

EVALUASI SISTEM PENYIRAMAN TANAMAN BERBASIS ESP32 DENGAN SUMBER ENERGI TENAGA SURYA UNTUK LAHAN HAMPARAN DI KELURAHAN BAKUNG JAYA

Fani Katarina Sinaga¹, Nehru², Andre Rabiula³

fanisinaga278@gmail.com¹, nehru@unja.co.id², andrerabiula@unja.co.id³

Universitas Jambi

ABSTRAK

Sistem penyiraman otomatis berbasis teknologi menjadi solusi strategis untuk optimalisasi distribusi air pada lahan pertanian. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja sistem penyiraman otomatis berbasis mikrokontroler ESP32 dengan sumber energi tenaga surya yang telah beroperasi sejak Oktober 2024 di lahan hamparan Kelurahan Bakung Jaya, Jambi. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan pengumpulan data primer melalui sensor kelembaban tanah, pengukuran suhu udara, dan monitoring radiasi matahari selama periode Mei-Agustus 2025. Evaluasi mencakup pengujian akurasi sensor, keseragaman distribusi air, dan performa sistem pembangkit listrik tenaga surya. Hasil pengujian menunjukkan sensor kelembaban tanah memiliki akurasi sangat baik dengan nilai MAPE di bawah 6 persen. Namun, sistem menghadapi keterbatasan pada keseragaman distribusi air dengan nilai Coefficient of Uniformity 69,1 persen dan Distribution Uniformity 50,9 persen yang tergolong kurang merata. Performa PLTS mencatat Performance Ratio 15,19-21,94 persen dengan defisit energi signifikan, dimana kapasitas panel 200 Wp hanya mampu memenuhi 11-16 persen kebutuhan energi pompa 1200 watt-jam per hari. Kapasitas baterai VRLA 50 Ah dengan energi efektif 270 watt-jam tidak mencukupi untuk satu siklus penyiraman penuh. Pengembangan sistem memerlukan peningkatan kapasitas panel menjadi 400 Wp, penggantian baterai menjadi 100 Ah, dan implementasi zonasi penyiraman menggunakan solenoid valve untuk meningkatkan keseragaman distribusi dan efisiensi energi.

Kata Kunci: Sistem Penyiraman Otomatis, Energi Surya, Mikrokontroler ESP32.

ABSTRACT

Technology-based automatic irrigation systems offer a strategic solution to optimize water distribution in agricultural land. This study aims to evaluate the performance of an ESP32-based automatic irrigation system powered by solar energy that has been operating since October 2024 on open farmland in Bakung Jaya Village, Jambi, Indonesia. The research employed a quantitative approach, with primary data collected through soil moisture sensors, air temperature measurements, and solar radiation monitoring during the period from May to August 2025. The evaluation included sensor accuracy testing, water distribution uniformity analysis, and performance assessment of the photovoltaic power system. The results indicate that the soil moisture sensors exhibit very good accuracy, with Mean Absolute Percentage Error (MAPE) values below 6%. However, the system experiences limitations in water distribution uniformity, with a Coefficient of Uniformity (CU) of 69.1% and Distribution Uniformity (DU) of 50.9%, indicating uneven irrigation performance. The photovoltaic system recorded a Performance Ratio ranging from 15.19% to 21.94%, revealing a significant energy deficit, as the 200 Wp solar panel capacity was only able to supply 11–16% of the daily energy demand of the irrigation pump (1200 Wh/day). In addition, the 50 Ah VRLA battery, with an effective energy capacity of 270 Wh, was insufficient to support a full irrigation cycle. System development therefore requires increasing the solar panel capacity to 400 Wp, upgrading the battery capacity to 100 Ah, and implementing irrigation zoning using solenoid valves to improve water distribution uniformity and overall energy efficiency.

Keywords: Automatic Irrigation Systems, Solar Energy, Microcontroller ESP32.

PENDAHULUAN

Ketahanan pangan global menghadapi tantangan signifikan akibat dinamika perubahan iklim yang semakin tidak terprediksi, pertumbuhan populasi yang eksponensial, dan keterbatasan sumber daya air yang kian memprihatinkan. Dalam konteks tersebut, optimalisasi sistem penyiraman tanaman menjadi salah satu solusi strategis yang tidak dapat diabaikan dalam upaya mewujudkan keberlanjutan produksi pertanian. Sistem penyiraman yang efisien dan cerdas merupakan fondasi vital dalam memastikan distribusi air yang optimal bagi tanaman, yang pada gilirannya menentukan produktivitas dan kualitas hasil pertanian secara keseluruhan (Buwarda & Makmur, 2023). Transformasi dari pendekatan konvensional menuju sistem penyiraman otomatis berbasis teknologi digital telah menjadi keniscayaan dalam era revolusi industri 4.0, di mana integrasi antara sensor, aktuator, dan sistem kendali cerdas memungkinkan pengelolaan air yang presisi dan responsif terhadap kondisi lingkungan secara real-time. Pergeseran paradigma ini tidak sekadar menawarkan efisiensi operasional, melainkan juga membuka peluang untuk implementasi praktik pertanian berkelanjutan yang menyelaraskan produktivitas dengan konservasi sumber daya alam.

Dalam lanskap pertanian Indonesia, lahan hamparan dengan karakteristik topografi datar dan area yang luas memiliki peran strategis sebagai lokus produksi tanaman pangan dan hortikultura secara intensif (Yusuf et al., 2024). Konfigurasi lahan hamparan yang terbuka dan tanpa elevasi signifikan menghadirkan keuntungan dari perspektif mekanisasi dan efisiensi pengelolaan, namun secara bersamaan menimbulkan kompleksitas tersendiri dalam konteks distribusi air. Ketiadaan gradien alami menyebabkan air cenderung terakumulasi pada titik-titik tertentu sambil meninggalkan area lain dalam kondisi defisit hidrasi, suatu fenomena yang dapat mengakibatkan heterogenitas pertumbuhan tanaman dan penurunan produktivitas lahan secara agregat. Problematika ini diperparah oleh tingkat evapotranspirasi yang tinggi pada musim kemarau, mengingat lahan hamparan tidak memiliki proteksi alami dari tutupan vegetasi vertikal atau struktur topografi yang dapat mereduksi paparan langsung terhadap radiasi matahari.

Transisi dari sistem penyiraman konvensional menuju sistem otomatis merepresentasikan evolusi fundamental dalam manajemen irigasi pertanian. Sistem konvensional yang masih mendominasi praktik petani skala kecil, meskipun memiliki keunggulan dari sisi kesederhanaan dan biaya investasi yang rendah, menghadapi limitasi serius dalam hal efisiensi penggunaan air, presisi waktu penyiraman, dan intensitas tenaga kerja yang diperlukan. Sebaliknya, sistem penyiraman otomatis memanfaatkan kemajuan teknologi sensor dan sistem kendali untuk mengatur distribusi air secara cerdas berdasarkan parameter lingkungan yang terukur, sehingga menawarkan superioritas dalam hal presisi aplikasi dan konservasi air (Subni et al., 2020). Integrasi teknologi mikrokontroler dalam sistem penyiraman otomatis telah membuka dimensi baru dalam otomasi pertanian, di mana keputusan penyiraman dapat dibuat secara otonom berdasarkan data kondisi tanah yang diperoleh secara kontinu.

Dimensi keberlanjutan energi dalam sistem penyiraman otomatis menjadi pertimbangan krusial, terutama di wilayah dengan infrastruktur kelistrikan yang terbatas atau tidak ekonomis untuk diakses. Pemanfaatan energi surya sebagai sumber daya primer untuk mengoperasikan sistem penyiraman otomatis merepresentasikan solusi yang tidak hanya berkelanjutan dari perspektif lingkungan, tetapi juga pragmatis dari segi ekonomi operasional jangka panjang. Teknologi fotovoltaik telah mencapai tingkat maturitas dan efisiensi yang memadai untuk aplikasi pertanian, dengan kemampuan konversi energi radiasi matahari menjadi listrik yang dapat diandalkan untuk mengoperasikan komponen elektronik dan aktuator mekanis (Romadhon et al., 2025). Integrasi antara sistem

penyiraman otomatis dan tenaga surya menciptakan ekosistem teknologi yang mandiri dan resilent, yang dapat beroperasi tanpa ketergantungan pada jaringan listrik konvensional.

Kelurahan Bakung Jaya merepresentasikan tipologi kawasan agraris dengan dominasi lahan hamparan yang dimanfaatkan untuk budidaya tanaman hortikultura, khususnya komoditas sayuran. Potensi agronomis yang dimiliki wilayah ini, yang ditandai oleh ketersediaan lahan luas dan kualitas tanah yang produktif, memberikan landasan kuat untuk intensifikasi produksi pertanian. Namun, realisasi potensi tersebut menghadapi hambatan signifikan akibat dominasi praktik penyiraman manual yang tidak efisien dan tidak responsif terhadap kebutuhan aktual tanaman. Konteks geografis dan sosio-ekonomi Kelurahan Bakung Jaya menjadikan wilayah ini sebagai lokus yang representatif untuk evaluasi implementasi teknologi penyiraman otomatis berbasis energi terbarukan.

Penelitian ini mengambil pendekatan evaluatif terhadap sistem penyiraman otomatis berbasis mikrokontroler ESP32 yang telah diimplementasikan di lahan hamparan Kelurahan Bakung Jaya sejak Oktober 2024. Sistem yang menjadi objek evaluasi memanfaatkan sensor kelembaban tanah untuk monitoring kondisi hidrasi substrat secara berkala, dengan threshold aktivasi yang ditetapkan pada nilai kelembaban 60 persen sebagai batas minimum untuk memicu mekanisme penyiraman (Triguntoro & Kelviandy, 2024). Pemilihan aktuator tipe sprinkler didasarkan pada pertimbangan kemampuannya untuk mendistribusikan air secara uniform ke area yang luas, karakteristik yang sangat sesuai dengan konfigurasi lahan hamparan. Dimensi keberlanjutan energi diwujudkan melalui integrasi panel surya dan sistem penyimpanan energi, yang memungkinkan operasi sistem secara otonom tanpa koneksi ke jaringan distribusi listrik PLN.

Urgensi penelitian ini bersumber dari kebutuhan empiris untuk memvalidasi kinerja sistem penyiraman otomatis berbasis energi terbarukan dalam kondisi operasional lapangan yang sesungguhnya, dengan durasi pengamatan yang memadai untuk mengidentifikasi pola kinerja jangka menengah. Evaluasi yang komprehensif terhadap sistem yang telah beroperasi lebih dari dua belas bulan memberikan perspektif yang lebih holistik mengenai reliabilitas, adaptabilitas, dan keberlanjutan teknologi dalam menghadapi variabilitas kondisi cuaca musiman. Dari perspektif akademik, penelitian ini berkontribusi pada korpus literatur mengenai aplikasi teknologi Internet of Things dan energi terbarukan dalam pertanian tropis, sebuah domain yang masih memerlukan ekspansi basis evidens empiris terutama dalam konteks geografis Indonesia. Secara praktis, temuan penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan teknis dan ekonomis bagi stakeholder pertanian dalam mengadopsi dan mengadaptasi teknologi penyiraman otomatis untuk meningkatkan efisiensi produksi dan keberlanjutan praktik pertanian.

Tujuan utama penelitian ini adalah melakukan evaluasi komprehensif terhadap kinerja sistem penyiraman otomatis berbasis ESP32 dengan sumber energi tenaga surya yang telah diimplementasikan di lahan hamparan Kelurahan Bakung Jaya. Evaluasi mencakup parameter-parameter kritis seperti kemampuan sistem dalam mempertahankan kelembaban tanah pada level optimal, responsivitas terhadap perubahan kondisi meteorologis, efisiensi konsumsi air, dan stabilitas pasokan energi dari panel fotovoltaik. Berdasarkan temuan evaluasi, penelitian ini juga akan menyusun proposal pengembangan sistem yang dapat meningkatkan efektivitas operasional. Hipotesis yang mendasari penelitian ini adalah bahwa sistem penyiraman otomatis berbasis ESP32 dengan tenaga surya mampu mempertahankan kelembaban tanah pada level optimal secara konsisten, menghasilkan efisiensi penggunaan air yang superior dibandingkan metode konvensional, dan beroperasi secara stabil dengan pasokan energi surya tanpa memerlukan intervensi manual yang signifikan. Kesimpulan utama yang diantisipasi dari penelitian ini adalah konfirmasi bahwa integrasi teknologi mikrokontroler, sensor kelembaban tanah, aktuator

sprinkler, dan sistem energi surya dapat membentuk ekosistem penyiraman otomatis yang efektif, efisien, dan berkelanjutan untuk aplikasi pertanian lahan hamparan, dengan potensi replikabilitas yang tinggi untuk berbagai konteks geografis dan agronomis di Indonesia.

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di lahan hamparan Desa Tani Bakung Jaya, Kelurahan Bakung Jaya, Kota Jambi, Provinsi Jambi, dengan dimensi lahan berukuran 13,8 meter lebar dan 24 meter panjang. Periode pelaksanaan penelitian berlangsung selama empat bulan, dimulai dari bulan Mei hingga Agustus 2025. Penelitian ini mengadopsi pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja sistem penyiraman otomatis berbasis mikrokontroler ESP32 yang telah beroperasi sejak Oktober 2024 (Risal et al., 2024). Pemilihan pendekatan kuantitatif dimaksudkan untuk menghasilkan data numerik yang terukur dan dapat dianalisis secara statistik menggunakan Microsoft Excel, sehingga memberikan gambaran objektif mengenai performa sistem dalam kondisi operasional lapangan yang sesungguhnya.

Pengumpulan data dilakukan melalui dua kategori utama, yakni data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan sensor-sensor yang terintegrasi dalam sistem, meliputi sensor kelembaban tanah, pengukuran suhu udara, dan monitoring intensitas radiasi matahari (Nasrullah, 2011). Data sekunder dikumpulkan dari literatur ilmiah, laporan penelitian terdahulu, data meteorologis historis, serta informasi dari instansi pertanian lokal. Spesifikasi komponen sistem penyiraman didokumentasikan secara komprehensif, mencakup komponen input berupa panel surya off-grid dengan daya puncak 100 Wp, tegangan 18 V, dan arus 5,5 A yang dirancang untuk menghasilkan energi listrik yang dapat diandalkan. Sistem konversi energi menggunakan inverter tipe pure sine wave berkapasitas 1000 W dengan input 24 V DC dan output 220 V AC untuk menyuplai komponen yang memerlukan tegangan bolak-balik (Mulianda et al., 2025). Penyimpanan energi memanfaatkan baterai VRLA 12 V dengan kapasitas 55 Ah yang memiliki karakteristik penyimpanan energi yang stabil untuk aplikasi sistem tenaga surya, serta sensor kelembaban tanah yang beroperasi pada tegangan 3,3-5 V DC dengan konsumsi arus 5-35 mA untuk monitoring kondisi substrat secara berkala.

Komponen pemrosesan menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP32 dengan prosesor dual-core 160 MHz dan RAM 520 KB yang dilengkapi konektivitas WiFi dan Bluetooth untuk memungkinkan sistem kendali yang cerdas dan responsive. Komponen output terdiri dari pompa jet berdaya 600 W yang berfungsi sebagai aktuator penggerak fluida dalam sistem distribusi air, sprinkler rotari dengan debit 500 liter per jam dan jangkauan 3-5 meter yang dipilih berdasarkan kemampuannya mendistribusikan air secara merata pada lahan hamparan, LCD 20x4 I2C bertegangan 5 V sebagai antarmuka visualisasi data sistem, dan solid state relay dengan input 3-32 V DC serta output 24-480 V AC yang berfungsi sebagai saklar elektronik untuk mengaktifkan pompa berdasarkan sinyal dari mikrokontroler.

Evaluasi kinerja sistem dilakukan melalui serangkaian pengujian terstruktur untuk mengukur akurasi sensor, efisiensi distribusi air, dan performa komponen pendukung. Pengujian sensor kelembaban tanah dilakukan dengan membandingkan pembacaan tiga sensor yang terpasang terhadap alat ukur standar, kemudian menghitung deviasi rata-rata dan persentase error untuk menilai presisi pengukuran (Alam, 2018). Pengujian debit dan cakupan sprinkler dilakukan dengan mengukur volume air yang dikeluarkan per satuan waktu menggunakan prinsip pengukuran aliran fluida, tekanan kerja sistem, dan radius penyebaran air pada kondisi operasional normal (Andini, 2019). Keseragaman distribusi

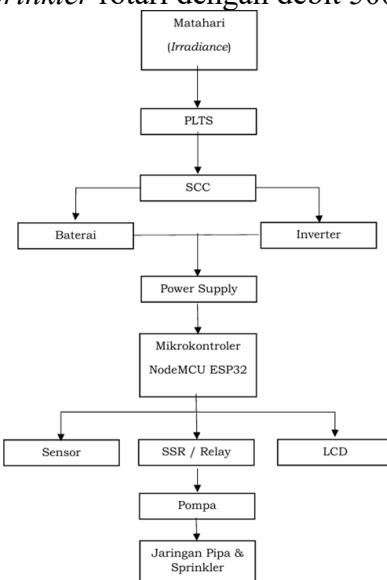
air dievaluasi menggunakan metode penampungan air dengan menempatkan wadah ukur pada titik-titik strategis di sekitar sprinkler, kemudian mengukur volume air tertampung menggunakan gelas ukur dan mengkonversinya menjadi kedalaman air. Data kedalaman air digunakan untuk menghitung Coefficient of Uniformity (CU) dan Distribution Uniformity (DU) sebagai indikator keseragaman penyiraman yang mengacu pada standar evaluasi sistem irigasi (Measurement & Station, 2021). Interpretasi nilai CU mengikuti standar yang dikemukakan oleh Hashim et al. (2021), di mana nilai CU di atas 90 persen mengindikasikan distribusi sangat merata, nilai 80-90 persen menunjukkan distribusi merata, nilai 70-80 persen mencerminkan distribusi cukup merata, dan nilai di bawah 70 persen mengindikasikan distribusi yang kurang merata.

Analisis performa sistem PLTS didasarkan pada perhitungan Performance Ratio (PR) untuk menilai efisiensi konversi energi surya menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan sistem, dengan mempertimbangkan data radiasi matahari lokal yang diperoleh dari stasiun klimatologi setempat (Anggraeni, 2024). Seluruh indikator kinerja yang diperoleh dianalisis secara komprehensif untuk menentukan tingkat keberhasilan operasional sistem dan mengidentifikasi area yang memerlukan optimalisasi lebih lanjut, sehingga memberikan dasar empiris bagi pengembangan sistem penyiraman otomatis berbasis energi terbarukan pada aplikasi pertanian lahan hamparan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Lokasi dan Konfigurasi Sistem

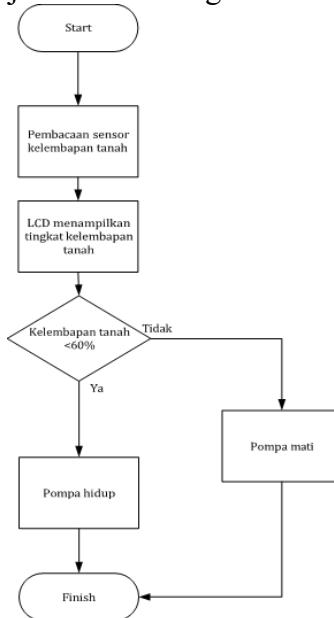
Penelitian dilaksanakan pada lahan hamparan berukuran 24 meter x 13,8 meter di Kelurahan Bakung Jaya, Kota Jambi, dengan karakteristik topografi datar dan terbuka. Sistem penyiraman otomatis yang dievaluasi merupakan instalasi yang telah beroperasi sejak Oktober 2024, terdiri dari komponen input berupa dua panel surya 100 Wp yang dirangkai paralel, inverter tipe *pure sine wave* berkapasitas 1000 watt, serta baterai VRLA 12 volt 50 Ah. Komponen pemrosesan menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP32 dengan prosesor *dual-core* 160 MHz, sedangkan komponen output terdiri dari pompa jet 600 watt dan dua belas unit *sprinkler* rotari dengan debit 500 liter per jam.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Penyiraman

Sumber air diambil dari sumur bor dengan kedalaman 8 meter dan jarak horizontal 22 meter menuju lahan. Jaringan distribusi menggunakan pipa utama diameter 2 inci sepanjang 22 meter yang bercabang menjadi pipa lateral diameter setengah inci sepanjang 12 meter. Jarak antar *sprinkler* ditetapkan 6 meter dengan tinggi pipa 1 meter dan radius

pancaran 3 meter. Sistem monitoring menggunakan tiga sensor kelembaban tanah dengan jarak antar sensor 4 meter, bekerja otomatis dengan threshold aktivasi 60 persen.



Gambar 2. Diagram Alir Prinsip Kerja Alat

Performa Komponen Sistem

Pengukuran lapangan menunjukkan panel surya menghasilkan daya puncak 107 Wp dengan tegangan 12-19,5 volt dan arus 5,5 ampere. Inverter beroperasi dengan kapasitas 1000 watt pada input 12-19,5 volt DC dan output 220 volt AC. Baterai memiliki kapasitas aktual 50 Ah dengan energi 660 watt-jam. Sensor kelembaban tanah beroperasi pada tegangan 3,3-5 volt DC dengan konsumsi arus kurang dari 20 miliampere, mampu mendeteksi kelembaban 20-100 persen.

Tabel 1. Spesifikasi Komponen Input

No.	Komponen	Spesifikasi Utama	Hasil Ukur Lapangan	Keterangan
1.	Panel Surya (Off Grid)	Daya Puncak : 100 Wp Tegangan 18 V Arus 5,5 A	Daya Puncak: 107 Wp Tegangan: 12 – 19,5 V – 19,5 V Arus : 5,5 A Jumlah Panel : 2	Berfungsi baik,namun efisiensi menurun pada kondisi mendung.
2.	Inverter	Tipe ; Pure Sine Wave Kapasitas : 1000 W Input : 24 V DC Output : 220 V AC	Kapasitas : 1000 W Input : 12 – 19,5 V DC Output : 220 V AC	Berfungsi dengan baik
3.	Baterai	Tipe : VRLA 12 V Kapasitas : 55 Ah Energi : 660 Wh	Kapasitas = 50 Ah Energi : 660 Wh	Berfungsi baik, tapi kurang tahan lama saat cuaca mendung.
4.	Sensor Soi 1 Moisture	Tegangan Kerja : 3,3 V – 5 V DC Arus = 5 mA – 35 mA	Tegangan Kerja = 3,3 V – 5 V DC Arus = <20 mA Deteksi Kelembapan = 20 – 100 %	Berfungsi dengan baik, tapi tidak dapat mewakilkan pembacaan keseluruhan lahan.

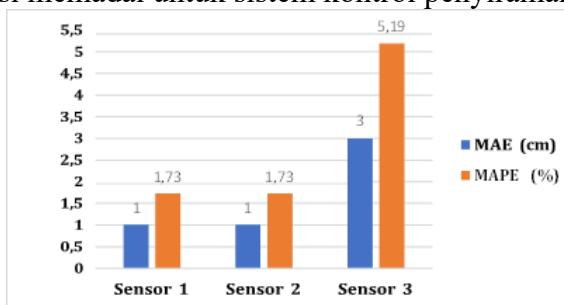
Akurasi Sensor Kelembaban Tanah

Pengujian akurasi sensor dilakukan dengan membandingkan pembacaan tiga sensor terhadap alat ukur standar pada lima tingkat kelembaban berbeda. Sensor 1 dan 2 menunjukkan deviasi rata-rata 1 persen dengan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) 1,73 persen. Sensor 3 memiliki deviasi 3 persen dengan MAPE 5,19 persen.

Tabel 2. pengujian sensor kelembapan

Pembacaan Alat Ukur (%)	Pembacaan Soil Moisture (%)	Sensor		
		Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
40	41		41	43
50	51		51	53
60	61		61	63
70	71		71	73
95	96		95	98
Deviasi rata-rata	1		1	3
Error (%)	1,73		1,73	5,19

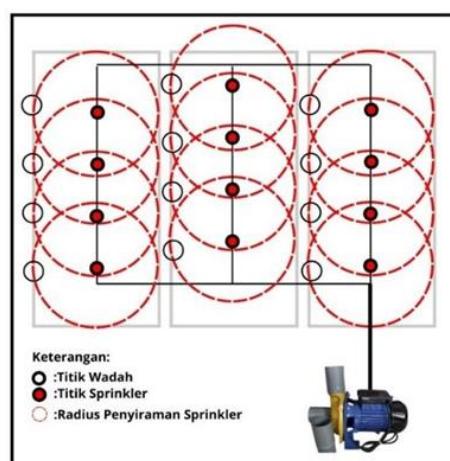
Ketiga sensor menunjukkan performa sangat baik dengan error di bawah 10 persen, mengindikasikan presisi memadai untuk sistem kontrol penyiraman otomatis.



Gambar 3. Grafik MAE dan MAPE

Keseragaman Distribusi Penyiraman

Evaluasi keseragaman dilakukan melalui penampungan air pada wadah yang ditempatkan di sekitar *sprinkler*. Nilai rata-rata acuan kedalaman air ditetapkan 0,24 milimeter. Perhitungan *Coefficient of Uniformity* (CU) rata-rata sistem menghasilkan 69,1 persen dan *Distribution Uniformity* (DU) 50,9 persen, mengindikasikan distribusi kurang merata.



Gambar 4. Konfigurasi Penempatan Wadah Penampung untuk Pengujian Keseragaman

Tabel 3. Hasil Pengujian CU

Sprinkler	Rata-rata Kedalaman Air (mm)	Rata-rata Acuan (mm)	Selisih Absolut	CU (%)	DU (%)
1	0,21	0,24	0,03	85,71	77,29
2	0,21	0,24	0,03	84,62	75,54
3	0,20	0,24	0,04	78,79	66,27
4	0,19	0,24	0,05	75,00	60,25
5	0,19	0,24	0,05	73,68	58,16
6	0,18	0,24	0,06	66,67	47,00
7	0,18	0,24	0,06	66,67	47,00
8	0,17	0,24	0,07	62,07	39,69
9	0,17	0,24	0,07	60,47	37,14
10	0,17	0,24	0,07	57,14	31,86
11	0,17	0,24	0,07	57,14	31,86
12	0,16	0,24	0,08	50,00	20,50
Total	2,20	-	0,68	69,1	50,9

Penurunan keseragaman menunjukkan *sprinkler* 1-2 memiliki CU di atas 80 persen (merata), sementara *sprinkler* 8-12 menunjukkan CU di bawah 62 persen (kurang merata), mengindikasikan penurunan tekanan progresif sepanjang jaringan pipa.

Performa PLTS

Pengukuran performa PLTS menunjukkan tegangan keluaran 12,5-19,0 volt dengan arus 5,5 ampere, menghasilkan daya 68,75-104,50 watt. Setelah konversi inverter dengan efisiensi 90 persen, daya keluaran AC berkisar 66,83-96,53 watt.

Tabel 4. Data Keluaran PLTS

Tanggal	Tegangan Panel (V)	Arus (A)	Daya Output (W)
20 Juli 2025	13,0	5,5	71,50
21 Juli 2025	19,0	5,5	104,50
23 Juli 2025	13,5	5,5	74,25
25 Juli 2025	13,2	5,5	72,60
28 Juli 2025	12,5	5,5	68,75
29 Juli 2025	13,2	5,5	72,60
30 Juli 2025	13,3	5,5	73,15

Dengan durasi operasi 2 jam per hari, energi keluaran harian 133,66-193,06 watt-jam. Perhitungan *Performance Ratio* (PR) berdasarkan *Peak Sun Hours* 4,4 jam menghasilkan nilai 15,19-21,94 persen.

Analisis Kebutuhan Energi

Analisis kebutuhan energi menunjukkan total head sistem 30 meter menghasilkan tekanan pompa 3 bar. Pompa 600 watt memerlukan energi 600 watt-jam per jam atau 1200 watt-jam untuk dua kali siklus penyiraman per hari. Kapasitas energi efektif baterai VRLA 12 volt 50 Ah dengan *Depth of Discharge* 50 persen dan efisiensi 90 persen adalah 270 watt-jam, tidak mencukupi untuk satu siklus penyiraman penuh yang memerlukan 600 watt-jam.

Pembahasan

Evaluasi komprehensif terhadap sistem penyiraman otomatis berbasis ESP32 dengan tenaga surya mengungkapkan beberapa temuan signifikan yang berimplikasi pada efektivitas operasional dan keberlanjutan sistem. Akurasi sensor kelembaban tanah dengan nilai MAPE di bawah 6 persen mengonfirmasi bahwa sistem mampu mendeteksi kondisi substrat dengan presisi memadai untuk pengambilan keputusan penyiraman otomatis, sejalan dengan penelitian (Cahyono, 2019) yang menekankan pentingnya akurasi sensor dalam sistem kendali penyiraman berbasis kelembaban tanah untuk memastikan

responsivitas sistem terhadap kebutuhan aktual tanaman. Stabilitas pembacaan sensor 1 dan 2 dengan error identik 1,73 persen menunjukkan konsistensi kualitas komponen, sementara deviasi sensor 3 yang lebih tinggi pada 5,19 persen mengindikasikan kemungkinan adanya variasi karakteristik tanah yang mempengaruhi sensitivitas deteksi kelembaban.

Keterbatasan utama sistem teridentifikasi pada aspek keseragaman distribusi air, dengan nilai CU 69,1 persen dan DU 50,9 persen yang mengindikasikan distribusi kurang merata menurut standar interpretasi (Maricar, 2020) yang menetapkan bahwa nilai CU di bawah 70 persen tergolong kategori distribusi kurang optimal untuk aplikasi irigasi presisi. Pola penurunan progresif keseragaman dari *sprinkler* 1 dengan CU 85,71 persen hingga *sprinkler* 12 dengan CU 50,00 persen mencerminkan fenomena kehilangan tekanan dalam aliran fluida yang konsisten dengan prinsip hukum Bernoulli dan persamaan Darcy-Weisbach dalam mekanika fluida. Ketika air mengalir melalui pipa dengan panjang total lebih dari 40 meter, terjadi disipasi energi akibat gesekan antara fluida dengan dinding pipa, turbulensi aliran pada sambungan, serta perubahan arah pada fitting seperti *elbow* dan *tee pipe*, yang secara kumulatif menyebabkan penurunan tekanan signifikan pada outlet yang lebih jauh dari pompa.

Implikasi agronomis dari ketidakseragaman distribusi air ini sangat signifikan terhadap produktivitas tanaman, mengingat area yang menerima *sprinkler* 1-3 dengan CU di atas 78 persen akan mengalami kondisi kelembaban optimal, sementara area dengan *sprinkler* 8-12 yang memiliki CU di bawah 62 persen berisiko mengalami defisit hidrasi yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan menurunkan kualitas hasil panen. Penelitian (Azmi et al., 2019) mengenai efisiensi teknologi irigasi *sprinkler* di lahan pertanian menunjukkan bahwa nilai CU optimal di atas 85 persen diperlukan untuk memastikan pertumbuhan tanaman homogen dan efisiensi penggunaan air maksimal, menegaskan urgensi perbaikan sistem untuk meningkatkan keseragaman distribusi.

Strategi pengembangan melalui pembagian sistem menjadi beberapa zona penyiraman dengan kontrol *solennoid valve* menjadi solusi relevan untuk mengatasi problematika ketidakseragaman ini, sebagaimana telah diterapkan pada sistem irigasi modern untuk meningkatkan stabilitas tekanan dan keseragaman distribusi. Dengan mengaktifkan *sprinkler* secara bertahap per zona, tekanan air pada setiap *sprinkler* aktif dapat dipertahankan pada level optimal tanpa mengalami penurunan akibat pembagian debit ke terlalu banyak outlet simultan. Pendekatan zonasi ini tidak hanya meningkatkan keseragaman distribusi tetapi juga mengurangi beban hidrolik pompa, sehingga mengoptimalkan efisiensi energi sistem secara keseluruhan.

Performa PLTS dengan PR 15,19-21,94 persen menunjukkan efisiensi konversi energi yang jauh di bawah standar optimal sistem fotovoltaik komersial, yang umumnya mencapai 70-80 persen pada kondisi operasi ideal. Rendahnya nilai PR disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor teknis, meliputi kehilangan energi pada proses konversi DC ke AC melalui inverter yang hanya memiliki efisiensi 90 persen, fluktuasi intensitas radiasi akibat variabilitas cuaca, temperatur operasi panel yang tinggi akibat paparan langsung sinar matahari yang menurunkan efisiensi konversi fotovoltaik, serta keterbatasan kapasitas terpasang panel 200 Wp yang tidak sebanding dengan beban energi system. Data pengukuran menunjukkan variasi tegangan keluaran signifikan antara 12,5-19,0 volt, mengindikasikan kondisi pembangkitan energi yang tidak stabil dan sangat bergantung pada kondisi meteorologis.

Dengan energi keluaran harian aktual berkisar 133,66-193,06 watt-jam, sistem PLTS eksisting hanya mampu memenuhi 11-16 persen dari kebutuhan energi pompa untuk dua kali siklus penyiraman per hari yang mencapai 1200 watt-jam, mengakibatkan defisit

energi signifikan yang membahayakan keberlanjutan operasional sistem (Ilmiyah et al., 2024). Ketergantungan sistem pada pengisian baterai simultan selama operasi pompa menjadi tidak realistik pada kondisi intensitas radiasi rendah. Ketidakcukupan kapasitas baterai VRLA 50 Ah dengan energi efektif 270 watt-jam memperparah kondisi defisit energi, di mana baterai tidak mampu menyimpan energi cukup untuk mengoperasikan pompa selama satu siklus penyiraman penuh tanpa mengalami pengosongan di bawah batas aman DoD 50 persen (Buwarda & Makmur, 2023). Karakteristik baterai VRLA yang membatasi DoD pada 50 persen untuk mencegah degradasi prematur membuat energi tersimpan yang dapat dimanfaatkan menjadi sangat terbatas.

Analisis mendalam terhadap konfigurasi jaringan distribusi menunjukkan bahwa penurunan progresif nilai CU dari 85,71 persen pada sprinkler pertama hingga 50,00 persen pada sprinkler kedua belas mencerminkan fenomena kehilangan energi hidrolik yang kompleks dalam sistem perpipaan. Panjang total jaringan pipa yang mencapai lebih dari 40 meter, terdiri dari pipa utama berdiameter 2 inci sepanjang 22 meter dan pipa lateral berdiameter setengah inci sepanjang 12 meter, menciptakan resistensi aliran yang substansial terhadap pergerakan fluida. Transisi diameter dari pipa utama ke pipa lateral melalui komponen reducer menimbulkan turbulensi lokal yang berkontribusi pada disipasi energi kinetik fluida, sementara penggunaan fitting seperti elbow pipe dan tee pipe pada titik percabangan mengakibatkan perubahan arah aliran mendadak yang memperbesar koefisien kehilangan minor dalam sistem (Anggraeni, 2024).

Perhitungan total head pompa sebesar 30 meter yang terdiri dari head hisap 8 meter dan head dorong 22 meter menghasilkan tekanan operasi pompa 3 bar, nilai yang secara teoretis memadai untuk mengoperasikan sprinkler rotari dengan spesifikasi tekanan kerja 1-3 bar. Namun, ketika debit total sistem 100 liter per menit didistribusikan simultan ke dua belas outlet sprinkler, terjadi pembagian debit yang mengakibatkan penurunan kecepatan aliran pada pipa lateral, yang selanjutnya mengurangi tekanan dinamis tersedia pada sprinkler yang berlokasi jauh dari sumber pompa. Fenomena ini diperparah oleh karakteristik aliran dalam pipa yang mengalami transisi dari rejim turbulen pada pipa utama berdiameter besar menuju rejim laminar pada pipa lateral berdiameter kecil, menciptakan profil kecepatan yang tidak uniform dan memperbesar gesekan dinding pipa (Azmi et al., 2019).

Defisit energi sistem PLTS yang signifikan, dimana kapasitas pembangkitan aktual hanya mencapai 11-16 persen dari kebutuhan harian 1200 watt-jam, mengungkapkan ketidakseimbangan fundamental antara desain sistem energi dan beban operasional. Variasi tegangan keluaran panel antara 12,5-19,0 volt menunjukkan ketergantungan kuat sistem terhadap kondisi radiasi matahari, dengan tegangan minimum 12,5 volt mengindikasikan kondisi operasi marginal yang mendekati batas minimum tegangan charging baterai VRLA 12 volt. Dalam kondisi demikian, charge controller mengalami kesulitan mempertahankan arus pengisian optimal, mengakibatkan waktu pengisian baterai memanjang dan efisiensi transfer energi menurun drastis. Keterbatasan kapasitas energi efektif baterai 270 watt-jam yang hanya mampu memenuhi 45 persen kebutuhan satu siklus penyiraman memaksa sistem beroperasi dengan margin keamanan yang sangat tipis, meningkatkan risiko pengosongan baterai hingga melampaui batas DoD yang direkomendasikan 50 persen (Andini, 2019).

Implementasi zonasi penyiraman melalui integrasi solenoid valve merepresentasikan transformasi fundamental dalam filosofi desain sistem distribusi air, mengubah pendekatan dari distribusi simultan menuju distribusi sekuensial yang terkendali. Dengan membagi dua belas sprinkler menjadi tiga zona masing-masing empat sprinkler, debit total 100 liter per menit dapat difokuskan pada empat outlet aktif, meningkatkan debit per

sprinkler dari 8,33 liter per menit menjadi 25 liter per menit, yang secara signifikan meningkatkan tekanan operasi dan jangkauan pancaran. Strategi ini mengoptimalkan karakteristik hidrolik pompa dengan mempertahankan titik operasi pada kurva performa optimal, dimana efisiensi volumetrik dan efisiensi mekanis pompa mencapai nilai maksimal. Pengurangan jumlah sprinkler aktif simultan juga menurunkan beban instan pompa dari 600 watt menjadi sekitar 200 watt per zona, memungkinkan kapasitas energi baterai 270 watt-jam mendukung operasi satu zona lengkap dengan cadangan energi tersisa (Adi et al., 2021).

Peningkatan kapasitas panel surya dari 200 Wp menjadi 400 Wp melalui konfigurasi 2S2P memberikan solusi komprehensif terhadap problematika energi sistem. Konfigurasi seri-paralel menghasilkan tegangan sistem 36-39 volt dengan arus 11 ampere, menciptakan karakteristik keluaran yang optimal untuk pengisian baterai VRLA 12 volt dengan efisiensi charge controller maksimal. Proyeksi energi harian 1320 watt-jam tidak hanya mencukupi kebutuhan operasional tetapi juga menyediakan surplus 10 persen untuk kompensasi kehilangan sistem dan pengisian baterai cadangan (Alam, 2018).

Peningkatan kapasitas panel surya menjadi 400 Wp dengan konfigurasi 2S2P dan penggantian baterai menjadi 100 Ah menjadi strategi pengembangan esensial untuk meningkatkan keandalan dan keberlanjutan sistem. Konfigurasi 2S2P memberikan keunggulan ganda berupa peningkatan tegangan sistem yang memfasilitasi efisiensi *charge controller* dan peningkatan arus output yang memperbesar kapasitas pembangkitan energi harian. Proyeksi energi keluaran harian sistem hasil pengembangan mencapai 1320 watt-jam mampu mendukung operasi sistem secara mandiri dengan surplus energi untuk pengisian baterai, memastikan ketersediaan cadangan energi pada kondisi cuaca tidak ideal (Adi et al., 2021). Integrasi *solenoid valve* untuk implementasi zonasi penyiraman tidak hanya meningkatkan keseragaman distribusi air tetapi juga mengoptimalkan konsumsi energi dengan mengurangi jumlah *sprinkler* aktif simultan, menurunkan beban debit pompa, dan meningkatkan nilai CU diproyeksikan di atas 80 persen.

KESIMPULAN

Evaluasi komprehensif terhadap sistem penyiraman otomatis berbasis ESP32 dengan tenaga surya di lahan hamparan Kelurahan Bakung Jaya menghasilkan temuan penting terkait performa operasional sistem. Sensor kelembaban tanah menunjukkan akurasi sangat baik dengan nilai MAPE maksimal 5,19 persen, membuktikan kemampuan sistem dalam mendeteksi kondisi substrat secara presisi untuk pengambilan keputusan penyiraman otomatis. Namun demikian, sistem mengalami keterbatasan signifikan pada aspek keseragaman distribusi air dan kecukupan energi. Nilai CU 69,1 persen dan DU 50,9 persen mengindikasikan distribusi air kurang merata akibat penurunan tekanan progresif sepanjang jaringan pipa, dengan sprinkler terjauh mengalami penurunan CU hingga 50 persen. Performa PLTS dengan PR 15,19-21,94 persen dan kapasitas panel 200 Wp hanya mampu memenuhi 11-16 persen kebutuhan energi harian sistem, sementara baterai VRLA 50 Ah dengan energi efektif 270 watt-jam tidak mencukupi untuk satu siklus penyiraman penuh yang memerlukan 600 watt-jam. Pengembangan sistem melalui peningkatan kapasitas panel surya menjadi 400 Wp konfigurasi 2S2P, penggantian baterai menjadi 100 Ah, dan implementasi zonasi penyiraman menggunakan *solenoid valve* menjadi rekomendasi esensial untuk meningkatkan keseragaman distribusi air, keandalan pasokan energi, dan keberlanjutan operasional sistem penyiraman otomatis berbasis energi terbarukan pada aplikasi pertanian lahan hamparan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adi, A., Rohman, N., Hidayat, R., Ramadhan, R., Studi, P., Otomasi, T., Industri, L., Elektro, J. T., Jakarta, P. N., & A, J. P. G. (2021). Pemrograman Mesin Smart Bartender Menggunakan Software Arduino IDE Berbasis Microcontroller ATmega2560. 6, 14–21.
- Alam, S. (2018). Rancang Bangun Sistem Penyiraman Otomatis Untuk Tanaman Berbasis Arduino Dan Kelembaban Tanah. 3(1), 44–57.
- Andini, M. D. (2019). Rancang Bangun Alat Praktikum Hukum Bernoulli Pada Fluida Ideal. 2(1), 379–382.
- Anggraeni, K. A. (2024). Analisis konsep penerapan mekanika dalam sistem irigasi pertanian berbasis teknologi. 8(2), 248–257.
- Azmi, F. A., Gunawan, T., Hapsari, G. I., Terapan, F. I., & Telkom, U. (2019). Sistem Penyiraman Bibit Tanaman Dengan Monitoring Berbasis Web. 5(1), 152–160.
- Buwarda, S., & Makmur, I. (2023). Pengembangan Sistem Penyiraman Tanaman Hortikultura Berbasis Mikrokontroller Esp32 Dan Aplikasi Telegram. 282–288.
- Cahyono, A. (2019). Rancang Bangun Sistem Kontrol Penyiram Tanaman Berdasarkan Sensor Soil Moisture Dengan Menggunakan Arduino. 11(1), 7–12.
- Maricar, M. A. (2020). Analisa Perbandingan Nilai Akurasi Moving Average dan Exponential Smoothing untuk Sistem Peramalan Pendapatan pada Perusahaan XYZ. 36–45.
- Measurement, T., & Station, C. (2021). Pengukuran dan Analisa Data Radiasi Matahari di Stasiun Klimatologi Muaro Jambi. 12(1), 40–47. <https://doi.org/10.46824/megasains.v12i1.45>
- Mulianda, P., Damanik, A. P., & Surya, S. A. (2025). Optimization of Drip Irrigation System to Improve Water Use Efficiency and Tomato Crop Productivity Journal of Agriculture (JoA). 02, 296–299.
- Nasrullah, E. (2011). Rancang Bangun Sistem Penyiraman Tanaman Secara Otomatis Menggunakan Sensor Suhu Lm35 Berbasis Mikrokontroler Atmega8535. 5(3), 182–192.
- Risal, A., Jawad, Y. A., Sidik, D., Elektronika, P. T., Makassar, U. N., Elektronika, P. T., & Makassar, U. N. (2024). Pkm Meningkatkan Keterampilan Siswa Melalui Pelatihan Mikrokontroller Nodemcu Esp8266 Di Era Industri 4.0. 2, 71–75.
- Romadhon, M. F., Haryati, N., Yustitia, B. P., & Lim, G. C. (2025). Evaluasi Manajemen dan Finansial Berbasis Implementasi Rancang Bangun Irigasi Tetes sebagai Strategi Adaptasi Perubahan Iklim (Studi pada Petani Jeruk Siam). 36(1), 1–12.
- Subni, G., Putra, A., Nabila, A., Pulungan, B., & Padang, U. N. (2020). Power Supply Variabel Berbasis Arduino. 1(2), 139–143.
- Yusuf, M., Sahidu, A., & Sarjan, M. (2024). Sustainable Dry Land Farming Development Through Integration of Crops and Bali Cattle in North Lombok District, from an Ontological Perspective.