RANCANG BANGUN ROBOT PENYEMPROT PESTISIDA CABAI BERTENAGA SURYA DENGAN KENDALI HIBRIDA

Herditero[1], Eko Mardianto[2], Hasan[3]

[1,2,3]Program Studi Teknik Rekayasan Sistem Elektronika, Politeknik Negeri Pontianak

Jln. Jendral Ahmad Yani – Pontianak 78124, Kalimantan Barat
[1]tmsherditer07@gmail.com, [2] emardianto74@gmail.com, [3] indra_elka@yahoo.com

Abstract

Conventional chili spraying causes heavy physical strain, uneven distribution, and chemical exposure risks. This study contributes to agricultural efficiency by developing an Arduino Mega 2560-based automated spraying robot prototype featuring hybrid control methods (wall-follower navigation and smartphone remote). The system incorporates a 60 Wp solar panel to establish energy independence. Quantitative tests emphasize the system's main contributions: the ultrasonic navigation achieves a 95% accuracy rate at optimal 10-15 cm distances, and the integrated water flow mechanism precisely limits pesticide volume to an average of 121 ml per plant, perfectly aligning with agricultural standards. Furthermore, the solar panel generates a stable average of 12.57V and 4.53A, sufficiently supporting 2 hours of continuous operation. The smartphone remote operates flawlessly with a minimal 0.5-second delay. Overall, this system significantly enhances operational efficiency and farmer safety, although further mechanical refinement is recommended for extreme soil terrains.

Keywords : *Arduino Mega 2560, solar panel, pesticide, wall follower.*

Abstrak

Metode penyemprotan konvensional pada tanaman cabai memicu kelelahan fisik, distribusi yang tidak merata, dan risiko paparan kimia bagi petani. Penelitian ini berkontribusi pada efisiensi agrikultur dengan mengembangkan prototipe robot penyemprot pestisida bertenaga surya berbasis Arduino Mega 2560 yang memiliki sistem kendali hibrida (otomatis dan jarak jauh via smartphone). Hasil pengujian kuantitatif menunjukkan kontribusi utama sistem: akurasi navigasi *wall-follower* mencapai 95% pada jarak 10-15 cm, sistem secara presisi membatasi penyemprotan pada volume rata-rata 121 ml per tanaman sesuai standar dosis kebutuhan, dan *delay* respons perintah dari aplikasi *smartphone* berada di bawah 0,5 detik. Kemandirian energi dari panel surya terbukti mampu menghasilkan rata-rata 12,57V dan 4,53A, yang mendukung operasional alat selama 2 jam penuh. Secara keseluruhan, sistem ini sangat efektif dalam meningkatkan efisiensi dan keamanan kerja petani, meskipun masih membutuhkan pengembangan mekanis lanjutan untuk beradaptasi pada medan tanah yang ekstrem.

Kata kunci : Arduino Mega 2560, panel surya, pestisida, *wall follower*.

1. PENDAHULUAN

Globalisasi dan kemajuan teknologi memaksa sektor pertanian Indonesia untuk meningkatkan produktivitas komoditas hortikultura seperti cabai, yang sering mengalami fluktuasi harga akibat serangan hama. Pengendalian hama yang intensif selama ini masih mengandalkan knapsack sprayer seberat 16 kg yang memicu kelelahan fisik serta risiko kontaminasi bagi petani [1]. Meskipun penelitian sebelumnya telah mengembangkan robot penyemprot otonom sistem *wall-follower*, namun perangkat tersebut masih memiliki kelemahan utama berupa ketergantungan pada sumber listrik luar yang sulit dijangkau di lahan pertanian serta keterbatasan operasional di luar bedengan karena ketiadaan kontrol jarak jauh [2]. Sebagai solusi, penelitian ini mengusulkan pengembangan robot penyemprot pestisida dengan nilai kebaruan pada integrasi panel surya sebagai sumber energi mandiri berbasis teknologi

photovoltaic [2] serta sistem kendali *hybrid* melalui *smartphone* berbasis Bluetooth. Pendekatan ini bertujuan untuk menciptakan alat yang lebih fleksibel, mandiri energi, dan efisien dalam meningkatkan produktivitas tanaman cabai sekaligus menjaga kesehatan petani di lapangan. Sejumlah penelitian terdahulu telah berupaya memecahkan kendala teknis pertanian ini. Widiyanti dkk. [3] merancang robot penyemprot sistem wall follower yang mampu menavigasi bedengan secara mandiri menggunakan sensor ultrasonik. Namun, perangkat tersebut masih memiliki kelemahan utama berupa ketergantungan pada sumber listrik luar, yang sangat membatasi fleksibilitasnya di lahan pertanian terbuka. Di sisi lain, potensi energi surya telah dibuktikan oleh Triyani dkk. [4] melalui rancang bangun alat penyemprot herbisida elektrik berbasis panel surya 20 Wp paralel, yang menunjukkan bahwa energi terbarukan mampu menjadi sumber tenaga mandiri dan ramah lingkungan bagi peralatan penyemprotan pertanian. Indah [5] telah mengimplementasikan sistem penyemprotan pestisida otomatis berbasis IoT yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh melalui jaringan internet, menegaskan bahwa konektivitas nirkabel menjadi kunci peningkatan efektivitas sistem penyemprotan modern. Kamal dkk. [6] berhasil mengimplementasikan teknik navigasi *wall follower* berbasis Arduino pada robot cerdas pemadam api, membuktikan akurasi dan keandalan metode ini dalam mendeteksi dan menjaga jarak terhadap dinding penghalang secara real-time. Lebih lanjut, Burhanudin [7] mengembangkan robot *wall follower* dengan kendali Fuzzy-PID berbasis sensor ultrasonik yang menunjukkan peningkatan signifikan pada presisi navigasi dan kestabilan gerak robot di lingkungan berstruktur, memberikan fondasi algoritma yang relevan untuk diadaptasi pada sistem robot pertanian. Dari sisi sistem tenaga surya sebagai sumber energi mandiri, Sianipar [8] menegaskan bahwa perencanaan pembangkit listrik tenaga surya yang tepat dapat menghasilkan energi yang stabil dan berkelanjutan, di mana parameter tegangan dan arus yang dihasilkan panel surya secara langsung menentukan keandalan operasional perangkat yang disuplainya. Prinsip ini menjadi landasan kuat bagi pemanfaatan panel surya 60 Wp pada robot ini guna memastikan kontinuitas operasional di lahan pertanian yang jauh dari jaringan listrik konvensional. Adapun dari perspektif teknik penyemprotan, Kebutuhan akan kendali jarak jauh juga didukung oleh riset Handika dan Abidin [9], yang membuktikan bahwa kendali *smartphone* berbasis IoT melalui modul ESP8266 dapat digunakan sebagai pengendali utama prototipe penyemprot hama tanaman otomatis, sehingga operator dapat mengarahkan alat dari jarak aman tanpa terpapar langsung oleh cairan pestisida. Pada aspek navigasi cerdas, algoritma *wall follower* berbasis sensor ultrasonik telah terbukti efektif dalam berbagai aplikasi robot otonom. Annafiyah dkk. [10] telah mengkaji rancang bangun sprayer pestisida menggunakan pompa air DC 12V, membuktikan bahwa pompa DC bertekanan tinggi mampu menghasilkan debit dan distribusi semprotan yang merata dan terukur, sehingga menjamin efektivitas pengendalian hama sekaligus mencegah pemborosan cairan pestisida. Selain itu, penelitian oleh Nurrahman dkk. [11] menunjukkan bahwa integrasi PLTS dan sistem pemantauan terbukti sangat efektif untuk sistem otomatisasi operasional mandiri. Lebih lanjut, guna menjaga kestabilan suplai arus dan tegangan dari panel surya ke baterai, diperlukan integrasi konverter daya yang baik sebagaimana dikaji oleh Amalia dkk. [12] mengenai desain sistem konverter terintegrasi pada solar PV. Prinsip ini menjadi landasan kuat bagi pemanfaatan panel surya 60 Wp pada robot ini guna memastikan kontinuitas operasional di lahan pertanian yang jauh dari jaringan listrik konvensional. Keandalan PLTS sebagai sumber energi ini juga didukung oleh analisis Putra dkk. [13] terkait efisiensi konversi daya. Sementara itu, untuk sistem kendalinya, pengembangan sistem nirkabel untuk mengontrol aktuator penggerak berbasis Arduino telah dibuktikan kelayakannya secara efektif oleh Noor dkk. [14]. Lebih lanjut, integrasi antara efisiensi energi dari panel surya dan kemampuan kendali jarak jauh berbasis aplikasi seluler telah dibuktikan oleh Tinus dkk. [15] memberikan nilai tambah yang signifikan, yakni berupa kemudahan operasional, pengurangan intervensi manual secara langsung, serta peningkatan responsivitas pengendalian hama di lapangan secara *real-time,* sehingga memberikan dasar perancangan yang kuat untuk implementasi kendali remot gerak pada robot ini.

Meskipun berbagai literatur dan penelitian terdahulu telah menyumbangkan inovasi yang relevan, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) yang mendasar. Penelitian-penelitian sebelumnya masih bersifat parsial dan belum ada yang berhasil mengintegrasikan aspek navigasi otonom presisi tinggi (*wall follower*), kemandirian daya dari energi surya secara penuh, serta sistem

pembatasan debit penyemprotan otomatis dalam satu kesatuan sistem. Sistem terdahulu mayoritas masih memiliki keterbatasan mobilitas akibat ketergantungan pada suplai daya kabel eksternal, serta kurangnya kemampuan mendeteksi objek secara spesifik yang berujung pada pemborosan cairan pestisida di ruang kosong antar tanaman.

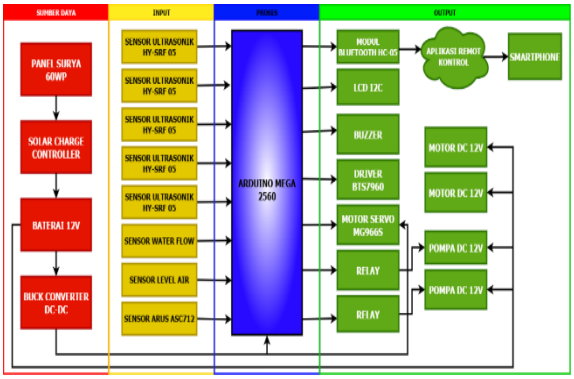
Oleh karena itu, kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada perancangan arsitektur kendali hibrida pada robot penyemprot yang sepenuhnya mandiri energi, dikombinasikan dengan mekanisme otomasi presisi volume cairan per tanaman. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah hadirnya solusi teknologi pertanian yang komprehensif, tidak terbatas oleh jarak kabel suplai daya, mampu dikendalikan secara fleksibel, dan secara efektif menekan pemborosan bahan kimia, sehingga siap diimplementasikan untuk meningkatkan efektivitas budidaya sekaligus mengamankan kesehatan petani di lapangan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Skema Alur Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem terintegrasi yang mencakup perancangan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) agar seluruh sistem dapat saling terhubung dan beroperasi. Pendekatan ini dipilih karena keberhasilan robot penyemprot pestisida sangat bergantung pada sinkronisasi antar-subsistem yang bersifat multidisiplin, mulai dari catu daya, sensor navigasi, aktuator gerak, hingga mekanisme penyemprotan, sehingga pengujian dan perbaikan tidak dapat dilakukan secara terpisah tanpa memperhitungkan interaksi antar komponen tersebut. Dengan demikian, rekayasa sistem terintegrasi memungkinkan evaluasi kinerja dilakukan pada level sistem secara menyeluruh, bukan hanya pada masing-masing komponen secara individual. Skema alur penelitian dan pengembangan sistem robot penyemprot pestisida ini digambarkan dalam bentuk *framework* operasional yang terdiri dari pemodelan blok sistem (Input-Proses-Output) serta algoritma kendali cerdas untuk navigasi dan penyemprotan.

A. Framework Pemodelan Sistem(Block Diagram)



Gambar 1. Block Diagram

Pemodelan *hardware* dan *software* dirancang dengan arsitektur aliran data sebagai berikut:

Sistem ini ditenagai secara mandiri menggunakan panel surya *monocrystalline* berkapasitas 60 Wp. Energi yang dihasilkan diatur melalui *Solar Charge Controller* (SCC) untuk mengisi daya dua buah baterai VRLA 12V. Tegangan baterai kemudian diturunkan menggunakan modul *step-down* untuk menyuplai mikrokontroler. Pemilihan panel surya jenis *monocrystalline* dijustifikasi karena efisiensi konversi energinya lebih tinggi dibanding tipe polikristal pada luas permukaan yang terbatas, sehingga sesuai dengan keterbatasan dimensi sasis robot. Kapasitas 60 Wp ditentukan berdasarkan perhitungan estimasi beban total aktuator (motor DC, motor servo, dan dua pompa DC) agar mampu memenuhi kebutuhan operasional selama minimal 2 jam tanpa mengandalkan sumber listrik eksternal. SCC digunakan untuk mencegah kondisi pengisian berlebih (*overcharging*) maupun pengosongan berlebih pada baterai, sehingga memperpanjang umur pakai baterai. Baterai VRLA 12V dipilih karena bersifat bebas perawatan dan tahan terhadap getaran selama robot bergerak di permukaan lahan yang tidak rata, sedangkan modul *step-down* dipilih karena memiliki efisiensi konversi tegangan yang tinggi sehingga suplai daya ke mikrokontroler tetap stabil dan terlindungi dari fluktuasi tegangan baterai.

Data masukan sistem berasal dari 5 unit sensor ultrasonik HY-SRF05 untuk mendeteksi dinding bedengan, tanaman, dan halangan. Penggunaan sensor ini dijustifikasi karena memiliki kepresisian jangkauan gelombang yang lebih stabil dibanding varian konvensional dalam menavigasi dinding lorong dan mendeteksi rimbunan daun. Selain itu, terdapat *water flow sensor* untuk mengukur debit/volume cairan pestisida yang keluar, sensor level air untuk memantau kapasitas tangki, sensor arus ACS712, serta modul komunikasi Bluetooth HC-05 untuk

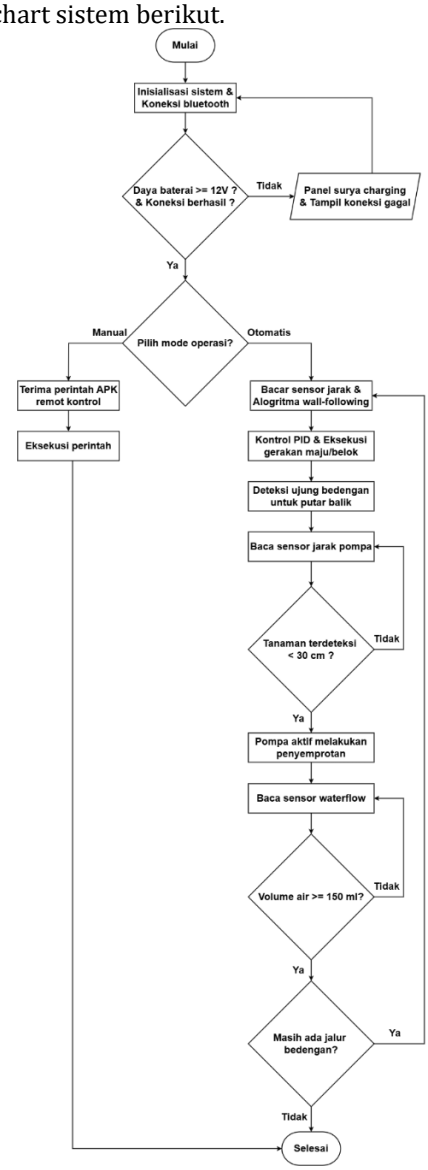
menerima perintah dari aplikasi *smartphone*. Pemilihan *water flow sensor* tipe efek Hall dijustifikasi karena mampu menghasilkan sinyal pulsa yang linear terhadap laju aliran cairan, sehingga akumulasi volume dapat dihitung secara akurat oleh mikrokontroler tanpa memerlukan kalibrasi tambahan yang rumit. Sensor level air dipilih karena sifatnya yang non-kontak dengan cairan pestisida sehingga tahan terhadap korosi kimia dan aman digunakan pada tangki penyemprot. Sensor arus ACS712 digunakan karena berbasis prinsip efek Hall yang memberikan isolasi galvanis antara jalur daya dan mikrokontroler, sehingga pembacaan arus panel surya tetap akurat tanpa membebani maupun merusak rangkaian kendali. Adapun modul Bluetooth HC-05 dipilih atas pertimbangan konsumsi daya yang rendah, jangkauan komunikasi yang memadai untuk skala satu bedengan lahan percobaan, serta kemudahan integrasinya dengan platform *MIT App Inventor* yang digunakan pada aplikasi kendali jarak jauh.

Mikrokontroler Arduino Mega 2560 bertindak sebagai unit pemroses pusat (otak sistem) yang mengolah semua data input dari sensor maupun Bluetooth berdasarkan algoritma yang telah diprogram melalui *software* Arduino IDE. Pemilihan mikrokontroler ini dijustifikasi oleh ketersediaan pin I/O yang sangat melimpah, sehingga mampu mengakomodasi pemrosesan seluruh sensor dan aktuator secara bersamaan secara optimal tanpa kendala *multiplexing*.

Hasil pemrosesan dieksekusi menjadi tindakan mekanis melalui Motor DC (dikendalikan driver BTS7960) untuk roda penggerak utama, dan Motor Servo MG996R untuk kemudi roda depan (*steering*). Proses penyemprotan dikendalikan melalui dua pompa DC bertenaga 100 PSI yang diaktifkan menggunakan komponen *limit switch*. Sistem juga memberikan *output* visual dan audio berupa layar LCD I2C dan Buzzer. Motor DC dengan driver BTS7960 dipilih karena driver ini mampu menangani arus tinggi serta mendukung kendali kecepatan dan arah putaran (H-bridge) secara presisi, sesuai dengan kebutuhan penggerak roda utama robot yang membawa beban tangki pestisida. Motor Servo MG996R dijustifikasi atas dasar torsi yang besar dan daya tahan terhadap pemakaian berulang, sehingga mampu menggerakkan mekanisme kemudi secara stabil meski dilakukan koreksi arah berkali-kali selama navigasi. Pompa DC bertekanan 100 PSI dipilih karena tekanan tersebut memadai untuk menghasilkan pola semprotan yang halus dan merata pada daun tanaman cabai, sementara komponen limit switch digunakan sebagai saklar aktuasi mekanis yang sederhana, murah, dan responsif untuk mengaktifkan atau memutus aliran pompa sesuai perintah mikrokontroler.

B. Algoritma dan Alur Operasi sistem

Secara perangkat lunak, algoritma dan rancangan skenario kerja robot dibagi menjadi tahapan inisialisasi, mode manual, dan mode otomatis dengan aturan (*rule*) seperti pada flowchart sistem berikut.

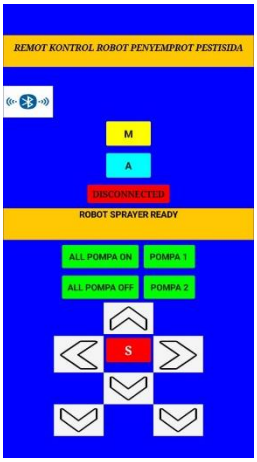


Gambar 2. Flowchart Sistem

Pada tahap inisalisasi dan *safety rule* robot melakukan pembacaan tegangan pada panel surya dan baterai. Jika tegangan berada di bawah 12V, SCC akan secara otomatis mengaktifkan mode *charging* dan sensor level air mendeteksi kapasitas tangki pestisida. Jika sensor mendeteksi cairan berada di bawah batas minimum (mendekati 0 ml), mikrokontroler akan memicu

alarm *buzzer* untuk aktif sebagai notifikasi kondisi kritis (*empty*).

Pada algoritma mode manual (*Remote control*) Pengguna menghubungkan *smartphone* Android ke robot Menggunakan aplikasi MIT App Inventor via Bluetooth. Instruksi dikirim via karakter ASCII. Algoritmanya bekerja dengan pembacaan *if-else*; contohnya ketika mikrokontroler menerima instruksi 'F', motor DC bergerak maju. Jika perintah belok ('L' atau 'R') diterima, motor servo dikoreksi ke sudut 30° atau 150° secara bersamaan dengan motor DC. Terdapat fungsi instruksi 'Y' untuk mengaktifkan seluruh pompa (*All Pompa On*) dan karakter 'S' untuk menghentikan seluruh sistem gerak seketika. Berikut tampilan dari remote kontrol via smartphone.



Gambar 3. Aplikasi Remot Kontrol

Pada algoritma mode otomatis Robot bergerak mandiri memindai dinding bedengan menggunakan dua sensor ultrasonik di sisi kiri dan kanan bawah. Apabila jarak dinding terbaca ideal (< 15 cm), robot akan bergerak maju secara konstan. Jika salah satu sensor mendeteksi deviasi/terlalu dekat dengan dinding, algoritma akan memutar servo roda depan (35° untuk menjauh ke kiri, 140° untuk menjauh ke kanan) sebagai koreksi, lalu mengembalikan servo ke posisi 90° ketika jarak kembali aman pada 15-16 cm. Jika sensor ultrasonik depan menangkap objek dalam jarak deteksi 2-15 cm, mikrokontroler memutus arus putaran maju dan segera mengaktifkan motor DC untuk mundur secara otomatis agar terhindar dari tabrakan. Ketika robot mencapai ujung bedengan (sensor kiri dan kanan tidak mendeteksi dinding), robot akan membaca bahwa dinding telah hilang (*wall lost*). Program kemudian memicu urutan manuver putar balik (*U-Turn*). Dua sensor ultrasonik yang berada di area atas secara simultan memindai barisan tanaman cabai. Pemodelan ini menggunakan logika *threshold*, jika objek tanaman tidak terdeteksi, pompa akan berada di kondisi mati (*Off*). Begitu sensor mendeteksi ada daun/tanaman cabai pada jarak efektif < 30 cm, status pompa akan otomatis diubah menjadi aktif (*On*). Saat pompa beroperasi menyemprotkan cairan ke tanaman cabai, sensor *water flow* memproses data putaran efek Hall menjadi pulsa volumetrik. Program akan mengalkulasi total pulsa ini. Begitu akumulasi keluaran cairan telah mencapai dosis yang ditentukan (antara 100 ml - 200 ml per pokok tanaman), mikrokontroler akan langsung mematikan aktuasi *limit switch* pada pompa meskipun sensor ultrasonik masih melihat tanaman, guna memastikan pestisida tidak boros.

2.2. Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, metode pengumpulan data dilakukan melalui observasi eksperimental dan studi kepustakaan untuk mendapatkan data yang valid dan relevan dengan rancang bangun robot penyemprot pestisida. Data yang dikumpulkan dibagi menjadi dua jenis, yaitu data primer dan data sekunder.

1) Data Primer

Pengambilan data kalibrasi sensor ultrasonik HY-SRF 05 dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan jarak oleh sensor (bagian depan, kiri, kanan, dan atas) dengan jarak sebenarnya yang diukur menggunakan meteran manual. Data ini krusial untuk menentukan persentase *error* serta mengatur ambang batas (*threshold*) navigasi *wall-follower* dan jarak deteksi tanaman cabai (maksimal 30 cm). Pengumpulan data kinerja panel surya dengan mengukur parameter kelistrikan berupa tegangan (Volt), arus (Ampere), dan daya (Watt) yang dihasilkan panel surya 60 Wp. Pengukuran dilakukan secara *real-time* menggunakan sensor arus ACS712 dan divalidasi menggunakan *multimeter* digital pada jam operasional dari pukul 09.00 hingga 14.00 WIB. Pengumpulan data debit dan volume cairan pestisida yang dikeluarkan oleh pompa DC bertekanan 100 PSI. Data diambil dengan menampung hasil semprotan ke dalam wadah ukur untuk memastikan dosis yang dikeluarkan per pokok tanaman sesuai dengan target (100–200 ml). Mengumpulkan data latensi (*delay*) dan tingkat keberhasilan transmisi perintah (karakter ASCII) dari aplikasi *smartphone* Android berbasis *MIT App Inventor* ke mikrokontroler melalui modul Bluetooth HC-05.

2) Data Sekunder

Data sekunder digunakan sebagai landasan teori dan acuan dalam merancang perangkat keras (*hardware*) maupun perangkat lunak (*software*).

Data sekunder diperoleh melalui studi pustaka (*literature review*).

Mengumpulkan informasi mengenai algoritma navigasi *wall-follower*, pemanfaatan energi terbarukan (panel surya) dalam bidang pertanian, dan teknologi robotika pertanian dari penelitian-penelitian sebelumnya.

Mengumpulkan spesifikasi teknis dari komponen elektronik yang digunakan, seperti *datasheet* Arduino Mega 2560, spesifikasi efisiensi *Solar Charge Controller* (SCC), *driver* motor BTS7960, baterai VRLA 12V, serta modul komunikasi Bluetooth HC-05.

Mengumpulkan data terkait standar budidaya tanaman cabai merah keriting (*Capsicum annuum L.*), bentuk dan dimensi bedengan ideal (lebar 1 m, tinggi 30 cm), serta dosis penyemprotan dan karakteristik Hama/Organisme Pengganggu Tanaman (OPT).

2.3. Analisa Data

Bagian ini menguraikan analisa yang dilakukan dengan menerapkan metode evaluasi eksperimental komparatif. Metode ini dipilih karena memungkinkan hasil pengujian tiap komponen dibandingkan secara langsung dengan nilai acuan atau standar yang telah ditetapkan sebelumnya, seperti jarak sebenarnya hasil pengukuran manual, standar dosis pestisida agrikultur, maupun spesifikasi teknis dari datasheet komponen, sehingga tingkat penyimpangan (error) dan kelayakan kinerja sistem dapat diukur secara objektif dan terukur. Analisa data dilakukan secara kuantitatif untuk mengukur nilai tingkat *error* dan keakuratan tiap komponen, serta secara kualitatif untuk mengevaluasi fungsionalitas sistem sebagai satu kesatuan yang terintegrasi. Objek yang dianalisa adalah kinerja operasional prototipe robot penyemprot pestisida bertenaga surya. Analisa ini mencakup tingkat akurasi dan persentase *error* sensor ultrasonik HY-SRF05 dalam navigasi jarak dinding bedengan (jarak ideal <15 cm) dan mendeteksi keberadaan tanaman, efisiensi suplai daya panel surya 60 Wp yang mencakup parameter tegangan (Volt), arus (Ampere), dan daya (Watt), presisi algoritma sensor *water flow* dalam mengukur dan membatasi volume penyemprotan pestisida sesuai target dosis (100 ml - 200 ml) dan responsivitas dan latensi sistem komunikasi jarak jauh menggunakan aplikasi *smartphone* (Bluetooth HC-05).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perakitan alat memperlihatkan bentuk dari robot penyemprot pestisida otomatis dan kontrol *smartphone* bertenaga surya untuk tanaman cabai sebagai berikut.



Gambar 4. Bentuk alat robot

Pada gambar 4 merupakan bentuk dari prototipe robot yang terdiri dari bahan material akrilik, besi hollow persegi ukuran 2x4, besi hollow bulat dan roda ban karet sehingga terbentuk mobil robot.

Hasil miniatur bedengan kebun cabai sebagai alat untuk uji coba robot menggunakan 3 bedengan dan sampel 9 pokok tanaman.



Gambar 5. Bentuk Miniatur Bedengan

Pada gambar 5 dapat dilihat bentuk bedengan yang terbuat PVC foam dengan ukuran lebar bedengan 50 cm, tinggi 30 cm dan jarak antar bedengan 100 cm.

3.1 Pengujian Sensor Ultrasonik dan Navigasi Robot

Pengujian sensor ultrasonik dilakukan untuk memvalidasi akurasi pembacaan jarak serta respons aktuator (motor DC dan motor servo) terhadap objek di sekitarnya. Pada Tabel 1 pengujian sensor bagian depan, hasil menunjukkan tingkat akurasi yang memadai dengan persentase kesalahan (*error*) maksimal sebesar 6,67% pada jarak terdekat 5 cm akibat keterbatasan titik buta (*blind spot*). Sistem terbukti responsif dengan menginstruksikan motor DC bergerak mundur saat halangan terdeteksi di bawah batas ambang 15 cm.

TABEL I. PENGUJIAN STATUS MOTOR DC PADA SENSOR ULTRASONIK DEPAN

Jarak Sebenarnya (Cm)	Jarak Pembacaan Sensor (Cm)	Eror (%)	Status Motor DC
5	4.67	6.67%	Aktif mundur
10	10	0.00%	Aktif mundur
15	14.67	2.22%	Aktif mundur
20	20.33	1.67%	Aktif maju
25	25	0.00%	Aktif maju
30	29.67	1.11%	Aktif maju
31	31.33	1.08%	Aktif maju

Sementara itu, pada sistem kemudi (*steering*), sensor ultrasonik kiri dan kanan berhasil memandu manuver *wall-follower* robot di lorong bedengan. Ketika jarak dinding menyempit di bawah 15 cm, sistem secara otomatis merespons dengan mengubah sudut motor servo menjadi 140 derajat (untuk halangan di kanan) seperti pada Tabel 2 dan 35 derajat (untuk halangan di kiri) guna menjauhi dinding, kemudian kembali ke posisi netral 90 derajat saat lintasan dinilai aman.

TABEL II. PENGUJIAN STATUS SUDUT MOTOR SERVO PADA SENSOR ULTRASONIK KANAN

Jarak Sebenarnya (Cm)	Jarak Pembacaan Sensor (Cm)	Eror (%)	Sudut Motor Servo
5	4.67	6.67%	140°
10	10	0.00%	140°
12	12.33	2.78%	140°
14	14.33	2.38%	140°
16	16.33	2.08%	90°

TABEL III. PENGUJIAN STATUS SUDUT MOTOR SERVO PADA SENSOR ULTRASONIK KIRI

Jarak Sebenarnya (Cm)	Jarak Pembacaan Sensor (Cm)	Eror (%)	Sudut Motor Servo
5	5	0.00%	35°
10	10.33	3.33%	35°
12	11.33	5.56%	35°
14	14.33	2.38%	35°
16	15.67	2.08%	90°

Pengujian juga memvalidasi kinerja sensor atas yang difungsikan untuk memicu aktuasi pompa. Dengan tingkat kesalahan antara 0,00% hingga 6,67%, mikrokontroler secara konsisten menyalakan pompa saat mendeteksi tanaman pada radius efektif maksimal 30 cm, dan langsung memutus arus (*off*) ketika jarak objek mencapai 31 cm.

TABEL IV. PENGUJIAN STATUS POMPA 1 PADA SENSOR ULTRASONIK KANAN ATAS

Jarak Sebenarnya (Cm)	Jarak Pembacaan Sensor (Cm)	Eror (%)	Status Pompa 1
5	4.67	6.67%	Aktif
10	10	0.00%	Aktif
15	14.33	4.44%	Aktif
20	20	0.00%	Aktif
25	24.67	1.33%	Aktif
30	30.33	1.11%	Aktif
31	30.67	2.05%	Off

TABEL V. PENGUJIAN STATUS POMPA 2 PADA SENSOR ULTRASONIK KIRI ATAS

Jarak Sebenarnya (Cm)	Jarak Pembacaan Sensor (Cm)	Eror (%)	Status Pompa 2
5	4.67	6.67%	Aktif
10	9.67	3.33%	Aktif
15	15.33	2.22%	Aktif
20	20.33	1.67%	Aktif
25	25	0.00%	Aktif
30	30.67	2.22%	Aktif
31	31.33	1.08%	Off

3.2 Pengujian kinerja catu daya panel surya

Sistem catu daya dievaluasi dengan memantau keluaran arus, tegangan, dan daya panel surya berkapasitas 60 Wp yang dicatat secara berkala dari pukul 09.00 hingga 14.00 WIB. Pengukuran tegangan menggunakan alat ukur multimeter yang dibandingkan dengan nilai pada *Solar Charge Controller* (SCC) menunjukkan karakteristik yang stabil seperti pada Tabel 6.

TABEL VI. HASIL PENGUJIAN ARUS DAN TEGANGAN PADA PANEL SURYA

JAM	V-Multi (V)	I-Multi (A)	V-SCC (V)	I-Sensor (A)
09.00.00	12.20	0.16	10.22	0.14
09.30.00	12.53	0.22	10.20	0.25
10.00.00	12.54	0.26	10.42	0.29
10.30.00	12.52	0.30	10.40	0.34
11.00.00	12.53	0.33	10.20	0.43
11.30.00	12.58	0.37	10.40	0.43
12.00.00	12.60	0.41	10.10	0.58
12.30.00	12.95	0.43	10.10	0.58
13.00.00	12.60	0.46	10.40	0.53
13.30.00	12.75	0.48	10.40	0.53
14.00.00	12.53	0.55	10.55	0.53

Disparitas tegangan sekitar 2 Volt yang terjadi di antara kedua instrumen tegangan pada multimeter dan *solar charge control* (SCC) merupakan fenomena teknis yang wajar akibat adanya jatuh tegangan (*voltage drop*) pada sirkuit kabel dan pembebanan regulasi daya. Di sisi lain, pembacaan sensor arus memiliki korelasi linier yang sangat identik dengan alat multimeter, di mana lonjakan arus tertinggi tercatat sebesar 0,58 A pada siang hari saat iradiasi matahari mencapai titik optimal. Secara kumulatif, sistem monitoring daya ini mencatat tingkat *error* rata-rata sebesar 10,67%. Penyimpangan tertinggi sebesar 26,70% terdeteksi pada pagi hari yang dipicu oleh rendahnya rasio *signal-to-noise* pada arus kecil, sedangkan tingkat akurasi terbaik tercapai pada siang hari dengan persentase kesalahan hanya 3,92%. Hal ini mengonfirmasi bahwa panel surya dan instrumen pemantaunya bekerja valid dan sangat layak dalam menjaga kontinuitas suplai daya robot.

3.3 Pengujian sistem penyemprotan dan monitoring ktersediaan pestisida

Kinerja penyemprotan presisi dievaluasi menggunakan *water flow sensor* dengan target luaran volume cairan antara 100 ml hingga 200 ml per tanaman. Berdasarkan uji coba pada 10 sampel tanaman dengan masing 5 tanaman pada setiap *water flow sensor* yang dapat dilihat pada Tabel 7 dan 8, nilai rata-rata volume penyemprotan yang dihasilkan adalah sebesar 121 ml.

TABEL VII. HASIL PENGUJIAN VOLUME CAIRAN PESTISIDA PADA SENSOR WATERFLOW 1

Tanaman Cabai	1	2	3	4	5
Vol. Awal Tangki(ml)	1000	900	750	650	540
Vol.Tersemprot (ml)	100	150	100	110	140
Vol.Akhir Tangki(ml)	900	750	650	540	400

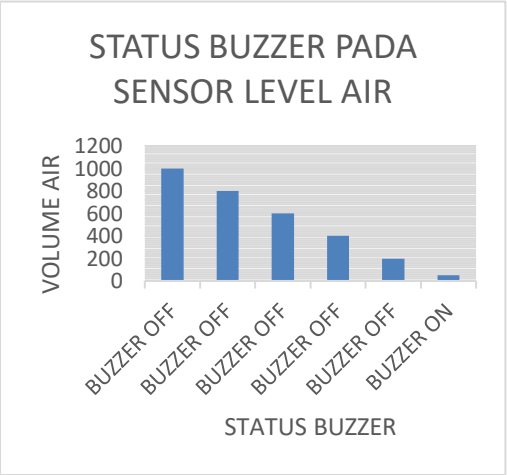
TABEL VIII. HASIL PENGUJIAN VOLUME CAIRAN PESTISIDA PADA SENSOR WATERFLOW 2

Tanaman Cabai	1	2	3	4	5
Vol. Awal Tangki(ml)	400	280	140	30	0
Vol.Tersemprot (ml)	120	140	110	30	0
Vol.Akhir Tangki(ml)	280	140	30	0	0

Penurunan volume air pada penyemprotan tanaman cabai 4 dan 5 yang dibaca *water flow sensor* 2 tidak mencapai 100-200 ml karena air didalam tangki telah habis selama proses pengujian. Kondisi ini membuat rentang debit air yang terukur bervariasi sangat kecil karena dipengaruhi oleh jeda mekanis penutupan katup selenoid dan penurunan tekanan dinamis saat air di dalam tangki mulai menyusut. Namun, secara teknis fungsionalitas ini dinyatakan berhasil secara penuh karena seluruh data volume luaran terjaga di dalam spesifikasi dosis kebutuhan tanaman.

Untuk mencegah kerusakan pompa akibat beroperasi dalam kondisi kering, robot ini dilengkapi sensor level air pada tangki utama berkapasitas 1000 ml.

Grafik blok 1. Hasil pengujian sensor air



Pengujian membuktikan bahwa sensor dengan presisi mampu memperbarui status pada penampil LCD menjadi indikator *Full* (900-1000 ml) dan *Mid* (400-600 ml). Ketika volume cairan menurun secara kritis menyentuh rentang 0-50 ml, sistem secara otomatis menampilkan indikator *Empty* dan mengaktifkan *buzzer* sebagai alarm notifikasi bagi operator agar segera melakukan pengisian ulang.

3.4 Pengujian fungsional aplkasi remot kontrol

Tahap akhir difokuskan untuk menguji stabilitas transmisi komunikasi antara aplikasi pengendali pada *smartphone* Android dengan modul Bluetooth HC-05 pada pusat kendali robot. Sebanyak tiga belas instruksi karakter ASCII diujikan, mencakup peralihan mode manual dan otomatis, manuver arah laju kendaraan, hingga kendali penyemprotan pompa secara individu maupun serentak. Hasil uji lapangan mencatatkan persentase keberhasilan absolut sebesar 100%, di mana mikrokontroler mampu merespons instruksi secara *real-time* tanpa adanya kegagalan penerjemahan data *(data loss)*.

TABEL IX. HASIL PENGUJIAN FUNGSI RESPON APLIKASI REMOT KONTROL

Input	Tombol	Respon sistem	status
Mode Manual	‘ M’	Otomatis Aktif	Berhasil
Mode Otomatis	‘ A’	Otomatis Aktif	Berhasil
Semua Pompa ON	‘Y’	Pompa 1-2 aktif	Berhasil
Semua Pompa Off	‘O’	Pompa 1-2 nonaktif	Berhasil
Pompa 1	‘P’	Pompa 1 aktif	Berhasil
Pompa 2	‘V’	Pompa 2 aktif	Berhasil
Arah Atas	‘F’	Motor maju	Berhasil
Arah Bawah	‘B’	Motor Mundur	Berhasil
Arah Kiri	‘L’	Maju+ Servo 30°	Berhasil
Arah Kanan	‘R’	Maju+ Servo 150°	Berhasil
Bawah Kiri	‘H’	Mundur+ Servo 30	Berhasil
Bawah Kanan	‘J’	Mundur+ Servo 150°	Berhasil
Stop	‘S’	Motor berhenti	Berhasil

Sistem pergerakan merespons instruksi arah dengan perputaran roda yang sinkron, motor servo membentuk sudut kemudi secara akurat, dan relai dapat memutus atau mengalirkan arus ke pompa dengan seketika. Hal ini menyimpulkan bahwa antarmuka pengendali jarak jauh yang dirancang siap beroperasi memfasilitasi pengguna untuk memosisikan robot sebelum beralih ke rute operasi otonomnya.

3.5 Analisis Komparatif dengan Penelitian Terdahulu

Untuk memperkuat kontribusi keilmuan, kinerja prototipe pada penelitian ini dibandingkan dengan beberapa penelitian sejenis. Dari aspek navigasi, tingkat kesalahan (*error*) pembacaan sensor ultrasonik pada robot ini (maksimal 6,67%) menunjukkan hasil yang sebanding dengan robot *wall-follower* berbasis Fuzzy-PID yang dikembangkan Burhanudin [7], meskipun penelitian ini hanya menerapkan logika kendali *if-else* sederhana tanpa algoritma kendali lanjut. Dibandingkan dengan robot *wall-follower* rancangan Widiyanti dkk. [3] yang masih bergantung pada suplai listrik eksternal, robot pada penelitian ini unggul dari sisi kemandirian energi karena telah diintegrasikan dengan panel surya.

Pada aspek kelistrikan, kapasitas panel surya 60 Wp yang digunakan pada penelitian ini tiga kali lebih besar dibanding panel surya 20 Wp paralel pada alat penyemprot herbisida elektrik rancangan Triyani dkk. [4], sehingga mampu menghasilkan tegangan rata-rata 12,57V dan mendukung operasional kontinu hingga 2 jam pada sebuah unit robot bergerak, bukan sekadar alat semprot statis. Hasil ini turut menegaskan prinsip perencanaan pembangkit listrik tenaga surya yang dikemukakan Sianipar [8], bahwa parameter tegangan dan arus keluaran panel secara langsung menentukan keandalan operasional perangkat yang disuplainya.

Dari sisi konektivitas kendali jarak jauh, sistem Bluetooth HC-05 pada penelitian ini mencatatkan *delay* respons di bawah 0,5 detik dengan tingkat keberhasilan 100%, sebanding dengan kendali *smartphone* berbasis IoT ESP8266 yang diujikan Handika dan Abidin [9]. Berbeda dengan pendekatan Indah [5] dan Tinus dkk. [15] yang memanfaatkan konektivitas internet (IoT) untuk pemantauan jarak jauh tanpa batas, penggunaan

Bluetooth pada penelitian ini merupakan pilihan desain yang disesuaikan dengan kondisi lahan pertanian yang umumnya minim infrastruktur jaringan internet, meskipun konsekuensinya jangkauan kendali menjadi terbatas pada radius komunikasi Bluetooth.

Pada aspek presisi penyemprotan, mekanisme pembatasan volume otomatis berbasis *water flow sensor* pada penelitian ini menjadi nilai tambah dibandingkan sprayer berbasis pompa DC 12V rancangan Annafiyah dkk. [10], yang terbukti efektif menghasilkan distribusi semprotan merata namun belum dilengkapi mekanisme pembatasan dosis otomatis per tanaman. Dengan rata-rata luaran 121 ml per tanaman yang konsisten berada dalam rentang standar 100-200 ml, penelitian ini menunjukkan penyempurnaan pada aspek efisiensi penggunaan bahan kimia yang belum banyak diakomodasi pada penelitian-penelitian terdahulu.

3.6 Keterbatasan Sistem

Meskipun secara keseluruhan menunjukkan kinerja yang baik, prototipe ini masih memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan pada penerapan skala lapangan yang lebih luas. Pertama, sistem pemantauan daya panel surya mencatat tingkat *error* rata-rata sebesar 10,67%, bahkan mencapai 26,70% pada pagi hari akibat rendahnya rasio *signal-to-noise* pada arus kecil, sehingga akurasi pembacaan sensor arus ACS712 pada kondisi iradiasi rendah masih perlu ditingkatkan, misalnya melalui filter sinyal atau kalibrasi tambahan.

Kedua, pengujian dilakukan pada miniatur bedengan berbahan PVC foam dengan skala terbatas (3 bedengan dan 9 pokok tanaman), sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi lahan pertanian riil yang memiliki variasi tekstur tanah, kelembaban, kontur permukaan, serta gangguan lingkungan seperti angin dan gulma. Validasi lanjutan pada lahan cabai sesungguhnya diperlukan untuk memastikan konsistensi kinerja sistem.

Ketiga, kapasitas tangki pestisida yang hanya 1 liter serta daya tahan operasional maksimal 2 jam membatasi luas cakupan lahan yang dapat dilayani dalam satu siklus kerja, sehingga untuk skala perkebunan yang lebih luas diperlukan pembesaran kapasitas tangki maupun baterai cadangan. Keempat, jangkauan komunikasi modul Bluetooth HC-05 yang relatif pendek mengharuskan operator tetap berada pada jarak yang tidak terlalu jauh dari robot, sehingga manfaat perlindungan terhadap paparan pestisida belum dapat dioptimalkan sepenuhnya dibandingkan solusi berbasis IoT dengan jangkauan tanpa batas. Terakhir, sebagaimana telah diidentifikasi pada bagian kesimpulan, sistem penggerak dan suspensi robot saat ini belum diuji pada kontur lahan yang ekstrem seperti tanah becek, berlumpur, atau bergelombang, sehingga stabilitas pergerakan pada kondisi tersebut masih menjadi aspek yang perlu disempurnakan pada pengembangan berikutnya.

4. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan perancangan, pembuatan, dan pengujian prototipe robot penyemprot pestisida otomatis bertenaga surya untuk tanaman cabai, dapat disimpulkan bahwa sistem navigasi dan kendali robot berfungsi dengan tingkat presisi yang tinggi. Pada mode otomatis (*wall follower*), algoritma navigasi terbukti akurat dalam menjaga jarak aman terhadap bedengan, di mana logika kendali motor servo sangat responsif melakukan manuver koreksi arah berdasarkan pembacaan sensor yang memiliki persentase kesalahan sangat rendah (di bawah 6,67%). Kinerja pergerakan ini juga didukung oleh mode kendali manual berbasis *smartphone* yang mencatatkan tingkat keberhasilan eksekusi perintah navigasi mencapai 100% tanpa adanya kendala latensi komunikasi yang berarti.

Pada aspek penyemprotan, integrasi sensor ultrasonik dan *water flow sensor* berhasil menciptakan mekanisme otomasi yang sangat efisien. Sistem secara cerdas hanya mengaktifkan pompa ketika mendeteksi keberadaan tanaman cabai pada radius efektif di bawah 30 cm dan otomatis memutus aliran pada ruang kosong. Mekanisme ini secara konsisten menghasilkan volume luaran pestisida rata-rata sebesar 121 ml per tanaman. Angka tersebut sangat ideal dan masuk ke dalam rentang standar kebutuhan agrikultur (100–200 ml), sehingga terbukti efektif meminimalisir pemborosan cairan dibandingkan dengan metode penyemprotan manual konvensional.

Keandalan operasional robot ini turut ditopang oleh sistem manajemen daya dan proteksi keamanan yang bekerja secara optimal. Sistem catu daya panel surya mampu menjaga stabilitas tegangan di angka rata-rata 12,57 Volt, dengan instrumen pemantauan daya yang valid memetakan tren intensitas matahari berbekal deviasi kesalahan yang masih dapat ditoleransi. Selain itu, fitur keselamatan robot terbukti berfungsi sesuai perancangan, baik melalui algoritma *obstacle avoidance* yang sukses mencegah benturan fisik, maupun melalui sistem

pemantauan level air yang secara akurat mendeteksi kekosongan tangki untuk memicu alarm peringatan sekaligus memutus arus agar pompa terhindar dari kerusakan akibat *dry running*.

Guna mengoptimalkan kinerja prototipe agar dapat diaplikasikan pada skala pertanian yang lebih luas, diperlukan serangkaian penyempurnaan dari sisi mekanik maupun teknologi. Modifikasi awal dapat difokuskan pada pembesaran kapasitas tangki pestisida serta penguatan struktur sasis agar robot mampu mengangkut volume cairan yang lebih masif dibandingkan kapasitas satu liter saat ini. Selain itu, sistem penggerak dan suspensi perlu diadaptasi menggunakan desain *off-road* atau roda rantai (*tank*) supaya perangkat tetap stabil saat bermanuver di atas kontur lahan perkebunan yang tidak rata, bergelombang, maupun berlumpur. Dari segi konektivitas, keterbatasan jarak pada sistem Bluetooth saat ini dapat diatasi dengan mengimplementasikan teknologi *Internet of Things* (IoT) seperti modul ESP32 atau LoRa, yang memungkinkan kontrol jarak jauh tanpa batas jarak sekaligus pemantauan kondisi robot secara terpusat melalui *cloud*. Terakhir, tingkat presisi operasional dapat dimaksimalkan dengan mengganti sensor ultrasonik menjadi sistem *computer vision* berbasis kecerdasan buatan (AI), sehingga robot tidak hanya mendeteksi keberadaan objek, tetapi juga mampu membedakan tanaman utama dari gulma serta mengidentifikasi penyakit daun secara visual dan spesifik.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Rekayasa Elektronika Politeknik Negeri Pontianak yang telah memfasilitasi perangkat dan ruang pengujian.

Daftar Pustaka:

[1] M. Budiono, "Rancang Bangun Robot Penyemprot Pestisida Otonom Dengan Sistem Wall Follower Pada Penyemprotan Tanaman Cabai," Laporan Tugas Akhir, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2021.

[2] E. Sarwono, Subiyanto, dan Y. Primadiyono, "Alat Penyempot Pestisida Tenaga Surya Menggunakan Panel Surya 30W," *Journal of Electrical Power Control and Automation*, vol. 4, no. 2, pp. 40-46, 2021.

[3] I. Widiyanti, A. F. Ikhsan, dan T. A. Wiharso, "Rancang Bangun Robot Penyemprot Pestisida Dengan Sistem Wall Follower Pada Tanaman Cabai," *Jurnal FUSE – Teknik Elektro*, vol. 3, no. 2, pp. 71-78, 2023 .

[4] G. Triyani, F. Arkan, dan M. Y. Puriza, "Rancang Bangun Alat Penyemprot Herbisida (Knapsack Sprayer) Elektrik Berbasis Panel Surya 20 Wp Paralel," *EPSILON: Journal of Electrical Engineering and Information Technology*, vol. 2, pp. 150-161, 2022.

[5] T. Indah, "Implementasi Sistem Penyemprotan Pestisida Otomatis Berbasis Internet Of Things (IoT)," Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bengkalis, 2024.

[6] M. S. Kamal, K. Rizal, M. Syani, dan Ahmad, "Rancang Bangun Robot Cerdas Pemadam Api Menggunakan Teknik Navigasi Wall Follower Berbasis Arduino," *ILTEK: Jurnal Teknologi*, vol. 17, no. 2, pp. 88-93, 2022.

[7] B. Burhanudin, "Rancang Bangun Robot Wall follower dengan Kendali Fuzzy-PID Berbasis Sensor Ultrasonik," *Mars: Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro Dan Ilmu Komputer*, vol. 3, no. 6, pp. 244-261, 2025.

[8] R. Sianipar, "Dasar Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya," *Jetri: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 11, pp. 61-78, 2017.

[9] A. Handika, Z. Abidin, "Rancang Bangun Prototype Penyemprot Hama Tanaman Otomatis Dengan Menggunakan Smartphone Control Utama IoT ESP8266," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, vol. 6, no. 1, pp. 58-68, 2024.

[10] Annafiyah, S. Anam, M. Fatah, "Rancang Bangun Sprayer Pestisida Menggunakan Pompa Air DC 12 V dan Panjang Batang Penyemprot 6 Meter," Jurnal Rekayasa Mesin, vol. 16, no. 1, pp. 90-99, 2021.

[11] F. Nurrahman, W. Yurniato, dan E. Mardianto, "Sistem Monitoring Dan Keamanan Rumah Walet Berbasis IoT Dan PLTS," *Jurnal Informatika dan Rekayasa Elektronik*, vol. 7, no. 2, pp. 281-292, 2024.

[12] R. N. Amalia, W. Kusuma, dan H. A. Yuniq, "Desain Dan Analisa Closed Loop Boost Converter Terintegrasi Solar PV Berbasis Fuzzy Logic Controller," *Jurnal Informatika dan Rekayasa Elektronik*, vol. 6, no. 1, pp. 130-139, 2023.

[13] S. H. Putra, M. F. Zambak, Suwarno, dan Rahana, "Analisis PLTS Atap on Grid 618,8 kWp Pada Gedung Universitas HKBP Nomensen," *Jurnal Informatika dan Rekayasa Elektronik*, vol. 7, no. 2, pp. 453-461, 2024.

[14] A. Noor, O. Rahmanto, dan M. Yahya, "Perancangan Wireless Starter Kendaraan Bermotor Berbasis Arduino," *Jurnal Informatika dan Rekayasa Elektronik*, vol. 6, no. 2, pp. 228-237, 2023.

[15] F. R. Tinus, F. E. Purnomo, D. I. Mubarok, F. A. Prayoga, M. R. Rabani, dan N. Ristaulia, "Perancangan Alat Penyemprotan Tanaman Cabai Sistem Kontrol Otomatis Berbasis IoT," *The Indonesian Journal of Computer Science*, vol. 14, no. 3, pp. 5113-5126, 2025.