SELAPARANG: Jurnal Pengabdian Masyarakat Berkemajuan
Volume 10, Nomor 5, Oktober 2026, hal. 5635 – 5646
ISSN : 2614-5251 (*print*) | ISSN : 2614-526X (elektronik)

Analisis pemanfaatan energi PLTS irigasi dengan penambahan penyimpanan baterai di kelompok tani Tawang Makmur

Rey Gasta Isrofiasrory, Agil Ziddan Achmad, Arya Kusumawardana

Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Malang, Indonesia

Penulis korespondensi : Arya Kusumawardana
E-mail : : arya.kusumawardana.ft@um.ac.id

Diterima: 05 Agustus 2026| Direvisi: 07 Oktober 2026| Disetujui: 11 Oktober 2026| Online: 31 Oktober 2026
© Penulis 2026

Abstrak
Kelompok Tani Tawang Makmur (KTTM) di Desa Bendosewu, Kecamatan Talun, Kabupaten Blitar, beranggotakan 32 petani, memakai pompa bertenaga surya dari PLTS off-grid 1200 Wp (2024-2025) untuk mengisi tandon air irigasi, tetapi sistem itu belum memiliki penyimpanan energi sehingga sebagian besar energi panel di luar jadwal pompa terbuang. Kegiatan ini bertujuan memasang jalur penyimpanan berbasis baterai dan MPPT paralel pada sistem eksisting beserta otomasi tandon dan penerangan, serta menganalisis energi terbuang dan termanfaatkan. Pelaksanaan meliputi observasi lapangan, perancangan, instalasi dan uji fungsional, serta monitoring dan evaluasi. Iradiasi diukur dengan *Solar Power Meter* sebagai data rata-rata per jam selama 31 hari. Arus dan daya kedua konfigurasi diukur langsung pada sistem, tanpa pemodelan. Satu pompa mengisi tandon 1200 L tiga kali sehari dengan durasi tetap 90 menit. Uji fungsional menunjukkan MPPT mengisi baterai, sensor level mengatur pompa, lampu menyala otomatis, dan jalur SVFD tidak terganggu. Sistem A (1200 Wp tanpa penyimpanan) memanfaatkan 28,3% energi dihasilkan dan membuang 103.439 Wh, sedangkan Sistem B (600 Wp dengan baterai, diukur di sisi baterai) memanfaatkan 94,2% dan membuang 4.172 Wh. Angka 94,2% merupakan konsekuensi asumsi tanpa pemodelan pengosongan baterai, sehingga tidak ditafsirkan sebagai kinerja malam hari atau kapasitas baterai optimal.

Kata kunci: PLTS off-grid; penyimpanan baterai; irigasi pertanian; pemanfaatan energi; MPPT

Abstract
The Tawang Makmur Farmer Group (KTTM) in Bendosewu Village, Talun District, Blitar Regency, with 32 farmers, uses a solar-powered pump from a 1200 Wp off-grid PV system (2024-2025) to fill an irrigation reservoir, but the system has no energy storage, so most panel energy outside the pump schedule is wasted. This activity aims to install a parallel battery and MPPT storage path on the existing system together with reservoir and lighting automation, and to analyze wasted and utilized energy. The work comprised field observation, design, installation and functional testing, and monitoring and evaluation. Irradiance was measured with a Solar Power Meter as hourly averages over 31 days. Current and power of both configurations were measured directly on the system, without modelling. A single pump fills a 1200 L reservoir three times a day with a fixed duration of 90 minutes. Functional tests showed that the MPPT charges the battery, the level sensor controls the pump, the lamp switches on automatically, and the SVFD path is unaffected. System A (1200 Wp without storage) utilized 28.3% of the energy produced and wasted 103,439 Wh, whereas System B (600 Wp with battery, measured on the battery side, as is System A) utilized 94.2% and wasted 4,172 Wh. The 94.2% figure follows from the assumption that battery discharge is not modelled, so it is not interpreted as nighttime performance or optimal battery capacity.

Keywords: off-grid solar power plant; battery storage; agricultural irrigation; energy utilization; MPPT

PENDAHULUAN

Sektor pertanian di pedesaan Indonesia menghadapi tantangan yang saling berkaitan antara ketahanan air, akses energi, dan keberlanjutan lingkungan. Ketergantungan irigasi pada bahan bakar fosil menimbulkan beban ekonomi bagi petani, yaitu tekanan biaya energi yang juga membebani petani skala kecil di Asia Tenggara (OECD, 2024), sekaligus menyumbang emisi gas rumah kaca sektor pertanian yang mencapai sekitar 10% secara global (Ngadisih dkk., 2024), sementara perubahan iklim memperparah ketersediaan air melalui pergeseran pola musim dan peningkatan frekuensi kekeringan (Bolan dkk., 2024). Keterkaitan erat antara air, energi, dan pangan menjadikan pilihan sumber energi irigasi sebagai bagian dari pengelolaan nexus air-energi-pangan yang saling memengaruhi (Peña-Torres dkk., 2022). Kelompok Tani Tawang Makmur (KTTM) di Dusun Tawang, Desa Bendosewu, Kecamatan Talun, Kabupaten Blitar merepresentasikan kondisi tersebut. Kelompok yang beranggotakan 32 orang ini mengelola 30 hektare lahan persawahan yang terbagi menjadi ±143 petak, dengan hasil rata-rata Rp1.800.000 per petak setiap kali panen dan 2-3 kali panen per tahun melalui sistem manajemen kolektif pengadaan bibit, pupuk, dan irigasi dikoordinasikan terpusat, sementara tiap anggota menggarap petaknya masing-masing. Selain padi, KTTM menanam sawi, kangkung, kubis, lombok, brambang, buncis, dan kacang. Irigasi menjadi faktor penentu keberhasilan tanam: pada musim penghujan kebutuhan air tercukupi dari saluran alami, namun ketika kemarau tiba debit air menurun dan petani sebelumnya menambah pasokan dengan pompa bertenaga diesel yang dioperasikan hingga 8 jam per hari. Biaya bahan bakar yang ditanggung terus-menerus, ditambah emisi yang dihasilkan, bertentangan dengan transisi menuju pertanian nol emisi dan target net zero emission pemerintah pada 2050 (antaranews.com, 2023; Rosa & Gabrielli, 2023).

Di tengah kondisi tersebut, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid menjadi sumber energi terbarukan yang relevan, didukung potensi radiasi matahari Indonesia yang mencapai 200.000 TWh dan kesesuaiannya bagi lahan pertanian yang sebagian besar berada di daerah terpencil tanpa akses jaringan listrik stabil (Saha, 2025; Silalahi dkk., 2021). Integrasi panel surya dengan lahan pertanian bahkan terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan lahan sekaligus menekan penguapan air tanah (Singla dkk., 2025), memperkuat relevansi teknologi ini bagi kawasan persawahan. Penggantian diesel dengan PLTS di lahan KTTM berjalan bertahap sejak 2020. Pada 2020-2021 tim pengabdian mengembangkan Solar Variable Frequency Drive (SVFD) sebagai pengendali pompa; tahun 2022-2023 SVFD tersebut diimplementasikan pada PLTS off-grid untuk kebutuhan pertanian; dan pada 2024-2025 sistem PLTS off-grid direct-coupled dibangun langsung di lahan KTTM, terdiri dari enam panel surya 200 Wp (total 1200 Wp) yang tersambung ke pompa melalui inverter SVFD tanpa media penyimpanan energi (Achmad dkk., 2025). Uji coba sistem tersebut menunjukkan pompa dapat menyala otomatis pada pukul 07.30-16.30 WIB, namun simulasi PVSyst pada periode yang sama mencatat performance ratio rata-rata hanya 0,374 disertai energi tidak terpakai (*unused energy*) yang tinggi, tanpa menjelaskan penyebabnya secara terukur (Achmad dkk., 2025).

Sistem *direct-coupled* tanpa penyimpanan energi menyisakan dua persoalan konkret. Pertama, pompa tunggal pengisi tandon hanya menyala ketika mendapat pasokan daya langsung dari panel; kapasitas panel yang jauh melampaui kebutuhan pompa terjadwal membuat energi yang dikonversi di luar jadwal tersebut tidak memiliki tujuan penyaluran, namun besaran energi yang terbuang akibat kondisi ini belum pernah dihitung. Kedua, waktu operasi terbatas pada jam matahari langsung, sehingga pada malam hari atau saat mendung berkepanjangan petani kembali bergantung pada diesel sebagai cadangan. Persoalan operasional turut ditemukan pada pengelolaan tandon air yang masih manual tanpa sensor level, serta area rumah pompa yang belum memiliki penerangan sehingga menyulitkan pemantauan dan menimbulkan risiko keamanan pada peralatan di lokasi terbuka.

Pilihan sistem tanpa baterai pada periode 2024-2025 memiliki dasar yang kuat: penggunaan baterai konvensional menyumbang biaya yang lebih besar dibandingkan komponen lain dalam sistem PLTS sekaligus menimbulkan risiko pencemaran lingkungan bila tidak didaur ulang dengan tepat (Abdelkareem dkk., 2023; Narayan dkk., 2018), dan sejumlah kajian menunjukkan desain PLTS tanpa baterai (*battery-less*) untuk irigasi dapat menurunkan *levelized cost of energy* dibandingkan sistem

konvensional (Chandel dkk., 2017), meski memerlukan kontrol inverter yang presisi untuk menyesuaikan variabilitas radiasi matahari melalui Maximum *Power Point Tracking* (Abdellahi dkk., 2019; Hilali dkk., 2022). Konsekuensinya, pemanfaatan energi sepenuhnya terikat pada jadwal dan rating daya pompa. Ketika kapasitas panel dinaikkan tanpa menambah beban atau media penyimpanan, tambahan energi yang dihasilkan hanya terbentuk lalu hilang tanpa termanfaatkan. Kesenjangan antara kondisi terpasang dan kondisi yang diharapkan terletak pada dua hal: belum tersedianya perhitungan terukur atas besaran energi terbuang pada sistem 2024-2025, dan belum adanya mekanisme untuk memperluas waktu operasi ke luar jam matahari langsung.

Kegiatan pengabdian 2026 menjawab kesenjangan tersebut dengan menambahkan jalur penyimpanan energi berbasis baterai 12 V 100 Ah dan MPPT *charge controller* secara paralel terhadap jalur SVFD yang sudah menggerakkan pompa pengisi tandon sejak 2024, tanpa membongkar jalur tersebut, dilengkapi otomasi pompa berbasis sensor level dan penerangan otomatis berbasis sensor cahaya untuk area rumah pompa. Kapasitas panel 1200 Wp dipertahankan tanpa penambahan unit baru. Kebaruan kegiatan ini adalah analisis energi terbuang dan termanfaatkan pada dua konfigurasi, 1200 Wp tanpa penyimpanan dan 600 Wp dengan penyimpanan, atas data iradiasi yang identik, yang belum tersedia pada laporan 2024-2025.

Berdasarkan uraian tersebut, kegiatan pengabdian ini bertujuan (1) memasang dan menguji fungsi sistem penyimpanan energi berbasis baterai dan MPPT yang terintegrasi dengan PLTS eksisting disertai otomasi tandon dan penerangan, serta (2) menganalisis energi yang dihasilkan panel tetapi terbuang dan energi yang termanfaatkan pada dua konfigurasi, dengan batasan asumsi yang dinyatakan pada Metode.

METODE

Kegiatan pengabdian ini dilaksanakan dalam empat tahapan, yaitu observasi lapangan, perancangan, pelaksanaan (instalasi dan uji fungsional), serta monitoring dan evaluasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



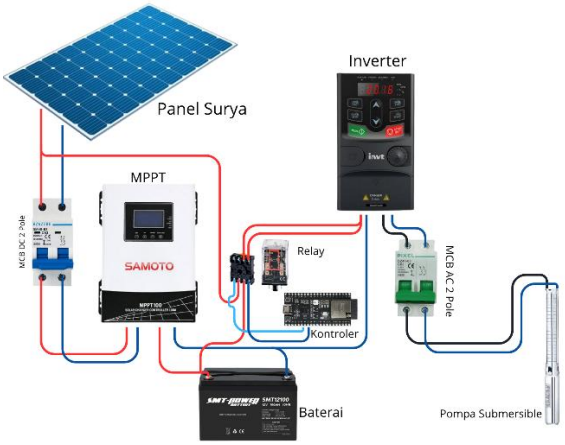
Gambar 1. Diagram alir kegiatan pengabdian.

Observasi lapangan dilakukan di lahan persawahan Kelompok Tani Tawang Makmur (KTTM), Dusun Tawang, Desa Bendosewu, Kecamatan Talun, Kabupaten Blitar, dengan mitra sasaran KTTM yang beranggotakan 32 orang petani dan diketuai Drs. H. Moh. Chilmi. Tahap ini bertujuan mengetahui kondisi sistem yang telah terpasang serta kebutuhan yang belum terpenuhi. Sistem PLTS off-grid *direct-coupled* berkapasitas 1200 Wp yang dibangun pada 2024-2025 telah berhasil menggantikan pompa diesel, dengan satu pompa bertenaga surya yang mengisi tandon air untuk irigasi pada siang hari. Sistem tersebut belum memiliki media penyimpanan energi, pengelolaan tandon masih manual, dan area rumah pompa belum berpenerangan (Achmad dkk., 2025). Pada tahap ini dikonfirmasi spesifikasi yang menjadi masukan analisis: pompa submersible daya nominal 370 W dan kapasitas tandon 1200 L.

Perancangan

Perancangan menitikberatkan pada penambahan jalur penyimpanan energi secara paralel tanpa membongkar sistem yang sudah berjalan, dengan tetap mempertahankan kapasitas panel surya eksisting 1200 Wp. Konfigurasi kelistrikan sistem terintegrasi disajikan pada Gambar 2, di mana daya keluaran panel surya didistribusikan ke dua jalur fungsional: jalur penggerak pompa melalui pengaman MCB AC menuju inverter Solar Variable Frequency Drive (SVFD) berdaya 0,75 kW untuk mengoperasikan pompa submersible 370 W pengisi tandon 1.200 L, serta jalur penyimpanan melalui MCB DC menuju MPPT *charge controller* berkapasitas 100 A untuk mengisi baterai *deep cycle gel* 12 V 100 Ah. Sistem penyimpanan ini diintegrasikan dengan unit mikrokontroler dan modul relay yang

mengontrol pengisian tandon otomatis berdasarkan sensor level air serta mengaktifkan lampu penerangan rumah pompa berbasis sensor cahaya saat malam hari.



Gambar 2. Skema pengkabelan dan integrasi jalur penyimpanan energi baterai dengan sistem PLTS irigasi eksisting.

Pelaksanaan (Instalasi dan Uji Coba)

Instalasi dilakukan dengan perakitan MPPT, baterai, dan MCB DC/AC tambahan dalam satu box yang disambungkan pada jalur keluaran panel surya, pemasangan sensor level pada tandon, serta pemasangan lampu LED dan sensor cahaya di area rumah pompa. Uji fungsional memastikan empat hal: MPPT dapat mengisi baterai, sensor level dapat mengaktifkan dan menonaktifkan pompa pengisi tandon, lampu menyala dan padam sesuai kondisi cahaya, serta jalur SVFD tidak terganggu oleh penambahan jalur baru. Hasil tiap uji (berfungsi atau tidak) dicantumkan pada Tabel 2 (Hasil dan Pembahasan). Spesifikasi komponen yang dipasang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Komponen

Komponen	Spesifikasi
Panel Surya	1200 Wp
Pompa	Submersible 370 W
Baterai	12V 100 Ah
MPPT	100A (12/24/36/48V)
Lampu LED	20W
Sensor Level	Penguin Liquid Level Control Switch
Solar Power Meter	Lutron SPM-1116SD

Monitoring dan Evaluasi

Monitoring dan evaluasi menitikberatkan pada penilaian kuantitatif energi terbuang dan termanfaatkan pada dua konfigurasi, Sistem A (1200 Wp tanpa penyimpanan) dan Sistem B (600 Wp dengan penyimpanan baterai), atas masukan iradiasi yang identik. Sumber data, perhitungan, dan teknik analisis dijelaskan berturut-turut agar prosedur dapat ditelusuri.

Sumber dan Pengumpulan Data

Iradiasi matahari diukur memakai Solar Power Meter di lokasi mitra dan dinyatakan sebagai data rata-rata per jam. Data mencakup 31 hari pengamatan (hari ke-1 hingga ke-31) pada jam 07:00-17:00, menghasilkan 341 baris data (31 hari × 11 jam). Arus dan daya diukur langsung pada sistem, tanpa pemodelan. Nilai Sistem A (1200 Wp tanpa penyimpanan) dan Sistem B (600 Wp dengan penyimpanan, diukur di sisi baterai) seluruhnya merupakan hasil pengukuran arus dan daya. Besaran lain diambil dari spesifikasi komponen terpasang: efisiensi panel, SVFD, dan MPPT, daya nominal pompa 370 W,

serta kapasitas tandon 1200 L. Hanya satu pompa yang dibahas, yaitu pompa yang mengisi tandon; petani mengambil air irigasi dari tandon tersebut.

Persamaan Pengolahan Data

Persamaan (1)-(5) digunakan untuk mengolah data terukur. Daya keluaran panel terhadap iradiasi matahari G (W/m²) dinyatakan dengan derating linear terhadap kondisi uji standar (Standard Test Conditions), (STC, G=1000 W/m²):

$$P_{PV}(t) = W_p \times \frac{G(t)}{1000} \times \eta_{PV} \quad (1)$$

dengan $\eta_{PV} = 0{,}825$ yang mencakup rugi suhu, pengkabelan, dan mismatch. Jalur pompa identik pada kedua sistem sama-sama melalui inverter SVFD dengan $\eta_{SVFD} = 0{,}9$:

$$P_{pompa}(t) = f(t) \times \min(P_{PV}(t) \times \eta_{SVFD},\ P_{rated}) \quad (2)$$

Dengan P_{rated} =370 W dan $f(t)$ fraksi jam pompa menyala. Pengisian tandon dijadwalkan tiga kali sehari (08:00, 13:00, 15:00) dengan durasi tetap 90 menit per pengisian. Durasi ini adalah asumsi rata-rata; variasi debit akibat iradiasi rendah tidak dimodelkan.

Pada Sistem B, sisa daya panel yang tidak diserap pompa dialirkan ke baterai melalui MPPT dengan dengan η_{MPPT}=0,97:

$$P_{baterai}(t) = \left(P_{PV}(t) - \frac{P_{pompa}(t)}{\eta_{SVFD}}\right) \times \eta_{MPPT} \quad (3)$$

Daya terbuang adalah selisih daya dihasilkan dan daya termanfaatkan:

$$P_{terbuang}(t) = P_{PV}(t) - P_{manfaat}(t) \quad (4)$$

dengan $P_{konsumsi} = P_{pompa}$ untuk Sistem A, dan $P_{manfaat} = P_{pompa} + P_{baterai}$ untuk Sistem B. Persentase utilisasi energi bagian daya dihasilkan yang benar-benar termanfaatkan dihitung sebagai:

dengan $P_{konsumsi} = P_{pompa}$ untuk Sistem A, dan $P_{manfaat} = P_{pompa} + P_{baterai}$untuk Sistem B. Persentase utilisasi energi dihitung sebagai:

$$\text{Utilisasi} = \frac{\sum P_{manfaat}(t)}{\sum P_{PV}(t)} \times 100\% \quad (5)$$

Penjumlahan daya rata-rata per jam (W) menghasilkan energi (Wh), karena tiap nilai mewakili rata-rata selama satu jam. Batasan analisis. (1) Pengosongan baterai dan *state of charge* tidak dimodelkan, sehingga energi yang masuk baterai dianggap seluruhnya diserap; selisih antara energi dihasilkan dan diserap pada Sistem B praktis hanya rugi konversi MPPT dan SVFD. (2) Durasi pengisian tandon tetap 90 menit. (3) Analisis dibatasi pada jam 07:00-17:00, sehingga kinerja malam hari, kapasitas baterai optimal, dan dampak irigasi pada luas lahan tidak dinilai karena tidak diukur.

Teknik Analisis Data

Alur pengolahan dimulai dari berkas iradiasi harian, disaring ke jam 07:00-17:00 selama 31 hari, dilanjutkan pengolahan data terukur memakai Persamaan (1)-(5), kemudian direkap per hari, diakumulasi selama 31 hari, dan divisualisasikan. Grafik profil daya per jam memakai skala sumbu-Y yang sama untuk Sistem A dan Sistem B agar tinggi kurva dapat dibandingkan langsung. Besaran yang dievaluasi adalah energi dihasilkan, termanfaatkan (diserap sistem), dan terbuang, serta persentase utilisasi energi (deskriptif kuantitatif).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Fungsional

Uji fungsional dilakukan setelah instalasi jalur MPPT-baterai, sensor level, dan lampu otomatis. Seluruh perangkat berfungsi sesuai rancangan, dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Verifikasi nilai puncak daya pada tiga kondisi iradiasi.

Perangkat / Fungsi	Indikator Uji	Hasil
MPPT	Mengisi baterai dari keluaran panel	Berfungsi
Baterai 12V 100Ah	Menerima energi pengisian	Berfungsi
Sensor Level Tandon	Mengaktifkan dan menonaktifkan pompa pengisi	Berfungsi
Lampu LED dan sensor	tandon	Berfungsi
Cahaya	Menyala saat gelap, padam saat terang	Berfungsi
Jalur SVFD	Pompa tunggal tetap beroperasi tanpa gangguan	

Daya Keluaran Panel dari Persamaan (1)

Tabel 3 menyajikan daya keluaran panel dari Persamaan (1) pada tiga nilai iradiasi untuk kedua kapasitas panel.

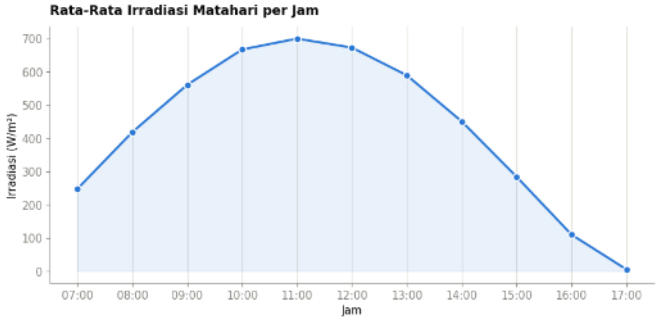
Tabel 3. Daya keluaran panel dari Persamaan (1) pada tiga kondisi iradiasi.

Kondisi Iradiasi (G)	Nilai	Daya Sistem A (1200 Wp)	Daya Sistem B (600 Wp)
Rata-rata jam 11:00	699,5 W/m²	692,5 W	346,3 W
Hari tercerah	896 W/m²	887 W	443 W
Kondisi standar (STC)	1000 W/m²	990 W	495 W

Seluruh angka pada Tabel 3 dihitung dengan Persamaan (1). Daya Sistem B selalu setengah daya Sistem A pada setiap kondisi iradiasi, sebagaimana rasio kapasitas panel 600 Wp terhadap 1200 Wp, karena Persamaan (1) berbanding lurus dengan kapasitas panel. Daya tertinggi yang dicapai Sistem A hanya 887 W pada iradiasi 896 W/m² dan 990 W pada kondisi standar, masih di bawah kapasitas *nameplate* 1200 W. Selisih tersebut berasal dari iradiasi maksimum yang tercatat sebesar 896 W/m² dan faktor efisiensi 0,825% yang berlaku tetap pada semua kondisi.

Profil Iradiasi Matahari

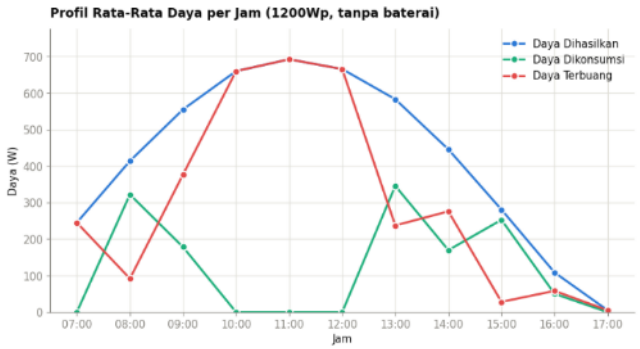
Pada Sistem B, daya dihasilkan (kurva biru) mencapai puncak 346 W setengah dari Sistem A, sesuai rasio kapasitas panel ditunjukkan pada Gambar 3. Sumbu-Y kedua grafik profil dikunci pada skala yang sama sehingga perbedaan tinggi puncak dapat dibandingkan langsung. Berbeda dari Sistem A, kurva daya termanfaatkan (hijau) hampir berhimpit dengan kurva daya dihasilkan (biru) di sepanjang hari, sementara kurva daya terbuang (merah) hampir rata di dasar grafik. Hampir seluruh energi termanfaatkan, baik oleh pompa maupun oleh baterai yang menyerap sisa daya di luar jadwal pompa.



Gambar 3. Rata-rata iradiasi matahari per jam

Profil Daya Sistem A (1200 Wp Tanpa Penyimpanan Energi)

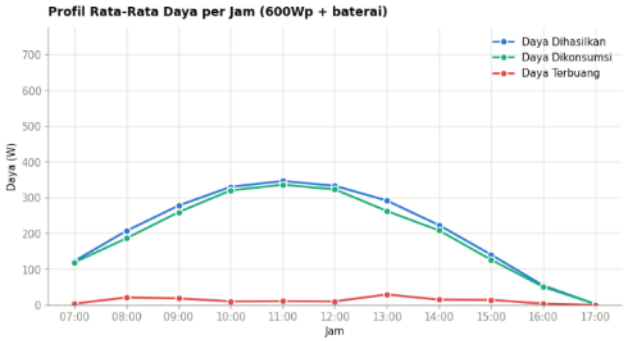
Pada Sistem A, daya dihasilkan (kurva biru) mencapai puncak 692 W pada pukul 11:00, ditunjukkan pada Gambar 4. Pompa hanya beroperasi pada jadwal tetap (08:00, 13:00, 15:00) dan dibatasi rating 370 W, sehingga kurva daya termanfaatkan (hijau) hanya membentuk tiga lonjakan sempit. Akibatnya, sebagian besar daya di luar jadwal tersebut termasuk seluruh rentang pukul 10:00-12:00 yang justru menjadi puncak produksi terbuang seluruhnya, tampak dari kurva daya terbuang (merah) yang hampir berhimpit dengan kurva daya dihasilkan pada jam-jam puncak.



Gambar 4. Profil rata-rata daya per jam Sistem A (1200 Wp, tanpa penyimpanan energi).

Profil Daya Sistem B (600 Wp Dengan Penyimpanan Energi Baterai)

Pada Sistem B, daya dihasilkan (kurva biru) mencapai puncak 346 W setengah dari Sistem A, sesuai rasio kapasitas panel ditunjukkan pada Gambar 5. Sumbu-Y kedua grafik profil dikunci pada skala yang sama sehingga perbedaan tinggi puncak dapat dibandingkan langsung. Berbeda dari Sistem A, kurva daya termanfaatkan (hijau) hampir berhimpit dengan kurva daya dihasilkan (biru) di sepanjang hari, sementara kurva daya terbuang (merah) hampir rata di dasar grafik. Hampir seluruh energi termanfaatkan, baik oleh pompa maupun oleh baterai yang menyerap sisa daya di luar jadwal pompa.



Gambar 5. Profil rata-rata daya per jam Sistem B (600 Wp, dengan penyimpanan energi).

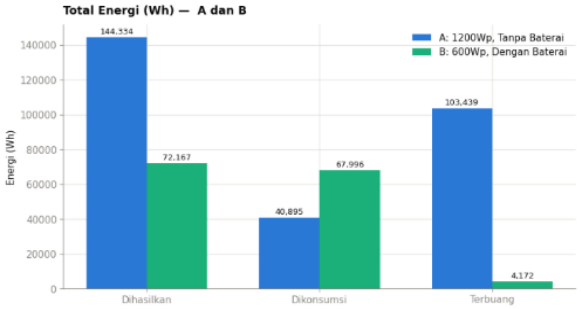
Perbandingan Total Energi Kumulatif 31 Hari

Rekapitulasi energi kumulatif selama 31 hari pengamatan disajikan pada Tabel 4 dan divisualisasikan pada Gambar 5.

Tabel 4. Rekapitulasi energi kumulatif 31 hari dua konfigurasi.

Kategori	Sistem A (1200 Wp)	Sistem B (600 Wp)
Total dihasilkan	144.334 Wh	72.167 Wh
Total termanfaatkan (diserap sistem)	40.895 Wh	67.996 Wh
Total Terbuang	103.439 Wh	4.172 Wh
Rata-rata dihasilkan per hari	4.655,9 Wh	2.328,0 Wh
Rata-rata termanfaatkan per hari	1.319,2 Wh	2.193,4 Wh

Kategori	Sistem A (1200 Wp)	Sistem B (600 Wp)
Rata-rata terbuang per hari	3.336,7 Wh	134,6 Wh

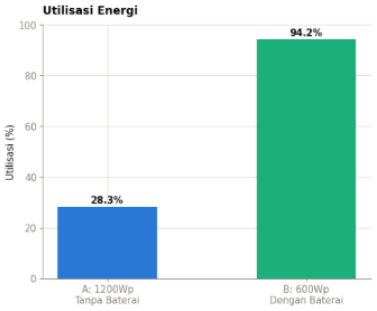


Gambar 6. Total energi kumulatif 31 hari perbandingan Sistem A dan Sistem B.

Pada Gambar 6, kelompok batang "Dihasilkan" memperlihatkan Sistem A (batang biru) memproduksi energi dua kali lipat dibanding Sistem B (batang hijau), namun pada kelompok "Dikonsumsi" (energi termanfaatkan) posisinya justru terbalik: energi yang termanfaatkan Sistem A lebih rendah (40.895 Wh berbanding 67.996 Wh). Menambah kapasitas panel tanpa media penyimpanan tidak menambah energi termanfaatkan; kapasitas dan jadwal pompa tetap menjadi faktor pembatas konsumsi, sehingga kelebihan energi hanya berakhir sebagai kerugian tampak dari kelompok "Terbuang" yang menunjukkan 103.439 Wh pada Sistem A berbanding hanya 4.172 Wh pada Sistem B.

Utilisasi Energi

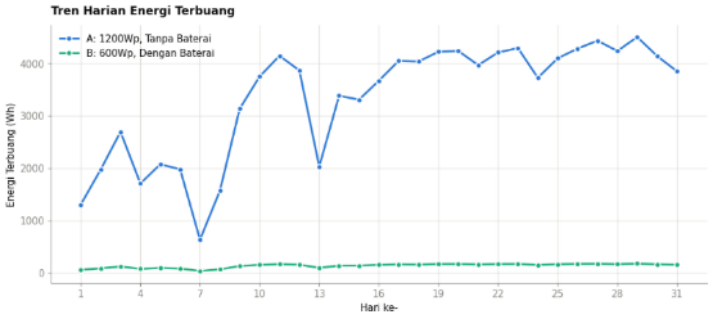
Persentase energi dihasilkan yang termanfaatkan pada Sistem A hanya 28,3%, sedangkan Sistem B mencapai 94,2% (Gambar 7). Angka 94,2% mencerminkan rugi konversi MPPT dan SVFD, sebagai konsekuensi asumsi bahwa pengosongan baterai tidak dimodelkan, sehingga seluruh energi yang masuk baterai dihitung diserap. Dengan demikian, angka ini belum menggambarkan rugi daya keseluruhan sistem maupun energi yang dipakai beban.



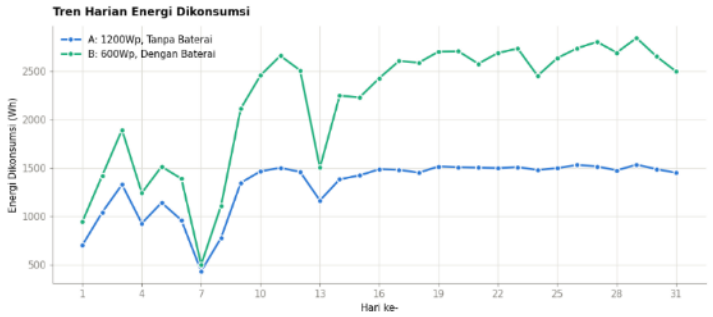
Gambar 7. Utilisasi energi Sistem A dan Sistem B.

Tren Harian Selama 31 Hari

Pola energi terbuang harian ditunjukkan pada Gambar 8 dan energi termanfaatkan harian pada Gambar 8. Pada kedua grafik, sumbu horizontal menampilkan hari ke-1 hingga ke-31. Kurva Sistem A (biru) dan Sistem B (hijau) sama-sama mengikuti variasi iradiasi harian, tetapi jarak antara keduanya konsisten sepanjang 31 hari. Pada Gambar 7, kurva biru (energi terbuang Sistem A) berada jauh di atas kurva hijau (Sistem B) setiap hari, sedangkan pada Gambar 9 pola sebaliknya terjadi pada energi termanfaatkan kurva hijau (Sistem B) konsisten di atas kurva biru (Sistem A). Kesenjangan ini bertahan baik pada hari cerah maupun mendung, sehingga temuan tidak bergantung pada kondisi cuaca tertentu.



Gambar 8. Tren harian energi terbuang.



Gambar 9. Tren harian energi dikonsumsi.

Pembahasan

Pada Sistem A, penambahan kapasitas panel tanpa penyimpanan tidak menambah energi termanfaatkan: pompa tunggal 370 W yang mengisi tandon tiga kali sehari, masing-masing 90 menit, menjadi pembatas, sehingga kelebihan energi panel terbuang (103.439 Wh). Pada Sistem B, jalur baterai menyerap sisa energi di luar jadwal pompa sehingga energi terbuang turun menjadi 4.172 Wh, meski panel hanya 600 Wp. Pola ini sejalan dengan kajian yang menunjukkan bahwa sistem pompa PV *direct-coupled* tidak memanfaatkan energi di luar beban terjadwal (Chandel dkk., 2017), serta dengan pertimbangan biaya penyimpanan yang menjadi alasan sistem 2024-2025 dirancang tanpa baterai (Narayan dkk., 2018).

Hasil uji fungsional (Tabel 1) menunjukkan jalur MPPT-baterai, sensor level, lampu otomatis, dan jalur SVFD berfungsi. Hal ini memperlihatkan bahwa sistem yang dipasang pada rumah pompa KTTM beroperasi sesuai rancangan.

Batasan. (1) Pengosongan baterai tidak dimodelkan, sehingga utilisasi 94,2% hanya mencerminkan rugi konversi dan belum menunjukkan pemakaian oleh beban. (2) Durasi pengisian tandon diasumsikan tetap 90 menit. (3) Kapasitas baterai tidak divariasikan, kinerja malam hari tidak diukur, dan dampak pada luas lahan yang diairi tidak dievaluasi. Karena itu, hasil ini tidak digunakan untuk menyimpulkan kapasitas baterai optimal, kinerja malam hari, atau cakupan irigasi, dan rasio kapasitas panel terhadap penyimpanan menjadi rekomendasi kajian lanjutan.

Hasil Implementasi dan Dokumentasi Lapangan

Pemasangan dan integrasi perangkat sistem di rumah pompa persawahan Kelompok Tani Tawang Makmur ditunjukkan pada Gambar 10. Sistem penampungan air menggunakan tandon berkapasitas 1.200 L yang terpasang pada menara rangka besi di bawah dudukan modul panel surya (Gambar 10a). Baterai *deep cycle gel* 12 V 100 Ah dirakit dalam box panel besi bertingkat untuk melindungi baterai dari kelembapan dan paparan cuaca luar (Gambar 10b). Inverter SVFD dan modul MPPT beserta kontroler dipasang pada box panel kontrol terpisah yang dilengkapi pengaman MCB DC dan AC (Gambar 10c).


(10a)



(10b)


(10c)

Gambar 10. Implementasi fisik sistem di lokasi mitra.

Uji coba fungsionalitas dan pengukuran operasional sistem dilakukan secara langsung di lapangan (Gambar 11). Intensitas radiasi matahari diukur secara real-time menggunakan alat ukur pyranometer digital yang dilengkapi perekam data kartu SD (Gambar 11a). Pengukuran parameter kelistrikan keluaran inverter SVFD menuju pompa dilakukan menggunakan multimeter digital true-RMS (Gambar 11b). Hasil pengujian mengonfirmasi bahwa seluruh komponen berfungsi dengan baik: inverter mampu menggerakkan pompa sesuai batas frekuensi operasional, MPPT menyalurkan daya pengisian ke baterai secara stabil, dan sensor level air berhasil memutus arus pompa saat tandon terisi penuh. Rangkaian kegiatan diakhiri dengan serah terima perangkat kepada pengurus Kelompok Tani Tawang Makmur (Gambar 12).


(11a)


(11b)

Gambar 11. Pengukuran lapangan dan uji fungsi.



Gambar 12. Penyerahan perangkat tambahan kepada perwakilan Kelompok Tani Tawang Makmur.

SIMPULAN DAN SARAN

Pada PLTS 1200 Wp di rumah pompa Kelompok Tani Tawang Makmur telah terpasang jalur penyimpanan berupa MPPT *charge controller* dan baterai 12 V 100 Ah, sensor level yang mengatur pompa pengisi tandon, serta lampu otomatis berbasis sensor cahaya. Hasil uji fungsional menunjukkan seluruh perangkat berfungsi dan jalur SVFD tidak terganggu. Pengukuran selama 31 hari menunjukkan Sistem A (1200 Wp tanpa penyimpanan) memanfaatkan 28,3% energi dihasilkan dan membuang 103.439 Wh, sedangkan Sistem B (600 Wp dengan baterai) memanfaatkan 94,2% dan membuang 4.172 Wh. Angka 94,2% merupakan konsekuensi asumsi tanpa pemodelan pengosongan baterai, dengan durasi pengisian tandon tetap 90 menit, sehingga bukan rugi keseluruhan sistem dan tidak digunakan untuk menyimpulkan kapasitas baterai optimal, kinerja malam hari, atau cakupan irigasi.

Disarankan pengujian beban malam hari disertai perhitungan *state of charge* baterai, yang sekaligus menjadi keterbatasan kegiatan ini, serta analisis kapasitas baterai pada kajian lanjutan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Negeri Malang atas dukungan dan pendanaan yang memungkinkan terlaksananya kegiatan pengabdian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh anggota tim, mitra lapangan, serta Kelompok Tani Tawang Makmur dan ketuanya, Drs. H. Moh. Chilmi, yang telah bekerja sama dengan baik dalam proses implementasi dan pemanfaatan sistem PLTS dengan penyimpanan energi untuk irigasi persawahan.

DAFTAR RUJUKAN

Abdelkareem, M. A., Ayoub, M., Khuri, S., Alami, A. H., Sayed, E. T., Deepa, T. D., & Olabi, A. G. (2023). Environmental aspects of batteries. *Sustainable Horizons*, *8*, 100074. https://doi.org/10.1016/j.horiz.2023.100074

Abdellahi, B., Mohamed Mahmoud, M. E. M., Dah, N. O., Diakité, A., El Hassen, A., & Ehssein, C. (2019). Monitoring the performances of a maximum power point tracking photovoltaic (MPPT PV) pumping system driven by a brushless direct current (BLDC) motor. *International Journal of Renewable Energy Development*, *8*(2), 193–201. https://doi.org/10.14710/ijred.8.2.193-201

Achmad, A. Z., Sahroni, M. A., Prasetyo, M. A., Ivandany, I., Rizqi, M. I., Habibi, M. A., Gumilar, L., & Kusumawardana, A. (2025). Pemanfaatan teknologi PLTS Off-Grid tanpa baterai untuk sistem irigasi persawahan di Desa Bendosewu Talun Blitar. *SELAPARANG: Jurnal Pengabdian Masyarakat Berkemajuan*, *9*(4), 2247–2254. https://doi.org/10.31764/jpmb.v9i4.32569

antaranews.com. (2023, Oktober 26). *Indonesia komitmen capai NDC dan Net Zero di 2050*. Antara News. https://www.antaranews.com/berita/3793104/indonesia-komitmen-capai-ndc-dan-net-zero-di-2050

Bolan, S., Padhye, L. P., Jasemizad, T., Govarthanan, M., Karmegam, N., Wijesekara, H., Amarasiri, D., Hou, D., Zhou, P., Biswal, B. K., Balasubramanian, R., Wang, H., Siddique, K. H. M., Rinklebe, J., Kirkham, M. B., & Bolan, N. (2024). Impacts of climate change on the fate of contaminants through extreme weather events. *Science of The Total Environment*, *909*, 168388. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168388

Chandel, S. S., Naik, M. N., & Chandel, R. (2017). Review of performance studies of direct coupled photovoltaic water pumping systems and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 163–175. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.019

Hilali, A., Mardoude, Y., Essahlaoui, A., Rahali, A., & Ouanjli, N. E. (2022). Migration to solar water pump system: Environmental and economic benefits and their optimization using genetic algorithm Based MPPT. *Energy Reports*, *8*, 10144–10153. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.08.017

Narayan, N., Papakosta, T., Vega-Garita, V., Qin, Z., Popovic-Gerber, J., Bauer, P., & Zeman, M. (2018). Estimating battery lifetimes in Solar Home System design using a practical modelling methodology. *Applied Energy*, *228*, 1629–1639. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.152

Ngadisih, N., Sinatrya, A., Retno Wulan, I., Claudea Tanjung, J., Fahima, S., & Lestari, P. (2024). Potensi Ancaman dan Upaya Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca di Sektor Pertanian Indonesia: Tinjauan Sistematis atas Literatur. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, *12*(1), 245–254. https://doi.org/10.26418/jtllb.v12i1.74231

OECD. (2024). *OECD Economic Surveys: Indonesia 2024* (Vol. 2024). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/de87555a-en

Peña-Torres, D., Boix, M., & Montastruc, L. (2022). Optimization approaches to design water-energy-food nexus: A litterature review. *Computers & Chemical Engineering*, *167*, 108025. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.108025

Rosa, L., & Gabrielli, P. (2023). Achieving net-zero emissions in agriculture: A review. *Environmental Research Letters*, *18*(6), 063002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/acd5e8

Saha, S. K. (2025). Empowering rural South Asia: Off-grid solar PV, electricity accessibility, and sustainable agriculture. *Applied Energy*, *377*, 124639. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124639

Silalahi, D. F., Blakers, A., Stocks, M., Lu, B., Cheng, C., & Hayes, L. (2021). Indonesia's Vast Solar Energy Potential. *Energies*, *14*(17), 5424. https://doi.org/10.3390/en14175424

Singla, M. K., Gupta, J., Gupta, A., Safaraliev, M., Zeinoddini-Meymand, H., & Kumar, R. (2025). Empowering Rural Farming: Agrovoltaic Applications for Sustainable Agriculture. *Energy Science & Engineering*, *13*(1), 35–59. https://doi.org/10.1002/ese3.2017