

## EVALUASI KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ON-GRID BERBASIS PANEL SURYA MONOCRYSTALLINE DI KOTA PONTIANAK

Rodo Manurung<sup>1</sup>, Yandri<sup>2</sup>, Kho Hie Khwee<sup>3</sup>

[d1021201043@student.untan.ac.id](mailto:d1021201043@student.untan.ac.id)<sup>1</sup>, [yandri.hasan@ee.untan.ac.id](mailto:yandri.hasan@ee.untan.ac.id)<sup>2</sup>, [khohiekhwee@untan.ac.id](mailto:khohiekhwee@untan.ac.id)<sup>3</sup>

Universitas Tanjungpura

### ABSTRAK

Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan geografis dan parameter instalasi fisik, khususnya di wilayah khatulistiwa. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem PLTS on-grid berkapasitas 3,76 kWp yang menggunakan delapan modul surya monokristalin 470 Wp di Kota Pontianak. Pemantauan dan evaluasi kinerja dilakukan selama 61 hari (Agustus hingga September 2025) dengan berfokus pada parameter Global Tilt Irradiance ( $H_T$ ), Final Yield ( $Y_F$ ), Reference Yield ( $Y_R$ ), Performance Ratio (PR), dan Capacity Utilization Factor (CUF). Metodologi perhitungan parameter tersebut juga secara spesifik memperhitungkan faktor astronomis, geometris, serta nilai albedo permukaan atap seng sebesar 0,20. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem menghasilkan nilai  $Y_F$  rata-rata sebesar 3,2041 jam/hari dan  $Y_R$  sebesar 4,7467 jam/hari. Adapun persentase Performance Ratio (PR) yang dicapai adalah sebesar 68,47% dengan tingkat CUF sebesar 13,35%. Penurunan rasio kinerja sistem dari kondisi ideal diidentifikasi berasal dari akumulasi rugi-rugi (losses) operasional dan lingkungan. Faktor penyumbang penurunan kinerja tersebut meliputi instalasi sudut kemiringan (tilt angle) sebesar 20,25° yang menyimpang curam dari sudut optimal wilayah ekuator (5°), efek bayangan (shading) dari vegetasi di sisi barat pada sore hari, tingginya suhu operasional modul di ekosistem dataran rendah, serta faktor degradasi modul sekitar 1,2% setelah tiga tahun beroperasi. Sebagai langkah optimalisasi, penyesuaian sudut kemiringan modul menjadi lebih landai, pemantauan suhu serta kinerja inverter secara berkala, dan penggunaan periode data pengamatan yang lebih representatif sangat direkomendasikan untuk pengembangan sistem PLTS di masa mendatang.

**Kata Kunci:** PLTS On-Grid, Performance Ratio, Tilt Angle, Kinerja Sistem, Kota Pontianak.

### ABSTRACT

*The performance of Solar Power Plants (PLTS) is highly influenced by geographical environmental conditions and physical installation parameters, particularly in equatorial regions. This study aims to analyze the performance of a 3.76 kWp on-grid PLTS system using eight 470 Wp monocrystalline solar modules in Pontianak City. Performance monitoring and evaluation were conducted over 61 days (August to September 2025), focusing on the parameters of Global Tilt Irradiance ( $H_T$ ), Final Yield ( $Y_F$ ), Reference Yield ( $Y_R$ ), Performance Ratio (PR), and Capacity Utilization Factor (CUF). The calculation methodology for these parameters also specifically accounted for astronomical and geometrical factors, as well as a zinc roof surface albedo value of 0.20. The evaluation results indicate that the system generated an average  $Y_F$  of 3.2041 hours/day and a  $Y_R$  of 4.7467 hours/day. The achieved Performance Ratio (PR) percentage was 68.47%, with a CUF rate of 13.35%. The system's performance deviation from ideal conditions was identified as originating from an accumulation of operational and environmental losses. The contributing factors to this performance degradation include an installation tilt angle of 20.25°, which steeply deviates from the optimal equatorial angle (5°), shading effects from vegetation on the western side during the afternoon, high operating temperatures of the modules in a lowland ecosystem, and an estimated module degradation of 1.2% after three years of operation. For optimization, adjusting the module tilt angle to be flatter, conducting regular monitoring of temperature and inverter performance, and utilizing a more representative observation data period are highly recommended for future PLTS system development.*

**Keywords:** On-Grid PV System, Performance Ratio, Tilt Angle, System Performance, Pontianak City.

## PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan industri. Ketergantungan pada sumber energi fosil yang terbatas dan tidak ramah lingkungan mendorong pemerintah untuk menggalakkan diversifikasi energi melalui pemanfaatan Energi Baru dan Terbarukan (EBT). Menurut data laporan kementerian Energi Sumber Daya Mineral (ESDM) pada tahun 2024, pemerintah Indonesia terus menunjukkan komitmen yang kuat dalam pengembangan energi terbarukan. Hingga Semester I (Januari - Juni) tahun 2024, penambahan kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Tenaga (PLT) Energi Baru dan Terbarukan (EBT) telah mencapai 217,73 Megawatt (MW) atau sekitar 66,6% dari target tahunan sebesar 326,91 MW. Pemerintah Indonesia telah menargetkan bauran EBT sebesar 23% pada tahun 2025, dan energi surya menjadi salah satu potensi terbesar yang dimiliki Indonesia sebagai negara tropis [1].

Kota Pontianak, yang terletak tepat di garis khatulistiwa, memiliki potensi iradiasi surya yang sangat tinggi sepanjang tahun. Rata-rata iradiasi harian di wilayah ini dapat mencapai 5-7 jam/hari (51%), menjadikannya lokasi yang sangat strategis untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).

Salah satu teknologi panel surya yang populer digunakan adalah jenis monocrystalline. Panel ini dikenal memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan jenis polycrystalline, terutama dalam kondisi iradiasi yang ideal. Namun, kinerja panel surya, termasuk monocrystalline, sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti temperatur dan kelembaban. Panel surya cenderung mengalami penurunan efisiensi pada temperatur operasi yang tinggi. Karakteristik iklim Kota Pontianak yang memiliki suhu udara rata-rata tinggi dan kelembaban yang juga tinggi menjadi tantangan tersendiri.

Sistem PLTS On-grid yang terhubung langsung dengan jaringan listrik PLN menjadi pilihan populer untuk instalasi di perkotaan karena tidak memerlukan sistem penyimpanan baterai yang mahal. Analisis kinerja sistem ini secara nyata di lapangan sangat penting untuk memvalidasi potensi teoretis dan memberikan data riil mengenai efektivitas, efisiensi, dan Performance ratio (PR) dari PLTS On-grid yang menggunakan panel monocrystalline di bawah kondisi iklim khatulistiwa yang spesifik seperti di Kota Pontianak. Agar evaluasi parameter kinerja tersebut valid dan diakui secara akademis maupun industrial, perhitungan matematis harus mengacu pada pedoman standar internasional, yaitu IEC 61724. Meskipun demikian, mendapatkan angka luaran kinerja seperti Performance Ratio (PR) belumlah cukup tanpa adanya tolok ukur untuk menilai kelayakan operasionalnya. Mengingat kerentanan panel monocrystalline terhadap susut daya (loss) akibat paparan suhu tinggi yang konstan di wilayah khatulistiwa, maka diperlukan studi komparatif terhadap standar performa PLTS global. Dalam hal ini, Laporan IEA-PVPS (International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme) menjadi acuan krusial untuk mengevaluasi apakah nilai PR aktual sistem telah memenuhi batas wajar keberhasilan operasional atau justru mengalami deviasi yang signifikan. Oleh karena itu, penelitian ini diusulkan untuk mengevaluasi kinerja sistem tersebut.

## METODE PENELITIAN

Bahan penelitian ini berupa sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) on-grid yang terpasang di Kota Pontianak dengan konfigurasi 8 modul panel surya monocrystalline berkapasitas 470 Wp per modul yang dirangkai secara seri dalam satu string, sehingga memiliki kapasitas total sebesar 3,76 kWp. Sistem terhubung ke inverter on-grid yang mengonversi daya DC menjadi daya AC untuk disalurkan ke jaringan listrik. Data yang digunakan dalam penelitian meliputi data sheet modul dan inverter, data iradiasi matahari, data suhu lingkungan, serta data energi output harian sistem. Data tersebut digunakan

sebagai dasar dalam evaluasi kinerja sistem PLTS.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Gambaran Umum Lokasi Penelitian

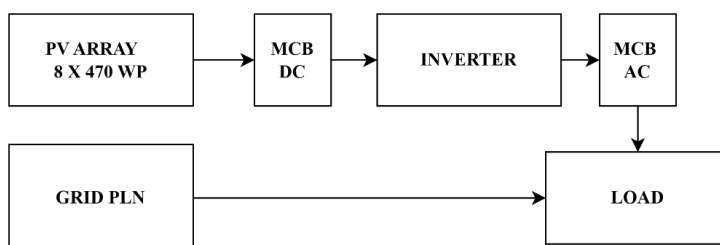
Lokasi penelitian ini dilaksanakan di jalan merdeka Kota Pontianak Lebih tepatnya Keluahan Darat Sekip, Kec. Pontianak Kota, Kota Pontianak, Kalimantan Barat 78243, dengan Latitude (Garis Lintang):  $-0.0205538$  dan Longitude (Garis Bujur):  $109.3292729$ , dan lokasi dapat dilihat dalam gambar 1.



Gambar 1 Lokasi panel terpasang

### 2. Sistem PLTS On-Grid terpasang

Sistem PLTS dengan kapasitas total 3,76 kWp ini dirangkai secara seri dan digunakan untuk menyuplai kebutuhan beban listrik harian. Sistem terhubung ke jaringan PLN dengan skema on-grid, serta menggunakan kWh meter EXIM pada daya terpasang sebesar 5.500 VA. Skema dapat dilihat di gambar 2 dimana beban dihubungkan langsung dari keluaran inverter.



Gambar2 Skema PLTS on grid

PLTS ini mulai beroperasi sejak tahun 2022 dan menghasilkan energi listrik dari 8 modul panel surya, di mana masing-masing panel memiliki kapasitas sebesar 470 Wp, sehingga total kapasitas terpasang mencapai 3,76 kWp.

#### Konfigurasi Sistem PLTS

PLTS Rooftop 3.76 kWp di lokasi penelitian memiliki kapasitas 3760 Wp yang tersusun dari 8 modul panel surya tipe monocrystalline merk JINKO Solar JKM470N-7RL3 berkapasitas 470Wp. PLTS ini tersusun atas 8 modul panel surya atas rangkaian seri. Spesifikasi modul dapat dilihat di tabel 1 di bawah ini

Tabel 1 spesifikasi modul surya

|                            |                                 |
|----------------------------|---------------------------------|
| MERK                       | JINKO Solar                     |
| TYPE                       | JKM470N-60HL4-V (Monocrystalin) |
| Output Power ( $P_{max}$ ) | 470 W                           |

|                              |                        |
|------------------------------|------------------------|
| <i>Max Power Voltage</i>     | 35.05 V                |
| <i>Max Power Current</i>     | 13.41 A                |
| <i>Open Circuit Voltage</i>  | 42.38 $\pm 3\%$        |
| <i>Short Circuit Current</i> | 14.15 $\pm 4\%$        |
| $G_{stc}$                    | 1.000 W/m <sup>2</sup> |
| Dimension                    | 1903 X 1134 X 30 (mm)  |
| weight                       | 24.2 Kg                |

PLTS ini terpasang secara Rooftop Flush Mount dengan Rail Berdasarkan hasil pengukuran di lokasi penelitian, orientasi modul fotovoltaik (panel facing) menghadap ke arah timur laut (NE) dengan sudut azimuth sebesar 38°, yang diperoleh melalui pengukuran menggunakan kompas pada perangkat lunak yang ada di telepon genggam. Sementara itu, sudut kemiringan modul (tilt angle) sebesar 20,25° diukur menggunakan alat inklinometer digital. Dapat di lihat dalam gambar 4.2 untuk pengukuran orientasi modul dan 4.3 untuk kemiringan modul.



Gambar 3 Hasil pengukuran orientasi modul



Gambar 4 hasil pengukuran sudut kemiringan modul

Keluaran daya listrik dari inverter ini kemudian dialirkan ke jaringan instalasi rumah melalui kWh eksim yang berfungsi sebagai pengukur penggunaan energi listrik baik ekspor energi listrik dari produksi PLTS maupun impor energi dari PLN untuk spesifikasi inverter dapat dilihat di tabel 2 berikut.

Tabel 2 Spesifikasi inverter

| Merk | ICA Solar          |                           |
|------|--------------------|---------------------------|
| Type | SNV-GT5023DSC      |                           |
| DC   | Vdc Max            | 600 V                     |
|      | MPPT voltage range | 80V-560V                  |
|      | Idc Maax           | 15A                       |
| AC   | Nominal AC Voltage | 230V L-N                  |
|      | Power factor       | 0.8 leading ~ 0.8 lagging |
|      | Nominal ac power   | 5000 W                    |
|      | Iac Max            | 24 A                      |

### 3. Perhitungan Global Tilt Irradiance (GTI/HT)

#### 1) Perhitungan deklinasi matahari ( $\delta$ )

Untuk tanggal 1 Agustus 2025, perhitungan deklinasi matahari menggunakan nilai hari ke-n sebesar 213. Nilai ini ditetapkan berdasarkan perhitungan Julian day dari awal tahun hingga 1 Agustus untuk tahun 2025 yang merupakan tahun non-kabisat. Berdasarkan penetapan tersebut, perhitungan dapat diuraikan sebagai berikut:

$$\delta_{1\text{agu}} = 23.45^\circ \sin \left[ \frac{2\pi}{365} ((360(284+213))/365) \right]$$

$$\delta_{1\text{agu}} = 23.45^\circ \sin \left[ \frac{2\pi}{365} (490.1917) \right]$$

$$\delta_{1\text{agu}} = 23.45^\circ \times 0.7638$$

$$\delta_{1\text{agu}} = 17.9132^\circ$$

#### 2) Perhitungan sudut matahari terbenam bidang horizontal ( $\omega_s$ )

Parameter sudut jam matahari terbenam pada bidang horizontal ( $\omega_s$ ) digunakan untuk menentukan durasi teoretis penyinaran matahari maksimum yang dapat diterima oleh suatu permukaan datar sejak matahari terbit hingga terbenam. Nilai sudut ini sangat bergantung pada posisi lintang geografis lokasi pengujian ( $\phi$ ) dan sudut deklinasi matahari ( $\delta$ ). Mengingat lokasi instalasi PLTS pada penelitian ini berada di Kota Pontianak yang terletak tepat di garis khatulistiwa, nilai garis lintangnya adalah  $0^\circ$ . Perhitungan nilai  $\omega_s$  untuk data awal pada tanggal 1 Agustus 2025 dapat dijabarkan melalui persamaan berikut:

$$\omega_s = \cos^{-1} \left( -\tan \phi \tan \delta \right) \left[ 0^\circ \tan^{-1} 17.9132 \right]$$

$$\omega_s = \cos^{-1} (0 \tan^{-1} 17.9132)$$

$$\omega_s = \cos^{-1} (0)$$

$$\omega_s = 90^\circ$$

Berdasarkan perhitungan di atas, diperoleh nilai  $\omega_s$  sebesar  $90^\circ$ . Nilai ini memiliki makna fisis bahwa pada bidang horizontal murni di lokasi khatulistiwa, matahari akan selalu memiliki sudut jam terbenam sebesar  $90^\circ$  (setara dengan 6 jam dari titik puncak matahari siang). Hal ini mengindikasikan bahwa secara teoretis, durasi penyinaran matahari di lokasi penelitian adalah konstan selama 12 jam per hari sepanjang tahun, mengabaikan faktor tutupan awan. Nilai konstan ini selanjutnya menjadi parameter pembatas (limit) saat menghitung sudut penyinaran pada bidang panel yang dimiringkan.

#### 3) Perhitungan sudut matahari terbenam bidang miring ( $\omega_{s'}$ )

Parameter sudut jam matahari terbenam pada bidang miring ( $\omega_{s'}$ ) dievaluasi untuk mengetahui kapan secara efektif modul surya berhenti menerima penyinaran langsung akibat orientasi kemiringannya. Mengingat lokasi instalasi PLTS berada di wilayah khatulistiwa dengan nilai garis lintang ( $\phi$ ) pada  $0^\circ$ , maka perhitungan durasi penyinaran

ini sangat dipengaruhi oleh besaran sudut kemiringan panel ( $\beta$ ) dan sudut deklinasi matahari ( $\delta$ ) pada periode pengujian. Perhitungan nilai  $\omega'_s$  untuk tanggal 1 Agustus 2025 dapat dijabarkan melalui substitusi parameter berikut

$$\begin{aligned}\omega'_s &= [\cos]^{(-1)} (-\tan(\phi - \beta) \tan \delta) \\ \omega'_s &= [\cos]^{(-1)} (-\tan(0^\circ - 20.25^\circ) \tan 17.9132^\circ) \\ \omega'_s &= [\cos]^{(-1)} (-\tan(-20.25^\circ) \tan 17.9132^\circ) \\ \omega'_s &= 83,1510\end{aligned}$$

Hasil perhitungan sebesar  $83,1510^\circ$  ini menunjukkan titik sudut waktu spesifik di mana radiasi matahari tidak lagi jatuh di atas permukaan bidang panel. Nilai ini menjadi batasan astronomis harian yang krusial sebelum menentukan rasio geometris sistem

#### 4) Perhitungan rasio geometris ( $R_b$ )

Rasio geometris ( $R_b$ ) merupakan faktor pengali yang merepresentasikan perbandingan antara radiasi langsung (beam radiation) yang jatuh pada bidang miring panel surya terhadap radiasi yang jatuh pada bidang horizontal murni. Nilai ini sangat dinamis dan menjadi penentu utama seberapa besar radiasi yang "hilang" atau "bertambah" akibat kemiringan  $20,25^\circ$  pada modul. Dengan mensubstitusikan nilai deklinasi ( $\delta$ ), sudut jam matahari pada bidang datar ( $\omega_s$ ), dan sudut jam pada bidang miring ( $\omega'_s$ ), perhitungan  $R_b$  untuk tanggal 1 Agustus 2025 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}R_b &= \frac{\cos(0 - 20.25) \cos 17.9132 \sin 83,1510 + \left(\frac{\pi}{180}\right) 83,1510 \sin(0 - 20.25) \sin 17.9132}{\cos 0 \cos 17.9132 \sin 90^\circ + \left(\frac{\pi}{180}\right) 90^\circ \sin 0 \sin 17.9132} \\ R_b &= \frac{0.9381 \cdot 0.9515 \cdot 0.9928 + 1.4505(-0.3461) \cdot 0.3075}{(1) \cdot 0.9515 \cdot (1) + 1.5707 \cdot (0) \cdot 0.3075} \\ R_b &= \frac{0.8861 + (-0.1543)}{0.9515 + 0} \\ R_b &= \frac{0.7318}{0.9515} \\ R_b &= 0.7691\end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan, diperoleh nilai  $R_b$  sebesar 0,7691. Nilai yang lebih kecil dari 1,0 ini mengindikasikan bahwa pada hari tersebut, bidang miring  $20,25^\circ$  menangkap proporsi radiasi langsung yang lebih rendah dibandingkan jika panel diletakkan sepenuhnya horizontal datar. Penurunan tangkapan radiasi langsung ini adalah respons geometris yang wajar terjadi pada bulan Agustus akibat posisi lintasan matahari tahunan terhadap orientasi atap, yang selanjutnya akan digunakan untuk mengonversi nilai GHI menjadi GTI.

#### 5) Perhitungan HT/GTI

Langkah perhitungan radiasi global pada bidang miring ( $H_T$ ) ini merupakan tahapan akhir dengan memasukkan nilai GHI yang dikurangkan dengan DHI, serta komponen radiasi pantulan (albedo). Mengingat sistem PLTS pada penelitian ini terpasang di atas atap seng dengan kondisi permukaan yang sudah kusam dan terpengaruh cuaca, maka koefisien albedo ( $\rho$ ) yang digunakan ditetapkan sebesar 0,20. Nilai ini juga merupakan standar asumsi untuk instalasi di lingkungan atap perumahan. Berdasarkan parameter tersebut, berikut adalah penjabaran perhitungan sistem untuk tanggal 1 Agustus 2025::

$$\begin{aligned}HT &= (H - H_d) R_b + H_d ((1 + [\cos] \beta)/2) + H_p g ((1 - [\cos] \beta)/2) \\ HT &= (5.4689 - 2.0858) \cdot 0.7691 + 2.0858 ((1 + \cos 20.25)/2) + 5.4689 \cdot (0.20) ((1 - \cos 20.25)/2) \\ HT &= (3.3831) \cdot (0.7691) + 2.0858(0.9691) + 5.4689 \cdot (0.20)(0.0309) \\ HT &= 2.6021 + 2.0213 + 0.0338 \\ HT &= 4.6571\end{aligned}$$

HT/GTI dalam subbab ini merupakan HT di tanggal 1 Agustus 2025 untuk

memudahkan penelitian maka dilakukan perhitungan menggunakan M.S Excel, hasil dari 7 hari pertama dapat dilihat pada tabel dibawah ini

Tabel 3 perhitungan GTI selama 1 minggu di bulan agustus

| Tanggal  | GHI<br>(kWh/m <sup>2</sup> /hari) | DHI<br>(kWh/m <sup>2</sup> /hari) | Julian<br>Day (n) | Deklinasi (°) | Omega<br>bidang<br>datar (°) | Omega<br>bidang<br>miring (°) | $R_b$  | GTI<br>(kWh/m <sup>2</sup><br>/day) |
|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------|------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------------|
| 1/8/2025 | 5.4689                            | 2.0858                            | 213               | 17.9132       | 90                           | 83.1511                       | 0.7691 | 4.6572                              |
| 2/8/2025 | 2.9537                            | 1.831                             | 214               | 17.65         | 90                           | 83.2589                       | 0.7717 | 2.659                               |
| 3/8/2025 | 5.4101                            | 2.1538                            | 215               | 17.3817       | 90                           | 83.3685                       | 0.7743 | 4.6419                              |
| 4/8/2025 | 3.18                              | 2.3268                            | 216               | 17.1081       | 90                           | 83.4799                       | 0.7769 | 2.9374                              |
| 5/8/2025 | 5.3299                            | 1.8768                            | 217               | 16.8295       | 90                           | 83.593                        | 0.7796 | 4.5437                              |
| 6/8/2025 | 5.8013                            | 2.0868                            | 218               | 16.5459       | 90                           | 83.7077                       | 0.7823 | 4.9641                              |
| 7/8/2025 | 5.7595                            | 1.8982                            | 219               | 16.2574       | 90                           | 83.824                        | 0.7851 | 4.9066                              |

Tabel 3 menyajikan hasil perhitungan radiasi matahari harian selama minggu pertama bulan Agustus 2025. Tabel ini menunjukkan perubahan nilai radiasi yang jatuh pada bidang datar (GHI) menjadi nilai radiasi yang benar-benar diterima oleh panel yang dimiringkan (GTI atau H<sub>T</sub>).

Berdasarkan tabel tersebut, nilai rasio geometris ( $R_b$ ) berada pada kisaran 0,76 hingga 0,78. Karena angka rasio ini lebih kecil dari 1, total energi matahari yang diterima oleh panel miring (H<sub>T</sub>) menjadi sedikit lebih rendah dibandingkan jika panel diletakkan secara mendatar (GHI). Penurunan ini adalah hal yang wajar pada bulan Agustus karena terpengaruh oleh posisi sudut lintasan matahari terhadap kemiringan panel. Selanjutnya, nilai total iradiasi (H<sub>T</sub>) harian inilah yang akan digunakan sebagai data acuan utama (Reference Yield) untuk menghitung seberapa baik kinerja sistem PLTS tersebut.

Perhitungan yang sama dilakukan untuk setiap hari pada periode penelitian Agustus–September 2025. Namun, untuk mempermudah analisis dan penyajian data, pada Tabel 4.1 hanya ditampilkan hasil perhitungan selama satu minggu pertama bulan Agustus sebagai representasi analisis harian sistem. Data lengkap hasil perhitungan H<sub>T</sub> harian selama periode Agustus–September 2025 disajikan pada Lampiran A.

#### 4. Final yield

sebelum mengevaluasi nilai Final yield ( $Y_F$ ), perlu diketahui terlebih dahulu besaran energi bersih arus bolak-balik ( $E_{AC}$ ) yang berhasil dikonversi oleh inverter dan disuplai ke jaringan. Data  $E_{AC}$  pada penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh secara aktual melalui perekaman aplikasi pemantau daya bawaan inverter PV123. Rekapitulasi data energi keluaran harian selama minggu pertama pengumpulan data di bulan Agustus 2025 disajikan pada Tabel 4.4 berikut. Untuk keseluruhan data akan di muat kedalam lampiran B.

Tabel 4 Keluaran daya yang di dapat dari aplikasi PV123

| EAC HARIAN PLTS |           |
|-----------------|-----------|
| HARI/TANGGAL    | EAC (Kwh) |
| 01 Agustus 2025 | 12.8      |
| 02 Agustus 2025 | 6.8       |
| 03 Agustus 2025 | 12.8      |
| 04 Agustus 2025 | 10.2      |
| 05 Agustus 2025 | 11.1      |

|                 |      |
|-----------------|------|
| 06 Agustus 2025 | 13.8 |
| 07 Agustus 2025 | 13.7 |
| 08 Agustus 2025 | 7.7  |
| 09 Agustus 2025 | 7.5  |
| 10 Agustus 2025 | 12.8 |
| 11 Agustus 2025 | 11.5 |
| 12 Agustus 2025 | 11.5 |
| 13 Agustus 2025 | 7.5  |
| 14 Agustus 2025 | 10.5 |

Untuk menghitung energi AC yang disuplai ke grid per daya puncak PV atau final yield dapat menggunakan persamaan 1 dengan memasukan nilai parameter  $E_{AC}=12,8$  Kwh dan  $P_{Max}=3,76$  Kwp yang di peroleh dari data keluaran inverter pada tanggal 1 Agustus 2025. Final yield harian dapat dihitung menggunakan persamaan 6.

$$Y_F \text{ 1 Agu.} = \frac{E_{AC}}{P_{Max}} = \frac{12,8 \text{ Kwh}}{3,76 \text{ Kw}} = 3,4043 \text{ jam}$$

$$Y_F \text{ 2 Agu.} = \frac{E_{AC}}{P_{Max}} = \frac{6,8 \text{ Kwh}}{3,76 \text{ Kw}} = 1,8085 \text{ jam}$$

$$Y_F \text{ 3 Agu.} = \frac{E_{AC}}{P_{Max}} = \frac{12,8 \text{ Kwh}}{3,76 \text{ Kw}} = 3,4043 \text{ jam}$$

$$Y_F \text{ 4 Agu.} = \frac{E_{AC}}{P_{Max}} = \frac{10,2 \text{ Kwh}}{3,76 \text{ Kw}} = 2,7128 \text{ jam}$$

$$Y_F \text{ 5 Agu.} = \frac{E_{AC}}{P_{Max}} = \frac{11,1 \text{ Kwh}}{3,76 \text{ Kw}} = 2,9521 \text{ jam}$$

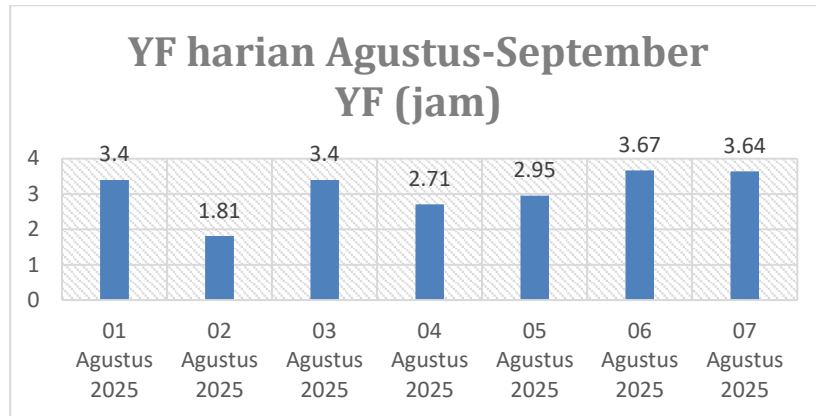
$$Y_F \text{ 6 Agu.} = \frac{E_{AC}}{P_{Max}} = \frac{13,8 \text{ Kwh}}{3,76 \text{ Kw}} = 3,6702 \text{ jam}$$

$$Y_F \text{ 7 Agu.} = \frac{E_{AC}}{P_{Max}} = \frac{13,7 \text{ Kwh}}{3,76 \text{ Kw}} = 3,6436 \text{ jam}$$

Perhitungan yang sama dilakukan untuk setiap hari pada periode penelitian Agustus–September 2025. Namun, untuk mempermudah analisis dan penyajian data, pada Tabel 4.5 hanya ditampilkan hasil perhitungan selama satu minggu pertama bulan Agustus sebagai representasi analisis harian sistem. Data lengkap hasil perhitungan  $Y_F$  harian selama periode Agustus–September 2025 disajikan pada Lampiran C.

Tabel 5  $Y_F$  Harian di tampilkan dalam 1 minggu.

| YF harian Agustus-September |          |
|-----------------------------|----------|
| HARI/TANGGAL                | YF (jam) |
| 01 Agustus 2025             | 3.4043   |
| 02 Agustus 2025             | 1.8085   |
| 03 Agustus 2025             | 3.4043   |
| 04 Agustus 2025             | 2.7128   |
| 05 Agustus 2025             | 2.9521   |
| 06 Agustus 2025             | 3.6702   |
| 07 Agustus 2025             | 3.6436   |



Gambar 5 Grafik YF 7 hari pertama

Berdasarkan hasil pemantauan pada tujuh hari pertama bulan Agustus 2025, nilai Final Yield (Y\_F) sistem PLTS on-grid menunjukkan fluktuasi harian yang cukup signifikan. Variasi ini dipengaruhi oleh kondisi cuaca lokal di Kota Pontianak, khususnya perubahan intensitas radiasi matahari. Nilai Y\_F tertinggi tercatat pada tanggal 06 Agustus sebesar 3,67 jam, diikuti oleh tanggal 07 Agustus sebesar 3,64 jam, yang mengindikasikan kondisi radiasi matahari yang optimal. Sebaliknya, nilai terendah terjadi pada tanggal 02 Agustus sebesar 1,81 jam, yang kemungkinan disebabkan oleh kondisi cuaca kurang mendukung, seperti tutupan awan atau curah hujan yang tinggi. Secara umum, tren pada minggu pertama menunjukkan adanya penurunan signifikan pada awal periode, kemudian kinerja sistem berangsur meningkat mulai tanggal 04 Agustus hingga mencapai nilai maksimum di akhir minggu. Variasi ini memberikan gambaran awal mengenai pengaruh faktor lingkungan terhadap kinerja sistem PLTS.

Tabel dan grafik yang disajikan pada subbab ini hanya menampilkan tujuh hari pertama sebagai contoh perhitungan harian. Namun, perhitungan dilakukan untuk seluruh periode pengamatan selama 61 hari (Agustus–September 2025), dan hasil lengkap disajikan pada lampiran. Berdasarkan keseluruhan data tersebut, diperoleh nilai rata-rata Final Yield (Y\_F) sebesar 3,2041 jam, yang mencerminkan kinerja umum sistem selama periode penelitian.

## 5. Reference Yield

Parameter Reference Yield (Y\_R) merupakan indikator teoretis yang mengukur potensi ketersediaan sumber daya energi matahari di lokasi pengujian. Secara fisis, parameter ini merepresentasikan durasi ekuivalen dalam sehari (jam/hari) di mana radiasi matahari menyinari bidang panel seolah-olah beroperasi pada kondisi uji standar (STC) sebesar  $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ . Pada konfigurasi PLTS on-grid yang menggunakan rangkaian seri delapan panel surya monokristalin berkapasitas total 3,76 kWp ini, nilai Y\_R dievaluasi menggunakan data radiasi bidang miring (H\_T) dari hasil perhitungan sebelumnya, yang berbasis pada data radiasi harian di Kota Pontianak dari basis data NASA POWER.

$$Y_{R1 \text{ Agu.}} = \frac{HT}{GSTC} = \frac{4.6572 \text{ Kwh/m}^2}{1 \text{ Kw/m}^2} = 4.6572 \text{ jam}$$

$$Y_{R2 \text{ Agu.}} = \frac{HT}{GSTC} = \frac{2.6590 \text{ Kwh/m}^2}{1 \text{ Kw/m}^2} = 2.6590 \text{ jam}$$

$$Y_{R3 \text{ Agu.}} = \frac{HT}{GSTC} = \frac{4.6419 \text{ Kwh/m}^2}{1 \text{ Kw/m}^2} = 4.6419 \text{ jam}$$

$$Y_{R4 \text{ Agu.}} = \frac{HT}{GSTC} = \frac{2.9374 \text{ Kwh/m}^2}{1 \text{ Kw/m}^2} = 2.9374 \text{ jam}$$

$$Y_{R5 \text{ Agu.}} = \frac{HT}{GSTC} = \frac{4.5437 \text{ Kwh/m}^2}{1 \text{ Kw/m}^2} = 4.5437 \text{ jam}$$

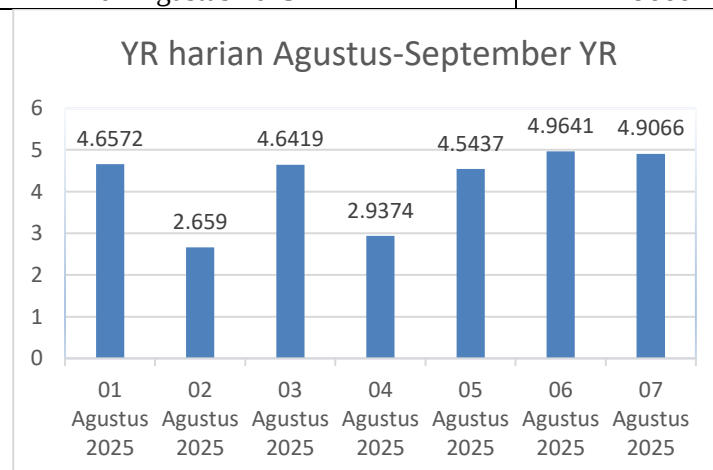
$$Y_{R6 \text{ Agu.}} = \frac{HT}{GSTC} = \frac{4.9641 \text{ Kwh/m}^2}{1 \text{ Kw/m}^2} = 4.9641 \text{ jam}$$

$$Y_{R7 \text{ Agu.}} = \frac{HT}{GSTC} = \frac{4.9066 \text{ Kwh/m}^2}{1 \text{ Kw/m}^2} = 4.9066 \text{ jam}$$

Nilai perhitungan sebesar 4,6572 jam bermakna bahwa pada tanggal tersebut, hamparan modul surya secara teoretis menerima energi penyinaran yang setara dengan operasi pada daya puncak maksimumnya selama 4,6572 jam. Perhitungan yang sama dilakukan untuk seluruh periode penelitian Agustus-September 2025. Namun, untuk kemudahan analisis, Tabel 4.5 berikut hanya menampilkan data selama satu minggu pertama sebagai representasi harian, sedangkan data lengkap disajikan pada Lampiran D.

Tabel 6  $Y_R$  Harian di tampilkan dalam 1 minggu.

| <b><math>Y_R</math> harian Agustus-September</b> |           |
|--------------------------------------------------|-----------|
| <b>HARI/TANGGAL</b>                              | <b>YR</b> |
| 01 Agustus 2025                                  | 4.6572    |
| 02 Agustus 2025                                  | 2.6590    |
| 03 Agustus 2025                                  | 4.6419    |
| 04 Agustus 2025                                  | 2.9374    |
| 05 Agustus 2025                                  | 4.5437    |
| 06 Agustus 2025                                  | 4.9641    |
| 07 Agustus 2025                                  | 4.9066    |



Gambar 6 Grafik  $Y_R$  7 hari pertama

Sejalan dengan hasil Final Yield ( $Y_F$ ), nilai Reference Yield ( $Y_R$ ) harian pada tujuh hari pertama bulan Agustus 2025 juga menunjukkan fluktuasi yang mencerminkan variasi ketersediaan energi matahari. Parameter  $Y_R$  merepresentasikan potensi energi matahari teoretis berdasarkan iradiasi yang diterima oleh bidang modul surya. Nilai  $Y_R$  tertinggi pada periode ini terjadi pada tanggal 06 Agustus sebesar 4,9641 jam, diikuti oleh tanggal 07 Agustus sebesar 4,9066 jam, yang menunjukkan kondisi radiasi matahari yang tinggi. Sebaliknya, nilai terendah tercatat pada tanggal 02 Agustus sebesar 2,6590 jam dan tanggal

04 Agustus sebesar 2,9374 jam. Penurunan drastis ini mengindikasikan berkurangnya intensitas penyinaran matahari yang kemungkinan disebabkan oleh kondisi cuaca mendung, tutupan awan tebal, atau curah hujan di wilayah Kota Pontianak.

Secara umum, nilai  $Y_R$  selama minggu pertama menunjukkan pola fluktuatif yang menggambarkan besarnya variabilitas sumber daya matahari harian. Variasi ini menjadi faktor utama yang memengaruhi kinerja sistem, karena  $Y_R$  digunakan sebagai acuan dasar dalam mengevaluasi energi aktual yang dihasilkan sistem melalui parameter Final Yield ( $Y_F$ ) serta dalam perhitungan persentase Performance Ratio (PR). Tabel pada subbab sebelumnya hanya menampilkan tujuh hari pertama sebagai sampel perhitungan harian. Meskipun demikian, evaluasi dilakukan secara komprehensif untuk seluruh periode pengamatan selama 61 hari (Agustus–September 2025), dengan rekapitulasi data lengkap disajikan pada Lampiran E. Dari akumulasi keseluruhan pengamatan tersebut, diperoleh nilai rata-rata Reference Yield ( $Y_R$ ) sistem sebesar 4.7467 jam, yang secara representatif mencerminkan potensi ketersediaan energi matahari harian rata-rata selama periode penelitian.

## 6. Performance Ratio

Performance rasio harian sistem PLTS 3,76 kWp di hari Jumat 1 Agustus 2025 dapat dihitung menggunakan persamaan 8 sebagai berikut: Performance Ratio (PR) merupakan metrik evaluasi paling krusial untuk mengukur efektivitas konversi energi operasional sebuah pembangkit fotovoltaik, terlepas dari kapasitas terpasang maupun lokasi geografisnya. Parameter ini dihitung dengan membandingkan produksi energi aktual yang berhasil disuplai sistem ke jaringan (Final Yield,  $Y_F$ ) terhadap potensi energi teoretis yang tersedia di lokasi (Reference Yield,  $Y_R$ ). Dalam hal ini dilakukan perhitungan sebagai berikut :

$$P_R \text{ 3 Agu.} = \frac{Y_F}{Y_R} \times 100\% = \frac{3.4043 \text{ jam}}{5.0556 \text{ jam}} \times 100\% = 73.34 \%$$

$$P_R \text{ 4 Agu.} = \frac{Y_F}{Y_R} \times 100\% = \frac{2.7128 \text{ jam}}{2.9374 \text{ jam}} \times 100\% = 92.35 \%$$

$$P_R \text{ 5 Agu.} = \frac{Y_F}{Y_R} \times 100\% = \frac{2.9521 \text{ jam}}{4.5437 \text{ jam}} \times 100\% = 64.97 \%$$

$$P_R \text{ 6 Agu.} = \frac{Y_F}{Y_R} \times 100\% = \frac{3.6702 \text{ jam}}{4.9641 \text{ jam}} \times 100\% = 73.94 \%$$

$$P_R \text{ 7 Agu.} = \frac{Y_F}{Y_R} \times 100\% = \frac{3.6436 \text{ jam}}{4.9066 \text{ jam}} \times 100\% = 74.26 \%$$

Nilai Performance Ratio (PR) sebesar 68,01% menunjukkan bahwa kinerja sistem PLTS pada hari tersebut masih berada di bawah kisaran performa yang direkomendasikan oleh IEA PVPS. Berdasarkan acuan IEA PVPS, sistem PLTS yang beroperasi dengan baik umumnya memiliki nilai PR pada kisaran 70–90%, meskipun nilai tersebut dapat dipengaruhi oleh kondisi iklim, suhu modul, orientasi panel, tingkat radiasi matahari, serta rugi-rugi pada sistem.

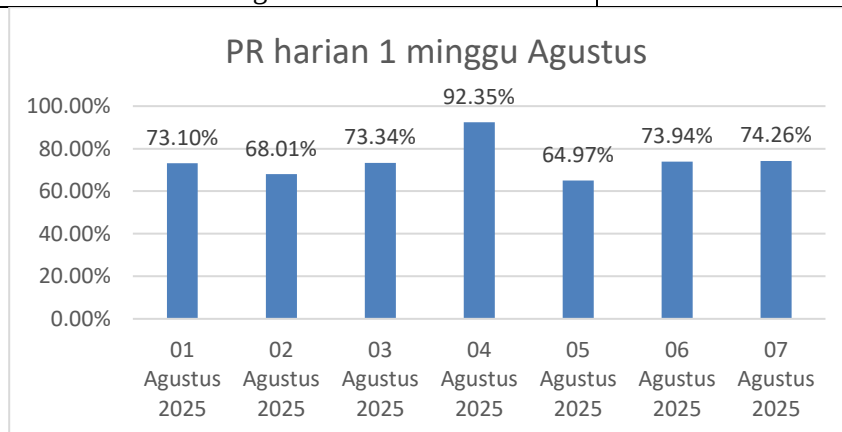
Perhitungan nilai PR dilakukan untuk seluruh data harian selama periode penelitian, yaitu Agustus hingga September 2025. Namun, pada Tabel 4.3 hanya disajikan hasil perhitungan PR untuk tujuh hari pertama bulan Agustus (1–7 Agustus 2025) sebagai representasi analisis kinerja harian sistem. Adapun hasil perhitungan PR secara lengkap selama periode penelitian disajikan pada Lampiran D.

Selanjutnya, nilai PR dianalisis untuk mengidentifikasi tren kinerja sistem PLTS selama periode penelitian serta mengevaluasi apakah sistem telah memenuhi kriteria kinerja berdasarkan acuan IEA PVPS. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam menilai tingkat efektivitas konversi energi sistem PLTS serta mengidentifikasi pengaruh faktor lingkungan

dan rugi-rugi sistem terhadap performa operasional.

Tabel 7 P<sub>R</sub> Harian di tampilkan dalam 1 minggu.

| <b>P<sub>R</sub> harian Agustus-September</b> |           |
|-----------------------------------------------|-----------|
| <b>HARI/TANGGAL</b>                           | <b>PR</b> |
| 01 Agustus 2025                               | 73.10%    |
| 02 Agustus 2025                               | 68.01%    |
| 03 Agustus 2025                               | 73.34%    |
| 04 Agustus 2025                               | 92.35%    |
| 05 Agustus 2025                               | 64.97%    |
| 06 Agustus 2025                               | 73.94%    |
| 07 Agustus 2025                               | 74.26%    |



Gambar 7 Grafik PR 7 hari pertama

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai Performance Ratio (PR) tertinggi selama tujuh hari pertama pengamatan terjadi pada 04 Agustus 2025 sebesar 92,35%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem PLTS mampu beroperasi dengan sangat baik dan mendekati kondisi optimal. Meskipun sedikit melebihi kisaran umum 70–90% yang direkomendasikan oleh IEA PVPS untuk sistem fotovoltaik yang berkinerja baik, kondisi ini masih dapat terjadi akibat variasi intensitas radiasi matahari, suhu modul, maupun ketidakpastian pengukuran sehingga mengindikasikan bahwa rugi-rugi sistem pada hari tersebut relatif kecil.

Sebaliknya, nilai PR terendah terjadi pada 05 Agustus 2025 sebesar 64,97%. Nilai ini menunjukkan bahwa kinerja sistem berada di bawah kisaran performa yang direkomendasikan oleh IEA PVPS. Penurunan nilai PR tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh faktor lingkungan, seperti tutupan awan, curah hujan, peningkatan suhu modul, atau rugi-rugi pada sistem, yang menyebabkan berkurangnya efisiensi konversi energi listrik dari modul fotovoltaik.

Secara umum, nilai PR selama tujuh hari pertama bulan Agustus 2025 berada pada kisaran 64,97% hingga 92,35%. Dari tujuh hari pengamatan, lima hari memiliki nilai PR yang berada dalam kisaran acuan 70–90% menurut IEA PVPS, satu hari berada di bawah kisaran tersebut, dan satu hari sedikit melebihi batas atas kisaran. Hasil ini menunjukkan bahwa kinerja sistem PLTS cenderung dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama intensitas radiasi matahari.

Tabel dan grafik pada pembahasan ini hanya menyajikan hasil perhitungan untuk tujuh hari pertama sebagai representasi analisis harian. Namun, perhitungan PR telah dilakukan untuk seluruh periode penelitian selama 61 hari, yaitu Agustus–September 2025, dengan data lengkap disajikan pada Lampiran D. Berdasarkan keseluruhan data tersebut, diperoleh nilai rata-rata Performance Ratio (PR) sebesar 68,4%. Nilai rata-rata ini menunjukkan

bahwa secara keseluruhan kinerja sistem masih berada sedikit di bawah kisaran performa yang direkomendasikan oleh IEA PVPS, sehingga masih terdapat rugi-rugi sistem yang memengaruhi efektivitas konversi energi selama periode pengamatan.

## 7. Capacity Utilitation Factor

Berbeda dengan parameter Performance Ratio yang mengukur efisiensi sistem terhadap porsi radiasi matahari yang ada, parameter Capacity Utilization Factor (CUF) digunakan untuk mengevaluasi seberapa efektif kapasitas desain pembangkit dimanfaatkan secara keseluruhan sepanjang waktu. Secara konseptual, CUF membandingkan produksi energi aktual dari sistem PLTS terhadap potensi maksimumnya jika sistem tersebut mampu menyuplai daya puncak secara konstan 24 jam penuh tanpa henti. Pada karakteristik sistem tenaga surya on-grid, nilai parameter ini secara alamiah memang rendah karena pembangkitan eksklusif hanya terjadi pada siang hari dan sangat bergantung pada tingkat ketersediaan radiasi (intermittent).

Perhitungan tingkat pemanfaatan kapasitas (CUF) harian sistem PLTS 3,76 kWp pada tanggal 1 Agustus 2025 dapat dievaluasi menggunakan Persamaan 9 sebagai berikut :

Capacity Utilitation Factor harian sistem PLTS 3,76 kWp di hari Jumat 1 Agustus 2025 dapat dihitung menggunakan persamaan 5 sebagai berikut:

$$CUF\ 1\ Agu. = \frac{Y_F}{24\ jam} \times 100\% = \frac{3,4043\ jam}{24\ jam} = 14.18\ \%$$

$$CUF\ 2\ Agu. = \frac{Y_F}{24\ jam} \times 100\% = \frac{1,8085\ jam}{24\ jam} = 7.54\ \%$$

$$CUF\ 3\ Agu. = \frac{Y_F}{24\ jam} \times 100\% = \frac{3,4042\ jam}{24\ jam} = 14.18\ \%$$

$$CUF\ 4\ Agu. = \frac{Y_F}{24\ jam} \times 100\% = \frac{2,7128\ jam}{24\ jam} = 11,30\ \%$$

$$CUF\ 5\ Agu. = \frac{Y_F}{24\ jam} \times 100\% = \frac{2,9521\ jam}{24\ jam} = 12,30\ \%$$

$$CUF\ 6\ Agu. = \frac{Y_F}{24\ jam} \times 100\% = \frac{3,6702\ jam}{24\ jam} = 15,29\ \%$$

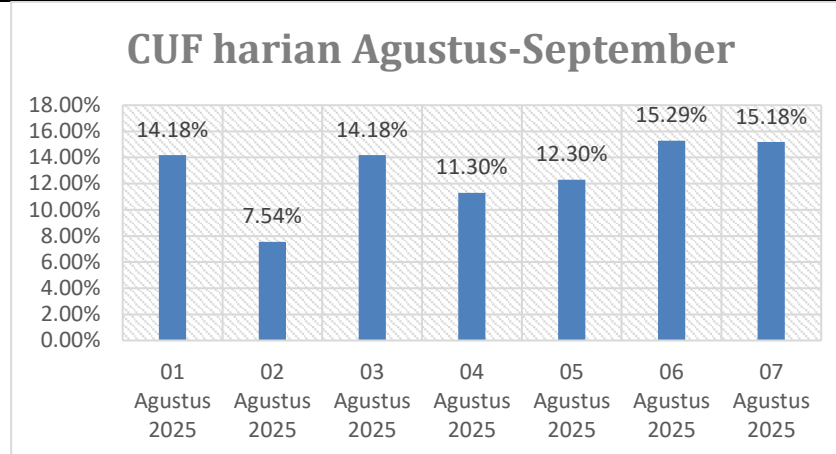
$$CUF\ 7\ Agu. = \frac{Y_F}{24\ jam} \times 100\% = \frac{3,6436\ jam}{24\ jam} = 15.18\ \%$$

Nilai CUF sebesar 14,18% menunjukkan bahwa sistem PLTS beroperasi dengan pemanfaatan kapasitas efektif sebesar 14,18% dari kapasitas maksimum teoritis selama 24 jam pada hari tersebut. Nilai ini mencerminkan karakteristik sistem pembangkit surya yang bergantung pada ketersediaan radiasi matahari dan tidak beroperasi penuh selama 24 jam. Lebih lanjut, pencapaian CUF di kisaran angka tersebut tergolong wajar dan representatif untuk sistem PLTS on-grid dengan konfigurasi terpasang tetap (fixed-tilt) di wilayah ekuator. Mengingat durasi penyinaran matahari yang optimal (Peak Sun Hours) umumnya hanya berlangsung efektif selama beberapa jam di siang hari, sistem secara praktis tidak memproduksi energi pada malam hari dan mengalami fluktuasi produksi saat pagi, sore, atau ketika terjadi tutupan awan. Selain faktor cuaca, nilai pemanfaatan kapasitas ini juga turut dipengaruhi oleh kondisi spesifik instalasi di lapangan, seperti penempatan sudut kemiringan panel 20,25° yang belum sepenuhnya selaras dengan lintang geografis Pontianak, peningkatan suhu operasi modul, serta adanya pengaruh bayangan (shading) pada jam-jam tertentu yang membatasi sistem untuk menghasilkan daya puncak (3,76 kWp) dalam durasi yang lebih panjang.

Perhitungan yang sama dilakukan untuk seluruh hari pada periode Agustus–September 2025. Namun, pada Tabel 4.7 hanya ditampilkan nilai CUF selama tujuh hari pertama bulan Agustus (1–7 Agustus 2025) sebagai representasi analisis harian, sedangkan data lengkap hasil perhitungan CUF selama periode penelitian disajikan pada Lampiran F.

Tabel 8 CUF Harian di tampilkan dalam 1 minggu

| CUF harian Agustus-September |        |
|------------------------------|--------|
| HARI/TANGGAL                 | CUF    |
| 01 Agustus 2025              | 14.18% |
| 02 Agustus 2025              | 7.54%  |
| 03 Agustus 2025              | 14.18% |
| 04 Agustus 2025              | 11.30% |
| 05 Agustus 2025              | 12.30% |
| 06 Agustus 2025              | 15.29% |
| 07 Agustus 2025              | 15.18% |



Gambar 8 Grafik P\_R 7 hari pertama

Sebagai parameter evaluasi untuk mengukur tingkat pemanfaatan kapasitas terpasang, Capacity Utilization Factor (CUF) digunakan untuk menggambarkan seberapa efektif sistem PLTS menghasilkan energi dibandingkan dengan kapasitas maksimumnya. Berdasarkan hasil pengamatan pada tujuh hari pertama bulan Agustus 2025, nilai CUF menunjukkan pola fluktuatif yang sejalan dengan Final Yield (Y\_F).

Nilai CUF tertinggi tercatat pada tanggal 06 Agustus sebesar 15,29%, diikuti oleh tanggal 07 Agustus sebesar 15,16%. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem beroperasi dengan tingkat pemanfaatan kapasitas yang baik akibat kondisi radiasi matahari yang tinggi. Sebaliknya, nilai terendah terjadi pada tanggal 02 Agustus sebesar 7,54%, yang mengindikasikan penurunan produksi energi akibat kondisi cuaca yang kurang mendukung, seperti tutupan awan atau curah hujan di wilayah Pontianak. Secara umum, nilai CUF selama tujuh hari pertama berada pada kisaran 7,5% hingga 15%, yang menunjukkan bahwa kinerja sistem PLTS sangat dipengaruhi oleh variabilitas kondisi lingkungan. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang menyatakan bahwa nilai CUF sistem fotovoltaik umumnya berada pada kisaran 10%–20%, tergantung pada kondisi iradiasi matahari dan lokasi instalasi [11].

Tabel dan Grafik di atas hanya menampilkan tujuh hari pertama sebagai contoh perhitungan harian. Namun, perhitungan dilakukan untuk seluruh periode pengamatan selama 61 hari (Agustus–September 2025), dan data lengkap disajikan pada lampiran. Berdasarkan keseluruhan data tersebut, diperoleh nilai rata-rata Capacity Utilization Factor (CUF) sebesar 13,35%, yang mencerminkan tingkat pemanfaatan kapasitas sistem selama periode penelitian.

## 8. Analisis

Berdasarkan hasil perhitungan parameter kinerja sistem menggunakan standar pedoman evaluasi IEC 61724 yang meliputi Final Yield (Y\_F), Reference Yield (Y\_R), dan

Performance Ratio (PR), serta penambahan metrik Capacity Utilization Factor (CUF) untuk tinjauan pemanfaatan kapasitas, telah diperoleh gambaran menyeluruh mengenai performa sistem dalam kondisi operasional aktual. Evaluasi secara komprehensif selama periode pengamatan 61 hari (Agustus–September 2025) telah direkapitulasi secara lengkap pada Lampiran C, D, E, dan F, dengan perolehan akumulasi nilai rata-rata meliputi Final Yield ( $Y_F$ ) sebesar 3,2041 jam/hari, Reference Yield ( $Y_R$ ) sebesar 4,7467 jam/hari, Performance Ratio (PR) sebesar 68,47%, serta Capacity Utilization Factor (CUF) sebesar 13,35%.

Nilai rata-rata Reference Yield ( $Y_R$ ) sebesar 4,7467 jam/hari merepresentasikan tingginya potensi ketersediaan energi matahari teoretis berdasarkan iradiasi yang menyinari permukaan modul surya. Namun, nilai rata-rata Final Yield ( $Y_F$ ) yang tercatat disuplai oleh sistem per satuan kapasitas terpasangnya hanyalah sebesar 3,2041 jam/hari. Selisih antara potensi energi yang tersedia ( $Y_R$ ) dengan energi listrik aktual yang berhasil dimanfaatkan ( $Y_F$ ) ini mengindikasikan besaran penyusutan energi selama proses konversi berlangsung.

Perbandingan antara nilai  $Y_F$  dan  $Y_R$  tersebut menghasilkan rata-rata Performance Ratio (PR) sebesar 68,47%. Berdasarkan literatur Laporan IEA-PVPS, sebuah sistem fotovoltaik yang beroperasi dengan baik umumnya dianjurkan memiliki nilai PR sekitar 70%. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja sistem PLTS dalam penelitian ini masih berada sedikit di bawah ambang batas standar, sehingga dapat disimpulkan sistem belum sepenuhnya beroperasi pada titik efisiensi tertingginya.

Penurunan nilai PR hingga di bawah acuan standar ini menegaskan adanya akumulasi rugi-rugi sistem yang masih cukup signifikan. Rugi-rugi operasional ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik lingkungan lokasi instalasi di Kota Pontianak. Teriknya radiasi matahari yang tinggi di wilayah khatulistiwa dapat memicu peningkatan suhu modul surya jenis monokristalin hingga melebihi batas suhu operasi standarnya, yang berujung pada menurunnya efisiensi dan tegangan output panel. Selain faktor suhu modul, kerugian ini juga dapat diakibatkan oleh efisiensi inverter yang belum optimal, kemungkinan adanya efek bayangan (shading), serta degradasi modul.

Di sisi lain, parameter Capacity Utilization Factor (CUF) yang dievaluasi menunjukkan nilai rata-rata sebesar 13,35%. Nilai tersebut menunjukkan tingkat pemanfaatan kapasitas terpasang sistem selama periode pengamatan. Angka 13,35% ini masih berada dalam kisaran umum kelayakan sistem fotovoltaik, yaitu sekitar 10–20%, yang dipengaruhi secara langsung oleh kondisi iradiasi matahari dan karakteristik lokasi instalasi.

Secara keseluruhan, kinerja sistem PLTS on-grid berkapasitas 3,76 kWp ini menunjukkan fluktuasi harian yang signifikan dari hari ke hari. Variabilitas kondisi lingkungan di wilayah Pontianak, terutama tutupan awan, intensitas curah hujan, dan radiasi matahari, secara langsung memengaruhi nilai  $Y_R$ , yang kemudian berdampak linier terhadap metrik  $Y_F$ , PR, maupun CUF sistem. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sistem PLTS yang diteliti telah beroperasi dengan cukup baik, namun masih terdapat potensi ruang peningkatan kinerja untuk meminimalisasi rugi-rugi sistem dan mengoptimalkan pemanfaatan energi matahari yang tersedia.

#### **1) Faktor yang Mempengaruhi Produksi Energi Sistem PLTS 3,76 kWp**

Produksi energi pada sistem PLTS dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik yang berasal dari kondisi lingkungan maupun karakteristik sistem itu sendiri. Faktor utama yang memengaruhi kinerja PLTS adalah intensitas radiasi matahari dan suhu modul. Semakin tinggi radiasi matahari yang diterima, semakin besar potensi energi listrik yang dapat dihasilkan. Namun, peningkatan suhu modul dapat menurunkan efisiensi konversi energi

listrik pada sel surya.

Secara umum, kenaikan suhu modul menyebabkan penurunan tegangan keluaran (output voltage) akibat perubahan karakteristik semikonduktor pada sel surya. Meskipun arus keluaran cenderung meningkat sedikit, penurunan tegangan yang lebih dominan mengakibatkan daya keluaran modul menjadi lebih rendah. Suhu operasi yang tinggi dapat menyebabkan penurunan performa sistem PLTS.

Selain itu, kondisi geografis Kota Pontianak juga berpotensi memengaruhi suhu operasional modul surya. Kota Pontianak merupakan wilayah dataran rendah dengan ketinggian berkisar antara 0,1 hingga 1,5 meter di atas permukaan laut serta didominasi oleh kawasan rawa dan dipengaruhi oleh keberadaan Sungai Kapuas. Karakteristik tersebut menyebabkan kondisi lingkungan cenderung memiliki suhu dan kelembapan yang relatif tinggi, sehingga dapat meningkatkan suhu kerja modul surya dan menurunkan efisiensi konversi energi yang.

a) Shading modul terpasang

Hasil observasi lapangan menunjukkan adanya pengaruh bayangan (shading) yang berasal dari vegetasi di sekitar lokasi pemasangan modul surya. Bayangan tersebut terutama terjadi pada sore hari ketika posisi matahari bergerak ke arah barat. Modul surya yang terpasang menghadap ke arah timur laut, sedangkan terdapat vegetasi berupa pohon berukuran besar pada sisi barat lokasi pemasangan. Kondisi ini menyebabkan sebagian permukaan modul terhalang dari paparan sinar matahari pada periode tertentu.

Keberadaan shading mengurangi jumlah radiasi matahari yang diterima modul sehingga energi yang dapat dikonversi menjadi energi listrik menjadi lebih rendah. Fenomena ini juga terlihat pada data monitoring sistem, di mana daya keluaran meningkat secara signifikan pada pagi hingga siang hari, kemudian mengalami penurunan yang relatif cepat pada sore hari. Penurunan tersebut diduga dipengaruhi oleh efek bayangan dari vegetasi yang semakin dominan seiring pergeseran posisi matahari menuju arah barat.

b) Sudut Kemiringan (Tilt Angle) dan Orientasi (Azimuth)

Faktor instalasi fisik yang sangat krusial dalam memaksimalkan penerimaan iradiasi matahari adalah penentuan sudut kemiringan (tilt angle) dan arah orientasi (azimuth) modul surya. Mengingat posisi geografis Kota Pontianak yang dilintasi garis khatulistiwa, penentuan sudut yang tidak tepat akan berdampak langsung pada berkurangnya intensitas radiasi yang tertangkap oleh permukaan panel. Berdasarkan penelitian terdahulu yang secara spesifik mengkaji optimasi letak PLTS di Pontianak, yakni pada studi yang berjudul "Determination of Tilt and Azimuth Angles of Solar Panels at Tanjungpura University Solar Power Plant Using PVsyst 7.3", ditemukan bahwa konfigurasi paling optimal untuk menangkap radiasi matahari maksimal di wilayah ini adalah menggunakan sudut kemiringan (tilt angle) sebesar  $5^{\circ}$  dengan orientasi azimuth menghadap ke arah timur laut ( $-45^{\circ}$ ). Sudut yang landai ini dinilai paling efektif untuk mengakomodasi lintasan matahari di wilayah ekuator.

Namun, pada sistem PLTS 3,76 kWp yang diteliti, modul surya terpasang dengan sudut kemiringan sebesar  $20,25^{\circ}$ . Nilai tilt angle ini terlampaui besar dan menyimpang cukup jauh dari nilai optimal  $5^{\circ}$  yang direkomendasikan. Kemiringan yang terlalu curam menyebabkan modul surya tidak dapat menangkap paparan iradiasi secara tegak lurus dengan maksimal sepanjang hari, terutama pada saat posisi matahari berada tepat di atas kepala (zenith). Kondisi pemasangan yang kurang optimal ini mengakibatkan terjadinya penurunan potensi energi radiasi yang dapat diserap, sehingga turut memberikan kontribusi yang signifikan terhadap akumulasi rugi-rugi (losses) dan penurunan efisiensi sistem secara keseluruhan di luar faktor cuaca dan bayangan (shading).

#### c) Degradasi Modul Surya

Faktor lain yang berpotensi memengaruhi penurunan produksi energi adalah degradasi modul surya. Berdasarkan hasil pengamatan, modul surya yang digunakan telah beroperasi selama kurang lebih tiga tahun sejak pemasangan. Mengacu pada spesifikasi pabrikan (datasheet), modul memiliki laju degradasi daya tahunan sebesar 0,4%. Dengan asumsi laju degradasi berlangsung secara linier, maka setelah tiga tahun operasi modul berpotensi mengalami penurunan performa sebesar sekitar 1,2% dari kapasitas awalnya. Meskipun nilai tersebut relatif kecil, degradasi modul tetap berkontribusi terhadap penurunan produksi energi secara keseluruhan. Oleh karena itu, faktor degradasi perlu dipertimbangkan dalam analisis kinerja sistem PLTS, terutama ketika membandingkan hasil produksi energi aktual dengan nilai produksi energi awal.

#### d) Efisiensi Inverter

Inverter merupakan salah satu komponen utama dalam sistem PLTS yang berfungsi mengubah energi listrik arus searah (DC) yang dihasilkan modul surya menjadi energi listrik arus bolak-balik (AC) yang dapat digunakan oleh beban. Dalam proses konversi tersebut, terdapat rugi-rugi energi yang menyebabkan energi keluaran inverter lebih kecil dibandingkan energi yang masuk dari modul surya. Berdasarkan datasheet pabrikan, inverter yang digunakan pada sistem PLTS ini memiliki efisiensi maksimum (maximum efficiency) sebesar 98,30%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi operasi tertentu inverter mampu mengonversi hingga 98,30% energi listrik DC menjadi energi listrik AC, sedangkan sekitar 1,70% energi lainnya hilang dalam bentuk panas dan rugi-rugi konversi.

Meskipun nilai efisiensi inverter tergolong tinggi, efisiensi aktual selama operasi dapat berbeda dari nilai maksimum yang tercantum pada datasheet. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti tingkat pembebanan inverter, suhu lingkungan, kualitas instalasi, dan kondisi operasional sistem. Namun, karena penelitian ini tidak melakukan pengukuran efisiensi inverter secara langsung, maka analisis kinerja inverter mengacu pada spesifikasi yang diberikan oleh pabrikan. Dengan efisiensi maksimum sebesar 98,30%, rugi-rugi pada inverter secara teoritis relatif kecil dibandingkan beberapa faktor lain yang memengaruhi kinerja sistem, seperti shading, suhu modul yang tinggi, dan degradasi modul surya. Meskipun demikian, akumulasi rugi-rugi dari seluruh komponen sistem, termasuk inverter, tetap memberikan kontribusi terhadap penurunan kinerja keseluruhan sistem yang tercermin dalam nilai Performance Ratio (PR). Oleh karena itu, seluruh faktor rugi-rugi tersebut tetap perlu dipertimbangkan dalam evaluasi kinerja sistem PLTS secara komprehensif.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) on-grid dengan kapasitas 3,76 kWp selama periode pengamatan 61 hari (Agustus–September 2025), diperoleh beberapa kesimpulan utama terkait performa sistem. Nilai rata-rata Final Yield (YF) sebesar 3,2041 jam menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan energi listrik harian yang cukup baik berdasarkan kapasitas terpasang. Sementara itu, nilai rata-rata Reference Yield (YR) sebesar 4,7941 jam mengindikasikan bahwa potensi energi matahari yang tersedia di lokasi penelitian relatif tinggi dan mendukung operasional sistem PLTS. Perbandingan antara kedua parameter tersebut menghasilkan nilai rata-rata Performance Ratio (PR) sebesar 68,47%, yang menunjukkan bahwa kinerja sistem belum sepenuhnya optimal. Jika dibandingkan dengan literatur dari International Energy Agency dan Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, yang menyatakan bahwa sistem PLTS yang beroperasi dengan baik umumnya memiliki nilai PR sekitar 70%, maka kinerja sistem masih

berada sedikit di bawah nilai acuan tersebut. Selain itu, nilai rata-rata Capacity Utilization Factor (CUF) sebesar 13,35% menunjukkan bahwa tingkat pemanfaatan kapasitas sistem berada dalam kisaran umum sistem fotovoltaik, yaitu sekitar 10–20%, sehingga dapat dikategorikan cukup baik. Secara keseluruhan, kinerja sistem PLTS menunjukkan fluktuasi harian yang signifikan yang dipengaruhi oleh variabilitas kondisi lingkungan di wilayah Pontianak, terutama intensitas radiasi matahari dan kondisi cuaca. Nilai PR yang berada di bawah nilai acuan mengindikasikan adanya rugi-rugi sistem yang dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti peningkatan suhu modul, efisiensi inverter yang belum optimal, serta kemungkinan adanya efek shading dan kondisi cuaca yang kurang mendukung.

### **Saran**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan dan peningkatan kinerja sistem PLTS di masa mendatang. Langkah utama yang disarankan adalah melakukan penyesuaian konfigurasi instalasi fisik dengan melandaikan sudut kemiringan (tilt angle) modul surya. Mengingat sistem saat ini terpasang pada sudut 20,25°, penurunan sudut kemiringan agar mendekati nilai optimal di wilayah ekuator seperti Pontianak, yakni sekitar 5°, sangat krusial untuk memaksimalkan penyerapan radiasi matahari secara tegak lurus. Selain itu, pemantauan suhu modul secara lebih detail perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap penurunan efisiensi sistem secara presisi, sehingga dapat dirumuskan langkah mitigasi yang tepat, seperti peningkatan sirkulasi udara di sekitar modul. Evaluasi kinerja inverter secara berkala juga sangat dianjurkan guna memastikan efisiensi konversi energi tetap berada pada kondisi optimal seiring berjalannya waktu operasional. Untuk penelitian selanjutnya, diharapkan dapat menganalisis rugi-rugi sistem secara lebih rinci, termasuk losses akibat hambatan kabel, ketidaksesuaian antar modul (mismatch), serta pengaruh bayangan (shading) dari lingkungan sekitar. Penggunaan periode pengamatan data yang lebih panjang juga sangat disarankan agar diperoleh hasil evaluasi yang lebih representatif terhadap kondisi cuaca dan operasional sistem secara komprehensif sepanjang tahun. Sebagai tambahan untuk opsi pengembangan sistem ke depannya, integrasi dengan teknologi penyimpanan energi (baterai) atau sistem hybrid dapat menjadi alternatif yang baik untuk meningkatkan stabilitas kelistrikan serta mengoptimalkan pemanfaatan energi yang dihasilkan.

### **DAFTAR PUSTAKA**

- A. C. Adi, “Semester I 2024, Kapasitas Terpasang EBT Bertambah 217,7 MW,” KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/en/media-center/news-archives/semester-i-2024-kapasitas-terpasang-ebt-bertambah-2177-mw>
- A. E. FAIRUS NAVEEL MUBAROK, Prof. Dr. Ir. Harintaka, S.T., MT., IPU, “Penentuan Lokasi Instalasi Rooftop Solar Photovoltaic (RPV) di Universitas Gadjah Mada,” 2025.
- A. Elamim, B. Hartiti, A. Haibaoui, A. Lfakir, and P. Thevenin, “Comparative study of photovoltaic solar systems connected to the grid: Performance evaluation and economic analysis,” *Energy Procedia*, vol. 159, pp. 333–339, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.006.
- B. Kamil et al., “Performance Analysis of Multi-Oriented Residential Rooftop PV System in Indonesia Towards Net Zero Emission by 2060,” *Prog. Sol. Energy Eng. Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 16–22, 2022, doi: 10.18280/psees.060102.
- D. A. Quansah, M. S. Adaramola, G. K. Appiah, and I. A. Edwin, “Performance analysis of different grid-connected solar photovoltaic (PV) system technologies with combined capacity of 20 kW located in humid tropical climate,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 7, pp. 4626–4635, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.10.119.
- D. Muhammad and A. Hiendro, “Determination of Tilt and Azimuth Angles of Solar Panels at Tanjungpura University Solar Power Plant Using PVsyst 7 . 3,” vol. 1, no. 3, 2024, doi: 10.26418/telectrical.v1i3.72983.

- I. F. Nur Diansyah, S. Handoko, and J. Windarta, "Implementasi Dan Evaluasi Performa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) on Grid Studi Kasus Smp N 3 Purwodadi," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 4, pp. 701–708, 2021, doi: 10.14710/transient.v10i4.701-708.
- IEEE Std 446, *IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications*, vol. 1995. 1996.
- J. A. D. Deceased and W. A. Beckman, *of Thermal Processes Solar Engineering*.
- R. R. Ramadhana, M. M. Iqbal, A. Hafid, and Adriani, "Analisis Plts on Grid," *J. Tek. Elektro UNISMUH*, vol. 14, no. 1, pp. 12–25, 2022.
- S. Bucket, "NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER)," datasets managed by NASA. [Online]. Available: <https://registry.opendata.aws/nasa-power/>