata arus yang dihasilkan:} \\ \frac{(0,5 + 0,25 + 0,2 + 0,15 + 0,32 + 0,17 + 0,43)}{7 \text{ hari percobaan}} \quad (2) \\ = 0,2886 \text{ Ampere} = 0,289 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c. Rata-rata daya yang dihasilkan:} \\ \frac{(5,2 + 3,3 + 3,1 + 2,7 + 4,8 + 2,8 + 5,8)}{7 \text{ hari percobaan}} \quad (3) \\ = 3,9571 \text{ Watt} = 3,96 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Dari hasil analisis tersebut maka didapatkan hasil akhir dari pengujian yaitu *output* tertinggi didapatkan pada hari ke-7 percobaan. Rata-rata tegangan yang dihasilkan selama 7 hari percobaan yaitu 13 Volt. Rata-rata arus yang dihasilkan selama 7 hari percobaan yaitu 0,289 Ampere. Rata-rata daya yang dihasilkan selama 7 hari percobaan yaitu 3,96 Watt. *Fluktuasi output* disebabkan oleh kondisi cuaca yang bervariasi antara panas, mendung, dan hujan di Yogyakarta selama 7 hari percobaan. Akibat dari cuaca yang tidak menentu ini maka hasil *output* dari panel surya juga tidak menentu.

Penelitian lain yang menggunakan tenaga surya untuk sistem penyiraman otomatis menemukan hasil serupa, di mana kapasitas energi yang dihasilkan sangat bergantung pada kondisi cuaca [22]. Penggunaan aki sebagai penyimpan energi pada sistem ini membantu mengatasi masalah ketidakstabilan sumber daya, sehingga alat tetap dapat berfungsi meskipun sinar matahari tidak optimal.

3. Pengujian Akurasi Pembacaan Sensor Ultrasonik HY-SR04

Sensor ultrasonik yang digunakan memiliki akurasi tinggi dalam mendeteksi ketinggian cairan pestisida di dalam tampungan. Pengujian dilakukan dengan mengukur level cairan pada interval tertentu (5 cm, 10 cm, 15 cm, dst.), menunjukkan kesalahan pengukuran 0%, sehingga sesuai untuk prototipe ini. Hasil pengujian dari akurasi sensor ultrasonik disajikan dalam Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Akurasi sensor ultrasonik HY-SR04

No	Ketinggian	Akurasi pembacaan sensor		Keterangan
		Akurat	Tidak akurat	
1	5 cm	√	-	Sesuai
2	10 cm	√	-	Sesuai
3	15 cm	√	-	Sesuai
4	20 cm	√	-	Sesuai
5	25 cm	√	-	Sesuai
6	30 cm	√	-	Sesuai

Berdasarkan hasil pengujian dari dengan pengambilan 6 sampel, maka didapatkan hasil sebagai berikut:

- Jumlah Berhasil: 6
- Jumlah Gagal: 0
- Jumlah Pengujian: 6
- Jumlah Respon Sesuai Harapan: 6
- Jumlah Respon di Luar Harapan: 0

Maka didapat hasil persentase keberhasilan sebagai berikut:

a. **Akurasi Keberhasilan**

Akurasi Berhasil

$$\frac{6}{6} \times 100\% = 100\% \quad (4)$$

$$\text{Akurasi Gagal} \\ \frac{0}{6} \times 100\% = 0\% \quad (5)$$

b. **Akurasi Respon Sensor**

Respon Sesuai

$$\frac{6}{6} \times 100\% = 100\% \quad (6)$$

Respon Gagal

$$\frac{0}{6} \times 100\% = 0\% \quad (7)$$

Dari analisis tersebut maka didapatkan hasil persentase akhir dengan akurasi 100% untuk pembacaan sensor Ultrasonik HY-SR04 dan pada pengujian akurasi ketepatan respon sensor. Pengujian akurasi sensor ultrasonik HY-SR04 menunjukkan tingkat keakuratan 100%, sehingga memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi penggunaan pestisida.

Dengan akurasi tinggi ini, sistem dapat memastikan bahwa penyemprotan dilakukan secara presisi hanya pada area yang membutuhkan, sehingga mengurangi pemborosan pestisida. Selain itu, teknologi ini dapat mendukung praktik pertanian yang lebih ramah lingkungan dengan mengurangi dampak negatif pestisida terhadap ekosistem sekitar.

4. Pengujian Prototipe Alat Penyemprotan Pestisida Otomatis pada Perkebunan Cabai

Prototipe yang digunakan untuk pengujian pada perkebunan cabai menggunakan komponen sensor ultrasonik dengan melibatkan IoT dengan menggunakan software MQTT. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur tingkat akurasi pembacaan sensor dan akurasi ketepatan pembacaan ketinggian yang kemudian terhubung dengan IoT dan MQTT, serta pengujian akurasi ketepatan pada pompa air antara hidup dan mati. Hasil pengujian dari prototipe ini disajikan dalam Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Pengujian prototipe alat

Hari/tanggal	Jam	Akurasi ketinggian	Pembacaan sensor	IoT (MQTT)		Pompa air DC		Keterangan
				Hidup	Mati	Hidup	Mati	
				Rabu, 17 Januari 2024	09.43	9 cm	Low	
Rabu, 17 Januari 2024	09.51	7 cm	High	√	-	√	-	Sesuai
Rabu, 17 Januari 2024	10.15	10 cm	Low	-	√	-	√	Sesuai
Rabu, 24 Januari 2024	10.38	12 cm	Low	√	-	√	-	Sesuai
Rabu, 24 Januari 2024	15.42	5 cm	High	√	-	√	-	Sesuai
Rabu, 24 Januari 2024	15.45	2 cm	High	-	√	-	√	Sesuai

Dari pengujian prototipe dengan pengambilan 2 sampel dalam beberapa waktu yang berbeda maka didapatkan hasil sebagai berikut:

- Jumlah Keberhasilan IoT: 6
- Jumlah Kegagalan IoT: 0
- Jumlah Pengujian: 6
- Jumlah Pembacaan Akurasi Sensor Sesuai Harapan: 6
- Jumlah Pembacaan Akurasi Sensor di Luar Harapan: 0

Maka didapat hasil persentase keberhasilan sebagai berikut:

- Akurasi Keberhasilan IoT
Akurasi Berhasil

$$\frac{6}{6} \times 100\% = 100\% \quad (8)$$

Akurasi Gagal

$$\frac{0}{6} \times 100\% = 0\% \quad (9)$$

- Akurasi Pembacaan Sensor
Respon Sesuai

$$\frac{6}{6} \times 100\% = 100\% \quad (10)$$

Respon Gagal

$$\frac{0}{6} \times 100\% = 0\% \quad (11)$$

Analisis hasil pengujian prototipe alat ini menunjukkan bahwa alat penyemprotan mencapai akurasi tingkat keberhasilan sebesar 100% dan akurasi pembacaan sensor sebesar 100%. Secara keseluruhan, pengujian alat ini menunjukkan hasil yang optimal. Perbandingan dengan penelitian sebelumnya yaitu penelitian terdahulu hanya mengandalkan sistem manual atau tanpa integrasi IoT, sehingga penelitian ini mengembangkan alat dengan keunggulan signifikan dalam hal otomatisasi dan akurasi kinerja.

Performa alat ini sangat dipengaruhi oleh intensitas sinar matahari. Pada kondisi cuaca cerah, sistem bekerja optimal dengan *output* daya yang tinggi, namun *fluktuasi* terjadi pada kondisi mendung atau hujan, di mana intensitas cahaya matahari menurun signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa alat ini memiliki ketergantungan pada cuaca, yang menjadi salah satu tantangan bagi petani di musim hujan. Sebagai solusinya, integrasi sumber energi cadangan, seperti baterai berkapasitas lebih besar atau energi alternatif, dapat mengurangi keterbatasan ini dan memungkinkan alat untuk tetap berfungsi meskipun intensitas sinar matahari rendah.

Salah satu keunggulan dari sistem ini yaitu mampu mengoptimalkan penggunaan pestisida dengan lebih presisi dibandingkan metode tradisional. Sistem ini juga mampu mengurangi limbah dan dampak negatif bagi lingkungan, serta menurunkan biaya operasional bagi petani.

Teknologi IoT yang diterapkan dalam penelitian ini memungkinkan monitoring dan kontrol jarak jauh secara *real-time*. Penggunaan protokol MQTT terbukti sangat efektif, dengan *latensi* rendah dan respon yang cepat. Keberhasilan sistem dalam menyediakan monitoring dan kontrol jarak jauh melalui IoT dapat memberikan fleksibilitas bagi petani. Petani dapat memantau dan mengontrol alat tanpa harus berada di lokasi, sehingga dapat bermanfaat bagi petani dengan lahan luas atau berada di daerah terpencil. Dalam jangka panjang, implementasi sistem ini dapat meningkatkan efisiensi operasional dan menurunkan biaya tenaga kerja.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa sistem penyemprotan pestisida organik otomatis berbasis tenaga surya dan IoT berhasil meningkatkan efisiensi tenaga surya dan IoT berhasil meningkatkan efisiensi penggunaan pestisida di perkebunan cabai. Dengan integrasi sensor ultrasonik, mikrokontroler WeMos D1 R1, dan protokol MQTT, sistem ini memungkinkan kontrol jarak jauh melalui aplikasi mobile.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem penyemprotan pestisida otomatis beroperasi dengan efisien pada kondisi cuaca yang mendukung, namun kinerja dari alat ini menurun saat cuaca mendung atau hujan akibat ketergantungan pada intensitas cahaya matahari. Oleh karena itu, diperlukan solusi energi cadangan untuk mengatasi masalah ketergantungan pada sinar matahari, seperti penggunaan baterai berkapasitas lebih besar atau mengintegrasikan alat ini dengan sumber energi alternatif untuk meningkatkan kestabilan operasional sistem.

Hasil analisis menunjukkan bahwa sensor ultrasonik HY-SR04 memiliki akurasi pembacaan dan ketepatan respon sebesar 100%. Akurasi tinggi ini memastikan penyemprotan dilakukan secara presisi hanya pada area yang membutuhkan, mengurangi pemborosan pestisida, serta mendukung praktik pertanian yang ramah lingkungan. Pengujian prototipe alat penyemprotan juga menunjukkan tingkat keberhasilan dan akurasi pembacaan sensor sebesar 100%, membuktikan bahwa alat berfungsi secara optimal sesuai desain dan tujuan.

Sistem ini berkontribusi untuk mengurangi pemborosan pestisida dan dampak negatif bagi lingkungan, sehingga dapat menjadi solusi inovatif untuk pertanian berkelanjutan, khususnya bagi petani di daerah dengan keterbatasan akses energi listrik. Namun, ketergantungan terhadap intensitas sinar matahari tetap menjadi kendala utama yang memengaruhi durasi operasional alat pada saat cuaca mendung. Uji coba lebih lanjut dalam berbagai kondisi cuaca dan lokasi direkomendasikan untuk mengevaluasi ketahanan sistem dan menyesuaikan

teknologi guna mendukung penerapan skala besar. Dengan pengembangan ini, sistem diharapkan menjadi solusi pertanian berkelanjutan yang andal, efisien, dan ramah lingkungan, terutama bagi petani di daerah terpencil.

V. SARAN

Berdasarkan kesimpulan penelitian, saran yang dapat diberikan yaitu penerapan teknologi ini juga dapat diperluas untuk lahan dengan skala lebih besar melalui peningkatan kapasitas panel surya dan perangkat IoT yang lebih canggih. Penelitian lanjutan juga diperlukan untuk menguji efektivitas sistem dalam jangka waktu yang lebih panjang serta pada berbagai jenis tanaman dan kondisi cuaca yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Pertanian, Analisis Kinerja Perdagangan Cabai Merah, Volume 11. Jakarta Selatan: Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian Kementerian Pertanian 2021, 2021. [Online]. Available: https://satudata.pertanian.go.id/assets/docs/publikasi/Analisis_Kinerja_Perdagangan_Komoditas_Cabai_Merah_Semester_I_Tahun_2021.pdf
- [2] S. Wiyono, S. H. Hidayat, Sobir, & A. S. Suryaningsih, "The Use of Combination Plant Growth Promoting Rhizobacteria To Control Chili Leaf Curl Disease In The Field," *J. Trop. Plant Pests Dis.*, vol. 24, no. 2, pp. 177–184, 2024, doi: 10.23960/jhptt.224177-184.
- [3] V. Budi, "Produksi Cabai Merah Meningkatkan 96 Ribu Ton pada 2021," Databoks.Katadata.Co.Id. Accessed: Oct. 30, 2022. [Online]. Available: <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2022/10/26/produksi-cabai-merah-meningkat-96-ribu-ton-pada-2021>
- [4] N. Mukhlisah, F. M. Faizah, R. Rosmiati, H. Herawaty, & A. Aswar, "Pemanfaatan Tanah, Kompos, dan Arang Sekam Untuk Pertumbuhan Tanaman Cabai," *COMSERVA Indones. J. Community Serv. Dev.*, vol. 2, no. 2, pp. 29–36, 2022, doi: 10.59141/comserva.v2i2.217.
- [5] S. Amelia, M. A. Putri, & F. Ibusina, "Karakteristik dan Pengetahuan Petani Cabai Merah terhadap Penggunaan Pestisida Kimia: Studi Kasus di Kecamatan Payakumbuh, Kabupaten Lima Puluh Kota, Indonesia," *AgriHealth J. Agri-food, Nutr. Public Heal.*, vol. 3, no. 2, pp. 133–142, 2022, doi: 10.20961/agrihealth.v3i2.63032.
- [6] Dinas Tanaman Pangan Dan Hortikultura, "Produktivitas Cabai Rawit Berdasarkan Kabupaten/Kota di Jawa Barat," Opendata Jabarprov. Accessed: Oct. 30, 2022. [Online]. Available: <https://opendata.jabarprov.go.id/id/dataset/produktivitas-cabai-rawit-berdasarkan-kabupatenkota-di-jawa-barat>
- [7] A. Umayah & Wagiyanti, "Cara Penggunaan Pestisida dan Analisis Residu pada Cabai Merah (*Capsicum annum* L.) (Studi Kasus : Desa Saleh Mukti , Kecamatan Air The use of pesticide and it ' s residue analysis in chili (*Capsicum*," *J. Agrik.*, vol. 32, no. 1, pp. 57–62, 2021.
- [8] T. Prajawahyudo, F. K. P. Asiaka, & E. Ludang, "Peranan Keamanan Pestisida Di Bidang Pertanian Bagi Petani Dan Lingkungan," *J. Socio Econ. Agric.*, vol. 17, no. 1, pp. 1–9, 2022, doi: 10.52850/jsea.v17i1.4227.
- [9] T. Dewi, R. Rusdianasari, A. Taqwa, & T. Wijaya, "The Concept and Design of Solar Powered Sprinkler System Based on IOT Monitoring," *Proc. 5th FIRST T1 T2 2021 Int. Conf. (FIRST-T1-T2 2021)*, vol. 9, pp. 54–58, 2022, doi: 10.2991/ahe.k.220205.010.
- [10] D. Pernandi & B. Santoso, "Otomatisasi Penyiraman Tanaman Buah Naga Berbasis Iot Menggunakan Energy Panel Surya (Studi Kasus: Suga Flora)," *OKTAL J. Ilmu Komput. dan Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 489–495, 2023.
- [11] A. S. Budi, "Design of Automatic Garden Watering Based on Solar Cell," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 2, no. 1, pp. 13–16, 2022, doi: 10.47709/brilliance.v2i1.1507.
- [12] A. Arsi *et al.*, "Penerapan Pemakaian Pestisida yang Tepat dalam Mengendalikan Organisme Pengganggu Tanaman Sayuran di Desa Tanjung Baru, Indralaya Utara," *SEMAR (Jurnal Ilmu Pengetahuan, Teknol. dan Seni bagi Masyarakat)*, vol. 11, no. 1, pp. 108–116, 2022, doi: 10.20961/semar.v11i1.56894.
- [13] A. Lukman, S. P. Santosa, B. F. Triyanto, B. P. Andhika, & A. S. Fadilah, "Penerapan Alat Penyiraman Otomatis Berbasis Mikrokontroler Menggunakan Energi Surya Dalam Mendukung Program Kampung Sejuta Anggrek Di Kelurahan Baru, Jakarta Timur," *J. Pengabd. Masy. Tek.*, vol. 6, no. 2, pp. 98–105, 2024, doi: 10.24853/jpmt.6.2.98-105.
- [14] Z. Y. Lamasigi, A. R. K. Haba, M. I. Jafar, S. Syamsir, & S. A. Hulukati, "Automated Drip Irrigation System Based on IoT for Chili Plants Using Solar Panel Energy," *J. Pengabd. Masy.*, vol. 5, no. 1, pp. 183–191, 2024, doi: 10.32815/jpm.v5i1.2006.
- [15] G. Triyani *et al.*, "Rancang Bangun Alat Penyemprot Herbisida (Knapsack Sprayer) Elektrik Berbasis Panel Surya 20 Wp Paralel," *Epsil. J. Electr. Eng. Inf. Technol.*, vol. 20, no. 2,

- pp. 150–161, 2022, doi: 10.55893/epsilon.v20i2.97.
- [16] B. Anitha, P. Jeyakani, V. Mahalakshmi, S. Shalini, & R. Senthil Kumar, “*Design and Implementation of a Smart Solar Irrigation System Using IoT and Machine Learning*,” *E3S Web Conf.*, vol. 387, no. 05012, pp. 1–7, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202338705012.
- [17] S. D. Putra, H. Heriansyah, E. F. Cahyadi, K. Anggriani, & M. H. I. S. Jaya, “*Development of Smart Hydroponics System using AI-based Sensing*,” *J. Infotel*, vol. 16, no. 3, pp. 474–485, 2024, doi: 10.20895/infotel.v16i3.1190.
- [18] X. Zhong, R. Qiao, & X. Wang, “*An Innovative IoT-Based Intelligent Control System for Agricultural Greenhouses*,” *Int. J. Mech. Electr. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 85–90, 2024, doi: 10.62051/ijmee.v2n3.10.
- [19] G. Fathurrohman, Hermantoro, & Suparman, “*Perancangan Alat Sprayer menggunakan Pengkabut Mini dengan Tenaga Panel Surya*,” *Agric. Eng. Innov. J.*, vol. 1, no. 01, pp. 1–11, 2023.
- [20] G. Triyani *et al.*, “*Rancang Bangun Alat Penyemprot Herbisida (Knapsack Sprayer) Elektrik Berbasis Panel Surya 20 Wp Paralel*,” *Epsil. J. Electr. Eng. Inf. Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 150–161, 2022, doi: 10.55893/epsilon.v20i2.97.
- [21] N. N. Arofah, F. T. Syifa, & I. Permatasari, “*Penyiraman Tanaman Otomatis pada Tanaman Cabai Rawit dengan Metode Simple Additive Weighting*,” *J. Ilmu Pengetah. dan Teknol.*, vol. 9, no. 2, pp. 116–129, 2023.
- [22] M. Syahid, A. Hayat, S. Laban, L. Kasim, & R. Amme, “*Pemanfaatan Pompa Air Tenaga Surya untuk Sistem Penyiraman Otomatis pada Tanaman Pekarangan di Kota Pare-Pare*,” *Bhakti Persada*, vol. 8, no. 2, pp. 145–150, 2022, doi: 10.31940/bp.v8i2.145-150.
- [23] J. F. Kayode *et al.*, “*Development of Remote-Controlled Solar-Powered Pesticide Sprayer Vehicle*,” *Res. Sq.*, pp. 1–20, 2023, doi: 10.21203/rs.3.rs-3229329.
- [24] I. K. D. A. Oka, B. P. W. Nirmala, & M. A. P. Putra, “*Model IoT Berbasis Fuzzy Tsukamoto Untuk Penyemprotan Pestisida Otomatis Pada Tanaman Sayur Kubis*,” *Progresif J. Ilm. Komput.*, vol. 18, no. 2, pp. 141–150, 2022, doi: 10.35889/progresif.v18i2.923.
- [25] D. A. Riantizal, L. L. Van FC, Y. Yunefri, Y. E. Fadrial, & Ilmawati, “*Alat Penyiraman Tanaman Otomatis Berbasis IoT Menggunakan Metode Fuzzy Logic*,” *Prosiding-Seminar Nas. Teknol. Inf. Ilmu Komput.*, vol. 2, no. 1, pp. 228–237, 2023.
- [26] P. V. Amalia, S. P. Mursid, & B. Suharto, “*Smart Drip Irrigation Control System Otomatis Berbasis IoT Menggunakan Tenaga Surya*,” *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 15, no. 1, pp. 47–56, 2024, doi: 10.35313/irwns.v15i1.6279.
- [27] A. A. Chand *et al.*, “*Design and Analysis of Photovoltaic Powered Battery-Operated Computer Vision-Based Multi-Purpose Smart Farming Robot*,” *Agronomy*, vol. 11, no. 530, pp. 1–18, 2021, doi: 10.3390/agronomy11030530.