



Equivalent: Jurnal Ilmiah Sosial Teknik
Volume 7, Issue 2, 97-114
e_ISSN: 2775-0833
<https://jurnalequivalent.id/index.php/jequi/index>
DOI: doi.org/10.59261/jequi.v7i2.228

Optimasi Kinerja Sistem Fotovoltaik Terhubung Jaringan (On-Grid) Berkapasitas 308 kWp

***Dimas Bagus Sandra**
Universitas Muhammadiyah
Malang, Indonesia

Kurniawan Dwi S
Universitas Muhammadiyah
Malang, Indonesia

M. Rifki Abdillah
Universitas Muhammadiyah
Malang, Indonesia

Diaz Budi
Universitas Muhammadiyah
Malang, Indonesia

Machmud Effendy
Universitas Muhammadiyah
Malang, Indonesia

Haneef Naufal
Universitas Muhammadiyah
Malang, Indonesia

***Corresponding author:**
Dimas Bagus Sandra, Muhammadiyah Malang,
Indonesia,
✉ dimasbagussandra@gmail.com

Article Info :

Article history:

Received: June 28, 2025

Revised: August 29, 2025

Accepted: October 29, 2025

Keywords:

performance ratio;
soiling; zero export;
UVR; UVT; energy efficiency

Kata Kunci:

performance ratio; soiling; zero
export; UVR; UVT; efisiensi energi

Abstract

Background: The deployment of grid-connected solar photovoltaic (PV) systems in industrial environments requires optimal performance and high operational reliability, particularly under zero-export regulations. System performance is influenced by environmental and technical factors such as dust accumulation (soiling), DC cable power losses, and the effectiveness of voltage protection devices including Under Voltage Relay (UVR) and Under Voltage Trip (UVT).

Aims: This study aims to evaluate the performance of a 308 kWp on-grid solar PV system installed in an industrial area in Lumajang by assessing the impact of soiling, DC cable losses, zero-export policy implementation, and UVR/UVT protection systems on overall system efficiency and stability.

Methods: A case study method was applied using real operational data obtained from the Huawei FusionSolar monitoring system. The analysis focused on performance ratio (PR), power losses due to DC cable length, energy utilization under zero-export conditions, and the effectiveness of UVR/UVT systems in maintaining voltage stability.

Results: The findings show that soiling significantly reduces system performance, causing a PR decrease of approximately 30–40%. DC cable length contributes to additional power losses, while the zero-export system, although effective in preventing grid energy injection, results in potential unused energy. UVR and UVT systems operate effectively in maintaining voltage stability and preventing system disturbances.

Conclusion: The performance of industrial on-grid PV systems is strongly affected by environmental and operational factors. Regular module cleaning, optimized DC cable design, adaptive zero-export strategies, and reliable UVR/UVT protection systems are essential to enhance efficiency, reliability, and voltage stability.

Abstrak

Pendahuluan: Penerapan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terhubung jaringan (on-grid) di sektor industri menuntut kinerja sistem yang optimal dan keandalan operasional yang tinggi, terutama dalam penerapan kebijakan zero-export. Kinerja PLTS dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan dan teknis, seperti akumulasi debu (soiling), rugi-rugi daya pada kabel DC, serta efektivitas sistem proteksi tegangan berupa Under Voltage Relay (UVR) dan Under Voltage Trip (UVT).

Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem PLTS on-grid berkapasitas 308 kWp yang terpasang di kawasan industri Lumajang dengan meninjau pengaruh soiling, rugi-rugi daya kabel DC,

penerapan kebijakan zero-export, serta kinerja sistem proteksi UVR/UVT terhadap efisiensi dan stabilitas sistem.

Metode: Metode studi kasus digunakan dengan memanfaatkan data operasi aktual yang diperoleh dari sistem pemantauan Huawei FusionSolar. Analisis difokuskan pada parameter kinerja utama, meliputi rasio kinerja (performance ratio/PR), rugi-rugi daya akibat panjang kabel DC, pemanfaatan energi pada kondisi zero-export, serta efektivitas sistem UVR/UVT dalam menjaga stabilitas tegangan.

Hasil: Hasil penelitian menunjukkan bahwa soiling berdampak signifikan terhadap penurunan kinerja sistem, dengan penurunan PR mencapai 30–40% dibandingkan kondisi optimal. Panjang kabel DC meningkatkan rugi-rugi daya, sementara penerapan zero-export efektif mencegah ekspor energi ke jaringan namun berpotensi menimbulkan energi tidak termanfaatkan. Sistem proteksi UVR/UVT terbukti berfungsi dengan baik dalam menjaga stabilitas tegangan dan mencegah gangguan sistem.

Kesimpulan: Kinerja PLTS on-grid di lingkungan industri sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan operasional. Pemeliharaan rutin untuk mengurangi dampak soiling, perancangan kabel DC yang efisien, strategi zero-export yang adaptif, serta sistem proteksi UVR/UVT yang andal sangat penting untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan stabilitas sistem.

To cite this article: Sandra, D. B., Kurniawan, D. S., Rifki, M., Abdillah, D. B., Effendy, M., Haneef, & Naufal. (2025). *Optimasi kinerja sistem fotovoltaik terhubung jaringan (on-grid) berkapasitas 308 kWp. Equivalent: Jurnal Ilmiah Sosial Teknik*, 7(2), 97–114. <https://doi.org/10.59261/jequi.v7i2.228>

PENDAHULUAN

Energi Baru Terbarukan (EBT) di Indonesia terus berkembang seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan sumber energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu teknologi yang memiliki peran strategis dalam mendukung transisi menuju energi bersih adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) (Sianipar et al., 2024; Lahope, 2024). Teknologi ini semakin banyak diterapkan di berbagai sektor, termasuk sektor industri, seiring dengan menurunnya biaya produksi sistem fotovoltaik, meningkatnya efisiensi modul PV, serta adanya dukungan kebijakan pemerintah terhadap pengembangan energi terbarukan (Maghami et al., 2016; Sidik et al., 2023).

PLTS bekerja dengan mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui modul fotovoltaik (PV), yang selanjutnya diubah dari arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan inverter sebelum disalurkan ke beban atau jaringan listrik (Priatam et al., 2021; Arrosyid & Kusnadi, 2024). Kinerja sistem PLTS sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis dan lingkungan, antara lain intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, orientasi dan kemiringan panel, serta tingkat kebersihan permukaan modul. Salah satu parameter utama yang umum digunakan untuk mengevaluasi kinerja PLTS adalah *Performance Ratio* (PR), yang merepresentasikan rasio antara energi aktual yang dihasilkan sistem terhadap energi teoritis pada kondisi ideal (Ghazi, Sayigh, & Ip, 2014).

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji berbagai faktor yang memengaruhi kinerja PLTS. Darwish et al. (2015) menunjukkan bahwa akumulasi debu (*soiling*), khususnya pada lingkungan industri dan area dengan aktivitas tinggi, dapat menurunkan produksi energi hingga 30–40%, yang secara langsung berdampak pada penurunan nilai PR. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Mani dan Pillai (2010), yang menegaskan bahwa *soiling* merupakan salah satu penyebab utama degradasi kinerja sistem PV di daerah tropis dan semi-kering.

Selain faktor lingkungan, aspek desain kelistrikan juga berperan penting dalam efisiensi sistem. Ekici dan Kopru (2017) melalui simulasi menggunakan PVsyst menunjukkan bahwa panjang dan ukuran penampang kabel DC berpengaruh signifikan terhadap kerugian daya. Kerugian daya akibat resistansi kabel dapat mencapai lebih dari 1% apabila desain kabel tidak dioptimalkan, sehingga berdampak pada efisiensi sistem secara keseluruhan.

Dalam konteks operasional di Indonesia, penerapan kebijakan *zero export* menjadi salah satu tantangan tersendiri dalam implementasi PLTS industri (Aprilianto & Ariefianto, 2021). Sistem *zero export* dirancang untuk mencegah aliran daya berlebih dari PLTS ke jaringan PLN, guna menjaga stabilitas sistem kelistrikan (Panjadinata, 2024). Namun, beberapa studi menunjukkan bahwa pada kondisi beban rendah, kebijakan ini dapat menyebabkan energi

terbuang karena tidak seluruh energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan (Nugraha, 2025). Tanpa pengelolaan yang tepat, kondisi ini berpotensi menurunkan efisiensi energi dan manfaat ekonomi dari sistem PLTS (Kadang & Windarta, 2021).

Untuk menjaga keandalan dan keselamatan sistem, penggunaan perangkat proteksi tegangan seperti *Under Voltage Relay* (UVR) dan *Under Voltage Trip* (UVT) juga menjadi aspek penting dalam sistem PLTS industri (Kotb et al., 2018; Zubkov et al., 2022). Widarsono (2021) menjelaskan bahwa UVR dan UVT berfungsi melindungi inverter dan peralatan listrik dari kondisi tegangan abnormal, sekaligus menjaga stabilitas sistem pada saat terjadi fluktuasi beban atau gangguan jaringan. Meskipun demikian, kajian terkait efektivitas sistem proteksi ini umumnya masih dilakukan secara terpisah dari analisis kinerja energi (Tanoto, 2023).

Berdasarkan tinjauan penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar studi masih berfokus pada satu aspek tertentu, seperti *soiling*, rugi daya kabel, atau kebijakan *zero export*, tanpa mengintegrasikan seluruh faktor tersebut secara komprehensif dalam satu studi berbasis sistem PLTS industri yang beroperasi secara nyata (Setianto & Anandhita, 2017). Oleh karena itu, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) dalam memahami keterkaitan antara faktor lingkungan, desain teknis, kebijakan operasional, dan sistem proteksi terhadap kinerja PLTS secara menyeluruh.

Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja sistem PLTS On-Grid berkapasitas 308 kWp yang diterapkan pada lingkungan industri di Lumajang secara komprehensif, dengan menganalisis pengaruh akumulasi debu (*soiling*), kerugian daya kabel DC, penerapan kebijakan *zero export*, serta efektivitas sistem proteksi UVR/UVT terhadap nilai *Performance Ratio* (PR) dan efisiensi operasional sistem secara keseluruhan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis dan operasional bagi pengelola serta perancang PLTS industri dalam meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan sistem.

METODE

Penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif berbasis studi kasus, dengan mengambil lokasi pada instalasi PLTS On-Grid 308 kWp di industri pengolahan kayu Lumajang. Data diperoleh secara langsung dari sistem pemantauan Huawei *FusionSolar* selama periode September 2024 hingga Mei 2025. Pemantauan dilakukan secara real-time dan historis, dengan fokus pada nilai *Performance Ratio* (PR), produksi energi, dan kerugian daya sistem.

Komponen utama yang dianalisis terdiri dari 560 unit PV modul tipe monocrystalline JAM72S30-550/MR/1500V, dua inverter Huawei SUN2000-115KTL-M2, dan satu inverter SUN2000-20KTL-M3. Sistem juga dilengkapi dengan konfigurasi *zero export* dan proteksi tegangan UVR/UVT. Setiap subsistem diuji secara terpisah dan gabungan untuk melihat pengaruh terhadap performa sistem secara keseluruhan.

Analisis Performance Ratio (PR)

Performance Ratio dihitung menggunakan rumus standar sebagai berikut:

$$PR = \frac{E_{AC}}{P_{nom} \times H_{POA}} \times 100\%$$

Keterangan :

- E_{AC} : Energi keluaran inverter (kWh)
- P_{nom} : Kapasitas normal sistem PLTS terpasang (kWp)
- H_{POA} : Radiasi surya ttal pada bidang panel (kWh/m²)

Dalam praktik lapangan, digunakan variasi radiasi harian yang tercatat pada sistem *FusionSolar*, dikombinasikan dengan data produksi inverter per hari. PR dihitung secara harian dan dibandingkan antarbulan untuk melihat efek penurunan efisiensi karena *soiling*, kerugian kabel, dan pengaturan *zero export*. Rumus ini telah divalidasi dalam berbagai studi sebelumnya (Maghami et al., 2016; Ghazi et al., 2014).

Perlakuan Pembersihan Panel (Soiling Treatment)

Untuk menguji dampak debu kayu terhadap PR, dilakukan perlakuan pembersihan panel secara total pada tanggal 15 September 2024. PR dihitung sebelum pembersihan (14 September) dan setelah pembersihan (15–18 September). Perbandingan dilakukan dalam 10 kali pengambilan data berbeda yang mewakili kondisi bersih dan kotor.

Ketebalan debu tidak diukur secara langsung, tetapi diestimasi melalui penurunan nilai PR yang terjadi sebelum dan sesudah pembersihan. Rata-rata penurunan PR akibat soiling dalam kondisi tidak dibersihkan mencapai 30–40% dibandingkan kondisi bersih (Darwish et al., 2015).

Pemendekan Kabel DC

Untuk mengukur dampak panjang kabel terhadap kerugian daya, dilakukan simulasi dua skenario:

- Skenario awal: Panjang kabel DC sesuai konfigurasi lapangan (panjang > 50 m).
- Skenario modifikasi: Kabel DC dipendekkan hingga < 30 m.

Pengukuran dilakukan dengan menghitung *voltage drop* (V_d) dan persentase kerugian energi (%Losses) dengan rumus berikut:

$$V_d = \frac{2 \times I \times R_c \times L}{n_{\text{run}} \times 1000}$$
$$\text{Losses (\%)} = \frac{V_d}{V_{\text{DC}}} \times 100\%$$

Hasil perhitungan menunjukkan rata-rata penurunan rugi daya dari 2,08% menjadi 1,76% setelah pemendekan kabel. Efek ini berdampak positif terhadap peningkatan PR rata-rata sebesar $\pm 0,3\%$.

Pengujian Zero Export dan Proteksi UVR/UVT

Zero export dikonfigurasi menggunakan *SmartLogger Huawei*, yang mencegah energi masuk ke grid PLN saat konsumsi beban rendah. Data harian inverter yield dan ekspor listrik digunakan untuk mengidentifikasi jumlah energi yang tidak terserap beban. Evaluasi visual dan data parameter inverter dilakukan saat sistem *berfungsi* dan *tidak berfungsi*.

Sementara itu, UVR dan UVT diuji dengan mensimulasikan penurunan tegangan menggunakan *sensing genset*. Sistem breaker diamati dalam dua kondisi:

- Normal beban: Tegangan stabil dan tidak terjadi pemutusan,
- Gangguan tegangan: Tegangan sengaja diturunkan hingga aktivasi UVR/UVT tercapai.

Respons sistem dicatat untuk mengetahui sensitivitas dan efektivitas proteksi dalam menjaga kestabilan sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Pengujian Subsistem Perangkat Lunak

Analisa pengaruh debu serbuk kayu terhadap keluaran daya sistem PLTS 308 kWp

Tabel 1. Lingkup Pengujian

No	Lingkup Pengujian	Deskripsi
1	Fungsional	Mengetahui dampak yang ditimbulkan dari debu yang berada pada permukaan panel surya, serta presentasi ketebalan debu yang dapat di liat di PR.
2	Kinerja Komponen (simulasi)	Dilakukan sepuluh kali simulasi untuk mengevaluasi tingkat ketebalan debu dalam sistem.

Sumber: Data olahan

Tabel 2. Konfigurasi Pengujian

No	Pengamatan	Capaian
1	Dapat mengetahui nilai PR pada sistem PLTS	Berhasil
2	Dapat mengetahui sejauh mana soiling mempengaruhi kinerja PLTS.	Berhasil jika poin satu terpenuhi.

Sumber: Data olahan

Syarat Pengujian

Dengan melakukan perhitungan terhadap ketebalan debu yang menumpuk, menggunakan variasi nilai Performance Ratio dari panel surya yang berbeda dalam sistem, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai dampaknya terhadap efisiensi dan kinerja keseluruhan.

Prosedur Pengujian

Pemanfaatan panel surya tipe JAM72S30-550/MR/1500V, bersama dengan dua inverter SUN2000-115KTL-M2 serta satu inverter SUN2000-20KTL-M3, digunakan dalam proses perhitungan bertahap. Perhitungan dilakukan dengan menerapkan nilai Performance Ratio (PR) sesuai ketentuan pengujian, yang kemudian diulang sebanyak sepuluh kali percobaan dengan beberapa tanggal atau bulan yang berbeda untuk memperoleh hasil yang lebih akurat.

Teknik analisa output daya, Efisiensi PV modul, dalam hal ini dapat di lihat pada perhitungan dengan rumus:

$$P(t) = P_{peak} \times \left(\frac{I(t)}{1000} \right) \times PR$$

Keterangan :

P(t) = hasil daya pada waktu (t) dalam satuan watt.

P_{peak} = kapasitas PLTS yang terpasang.

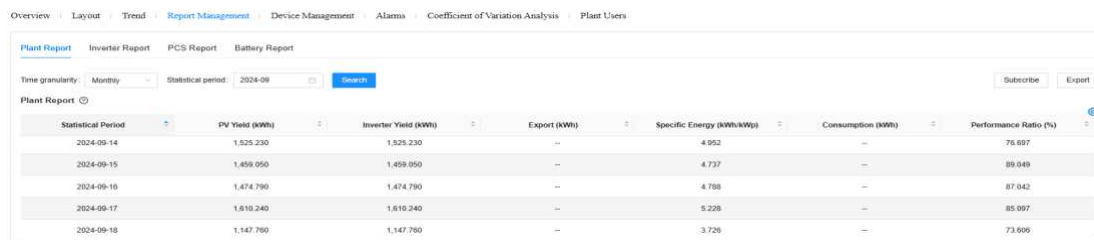
I(t) = radiasi matahari yang diterima pada waktu (t).

1000 W/m = standart insensitas matahari.

PR = performance ratio.

Hasil Pengujian

Data Performance Ratio (PR) bulan September, November 2024 dan Mei 2025

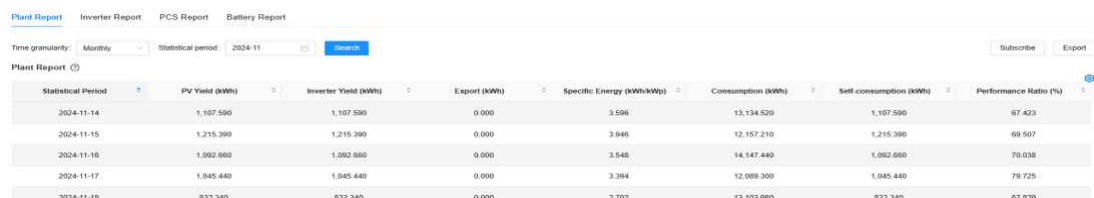


Statistical Period	PV Yield (kWh)	Inverter Yield (kWh)	Export (kWh)	Specific Energy (kWh/kWp)	Consumption (kWh)	Performance Ratio (%)
2024-09-14	1,525,230	1,525,230	--	4.952	--	78.897
2024-09-15	1,459,050	1,459,050	--	4.737	--	89.049
2024-09-16	1,474,790	1,474,790	--	4.788	--	87.042
2024-09-17	1,610,240	1,610,240	--	5.228	--	85.897
2024-09-18	1,147,790	1,147,790	--	3.726	--	73.696

Gambar 1. Data Performance Ratio September 2024

Sumber: Data olahan

Gambar 1 merupakan data dari produksi PLTS pada pabrik kayu di lumajang, pada table diatas merupakan data yang diambil pada bulan september, pada tanggal 15-17 september performa resio plts tinggi di angka sekitar 85% sampai 89% pada tanggal ini dilakukan pembersihan pada keseluruhan panel surya, pembersihan ini dilakukan untuk menghilangkan debu yang terdapat pada panel surya sehingga mengurangi penyerapan energi matahari.

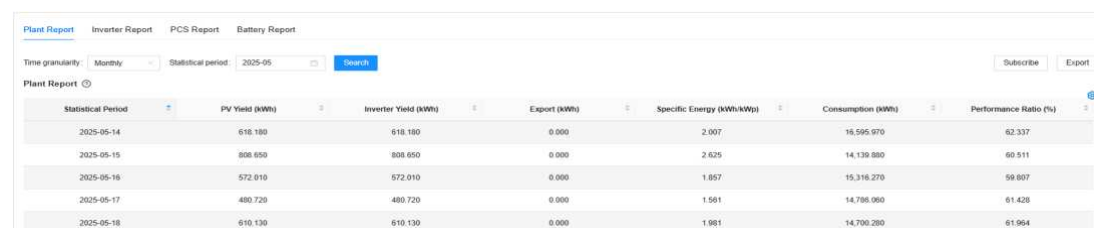


Statistical Period	PV Yield (kWh)	Inverter Yield (kWh)	Export (kWh)	Specific Energy (kWh/kWp)	Consumption (kWh)	Self-consumption (kWh)	Performance Ratio (%)
2024-11-14	1,107,590	1,107,590	0.000	3.508	13,134,520	1,107,590	67.423
2024-11-15	1,215,390	1,215,390	0.000	3.948	12,157,210	1,215,390	69.507
2024-11-16	1,092,660	1,092,660	0.000	3.548	14,147,440	1,092,660	70.038
2024-11-17	1,045,440	1,045,440	0.000	3.394	12,089,300	1,045,440	79.725
2024-11-18	832,340	832,340	0.000	2.792	13,103,980	832,340	67.829

Gambar 2. Data Performance Ratio November 2024

Sumber: Data olahan

Gambar 2 merupakan data hasil dari produksi PLTS pada pabrik kayu di lumajang, jika dibandingkan dengan data pada bulan september pada bulan november performa ratio atau tingkat penyerapan energi matahari, pada bulan ini mengalami penurunan mulai dari sekitar 85% sampai pada 59% pada titik terendahnya jika dibandingkan dari bulan sebelumnya.



Statistical Period	PV Yield (kWh)	Inverter Yield (kWh)	Export (kWh)	Specific Energy (kWh/kWp)	Consumption (kWh)	Performance Ratio (%)
2025-05-14	616,180	616,180	0.000	2.907	16,595,970	62.337
2025-05-15	808,650	808,650	0.000	2.625	14,139,880	60.511
2025-05-16	572,010	572,010	0.000	1.857	15,316,270	59.807
2025-05-17	480,720	480,720	0.000	1.561	14,786,060	61.426
2025-05-18	610,130	610,130	0.000	1.981	14,700,280	61.964

Gambar 3. Data Performance Ratio Mei 2025

Sumber: Data olahan

Gambar 3 merupakan akhir pada proses pemantauan pengambilan data performa rasio, data menunjukan bahwa tingkat soiling debu pada pabrik kayu di lumajang sangat tinggi. Penyerapan energi matahari sangat merugikan dari produktifitas maupun dari biaya tidak maksimal, sistem ini hampir kehilangan sekitar 30-40% dari puncak produksi yang terjadi pada bulan september.

System summary			
Grid-Connected System		Tables on a building	
PV Field Orientation		User's needs	
Fixed planes	2 orientations	Unlimited load (grid)	
Tilts/azimuths	10 / -20 °		
	10 / 160 °		
System information			
PV Array		Inverters	
Nb. of modules	560 units	Nb. of units	3 units
Pnom total	308 kWp	Pnom total	250 kWac
		Pnom ratio	1.232
Results summary			
Produced Energy	509324 kWh/year	Specific production	1654 kWh/kWp/year
		Perf. Ratio PR	79.00 %

Gambar 4. Data Pvsyst aktual
Sumber: Data olahan

Pengambilan nilai PR di lakukan pada sistem monitoring huawei selama rentang beberapa bulan. Pengambilan nilai PR yang di ambil di awal pemasangan panel surya, dua bulan setelah pemasangan panel surya dan 9 bulan setelah pemasangan panel surya.

Berdasarkan hasil pengujian bertahap, terlihat bahwa seiring berjalannya waktu, lapisan debu pada permukaan panel surya semakin menebal. Kondisi ini menghambat modul PV dalam mengoptimalkan penyerapan energi matahari, sehingga berdampak pada penurunan performance ratio sistem. Nilai PR yang kurang dari 79% disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk penyimpangan suhu operasi modul PV sebesar 25 derajat, serta berbagai kerugian sistem seperti kehilangan daya akibat kabel, kondisi pemasangan di lapangan, dan efek soiling.

Perbandingan nilai PR di lapangan dilakukan dengan menggunakan sistem monitoring Huawei yang disebut Fusion Solar. Data dikumpulkan selama lima hari dalam rentang tiga bulan. Pada 14 September, panel PV masih dalam kondisi belum dibersihkan, kemudian pada 15 September dilakukan pembersihan. Setelah itu, berdasarkan data yang tercantum dalam tabel, terlihat bahwa nilai PR mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai 61,964% pada 18 Mei.

Tabel 3. Energi yang di hasilkan dan di buang pada sistem PLTS

Date	Performance Ratio (PR)	PV Yield (kWh)	Losses PV Yield (kWh)
14 September 2024	76.697	1525.23	421.6521075
15 September 2024	89.049	1459.05	145.0218593
16 September 2024	87.042	1474.79	183.9717587
17 September 2024	85.097	1610.24	242.2635665
18 September 2024	73.606	1147.76	378.823485
14 November 2024	67.423	1107.59	500.6603152
15 November 2024	69.507	1215.39	496.4761574
16 November 2024	70.038	1092.66	434.673933
17 November 2024	79.725	1045.44	238.3301599
18 November 2024	67.829	832.34	369.0058255
14 Mei 2025	62.337	618.18	352.6691265
15 Mei 2025	60.511	808.65	499.6548537
16 Mei 2025	59.807	572.01	364.3315486
17 Mei 2025	61.428	480.72	285.4206525
18 Mei 2025	61.964	610.13	353.8446788

Sumber: Data olahan

Berdasarkan tabel 3, terlihat adanya tren penurunan nilai Performance Ratio (PR), energi yang dihasilkan, serta energi yang terbuang selama periode beberapa bulan terakhir. Fenomena ini menunjukkan bahwa seiring waktu, akumulasi debu pada permukaan panel surya semakin meningkat, sehingga menghambat penyerapan energi matahari oleh modul PV. Dalam kondisi ideal, semakin besar energi yang berhasil dibangkitkan, semakin tinggi pula nilai PR. Namun, keberadaan debu yang menempel pada panel surya menyebabkan kehilangan daya yang signifikan, sehingga nilai PR mengalami penurunan secara bertahap.

Debu memiliki dampak besar terhadap efisiensi sistem pembangkit listrik tenaga surya, terutama dalam hal produksi energi. Banyak penelitian dan artikel yang membahas persoalan ini dan menekankan perlunya pembersihan rutin pada permukaan panel surya agar akumulasi debu dapat diminimalisir. Salah satu metode yang disarankan untuk mengatasi masalah ini adalah dengan memperhatikan lingkungan sekitar tempat pemasangan modul PV. Misalnya, dengan menanam rumput di area sekitar panel surya guna mengurangi jumlah debu yang terbawa oleh angin dan menempel pada permukaan modul. Selain itu, metode lain seperti penggunaan sistem pembersihan otomatis atau penerapan pelapis khusus yang dapat mengurangi adhesi debu juga menjadi solusi yang dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan efisiensi sistem.

Dengan pemeliharaan yang tepat, sistem pembangkit listrik tenaga surya dapat bekerja lebih optimal, mengurangi kerugian akibat debu, serta mempertahankan nilai PR yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan efektivitas dalam pemanfaatan energi matahari.

Analisa Kerugian Daya pada Kabel DC pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya 38 kWp di Lumajang Lingkup Pengujian

Table 4. Lingkup Pengujian

No	Lingkup Pengujian	Deskripsi
1	Fungsional	Digunakan untuk mengetahui dampak panjang kabel DC terhadap keluaran nilai PR dalam sistem PLTS
2	Kinerja Komponen (simulasi)	Dilakukan perhitungan losses kabel DC dengan menggunakan Excel
		Di lakukan perbandingan rata-rata Losses kabel DC terhadap nilai PR
		Memperpendek kabel DC sehingga di dapatkan nilai PR yang tinggi

Sumber: Data olahan

Konfigurasi Pengujian

Table 5. Konfigurasi Pengujian

No	Pengamatan	Capaian
1	Dapat mengetahui PR yang maksimal	Berhasil
2	Dapat membandingkan nilai PR dengan ukuran panjang kabel DC yang berbeda	Berhasil jika poin satu terpenuhi.

Sumber: Data olahan

Syarat Pengujian

Pengujian *DC losses* pada kabel panjang dan pendek dalam sistem PLTS dilakukan untuk memahami dampaknya terhadap nilai *Performance Ratio (PR)*. Variasi panjang kabel dapat mempengaruhi resistansi dan efisiensi transmisi daya, sehingga penting untuk menganalisis perbedaan energi yang hilang. Dengan metode pengukuran yang akurat, hasil pengujian dapat membantu dalam optimalisasi pemilihan kabel untuk meningkatkan kinerja sistem PLTS.

Prosedur Pengujian

Dalam analisis ini, panjang kabel DC awal yang sesuai dengan sistem PLTS dihitung dan dibandingkan terhadap nilai *Performance Ratio (PR)*. Kabel kemudian diperpendek untuk mengoptimalkan efisiensi dan mencapai nilai PR maksimal. Dari hasil pengujian, sistem dengan

kabel lebih pendek menunjukkan peningkatan efisiensi dibandingkan dengan konfigurasi awal, memberikan dasar untuk pemilihan

Hasil Pengujian

$$\%V_d = \left(\frac{V_d}{V_{mp} \times n} \right) \times 100\%$$

V_{mp} = Tegangan maksimum daya modul (Volt)

n = Jumlah modul dalam satu string

Nilai persentase *voltage drop* ini digunakan untuk merepresentasikan kerugian daya pada sisi DC (*DC cable losses*). Semakin besar nilai *voltage drop*, semakin besar pula energi yang hilang pada penghantar DC, yang secara langsung berdampak pada penurunan *Performance Ratio* (PR) sistem PLTS.

Tabel 6. Losses DC dengan Sistem yang Tepasang

Solar Cable	Core Size (mm ²)	Over all Dia.	L	Imp	20°C (Rc)	no. of string	Vmp * no. of string	Losses DC Cable (V)	Losses DC Cable (%)
STRING 01-INV 1			123	13,11	5,09	20	839,2	16,4	1,96%
STRING 02-INV 1	1C-4	5,6	117	13,11	5,09	20	839,2	15,6	1,86%
STRING 03-INV 1	1C-4	5,6	115	13,11	5,09	20	839,2	15,3	1,83%
STRING 04-INV 1	1C-4	5,6	114	13,11	5,09	20	839,2	15,2	1,81%
STRING 05-INV 1	1C-4	5,6	105	13,11	5,09	20	839,2	14	1,67%
STRING 06-INV 1	1C-4	5,6	105	13,11	5,09	20	839,2	14	1,67%
STRING 07-INV 1	1C-4	5,6	95	13,11	5,09	20	839,2	12,7	1,51%
STRING 08-INV 1	1C-4	5,6	93	13,11	5,09	20	839,2	12,4	1,48%
STRING 09-INV 1	1C-4	5,6	111	13,11	5,09	20	839,2	14,8	1,77%
STRING 10-INV 1	1C-4	5,6	109	13,11	5,09	20	839,2	14,5	1,73%
STRING 11-INV 1	1C-4	5,6	126	13,11	5,09	20	839,2	16,8	2,00%
STRING 12-INV 2	1C-4	5,6	127	13,11	5,09	20	839,2	16,9	2,02%
STRING 13-INV 1	1C-4	5,6	126	13,11	5,09	20	839,2	16,8	2,00%
STRING 01-INV 2	1C-4	5,6	123	13,11	5,09	20	839,2	16,4	1,96%
STRING 02-INV 2	1C-4	5,6	124	13,11	5,09	20	839,2	16,5	1,97%
STRING 03-INV 2	1C-4	5,6	114	13,11	5,09	20	839,2	15,2	1,81%

Solar Cable	Core Size (mm ²)	Over all Dia.	L	Imp	20°C (Rc)	no. of string	Vmp * no. of string	Losses DC Cable (V)	Losses DC Cable (%)
STRING 04-INV 2	1C-4	5,6	108	13,11	5,09	20	839,2	14,4	1,72%
STRING 05-INV 2	1C-4	5,6	118	13,11	5,09	20	839,2	15,7	1,88%
STRING 06-INV 2	1C-4	5,6	96	13,11	5,09	20	839,2	12,8	1,53%
STRING 07-INV 2	1C-4	5,6	96	13,11	5,09	20	839,2	12,8	1,53%
STRING 08-INV 2	1C-4	5,6	92	13,11	5,09	20	839,2	12,3	1,46%
STRING 09-INV 2	1C-4	5,6	114	13,11	5,09	20	839,2	15,2	1,81%
STRING 10-INV 2	1C-4	5,6	111	13,11	5,09	20	839,2	14,8	1,77%
STRING 11-INV 2	1C-4	5,6	121	13,11	5,09	20	839,2	16,1	1,92%
STRING 12-INV 2	1C-4	5,6	113	13,11	5,09	21	881,16	15,1	1,71%
STRING 13-INV 2	1C-4	5,6	108	13,11	5,09	21	881,16	14,4	1,64%
STRING 01-INV 3	1C-4	5,6	102	13,11	5,09	19	797,24	13,6	1,71%
STRING 02-INV 3	1C-4	5,6	98	13,11	5,09	19	797,24	13,1	1,64%
Average Losses								14,8	1,76%

Sumber: Data olahan

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 6, diperoleh nilai rata-rata *losses* kabel DC sebesar **1,76%**, yang masih berada dalam batas toleransi desain sistem PLTS (< 2%).

Tabel 7. Losses DC dengan Pengurangan Panjang

Rata-rata losses kabel DC	2.08%
Rata-rata losses kabel DC setelah pengurangan panjang	1.76%

Sumber: Data olahan

Selanjutnya, pada Tabel 7 ditunjukkan bahwa pengurangan panjang kabel DC mampu menurunkan *losses* rata-rata dari 2,08% menjadi 1,76%, sehingga memberikan peningkatan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Hasil perbandingan losses kabel DC

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, terdapat selisih sebesar 0,32% yang berpengaruh terhadap nilai keluaran Performance Ratio (PR) pada sistem PLTS. Selisih ini menunjukkan bahwa kerugian pada kabel DC memberikan dampak yang cukup signifikan terhadap efisiensi sistem. Dengan adanya kerugian ini, performa keseluruhan PLTS bisa

mengalami penurunan, yang berpotensi mempengaruhi produksi energi dan efektivitas penggunaan sumber daya.

Selain itu, dari sisi instalasi, penempatan inverter shelter menjadi faktor yang perlu dipertimbangkan secara matang. Idealnya, inverter sebaiknya ditempatkan sedekat mungkin dengan modul PV untuk mengurangi kerugian daya akibat panjang kabel DC. Namun, dalam praktiknya, lokasi yang telah disediakan oleh pihak klien berada cukup jauh dari modul PV, sehingga diperlukan solusi yang dapat meminimalkan dampak negatif dari penarikan kabel yang lebih panjang.

Pendekatan yang dapat dilakukan antara lain adalah pemilihan kabel dengan ukuran yang lebih besar guna mengurangi rugi-rugi daya, serta evaluasi kembali desain sistem untuk memastikan kompromi terbaik antara efisiensi energi dan keterbatasan lokasi yang tersedia. Dengan cara ini, diharapkan sistem PLTS tetap dapat bekerja secara optimal meskipun ada tantangan dalam aspek instalasi.

Analisis Zero Export terhadap Kinerja dan Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya 308 kWp di Lumajang

Lingkup Pengujian

Table 8. Lingkup Pengujian

No	Lingkup Pengujian	Deskripsi
1	Fungsional	Digunakan untuk mengetahui dampak Zero export dalam sistem PLTS
2	Kinerja Komponen	Dilakukan analisa Zero export melalui SLD serta Fusion solar

Sumber: Data olahan

Konfirmasi Pengujian

Table 9. Konfirmasi Pengujian

No	Pengamatan	Capaian
1	Dapat mengetahui cara kerja zero export	Berhasil
2	Dapat mengetahui cra setting zero export huawei	Berhasil jika poin satu terpenuhi.

Sumber: Data olahan

Syarat Pengujian

Syarat pengujian untuk menilai dampak Zero Export terhadap kinerja PLTS 308 kWp di Lumajang. Pengujian dilakukan dalam kondisi sistem yang stabil, dengan alat ukur terkalibrasi seperti power meter dan data logger.

Prosedur Pengujian

Dampak Zero Export terhadap kinerja dan efisiensi PLTS 308 kWp di Lumajang. Pengujian dilakukan dengan analisis data historis dan pemantauan langsung menggunakan alat ukur seperti **power meter** dan **data logger**.

Hasil Pengujian

Sistem PLTS beroperasi dengan konfigurasi Zero Export, di mana energi yang dihasilkan diarahkan untuk konsumsi internal tanpa masuk ke jaringan PLN. Parameter utama yang diamati meliputi:

- a) Daya DC yang dihasilkan oleh panel surya
- b) Daya AC yang dikonsumsi oleh beban local

Statistical Period	Inverter Yield (kWh)	Export (kWh)	Consumption (kWh)	Performance Ratio (%)
2025-04-01	0.210	0.000	99.760	0.018
2025-04-02	0.200	0.000	102.470	0.013
2025-04-03	0.220	0.000	102.720	0.024
2025-04-04	0.210	0.000	103.950	0.011
2025-04-05	0.200	0.000	104.930	0.012
2025-04-06	46.900	0.000	4.211.600	2.787
2025-04-07	1.073.660	0.000	17.693.300	58.585
2025-04-08	1.013.410	0.040	13.004.520	57.520
2025-04-09	921.230	0.000	16.651.070	59.744
2025-04-10	607.120	0.000	14.793.260	65.252

Total records: 30

Gambar 5. Data Daya Existing dan PLTS pada Fusion Solar
Sumber: Data olahan



Gambar 6. Dokumentsai Pemasangan Zero Export pada Sisi Incoming PLN
Sumber: Data olahan



Gambar 7. Aliran Daya jika Zero Export berjalan pada Fusion Solar
Sumber: Data olahan



Gambar 8. Aliran Daya jika Zero Export tidak berjalan pada Fusion Solar
Sumber: Data olahan

SmartLogger3000			
No.	Signal Name	Value	Unit
1	Device status	On-grid	Power limit
2	Energy yield of current day	12.23	kWh
3	Real energy yield	972.82	kWh
4	Reduced CO2 emission	670.80	kg
5	DC power	0.000	kW
6	Active power	0.000	kW
7	Reactive power	-0.010	kVar
8	Power factor	0.000	
9	PV1/PV2/PV3/PV4/PV5/PV6/PV7/PV8 voltage	773.4/771.4/773.4/819.3/819.3/823.7/823.7	V
10	PV9/PV10/PV11/PV12/PV13/PV14/PV15/PV16 voltage	823.7/822.8/822.8/822.8/824.0/824.0/823.8	V
11	PV17/PV18/PV19/PV20/PV21 voltage	823.8/823.8/823.8/823.8/823.8	V
12	PV1/PV2/PV3/PV4/PV5/PV6/PV7/PV8 current	0.11/0.08/0.00/0.10/0.01/-0.02/-0.06/0.03	A
13	PV9/PV10/PV11/PV12/PV13/PV14/PV15/PV16 current	0.008/0.01/0.02/0.06/0.06/0.02/0.02/-0.02	A
14	PV17/PV18/PV19/PV20/PV21 current	0.03/0.00/-0.08/0.06/0.00	A
15	Grid A/B/C phase voltage	238.9/242.1/240.0	V
16	Grid A/B/C phase current	0.076/0.076/0.076	A
17	Today's peak active power	122.448	kW
18	Grid frequency	49.98	Hz
19	Locking	Unlocked	
20	Insulation resistance	0.768	MΩ
21	Cabinet temperature	42.1	degC
22	Startup time	2025-06-19 05:33:16	
23	Shutdown time	NA	
24	Collect DSP data	Normal	
25	Active power adjustment	P = 0.00(Active power deration percent)	
26	Reactive power adjustment	PF = 1.000(Power factor)	
27	Built-in PD compensation direction	PV: positive offset	
28	Built-in PD running status	Disable	
29	Voltage between PV- and the ground	-326.6	V

Gambar 9. Kondisi inverter jika Zero export berjalan pada enspire smartlogger
Sumber: Data olahan

SmartLogger3000			
No.	Signal Name	Value	Unit
1	Device status	On-grid	
2	Energy yield of current day	5.76	kWh
3	Real energy yield	2.18	kWh
4	Reduced CO2 emission	5.74	kg
5	DC power	9.723	kW
6	Active power	9.478	kW
7	Reactive power	0.001	kVar
8	Power factor	1.000	
9	PV1/PV2/PV3/PV4/PV5/PV6/PV7/PV8 voltage	750.0/750.0/750.0/734.0/734.0/726.8/726.8	V
10	PV9/PV10/PV11/PV12/PV13/PV14/PV15/PV16 voltage	726.8/775.1/775.1/775.1/767.9/767.9/778.5	V
11	PV17/PV18/PV19/PV20/PV21 voltage	778.5/778.5/779.8/779.8/779.8	V
12	PV1/PV2/PV3/PV4/PV5/PV6/PV7/PV8 current	0.83/0.84/0.87/0.85/0.85/0.87/0.89/0.84	A
13	PV9/PV10/PV11/PV12/PV13/PV14/PV15/PV16 current	0.01/0.03/0.04/0.00/0.04/0.08/0.02/0.83	A
14	PV17/PV18/PV19/PV20/PV21 current	0.85/0.02/0.86/0.00/0.01	A
15	Grid A/B/C phase voltage	227.8/231.8/230.2	V
16	Grid A/B/C phase current	14.408/14.517/14.598	A
17	Today's peak active power	30.409	kW
18	Grid frequency	49.96	Hz
19	Locking	Unlocked	
20	Insulation resistance	0.819	MΩ
21	Cabinet temperature	37.0	degC
22	Startup time	2025-06-17 16:43:35	
23	Shutdown time	NA	
24	Collect DSP data	Normal	
25	Active power adjustment	P = 100.00(Active power deration percent)	
26	Reactive power adjustment	PF = 1.000(Power factor)	

Gambar 10. Kondisi inverter jika Zero export tidak bekerja pada enspire smartlogger
Sumber: Data olahan

Data menunjukkan bahwa konsumsi energi internal cukup tinggi, dengan beberapa fluktuasi bergantung pada inverter yield harian. Pada tanggal 01-05 April 2025, memiliki daya PLN sebesar ± 100 kWh dan daya PLTS sebesar $\pm 0,2$ kWh, sementara pada 07-10 April 2025, konsumsi PLN meningkat drastis mencapai $\pm 17,693.3$ kWh dan PLTS sebesar ± 900 kWh.

Berdasarkan data yang diperoleh, Zero Export berfungsi ketika beban pada sistem mengalami penurunan hingga melampaui batas ekspor yang telah dikonfigurasi pada SmartLogger Huawei. Akibatnya, kelebihan daya yang tidak dapat disalurkan ke jaringan akan terbuang.

Analisis Kinerja Under Voltage Release (UVR) dan Under Voltage Trip (UVT) pada Breaker di Sistem PLTS 308 kWp Lumajang

Lingkup Pengujian

Table 13. Lingkup Pengujian

No	Lingkup Pengujian	Deskripsi
1	Fungsional	Digunakan untuk mengetahui cara kerja UVT dan UVR pada panel PLTS
2	Kinerja Komponen (simulasi)	Dilakukan analisa UVT dan UVR melalui SLD Di lakukan pemaparan cara kerja UVT dan UVR

Sumber: Data olahan

Konfigurasi Pengujian

Table 14. Konfigurasi Pengujian

No	Pengamatan	Capaian
1	Dapat mengetahui PR yang maksimal	Berhasil
2	Dapat membandingkan nilai PR dengan ukuran panjang kabel DC yang berbeda	Berhasil jika poin satu terpenuhi.

Sumber: Data olahan

Syarat Pengujian

Dalam pengujian ini, sistem PLTS dioperasikan dalam dua kondisi utama: beban normal dan variasi beban. Kondisi beban normal mencerminkan operasi standar di mana konsumsi energi berjalan sesuai dengan kebutuhan harian tanpa perubahan signifikan. Sementara itu, variasi beban dilakukan untuk mensimulasikan fluktuasi daya yang dapat mempengaruhi stabilitas tegangan. Dengan memonitor sistem dalam kedua skenario ini, dapat dianalisis bagaimana breaker merespons penurunan tegangan akibat perubahan beban. Evaluasi ini penting untuk memastikan bahwa Under Voltage Release (UVR) dan Under Voltage Trip (UVT) bekerja secara optimal dalam melindungi sistem dari potensi gangguan tegangan rendah yang dapat mempengaruhi performa inverter dan distribusi daya.

Prosedur Pengujian

Pada tahap pengujian respons Under Voltage Release (UVR) terhadap penurunan tegangan, sistem PLTS dioperasikan dalam kondisi tegangan normal dengan bantuan sensing genset sebagai sumber simulasi gangguan. Genset sensing dikonfigurasi untuk menghasilkan tegangan stabil sebelum secara bertahap diturunkan hingga mencapai batas aktivasi UVR pada breaker.

Pembahasan

Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan dengan tujuan mengevaluasi kinerja Under Voltage Release (UVR) pada breaker dalam menghadapi penurunan tegangan yang disimulasikan menggunakan sensing genset. Dalam sistem PLTS 308 kWp, UVR berperan dalam melepaskan breaker saat tegangan turun di bawah batas tertentu untuk mencegah gangguan pada inverter dan sistem distribusi daya.

Tahap awal pengujian dimulai dengan mengoperasikan sistem PLTS dalam kondisi beban normal, di mana semua parameter berada dalam rentang operasi standar. Sensing genset dikonfigurasi untuk menghasilkan tegangan yang stabil sebelum secara bertahap diturunkan untuk mensimulasikan gangguan. Pengurangan tegangan dilakukan secara terkontrol untuk mengamati respons UVR terhadap variasi tegangan yang diterima breaker.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa Under Voltage Release (UVR) pada sistem PLTS 308 kWp mampu merespons penurunan tegangan secara tepat dengan melepaskan breaker ketika tegangan turun di bawah ambang batas yang ditentukan. Perilaku ini sejalan dengan prinsip kerja sistem proteksi tegangan rendah, di mana UVR dirancang untuk mencegah inverter dan peralatan listrik lainnya beroperasi pada kondisi tegangan yang tidak aman. [Jondra et al. \(2025\)](#) dan [Emiwati et al., \(2023\)](#) menegaskan bahwa proteksi tegangan rendah memiliki peran penting dalam menjaga keandalan sistem tenaga listrik, khususnya pada sistem berbasis inverter yang sensitif terhadap fluktuasi tegangan. Dengan demikian, hasil pengujian ini mengonfirmasi bahwa UVR berfungsi efektif sebagai lapisan perlindungan utama terhadap gangguan tegangan pada sistem PLTS on-grid.

Pengujian dengan simulasi penurunan tegangan menggunakan sensing genset memberikan gambaran realistis terhadap kondisi gangguan yang dapat terjadi pada jaringan distribusi, seperti drop tegangan akibat fluktuasi beban atau gangguan dari jaringan utilitas. Respons UVR yang konsisten dan cepat dalam memutus breaker menunjukkan bahwa sistem proteksi telah dikonfigurasi sesuai standar operasional. Hal ini selaras dengan temuan [Achmadany et al. \(2024\)](#), yang menyatakan bahwa integrasi sistem proteksi tegangan pada pembangkit listrik berbasis fotovoltaik sangat penting untuk mencegah kerusakan inverter dan meningkatkan umur peralatan. Selain itu, proteksi yang bekerja dengan baik juga berkontribusi dalam menjaga kontinuitas operasi sistem setelah gangguan berhasil diatasi.

Dari sudut pandang keandalan dan keselamatan sistem, keberhasilan UVR dalam pengujian ini menunjukkan bahwa sistem PLTS 308 kWp memiliki tingkat kesiapan yang baik dalam menghadapi kondisi abnormal pada sisi tegangan. [Bashir et al. \(2021\)](#) menyebutkan bahwa sistem proteksi yang andal merupakan faktor kunci dalam menjaga stabilitas operasi jangka panjang pembangkit listrik tenaga surya, terutama pada lingkungan industri dengan variasi beban yang tinggi. Oleh karena itu, penerapan dan pengujian UVR secara berkala sangat direkomendasikan untuk memastikan bahwa sistem PLTS tidak hanya optimal secara energi, tetapi juga aman dan tangguh terhadap gangguan jaringan listrik.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa performa sistem PLTS sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti soiling dan desain teknis seperti panjang kabel DC. Kebijakan operasional seperti zero export perlu disesuaikan agar energi tidak terbuang sia-sia. Sistem proteksi UVR dan UVT terbukti mendukung keandalan sistem. Rekomendasi penting dari penelitian ini adalah perlunya perawatan rutin panel, optimalisasi desain instalasi, serta evaluasi kebijakan zero export untuk efisiensi maksimal. Penelitian lanjutan dapat diarahkan pada pengembangan sistem pembersihan panel otomatis berbasis sensor serta integrasi baterai penyimpanan energi untuk meningkatkan keandalan sistem PLTS di luar jam produksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak industri pengolahan kayu di Lumajang yang telah memberikan akses lokasi, data operasional, serta dukungan selama proses pengambilan data penelitian. Penulis juga mengucapkan apresiasi kepada tim teknis yang membantu proses observasi lapangan, validasi parameter sistem, dan dokumentasi instalasi PLTS. Selain itu, penulis berterima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Malang atas dukungan

akademik dan fasilitas yang mendukung penyusunan penelitian ini. Data monitoring yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari sistem Huawei FusionSolar, yang sangat membantu dalam memperoleh data kinerja secara historis maupun real-time. Segala kekeliruan dalam interpretasi dan penulisan sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis.

PERNYATAAN KONTRIBUSI PENULIS

DBS berperan dalam konseptualisasi penelitian, perancangan metode, pengolahan data utama dari Huawei FusionSolar, serta penyusunan draf awal manuskrip. KDS berkontribusi pada pengumpulan data lapangan, verifikasi konfigurasi sistem PLTS, serta penyusunan bagian metode dan prosedur pengujian. MRA berperan dalam analisis teknis kinerja sistem (PR, rugi kabel DC, dan evaluasi soiling), termasuk perhitungan kerugian daya serta interpretasi hasil. DB berkontribusi dalam analisis penerapan zero export, penelaahan data operasional inverter, serta penyusunan bagian hasil dan pembahasan terkait kebijakan operasional sistem. ME berperan dalam evaluasi sistem proteksi UVR/UVT, penelaahan single line diagram (SLD), serta validasi teknis temuan penelitian. HN berkontribusi dalam kajian pustaka, penyelarasan penulisan ilmiah, penyuntingan bahasa, serta penataan format naskah sesuai kaidah jurnal. Seluruh penulis meninjau, memberikan masukan, dan menyetujui versi akhir manuskrip.

DAFTAR PUSTAKA

- Aprilianto, R. A., & Ariefianto, R. M. (2021). Peluang dan tantangan menuju net zero emission (NZE) menggunakan variable renewable energy (VRE) pada sistem ketenagalistrikan di Indonesia. *Jurnal Paradigma: Jurnal Multidisipliner Mahasiswa Pascasarjana Indonesia*, 2(2), 1–13.
- Arrosyid, B., & Kusnadi, H. (2024). Rancangan pemakaian modul PV pada PLTS sistem hybrid untuk skala rumah tangga. *Techné: Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, 23(2), 257–264. <https://doi.org/10.31358/techn.v23i2.425>
- Bashir, N., Mushtaq, A., Ali, M., & Khan, S. (2021). Impact of dust accumulation on performance of photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110896. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110896>
- Ekici, S., & Kopru, M. A. (2017). Investigation of PV system cable losses. *International Journal of Renewable Energy Research*, 7(2). <https://www.ijrer.com/index.php/ijrer/article/view/6099>
- Ghazi, S., Sayigh, A., & Ip, K. (2014). Dust effect on flat surfaces – A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 742–751. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.016>
- Jondra, I. W., Suryawan, I. K., & Wibawa, I. P. A. S. (2025). Fuse memproteksi inverter dan baterai BESS dalam sistem distribusi listrik. *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*, 14(2), 318–328.
- Kadang, J. M., & Windarta, J. (2021). Optimasi sosial-ekonomi pada pemanfaatan PLTS PV untuk energi berkelanjutan di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(2), 74–83.
- Kotb, M. F., El-Saadawi, M. M., & El-Desouky, E. H. (2018). Design of over/under voltage protection relay using Arduino Uno for FREEDM system. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2(7).* <https://doi.org/10.24018/ejece.2018.2.7.44>
- Lahope, G. (2024). Implementasi kebijakan energi nasional (KEN) Indonesia menuju 23% target bauran energi baru terbarukan (EBT) 2025. *Jurnal Darma Agung*, 30(2), 124–135. <http://dx.doi.org/10.46930/ojsuda.v32i1.3945>
- Maghami, M. R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M. A., Rezadad, M. I., & Hajighorbani, S. (2016). Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1307–1316. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044>
- Mani, M., & Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3124–3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>
- Nugraha, R. A. (2025). Pengaruh pengaturan zero export pada inverter terhadap produksi energi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) 5 kWp Pondok Pesantren Kota Semarang. *Kocenin Serial Konferensi*, (1). E-ISSN: 2746-7112.

- Panjidinata, N. A. (2024). Analisis dampak kebijakan pembangkit listrik tenaga surya atap PLN terhadap pengembangan energi terbarukan: Tantangan dalam harmonisasi regulasi investasi energi terbarukan. *Commerce Law*, 4(2), 488–506.
- Priatam, P. P. T. D., Zambak, M. F., Suwarno, S., & Harahap, P. (2021). Analisa radiasi sinar matahari terhadap panel surya 50 WP. *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 4(1), 48–54. <https://doi.org/10.30596/rele.v4i1.7825>
- Setianto, B. D., & Anandhita, G. (2017). *Unika dalam wacana publik 2017–2018: Transformasi inspiratif*. SCU Knowledge Media.
- Sianipar, R. J., Januar, R. R., & Silalahi, S. D. C. (2024). Analisis pemetaan potensi dan realisasi energi baru terbarukan (EBT) dengan pemodelan determinan konsumsi dan metode grouping analysis EBT di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 5(2), 30–49. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.22970>
- Sidik, A., Lumbantobing, H., Indrawan, B., Edwinanto, E., Putra, Y., Imamulhak, Y., & Rinaldi, R. (2023). Studi potensi pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) untuk mendukung sistem ketenagalistrikan di wilayah IKN. *Jurnal SISKOM-KB (Sistem Komputer dan Kecerdasan Buatan)*, 6(2), 137–144. <https://doi.org/10.47970/siskom-kb.v6i2.379>
- Tanoto, Y. (2023). *Pengelolaan energi berkelanjutan di hotel*. Zahir Publishing.
- Widarsono, K. (2021). Relay protection of over voltage, under voltage and unbalance voltage magnitude based on Visual Basic using Arduino Mega. *Seminar MASTER*. ISSN: 2548-1509.
- Zubkov, O., Svyd, I., & Vorgul, O. (2022). Features of the implementation of an over/under voltage relay on STM32 microcontrollers. *Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs, 2022*. <https://doi.org/10.35598/mcfpga.2022.001>