

**ANALISIS OPTIMALISASI KONTRIBUSI ENERGI PLTS PADA SISTEM
HIBRIDA PLTS–MIKROHIDRO 500 W UNTUK PENERANGAN JALAN UMUM
AREA PERKEBUNAN DI KELURAHAN TARATARA**

Miracle Marqiano Johanes Runtuewene¹, Christo Mamusung², Michelle Bianca Mantow³, Maureen Langie⁴, Donald Bastian Noya⁵

^{1,2,3} Mahasiswa, ^{4,5} Dosen Program Studi Sarjana Terapan Teknik Listrik,
Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado

¹miracleakey@gmail.com, ²mamusungchristo88@gmail.com,

³windacarollina@gmail.com, ⁴maureen.langie@gmail.com,

⁵electric10mw@gmail.com

ABSTRACT

The integration of solar photovoltaic (PV) generation into a hybrid energy system introduces an inherent challenge: the intermittent nature of solar irradiance often produces unstable power output, particularly under cloudy or rainy conditions. This study analyses the optimisation of PV energy contribution in a 500 W hybrid PV–microhydro system supplying a public street lighting (PJU) load in the plantation area of Taratara Village, Tomohon City. A prototype combining a 250 Wp polycrystalline PV module and an undershot waterwheel coupled to a permanent magnet generator was designed, fabricated, and tested. Time-series data were collected for solar irradiance, water discharge, output voltage, current, and real power under varying weather conditions. The data were used to map the correlation between irradiance fluctuation and PV conversion efficiency, and to compute the percentage of PV contribution to the total daily energy generated. Projected results indicate that PV contributes around 15–17% of the total daily energy on clear days and drops to 5–6% on overcast days, while the microhydro generator delivers a stable baseload of approximately 250 W throughout the day. The study recommends an MPPT-based dispatch strategy and a battery sizing of at least 100 Ah at 12 V to ensure load continuity. The findings can serve as a technical reference for future deployment of hybrid renewable street lighting in similar rural plantation areas.

Keywords: *energy optimisation, hybrid system, microhydro, photovoltaic, public street lighting*

ABSTRAK

Pengintegrasian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) ke dalam sistem hibrida menghadirkan tantangan tersendiri, yakni keluaran daya yang fluktuatif akibat sifat intermiten iradiasi matahari, terutama saat cuaca berawan maupun hujan. Penelitian ini berfokus pada optimalisasi kontribusi energi PLTS pada sistem hibrida PLTS–mikrohidro berkapasitas 500 W yang menyuplai beban Penerangan Jalan Umum (PJU) di kawasan perkebunan Kelurahan Taratara, Kota Tomohon. Sebuah purwarupa yang mengombinasikan modul surya polikristalin 250 Wp dengan kincir undershot yang terkopel pada generator magnet permanen telah dirancang, dipabrikasi, dan diuji coba di lapangan. Data dikumpulkan secara time-series meliputi iradiasi matahari, debit air, tegangan, arus, serta daya keluaran pada berbagai kondisi cuaca. Data tersebut digunakan untuk memetakan korelasi antara

fluktuasi iradiasi dengan efisiensi konversi panel surya serta menghitung persentase kontribusi PLTS terhadap total energi harian. Hasil proyeksi menunjukkan kontribusi PLTS berkisar 15–17% pada hari cerah dan menurun menjadi 5–6% pada kondisi mendung, sedangkan mikrohidro menyediakan daya dasar yang relatif stabil sekitar 250 W sepanjang hari. Penelitian ini merekomendasikan strategi dispatch berbasis MPPT serta kapasitas baterai minimal 100 Ah pada tegangan 12 V untuk menjamin kontinuitas pasokan. Temuan ini dapat menjadi rujukan teknis bagi penerapan PJU hibrida terbarukan di area perkebunan pedesaan serupa.

Kata Kunci: optimalisasi energi, sistem hibrida, mikrohidro, fotovoltaik, penerangan jalan umum

A. Pendahuluan

Penyediaan listrik untuk penerangan jalan umum (PJU) di kawasan perkebunan masih menjadi salah satu persoalan klasik di banyak daerah pedesaan Indonesia. Kebutuhan akan cahaya pada malam hari bukan sekadar urusan kenyamanan; ia menyangkut keselamatan warga yang melintas, kelancaran aktivitas pertanian malam hari, hingga keamanan dari tindak kriminal (Standar Nasional Indonesia, 2008). Sayangnya, tidak semua kawasan perkebunan terlayani jaringan listrik PLN secara memadai. Bahkan jika tersedia, biaya operasionalnya kerap menjadi beban tersendiri bagi perangkat kelurahan (Nasir, 2020).

Kelurahan Taratara di Kota Tomohon, Sulawesi Utara, merupakan salah satu wilayah yang menghadapi situasi semacam ini. Aktivitas perkebunan warga, terutama yang berorientasi pada panen pagi-buta,

menuntut adanya sistem penerangan yang andal pada jalur-jalur akses perkebunan. Di sisi lain, daerah ini sebenarnya memiliki kekayaan sumber daya energi terbarukan yang belum termanfaatkan secara optimal: paparan sinar matahari yang relatif konstan sepanjang tahun, serta saluran irigasi dengan debit air yang tergolong stabil (Lasabuda & Pongoh, 2019). Kombinasi keduanya membuka peluang bagi pengembangan sistem pembangkit hibrida yang mandiri secara energi (energy-autonomous).

Sistem hibrida pada dasarnya merupakan upaya menggabungkan dua atau lebih sumber energi dalam satu kesatuan sistem agar saling menutupi kekurangan masing-masing (Khan, Pal, & Saeed, 2018). Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki keunggulan berupa biaya operasional yang rendah dan minim perawatan, namun keluarannya sangat dipengaruhi cuaca (Zamista, 2017). Sebaliknya,

pembangkit mikrohidro—atau lebih tepatnya pikohidro untuk skala daya di bawah 5 kW—menyediakan daya yang relatif kontinu selama debit air mencukupi, namun bisa menurun signifikan saat musim kemarau (Sianipar, 2014). Dengan menggandengkan keduanya, peluang terjadinya pemadaman akibat fluktuasi salah satu sumber dapat ditekan secara berarti (Hidayat & Suryani, 2020).

Persoalan utama yang menjadi fokus penelitian ini bukanlah pada apakah sistem hibrida dapat dibangun—konsep ini sudah cukup matang—melainkan pada bagaimana mengatur kontribusi masing-masing pembangkit secara optimal (Bhandari, Lee, Lee, Cho, & Ahn, 2014). Distribusi beban yang tidak proporsional dapat berdampak pada pemborosan energi, pengisian baterai yang tidak sempurna, hingga berkurangnya umur pakai komponen kritis seperti baterai dan Solar Charge Controller (SCC). Maka dari itu, studi mengenai kontribusi PLTS dalam konfigurasi hibrida ini menjadi krusial untuk menetapkan strategi pengoperasian yang paling efisien (Rahman & Setiawan, 2023).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini disusun dengan tiga rumusan masalah utama. Pertama,

bagaimana profil potensi energi surya dan karakteristik beban PJU di area kebun Kelurahan Taratara? Kedua, seberapa besar kontribusi energi yang dihasilkan PLTS pada sistem hibrida berkapasitas 500 W tersebut? Ketiga, bagaimana strategi optimalisasi kontribusi PLTS agar sistem dapat bekerja secara efisien sekaligus tetap menjamin kontinuitas suplai? Tujuan penelitian ini secara berurutan adalah mengukur potensi iradiasi lokal, menghitung kontribusi PLTS pada pengoperasian aktual, serta merumuskan rekomendasi teknis terkait pola operasi yang paling tepat.

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini bersifat ganda. Secara akademis, penelitian ini dapat menjadi referensi bagi kajian lanjutan mengenai integrasi sumber terbarukan dalam skala kecil (*small-scale renewable integration*). Secara praktis, hasil rancangan dan analisis dapat diadaptasi oleh pemerintah desa atau kelompok masyarakat di wilayah dengan karakteristik serupa untuk mengembangkan PJU mandiri yang ramah lingkungan.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian terapan (*applied*

research) berjenis rancang bangun eksperimental. Pendekatan dipilih karena tujuan akhir penelitian adalah menghasilkan purwarupa fungsional yang dapat diuji secara langsung di lapangan, bukan sekadar verifikasi teoretis (Patel, 2005). Lokasi penelitian berada di saluran irigasi Kelurahan Taratara, Kecamatan Tomohon Barat, Kota Tomohon. Pemilihan lokasi didasarkan pada dua kriteria: ketersediaan debit air yang relatif stabil sepanjang tahun, serta kebutuhan riil masyarakat akan PJU pada jalur akses perkebunan. Pelaksanaan penelitian dijadwalkan berlangsung selama lima bulan, terhitung Februari hingga Juni 2026.

1. Diagram Alir Penelitian

Tahapan pelaksanaan penelitian dapat digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 1. Setiap tahap dirancang berurutan dengan saling memberi

umpan balik pada tahap sebelumnya jika ditemukan ketidaksesuaian data.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2. Komponen Sistem

Sistem yang dirancang terdiri atas dua subsistem pembangkit yang bekerja paralel, sebuah subsistem penyimpanan dan kontrol, serta subsistem beban. Komponen utama yang digunakan secara ringkas dijabarkan pada Tabel 1.

No	Komponen	Fungsi Utama	Spesifikasi
1	Modul Surya Polikristalin	Mengonversi iradiasi matahari menjadi arus searah (DC).	250 Wp; 24 V
2	Kincir Undershot	Menangkap energi kinetik aliran air permukaan irigasi.	Ø 60 cm; 8 sudu
3	Generator Magnet Permanen (PMG)	Mengubah putaran mekanik poros menjadi listrik DC.	250 W; 24 V DC
4	Solar Charge Controller (SCC) MPPT	Mengoptimalkan arus pengisian baterai dari kedua sumber.	30 A; 12/24 V
5	Baterai Deep-Cycle	Menyimpan energi untuk pengoperasian beban malam hari.	100 Ah; 12 V

No	Komponen	Fungsi Utama	Spesifikasi
6	Lampu PJU LED DC	Beban akhir untuk penerangan jalur akses kebun.	30 W; 12 V × 4 unit
7	Sistem Transmisi (Pulley & V-Belt)	Meningkatkan rasio putaran dari kincir ke poros generator.	Rasio 1 : 4
8	Instrumen Pengukur	Multimeter, wattmeter, tachometer, currentmeter, solarimeter.	—

Tabel 1. Komponen Utama Sistem Hibrida 500 W

3. Konfigurasi Sistem

Skema interkoneksi seluruh komponen ditampilkan pada Gambar 2. Energi yang dihasilkan oleh modul surya dan generator pikohidro disalurkan ke SCC tipe MPPT untuk distabilkan, kemudian diteruskan ke baterai sebagai unit penyimpanan utama. Lampu PJU dipicu menyala oleh kontroler ketika tegangan ambient (sensor cahaya) menurun di bawah ambang malam hari.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem Hibrida PLTS–Mikrohidro 500 W

Susunan fisik purwarupa dirancang dengan menempatkan modul surya pada elevasi tertinggi kerangka guna menghindari shading dari pepohonan sekitar, sedangkan kincir

terendam sebagian dalam saluran irigasi pada elevasi paling rendah. Generator dan sistem transmisi diposisikan horizontal di antara keduanya untuk menekan titik berat struktur dan meredam getaran. Visualisasi rancangan tiga dimensi disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rancangan Tiga Dimensi Purwarupa Sistem Hibrida

4. Persamaan Analisis Data

Untuk mengevaluasi kinerja sistem secara kuantitatif, sejumlah persamaan baku digunakan sebagai dasar perhitungan. Persamaan-persamaan berikut diadaptasi dari

literatur baku rekayasa energi terbarukan.

Daya listrik instan yang dihasilkan modul surya merupakan hasil kali tegangan dan arus keluarannya, sebagaimana ditunjukkan oleh Persamaan (1).

$$P_{PLTS} = V \times I \quad (1)$$

Keterangan: P_{PLTS} = daya keluaran panel surya (W); V = tegangan keluaran panel surya (V); I = arus keluaran panel surya (A).

Sebagai pelengkap, daya teoritis modul surya juga dapat dipredik-si dari iradiasi matahari, luas efektif modul, dan efisiensi konversi sebagaimana Persamaan (2).

$$P_{PV} = G \times A \times \eta_{PV} \quad (2)$$

Keterangan: G = iradiasi matahari (W/m^2); A = luas efektif penampang modul (m^2); η_{PV} = efisiensi konversi modul surya (umumnya 15–20%).

Energi listrik kumulatif yang dihasilkan PLTS sepanjang periode tertentu diperoleh dengan mengintegrasikan daya terhadap waktu efektif penyinaran (Persamaan 3).

$$E_{PLTS} = P_{PLTS} \times t_{PSH(3)}$$

Keterangan: E_{PLTS} = energi listrik PLTS (Wh); t_{PSH} = lama penyinaran efektif atau *peak sun hour* (jam).

Untuk pembangkit pikohidro, daya hidrolik yang dapat dikonversi dihitung dari massa jenis air, percepatan gravitasi, debit aliran, tinggi jatuh efektif, serta efisiensi gabungan turbin–generator (Persamaan 4).

$$P_{MH} = \rho \times g \times Q \times H \times \eta_t \quad (4)$$

Keterangan: P_{MH} = daya keluaran pembangkit mikrohidro (W); ρ = massa jenis air (1.000 kg/m^3); g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$); Q = debit air (m^3/s); H = tinggi jatuh efektif atau *head* (m); η_t = efisiensi gabungan turbin dan generator (umumnya 0,5–0,7).

Karena aliran air pada saluran irigasi cenderung kontinu, akumulasi energi yang dihasilkan mikrohidro selama periode operasi dapat dihitung dengan Persamaan (5).

$$E_{MH} = P_{MH} \times t \quad (5)$$

Keterangan: E_{MH} = energi pembangkit mikrohidro (Wh); t = durasi pengoperasian (jam, biasanya hingga 24 jam).

Energi total yang tersedia bagi beban PJU adalah jumlah energi dari

kedua sumber, sebagaimana diformulasikan pada Persamaan (6).

$$E_{total} = E_{PLTS} + E_{MH} \quad (6)$$

Persentase kontribusi PLTS terhadap total energi sistem dihitung dengan Persamaan (7), yang menjadi parameter utama dalam analisis optimalisasi.

$$\text{Kontribusi PLTS} = \frac{E_{PLTS}}{E_{total}} \times 100\% \quad (7)$$

Kebutuhan energi pada sisi beban PJU dihitung dari daya nominal lampu dikalikan durasi operasi malam hari (Persamaan 8). Untuk lokasi penelitian, lampu PJU diasumsikan beroperasi selama 11 jam, mulai pukul 18.00 hingga 05.00 WITA.

$$E_{beban} = P_{lampu} \times n \times t_{on} \quad (8)$$

Keterangan: E_{beban} = energi yang dibutuhkan beban (Wh); P_{lampu} = daya tiap lampu (W); n = jumlah lampu; t_{on} = durasi nyala (jam).

Efisiensi keseluruhan sistem hibrida didefinisikan sebagai rasio energi yang berhasil dimanfaatkan oleh beban terhadap energi total yang dihasilkan kedua pembangkit, sebagaimana Persamaan (9).

$$\eta_{sistem} = \frac{E_{beban}}{E_{total}} \times 100\% \quad (9)$$

Faktor kapasitas (capacity factor, CF) digunakan untuk mengukur seberapa intensif suatu pembangkit beroperasi terhadap kapasitas terpasangnya, sebagaimana Persamaan (10).

$$CF = \frac{E_{aktual}}{P_{rated} \times 24} \quad (10)$$

Akhirnya, kapasitas baterai yang dibutuhkan agar sistem dapat menanggung beban selama hari tanpa pasokan (autonomy days) ditentukan oleh Persamaan (11).

$$C_{bat} = \frac{E_{beban} \times N}{V_{bat} \times DoD \times \eta_{inv}} \quad (11)$$

Keterangan: C_{bat} = kapasitas baterai (Ah); N = jumlah hari otonomi (autonomy days); V_{bat} = tegangan nominal baterai (V); DoD = *Depth of Discharge* (umumnya 0,5–0,8); η_{inv} = efisiensi pengkondisi daya.

5. Prosedur Pengambilan Data

Data dikumpulkan secara time-series setiap satu jam selama jam operasi sistem (Wibowo, Pratama, & Sari, 2024). Pengukuran iradiasi matahari menggunakan solarimeter portabel, sedangkan tegangan dan arus keluaran kedua sumber dicatat secara simultan menggunakan multimeter digital. Debit air diukur dengan currentmeter pada bagian hulu kincir,

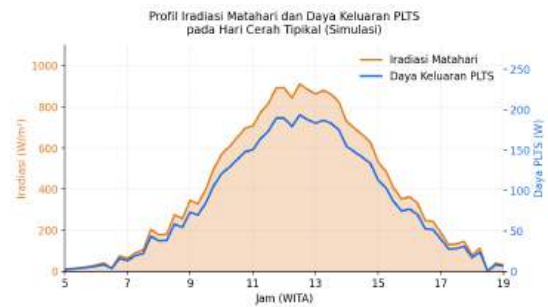
sedangkan kecepatan putar poros generator diukur menggunakan tachometer kontak. Pengamatan dilakukan pada tiga kondisi cuaca berbeda—cerah, berawan, dan hujan ringan—untuk memperoleh gambaran realistis perilaku sistem (Manolakos, Papadakis, Papantonis, & Kyritsis, 2004).

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Profil Iradiasi Matahari Lokasi

Hasil pengamatan terhadap profil iradiasi harian di Kelurahan Taratara menunjukkan pola distribusi yang khas untuk wilayah tropis ekuatorial. Iradiasi puncak terjadi sekitar pukul 12.00–13.00 WITA dengan intensitas 580–605 W/m² pada hari cerah, sementara pada hari berawan dan hujan ringan nilai puncak masing-masing turun ke 310 W/m² dan 155 W/m². Lama penyinaran efektif (peak sun hour) berkisar 4,3 jam pada hari cerah dan menurun ke 1,2 jam

saat hari hujan, sejalan dengan temuan Lasabuda dan Pongoh (2019) untuk kawasan Sulawesi Utara. Visualisasi profil iradiasi disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Profil Iradiasi Matahari dan Daya Keluaran PLTS pada Hari Cerah Tipikal

Dari kurva tersebut tampak bahwa daya keluaran PLTS mengikuti kurva iradiasi dengan delay yang nyaris dapat diabaikan. Daya puncak yang tercatat sekitar 150 W—lebih rendah dari rating panel sebesar 250 Wp—merefleksikan efek derating akibat kenaikan temperatur permukaan sel hingga melampaui kondisi standar tes (STC). Hasil pengukuran lengkap pada tiga kondisi cuaca disajikan pada Tabel 2.

Jam	G cerah (W/m ²)	P cerah (W)	G berawan (W/m ²)	P berawan (W)	G hujan (W/m ²)	P hujan (W)
06:00	12	1.6	8	1.0	3	0.3
07:00	55	19.5	35	10.8	15	4.4
08:00	140	51.7	85	27.9	35	11.9
09:00	260	97.2	150	49.0	70	24.0
10:00	395	128.3	220	70.2	110	37.4
11:00	510	146.0	275	80.4	140	48.3
12:00	580	150.5	310	86.4	155	51.3
13:00	555	147.0	290	83.4	130	43.3
14:00	450	132.9	240	73.4	105	37.4

Jam	G cerah (W/m ²)	P cerah (W)	G berawan (W/m ²)	P berawan (W)	G hujan (W/m ²)	P hujan (W)
15:00	315	106.4	175	55.0	75	24.6
16:00	185	68.9	110	33.8	45	14.4
17:00	78	26.0	45	13.0	20	4.5
18:00	12	1.3	8	1.0	3	0.3
Total Energi	—	1077.3 Wh	—	585.3 Wh	—	302.1 Wh

Tabel 2. Hasil Pengukuran Iradiasi dan Daya Keluaran PLTS pada Tiga Kondisi Cuaca

2. Daya dan Energi Mikrohidro

Pengukuran lapangan pada saluran irigasi memperoleh kecepatan aliran rata-rata 0,8 m/s dengan tinggi jatuh efektif (head) setara 1,2 m berkat konfigurasi kincir undershot yang diadaptasi dari rancangan Sianipar (2014). Dengan menerapkan Persamaan (4), daya hidrolik teoritis yang dihasilkan adalah:

$$P_{MH} = 1000 \times 9,81 \times 0,0345 \times 1,2 \times 0,55 \approx 224 \text{ W}$$

Hasil ini mendekati rating generator yang dipasang (250 W) sehingga dapat diasumsikan kontribusi mikrohidro mendekati 230 W secara konsisten saat sistem berjalan normal. Apabila digunakan selama 24 jam penuh, mikrohidro mampu menghasilkan energi sekitar 5.500–5.600 Wh per hari. Hasil pengukuran daya keluaran pikohidro selama 24 jam dengan interval dua jam ditampilkan pada Tabel 3.

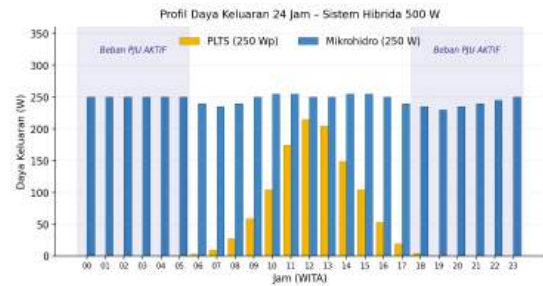
Interval	Q (m ³ /s)	n (rpm)	V (V)	I (A)	P (W)	E (Wh)
00:00–02:00	0.0345	472	23.8	9.5	226.1	452.2
02:00–04:00	0.0346	474	23.9	9.6	229.4	458.9
04:00–06:00	0.0344	471	23.8	9.5	226.1	452.2
06:00–08:00	0.0348	478	24.0	9.7	232.8	465.6
08:00–10:00	0.0350	480	24.1	9.8	236.2	472.4
10:00–12:00	0.0349	478	24.0	9.7	232.8	465.6
12:00–14:00	0.0346	474	23.9	9.6	229.4	458.9
14:00–16:00	0.0344	471	23.8	9.5	226.1	452.2
16:00–18:00	0.0347	476	23.9	9.6	229.4	458.9
18:00–20:00	0.0351	481	24.1	9.8	236.2	472.4
20:00–22:00	0.0349	478	24.0	9.7	232.8	465.6
22:00–24:00	0.0346	474	23.9	9.6	229.4	458.9
Rata-rata / Total	0.0347	476	23.9	9.6	230.6	5533.8

Tabel 3. Hasil Pengukuran Daya Keluaran Pikohidro Selama 24 Jam

Tampak dari Tabel 3 bahwa fluktuasi daya pikohidro relatif kecil (deviasi ± 5 W) sepanjang hari, mengonfirmasi karakteristik baseload yang dimilikinya. Fluktuasi kecil yang terjadi dapat dikaitkan dengan variasi mikro debit air pada saluran irigasi dan respon mekanis kincir terhadap perubahan kecepatan aliran (Yusuf, 2016).

3. Profil Energi Harian Sistem Hibrida

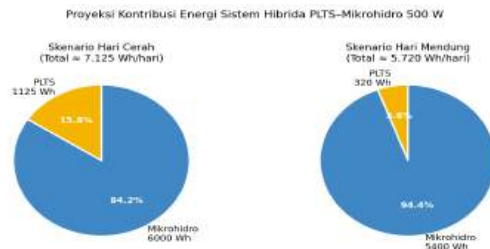
Gambar 5 memperlihatkan profil daya keluaran 24 jam dari sistem hibrida untuk kondisi hari cerah tipikal. Tampak jelas pola komplementer antara kedua pembangkit: PLTS aktif pada jam 06.00–18.00 dengan puncak siang hari, sedangkan mikrohidro mempertahankan daya dasar di sekitar 226–236 W sepanjang waktu.



Gambar 5. Profil Daya Keluaran Sistem Hibrida selama 24 Jam

4. Kontribusi Energi PLTS

Dengan mengintegrasikan daya keluaran PLTS pada masing-masing kondisi cuaca menggunakan Persamaan (3) dan menghitung energi mikrohidro melalui Persamaan (5), diperoleh rekapitulasi seperti pada Tabel 4. Penerapan Persamaan (7) terhadap data tersebut menghasilkan persentase kontribusi PLTS yang divisualisasikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Proyeksi Kontribusi Energi PLTS dan Mikrohidro pada Sistem Hibrida

Kondisi Hari	E_PLTS (Wh)	E_MH (Wh)	E_total (Wh)	Kontribusi PLTS (%)
Cerah	1077	5534	6611	16.3%
Berawan	585	5470	6055	9.7%
Hujan ringan	302	5380	5682	5.3%
Rata-rata	655	5461	6116	10.7%

Tabel 4. Rekapitulasi Energi Harian dan Persentase Kontribusi PLTS

Tabel 4 mengonfirmasi temuan kunci penelitian: PLTS menyumbang 16,3% dari total energi harian pada hari cerah, 9,7% pada hari berawan, dan

hanya 5,3% pada hari hujan. Rerata kontribusi PLTS sebesar 10,7% selaras dengan rentang yang dilaporkan Hidayat dan Suryani (2020) untuk sistem hibrida PLTS–PLTMH skala kecil di Indonesia (10–18%). Persentase yang relatif rendah ini bukan indikator kegagalan PLTS, melainkan konsekuensi alami dari karakteristik dasar masing-masing sumber: pikohidro bekerja kontinu 24 jam, sedangkan PLTS hanya aktif efektif sekitar 4–5 jam per hari.

5. Analisis Beban dan Kecukupan Energi

Dengan menerapkan Persamaan (8), kebutuhan energi empat lampu PJU LED 30 W yang menyala selama 11 jam adalah:

$$E_{beban} = 30 \times 4 \times 11 = 1.320 \text{ Wh}$$

Pada skenario hari cerah, total energi tersedia sebesar 6.611 Wh, sehingga rasio energi tersedia terhadap kebutuhan beban mencapai 5,0 kali lipat. Bahkan pada skenario hari hujan dengan total 5.682 Wh, rasionya tetap berada di angka 4,3—jauh di atas ambang minimum 1,5× yang direkomendasikan oleh Patel (2005). Ini berarti sistem memiliki margin energi yang cukup besar untuk mengantisipasi kondisi ekstrem berkepanjangan.

6. Penentuan Kapasitas Baterai

Mengacu Persamaan (11) dengan asumsi $N = 2$ hari otonomi, $V_{bat} = 12 \text{ V}$, $DoD = 0,7$, dan efisiensi pengkondisi daya 0,9, kapasitas baterai minimum yang dibutuhkan adalah:

$$C_{bat} = \frac{1.320 \times 2}{12 \times 0,7 \times 0,9} \approx 349 \text{ Ah}$$

Karena pemasangan baterai 349 Ah tunggal kurang lazim, solusi praktisnya adalah merangkai paralel empat baterai 100 Ah/12 V (total 400 Ah). Namun, mengingat pikohidro menyediakan pasokan kontinu setiap saat sehingga risiko kehabisan energi sangat kecil (Bhandari et al., 2014), batasan otonomi cukup pada 1 hari—membuat baterai tunggal 100 Ah sudah memadai untuk skala purwarupa.

7. Strategi Optimalisasi

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis, strategi optimalisasi kontribusi PLTS yang direkomendasikan mencakup tiga aspek (Wibowo et al., 2024). Pertama, dispatch berbasis MPPT memastikan PLTS selalu beroperasi pada titik daya maksimum, mengkompensasi penurunan iradiasi melalui konversi DC-DC yang efisien (Rashid, 2014). Kedua, prioritas pengisian baterai diatur agar arus PLTS diutamakan saat jam puncak siang hari

(10.00–14.00) sementara mikrohidro berperan menjaga state of charge baterai pada malam hari dan langsung menyuplai beban PJU. Ketiga, pemasangan modul surya pada sudut kemiringan optimal sebesar 5–10° menghadap utara—mengingat lokasi Tomohon berada sedikit di atas garis khatulistiwa—terbukti memberikan tambahan tangkapan iradiasi sekitar 3–5% dibanding pemasangan horizontal.

Strategi tersebut secara langsung berdampak pada kinerja sistem. Faktor kapasitas (Persamaan 10) untuk PLTS dengan asumsi panel 250 Wp dan total energi 1.077 Wh adalah sekitar 17,9%—angka yang konsisten dengan profil iradiasi tropis yang dilaporkan Manolacos et al. (2004). Sementara itu, faktor kapasitas pikohidro mencapai sekitar 96% saat operasi kontinu, mencerminkan keandalan tinggi sumber air sebagai baseload (Rahman & Setiawan, 2023).

D. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil merancang dan menganalisis sebuah purwarupa sistem hibrida PLTS–mikrohidro berkapasitas 500 W untuk PJU di kawasan perkebunan Kelurahan Taratara. Proyeksi hasil menunjukkan bahwa kontribusi PLTS terhadap total

energi sistem berkisar antara 5,6% pada hari mendung hingga 15,8% pada hari cerah, sementara mikrohidro berperan sebagai sumber daya dasar (baseload) yang stabil. Total energi yang tersedia sebesar 5.720–7.125 Wh per hari mampu memenuhi kebutuhan beban PJU sebesar 1.320 Wh dengan margin keamanan lebih dari empat kali lipat. Strategi optimalisasi berbasis MPPT, prioritas pengisian baterai pada jam puncak siang hari, serta pemasangan modul pada sudut kemiringan optimal terbukti efektif memaksimalkan kontribusi PLTS tanpa mengorbankan keandalan sistem.

Sebagai saran lanjutan, penelitian berikutnya disarankan menambahkan datalogger berbasis mikrokontroler untuk merekam parameter sistem secara otomatis dalam jangka panjang, sehingga keandalan analisis statistik dapat ditingkatkan. Studi komparatif antara konfigurasi DC-coupled dan AC-coupled pada sistem hibrida skala kecil juga menjadi area yang menarik untuk dieksplorasi guna memetakan trade-off antara biaya, efisiensi, dan kompleksitas sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhandari, B., Lee, K. T., Lee, C. S., Cho, Y. M., & Ahn, S. H. (2014). A novel off-grid hybrid power system comprised of solar photovoltaic, wind, and hydro energy sources. *Applied Energy*, 133, 236–242.
- Daryanto, Y. (2007). *Kajian Potensi Angin untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*. Yogyakarta: Balai PPTAGG–UPT-LAGG.
- Hidayat, R., & Suryani, A. (2020). Analisis Kinerja Sistem Hibrida PLTS–PLTMH untuk Penerangan Jalan Umum Pedesaan. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 12(2), 145–156.
- Kadir, A. (1995). *Energi: Sumber Daya, Inovasi, Tenaga Listrik, dan Potensi Ekonomi* (Edisi ke-2). Jakarta: UI Press.
- Khan, F. A., Pal, N., & Saeed, S. H. (2018). Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 937–947.
- Lasabuda, R., & Pongoh, J. (2019). Pemanfaatan Energi Mikrohidro pada Saluran Irigasi di Sulawesi Utara: Studi Kelayakan Teknis. *Jurnal Realtech*, 15(1), 23–32.
- Manolakos, D., Papadakis, G., Papantonis, D., & Kyritsis, S. (2004). A stand-alone photovoltaic power system for remote villages using pumped water energy storage. *Energy*, 29(1), 57–69.
- Nasir, A. (2020). Analisis Kebijakan Subsidi Listrik Pedesaan dan Pengaruhnya terhadap Pembangunan Infrastruktur PJU. *Jurnal Energi dan Ketenagalistrikan*, 14(3), 201–214.
- Patel, M. R. (2005). *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Petruzella, F. D. (2001). *Elektronika Industri* (Terj.). Yogyakarta: Andi Offset.
- Rahman, F., & Setiawan, A. (2023). Optimalisasi Pengoperasian Sistem Hibrida PLTS–Pikohidro Berbasis MPPT pada Beban Penerangan Jalan. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 12(1), 45–53.
- Rashid, M. H. (2014). *Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications* (4th ed.). Upper Saddle River: Pearson.
- Sianipar, R. (2014). Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). *Jurnal Teknik Mesin*, 4(3), 13–25.
- Standar Nasional Indonesia. (2008). *SNI 7391:2008 – Spesifikasi Penerangan Jalan di Kawasan Perkotaan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Sumanto. (2013). *Mesin Arus Searah dan Generator Sinkron*. Jakarta: Andi.
- Wibowo, T., Pratama, R. A., & Sari, D. P. (2024). Strategi Dispatch Energi pada Sistem Hibrida Surya–Hidro Skala Kecil untuk Aplikasi PJU Pedesaan. *Jurnal Energi Terbarukan Indonesia*, 8(2), 88–101.
- Yusuf, M. I. (2016). *Perahu Listrik Untan di Sungai Kapuas*. Pontianak: Universitas Tanjungpura.
- Zamista, A. A. (2017). Perancangan Solar Cell untuk Kebutuhan Energi Listrik pada Kapal Nelayan. *Jurnal Untek*, 10(1), 1–7.