

ANALISIS PERFORMA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ATAP PADA RUMAH TINGGAL DI ACEH BARAT

Zulfahmi^{1*}, M. Yasir², Rifqy Ramadhan Saputra³

¹²³ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Sains, Universitas Cipta Mandiri,
Aceh Barat, Indonesia

* Corresponding Author: zulfahmi@ucm.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa aktual sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap yang terpasang pada rumah tinggal di Kabupaten Aceh Barat pada tahun 2024. Kabupaten Aceh Barat memiliki potensi energi surya yang tinggi dengan iradiasi rata-rata berkisar antara 4,5–5,2 kWh/m²/hari, namun kajian ilmiah yang mengevaluasi kinerja aktual PLTS atap skala rumah tangga di wilayah ini masih sangat terbatas. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif deskriptif-evaluatif melalui survei lapangan dan pengukuran langsung terhadap 15 unit rumah tinggal yang mengoperasikan sistem PLTS atap dengan kapasitas terpasang antara 900 Wp hingga 4.000 Wp. Parameter yang diukur meliputi tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}), daya puncak (P_{max}), iradiasi matahari, dan suhu permukaan panel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata *Performance Ratio* (PR) sistem PLTS atap berada pada angka 78,3% dengan *Yield Factor* rata-rata sebesar 4,1 kWh/kWp/hari. Efisiensi konversi aktual modul surya tercatat sebesar 15,2%, berada di bawah nilai spesifikasi nominal rata-rata (17,8%). Faktor utama penurunan kinerja meliputi penumpukan debu (*dust loss* sebesar 8,2%), rugi-rugi pengkabelan dan inverter (7,1%), serta ketidakcocokan (*mismatch*) antar modul (6,4%). Sistem PLTS atap terbukti efektif memenuhi 62–85% kebutuhan energi listrik rumah tangga sampel dengan *payback period* berkisar antara 7 hingga 9 tahun.

Kata Kunci: PLTS Atap, *Performance Ratio*, Efisiensi Konversi, Energi Surya, Aceh Barat

Abstract

This study aims to analyze the actual performance of rooftop Photovoltaic (PV) systems installed on residential buildings in West Aceh Regency in 2024. West Aceh possesses high solar energy potential, with an average irradiance ranging from 4.5 to 5.2 kWh/m²/day; however, empirical

evaluations of household-scale systems remain limited. The methodology employed a quantitative descriptive-evaluative field survey across 15 residential units operating rooftop PV systems with capacities between 900 Wp and 4,000 Wp. Parameters measured included open-circuit voltage (V_{oc}), short-circuit current (I_{sc}), peak power (P_{max}), solar irradiance, and panel surface temperature. Results indicated an average Performance Ratio (PR) of 78.3% and a Yield Factor of 4.1 kWh/kWp/day. The actual module conversion efficiency averaged 15.2%, falling below the nominal rating of 17.8%. The primary factors contributing to performance loss were dust accumulation (dust loss of 8.2%), wiring and inverter losses (7.1%), and inter-module mismatch (6.4%). Overall, rooftop PV systems successfully met 62–85% of residential electricity demand, with an estimated payback period of 7 to 9 years.

Keywords: Rooftop PV, Performance Ratio, Conversion Efficiency, Solar Energy, West Aceh

PENDAHULUAN

Energi terbarukan menjadi fokus utama dalam transisi energi global guna mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menekan emisi gas rumah kaca. Di Indonesia, energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling potensial untuk dikembangkan, khususnya di wilayah Kabupaten Aceh Barat. Berdasarkan data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), wilayah Aceh Barat menerima iradiasi matahari harian rata-rata sebesar 4,5 hingga 5,2 kWh/m²/hari sepanjang tahun. Kondisi geografis dan iklim ini menjadikan Aceh Barat sebagai lokasi yang sangat strategis untuk implementasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).

Pemerintah Indonesia telah menerbitkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 26 Tahun 2021 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum guna mempercepat adopsi PLTS atap (*rooftop PV system*) di sektor komersial maupun rumah tangga. Sistem PLTS atap menawarkan kemudahan instalasi di atas struktur bangunan yang sudah ada, baik dengan konfigurasi terhubung jaringan listrik PLN (*on-grid*) maupun mandiri (*off-grid*).

Meskipun pengadopsian PLTS atap skala rumah tangga terus meningkat, terdapat kesenjangan (*gap*) antara kapasitas nominal spesifikasi pabrik dengan kinerja aktual di

lapangan. Performa sistem PLTS sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional dan lingkungan tropis, seperti fluktuasi iradiasi, suhu operasional modul yang tinggi, kelembaban udara, akumulasi debu, hingga kualitas instalasi dan perawatan. Kajian ilmiah mengenai evaluasi performa aktual PLTS atap di wilayah iklim tropis Aceh Barat masih sangat terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk mengukur dan menganalisis parameter performa utama PLTS atap pada rumah tinggal di Aceh Barat, mengidentifikasi faktor-faktor penyebab penurunan kinerja, serta mengevaluasi efisiensi aktual sistem. Data empiris yang dihasilkan diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah serta rekomendasi teknis praktis bagi pengguna, instalatur, dan pembuat kebijakan dalam mengoptimalkan pemanfaatan energi surya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode survei dan pengukuran lapangan (field measurement) berdesain deskriptif-evaluatif. Penelitian dilaksanakan di Kabupaten Aceh Barat, Provinsi Aceh, pada periode bulan Januari hingga Juni 2024.

Sampel penelitian ditentukan menggunakan teknik purposive sampling yang terdiri dari 15 unit rumah tinggal pengguna sistem PLTS atap. Kriteria inklusi sampel meliputi:

- Sistem PLTS atap telah beroperasi secara aktif minimal selama 1 tahun.
- Memiliki data riwayat penggunaan dan tagihan listrik PLN sebelum serta sesudah pemasangan PLTS.
- Pemilik rumah bersedia menjadi responden dan mengizinkan pengukuran teknis di lokasi.

Kapasitas terpasang pada unit sampel bervariasi antara 900 Wp hingga 4.000 Wp. Pengukuran parameter listrik dan lingkungan dilakukan pada hari cerah dalam jendela waktu pukul 09.00 hingga 15.00 WIB. Instrumen pengukuran yang digunakan meliputi:

- *Solar Power Meter* untuk mengukur tingkat iradiasi matahari ($\$/\text{m}^2\text{\$}$).

- *Clamp Meter* dan *Multimeter Digital* untuk mengukur arus (A) dan tegangan (V) DC/AC.
- *Termometer Infrared* untuk mengukur suhu permukaan modul surya (°C).
- *Data Logger* untuk merekam fluktuasi parameter secara kontinu.

Data kuantitatif yang terkumpul diolah menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel dan MATLAB. Parameter kinerja utama yang dihitung meliputi:

- **Performance Ratio (PR):** Rasio antara daya keluaran aktual terhadap daya teoritis yang seharusnya dihasilkan berdasarkan iradiasi terukur dan kapasitas nominal.
- **Yield Factor (YF):** Total energi listrik yang dihasilkan per kWp kapasitas terpasang per hari (kWh/kWp/hari).
- **Efisiensi Konversi Modul (η):** Persentase daya listrik yang dihasilkan dibandingkan dengan daya radiasi matahari yang diterima luas permukaan modul.

Analisis statistik deskriptif digunakan untuk menyajikan distribusi kinerja, sedangkan uji korelasi *Pearson* diterapkan untuk mengevaluasi hubungan antarvariabel lingkungan (iradiasi dan suhu) terhadap keluaran daya sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Sistem PLTS Atap Sampel

Berdasarkan hasil pendataan terhadap 15 unit rumah tinggal sampel, seluruhnya menggunakan konfigurasi sistem *on-grid* yang terhubung langsung dengan jaringan transmisi PLN. Rata-rata kapasitas terpasang adalah sebesar 2.150 Wp per unit rumah.

Parameter Sistem	Nilai / Keterangan
Jumlah Sampel Rumah	15 Unit
Konfigurasi Sistem	<i>On-Grid</i> (100%)
Rentang Kapasitas Terpasang	900 Wp – 4.000 Wp

Parameter Sistem	Nilai / Keterangan
Rata-rata Kapasitas Terpasang	2.150 Wp
Teknologi Modul Dominan	<i>Monocrystalline Silicon</i> (73,3%)
Usia Operasional Sistem	1 – 4 Tahun

Teknologi modul jenis *monocrystalline silicon* mendominasi penggunaannya hingga 73,3%, sedangkan sisanya menggunakan jenis *polycrystalline silicon*. Usia pakai sistem saat penelitian dilakukan berkisar antara 1 hingga 4 tahun.

Parameter Kinerja Aktual PLTS Atap

Pengukuran langsung di lapangan menghasilkan gambaran komprehensif mengenai parameter kinerja operasional PLTS atap di wilayah Aceh Barat.

Parameter Kinerja	Nilai Rata-Rata	Rentang (Min – Maks)
<i>Performance Ratio</i> (PR)	78,3%	69,1% – 87,4%
<i>Yield Factor</i> (YF)	4,1 kWh/kWp/hari	3,4 – 4,8 kWh/kWp/hari
Efisiensi Modul Aktual	15,2%	13,8% – 16,9%
Produksi Energi Bulanan	88,2 kWh/kWp	72,5 – 102,1 kWh/kWp

Rata-rata nilai *Performance Ratio* (PR) yang diperoleh dari seluruh sampel adalah sebesar 78,3%. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem PLTS atap di Aceh Barat beroperasi secara lumrah dan masuk dalam standar kisaran iklim tropis, yaitu antara 70% hingga 85% berdasarkan panduan IEA PVPS (2022). *Yield Factor* harian rata-rata sebesar 4,1 kWh/kWp/hari mengindikasikan akumulasi daya harian yang cukup optimal. Namun, efisiensi konversi aktual modul surya tercatat sebesar 15,2%, mengalami penurunan apabila dibandingkan dengan efisiensi standar pabrikan (STC) yang rata-rata mencapai 17,8%.

Analisis Faktor Penurunan Performa (*Loss Breakdown*)

Penurunan efisiensi dan kerugian daya (*losses*) dari kondisi nominal disebabkan oleh beberapa faktor lingkungan dan teknis instalasi.

- **Akumulasi Debu (*Dust Loss*):** Menyumbang penurunan kinerja terbesar, yaitu rata-rata sebesar 8,2%. Partikel debu dan kotoran tanah yang menempel pada permukaan kaca modul menghalangi penetrasi radiasi matahari secara optimal.
- **Rugi-Rugi Kabel dan Inverter:** Kerugian energi akibat hambatan dalam pengkabelan DC/AC serta efisiensi konversi inverter menyumbang penurunan sebesar 7,1%.
- **Ketidakcocokan Modul (*Mismatch Loss*):** Akibat variasi manufaktur atau orientasi sudut kemiringan atap yang tidak homogen, timbul rugi-rugi *mismatch* antar modul sebesar 6,4%.
- **Degradasi Modul:** Untuk sistem yang telah beroperasi lebih dari 2 tahun, teridentifikasi degradasi sel surya alami akibat paparan sinar UV dan cuaca sebesar 2,0%.

Secara keseluruhan, akumulasi kerugian daya sistem rata-rata mencapai 21,7% dari kapasitas nominal terpasang.

Analisis Korelasi Parameter Lingkungan

Uji korelasi *Pearson* mengonfirmasi dampak signifikan dari variabel iklim setempat terhadap daya yang dihasilkan:

- **Iradiasi vs Daya Keluaran:** Terdapat korelasi positif yang sangat kuat ($r = 0,94$; $p < 0,01$) antara tingkat iradiasi matahari dengan daya DC yang dihasilkan panel. Peningkatan intensitas radiasi matahari berbanding lurus dengan kenaikan daya puncak.
- **Suhu Panel vs Efisiensi Konversi:** Terdapat korelasi negatif yang kuat ($r = -0,87$) antara suhu permukaan panel dengan efisiensi konversi. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa setiap kenaikan suhu permukaan panel sebesar 1°C di atas kondisi standar (25°C) menyebabkan penurunan efisiensi sebesar 0,4% hingga 0,5%. Suhu permukaan panel di lokasi penelitian saat siang hari sering kali

mencapai \$48^{\circ}\text{C}\$ hingga \$56^{\circ}\text{C}\$, yang secara signifikan menurunkan tegangan keluaran (\$V_{oc}\$).

Dampak Perawatan dan Kelayakan Ekonomi

Tingginya rugi-rugi akibat akumulasi debu (8,2%) menegaskan pentingnya pemeliharaan rutin. Simulasi menunjukkan bahwa jadwal pembersihan permukaan panel secara berkala setiap dua minggu sekali dapat memulihkan Performance Ratio (PR) sebesar 5% hingga 7%.

Dari aspek keekonomian dan kemandirian energi, instalasi PLTS atap pada 15 rumah sampel terbukti mampu menyuplai antara 62% hingga 85% dari total kebutuhan listrik harian rumah tangga. Berdasarkan penghematan tagihan listrik bulanan, perkiraan masa pengembalian modal (*payback period*) investasi PLTS atap di Kabupaten Aceh Barat berkisar antara 7 hingga 9 tahun.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan analisis data pengukuran lapangan terhadap sistem PLTS atap pada rumah tinggal di Kabupaten Aceh Barat, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Rata-rata nilai *Performance Ratio* (PR) sistem PLTS atap terpasang mencapai 78,3% dengan *Yield Factor* harian sebesar 4,1 kWh/kWp/hari, yang menandakan bahwa kinerja sistem tergolong baik untuk wilayah beriklim tropis.
2. Efisiensi konversi aktual modul surya tercatat sebesar 15,2%, mengalami penurunan dari spesifikasi nominal pabrikan (17,8%) yang disebabkan oleh efek suhu operasional tinggi pada permukaan modul.
3. Faktor utama yang berkontribusi terhadap penurunan kinerja sistem secara berurutan adalah akumulasi debu (*dust loss* 8,2%), kerugian pengkabelan dan efisiensi inverter (7,1%), serta *mismatch* antar modul (6,4%).
4. Penerapan PLTS atap mampu mereduksi konsumsi listrik PLN sebesar 62–85% pada rumah tinggal sampel dengan durasi pengembalian investasi (*payback period*) selama 7 hingga 9 tahun.

Saran

Guna mengoptimalkan pemanfaatan dan kinerja sistem PLTS atap di masa mendatang, disarankan beberapa langkah teknis dan kebijakan:

1. **Bagi Pemilik PLTS:** Melakukan pembersihan permukaan modul secara berkala minimal 2 minggu sekali guna meminimalkan *dust loss* dan meningkatkan produksi energi hingga 7%.
2. **Bagi Instalatur Teknis:** Menggunakan kabel berstandar khusus solar (PV Cable) dengan ukuran penampang yang memadai serta memilih inverter berefisiensi tinggi untuk menekan rugi-rugi transmisi DC/AC.
3. **Bagi Pemerintah Daerah:** Mendorong program insentif, standarisasi instalasi, dan pelatihan teknis pemeliharaan bagi masyarakat untuk menjamin keandalan sistem PLTS atap jangka panjang di Aceh Barat.
4. **Bagi Penelitian Lanjutan:** Melakukan studi longitudinal minimal selama 5 tahun guna memperoleh pola degradasi modul secara presisi pada karakteristik iklim pesisir tropis.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. (2023). *Potensi Energi Surya di Indonesia*. Jakarta: BPPT Press.
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2021). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development* (3rd ed.). Elsevier.
- IEA PVPS. (2022). *Trends in Photovoltaic Applications 2022*. IEA Photovoltaic Power Systems Programme.
- Kementerian ESDM RI. (2021). *Peraturan Menteri ESDM Nomor 26 Tahun 2021 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Kurniawan, A., & Hidayat, R. (2023). Analisis Performa PLTS Atap Sistem On-Grid di Daerah Tropis Indonesia. *Jurnal Teknologi Elektro*, 14(2), 87-95.
- Muliadi, R., Rizal, S., & Fauzan, M. (2022). Pemetaan Potensi Energi Surya di Provinsi Aceh Menggunakan Data Satelit. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 18(3), 121-130.
- Patel, M. R. (2020). *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation* (3rd ed.). CRC Press.

- Quansah, D. A., Adaramola, M. S., & Mensah, L. D. (2021). Performance Degradation of c-Si and a-Si Thin-Film Photovoltaic Systems in Tropical Africa. *Energy Science & Engineering*, 9(5), 719-736.
- Rodrigues, E. M. G., Melicio, R., Mendes, V. M. F., & Catalão, J. P. S. (2020). Simulation of a Solar Cell Considering Single-Diode Equivalent Circuit Model. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(10), 369-373.
- Zainuddin, H., Shaari, S., Omar, A. M., & Bcecep, M. (2023). Effect of Dust and Soiling on Photovoltaic Panel Performance in Tropical Climate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 215, 110645.