

Kinerja pembangkit listrik tenaga surya hibrida 1 kWp pada lembaga sosial pendidikan di Singosari

Divac Nabel Akbar¹, Mohammad Noor Hidayat², Debi Satria Tri Mardani³, Ricky Dwi Saputra⁴,
Lindiasari Martha Yustika⁵

e-mail: nabel@polinema.ac.id, moh.noor@polinema.ac.id, debisatriatrimardani@gmail.com,
siricky83@gmail.com, lindiasarimartha@telkomuniversity.ac.id

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

⁵Program Studi Teknik Sistem Energi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Indonesia

⁵Center of Excellence for Sustainable Energy and Climate Change, Research Institute for Intelligent Business and Sustainable Economy, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 1 Mei 2026
Direvisi 26 Mei 2026
Diterbitkan 2 Juni 2026

Kata kunci:

efisiensi
energi
sistem hibrida
irradiasi
specific yield

Keywords:

efficiency
energy
hybrid system
irradiance
specific yield

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan energi listrik di salah satu lembaga sosial pendidikan di Singosari mendorong pengembangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sebagai sumber energi alternatif. Penelitian ini mengevaluasi kinerja PLTS hibrida skala kecil berkapasitas 1 kWp pada kondisi berbeban aktual. Sistem terdiri dari 10 modul *monocrystalline* 100 Wp dengan konfigurasi 2S5P. Evaluasi difokuskan pada sisi *array* PV sampai titik input inverter melalui pengukuran iradiasi, suhu modul, tegangan operasi, dan arus operasi selama pukul 10.00–16.00. Parameter yang dianalisis meliputi daya keluaran, efisiensi *array*, energi, *specific yield*, *performance ratio*, dan estimasi rugi performa. Hasil pengujian menunjukkan iradiasi rata-rata 796,02 W/m², suhu modul 39,51 °C, tegangan operasi 31,62 V, arus operasi 20,03 A, dan daya keluaran 651,18 W. Efisiensi rata-rata titik pengukuran sebesar 15,47%, sedangkan efisiensi berdasarkan parameter rata-rata sebesar 15,67%. Energi selama enam jam pengujian sebesar 3,91 kWh, dengan *specific yield* 3,91 kWh/kWp, *performance ratio* 81,8%, dan estimasi rugi performa 18,2%. Hasil ini menunjukkan bahwa PLTS hibrida 1 kWp dapat berkontribusi sebagai pengembangan kapasitas energi, tetapi belum dapat diklaim memenuhi seluruh kebutuhan energi harian.

ABSTRACT

The increasing electrical energy demand at a social-educational institution in Singosari encourages the development of a solar photovoltaic system as an alternative energy source. This study evaluates the performance of a small-scale 1 kWp hybrid photovoltaic system under actual loaded conditions. The system consists of ten 100 Wp monocrystalline modules arranged in a 2S5P configuration. The evaluation was limited to the PV array side up to the inverter input by measuring irradiance, module temperature, operating voltage, and operating current from 10:00 to 16:00. The analyzed parameters include output power, array efficiency, energy, specific yield, performance ratio, and estimated performance loss. The results show average irradiance of 796.02 W/m², module temperature of 39.51 °C, operating voltage of 31.62 V, operating current of 20.03 A, and output power of 651.18 W. The average measurement-point efficiency was 15.47%, while the efficiency calculated from average parameters was 15.67%. The estimated energy during six hours was 3.91 kWh, with a specific yield of 3.91 kWh/kWp, performance ratio of 81.8%, and estimated performance loss of 18.2%. These results indicate that the system can contribute as energy capacity expansion, but cannot yet be claimed to meet the entire daily energy demand.

Penulis Korespondensi:

Divac Nabel Akbar,
Jurusan Teknik Elektro,
Politeknik Negeri Malang,
Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang, Jawa Timur, Indonesia.
Email: nabel@polinema.ac.id

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi surya melalui sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) menjadi salah satu pilihan dalam pengembangan energi terbarukan di Indonesia. Penerapan PLTS atap pada bangunan rumah tangga, fasilitas pendidikan, dan fasilitas sosial dinilai relevan karena tidak membutuhkan lahan tambahan yang luas serta dapat dipasang dekat dengan pusat beban. Studi terkait penerapan PLTS atap di Indonesia menunjukkan bahwa pemanfaatan atap bangunan memiliki peluang untuk mendukung transisi energi, meskipun kinerja aktualnya tetap dipengaruhi oleh aspek teknis, konfigurasi sistem, kondisi radiasi matahari, dan karakteristik beban [1], [2], [3].

Evaluasi kinerja PLTS menjadi penting karena kapasitas terpasang atau nilai nameplate tidak selalu sama dengan daya yang diperoleh pada kondisi operasi lapangan. Daya keluaran sistem PV dipengaruhi oleh iradiasi, suhu modul, sudut pemasangan, rugi kabel, kondisi pembebanan, dan kondisi lingkungan sekitar. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kenaikan iradiasi cenderung meningkatkan arus dan daya keluaran, sedangkan kenaikan suhu modul dapat menurunkan tegangan dan efisiensi panel [4], [5]. Oleh karena itu, evaluasi berbasis data lapangan diperlukan untuk mengetahui kinerja sistem setelah dipasang dan dioperasikan.

Artikel evaluasi PLTS 1000 Wp umumnya menampilkan parameter utama seperti iradiasi, suhu modul, tegangan, arus, daya, efisiensi, dan energi kumulatif. Hidayat dkk. mengevaluasi kinerja PLTS 1000 Wp dengan mengukur parameter utama sistem PV untuk memperoleh daya, efisiensi, dan energi kumulatif [6]. Pola evaluasi tersebut sesuai dengan data penelitian ini karena sistem yang dikaji memiliki kapasitas terpasang 1 kWp dan diuji pada kondisi berbeban.

Beberapa penelitian lain juga menunjukkan bahwa evaluasi PLTS dapat dilakukan melalui pendekatan pengukuran langsung, simulasi, atau kombinasi keduanya. Evaluasi PLTS hibrida pada gedung fasilitas pendidikan menunjukkan bahwa data operasi lapangan penting untuk mengetahui kontribusi energi sistem terhadap beban [7]. Kajian PLTS atap di Polinema dan simulasi PVsyst juga menegaskan bahwa konfigurasi modul, kondisi lokasi, serta potensi radiasi matahari memengaruhi produksi energi sistem [2], [8]. Pada sistem PLTS hibrida skala kecil, keberadaan baterai dan perangkat pengelola energi ikut memengaruhi keandalan operasi sistem [9]. Studi lain pada PLTS *rooftop* dan sistem PV skala kecil juga menunjukkan bahwa konfigurasi sistem, kondisi lokasi, serta faktor operasional seperti *shading* dan karakteristik beban dapat memengaruhi performa keluaran PV [10], [11], [12].

Namun, sebagian besar kajian tersebut masih berfokus pada sistem PLTS atap, sistem *on-grid*, simulasi perencanaan, atau evaluasi performa pada gedung/institusi umum. Evaluasi PLTS hibrida skala kecil pada lembaga sosial pendidikan dengan kondisi pengujian berbeban aktual masih terbatas. Selain itu, beberapa penelitian hanya menampilkan parameter daya, efisiensi, dan energi, sedangkan indikator tambahan seperti *specific yield*, *performance ratio*, dan estimasi rugi performa belum selalu disajikan secara terpadu. Padahal, parameter tersebut dapat membantu menjelaskan perbedaan antara kapasitas terpasang dan daya aktual yang diperoleh pada kondisi operasi lapangan [13], [14].

Salah satu lembaga sosial pendidikan di Singosari telah memiliki sistem PLTS yang sebelumnya terdiri dari 6 modul 100 Wp. Kapasitas tersebut belum mencukupi kebutuhan pengembangan suplai energi sehingga dilakukan penambahan menjadi 10 modul 100 Wp atau 1 kWp. Akan tetapi, hasil perhitungan kebutuhan energi menunjukkan bahwa jumlah modul ideal untuk memenuhi seluruh kebutuhan harian mendekati 12 modul 100 Wp. Oleh karena itu, sistem 1 kWp pada penelitian ini tidak diposisikan sebagai sistem yang sepenuhnya menggantikan suplai utama, melainkan sebagai pengembangan kapasitas pada sistem PLTS hibrida.

Kontribusi utama penelitian ini adalah menyajikan evaluasi kinerja PLTS hibrida skala kecil 1 kWp pada lembaga sosial pendidikan berdasarkan data pengujian berbeban aktual. Evaluasi tidak hanya mencakup konfigurasi *array* 2S5P dan perhitungan daya keluaran, tetapi juga efisiensi *array*, estimasi energi, *specific yield*, *performance ratio*, dan estimasi rugi performa selama periode pengujian. Dengan demikian, penelitian ini memberikan gambaran kinerja sistem yang telah direalisasikan di lapangan sekaligus memperjelas batasan bahwa evaluasi difokuskan pada sisi *array* PV sampai titik input inverter, bukan pada analisis detail baterai, inverter, maupun mekanisme perpindahan sumber.

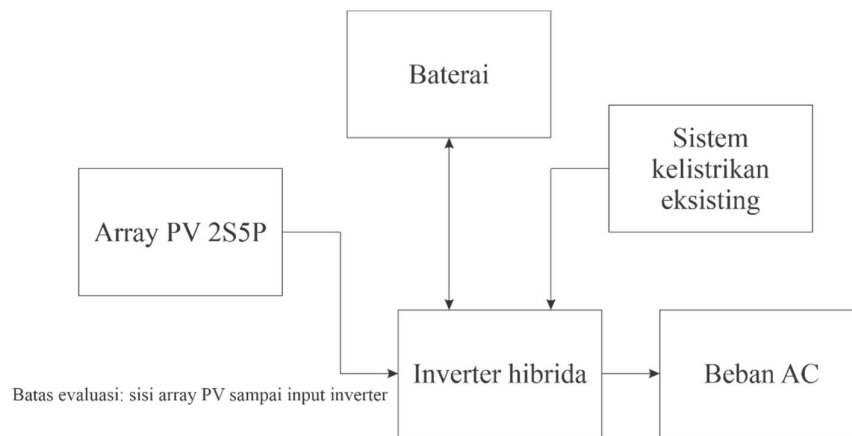
Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja PLTS hibrida 1 kWp di salah satu lembaga sosial pendidikan di Singosari. Evaluasi dilakukan melalui penentuan konfigurasi *array*, pengujian parameter operasi berupa iradiasi, suhu modul, tegangan operasi, arus operasi, daya keluaran, efisiensi *array*, estimasi energi, *specific yield*, *performance ratio*, dan estimasi rugi performa saat sistem terhubung dengan inverter dan beban.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi dan sistem PLTS hibrida 1 kWp

Penelitian dilakukan pada sistem PLTS hibrida di salah satu lembaga sosial pendidikan di Singosari, Kabupaten Malang. Sistem yang dikaji merupakan pengembangan kapasitas PLTS dari sistem eksisting menjadi 10 modul *monocrystalline* 100 Wp atau setara dengan kapasitas terpasang 1 kWp. Sistem ini dikategorikan sebagai PLTS hibrida karena *array* PV terhubung dengan inverter hibrida, baterai, beban AC, dan sistem kelistrikan eksisting pada lokasi penelitian. Sistem PLTS hibrida umumnya memadukan *array* PV, inverter, perangkat penyimpanan energi, dan sistem kelistrikan pendukung untuk menjaga kontinuitas suplai energi ketika kondisi iradiasi dan pembebanan berubah [7], [9], [15].

Pada konfigurasi penelitian ini, energi dari *array* PV dikonversi melalui inverter hibrida untuk menyuplai beban AC. Baterai berfungsi sebagai perangkat penyimpanan energi, sedangkan sistem kelistrikan eksisting berperan sebagai sumber pendukung ketika energi dari PLTS dan baterai belum mencukupi kebutuhan beban. Diagram blok sistem PLTS hibrida dan batas evaluasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok sistem PLTS hibrida dan batas evaluasi penelitian

Batas evaluasi penelitian difokuskan pada sisi array PV sampai titik input inverter. Dengan demikian, parameter yang dianalisis meliputi iradiasi, suhu modul, tegangan operasi PV, arus operasi PV, daya keluaran PV, efisiensi *array*, energi, *specific yield*, *performance ratio*, dan estimasi rugi performa pada sisi PV. Oleh karena itu, hasil yang dibahas merepresentasikan kinerja *array* PV pada sistem PLTS hibrida, sedangkan performa baterai, efisiensi inverter, mekanisme perpindahan sumber, dan strategi manajemen energi tidak dihitung sebagai parameter kinerja terpisah.

Inverter hibrida yang digunakan adalah HPS 3K-24 V dengan tipe *charge controller* PWM, arus maksimum charging 50 A, maksimum tegangan rangkaian terbuka PV 80 V_{dc}, rentang V_{mp} PV 30–40 V_{dc}, dan tegangan sistem 24 V. Spesifikasi tersebut digunakan sebagai batas teknis dalam menentukan konfigurasi *array* PV agar tegangan dan arus keluaran modul tetap sesuai dengan karakteristik masukan inverter. Spesifikasi teknis inverter dicantumkan bersama spesifikasi modul dan konfigurasi *array* pada Tabel 1.

2.2. Kebutuhan energi dan kapasitas terpasang

Berdasarkan data beban pada lokasi penelitian, kebutuhan energi harian lembaga sosial pendidikan tersebut sebesar 4.774,06 Wh. Hasil perhitungan kebutuhan modul menunjukkan bahwa untuk memenuhi kebutuhan energi harian secara lebih ideal diperlukan kapasitas modul yang mendekati 12 modul 100 Wp. Namun, kapasitas yang direalisasikan pada penelitian ini adalah 10 modul 100 Wp atau setara dengan 1 kWp. Pemilihan kapasitas 1 kWp dilakukan karena sistem ini merupakan pengembangan dari sistem PLTS eksisting yang sebelumnya menggunakan 6 modul 100 Wp, sehingga penambahan menjadi 10 modul dilakukan dengan mempertimbangkan ketersediaan modul, ruang pemasangan, dan kondisi implementasi di lapangan.

Dengan demikian, sistem 1 kWp pada penelitian ini tidak diposisikan sebagai sistem yang sepenuhnya memenuhi seluruh kebutuhan energi harian lokasi penelitian. Kapasitas tersebut diposisikan sebagai tahap

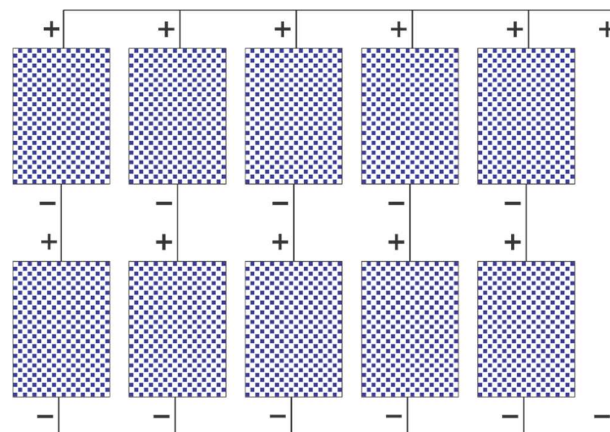
pengembangan sistem PLTS hibrida yang telah direalisasikan di lapangan. Oleh karena itu, evaluasi pada artikel ini difokuskan untuk mengetahui kinerja kapasitas terpasang 1 kWp pada kondisi berbeban aktual, meliputi daya keluaran, efisiensi, energi, *specific yield*, *performance ratio*, dan estimasi rugi performa selama periode pengujian.

2.3. Instalasi PV dan konfigurasi array

Modul yang digunakan adalah modul *monocrystalline* 100 Wp dengan V_{mp} 17 V, I_{mp} 5,8 A, V_{oc} 23 V, I_{sc} 6,3 A, dan dimensi $1160 \times 450 \times 30$ mm. Sepuluh modul PV disusun dalam konfigurasi 2S5P, sehingga diperoleh $V_{mp array}$ sebesar 34 V, $V_{oc array}$ sebesar 46 V, $I_{mp array}$ sebesar 29 A, dan $I_{sc array}$ sebesar 31,5 A. Konfigurasi 2S5P dipilih karena nilai $V_{mp array}$ sesuai dengan rentang V_{mp} PV inverter sebesar 30–40 V_{dc}, sedangkan $V_{oc array}$ masih berada di bawah batas maksimum tegangan rangkaian terbuka PV sebesar 80 V_{dc}.

Tabel 1. Spesifikasi modul, inverter, dan konfigurasi array PLTS 1 kWp

Parameter	Nilai
Jenis modul	<i>Monocrystalline</i>
Jumlah modul	10 unit
Daya tiap modul	100 Wp
V_{mp} modul	17 V
I_{mp} modul	5,8 A
V_{oc} modul	23 V
I_{sc} modul	6,3 A
Dimensi modul	$1160 \times 450 \times 30$ mm
Luas total modul	5,22 m ²
Konfigurasi array	2 seri \times 5 paralel (2S5P)
$V_{mp array}$	34 V
$V_{oc array}$	46 V
$I_{mp array}$	29 A
$I_{sc array}$	31,5 A
Model inverter	HPS 3K-24 V
Tegangan sistem	24 V
Rentang V_{mp} PV inverter	30–40 V _{dc}
Arus maksimum <i>charging</i>	50 A
Maksimum tegangan rangkaian terbuka PV	80 V _{dc}



Gambar 2. Konfigurasi array PV 1 kWp dengan susunan 2S5P

2.4. Pengujian kinerja PLTS

Pengujian utama dilakukan saat array PV terhubung dengan inverter dan beban. Kondisi berbeban dipilih karena merepresentasikan operasi aktual sistem dibandingkan pengujian tanpa beban. Parameter yang diukur meliputi iradiasi matahari, suhu permukaan modul, tegangan operasi PV, dan arus operasi PV. Iradiasi diukur menggunakan *solar power meter*, suhu modul diukur menggunakan *thermogun* pada permukaan modul, sedangkan tegangan dan arus operasi diukur pada sisi keluaran array PV yang terhubung ke inverter

menggunakan alat ukur listrik dan *clamp meter*. Pengambilan data dilakukan dari pukul 10.00 sampai 16.00 dengan interval 15 menit.

Titik pengukuran tegangan dan arus ditempatkan pada sisi DC keluaran *array* PV menuju inverter. Dengan demikian, tegangan dan arus yang dianalisis merupakan tegangan operasi PV (V_{pv}) dan arus operasi PV (I_{pv}), bukan tegangan terbuka (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}), atau V_{mp} pada kondisi STC/*datasheet*. Data tanpa beban tidak dijadikan hasil utama karena V_{oc} dan I_{sc} tidak terjadi pada kondisi operasi yang sama, sehingga tidak merepresentasikan daya operasi nyata sistem.

Sebelum pengambilan data, dilakukan pengecekan awal terhadap alat ukur. Pengecekan meliputi kondisi baterai alat, posisi nol pada *clamp meter* DC, pembacaan awal tegangan, serta penyesuaian posisi *solar power meter* terhadap bidang modul PV. Pengukuran iradiasi, suhu, tegangan, dan arus dilakukan sedekat mungkin dalam waktu yang sama untuk mengurangi pengaruh perubahan iradiasi sesaat. Spesifikasi dan fungsi alat ukur yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Alat ukur dan parameter pengujian

Alat ukur	Parameter yang diukur	Titik/posisi pengukuran
<i>Solar power meter</i>	Iradiasi matahari (G)	Disesuaikan terhadap bidang modul PV
<i>Thermogun</i>	Suhu permukaan modul (T)	Permukaan modul PV
Multimeter DC	Tegangan operasi PV (V_{pv})	Sisi DC keluaran <i>array</i> PV menuju inverter
<i>Clamp meter</i> DC	Arus operasi PV (I_{pv})	Salah satu konduktor DC keluaran <i>array</i> PV menuju inverter

Pengukuran dilakukan secara manual sehingga terdapat potensi ketidakpastian yang berasal dari akurasi alat ukur, perubahan iradiasi dalam waktu singkat, sudut pembacaan *solar power meter*, serta ketidakserempakan pembacaan parameter. Oleh karena itu, analisis kinerja pada artikel ini tidak difokuskan pada nilai sesaat, tetapi pada kecenderungan data dan nilai rata-rata selama periode pengujian berbeban. Pengujian hanya dilakukan selama satu hari pada rentang pukul 10.00–16.00, sehingga hasil yang diperoleh merepresentasikan kinerja sistem pada periode pengujian tersebut dan belum digunakan untuk menyimpulkan produksi energi harian, bulanan, atau tahunan secara menyeluruh.

2.5. Persamaan evaluasi daya, efisiensi, energi, *specific yield*, dan *performance ratio*

Daya keluaran PV dihitung dari hasil perkalian tegangan operasi dan arus operasi pada kondisi berbeban menggunakan persamaan (1).

$$P_{out} = V_{pv} \times I_{pv} \quad (1)$$

Daya radiasi yang diterima array dihitung dari iradiasi dan luas total modul seperti ditunjukkan pada persamaan (2).

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

Efisiensi array PV dihitung menggunakan persamaan (3).

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

Energi selama periode pengujian diperkirakan menggunakan daya rata-rata dan durasi pengujian seperti pada persamaan (4).

$$E = P_{rata-rata} \times t \quad (4)$$

Specific yield selama periode pengujian dihitung dari perbandingan energi yang dihasilkan terhadap kapasitas terpasang seperti pada persamaan (5) [13], [16].

$$Y_f = \frac{E}{P_{rated}} \quad (5)$$

Selain *specific yield*, kinerja sistem juga dievaluasi menggunakan *reference yield* dan *performance ratio*. *Reference yield* menunjukkan jumlah jam ekuivalen iradiasi pada kondisi standar dan dihitung menggunakan Persamaan (6) [14], [16], [17].

$$Y_r = \frac{H_t}{G_{STC}} \quad (6)$$

dengan H_t merupakan iradiasi total selama periode pengujian dan G_{STC} merupakan iradiasi standar sebesar 1000 W/m^2 . Nilai H_t diperoleh dari iradiasi rata-rata selama pengujian dikalikan durasi pengujian, seperti pada Persamaan (7).

$$H_t = G_{rata-rata} \times t \tag{7}$$

Performance ratio menunjukkan perbandingan antara *specific yield* dan *reference yield*, sehingga dapat digunakan untuk menilai kinerja sistem terhadap potensi energi radiasi yang tersedia. *Performance ratio* dihitung menggunakan Persamaan (8) [14], [16], [17].

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \times 100\% \tag{8}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Ringkasan parameter pengujian berbeban

Data pengujian berbeban diambil setiap 15 menit dari pukul 10.00 sampai 16.00, sehingga diperoleh 25 titik pengukuran. Parameter tegangan dan arus dinyatakan sebagai tegangan operasi PV (V_{pv}) dan arus operasi PV (I_{pv}), karena pengujian dilakukan saat sistem terhubung dengan inverter dan beban. Dengan demikian, nilai tersebut bukan merupakan tegangan terbuka (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}), atau V_{mp} pada kondisi STC/*datasheet*.

Untuk menunjukkan variasi data selama pengujian, parameter hasil pengukuran disajikan dalam bentuk nilai rata-rata dan standar deviasi. Ringkasan statistik parameter pengujian berbeban ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan statistik data pengujian PLTS pada kondisi berbeban

Parameter	Satuan	Rata-rata	Standar deviasi
Suhu modul	°C	39,51	3,57
Iradiasi	W/m ²	796,02	130,65
Tegangan operasi PV (V_{pv})	V	31,62	3,03
Arus operasi PV (I_{pv})	A	20,03	6,50
Daya keluaran PV (P_{out})	W	651,18	268,65
Efisiensi <i>array</i> PV	%	15,47	5,20

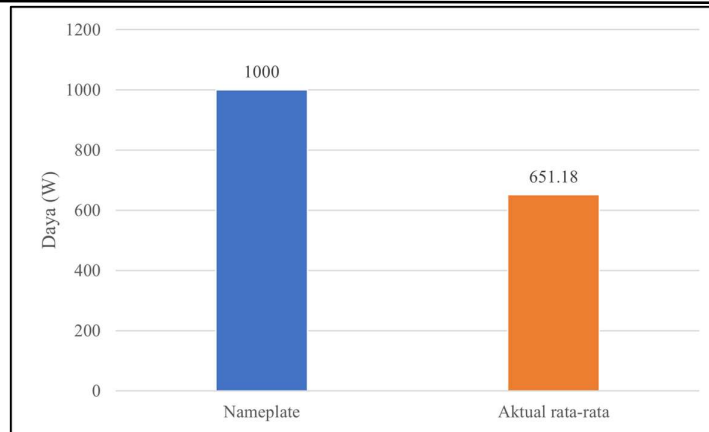
Berdasarkan Tabel 3, iradiasi rata-rata selama pengujian adalah $796,02 \text{ W/m}^2$ dengan standar deviasi $130,65 \text{ W/m}^2$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa intensitas radiasi matahari mengalami perubahan cukup nyata selama periode pengujian. Perubahan iradiasi tersebut memengaruhi arus operasi dan daya keluaran PV, sehingga daya keluaran rata-rata sebesar $651,18 \text{ W}$ memiliki standar deviasi $268,65 \text{ W}$.

Suhu modul rata-rata sebesar $39,51 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan standar deviasi $3,57 \text{ }^\circ\text{C}$. Nilai suhu tersebut lebih tinggi daripada suhu referensi STC sebesar $25 \text{ }^\circ\text{C}$, sehingga berpotensi menurunkan tegangan operasi PV. Tegangan operasi rata-rata sebesar $31,62 \text{ V}$ masih berada pada rentang kerja sistem, sedangkan arus operasi rata-rata sebesar $20,03 \text{ A}$ menunjukkan perubahan yang lebih besar karena arus PV sangat dipengaruhi oleh perubahan iradiasi.

Efisiensi rata-rata titik pengukuran sebesar $15,47\%$ dengan standar deviasi $5,20\%$. Nilai standar deviasi tersebut menunjukkan adanya fluktuasi efisiensi sesaat selama pengujian lapangan. Oleh karena itu, pembahasan kinerja tidak hanya didasarkan pada satu nilai efisiensi sesaat, tetapi pada nilai rata-rata, kecenderungan perubahan parameter, dan kondisi operasi berbeban selama periode pengujian.

3.2. Analisis daya, efisiensi, energi, specific yield, dan performance ratio

Berdasarkan data rata-rata pada Tabel 3, kinerja PLTS dianalisis menggunakan parameter daya radiasi, daya keluaran, efisiensi *array*, energi, *specific yield*, *reference yield*, dan *performance ratio*. Daya radiasi rata-rata diperoleh dari perkalian iradiasi rata-rata sebesar $796,02 \text{ W/m}^2$ dengan luas total modul $5,22 \text{ m}^2$, sehingga diperoleh P_{in} sebesar $4155,22 \text{ W}$. Dengan daya keluaran rata-rata sebesar $651,18 \text{ W}$, efisiensi *array* berdasarkan parameter rata-rata adalah $15,67\%$. Nilai efisiensi $15,47\%$ merupakan rata-rata efisiensi dari seluruh titik pengukuran, sedangkan nilai $15,67\%$ diperoleh dari perhitungan menggunakan daya keluaran rata-rata dan daya radiasi rata-rata. Perbedaan kecil antara kedua nilai tersebut terjadi karena metode perhitungan rata-rata yang digunakan berbeda.



Gambar 3. Perbandingan kapasitas *nameplate* dan daya aktual rata-rata PLTS

Energi selama periode pengujian dihitung dari daya keluaran rata-rata dikalikan durasi pengujian. Dengan P_{out} rata-rata sebesar 651,18 W dan durasi pengujian enam jam, energi yang dihasilkan selama periode pengujian adalah 3,91 kWh. Dengan kapasitas terpasang sebesar 1 kWp, *specific yield* atau *final yield* selama periode pengujian adalah 3,91 kWh/kWp.

Reference yield dihitung dari iradiasi total selama periode pengujian terhadap iradiasi standar STC. Dengan iradiasi rata-rata 796,02 W/m² selama enam jam, iradiasi total selama periode pengujian adalah 4,776 kWh/m². Nilai tersebut menghasilkan *reference yield* sebesar 4,776 jam. Berdasarkan perbandingan antara *specific yield* dan *reference yield*, diperoleh *performance ratio* sebesar 81,8%. Nilai ini menunjukkan bahwa selama periode pengujian, sistem menghasilkan energi sekitar 81,8% dari potensi energi referensi berbasis iradiasi yang diterima. Dengan demikian, estimasi rugi performa total berbasis *performance ratio* adalah sekitar 18,2%. Estimasi ini tidak memisahkan rugi masing-masing komponen seperti rugi suhu, kabel, inverter, baterai, atau *mismatch*, tetapi digunakan sebagai indikator total penurunan performa selama periode pengujian.

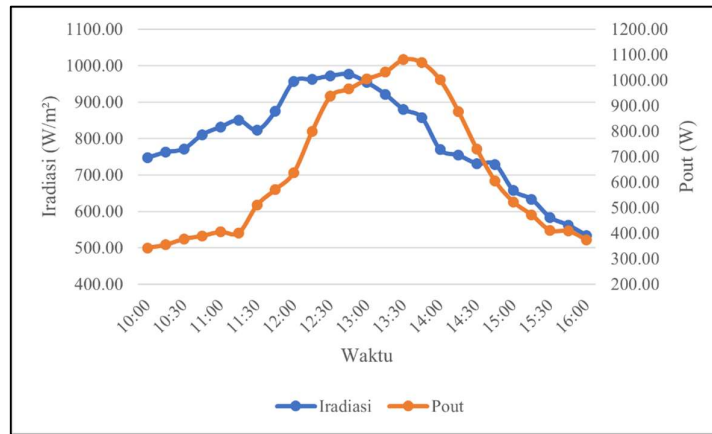
Tabel 4. Hasil perhitungan performa PLTS selama periode pengujian

Parameter	Hasil
Luas total modul	5,22 m ²
Iradiasi rata-rata	796,02 W/m ²
Daya radiasi rata-rata (P_{in})	4155,22 W
Daya keluaran rata-rata (P_{out})	651,18 W
Efisiensi berdasarkan parameter rata-rata	15,67%
Efisiensi rata-rata titik pengukuran	15,47%
Estimasi energi selama 6 jam	3,91 kWh
<i>Specific yield</i> selama 6 jam	3,91 kWh/kWp
Iradiasi total selama 6 jam (H_t)	4,776 kWh/m ²
<i>Reference yield</i> (Y_r)	4,776 jam
<i>Performance ratio</i> (PR)	81,8%
Estimasi rugi performa berbasis PR	18,2%

Secara numerik, nilai daya aktual rata-rata 651,18 W lebih rendah dibandingkan daya nominal 1 kWp. Penurunan tersebut tidak menunjukkan kegagalan sistem, tetapi merupakan konsekuensi dari kondisi operasi lapangan. Pada saat pengujian, iradiasi rata-rata berada di bawah kondisi STC 1000 W/m², suhu modul rata-rata lebih tinggi dari suhu referensi STC 25 °C, dan sistem bekerja pada kondisi berbeban. Oleh karena itu, nilai *performance ratio* sebesar 81,8% lebih representatif untuk menunjukkan kinerja sistem selama periode pengujian dibandingkan membandingkan langsung daya aktual terhadap kapasitas *nameplate*.

3.3. Pengaruh iradiasi dan suhu terhadap kinerja

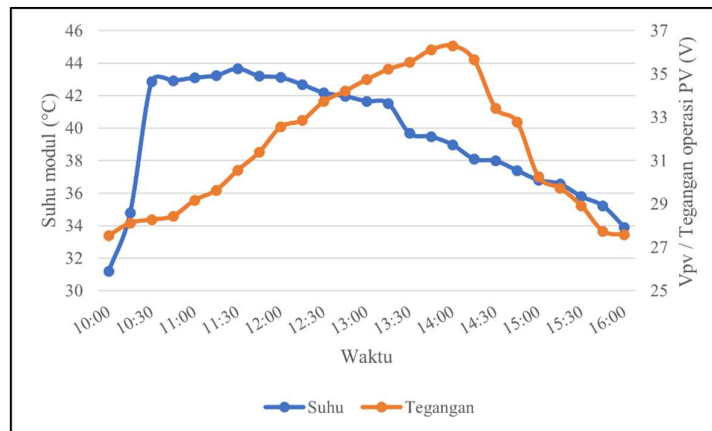
Perubahan iradiasi selama pengujian memengaruhi arus operasi dan daya keluaran PV. Berdasarkan Gambar 4, daya keluaran cenderung meningkat ketika iradiasi berada pada kisaran tinggi, kemudian menurun kembali saat iradiasi berkurang pada sore hari. Namun, hubungan antara iradiasi dan daya keluaran tidak sepenuhnya linier karena sistem diuji pada kondisi berbeban. Selain iradiasi, daya keluaran juga dipengaruhi oleh suhu modul, kondisi pembebanan, serta titik operasi sistem selama pengujian. Hal ini terlihat dari standar deviasi daya keluaran sebesar 268,65 W, yang menunjukkan adanya fluktuasi cukup besar selama periode pengujian.



Gambar 4. Profil iradiasi dan daya keluaran selama pengujian berbeban

Suhu modul rata-rata sebesar 39,51 °C lebih tinggi daripada suhu referensi STC sebesar 25 °C. Secara teori, kenaikan suhu pada modul fotovoltaik berbasis silikon dapat menurunkan tegangan. Namun, pada Gambar 5 terlihat bahwa tegangan operasi PV tidak hanya mengikuti perubahan suhu modul secara langsung. Tegangan operasi meningkat hingga sekitar pukul 14.00, kemudian menurun pada sore hari. Hal ini terjadi karena tegangan yang diukur merupakan tegangan operasi (V_{pv}) pada kondisi berbeban, sehingga dipengaruhi oleh kombinasi suhu modul, iradiasi, pembebanan, dan titik kerja sistem. Oleh karena itu, analisis tegangan pada sistem berbeban tidak dapat disamakan dengan analisis V_{oc} atau V_{mp} pada kondisi standar.

Nilai *performance ratio* sebesar 81,8% menunjukkan bahwa selama periode pengujian, sistem menghasilkan energi sekitar 81,8% dari potensi energi referensi berbasis iradiasi. Dengan demikian, estimasi rugi performa total berbasis PR adalah sekitar 18,2%. Nilai ini tidak diposisikan sebagai rincian rugi masing-masing komponen, tetapi sebagai indikator rugi performa total selama pengujian. Rugi tersebut dapat dipengaruhi oleh suhu modul yang lebih tinggi dari STC, rugi kabel dan koneksi, *mismatch* antarmodul, kondisi pembebanan, serta titik operasi inverter dan baterai. Karena penelitian ini dibatasi pada sisi *array* PV sampai input inverter, rugi masing-masing subsistem tidak dianalisis secara terpisah.



Gambar 5. Profil suhu modul dan tegangan operasi PV selama pengujian berbeban

Hasil penelitian ini dapat dibandingkan dengan evaluasi PLTS 1000 Wp oleh Hidayat dkk. [6] yang melaporkan daya rata-rata 535,99 W, efisiensi 14,29%, dan energi kumulatif rata-rata 2,64 kWh. Pada penelitian ini, daya keluaran rata-rata sebesar 651,18 W, efisiensi berada pada 15,47–15,67%, estimasi energi selama enam jam sebesar 3,91 kWh, dan PR sebesar 81,8%. Perbedaan hasil dipengaruhi oleh kondisi iradiasi, suhu modul, karakteristik sistem, durasi pengujian, dan kondisi pembebanan. Dibandingkan dengan penelitian Lemrabout dkk. [18] yang melaporkan PR sebesar 86,33% pada pembangkit hibrida skala besar, nilai PR pada penelitian ini lebih rendah. Perbedaan tersebut wajar karena kapasitas sistem, lokasi, durasi pengamatan, dan konfigurasi sistem yang digunakan berbeda.

Dengan demikian, evaluasi kinerja PLTS berbasis data lapangan perlu mempertimbangkan kondisi operasi aktual, bukan hanya kapasitas *nameplate*. Penggunaan nilai rata-rata, standar deviasi, *specific yield*, *performance ratio*, dan estimasi rugi performa memberikan gambaran performa yang lebih lengkap. Pada konteks PLTS hibrida skala kecil, hasil ini menunjukkan bahwa sistem 1 kWp dapat memberikan kontribusi energi sebagai pengembangan kapasitas, tetapi evaluasi dengan periode pengujian yang lebih panjang tetap diperlukan untuk menilai performa harian, bulanan, atau tahunan secara lebih menyeluruh.

3.4. Keterbatasan pengukuran lapangan

Pengujian lapangan memiliki keterbatasan karena iradiasi, suhu modul, tegangan, dan arus dapat berubah dalam waktu singkat. Perbedaan posisi atau sudut *solar power meter* terhadap bidang modul, ketidakteraturan pembacaan parameter, serta ketelitian alat ukur dapat memengaruhi nilai daya dan efisiensi sesaat. Oleh karena itu, hasil pengujian pada artikel ini lebih ditekankan pada nilai rata-rata, standar deviasi, *specific yield*, *performance ratio*, dan kecenderungan perubahan parameter selama periode pengujian, bukan pada satu nilai efisiensi sesaat sebagai indikator tunggal kinerja sistem.

Pengujian dilakukan selama satu hari pada rentang pukul 10.00–16.00, sehingga hasil yang diperoleh merepresentasikan kinerja sistem pada periode pengujian berbeban tersebut. Nilai energi, *specific yield*, *performance ratio*, dan estimasi rugi performa yang disajikan belum dapat digunakan untuk menyimpulkan produksi energi harian penuh, bulanan, atau tahunan. Selain itu, penelitian ini dibatasi pada sisi *array* PV sampai input inverter, sehingga rugi suhu, rugi kabel, rugi inverter, rugi baterai, dan *mismatch* antar modul tidak dipisahkan secara individual. Evaluasi lanjutan dengan durasi pengujian lebih panjang dan titik ukur yang lebih lengkap diperlukan untuk memperoleh gambaran performa sistem hibrida secara lebih menyeluruh.

4. KESIMPULAN

PLTS hibrida 1 kWp pada lembaga sosial pendidikan di Singosari berhasil dikonfigurasi menggunakan 10 modul *monocrystalline* 100 Wp dengan susunan 2S5P. Konfigurasi tersebut menghasilkan V_{mp} *array* sebesar 34 V, V_{oc} *array* sebesar 46 V, I_{mp} *array* sebesar 29 A, dan I_{sc} *array* sebesar 31,5 A, sehingga sesuai dengan karakteristik sistem 24 V yang digunakan pada instalasi. Hasil pengujian berbeban selama pukul 10.00–16.00 menunjukkan iradiasi rata-rata 796,02 W/m², suhu modul rata-rata 39,51 °C, tegangan operasi rata-rata 31,62 V, arus operasi rata-rata 20,03 A, dan daya keluaran rata-rata 651,18 W. Efisiensi rata-rata dari titik pengukuran adalah 15,47%, sedangkan efisiensi berdasarkan parameter rata-rata adalah 15,67%. Energi yang dihasilkan selama enam jam pengujian diperkirakan sebesar 3,91 kWh, dengan *specific yield* 3,91 kWh/kWp, *reference yield* 4,776 jam, dan *performance ratio* 81,8%.

Nilai *performance ratio* tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan energi sekitar 81,8% dari potensi energi referensi berbasis iradiasi selama periode pengujian, sedangkan estimasi rugi performa total berbasis PR adalah sekitar 18,2%. Rugi performa tersebut tidak dipisahkan per komponen, tetapi dapat dipengaruhi oleh suhu modul yang lebih tinggi dari STC, rugi kabel dan koneksi, *mismatch* antarmodul, kondisi pembebanan, serta titik operasi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PLTS hibrida 1 kWp layak diposisikan sebagai pengembangan kapasitas energi pada lokasi penelitian, tetapi belum dapat diklaim memenuhi seluruh kebutuhan energi harian. Penelitian selanjutnya perlu dilakukan dengan periode pengujian yang lebih panjang, mencakup variasi cuaca harian maupun musiman, serta melibatkan pengukuran tambahan pada sisi inverter, baterai, dan beban agar performa sistem hibrida dapat dianalisis secara lebih menyeluruh.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Malang, khususnya Jurusan Teknik Elektro, atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada mitra penelitian di Singosari, Kabupaten Malang, atas izin penggunaan lokasi, dukungan fasilitas, serta ketersediaan data pengujian sistem PLTS hibrida 1 kWp. Dukungan tersebut berperan penting dalam penyusunan dan penyelesaian artikel ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Tarigan, "Rooftop PV system policy and implementation study for a household in Indonesia," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 10, no. 5, pp. 110-115, 2020, doi: 10.32479/ijeep.9539.
- [2] Asrori, A. F. Ramdhani, P. W. Nugroho, and I. H. Eryk, "Kajian kelayakan solar rooftop on-grid untuk kebutuhan listrik Bengkel Mesin di Polinema," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 10, no. 4, pp. 830-845, 2022, doi: 10.26760/elkomika.v10i4.830.
- [3] H. B. Nurjaman and T. Purnama, "Pembangkit listrik tenaga surya sebagai solusi energi terbarukan rumah tangga," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 136-142, 2022, doi: 10.21831/jee.v6i2.51617.

- [4] M. K. Al-Ghezi, R. T. Ahmed, and M. T. Chaichan, "The influence of temperature and irradiance on performance of the photovoltaic panel in the Middle of Iraq," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 11, no. 2, pp. 501–513, 2022, doi: 10.14710/ijred.2022.43713.
- [5] O. Bamisile, C. Acen, D. Cai, Q. Huang, and I. Staffell, "The environmental factors affecting solar photovoltaic output," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 208, p. 115073, 2025, doi: 10.1016/j.rser.2024.115073.
- [6] F. Hidayat, D. Rusirawan, and I. R. F. Tanjung, "Evaluasi kinerja PLTS 1000 Wp di Itenas Bandung," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 7, no. 1, pp. 195–208, 2019, doi: 10.26760/elkomika.v7i1.195.
- [7] A. F. Hernawan, E. Mulyana, and B. Trisno, "Evaluasi kinerja sistem pembangkit listrik tenaga surya hybrid pada Gedung Centre of Excellence Universitas," *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 26, no. 1, pp. 31–39, 2024, doi: 10.14710/transmisi.26.1.31-39.
- [8] S. Nurhadi, P. S. Harijanto, and M. F. Hamzah, "Optimasi perencanaan pembangkit listrik tenaga surya atap on-grid melalui simulasi PVsyst," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 12, no. 3, pp. 156–161, 2025, doi: 10.33795/elposys.v12i3.8676.
- [9] B. S. Gumilang, M. N. Hidayat, R. Duanaputri, and S. Alfarisi, "Implementasi battery management system pada PLTS hibrida skala kecil," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 12, no. 3, pp. 162–167, 2025, doi: 10.33795/elposys.v12i3.7652.
- [10] I. G. N. A. B. R. W. Dewangga, I. A. D. Giriantari, and I. W. Sukerayasa, "Studi teknis PLTS rooftop 3 kWp frameless with on-grid system di lingkungan Kori Nuansa Jimbaran," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 8, no. 4, pp. 84–93, 2021, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2021.v08.i04.p10.
- [11] M. A. M. Youssef et al., "Investigation of small-scale photovoltaic systems for optimum performance under partial shading conditions," *Sustainability*, vol. 14, no. 6, p. 3681, 2022, doi: 10.3390/su14063681.
- [12] A. V. Fadilla, M. A. H. Prakoso, Nurhayati, M. N. Hidayat, and A. Hermawan, "Rancang bangun passive photovoltaic 50 Wp di Laboratorium Energi Terbarukan Politeknik Negeri Malang," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 7, no. 3, pp. 21-26, 2020, doi: 10.33795/elposys.v7i3.14.
- [13] S. Gulkowski, "Specific yield analysis of the rooftop PV systems located in south-eastern Poland," *Energies*, vol. 15, no. 10, p. 3666, 2022, doi: 10.3390/en15103666.
- [14] E. Fuster-Palop, C. Vargas-Salgado, J. C. Ferri-Revert, and J. Payá, "Performance analysis and modelling of a 50 MW grid-connected photovoltaic plant in Spain after 12 years of operation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 170, p. 112968, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112968.
- [15] I. U. V. Simanjuntak and A. Artanto, "Analisa anti islanding pada inverter 3 fase PLTS hybrid 5 kW terhadap jaringan PLN," *Cyclotron: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 5, no. 2, pp. 7–13, 2022, doi: 10.30651/el.v5i2.12520.
- [16] Z. Usman, J. Tah, H. Abanda, and C. Nche, "A critical appraisal of PV-systems' performance," *Buildings*, vol. 10, no. 11, p. 192, 2020, doi: 10.3390/buildings10110192.
- [17] F. J. Muñoz-Rodríguez, A. Snytko, J. de la Casa Hernández, C. Rus-Casas, and G. Jiménez-Castillo, "Rooftop photovoltaic systems. New parameters for the performance analysis from monitored data based on IEC 61724," *Energy and Buildings*, vol. 295, p. 113280, 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113280.
- [18] A. Lemrabout, A. Kerboua, R. Mohamed, A. Bouaichi, A. Ba, S. M. Minehna, F. B. Hacene, and A. K. Mahmoud, "Performance analysis of a photovoltaic component integrated into a hybrid power plant in Southeast Mauritania," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 13, no. 6, pp. 1093–1103, 2024, doi: 10.61435/ijred.2024.60474.