

EVALUASI KINERJA SISTEM PLTS PADA GEDUNG LABORATORIUM TEKNIK REKAYASA SISTEM ELEKTRONIKA POLITEKNIK NEGERI PONTIANAK

Seno Septiadi¹, Danial², Yandri³

senoseptiadi@gmail.com¹, danial.noah@ee.untan.ac.id², yandri.hasan@ee.untan.ac.id³

Universitas Tanjungpura

ABSTRAK

Energi surya merupakan salah satu alternatif sumber energi terbarukan yang terus dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan listrik secara berkelanjutan. Gedung Laboratorium Teknik Rekayasa Sistem Elektronika Politeknik Negeri Pontianak telah memanfaatkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 2,94 kWp sejak tahun 2022. Sistem PLTS menggunakan konfigurasi hybrid dengan 14 modul surya berkapasitas 210 Wp per modul. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem tersebut dengan mengacu pada standar IEC 61724. Evaluasi dilakukan berdasarkan parameter kinerja teknis meliputi efisiensi sistem, rasio performansi, dan kehilangan energi. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa kinerja sistem PLTS masih jauh dari optimal, dengan rata-rata efisiensi sistem sebesar 1,557%, lebih rendah dibandingkan standar minimal efisiensi sistem sebesar 8%. Rasio performansi sistem berada pada rentang 8,35% hingga 14,43% dengan rata-rata 10,66%, jauh di bawah standar minimal 75%. Kehilangan energi array tercatat sebesar 3,767 kWh/kWp per hari, melebihi ambang batas ideal yaitu di bawah 2 kWh/kWp per hari. Faktor utama yang memengaruhi rendahnya kinerja sistem meliputi efisiensi modul surya yang rendah, orientasi dan sudut kemiringan panel yang kurang tepat, serta potensi degradasi teknis pada komponen modul. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi teknis lanjutan dan perbaikan sistem, seperti penyesuaian orientasi panel, pembersihan rutin, peningkatan sistem pendinginan pasif, serta pemeriksaan kualitas modul surya secara berkala untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem PLTS.

Kata Kunci: Pembangkit Listrik Tenaga Surya, Evaluasi Kinerja, Standar Iec, Efisiensi Sistem, Rasio Performansi.

ABSTRACT

Solar energy is one of the renewable energy alternatives that continues to be developed to meet electricity needs sustainably. The Laboratory of Electronic System Engineering at Politeknik Negeri Pontianak has utilized a 2.94 kWp Solar Power Plant since 2022. The Solar Power Plant system uses a hybrid configuration with 14 solar modules, each with a capacity of 210 Wp. This study aims to evaluate the performance of the system by referring to the IEC 61724 standard. The evaluation was carried out based on technical performance parameters, including system efficiency, performance ratio, and energy losses. The results reveal that the performance of the Solar Power Plant system remains significantly below the expected optimal level, with an average system efficiency of 1.557%, which is lower than the minimum standard system efficiency of 8%. The system's performance ratio ranges from 8.35% to 14.43%, with an average of 10.66%, which is significantly below the minimum standard of 75%. The recorded array energy loss is 3.767 kWh/kWp per day, exceeding the ideal threshold of less than 2 kWh/kWp per day. The main factors affecting the low system performance include low solar module efficiency, suboptimal panel orientation and tilt angle, as well as potential technical degradation of the module components. Therefore, further technical evaluation and system improvements are required, such as adjusting panel orientation, routine cleaning, enhancing passive cooling systems, and periodic inspection of solar module

quality to improve the efficiency and performance of the Solar Power Plant system.

Keywords: *Solar Power Plant, Performance Evaluation, Iec Standard, System Efficiency, Performance Ratio.*

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan energi semakin lama semakin meningkat sebagaimana laju pertumbuhan pembangunan. Begitu juga dengan kebutuhan energi listriknya, hampir di setiap bidang pembangunan membutuhkan energi listrik bagi proses kegiatannya. Selain industri, sektor-sektor lain juga sangat memerlukan energi listrik, salah satunya yaitu untuk keperluan rumah tangga. Peningkatan kebutuhan energi listrik ini perlu diimbangi dengan upaya pencarian sumber energi baru. Salah satu upaya ke arah itu yaitu dengan memanfaatkan energi surya.

Sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan dapat diperbarui seperti energi surya mulai dikembangkan. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu sistem yang mampu mengkonversi energi radiasi cahaya matahari menjadi energi listrik menggunakan modul semikonduktor fotovoltaik. Menurut Siaran Pers Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi Nomor 303.Pers/04/SJI/2021, Indonesia memiliki potensi energi surya mencapai 200.000 MW, sementara pemanfaatan energi surya sendiri saat ini baru sekitar 150 MW atau 0,08% dari potensinya.

Melihat kriteria tersebut di atas, penggunaan PLTS sebagai energi terbarukan merupakan suatu pilihan yang perlu dipertimbangkan. Perencanaan PLTS biasanya dilakukan melalui langkah perhitungan untuk tiap komponen yang dibutuhkan. Perencanaan dimulai dengan mengetahui terlebih dahulu besarnya daya peralatan listrik konsumen dan lama waktu pemakaian untuk mengetahui besarnya energi listrik. Selanjutnya melakukan perhitungan besarnya kapasitas tiap komponen PLTS yang mencakup modul surya, inverter, Solar Charge Controller, dan baterai.

Gedung Laboratorium Teknik Rekayasa Sistem Elektronika merupakan gedung 2 lantai di Politeknik Negeri Pontianak yang memiliki Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada rooftop-nya. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang terpasang berkapasitas 2,94 kWp dengan sistem hybrid yang terdiri dari 14 modul surya dengan kapasitas masing-masing sebesar 210 Wp, pembangunan PLTS ini selesai pada bulan Januari 2022.

Meskipun penerapan PLTS memiliki potensi besar dalam menyediakan energi bersih, kinerjanya sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kondisi lingkungan di tempat pemasangan, efisiensi konversi energi oleh panel surya, serta performa komponen pada sistem PLTS. Oleh karena itu, evaluasi kinerja sistem PLTS sangat diperlukan untuk mengetahui sejauh mana sistem ini mampu beroperasi sesuai dengan kapasitas rancangannya, mengidentifikasi potensi kendala pada sistem, dan mengetahui efisiensinya dalam mengonversi energi listrik.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem PLTS pada Gedung Laboratorium Teknik Rekayasa Sistem Elektronika Politeknik Negeri Pontianak dengan menganalisis efisiensi sistem, daya listrik yang dihasilkan, serta membandingkan kinerja aktual dengan perhitungan teoretis. Selain itu, penelitian ini juga akan mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi kinerja sistem serta memberikan rekomendasi untuk optimalisasi kinerja PLTS agar dapat beroperasi dengan lebih efisien.

METODE

Studi Literatur

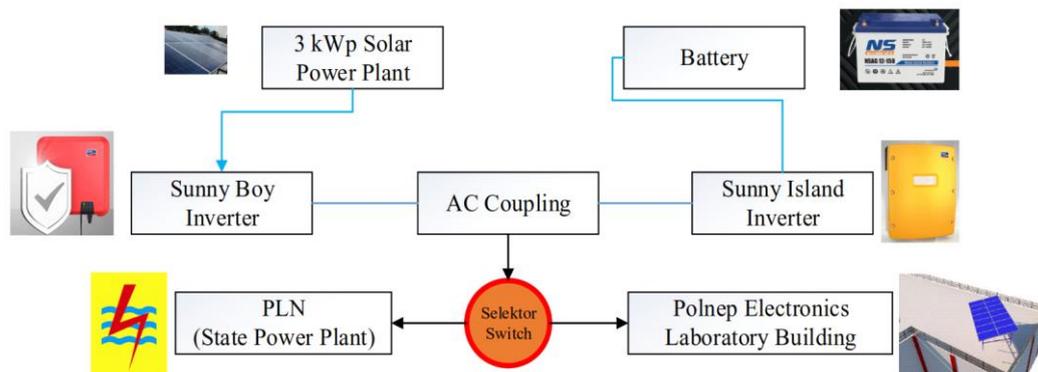
Melakukan studi literatur dengan mempelajari sistem dan cara kerja PLTS serta metode optimasi yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kinerja dan pemanfaatan PLTS dari buku, jurnal, dan bahan kuliah yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan.

Observasi Lapangan

Observasi lapangan dilakukan dengan meninjau lokasi objek penelitian. Pada tahap ini, dilakukan peninjauan umum terhadap area instalasi serta wawancara dengan penanggung jawab sistem PLTS untuk memperoleh informasi teknis terkait spesifikasi dan jenis sistem yang digunakan. Data yang dikumpulkan mencakup spesifikasi komponen sistem, konfigurasi dan jenis sistem PLTS, prosedur pemeliharaan rutin, serta data teknis berupa kondisi fisik instalasi, model pemasangan, sudut kemiringan, dan orientasi modul surya.

Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan dua metode, yaitu observasi lapangan secara komprehensif untuk mengumpulkan data primer, dan pengukuran parameter kinerja PLTS untuk memperoleh data sekunder. Pengukuran parameter kinerja PLTS dilakukan dengan menggunakan data keluaran dari SMA (*Sunny, Mesh, Anlagentechnik*) *Energy Meter* yang terintegrasi dengan Inverter *Sunny Boy* dan *Sunny Island*. Perangkat ini mencatat parameter energi listrik secara *real-time*, termasuk total energi aktif yang dihasilkan oleh panel surya, statistik pengisian dan penggunaan baterai, serta memungkinkan pemantauan akurat terhadap performa sistem melalui komunikasi data yang terhubung langsung dengan inverter. Adapun skema diagram PLTS yang terpasang adalah sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Sistem PLTS

Pengolahan Data

Melakukan pengolahan data hasil pengukuran secara keseluruhan menurut teori dan literatur yang digunakan. Data yang diperoleh pada tahap sebelumnya diolah secara kualitatif dan kuantitatif. Data yang diolah secara kualitatif mengacu pada Buku Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS *Off-Grid* yang diterbitkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Data juga diolah secara kuantitatif mengacu pada standar internasional yang dikeluarkan oleh Komisi Elektroteknik Internasional, yaitu standar IEC 61724, IEC 61215, IEC 61683, dan IEC 61427 untuk mendapatkan nilai *Reference Yield* (Y_r), *Array Yield* (Y_a), *Final Yield* (Y_f), efisiensi modul surya, inverter, baterai, sistem, Rasio Performansi, dan kehilangan energi pada sistem dan *array*.

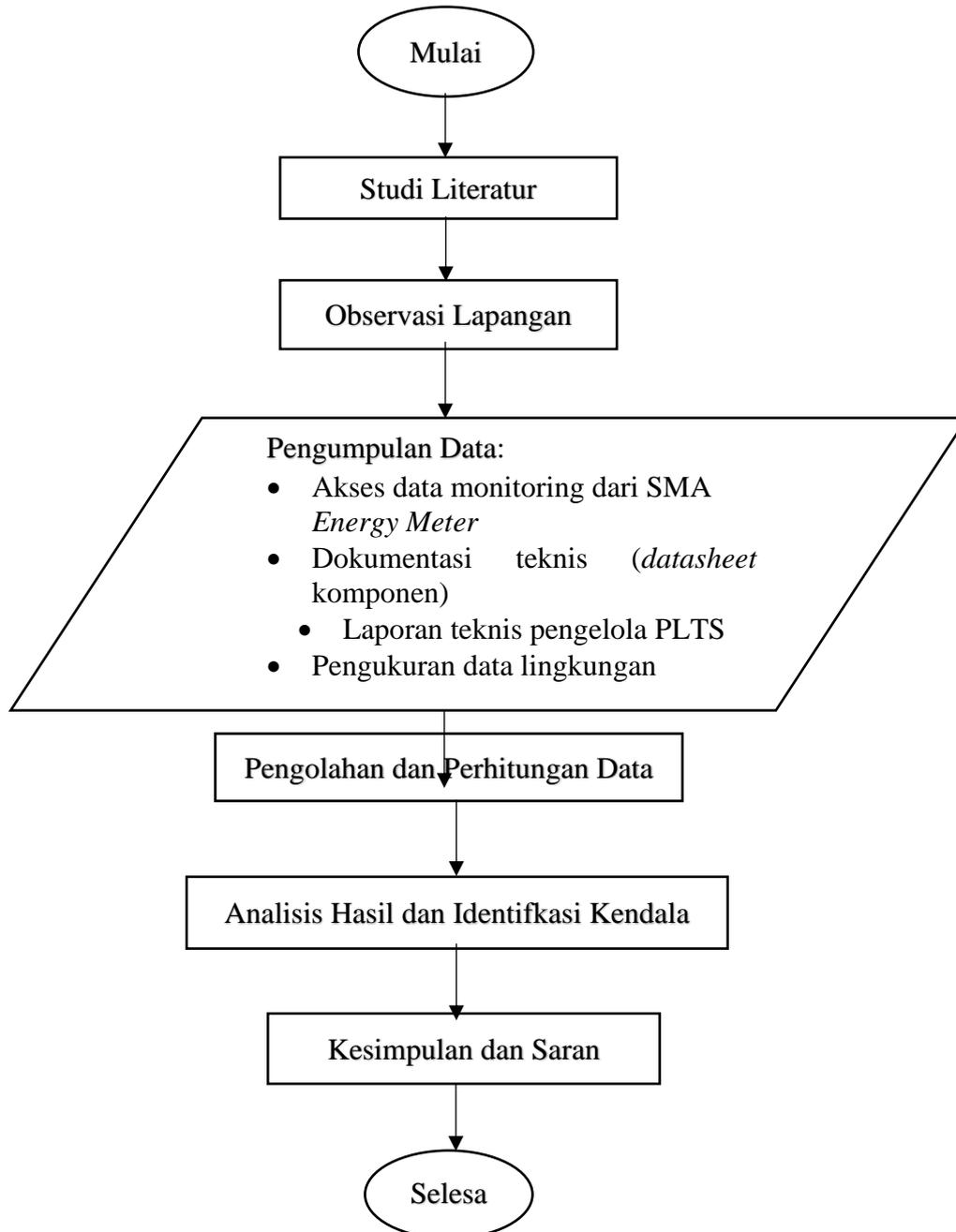
Perhitungan dan Analisis

Melakukan perhitungan dan analisis terhadap data hasil olahan untuk mengidentifikasi kendala, menilai kinerja aktual sistem PLTS, serta membandingkannya dengan kinerja acuan secara teoretis.

Kesimpulan dan Rekomendasi

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan terkait kinerja sistem PLTS dan memberikan rekomendasi untuk peningkatan kinerja dan optimasi sistem agar PLTS dapat bekerja dengan efisien dan optimal.

Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

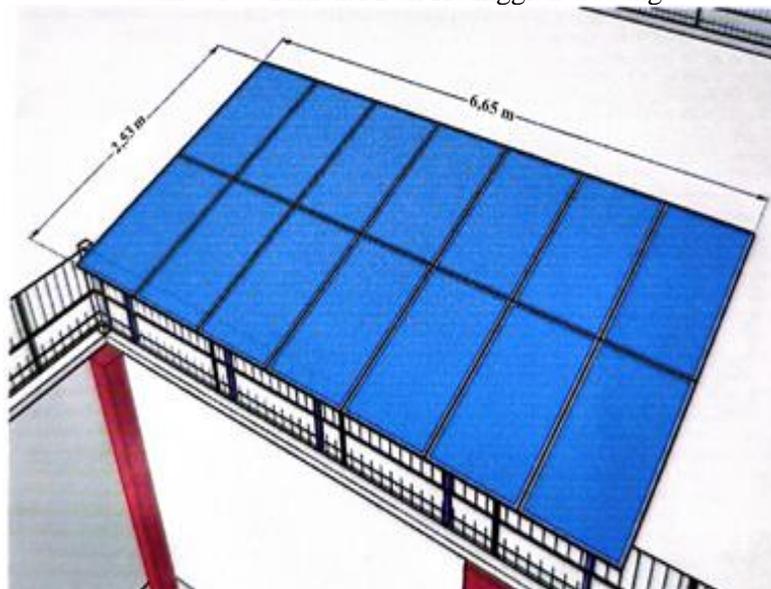
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Lapangan

Lokasi site PLTS berada di Gedung Laboratorium Teknik Rekayasa Sistem Elektronika Politeknik Negeri Pontianak yang terletak dengan ketinggian 6,75 m dengan bentuk site seperti yang ditunjukkan pada gambar 3 dan 4. Kondisi ini memungkinkan modul surya untuk terhindar dari risiko shading atau bayangan. Shading atau bayangan yang menutupi permukaan modul surya dapat mengakibatkan penurunan daya output yang signifikan.



Gambar 3. Dimensi Dan Ketinggian Gedung



Gambar 4. Dimensi dan ukuran panel surya terpasang

Tabel 1. Hasil Observasi Lapangan

No	Data dan Informasi yang Dibutuhkan	Keterangan
1	Koordinat lokasi <i>site</i>	-0,05458° LS dan 109,34566° BT
2	Jenis lahan	Lantai dak beton
3	Kelengkapan komponen: a. Panel surya b. <i>Solar Charge Controller</i> c. Inverter d. Baterai e. <i>Combiner box</i> f. Sistem <i>monitoring</i> g. Penangkal petir dan <i>Grounding</i>	14 unit Solar Quest type SQZB210P-48 210W, 25.11V, 8,53A. MPPT <i>Charge Controller</i> yang terintegrasi dengan inverter Sunny Boy SB2.0-1VL-40 dan Sunny Island SI4.4M-13 8 unit baterai NS Accelerate NSAG 12V 100Ah Ada (terpasang pada rangka panel surya) SMA <i>Energy Meter</i> WiFi yang terhubung dengan inverter Ada terintegrasi dengan penangkal petir dan sistem <i>grounding</i> yang terinstal di gedung
4	Sudut azimuth (orientasi) panel surya	Tenggara
5	Sudut kemiringan panel surya	10°
6	Dimensi panel surya: a. Panjang b. Lebar Luas per modul surya Luas total modul surya	126,5 cm 95 cm = 126,5 cm x 95 cm = 12.017 cm ² = 1,2 m ² = 14 unit x 1,2 m ² = 16,8 m ²

Aspek Kelayakan Teknis

1. Temperatur Lingkungan dan Temperatur Sel Surya

Temperatur lingkungan sangat memengaruhi kinerja sistem PLTS, meskipun pengaruhnya bersifat tidak langsung. Suhu udara yang tinggi dapat mempercepat kenaikan temperatur sel surya, terutama saat sistem terpapar radiasi matahari dalam durasi panjang tanpa pendinginan yang memadai.

Tabel 2. Temperatur Ling

<i>Tanggal</i>	<i>Temperatur minimum (°C)</i>	<i>Temperatur maksimum (°C)</i>	<i>Temperatur rata-rata (°C)</i>
10 April 2025	25,0	34,6	28,8
11 April 2025	24,6	33,4	27,1
12 April 2025	24,4	33,4	27,5
13 April 2025	24,7	33,2	27,5
14 April 2025	24,7	28,6	26,1

Sumber: *bmkg.go.id*

Sementara itu, pengaruh temperatur sel surya cukup signifikan terhadap kinerja panel surya. Ketika modul surya terpapar sinar matahari, suhu sel surya meningkat dan

menyebabkan penurunan efisiensi konversi energi. Untuk panel jenis polikristalin, setiap kenaikan suhu 1°C dapat menurunkan output daya sebesar sekitar 0,48%.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Temperatur Sel Surya

<i>Tanggal</i>	<i>Temperatur Puncak Sel Surya (°C)</i>
10 April 2025	59,8
11 April 2025	54,1
12 April 2025	57,0
13 April 2025	56,0
14 April 2025	52,3

Berdasarkan pengambilan data temperatur sel surya yang dilakukan selama lima hari berturut-turut pada pukul 12:00 siang, tercatat bahwa temperatur sel surya berkisar antara 52,3°C hingga 59,8°C. Secara teoretis, dalam kondisi standar pengujian (Standard Test Conditions/STC), temperatur sel surya yang ideal untuk pengoperasian maksimal adalah 25°C.

Kenaikan temperatur di atas nilai standar ini dapat berdampak langsung terhadap penurunan efisiensi konversi energi panel surya. Jika dibandingkan dengan kondisi STC, temperatur maksimum yang tercatat yaitu 59,8°C berarti terjadi kenaikan temperatur sebesar 34,8°C, sehingga potensi penurunan kinerja akibat kenaikan temperatur ini dapat mencapai 16,7% pada suhu puncaknya. Penurunan ini cukup signifikan dan menunjukkan bahwa suhu tinggi merupakan salah satu faktor utama yang menghambat pencapaian output daya optimal.

2. Data Output Energi dari SMA Energy Meter

Basis data yang diambil dalam penelitian ini penulis melakukan pengambilan data di web interface SMA Energy Meter dengan memanfaatkan data monitoring real-time yang terhubung langsung ke inverter Sunny Boy dan Sunny Island.

Tabel 4. Data SMA Energy Meter selama 5 hari

<i>Tanggal</i>	<i>Energi Output DC Panel Surya (kWh)</i>	<i>Energi Output AC Inverter (kWh)</i>
10 April 2025	1,173	1,103
11 April 2025	1,498	1,423
12 April 2025	1,311	1,258
13 April 2025	1,329	1,249
14 April 2025	1,353	1,245

3. Energi Yield

3. Energi yield

Energi yield adalah indikator kinerja yang menunjukkan jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh sistem per satuan kapasitas terpasang dalam periode waktu tertentu. Energi yield menjadi indikator penting dalam evaluasi kinerja sistem PLTS karena mencerminkan kemampuan sistem dalam menghasilkan listrik berdasarkan potensi energi matahari yang tersedia di lokasi instalasi.

a. Reference Yield (Yr)

Tabel 5. Reference Yield

<i>Tanggal</i>	<i>Reference Yield (jam/hari)</i>
10 April 2025	2,6
11 April 2025	5,8
12 April 2025	3,8
13 April 2025	4,0
14 April 2025	4,9

Sumber: bmkgo.go.id

b. Array Yield (Y_a)

$$Y_a = \frac{E_{dc}}{P_{PV(rated)}} \text{ [kWh/kWp]}$$

Tabel 6. Array Yield

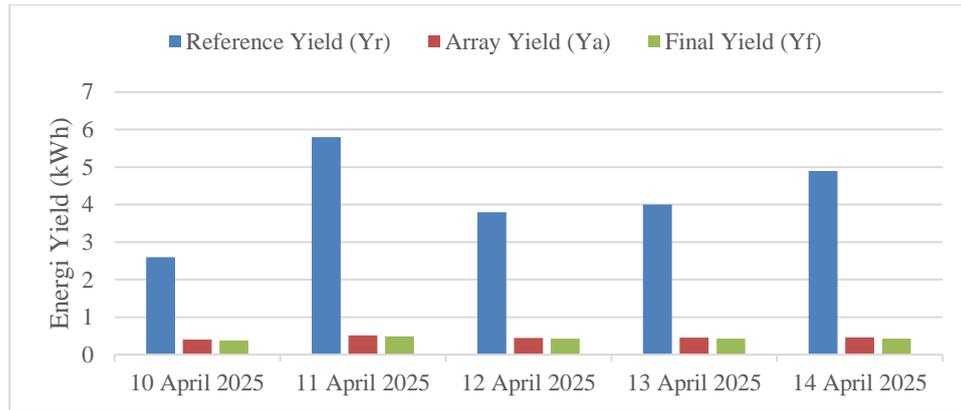
<i>Tanggal</i>	<i>Array Yield (kWh/kWp)</i>
10 April 2025	0,399
11 April 2025	0,509
12 April 2025	0,446
13 April 2025	0,452
14 April 2025	0,460

c. Final Yield (Y_f)

$$Y_f = \frac{E_{ac}}{P_{PV(rated)}} \text{ [kWh/kWp]}$$

Tabel 6. Array Yield

<i>Tanggal</i>	<i>Array Yield (kWh/kWp)</i>
10 April 2025	0,399
11 April 2025	0,509
12 April 2025	0,446
13 April 2025	0,452
14 April 2025	0,460



Gambar 5. Grafik Energi Yield

Gambar 5 menunjukkan grafik hasil perhitungan tiga parameter energi yield, yaitu *Reference Yield* (Yr), *Array Yield* (Ya), dan *Final Yield* (Yf) selama periode lima hari pengamatan. *Reference Yield* (Yr) merepresentasikan potensi energi matahari yang tersedia, sedangkan *Array Yield* (Ya) menunjukkan energi aktual yang dihasilkan oleh panel surya per satuan kapasitas terpasang, dan *Final Yield* (Yf) merupakan energi akhir yang dihasilkan oleh sistem setelah melalui proses konversi inverter.

Perbandingan ketiga parameter *yield* ini menunjukkan bahwa kinerja sistem PLTS secara umum mengikuti tren intensitas penyinaran matahari harian. Namun demikian, terdapat perbedaan cukup signifikan antara *Reference Yield* dengan *Array Yield* dan *Final Yield*. Selisih ini menunjukkan adanya rugi-rugi sistem baik pada sisi panel surya maupun pada proses konversi inverter, yang dapat disebabkan oleh faktor teknis seperti efisiensi panel, inverter, shading sebagian, atau faktor lingkungan seperti suhu tinggi yang menurunkan efisiensi modul.

Secara umum, hasil analisis menunjukkan bahwa performa sistem PLTS masih tergolong rendah jika dibandingkan dengan potensi yang tersedia. Hal ini dapat menjadi indikasi perlunya evaluasi teknis lebih lanjut, terutama pada aspek instalasi panel surya, efisiensi inverter, serta kondisi sambungan dan kebersihan permukaan panel, agar sistem dapat beroperasi lebih optimal dan mendekati nilai ideal sesuai kapasitas terpasang.

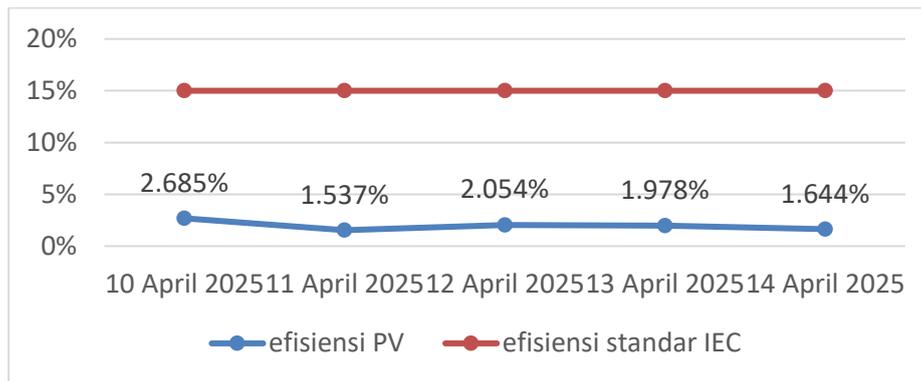
1. Efisiensi Komponen

a. Efisiensi Modul Surya (η_{pv})

$$\eta_{pv} = \frac{E_{dc}}{G \times A_m} \cdot 100 \%$$

Tabel 8. Efisiensi Modul Surya

Tanggal	Efisiensi Modul Surya (%)
10 April 2025	2,685
11 April 2025	1,537
12 April 2025	2,054
13 April 2025	1,978
14 April 2025	1,644



Gambar 6. Grafik perbandingan efisiensi PV dan standar IEC

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 8, diperoleh nilai efisiensi modul surya dari tanggal 10 hingga 14 April 2025, dengan rentang nilai antara 1,537% hingga 2,685%. Jika dibandingkan dengan standar efisiensi panel surya yang berlaku secara internasional (IEC 61215) maupun praktik umum di Indonesia, hasil pengujian ini berada jauh di bawah standar. Secara umum, efisiensi minimum modul surya yang umum digunakan adalah $\geq 15\%$ untuk panel polikristalin.

Rendahnya efisiensi ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain kondisi modul yang sudah mengalami degradasi, pengaruh suhu yang tinggi, intensitas radiasi matahari yang rendah saat pengujian, kesalahan dalam pemasangan atau pengukuran, atau kualitas modul yang memang tidak memenuhi standar industri.

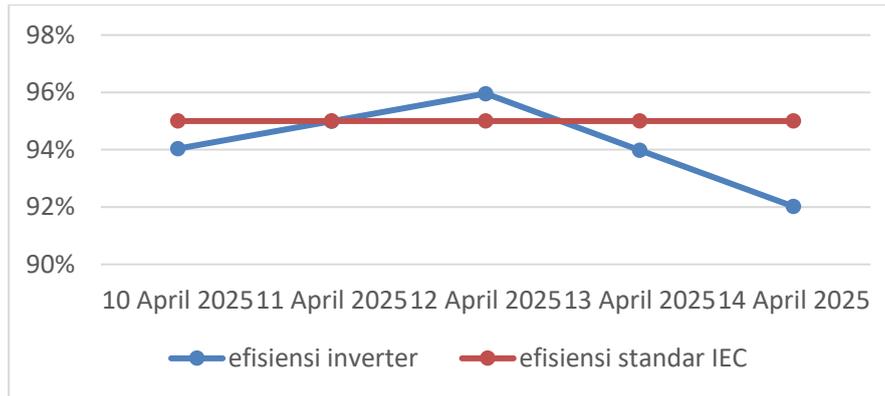
Analisis ini menunjukkan bahwa sistem PLTS yang diuji perlu dilakukan pemeriksaan lebih lanjut, baik dari segi pemeliharaan, pengukuran ulang dalam kondisi ideal, maupun kemungkinan penggantian modul dengan spesifikasi teknis yang lebih baik agar kinerja sistem dapat mendekati performa standar dan optimal secara teknis.

b. Efisiensi Inverter (η_{inv})

Efisiensi inverter merupakan sebuah perbandingan antara output listrik dari inverter dengan output listrik dari panel surya.

Tabel 9. Efisiensi Inverter

<i>Tanggal</i>	<i>Energi Output DC Panel Surya (kWh)</i>	<i>Energi Output AC Inverter (kWh)</i>	<i>Efisiensi Inverter</i>
<i>10 April 2025</i>	1,173	1,103	94%
<i>11 April 2025</i>	1,498	1,423	95%
<i>12 April 2025</i>	1,311	1,258	96%
<i>13 April 2025</i>	1,329	1,249	94%
<i>14 April 2025</i>	1,353	1,245	92%



Gambar 7. Grafik perbandingan efisiensi inverter dan standar IEC

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 9, efisiensi inverter diukur selama lima hari berturut-turut, yaitu dari tanggal 10 hingga 14 April 2025. Nilai efisiensi inverter yang diperoleh berkisar antara 92% hingga 96%. Nilai rata-rata efisiensi inverter dari pengukuran ini adalah sebesar 94,2%. Jika dibandingkan dengan standar efisiensi inverter secara umum, yaitu minimal 95% untuk kategori layak pakai dan $\geq 97\%$ untuk kategori sangat baik sebagaimana ditetapkan dalam referensi internasional seperti IEC 61683 dan praktik umum dalam proyek PLTS di Indonesia, maka efisiensi inverter yang diuji dapat dikategorikan cukup baik, meskipun belum sepenuhnya memenuhi standar efisiensi optimal.

c. Efisiensi Baterai (η_{Ah})

Efisiensi baterai merupakan perbandingan antara energi yang dapat dikeluarkan (*discharge*) dengan energi yang diperlukan saat pengisian ulang (*charging*). Dalam pengujian ini, efisiensi dihitung berdasarkan data energi pengisian dari *State of Charge* (SoC) 30% hingga 90%, serta kapasitas nominal baterai.

Berdasarkan hasil monitoring SMA *Energy Meter*, energi yang digunakan untuk mengisi baterai dari SoC 30% hingga 90% adalah sebesar:

$$E_{charge} = 6.900 \text{ Wh}$$

Rentang SoC 30% hingga 90% berarti 60% dari kapasitas total. Maka, secara teoretis, energi yang dapat dikeluarkan oleh baterai pada rentang tersebut adalah:

$$E_{discharge} = 60\% \times 9.600 = 5.760 \text{ Wh}$$

Sehingga bisa diperoleh nilai efisiensi baterai sebagai berikut:

$$\eta_{Ah} = \frac{E_{discharge}}{E_{charge}} \times 100\% = \frac{5.760}{6.900} \times 100\% = 83,48\%$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi baterai berada pada kisaran 83%, yang masih dalam rentang efisiensi wajar untuk baterai gel VRLA (*Valve-Regulated Lead-Acid*). Jika dibandingkan dengan standar efisiensi baterai timbal-asam yang tercantum dalam IEC 61427, yaitu berkisar antara 75% hingga 85%, maka nilai efisiensi tersebut dapat dikategorikan sebagai baik dan mendekati batas atas standar efisiensi. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem penyimpanan energi masih berfungsi secara optimal, meskipun tetap perlu dilakukan pemantauan berkala untuk mengantisipasi potensi

penurunan efisiensi akibat faktor umur dan siklus pemakaian.

2. Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem merupakan hasil perkalian dari efisiensi setiap komponen utama dalam sistem PLTS, yaitu efisiensi modul surya, inverter, dan baterai. Nilai efisiensi sistem menunjukkan seberapa besar proporsi energi dari radiasi matahari yang berhasil dikonversi dan disalurkan ke beban akhir.

$$\begin{aligned} \eta_{sistem} &= \eta_{pv} \times \eta_{inverter} \times \eta_{Ah} \\ &= 1,98\% \times 94,2\% \times 83,48\% = 1,557\% \end{aligned}$$

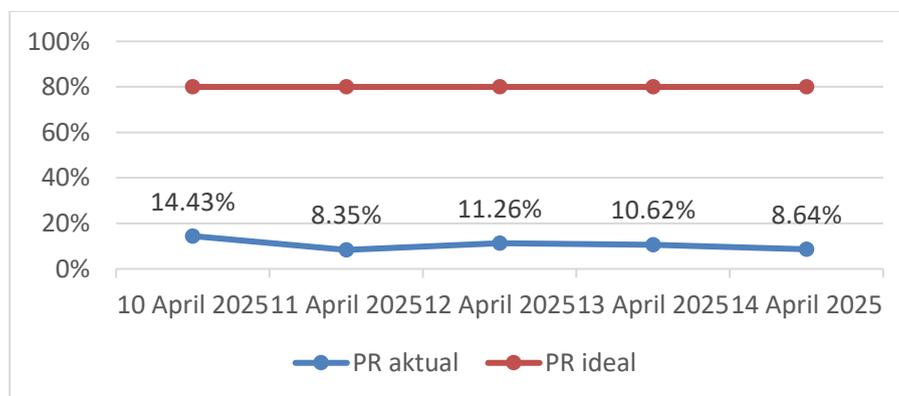
Efisiensi sistem PLTS secara keseluruhan diperoleh sebesar 1,557%. Nilai ini mencerminkan bahwa dari seluruh energi matahari yang diterima modul surya, hanya sekitar 1,557% yang berhasil dimanfaatkan sebagai energi listrik yang disalurkan ke beban. Nilai efisiensi sistem yang rendah sebagian besar disebabkan oleh efisiensi modul surya yang juga rendah, serta adanya rugi-rugi energi dalam proses penyimpanan dan konversi, khususnya pada tahap pengisian baterai dan konversi arus oleh inverter.

3. Rasio Performansi

Rasio performansi adalah indikator yang menunjukkan seberapa baik sistem PLTS beroperasi dibandingkan dengan kinerja idealnya dalam kondisi nyata. Rasio performansi menunjukkan perbandingan antara energi listrik aktual yang dihasilkan oleh sistem dengan potensi energi listrik yang seharusnya dapat dihasilkan berdasarkan besarnya iradiasi matahari yang diterima oleh modul surya dengan memperhitungkan seluruh kerugian sistem yang terjadi selama proses konversi energi surya menjadi energi listrik. Rasio ini dihitung sebagai perbandingan antara *final yield* (Y_f) dan *reference yield* (Y_r).

Tabel 10. Rasio Performansi

Tanggal	Reference Yield	Final Yield	Rasio Performansi (%)
10 April 2025	2,6	0,375	14,43
11 April 2025	5,8	0,484	8,35
12 April 2025	3,8	0,428	11,26
13 April 2025	4,0	0,425	10,62
14 April 2025	4,9	0,423	8,64



Gambar 8. Grafik perbandingan rasio performansi aktual dan ideal

Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada Tabel 10, nilai rasio performansi sistem PLTS selama lima hari berturut-turut berada pada rentang 8,35% hingga 14,43%. Jika dibandingkan dengan standar performa sistem fotovoltaik berdasarkan IEC 61724, nilai rasio performansi yang baik umumnya berada pada kisaran 75% hingga 90% untuk sistem dapat beroperasi secara optimal. Beberapa publikasi teknis seperti laporan dari IEA PVPS, EPIA, dan kajian oleh GIZ juga menyebutkan bahwa rasio performansi yang wajar untuk sistem PLTS berada dalam rentang 60% hingga 80%, tergantung pada kualitas instalasi, komponen, dan kondisi lingkungan. Dengan demikian, nilai rasio performansi yang diperoleh dari pengujian ini berada jauh di bawah standar minimum, yang mengindikasikan adanya kehilangan energi yang sangat signifikan dalam sistem.

Rendahnya nilai rasio performansi ini dapat disebabkan oleh sejumlah faktor teknis maupun lingkungan, seperti efisiensi modul surya yang rendah, penurunan performa akibat kotoran atau *shading* pada panel, kerugian daya pada kabel dan sambungan, serta efisiensi komponen lain yang belum optimal. Selain itu, faktor pemeliharaan dan kondisi umum instalasi sistem juga sangat berpengaruh terhadap penurunan performa.

4. Kehilangan Energi

a. Kehilangan Energi Sistem (L_s)

Kehilangan energi sistem disebabkan oleh kerja konversi inverter DC menjadi AC, yang ditentukan oleh perbedaan antara *array yield* dan *final yield*.

Tabel 11. Kehilangan Energi Sistem

<i>Tanggal</i>	<i>Array Yield</i>	<i>Final Yield</i>	<i>Kehilangan Energi Sistem (kWh/kWp)</i>
10 April 2025	0,399	0,375	0,0238
11 April 2025	0,509	0,484	0,0255
12 April 2025	0,446	0,428	0,0180
13 April 2025	0,452	0,425	0,0272
14 April 2025	0,460	0,423	0,0367

Nilai kehilangan energi sistem relatif kecil ($< 0,05$ kWh/kWp) menunjukkan bahwa proses konversi energi oleh inverter dalam sistem PLTS masih berjalan dengan efisien. Namun demikian, variasi antar hari dapat mengindikasikan adanya pengaruh dari beban yang berubah-ubah, temperatur lingkungan, kualitas sinyal inverter, atau faktor teknis lain yang memengaruhi kinerja konversi energi. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa sistem PLTS yang diuji masih memiliki tingkat kehilangan energi yang tergolong rendah dan dapat diterima, meskipun tetap diperlukan evaluasi berkala untuk menjaga stabilitas dan efisiensi sistem dalam jangka panjang.

b. Kehilangan Energi Array (L_{pv})

Kehilangan energi *array* merupakan perbedaan antara *reference yield* (Y_r) dengan *array yield* (Y_a). Kehilangan energi *array* diasumsikan mewakili kerugian yang disebabkan oleh temperatur modul surya, kabel, *shading*, debu, dan hal lain yang dapat menyebabkan penurunan kinerja *array*.

Tabel IV.13 Kehilangan Energi Array

<i>Tanggal</i>	<i>Reference Yield</i>	<i>Array Yield</i>	<i>Kehilangan Energi Array (kWh/kWp)</i>
<i>10 April 2025</i>	2,6	0,399	2,201
<i>11 April 2025</i>	5,8	0,509	5,290
<i>12 April 2025</i>	3,8	0,446	3,354
<i>13 April 2025</i>	4,0	0,452	3,548
<i>14 April 2025</i>	4,9	0,460	4,440

Secara teknis, kehilangan energi array mencerminkan kerugian yang berasal dari berbagai faktor, termasuk kenaikan temperatur modul surya, *shading* parsial atau total, akumulasi debu dan kotoran pada permukaan modul, penurunan kualitas kabel dan konektor, serta degradasi atau kerusakan fisik pada modul PV. Selama periode pengamatan dari tanggal 10 hingga 14 April 2025, nilai kehilangan energi *array* tercatat cukup signifikan, dengan nilai rata-rata 3,767 kWh/kWp. Nilai kehilangan energi yang berada di atas 3 kWh/kWp merupakan indikator bahwa performa *array* PV yang diteliti mengalami kerugian yang tergolong tinggi, bahkan melebihi batas toleransi umum untuk sistem yang beroperasi normal. Sebagai perbandingan, kehilangan energi array yang masih dalam kondisi optimal biasanya berkisar di bawah 1,5–2,0 kWh/kWp per hari, tergantung lokasi dan kondisi cuaca.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi dan analisis teknis terhadap sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 2,94 kWp yang terpasang di Gedung Laboratorium Teknik Rekayasa Sistem Elektronika Politeknik Negeri Pontianak, dapat disimpulkan beberapa poin penting sebagai berikut:

1. Kinerja aktual sistem PLTS menunjukkan performa yang jauh dari optimal, dengan rata-rata efisiensi sistem hanya sebesar 1,557%, yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan standar komersial (>10%). Hal ini terutama disebabkan oleh rendahnya efisiensi modul surya (rata-rata 1,98%) dibandingkan dengan standar IEC ($\geq 15\%$ untuk polikristalin).
2. Rasio performansi sistem (Performance Ratio/PR) berada pada rentang 8,35% hingga 14,43%, dengan rata-rata 10,66%, yang sangat rendah dibandingkan nilai ideal (70%–90% menurut IEC 61724). Ini menunjukkan bahwa hanya sebagian kecil dari potensi energi matahari yang berhasil dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.
3. Kehilangan energi array (LPV) tercatat cukup signifikan, dengan nilai rata-rata sebesar 3,767 kWh/kWp per hari, melebihi ambang batas ideal yaitu di bawah 2 kWh/kWp per hari. Ini mengindikasikan adanya kerugian besar pada tahap konversi energi oleh modul surya sebelum masuk ke inverter.
4. Kehilangan energi sistem (LS) akibat konversi dari DC ke AC oleh inverter relatif kecil, dengan rata-rata 0,0263 kWh/kWp, dan efisiensi inverter rata-rata mencapai 94,2%, yang masih dalam kategori baik, meskipun belum sepenuhnya memenuhi standar efisiensi optimal ($\geq 95\%$).
5. Faktor-faktor utama penyebab penurunan kinerja sistem meliputi:
 - Potensi kesalahan dalam konfigurasi rangkaian panel surya atau sambungan kabel yang kurang baik, sehingga efisiensi panel surya menurun.

- Degradasi modul surya dan kemungkinan kerusakan fisik (delaminasi, microcrack).
- Soiling losses akibat penumpukan debu pada modul yang tidak memiliki sudut kemiringan optimal untuk pembersihan alami.
- Potensi mismatch losses, kerusakan bypass diode dan masalah orientasi arah/kemiringan yang tidak sesuai standar desain PLTS.
- Tidak adanya sistem monitoring lingkungan yang terintegrasi, seperti pyranometer untuk pengukuran iradiasi matahari dan anemometer untuk kecepatan angin, menyebabkan ketidakakuratan dalam pemantauan kondisi lingkungan aktual yang sangat memengaruhi kinerja sistem

DAFTAR PUSTAKA

- Jed, M.E.H, et al., 2020. Performance analysis of 954,809 kWp PV array of Sheikh Zayed solar power plant (Nouakchott, Mauritania). *Renewable Energy Focus*, 32, pp.45-54.
- Wasistha, B. D., Salam, B. E. M., Wibawa, D. I., & Rizal, M., 2021. Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off Grid di Laboratorium Teknik Listrik Politeknik Negeri Jakarta. *Seminar Nasional Teknik Elektro*, 6(1), pp.76-82.
- Muna, W.Z.Z., 2022. Studi Evaluasi PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) Off-Grid di Gedung Jurusan Teknik Politeknik Negeri Jember. Skripsi, Politeknik Negeri Jember.
- Harun, E.H, Ahmad, F. & Ilham, J., 2023. Pengaruh Temperatur Permukaan Panel Surya Terhadap Kapasitas Daya yang Dihasilkan. *Journal Of Renewable Energy Engineering* 1(2), pp.25-28.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 2021. IEC 61215-1: Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules – Design Qualification and Type Approval – Part 1: Test Requirements. Geneva: IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 1999. IEC 61683: Photovoltaic Systems – Power Conditioners – Procedure for Measuring Efficiency. Geneva: IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 2013. IEC 61427-1: Secondary Cells and Batteries for Renewable Energy Storage – General Requirements and Methods of Test – Part 1: Photovoltaic Off-Grid Application. Geneva: IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 2021. IEC 61724-1: Photovoltaic System Performance – Part 1: Monitoring. Geneva: IEC.
- IEA PVPS Task 13, 2018. Performance and Reliability of Photovoltaic Systems: Summary Report. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme.
- Mekhilef, S., Saidur, R. & Safari, A. 2012. A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(1), pp.452–460.
- Jordan, D.C. & Kurtz, S.R., 2012. Photovoltaic Degradation Rates—An Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21(1), pp.12–29.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2017. Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-grid. Jakarta: Direktorat Jenderal EBTKE.