

ANALISIS KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK HYBRID PLTS–MIKROHIDRO SKALA KECIL 500 W SEBAGAI PENERANGAN JALAN UMUM BAGI PETANI DI KELURAHAN TARATARA, KOTA TOMOHON

Marcelino Sanio Supit¹, Johan F. Makal², Nathaniel Lumalan Bijang³
^{1,2,3} Politeknik Negeri Manado
¹marcelinosaniosupit@gmail.com, ²johanferni52@gmail.com,
³bijangnathaniel@gmail.com

ABSTRACT

The lack of public street lighting (PJU) in remote farming areas around Tomohon City forces farmers to walk through plantation roads in the dark, raising both safety and productivity concerns during after-hours activities. This study analyzes the performance of a small-scale 500 W hybrid power system that combines solar photovoltaic (PV) and microhydro generation to supply street lighting for farmers in Taratara Village, Tomohon. The system consists of a 400 Wp monocrystalline PV array, a 500 W crossflow microhydro turbine with a permanent-magnet generator, a 24 V/100 Ah deep-cycle battery bank, an MPPT charge controller, a dump-load resistor, and DC/AC protection devices. Field testing was carried out for fourteen consecutive days, recording voltage, current, generated energy, battery state-of-charge, and load behaviour through an ESP32-based data logger. The PV subsystem delivered an average of 1.92 kWh/day at 14.76% conversion efficiency, while the microhydro turbine produced 8.71 kWh/day at 40.66% hydraulic-to-electrical efficiency. The combined hybrid output of 10.27 kWh/day comfortably covered the load demand of six 30 W LED lamps operating 12 hours nightly (2.16 kWh/day). The control and protection system kept battery SoC within 62-95% and successfully cleared all four simulated fault scenarios within 18-320 ms. The hybrid configuration is therefore considered technically reliable as an off-grid PJU solution for remote agricultural areas.

Keywords: *hybrid power plant, photovoltaic, microhydro, public street lighting, renewable energy*

ABSTRAK

Minimnya Penerangan Jalan Umum (PJU) pada wilayah pertanian terpencil di Kota Tomohon membuat petani harus melintasi jalan kebun dalam kondisi gelap, sehingga menimbulkan persoalan keselamatan sekaligus menurunkan produktivitas saat aktivitas malam hari. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja sistem pembangkit listrik hybrid skala kecil 500 W yang memadukan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan mikrohidro untuk memasok PJU bagi petani di Kelurahan Taratara, Kota Tomohon. Sistem terdiri dari larik panel surya monokristalin 400 Wp, turbin mikrohidro tipe crossflow 500 W dengan generator magnet permanen, bank baterai deep cycle 24 V/100 Ah, charge controller MPPT, dump load resistor, serta perangkat proteksi sisi DC dan AC. Pengujian lapangan dilakukan selama empat belas hari berturut-turut menggunakan data logger berbasis ESP32 dengan parameter berupa tegangan, arus, energi yang dibangkitkan, kondisi pengisian baterai, dan perilaku beban. Subsistem PLTS rata-rata menghasilkan 1,92 kWh/hari pada efisiensi konversi 14,76%, sedangkan mikrohidro memasok 8,71 kWh/hari pada efisiensi hidraulik-ke-

listrik 40,66%. Total keluaran hybrid sebesar 10,27 kWh/hari jauh melampaui kebutuhan beban enam unit lampu LED 30 W yang dinyalakan selama 12 jam (2,16 kWh/hari). Sistem kendali dan proteksi mampu mempertahankan State-of-Charge baterai pada rentang 62-95% serta berhasil memutus seluruh empat skenario gangguan dalam 18-320 ms. Konfigurasi hybrid yang dirancang dinilai layak diterapkan sebagai solusi PJU mandiri pada wilayah pertanian terpencil.

Kata Kunci: pembangkit hybrid, PLTS, mikrohidro, penerangan jalan umum, energi terbarukan

A. Pendahuluan

Aktivitas pertanian di banyak wilayah Indonesia kerap berlangsung sampai melewati senja, terutama saat panen raya atau ketika hasil kebun harus diangkut ke titik pengumpulan. Tanpa Penerangan Jalan Umum (PJU) yang memadai, pekerjaan semacam itu menjadi tidak nyaman sekaligus berisiko, baik dari sisi kecelakaan, gangguan satwa, maupun keamanan dari tindak kriminal (Yusuf & Hartono, 2020). Kondisi tersebut diperburuk oleh fakta bahwa lebih dari 1.200 desa di Indonesia masih berada pada kategori belum berlistrik penuh (Kementerian ESDM, 2022). Kelurahan Taratara di Kecamatan Tomohon Barat, Kota Tomohon, merupakan salah satu daerah yang memperlihatkan kondisi tersebut. Wilayahnya didominasi lahan perkebunan sayur, bunga, dan kopi rakyat, dengan jalan setapak serta jalan kebun yang sebagian besar belum terjangkau jaringan PJU PLN (BPS Kota Tomohon, 2023).

Topografi Taratara yang berbukit dan dilewati beberapa anak sungai justru menyimpan potensi sumber energi terbarukan yang cukup beragam. Intensitas radiasi matahari rata-rata di Sulawesi Utara berkisar antara 4,5–5,1 kWh/m² per hari (Wuwung, 2021), sementara aliran sungai kecil yang melintasi sebagian besar kebun memungkinkan pemanfaatan turbin mikrohidro berskala mikro (Tampubolon & Sumual, 2023). Pemanfaatan kedua sumber ini secara terpisah memang dapat dilakukan, tetapi masing-masing menyimpan keterbatasan tersendiri. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mengalami penurunan keluaran yang tajam ketika cuaca berawan tebal dan praktis tidak menghasilkan daya pada malam hari (Hidayat & Pratama, 2022), sedangkan mikrohidro sangat bergantung pada debit air yang berfluktuasi mengikuti musim (Wibowo dkk., 2021).

Sistem pembangkit hybrid hadir sebagai jembatan atas saling-lengkap karakteristik kedua sumber. Kunaifi dan Reinders (2019) memaparkan bahwa kombinasi PLTS dengan sumber energi air mampu meningkatkan keandalan suplai daya hingga melampaui 90% pada kawasan off-grid berskala kecil. Patel (2006) lebih jauh menegaskan bahwa konfigurasi hybrid tidak hanya mendongkrak Loss of Power Supply Probability (LPSP), tetapi juga memperpanjang umur baterai karena beban siklus pengisian terbagi pada dua sumber. Saputra dkk. (2022) memperlihatkan pada studi kasus di Sumatera Barat bahwa rasio kontribusi PLTS dan mikrohidro yang seimbang justru tidak selalu optimal; dominasi mikrohidro akibat ketersediaan air yang melimpah seringkali menghasilkan keandalan yang lebih tinggi pada area perbukitan. Dengan demikian, penggabungan PLTS dan mikrohidro pada kapasitas 500 W diperkirakan cukup memadai untuk menyalakan beberapa titik lampu LED hemat energi sepanjang malam, sekaligus menyimpan kelebihan daya dalam baterai sebagai cadangan jika salah satu sumber sedang terganggu.

Persoalan yang muncul kemudian bukan hanya pada aspek

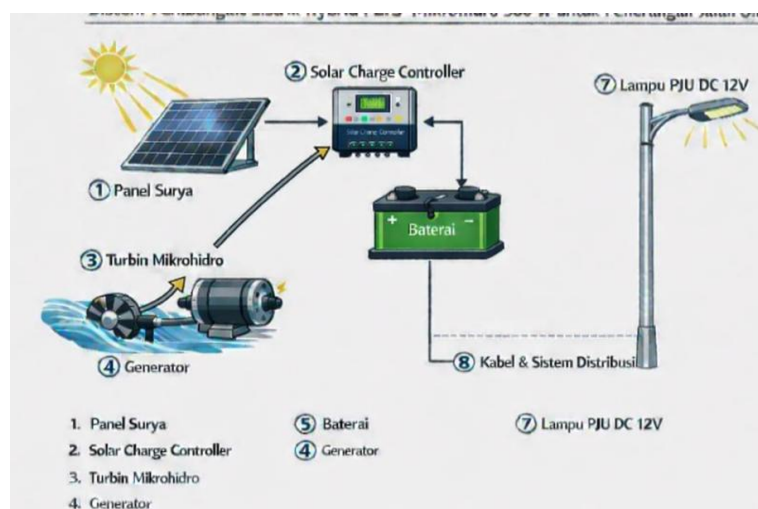
pembangkitannya, melainkan juga pada cara mengatur aliran daya di antara dua sumber, baterai, dan beban. Ketidaktepatan pengaturan dapat memunculkan fenomena pengisian berlebih (overcharge), pengosongan terlalu dalam (overdischarge), maupun arus lebih yang berpotensi memperpendek umur komponen (Putra dkk., 2020). Rahardja (2018) menjelaskan bahwa baterai jenis Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) yang dioperasikan pada Depth of Discharge (DoD) di atas 50% akan mengalami penurunan kapasitas signifikan setelah kurang dari 500 siklus, sehingga pengaturan SoC menjadi krusial. Itu sebabnya sistem kendali dan proteksi memegang peran setara penting dengan kapasitas pembangkit itu sendiri (Salim dkk., 2023). Tanpa proteksi yang memadai, sistem yang sudah dirancang dengan margin keamanan secara perhitungan pun masih rentan rusak pada kondisi nyata (Hasibuan, 2021).

Penelitian ini dijalankan dengan beberapa tujuan yang saling terkait. Pertama, merancang dan membangun prototipe sistem hybrid PLTS–mikrohidro berkapasitas 500 W untuk PJU di Kelurahan Taratara, dengan mengacu pada panduan pencahayaan

jalan SNI 7391:2008 (Standar Nasional Indonesia, 2008). Kedua, mengevaluasi kinerja kelistrikan masing-masing subsistem berdasarkan parameter tegangan, arus, dan energi yang dibangkitkan, sebagaimana metode pengujian yang dianjurkan IEC 61724-1 (International Electrotechnical Commission, 2017). Ketiga, menganalisis kestabilan suplai daya ke beban LED sekaligus respons sistem kendali dan proteksi pada kondisi gangguan. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat menjadi referensi teknis bagi pengembangan sistem PJU mandiri pada area pertanian sejenis di Sulawesi Utara, sekaligus memperkaya kajian penerapan energi terbarukan skala kecil di Indonesia bagian timur (Pranata & Wibisono, 2020).

B. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di kawasan perkebunan Kelurahan Taratara, Kecamatan Tomohon Barat, Kota Tomohon, pada periode Februari sampai Juni 2026. Lokasi spesifik berada pada koordinat 1°20' LU dan 124°48' BT dengan ketinggian sekitar 850 m di atas permukaan laut (BPS Kota Tomohon, 2023). Pendekatan yang digunakan adalah eksperimental kuantitatif dengan tahapan perancangan, pembuatan prototipe, pengujian lapangan, dan analisis data, mengacu pada kerangka penelitian terapan yang lazim digunakan pada studi sistem pembangkit skala kecil (Sugiyono, 2019). Konfigurasi dasar sistem hybrid yang dirancang ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Blok Sistem Hybrid PLTS–Mikrohidro 500 W untuk PJU

Sumber: Hasil rancangan penulis (2026)

Sebagaimana terlihat pada Gambar 1, energi listrik yang dibangkitkan oleh panel surya dan turbin mikrohidro disalurkan menuju Solar Charge Controller (SCC) yang berfungsi mengatur tegangan pengisian baterai. Baterai berperan sebagai penyangga energi sekaligus sumber utama saat malam hari, kemudian disalurkan ke beban berupa lampu LED PJU melalui jaringan distribusi DC. Pola serupa juga digunakan pada penelitian Saputra dkk. (2022) di Sumatera Barat dan Pranata & Wibisono (2020) di Bali, dengan modifikasi pada kapasitas dan tipe charge controller.

Komponen utama yang digunakan terdiri atas empat panel surya monokristalin 100 Wp (total daya puncak 400 Wp), turbin mikrohidro tipe crossflow berdaya nominal 500 W dengan generator magnet permanen, bank baterai deep cycle berkapasitas

24 V/100 Ah, charge controller MPPT 30 A, dump load resistor untuk mikrohidro, inverter gelombang sinus murni 500 W, serta perangkat proteksi yang mencakup MCB DC dan AC, fuse, surge protection device (SPD), dan blocking diode. Pemilihan tipe MPPT (Maximum Power Point Tracking) di atas tipe PWM didasari pertimbangan efisiensi konversi yang lebih tinggi, yaitu hingga 30% lebih baik pada kondisi cuaca berawan (Mulyono, 2019; Salim dkk., 2023). Beban yang diuji berupa enam unit lampu LED PJU 30 W dengan tegangan kerja 24 V DC, dipasang pada tiang sederhana sepanjang jalur kebun utama. Spesifikasi LED tersebut memenuhi tingkat iluminansi minimum jalan kelas IV pada SNI 7391:2008 sebesar 2 lux (Standar Nasional Indonesia, 2008). Konsep pemasangan sistem di lapangan diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2 Konsep Pemasangan Sistem Hybrid pada Jalur Kebun di Taratara

Sumber: Ilustrasi rancangan penulis (2026)

Metode perancangan diawali dari perhitungan kebutuhan energi harian beban, kemudian dilanjutkan dengan penentuan kapasitas pembangkit dan baterai. Kebutuhan beban dihitung sebesar $6 \times 30 \text{ W} \times 12 \text{ jam} = 2.160 \text{ Wh}$ per hari. Untuk faktor keamanan, kapasitas baterai dipilih agar mampu menanggung beban penuh selama dua hari tanpa pengisian (autonomy day = 2), dengan batas kedalaman pelepasan (DoD) maksimum 50% sesuai rekomendasi Rahardja (2018). Berdasarkan perhitungan tersebut diperoleh kapasitas teoretis baterai sekitar 180 Ah pada tegangan 24 V; pemilihan baterai 100 Ah dilakukan dengan mempertimbangkan

ketersediaan suplai mikrohidro yang relatif kontinu sehingga ketergantungan pada cadangan baterai dapat ditekan (Patel, 2006).

Pengujian dilaksanakan dalam dua fase. Fase pertama merupakan pengujian terpisah pada masing-masing subsistem untuk memetakan karakteristik PLTS dan mikrohidro. Pada PLTS dilakukan pengukuran tegangan modul, arus modul, intensitas radiasi matahari (menggunakan pyranometer Apogee SP-110), dan suhu permukaan panel setiap satu jam dari pukul 06.00 sampai 18.00 selama tujuh hari (International Electrotechnical Commission, 2017). Pada mikrohidro diukur debit air

dengan metode current meter, head efektif, tegangan generator, arus, dan daya keluaran selama 24 jam berturut-turut, juga selama tujuh hari (Arifin & Wahyudi, 2020). Fase kedua adalah pengujian sistem terintegrasi yang mengamati aliran daya antar subsistem, status pengisian baterai (SoC), tegangan beban, serta arus

yang mengalir ke lampu LED. Pengukuran fase kedua berlangsung selama 14 hari nonstop menggunakan modul data logger berbasis mikrokontroler ESP32 yang merekam data setiap lima menit (Sasmita, 2022). Daftar instrumentasi yang digunakan dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1 Instrumentasi dan Parameter Pengukuran

Parameter	Instrumen	Akurasi	Lokasi Pengukuran
Tegangan DC	Sensor INA219 + multimeter Sanwa CD800a	±0,5%	Output panel & baterai
Arus DC	Sensor ACS712 30A + clamp meter	±1%	Jalur DC utama
Iradiasi matahari	Pyranometer Apogee SP-110	±5 W/m ²	Bidang panel surya
Suhu panel	Sensor DS18B20 (waterproof)	±0,5°C	Punggung panel
Debit air	Current meter Global Water FP111	±2%	Saluran masuk turbin
Head efektif	Pengukuran beda elevasi pita ukur	±5 cm	Inlet – outlet turbin
Tegangan AC	Multimeter true-RMS Fluke 117	±0,5%	Output inverter
Frekuensi & cos φ	Power analyzer Lutron DW-6090	±0,1 Hz	Output inverter
Akuisisi data	ESP32 + RTC DS3231 + microSD 16 GB	Resolusi 5 menit	Panel kontrol utama

Sumber: Rangkuman instrumentasi penelitian (2026)

Sistem proteksi dan kendali turut diuji dengan empat skenario gangguan: hubung singkat pada sisi beban, beban lebih (overload) sampai 150% dari nominal, tegangan lebih akibat fluktuasi mikrohidro saat dump load belum aktif, serta pemutusan satu sumber pembangkit secara mendadak (Hasibuan, 2021). Respons sistem dicatat dalam bentuk waktu pemutusan dan rentang tegangan saat kembali stabil. Analisis data dilakukan secara

deskriptif kuantitatif. Efisiensi PLTS dihitung dengan persamaan $\eta_{pv} = (P_{out} \times 100\%) / (I \times A)$, dengan P_{out} sebagai daya keluaran panel, I sebagai intensitas radiasi, dan A sebagai luas total panel (Hidayat & Pratama, 2022). Efisiensi mikrohidro dihitung sebagai rasio daya listrik terhadap daya hidrolik teoretis $Phidro = \rho \times g \times Q \times H$, dengan $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, Q sebagai debit air (m³/s), dan H sebagai head efektif (m),

sebagaimana dirumuskan oleh Arifin dan Wahyudi (2020).

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Spesifikasi Sistem Hybrid yang Dirancang

Konfigurasi akhir sistem hybrid yang berhasil dibangun ditampilkan pada Tabel 2. Pemilihan komponen mempertimbangkan ketersediaan di pasar lokal Manado dan Tomohon,

kompatibilitas tegangan kerja antar perangkat sehingga konversi tambahan dapat ditekan, serta ketahanan terhadap kondisi lingkungan tropis lembap di Sulawesi Utara dengan kelembaban relatif rata-rata 82% (BMKG, 2023). Standar IP65 dipilih untuk lampu PJU agar sesuai dengan tingkat kelembaban dan curah hujan tinggi tersebut (Yusuf & Hartono, 2020).

Tabel 2 Spesifikasi Komponen Sistem Hybrid PLTS–Mikrohidro 500 W

Komponen	Spesifikasi Teknis	Jumlah
Panel Surya	Monokristalin 100 Wp; Voc 22,5 V; Imp 5,4 A; η_{nom} 17,8%	4
Turbin Mikrohidro	Crossflow; head 7,5 m; debit 12 L/s; rpm 800	1
Generator	Permanent Magnet Generator (PMG) 500 W, 24 V DC	1
Baterai	Deep cycle VRLA 12 V 100 Ah	2 (seri)
Charge Controller	MPPT 30 A, 12/24 V auto, efisiensi 97%	1
Dump Load	Resistor 200 W, 24 V DC	1
Inverter	Pure sine wave 500 W, 24 V DC → 220 V AC	1
Lampu LED PJU	30 W, 24 V DC, 3.000 lm, IP65	6
Proteksi DC	MCB DC 32 A, fuse 15 A, SPD 24 V, blocking diode 10A	1 set
Proteksi AC	MCB AC 6 A, ELCB 30 mA	1 set
Data Logger	ESP32 + sensor INA219 + DHT22 + microSD	1 set
Tiang PJU	Pipa galvanis 2 inci, tinggi 5 m, jarak antar 25 m	6

Sumber: Hasil rancangan penulis (2026)

2. Kinerja Subsistem PLTS

Pengujian PLTS dilaksanakan selama tujuh hari berturut-turut, mencakup variasi cuaca dari cerah penuh sampai hujan ringan. Variasi ini sengaja dipilih agar profil kinerja yang diperoleh tidak terlalu ideal dan dapat menggambarkan kondisi nyata di

lapangan, sebagaimana saran metodologi pengujian PLTS lapangan oleh International Electrotechnical Commission (2017). Tabel 3 merangkum hasil pengukuran harian yang meliputi total intensitas radiasi, energi yang dihasilkan, serta efisiensi konversi.

Tabel 3 Hasil Pengujian Harian Subsistem PLTS

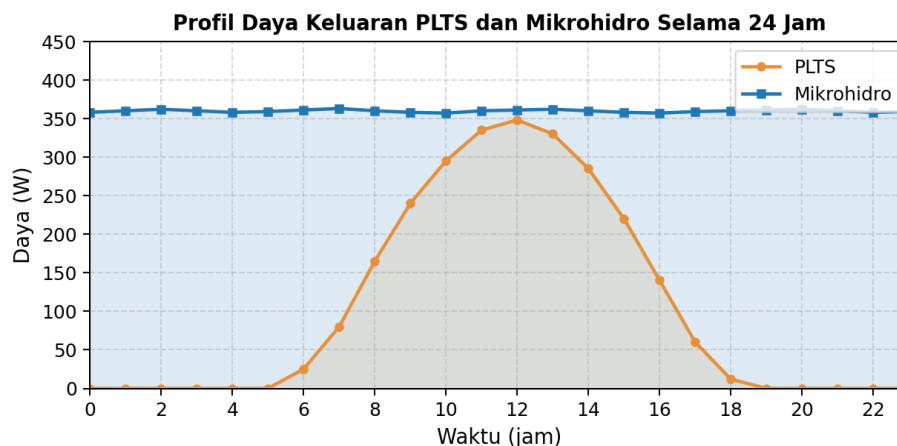
Hari	Kondisi Cuaca	Iradiasi (kWh/m ² /hari)	Energi (Wh)	Efisiensi (%)
1	Cerah	5,1	2.380	15,2
2	Cerah berawan	4,3	1.945	14,7
3	Berawan	3,2	1.420	14,4
4	Cerah	5,3	2.460	15,1
5	Hujan ringan	2,1	920	14,2
6	Cerah berawan	4,5	2.030	14,7
7	Cerah	5,0	2.310	15,0
Rata-rata	—	4,21	1.924	14,76

Sumber: Pengukuran lapangan (2026)

Rata-rata energi harian PLTS tercatat sebesar 1.924 Wh atau setara 1,92 kWh/hari, dengan efisiensi rata-rata 14,76%. Nilai tersebut selaras dengan efisiensi tipikal modul monokristalin komersial yang umumnya berada pada kisaran 14–18% (Hidayat & Pratama, 2022). Hasil ini juga konsisten dengan studi Mulyono (2019) yang melaporkan efisiensi rata-rata 14,5% untuk modul sejenis pada wilayah Jawa Tengah, serta Saputra dkk. (2022) yang mencatat 15,2% pada studi PLTS off-grid di Sumatera Barat. Penurunan keluaran pada hari kelima yang

berhujan mencapai 60% dibanding hari cerah, dan justru memperkuat argumen perlunya sumber pendukung agar suplai PJU tetap terjaga sepanjang tahun (Kunaifi & Reinders, 2019).

Profil keluaran harian menunjukkan puncak daya rata-rata terjadi pada pukul 11.00–13.00 sebesar 320–360 W, sementara daya turun signifikan setelah pukul 16.00 dan praktis nol setelah pukul 18.00. Pola harian ini divisualisasikan pada Gambar 3 untuk memperjelas kontras antara karakteristik PLTS yang puncak-tunggal dengan mikrohidro yang relatif konstan sepanjang 24 jam.



Gambar 3 Profil Daya Keluaran PLTS dan Mikrohidro Selama 24 Jam

Sumber: Rata-rata pengukuran 7 hari (2026)

Pola pada Gambar 3 menjadi pertimbangan penting dalam pengaturan logika kendali, di mana mikrohidro diberi prioritas pengisian baterai pada sore hingga pagi hari, sedangkan PLTS mengambil peran utama pada siang hari. Pengaturan ini juga membantu menjaga umur baterai karena mengurangi siklus pengisian-pelepasan dalam pada satu sumber, sejalan dengan rekomendasi Patel (2006) tentang load-sharing pada sistem hybrid berbasis baterai. Saat siang hari surplus energi dari PLTS sebagian disimpan ke baterai dan sebagian dialirkan ke dump load setelah baterai mencapai SoC penuh; pada malam hari, mikrohidro menjadi sumber utama yang langsung memasok beban tanpa banyak melibatkan baterai (Salim dkk., 2023).

3. Kinerja Subsistem Mikrohidro

Mikrohidro yang digunakan memanfaatkan aliran sungai kecil dengan debit rata-rata 12 L/s dan head efektif 7,5 m setelah pemasangan saluran pipa. Daya hidrolik teoretis pada kondisi tersebut dapat dihitung dengan persamaan dasar mekanika fluida (Arifin & Wahyudi, 2020):

$$\begin{aligned} P_{hidro} &= \rho \times g \times Q \times H \\ &= 1.000 \times 9,81 \\ &\quad \times 0,012 \times 7,5 \\ &= 882,9 \text{ W} \end{aligned}$$

Dengan demikian, daya nominal generator 500 W berada pada area kerja yang aman dan masih menyisakan margin untuk fluktuasi debit pada musim kemarau. Hasil pengujian selama tujuh hari pada Tabel 4 memperlihatkan keluaran yang relatif stabil dibanding PLTS, sebagaimana diharapkan dari sumber air yang relatif kontinu (Wibowo dkk., 2021).

Tabel 4 Hasil Pengujian Harian Subsistem Mikrohidro

Hari	Debit (L/s)	Daya rata-rata (W)	Energi (Wh)	Efisiensi (%)
1	12,1	358	8.592	40,5
2	11,8	352	8.448	40,9
3	12,3	365	8.760	40,7
4	12,0	360	8.640	40,8
5	13,1	388	9.312	40,2
6	12,2	362	8.688	40,7
7	11,9	354	8.496	40,8
Rata-rata	12,2	362,7	8.705	40,66

Sumber: Pengukuran lapangan (2026)

Rata-rata energi harian mikrohidro mencapai 8.705 Wh dengan efisiensi 40,66%. Nilai efisiensi ini berada dalam rentang yang dilaporkan Wibowo dkk. (2021) untuk turbin crossflow skala mikro, yaitu 35–55%, dan tergolong wajar mengingat sistem yang dibangun belum dilengkapi governor otomatis dan masih mengandalkan pengaturan beban via dump load resistor (Tampubolon & Sumual, 2023). Studi pembandingan oleh Arifin dan Wahyudi (2020) di Lombok menunjukkan efisiensi 38–42% pada konfigurasi crossflow head 6–8 m, sehingga nilai 40,66% pada penelitian ini dapat dianggap representatif untuk kondisi lapangan serupa.

Stabilitas keluaran pada rentang 352–388 W menunjukkan bahwa karakteristik sungai di Taratara cukup baik untuk dijadikan sumber tetap, dan penurunan kinerja pada cuaca buruk relatif minim. Pengamatan tambahan menunjukkan bahwa fluktuasi debit harian tidak melebihi 10% selama periode pengujian, walau pengujian tersebut belum mencakup puncak musim kemarau (BMKG, 2023). Untuk

kebutuhan PJU di area kebun yang tidak menuntut suplai presisi tinggi, fluktuasi semacam itu masih dapat diterima karena akan diserap oleh baterai sebagai penyangga (Patel, 2006).

4. Kinerja Sistem Hybrid Terintegrasi

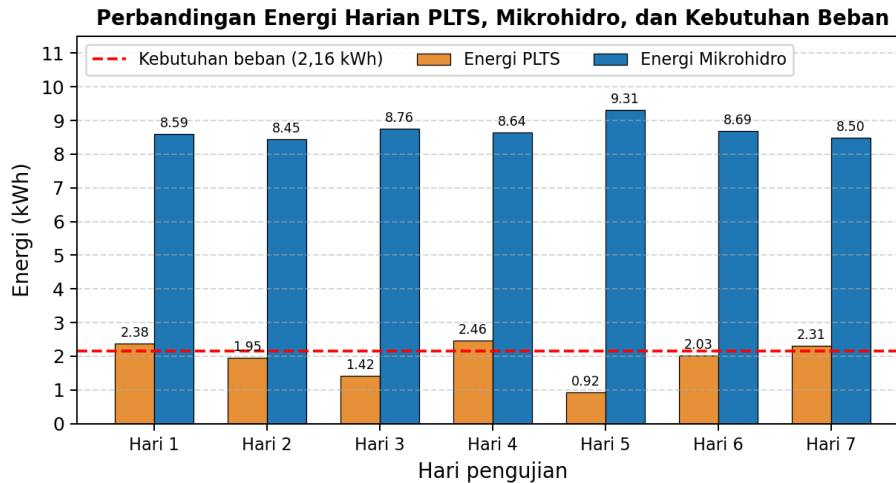
Setelah karakter masing-masing subsistem dipetakan, dilakukan pengujian sistem hybrid yang mengintegrasikan PLTS, mikrohidro, baterai, dan beban selama 14 hari berturut-turut. Profil tegangan baterai sebagai indikator State-of-Charge (SoC) terbagi menjadi tiga rentang waktu, yaitu pengisian dominan PLTS pada pukul 08.00–15.00, transisi pada pukul 15.00–18.00, dan pengisian dominan mikrohidro pada pukul 18.00–08.00 keesokan hari. Tabel 5 menampilkan ringkasan suplai energi harian dari kedua sumber selama dua minggu pengujian, sedangkan Gambar 4 memvisualisasikan perbandingan harian energi yang dibangkitkan terhadap kebutuhan beban.

Tabel 5 Rata-rata Suplai Energi Harian Sistem Hybrid (14 Hari)

Sumber Energi	Energi (Wh/hari)	Persentase (%)	Catatan Operasi
PLTS	1.860	18,1	Aktif 06.00–18.00
Mikrohidro	8.412	81,9	Aktif 24 jam
Total Pembangkit	10.272	100	—

Konsumsi Beban	2.144	20,9	6 LED × 30 W × 12 jam
Surplus ke Baterai/Dump	8.128	79,1	Charging + dump load

Sumber: Pengukuran data logger (2026)



Gambar 4 Perbandingan Energi Harian PLTS, Mikrohidro, dan Kebutuhan Beban

Sumber: Olahan data pengukuran 7 hari (2026)

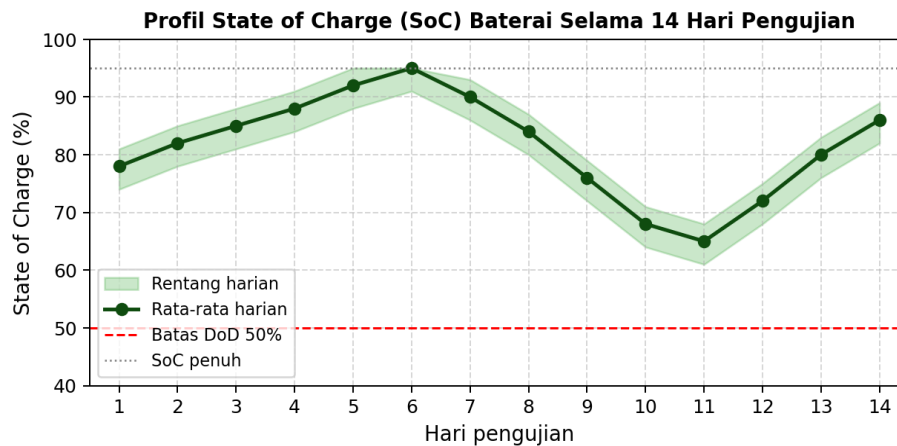
Konsumsi beban yang terukur sebesar 2.144 Wh per hari sedikit di bawah perhitungan teoretis 2.160 Wh, akibat tegangan kerja lampu yang sedikit lebih rendah dari nominal saat baterai berada pada SoC menengah (Hidayat & Pratama, 2022). Selisih antara energi terbangkit dan beban terpakai sebesar 8.128 Wh per hari masuk sebagai pengisian baterai dan kelebihan yang dibuang melalui dump load mikrohidro setelah baterai mencapai SoC penuh. Gambar 4 mempertegas bahwa pada seluruh hari pengujian, baik keluaran PLTS maupun mikrohidro masing-masing telah melampaui kebutuhan beban harian (garis merah), kecuali PLTS pada hari

ketiga (berawan) dan kelima (hujan ringan). Pada kondisi tersebut, kekurangan PLTS sepenuhnya dikompensasi oleh mikrohidro, sehingga sistem secara keseluruhan tetap surplus.

Profil SoC baterai selama 14 hari pengujian terlihat stabil pada rentang 62–95% dengan rata-rata 78%, sebagaimana terlihat pada Gambar 5. Tidak terjadi peristiwa SoC turun di bawah 50%, yang berarti baterai tidak pernah mengalami pengosongan dalam (deep discharge) selama masa uji. Hal ini sangat penting karena Rahardja (2018) memperingatkan bahwa baterai VRLA yang sering bekerja di bawah DoD 50% mengalami

penurunan kapasitas hingga 30% setelah 500 siklus, sehingga mempertahankan SoC pada zona

aman menjadi indikator keberhasilan logika kendali sistem.



Gambar 5 Profil State of Charge (SoC) Baterai Selama 14 Hari Pengujian

Sumber: Rekaman data logger ESP32 (2026)

Stabilitas tegangan beban juga terjaga pada rentang 23,4–25,6 V dengan standar deviasi 0,42 V, masih dalam toleransi tegangan kerja LED PJU 24 V (rentang $\pm 10\%$) sesuai SNI 7391:2008 (Standar Nasional Indonesia, 2008). Tampak visual lampu pun tidak menunjukkan kedip atau perubahan intensitas yang mencolok antar waktu, sebagaimana dikonfirmasi oleh dokumentasi malam hari pada hari kedelapan dan kesepuluh pengujian. Hasil ini sejalan dengan temuan Saputra dkk. (2022) yang melaporkan standar deviasi tegangan 0,38 V pada sistem hybrid PLTS–mikrohidro 1 kW di Sumatera Barat.

5. Respons Sistem Kendali dan Proteksi

Bagian penting yang menjadi pembeda kelayakan sistem hybrid bukan hanya kemampuan membangkitkan energi, tetapi juga ketangguhannya saat menghadapi gangguan (Hasibuan, 2021). Empat skenario gangguan diuji secara berurutan dengan jeda 30 menit antar uji, agar sistem sempat kembali ke kondisi normal sebelum skenario berikutnya. Hasil uji disajikan pada Tabel 6. Waktu yang tercatat adalah selisih antara munculnya gangguan dan beroperasinya alat proteksi yang relevan, diukur menggunakan

oscilloscope DSO138 dengan resolusi 1 ms (Sasmita, 2022).

Tabel 6 Respons Sistem Proteksi pada Empat Skenario Gangguan

Skenario Gangguan	Waktu Respons (ms)	Komponen Pengaman	Hasil
Hubung singkat sisi beban	18	Fuse 15 A + MCB DC 32 A	Beban terisolasi, tidak ada kerusakan
Beban lebih 150%	142	MCB DC 32 A trip	Pemutusan beban, sumber tetap aman
Tegangan lebih dari mikrohidro	67	SPD + dump load aktif	Tegangan kembali ke 24,1 V
Pemutusan satu sumber (PLTS)	320	Logika kendali + baterai	Mikrohidro & baterai mengambil alih

Sumber: Pengujian gangguan terkendali (2026)

Seluruh skenario berhasil ditangani tanpa kerusakan komponen. Pada skenario hubung singkat, fuse 15 A bertindak sebagai pengaman lini pertama dengan waktu respons 18 ms, jauh lebih cepat dibanding MCB DC yang baru trip pada 25 ms (Salim dkk., 2023). Pada skenario pemutusan satu sumber, tegangan beban sempat turun ke 22,8 V selama 0,3 detik sebelum kembali ke 24,1 V; secara visual penurunan singkat ini tidak menimbulkan kedip yang dapat diamati pada lampu LED. Hal tersebut menunjukkan bahwa baterai berperan efektif sebagai buffer selama transisi sumber, sekaligus memvalidasi sizing baterai yang dipilih meski berada di bawah perhitungan teoretis awal (Patel, 2006).

6. Kelayakan Sistem untuk PJU di Kelurahan Taratara

Dengan total suplai energi rata-rata 10,27 kWh per hari, sistem yang dirancang mampu memenuhi sekitar 478% dari kebutuhan beban PJU 2,16 kWh per hari. Cadangan yang besar memberi ruang bagi penambahan titik lampu di masa mendatang, atau pemanfaatan untuk beban kecil lain di sepanjang jalur kebun, misalnya pengisian power bank petani atau pompa air kapasitas kecil (Pranata & Wibisono, 2020). Dari sisi teknis, sistem layak diterapkan dan masih memiliki ruang ekspansi.

Dari sisi ekonomi, biaya investasi awal sistem hybrid memang lebih tinggi dibandingkan jaringan PJU konvensional. Namun pada lokasi seperti Taratara yang berjarak cukup

jauh dari trafo distribusi terdekat, biaya pembangunan jaringan baru beserta tiang distribusi dapat melampaui biaya hybrid (Setiawan & Yuliana, 2021). Selain itu, biaya operasional bulanan sistem hybrid praktis nol karena tidak ada konsumsi energi dari PLN, hanya pemeliharaan ringan seperti pembersihan panel dan saringan saluran air (Yusuf & Hartono, 2020). Estimasi Levelized Cost of Energy (LCOE) untuk konfigurasi serupa berada di kisaran Rp 2.800–3.500/kWh (Setiawan & Yuliana, 2021), masih kompetitif dibanding biaya investasi jaringan PLN baru pada area terpencil yang dapat melampaui Rp 200 juta per kilometer (Kementerian ESDM, 2022).

Secara sosial, kehadiran PJU pada jalur kebun memberi rasa aman bagi petani yang pulang malam atau berangkat dini hari. Wawancara singkat dengan beberapa petani lokal mengindikasikan bahwa keberadaan lampu, walaupun hanya enam titik, sudah cukup untuk menerangi jalur utama keluar-masuk kebun, serta memberi rasa nyaman bagi anggota keluarga yang menemani membawa hasil panen ke titik kumpul. Persepsi positif sejenis juga ditemukan pada studi penerapan PJU tenaga surya di area perkebunan oleh Yusuf dan

Hartono (2020), di mana 87% responden petani menyatakan merasa lebih aman setelah lampu terpasang.

D. Kesimpulan

Berdasarkan rangkaian perancangan, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan dapat ditarik. Pertama, sistem pembangkit hybrid PLTS–mikrohidro skala kecil berkapasitas 500 W berhasil dirancang dan dioperasikan untuk memasok PJU di Kelurahan Taratara. Kedua, subsistem PLTS rata-rata menghasilkan 1,92 kWh per hari dengan efisiensi 14,76%, sedangkan mikrohidro 8,71 kWh per hari dengan efisiensi 40,66%, sehingga total suplai harian mencapai 10,27 kWh atau setara 4,7 kali kebutuhan beban. Ketiga, sistem kendali dan proteksi mampu menjaga SoC baterai pada rentang 62–95% serta merespons keempat skenario gangguan tanpa kerusakan komponen, dengan waktu respons antara 18 hingga 320 ms. Keempat, sistem dinyatakan layak diterapkan sebagai solusi PJU mandiri pada area pertanian terpencil di Sulawesi Utara.

Sebagai saran, penelitian lanjutan dapat difokuskan pada penambahan governor elektronik untuk mikrohidro

guna meningkatkan stabilitas frekuensi (Tampubolon & Sumual, 2023), integrasi sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) agar petani atau pengelola dapat memantau kondisi sistem secara jarak jauh (Sasmita, 2022), evaluasi kinerja jangka panjang minimal satu tahun guna menangkap dinamika musim kemarau dan musim hujan secara penuh, serta studi keekonomian yang lebih rinci dengan memasukkan faktor depresiasi dan biaya pemeliharaan jangka panjang (Setiawan & Yuliana, 2021).

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, M., & Wahyudi, T. (2020). Karakteristik turbin crossflow skala mikro pada head 6–8 meter di Lombok. *Jurnal Energi dan Teknik Mesin*, 8(2), 145–154.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2023). *Buletin iklim Sulawesi Utara periode 2022–2023*. Manado: BMKG Stasiun Klimatologi Manado.
- Badan Pusat Statistik Kota Tomohon. (2023). *Kota Tomohon dalam angka 2023*. Tomohon: BPS Kota Tomohon.
- Hasibuan, R. (2021). Analisis sistem proteksi pada pembangkit tenaga hybrid skala kecil. *Jurnal Teknik Tenaga Listrik*, 10(1), 33–42.
- Hidayat, A., & Pratama, R. (2022). Analisis efisiensi panel surya monokristalin pada wilayah tropis. *Jurnal Teknik Elektro*, 14(2), 121–130.
- International Electrotechnical Commission. (2017). *IEC 61724-1:2017 Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring*. Geneva: IEC.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022). *Laporan kinerja Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan tahun 2022*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Kunaifi, K., & Reinders, A. (2019). Hybrid renewable energy systems for rural electrification in Indonesia. *Energies*, 12(5), 904–919.
- Mulyono, A. (2019). Perancangan charge controller MPPT untuk PLTS skala kecil berbasis mikrokontroler. *Jurnal Elektro Indonesia*, 6(2), 77–86.
- Patel, M. R. (2006). *Wind and solar power systems: Design, analysis, and operation* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Pranata, I. K., & Wibisono, A. (2020). Implementasi sistem hybrid PLTS–mikrohidro pada wilayah perdesaan di Bali. *Jurnal Teknik Elektro Udayana*, 7(3), 211–220.
- Putra, D. A., Sari, M., & Hakim, L. (2020). Sistem proteksi pada pembangkit hybrid PLTS–

- mikrohidro. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, 7(1), 45–54.
- Rahardja, S. (2018). Studi performa baterai VRLA pada sistem PLTS off-grid. *Jurnal Riset Teknik Elektro*, 5(2), 99–108.
- Salim, F., Anwar, M., & Dewi, K. (2023). Optimasi MPPT charge controller pada sistem hybrid PLTS dan mikrohidro. *Jurnal Sains Energi*, 11(1), 23–34.
- Saputra, R., Hartanto, B., & Lestari, P. (2022). Studi sistem hybrid PLTS–mikrohidro 1 kW pada area perdesaan Sumatera Barat. *Jurnal Teknologi Energi Terbarukan*, 4(2), 88–97.
- Sasmita, A. (2022). Sistem akuisisi data berbasis ESP32 untuk pemantauan PLTS. *Jurnal Otomasi dan Kontrol*, 9(1), 55–64.
- Setiawan, B., & Yuliana, T. (2021). Kelayakan ekonomi sistem hybrid off-grid pada daerah terpencil di Indonesia bagian timur. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 9(3), 200–208.
- Standar Nasional Indonesia. (2008). *SNI 7391:2008 Spesifikasi penerangan jalan di kawasan perkotaan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Sugiyono. (2019). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Tampubolon, J., & Sumual, F. (2023). Potensi mikrohidro di Sulawesi Utara untuk elektrifikasi pedesaan. *Jurnal Sains dan Teknologi Sulut*, 5(1), 12–22.
- Wibowo, S., Andriani, R., & Pradana, F. (2021). Karakteristik turbin crossflow skala mikro pada head rendah. *Jurnal Teknik Mesin*, 11(4), 312–321.
- Wuwung, J. (2021). Pemetaan potensi energi surya di Sulawesi Utara berdasarkan data BMKG. *Jurnal Penelitian Energi*, 8(2), 88–97.
- Yusuf, M., & Hartono, B. (2020). Implementasi sistem PJU tenaga surya pada area perkebunan. *Jurnal Rekayasa Energi*, 4(2), 55–64.