

Pengembangan Sistem Pompa Air Otomatis Berbasis PLTS *Off-Grid* untuk Irigasi Sawah

Ar Rasyid Arumas^{*a)}, Mahendra Widyartono^{a)}, Ayusta Lukita Wardani^{a)}, Reza Rahmadian^{a)}

(Received 15 Januari 2026 || Revised 2 Juli 2026 || Published 9 Juli 2026)

Abstract: *Conventional irrigation systems in rural agricultural areas are generally operated manually and rely on fossil-fuel-based pumps, resulting in high operational costs and low efficiency, particularly during the dry season. The objective of this research is to develop an autonomous irrigation system based on an off-grid photovoltaic power system that operates automatically according to water availability conditions. The proposed system utilizes a 250 Wp photovoltaic panel, a 12 V 200 Ah VRLA battery, an Arduino Uno microcontroller, float switch sensors for water level detection, and a LoRa-based communication module for security and remote monitoring. Field testing was conducted under actual operating conditions during five hours of effective solar irradiation by measuring photovoltaic output parameters (voltage, current, power, and energy), pump operating performance, automatic control response, and LoRa communication reliability. The photovoltaic system produced a total daily energy of 622.34 Wh under the test conditions. The water pump operated for approximately 2.5 hours with an actual power consumption of ± 500 W. The automatic control system successfully operated according to water availability in the river and irrigation demand in the rice field. In addition, the LoRa-based security system successfully transmitted warning signals over a distance of 300 m without data loss. These results indicate that the proposed system operates reliably for automatic rice field irrigation and remote security monitoring; however, increasing the photovoltaic capacity is recommended to better satisfy the system's daily energy demand.*

Keywords: *solar water pump, automatic irrigation, rice field irrigation, off-grid photovoltaic system, Arduino Uno, LoRa*

1. Pendahuluan

Pertanian menjadi sektor yang memegang peranan penting dalam perekonomian sebagian besar negara berkembang [1]. Hingga saat ini, sektor pertanian masih menjadi sumber mata pencaharian utama bagi masyarakat Indonesia, termasuk di wilayah Dusun Sumbernongko, Desa Denanyar, Kabupaten Jombang. Salah satu bentuk kegiatan pertanian yang umum dilakukan adalah budidaya padi di lahan sawah, di mana sebagian sawah telah didukung oleh sistem irigasi yang memadai, sementara sebagian lainnya masih bergantung pada curah hujan atau pemanfaatan air dari sungai untuk memenuhi kebutuhan pengairan [2].

Pada musim kemarau, ketersediaan air sungai yang menjadi sumber utama irigasi cenderung tidak stabil sehingga proses pengairan sawah sering kali tidak berjalan secara optimal [3]. Kondisi ini menyebabkan perlunya pemantauan air secara manual guna memastikan ketersediaan air sebelum mengoperasikan pompa [4]. Di sisi lain, sistem irigasi yang masih mengandalkan pompa air berbahan bakar fosil dengan harga yang semakin meningkat menyebabkan tingginya biaya operasional [5],[6]. Ketergantungan pada pemantauan manual dan sumber energi fosil tersebut menunjukkan bahwa sistem irigasi yang digunakan masih kurang efektif.

Indonesia memiliki potensi energi surya yang tinggi akibat intensitas penyinaran matahari yang relatif stabil [7]. Potensi energi surya di Indonesia mencapai 3.294 GWp [8], lebih tinggi dibandingkan potensi sumber energi terbarukan lainnya. Panel surya merupakan salah satu teknologi yang dapat mengubah energi matahari menjadi listrik [9]. Panel surya tersusun atas sejumlah sel surya yang dirangkai untuk menghasilkan keluaran sesuai kebutuhan. Sel-sel tersebut mengkonversi energi cahaya matahari menjadi listrik arus searah, yang dapat disimpan dalam baterai sebagai cadangan energi listrik. [10]. Pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), konfigurasi berdasarkan keterhubungan dengan jaringan dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu PLTS yang terhubung langsung dengan jaringan PLN (*On-Grid*), PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan PLN atau dikenal

sebagai sistem *Off-Grid*, serta PLTS yang dikombinasikan dengan jenis pembangkit lain yang disebut sebagai sistem PLTS *Hybrid* [11],[12],[13].

Penerapan teknologi irigasi menjadi komponen utama dalam upaya peningkatan efisiensi dan hasil produksi pertanian [14]. Pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi alternatif untuk sistem irigasi telah banyak dikembangkan karena bersifat ramah lingkungan dan berkelanjutan. Penelitian yang dilakukan oleh Izzul Fazlul Alam, Abdul Azis, dan Perawati pada tahun 2023 membahas perencanaan pompa air tenaga surya untuk irigasi sawah seluas 20 ha, namun penelitian tersebut belum mencakup tahap implementasi dan pengujian sistem secara langsung [2]. Penelitian lain oleh Abraham Laurens Rettob dan Richard S. Waremra pada tahun 2019 juga mengkaji pompa air tenaga surya untuk irigasi sawah, namun sistem yang dikembangkan belum dilengkapi dengan otomatisasi pengoperasian pompa dan sistem keamanan [15]. Sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada analisis kapasitas panel surya, baterai, dan pompa air, tanpa mengintegrasikan sistem kontrol otomatis berdasarkan kondisi ketinggian air di lapangan serta aspek keamanan sistem.

Berdasarkan kajian terhadap penelitian sebelumnya, sebagian besar penelitian masih berfokus pada perancangan PLTS atau pompa air tenaga surya secara terpisah, sehingga belum mengintegrasikan kendali otomatis berdasarkan ketinggian air, sistem keamanan berbasis LoRa, dan pengujian lapangan dalam satu sistem. Padahal, kondisi lingkungan persawahan menuntut sistem irigasi yang tidak hanya hemat energi, tetapi juga mampu beroperasi secara otomatis, adaptif terhadap kondisi ketinggian air, serta mudah dipantau dan aman.

Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem pompa air otomatis berbasis PLTS *off-grid* yang mengintegrasikan sensor ketinggian air dan sistem keamanan berbasis LoRa dalam satu sistem irigasi. Sistem dirancang menggunakan baterai sebagai penyimpan energi, mikrokontroler sebagai pusat kendali, serta komunikasi LoRa untuk pemantauan jarak jauh pada lingkungan persawahan terbuka. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, merealisasikan, dan mengevaluasi kinerja sistem pompa air otomatis berbasis PLTS *off-grid* melalui pengujian lapangan serta

*Korespondensi: arrasyid.21031@mhs.unesa.ac.id

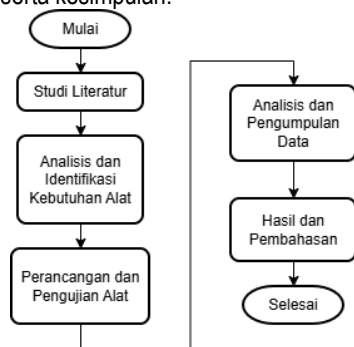
a) Prodi Teknik Listrik, Jurusan Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

menganalisis perbedaan antara hasil perancangan dan hasil pengujian aktual.

2. Metode

2.1 Langkah Penelitian

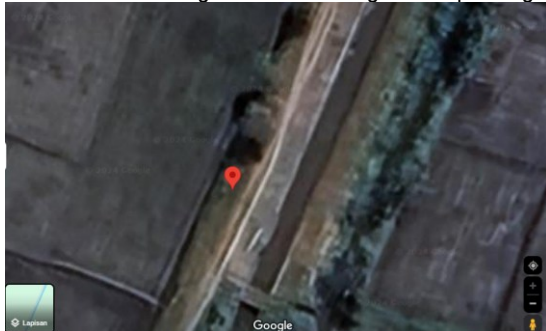
Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1, diawali dengan studi literatur melalui penelusuran penelitian-penelitian terdahulu yang relevan untuk memperoleh dasar teori dan referensi pendukung. Tahap selanjutnya adalah analisis dan identifikasi kebutuhan alat yang meliputi penentuan spesifikasi komponen dan kebutuhan sistem. Berdasarkan hasil analisis tersebut, dilakukan perancangan sistem yang kemudian dilanjutkan dengan pengujian alat untuk memastikan sistem berfungsi sesuai dengan perancangan. Pengujian dilakukan secara bertahap pada kondisi operasional sebenarnya, meliputi pengujian kinerja PLTS dengan mengukur tegangan, arus, daya, dan energi listrik yang dihasilkan, pengujian kinerja pompa air berdasarkan daya aktual dan lama operasi, pengujian proses *charging* dan *discharging* baterai, pengujian sistem kendali otomatis berdasarkan kondisi sensor ketinggian air di sungai dan sawah, serta pengujian komunikasi LoRa untuk mengevaluasi keberhasilan pengiriman data pada jarak 300 m. Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem dan menjadi dasar penyusunan hasil, pembahasan, serta kesimpulan.



GAMBAR 2.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

2.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada area persawahan di Dusun Sumbenongko, Desa Denanyar, Kabupaten Jombang. Gambar 2.2 menunjukkan lokasi utama sistem berada pada titik koordinat geografis -7,532340, 112,208974, yang merupakan area persawahan terbuka dengan sumber air irigasi berupa sungai.



GAMBAR 2.2 TITIK KOORDINAT LOKASI PENELITIAN

Karakteristik lokasi meliputi area terbuka dengan intensitas paparan sinar matahari yang cukup baik serta kondisi irigasi yang

masih memerlukan pemantauan manual. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada kesesuaiannya untuk pengujian sistem pompa air otomatis berbasis energi surya pada kondisi lapangan yang sebenarnya.

2.3 Komponen Utama Sistem

Sistem pompa air otomatis bertenaga surya yang dikembangkan terdiri dari beberapa komponen utama yang terintegrasi, meliputi panel surya, baterai VRLA, *solar charge controller* (SCC), inverter, pompa air, serta mikrokontroler Arduino Uno. Panel surya berfungsi sebagai sumber energi utama yang mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC), sedangkan baterai VRLA digunakan sebagai media penyimpanan energi untuk menjaga kontinuitas suplai daya ketika intensitas cahaya matahari menurun. SCC berperan dalam mengatur proses pengisian dan pengosongan baterai agar tetap berada pada batas aman serta melindungi sistem dari kondisi *overcharge* dan *overdischarge* [16].

Inverter digunakan untuk mengubah tegangan DC dari baterai menjadi tegangan AC [17], yang dibutuhkan oleh pompa air. Pompa air berfungsi sebagai aktuator utama sistem irigasi yang memindahkan air dari sumber air menuju area persawahan [18]. Spesifikasi pompa ditentukan berdasarkan daya listrik dan debit aliran agar sesuai dengan kebutuhan irigasi harian dan dapat dioperasikan secara otomatis menggunakan suplai energi dari sistem PLTS.

Mikrokontroler Arduino Uno digunakan sebagai pusat kendali sistem yang memproses data dari *float switch* sebagai sensor ketinggian air, serta mengendalikan kerja pompa melalui modul relay [19]. Selain itu, sistem dilengkapi dengan modul komunikasi LoRa yang berfungsi sebagai sistem keamanan dengan mengaktifkan indikator LED dan *buzzer alarm* sebagai notifikasi visual dan audio, baik di lokasi sistem maupun pada sisi penerima. Teknologi LoRa dipilih sesuai untuk lingkungan persawahan dengan keterbatasan infrastruktur jaringan. Tabel 2.1 merupakan spesifikasi komponen yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2.1 Spesifikasi Komponen

Komponen	Spesifikasi
Panel surya	Monocrystalline 250 Wp
Solar Charge Controller	PWM 20 A
Baterai	VRLA 12 V 200 Ah
Inverter	Pure Sine Wave 3000 W
Pompa air	AC 400 W, 400 L/min
Mikrokontroler	Arduino Uno R3
Sensor sawah	Float Switch
Sensor sungai	Float Switch
Komunikasi	LoRa SX1278

2.4 Perhitungan Kapasitas Komponen

Perhitungan kapasitas sistem dilakukan untuk memastikan bahwa energi yang dihasilkan oleh panel surya mampu memenuhi kebutuhan daya pompa air dan sistem kendali. Sistem menggunakan pompa air dengan daya nominal sebesar 400 W dan debit aliran sebesar 400 liter/menit. Kebutuhan air harian untuk irigasi ditetapkan sebesar 70.000 liter per hari. Waktu operasi pompa untuk memenuhi kebutuhan air harian dihitung menggunakan Persamaan (2-1):

$$t = \frac{V}{Q} \quad (2-1)$$

dengan t adalah waktu operasi pompa (menit), V merupakan kebutuhan air harian (liter), dan Q adalah debit pompa (liter/menit). Berdasarkan perhitungan, diperoleh waktu operasi pompa sebesar 175 menit atau sekitar 2,91 jam.

Kebutuhan energi listrik harian sistem dihitung menggunakan Persamaan (2-2):

$$Wh = P \times h \quad (2-2)$$

Dengan Wh merupakan energi listrik harian (Wh), P adalah daya pompa (W), dan h adalah lama operasi (jam). Hasil perhitungan menunjukkan kebutuhan energi harian sebesar 1.200 Wh .

Kapasitas baterai ditentukan dengan memperhitungkan hari otonomi dan batas maksimum pengosongan baterai (*Depth of Discharge*). Kapasitas baterai dihitung menggunakan Persamaan (2-3):

$$Ah = \frac{Wh \times Dn}{V \times DoD} \quad (2-3)$$

dengan Ah merupakan kapasitas baterai (Ah), Wh adalah kebutuhan energi harian (Wh), Dn adalah jumlah hari otonomi, V adalah tegangan baterai (V), dan DoD adalah kedalaman pengosongan baterai. Berdasarkan perhitungan, digunakan baterai dengan kapasitas 200 Ah pada tegangan 12 V .

Kapasitas panel surya ditentukan berdasarkan kebutuhan energi harian dan durasi penyinaran matahari efektif. Rata-rata durasi penyinaran matahari efektif di Indonesia adalah sekitar 5 jam per hari dan dihitung menggunakan Persamaan (2-4):

$$Wp = \frac{Wh}{Psh} \quad (2-4)$$

dengan Wp merupakan kapasitas panel surya (Wp) dan Psh adalah durasi penyinaran matahari efektif (jam/hari). Hasil perhitungan menunjukkan kapasitas panel surya sebesar 240 Wp , sehingga digunakan panel surya berkapasitas 250 Wp .

Kapasitas inverter ditentukan dengan mempertimbangkan arus awal pompa yang lebih besar dibandingkan arus nominal. Arus nominal pompa dihitung menggunakan Persamaan (2-5):

$$I_{pompa} = \frac{P}{V \cdot \cos \theta} \quad (2-5)$$

dengan I_{pompa} merupakan arus nominal (A), P adalah daya pompa (W), V adalah tegangan AC (V), dan $\cos \theta$ adalah faktor daya. Berdasarkan perhitungan, arus nominal pompa sebesar 2,14 A . Dengan asumsi lonjakan arus awal sebesar lima kali arus nominal, maka daya puncak inverter dihitung menggunakan Persamaan (2-6):

$$P_{inv} = V \times I_{start} \quad (2-6)$$

Dari hasil perhitungan diperoleh kebutuhan daya puncak inverter sebesar 2.354 W , sehingga digunakan inverter dengan kapasitas 3.000 W untuk memberikan margin keamanan.

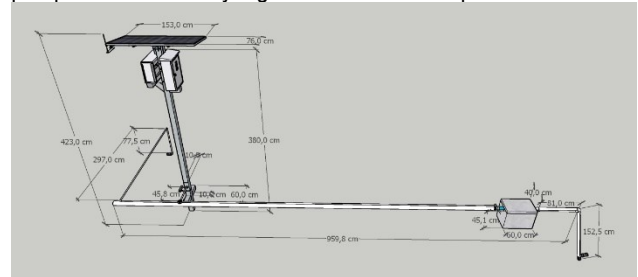
Kapasitas solar charge controller (SCC) ditentukan berdasarkan arus hubung singkat panel surya. Perhitungan kapasitas SCC dilakukan menggunakan Persamaan (2-7):

$$I_{SCC} = ISC \times n \quad (2-7)$$

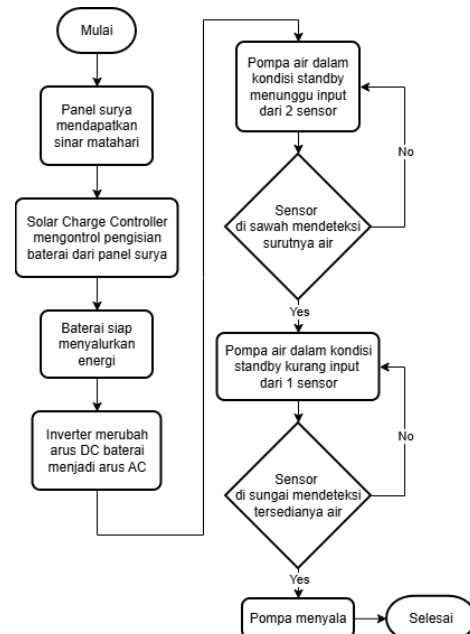
dengan I_{SCC} merupakan arus minimum SCC (A), ISC adalah arus hubung singkat panel (A), dan n adalah jumlah panel surya. Berdasarkan perhitungan, diperoleh arus minimum SCC sebesar 14,39 A , sehingga digunakan SCC dengan kapasitas 20 A .

2.5 Desain dan Mekanisme Kerja Sistem Pompa Air Otomatis

Desain alat yang ditampilkan pada Gambar 2.3 dan mekanisme kerja sistem pompa air otomatis dijelaskan melalui Gambar 2.4 yang menggambarkan alur operasi sistem secara keseluruhan, serta Gambar 2.5 yang merupakan skema wiring rangkaian pompa ini. Energi listrik dihasilkan oleh panel surya dan disimpan ke dalam baterai melalui solar charge controller, kemudian digunakan untuk menyuplai daya ke sistem kendali dan pompa air melalui inverter. Sistem berada pada kondisi siaga dan hanya akan mengaktifkan pompa ketika kondisi yang telah ditentukan terpenuhi.

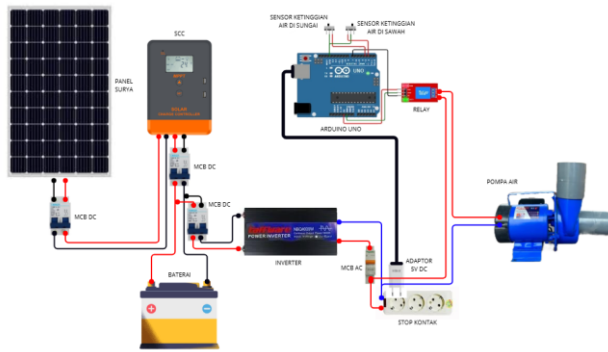


GAMBAR 2.3 DESAIN POMPA OTOMATIS TENAGA SURYA



GAMBAR 2.4 DIAGRAM ALIR MEKANISME POMPA OTOMATIS

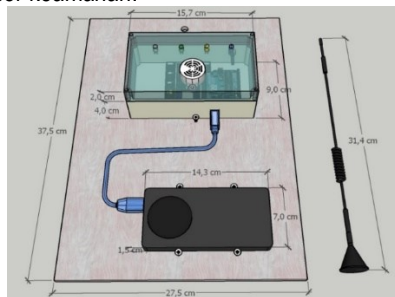
Pengoperasian pompa air dikendalikan berdasarkan pembacaan dua sensor ketinggian air, yaitu sensor pada area persawahan dan sensor pada sumber air (sungai). Sensor di area persawahan berfungsi mendeteksi kebutuhan pengairan berdasarkan kondisi ketinggian air. Apabila air di sawah berada di bawah batas minimum, sistem akan menunggu konfirmasi dari sensor pada sumber air. Sensor pada sungai berfungsi memastikan ketersediaan air yang cukup untuk dipompa. Pompa air akan diaktifkan secara otomatis hanya ketika kedua sensor memberikan kondisi yang sesuai, yaitu sawah membutuhkan air dan sumber air tersedia. Pompa akan berhenti beroperasi ketika ketinggian air di sawah telah mencapai batas yang ditentukan, dan sistem kembali ke kondisi siaga.



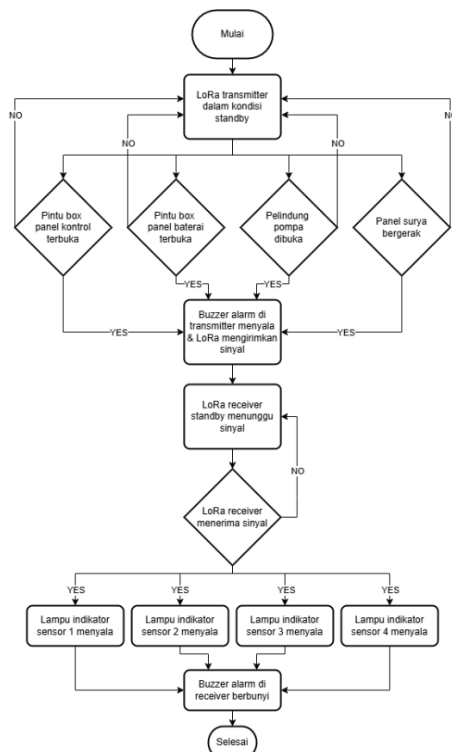
Gambar 2.5 Rangkaian Pompa Otomatis Tenaga Surya

2.6 Desain dan Mekanisme Sistem Keamanan Berbasis LoRa

Gambar 2.6 menunjukkan kotak penempatan LoRa *receiver*, berfungsi sebagai pusat penerima informasi. Sistem keamanan dan pemantauan dirancang menggunakan modul komunikasi LoRa untuk mendeteksi dan mengirimkan informasi kondisi keamanan sistem secara jarak jauh seperti diagram alir pada Gambar 2.7 Sistem berada dalam kondisi siaga, di mana modul LoRa *transmitter* yang terpasang pada lokasi pompa air memantau kondisi sensor keamanan.



GAMBAR 2.6 DESAIN BOX LoRa RECEIVER



GAMBAR 2.7 DIAGRAM ALIR MEKANISME LoRA

Sistem keamanan dilengkapi dengan empat sensor berbasis *limit switch* yang dipasang pada bagian-bagian kritis sistem, yaitu pintu *box* panel kontrol, pintu *box* baterai, pelindung pompa, dan rangka panel surya. Sensor-sensor tersebut berfungsi mendeteksi adanya perubahan kondisi fisik yang mengindikasikan gangguan atau aktivitas mencurigakan pada sistem. Selama seluruh sensor berada pada kondisi normal, sistem tetap berada dalam keadaan siaga.

Apabila salah satu atau lebih sensor mendeteksi kondisi tidak aman, LoRa *transmitter* akan mengirimkan sinyal peringatan ke LoRa *receiver*. Secara bersamaan, sistem akan mengaktifkan *buzzer alarm* di lokasi sawah sebagai peringatan lokal, serta *buzzer* dan lampu indikator di rumah sebagai notifikasi jarak jauh. Lampu indikator menunjukkan lokasi sensor yang mendeteksi gangguan. Sistem akan tetap aktif hingga kondisi kembali aman atau dilakukan reset secara manual oleh pengguna.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kinerja PLTS

Pengujian kinerja panel surya dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan panel dalam menghasilkan daya listrik berdasarkan kondisi iradiasi matahari di lokasi penelitian. Pengujian dilakukan selama satu hari dengan interval pengambilan data setiap 30 menit selama lima jam penyinaran efektif. Parameter yang diamati meliputi tegangan panel, arus keluaran, daya sesaat, dan energi harian yang dihasilkan, sebagaimana yang ditampilkan pada Tabel 3.1.

TABEL 3.1 KINERJA PLTS

Parameter	Nilai
Kondisi cuaca	Cerah
Rentang waktu pengujian	09.00-14.00 WIB
Radiasi matahari rata-rata (W/m^2)	767,09
Tegangan panel rata-rata (V)	17,37
Arus panel rata-rata (A)	6,51
Daya panel rata-rata (W)	113,15
Daya panel maksimum (W)	131,87
Daya panel minimum (W)	89,51
Energi total harian (Wh)	622,34

Hasil pengujian menunjukkan bahwa daya keluaran panel surya berfluktuasi mengikuti perubahan kondisi iradiasi dan suhu panel. Meskipun panel surya memiliki kapasitas nominal 250 Wp, daya aktual yang dihasilkan berada di bawah nilai nominal dengan energi total harian 622,34 Wh atau 88,9% dari hasil perancangan, sehingga terdapat selisih sebesar 11,1%. Perbedaan ini dipengaruhi oleh variasi intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, serta rugi-rugi pada sistem konversi energi. Kondisi ini menyebabkan baterai yang pada tahap perancangan direncanakan dapat terisi penuh dalam waktu sekitar 5 jam, pada pengujian lapangan memerlukan waktu sekitar 2–3 hari berturut-turut dengan kondisi cuaca cerah untuk mencapai kapasitas maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja PLTS di lapangan sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan efisiensi sistem, sehingga belum sepenuhnya mampu memenuhi kebutuhan energi harian sistem sesuai dengan perancangan awal.

3.2 Kinerja Baterai Saat Pompa Aktif (*Discharging*)

Tabel 3.2 menampilkan hasil pengujian *discharging* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan baterai dalam menyuplai daya ke pompa tanpa kontribusi energi dari panel surya hingga mencapai batas *depth of discharge* (DoD) yang aman. Hasil pengujian menunjukkan daya aktual pompa mencapai sekitar 500 W, lebih besar daripada daya perancangan sebesar 400 W. Akibatnya, energi baterai sebesar 1.200 Wh hanya mampu mengoperasikan pompa selama sekitar 2,5 jam sehingga lebih rendah dari target perancangan selama 3 jam.

TABEL 3.2 KINERJA BATERAI SAAT POMPA AKTIF (*DISCHARGING*)

Parameter	Nilai
Daya pompa (W)	500
Tegangan awal baterai (V)	13,16
Tegangan akhir baterai (V)	12,15
Arus pompa rata-rata (A)	2,24
Tegangan kerja sistem AC (V)	220
Daya pompa terukur (W)	≈ 500
Durasi operasi pompa (jam)	2,5
Penurunan kapasitas baterai (%)	≈ 50

3.3 Kinerja Sistem Saat *Charging–Discharging* Simultan

Pengujian sistem pada kondisi *charging–discharging* yang ditampilkan pada Tabel 3.3 dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem saat panel surya, baterai, dan pompa beroperasi secara bersamaan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan panel surya belum mampu mengimbangi daya yang dibutuhkan oleh pompa air. Akibatnya, meskipun sistem berada dalam kondisi *charging–discharging*, tegangan baterai tetap mengalami penurunan selama pompa beroperasi. Menunjukkan bahwa sistem masih bergantung pada energi yang tersimpan di baterai, dan kontribusi panel surya belum cukup signifikan untuk mempertahankan keseimbangan energi sistem.

TABEL 3.3 KINERJA SISTEM SAAT *CHARGING–DISCHARGING* SIMULTAN

Parameter	Nilai
Rentang waktu pengujian	09.00 – 11.30 WIB
Arus charging baterai rata-rata (A)	6,45
Tegangan charging baterai rata-rata (V)	12
Arus pompa rata-rata (A)	2,1
Daya pompa rata-rata (W)	≈ 500
Durasi operasi pompa (jam)	2,5
Penurunan kapasitas baterai (%)	≈ 50

3.4 Hasil Pengujian Sistem Kendali Otomatis

Pengujian sistem kendali otomatis dilakukan untuk memastikan bahwa pompa air dapat beroperasi sesuai dengan logika kontrol berdasarkan kondisi ketersediaan air di sungai dan kebutuhan air di sawah, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 3.4. Sistem diuji pada empat kondisi operasional untuk memverifikasi respons sistem terhadap kombinasi input sensor. Sistem kendali menggunakan dua buah *float switch sensor* yang masing-masing dipasang di area sawah dan di sungai. *Float switch* di sawah dipasang pada ketinggian 10 cm dari permukaan tanah untuk mendeteksi kebutuhan pengairan, sedangkan *float switch* di sungai dipasang 30 cm dari dasar sungai untuk mendeteksi ketersediaan air. Hasil pengujian menunjukkan sistem kendali bekerja sesuai logika kontrol pada seluruh kondisi pengujian.

TABEL 3.4 PENGUJIAN SISTEM KENDALI OTOMATIS

Kondisi	Air Sungai	Air Sawah	Status Pompa
1	Tersedia	Tidak tersedia	ON
2	Tersedia	Tersedia	OFF
3	Tidak tersedia	Tidak tersedia	OFF
4	Tidak tersedia	Tersedia	OFF

3.5 Hasil Pengujian Sistem Keamanan Berbasis LoRa

Pengujian sistem keamanan dilakukan untuk mengevaluasi keandalan komunikasi LoRa dalam mengirimkan sinyal peringatan dari lokasi sistem ke titik pemantauan. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali pada jarak 300 meter dengan kondisi lingkungan persawahan terbuka dengan hasil seperti pada Tabel 3.5. Parameter yang diamati meliputi keberhasilan pengiriman sinyal, respon sistem penerima, serta fungsi aktuator peringatan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh sinyal yang dikirimkan oleh LoRa *transmitter* berhasil diterima oleh LoRa *receiver* tanpa kehilangan data. Seluruh sinyal berhasil diterima tanpa kehilangan data serta mengaktifkan *buzzer* dan indikator LED sesuai kondisi sensor. Hal ini menunjukkan komunikasi LoRa andal untuk sistem pemantauan pada area persawahan terbuka.

TABEL 3.5 PENGUJIAN KEANDALAN LoRa

Pengujian	Jarak	Keterangan
1	300 Meter	Berhasil
2	300 Meter	Berhasil
3	300 Meter	Berhasil
4	300 Meter	Berhasil
5	300 Meter	Berhasil
6	300 Meter	Berhasil
7	300 Meter	Berhasil
8	300 Meter	Berhasil
9	300 Meter	Berhasil
10	300 Meter	Berhasil

3.6 Analisis Perbedaan Perancangan dan Pengujian Sistem

Pada tahap perancangan awal, daya pompa air diasumsikan sebesar 400 W. Namun, hasil pengujian aktual menunjukkan bahwa daya pompa saat beroperasi mencapai sekitar 500 W, terutama pada kondisi beban penuh dan saat awal proses pemompaan. Perbedaan ini berdampak langsung pada peningkatan konsumsi energi sistem dan pengurangan durasi operasi pompa dibandingkan dengan perencanaan awal.

Baterai yang digunakan pada sistem adalah baterai VRLA berkapasitas 200 Ah dengan tegangan 12 V dan batas *depth of discharge* (DoD) sebesar 50%, sehingga energi yang dapat dimanfaatkan sebesar 1.200 Wh. Dengan energi baterai tersebut, pompa hanya dapat beroperasi selama sekitar 2,5 jam. Untuk mencapai target operasi 3 jam diperlukan peningkatan kapasitas baterai menjadi sekitar 250 Ah.

Selain itu, perbedaan juga terjadi pada sisi pembangkit energi. Energi aktual panel surya sebesar 622,34 Wh per hari atau 51,86% dari hasil perancangan menyebabkan baterai memerlukan waktu sekitar dua hari untuk terisi penuh. Oleh karena itu, diperlukan peningkatan kapasitas panel menjadi sekitar 500 Wp agar target pengisian satu hari dapat tercapai atau penggunaan dua panel surya 250 Wp dengan asumsi kondisi operasi yang sama.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Rettob dan

Warembra (2019) yang menunjukkan bahwa sistem pompa air bertenaga energi surya dapat diterapkan sebagai alternatif irigasi sawah untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil [15]. Namun, penelitian tersebut berfokus pada perancangan dan demonstrasi pengoperasian pompa air tenaga surya, sedangkan penelitian ini memberikan evaluasi yang lebih komprehensif melalui analisis perbedaan antara hasil perancangan dan pengujian aktual, evaluasi kinerja sistem PLTS *off-grid*, serta integrasi sistem kendali otomatis berbasis sensor level air dan komunikasi LoRa sebagai sistem keamanan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menunjukkan keberhasilan implementasi sistem pompa air tenaga surya, tetapi juga memberikan informasi mengenai kinerja aktual sistem serta rekomendasi peningkatan kapasitas panel surya dan baterai untuk mencapai performa sesuai target perancangan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian, penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pompa air irigasi otomatis berbasis PLTS *off-grid* yang mengintegrasikan sistem kendali berbasis sensor level air dan komunikasi LoRa sebagai sistem keamanan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan energi listrik sebesar 622,34 Wh per hari, mengoperasikan pompa air selama sekitar 2,5 jam, menjalankan kendali otomatis sesuai kondisi ketersediaan air di sungai dan sawah, serta mengirimkan sinyal peringatan melalui komunikasi LoRa hingga jarak 300 m. Menunjukkan bahwa sistem mampu mendukung proses irigasi secara otomatis serta meningkatkan kemudahan pemantauan pada area persawahan.

Dibandingkan penelitian terdahulu yang umumnya hanya berfokus pada pemanfaatan PLTS atau pompa air tenaga surya, penelitian ini memberikan kontribusi melalui integrasi sistem PLTS *off-grid*, kendali otomatis berbasis sensor level air, dan komunikasi LoRa dalam satu sistem yang telah diuji secara langsung di lapangan. Selain itu, evaluasi terhadap perbedaan antara hasil perancangan dan pengujian aktual memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai kinerja sistem pada kondisi operasional sebenarnya.

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Kapasitas panel surya 250 Wp belum mampu memenuhi kebutuhan energi sistem dalam satu hari pengisian sehingga baterai memerlukan waktu sekitar dua hari untuk terisi penuh pada kondisi pengujian, sedangkan daya aktual pompa yang lebih besar dari nilai perancangan menyebabkan durasi operasi pompa hanya mencapai sekitar 2,5 jam. Selain itu, pengujian komunikasi LoRa masih terbatas pada jarak sekitar 300 m dan belum mengevaluasi pengaruh variasi kondisi lingkungan terhadap kualitas komunikasi.

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan kapasitas panel surya dan baterai yang lebih besar agar target operasi pompa sesuai dengan hasil perancangan dapat tercapai. Selain itu, sistem dapat dikembangkan melalui integrasi dengan *Internet of Things* (IoT), pengujian komunikasi LoRa pada berbagai kondisi lingkungan dan jarak yang lebih luas, serta evaluasi kinerja sistem dalam jangka panjang pada berbagai musim untuk meningkatkan keandalan implementasi di sektor pertanian.

Referensi

- [1] M. Syahid *et al.*, "Pemanfaatan Pompa Air Tenaga Surya untuk Sistem Irigasi Pertanian," *J. Tepat (Teknologi Terap. Untuk Pengabd. Masyarakat)*, vol. 5, no. 1, pp. 102–107, 2022.
- [2] I. F. Alam, A. Azis, and P. Perawati, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Untuk Pompa Irigasi Sawah Di Desa Ulak Aurstanding Kecamatan Pemulutan Selatan Kabupaten Ogan Ilir," *J. Surya Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 1–11, 2023, doi: 10.32502/jse.v8i1.6093.
- [3] M. Ade, K. Harahap, D. O. Suparwata, and S. Rijal, "Penerapan Irigasi Terpadu untuk Mengatasi Musim Kemarau dalam Pertanian Padi," vol. 1, no. 03, 2023.
- [4] E. Walujodjati, S. Permana, H. Nurhuda, and A. S. Pratama, "Analisis Kebutuhan dan Ketersediaan Air," pp. 183–193, 2021.
- [5] H. H. Sinaga, D. Permata, N. Soedjarwanto, and N. Purwasih, "POMPA AIR TENAGA SURYA UNTUK IRIGASI PER-MASYARAKAT DESA," 2021.
- [6] A. M. Rahman, A. F. Zainal, and A. H. Mustafa, "IMPLEMENTASI SISTEM IRIGASI MODERN BERBASIS TENAGA SURYA UNTUK TANAMAN HORTIKULTURA DI DESA BARUGAE MAROS," vol. 1, no. 2, pp. 1–7, 2025.
- [7] F. Aff and A. Martin, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia," vol. 6, no. 1, pp. 43–52, 2022.
- [8] A. Kharisma, S. Pinandita, and A. E. Jayanti, "Literature Review : Kajian Potensi Energi Surya Alternatif Energi Listrik," *JEBT J. Energi Baru Terbarukan Lit.*, vol. 5, no. 2, pp. 145–154, 2024, doi: 10.14710/jebt.2024.23956.
- [9] Z. Iqimal, I. D. Sara, and D. Syahrizal, "Aplikasi Sistem Tenaga Surya Sebagai Air," *J. Online Tek. Elektro*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [10] P. Harahap, "Pengaruh Temperatur Permukaan Panel Surya Terhadap Daya Yang Dihasilkan Dari Berbagai Jenis Sel Surya," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 73–80, 2020, doi: 10.30596/rele.v2i2.4420.
- [11] A. Gifson, M. R. Siregar, and M. P. Pambudi, "Rancang bangun pembangkit listrik tenaga surya (plts) on grid di ecopark ancil," vol. 22, no. 1, pp. 23–33, 2020.
- [12] A. W. Hasanah, T. Koemiawan, and Yuliansyah, "KAJIAN KUALITAS DAYA LISTRIK PLTS SISTEM OFF-GRID," *J. ENERGI KELISTRIKAN*, vol. 10, no. 2, pp. 93–101, 2018.
- [13] P. G. Chamdareno and H. Hilal, "Analisa Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid PLTD-PLTS di Pulau Tunda Serang Banten," vol. 1, no. 1, pp. 37–44, 2000.
- [14] R. T. Adhiguna and A. Rejo, "TEKNOLOGI IRIGASI TETES DALAM MENGOPTIMALKAN EFISIENSI PENGGUNAAN AIR DI LAHAN PERTANIAN," pp. 107–116, 2018.
- [15] A. L. Rettob and R. S. Warembra, "Pompa Air Bertenaga Energi Matahari (Solar Cell) Untuk Pengairan Sawah," *Musamus J. Sci. Educ.*, vol. 1, no. 2, pp. 046–052, 2019, doi: 10.35724/mjose.v1i2.1451.
- [16] E. Roza and M. Mujiudin, "Perancangan Pembangkit Tenaga Surya Fakultas Teknik Uhamka," *Ejournal Kaji. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 16–30, 2019.
- [17] H. Rudin, Emidiana, and Perawati, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di Perumahan Karyawan Blok B55 PT. Cipta Lestari Sawit Bumirejo Estate," *Elektrika*, vol. 14, no. 2, pp. 35–40, 2022.
- [18] A. R. H. M. Sochib, "PERANCANGAN INSTALASI POMPA AIR DARI MATA AIR DANAU NGIPIK KE TANDON PENAMPUNG PERUMAHAN KAPASITAS 900 L/JAM," *J. Keilmuan dan Terap. Tek.*, vol. 07, no. 02, pp. 164–173, 2018.
- [19] S.D.Ramdan, "Pengembangan Koper Pintar Berbasis Arduino," *J. ICTEE*, vol. 1, no. 1, pp. 4–8, 2020, doi: 10.33365/jictee.v1i1.699.