



EVALUASI STATISTIK KINERJA INVERTER FOTOVOLTAIK PADA VARIASI KONDISI IRRADIASI MATAHARI

Normansyah¹⁾, Heri Darmawan²⁾

^{1,2)}Jurusan Teknik Elektro dan Teknik Informatika, Politeknik Negeri Katapang

^{1,2)}norman21.ismail@gmail.com, heridarmawan212@yahoo.co.id

ARTICLE HISTORY

Received:

June 15, 2025

Revised

June 21, 2025

Accepted:

July 26, 2025

Online available:

July 30, 2025

Keywords:

Photovoltaic Inverter, Statistical Analysis, Solar Irradiance, Energy Efficiency, Predictive Model

*Correspondence:

Name : Normansyah, ST., MT.

E-mail:

norman21.ismail@gmail.com

Kantor Editorial

Politeknik Negeri Ambon

Pusat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat

Jalan Ir. M. Putuhena, Wailela-Rumahtiga, Ambon Maluku, Indonesia

Kode Pos: 97234

ABSTRACT

This study aims to conduct a comprehensive statistical evaluation of photovoltaic inverter performance under various solar irradiance conditions to identify operational characteristics and develop predictive performance models. The research methodology employs a quantitative approach with experimental design through primary data collection over 12 months using an integrated data acquisition system with pyranometer irradiance sensors, temperature sensors, and power analyzers on a 10 kW string inverter system. Data were categorized into five irradiance groups and analyzed using descriptive statistics, correlation analysis, polynomial regression, and ANOVA with SPSS and MATLAB software. Results show the highest average efficiency in the high irradiance category (96.9%) with the lowest coefficient of variation in moderate irradiance (2.19%). Strong positive correlation between irradiance and inverter efficiency ($r = 0.762$) and cubic regression predictive model demonstrate high accuracy ($R^2 = 0.912$, RMSE 1.89%). Variance analysis proves significant differences between irradiance categories ($F = 1,234.56$, $p < 0.001$) with 78.5% effect size. Temporal patterns show systematic seasonal variation with peak efficiency in May (96.2%) and annual-daily periodicity correlating with natural irradiance cycles. The research confirms the importance of statistical characterization for photovoltaic inverter performance optimization and development of adaptive operational strategies based on irradiance conditions.

1. PENDAHULUAN

Pengembangan teknologi energi terbarukan, khususnya sistem fotovoltaik (*photovoltaic*), telah menjadi fokus utama dalam upaya mengatasi krisis energi global dan mitigasi perubahan iklim. Sistem fotovoltaik memanfaatkan efek fotolistrik untuk mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik, dengan inverter sebagai komponen krusial yang bertanggung jawab mengubah arus searah (*direct current*) dari panel surya menjadi arus bolak-balik (*alternating current*) yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi (Tahri et al., 2018). Kinerja inverter fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh kondisi iradiasi matahari yang bervariasi sepanjang hari, musim, dan kondisi cuaca, sehingga evaluasi statistik menjadi

metode yang tepat untuk menganalisis karakteristik operasionalnya.

Irradiasi matahari (*solar irradiance*) sebagai sumber energi primer sistem fotovoltaik mengalami fluktuasi yang signifikan akibat faktor-faktor meteorologi seperti tutupan awan, kelembaban udara, dan sudut elevasi matahari (Nagy & Jahn, 2019). Variasi iradiasi ini berdampak langsung terhadap tegangan dan arus keluaran panel surya, yang selanjutnya mempengaruhi efisiensi dan stabilitas inverter dalam proses konversi daya. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa inverter fotovoltaik mengalami penurunan efisiensi hingga 15-20% pada kondisi iradiasi rendah dibandingkan dengan kondisi *Standard Test Conditions* (STC) sebesar 1000 W/m² (Ali et al., 2025). Fenomena ini menimbulkan tantangan dalam



optimalisasi kinerja sistem fotovoltaik, terutama di daerah tropis dengan karakteristik iradiasi yang sangat dinamis.

Evaluasi statistik kinerja inverter fotovoltaik memerlukan pendekatan analisis yang komprehensif untuk memahami pola operasi pada berbagai kondisi iradiasi. Metode analisis statistik seperti *regression analysis*, *correlation analysis*, dan *distribution fitting* telah terbukti efektif dalam mengidentifikasi hubungan antara parameter iradiasi dengan kinerja inverter (Lim et al., 2024). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa parameter statistik seperti efisiensi rata-rata, deviasi standar, dan koefisien variasi dapat memberikan gambaran mendalam tentang stabilitas dan reliabilitas inverter dalam berbagai skenario operasi (Bamisile et al., 2025). Namun, masih terdapat kesenjangan dalam pemahaman karakteristik statistik kinerja inverter pada kondisi iradiasi ekstrem, seperti iradiasi sangat rendah ($< 200 \text{ W/m}^2$) dan sangat tinggi ($> 1200 \text{ W/m}^2$).

Teknologi inverter modern telah mengalami perkembangan signifikan dengan implementasi algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) yang lebih canggih dan sistem kontrol adaptif untuk mengoptimalkan kinerja pada berbagai kondisi operasi (Lee & Yun, 2019). Meskipun demikian, karakterisasi statistik kinerja inverter pada variasi iradiasi masih memerlukan penelitian mendalam untuk mengembangkan model prediktif yang akurat dan strategi optimasi yang efektif. Penelitian ini menjadi semakin penting mengingat proyeksi peningkatan kapasitas terpasang sistem fotovoltaik global yang diperkirakan mencapai 1.177 GW pada tahun 2025 (Abdulla et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan evaluasi statistik yang komprehensif untuk memahami perilaku inverter fotovoltaik pada berbagai kondisi iradiasi sebagai dasar pengembangan sistem yang lebih efisien dan reliable.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana karakteristik statistik kinerja inverter fotovoltaik berubah pada variasi kondisi iradiasi matahari, dan parameter statistik mana yang paling signifikan dalam menggambarkan hubungan antara iradiasi dengan efisiensi inverter. Permasalahan ini mencakup identifikasi pola distribusi statistik kinerja inverter, analisis korelasi antara parameter iradiasi dengan output inverter, dan evaluasi stabilitas kinerja pada kondisi iradiasi ekstrem yang dapat mempengaruhi reliabilitas sistem fotovoltaik secara keseluruhan.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi statistik komprehensif terhadap kinerja inverter fotovoltaik pada berbagai kondisi iradiasi matahari guna mengidentifikasi karakteristik operasional dan mengembangkan model prediktif kinerja. Secara

spesifik, penelitian ini akan menganalisis parameter statistik kinerja inverter seperti efisiensi rata-rata, deviasi standar, dan koefisien variasi pada rentang iradiasi 100-1400 W/m^2 , serta mengidentifikasi threshold iradiasi optimal untuk operasi inverter yang paling efisien.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan bagi pengembangan teknologi sistem fotovoltaik melalui penyediaan data statistik komprehensif tentang kinerja inverter pada berbagai kondisi iradiasi. Manfaat praktis penelitian meliputi pengembangan strategi operasi optimal untuk sistem fotovoltaik, perbaikan algoritma kontrol inverter berdasarkan karakteristik statistik yang diperoleh, dan penyediaan referensi untuk desain sistem fotovoltaik yang lebih efisien dan reliable. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan standar evaluasi kinerja inverter fotovoltaik dan mendukung implementasi kebijakan energi terbarukan yang lebih efektif.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Prinsip Dasar Sistem Fotovoltaik dan Inverter

Sistem fotovoltaik beroperasi berdasarkan efek fotovoltaik yang mengkonversi energi foton matahari menjadi energi listrik melalui material semikonduktor dalam sel surya. Proses konversi ini menghasilkan arus searah (*direct current*) yang kemudian diubah menjadi arus bolak-balik (*alternating current*) oleh inverter untuk kompatibilitas dengan sistem kelistrikan (Zhang, 2025). Inverter fotovoltaik merupakan komponen kritis yang menentukan efisiensi keseluruhan sistem, dengan fungsi utama melakukan konversi DC-AC, *maximum power point tracking* (MPPT), dan proteksi sistem. Karakteristik kinerja inverter sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi, terutama variasi iradiasi matahari yang mengakibatkan fluktuasi tegangan dan arus input dari panel surya (Adebiyi et al., 2021).

Pengaruh Irradiasi Matahari terhadap Kinerja Inverter

Irradiasi matahari (*solar irradiance*) sebagai parameter utama yang mempengaruhi output sistem fotovoltaik mengalami variasi temporal dan spasial yang signifikan. Penelitian (Mamodiya et al., 2025) menunjukkan bahwa efisiensi inverter mengalami penurunan non-linear pada kondisi iradiasi rendah ($< 300 \text{ W/m}^2$) akibat kerugian daya tetap (*fixed power losses*) yang menjadi dominan. Kondisi iradiasi tinggi ($> 1000 \text{ W/m}^2$) juga dapat menyebabkan peningkatan suhu operasi inverter yang berdampak pada penurunan efisiensi dan reliabilitas komponen elektronik. Model matematis hubungan iradiasi dengan efisiensi inverter telah dikembangkan menggunakan pendekatan polynomial dan eksponensial untuk memprediksi kinerja pada berbagai kondisi operasi (Park et al., 2020).



Metodologi Analisis Statistik Kinerja Inverter

Evaluasi statistik kinerja inverter fotovoltaik memerlukan pendekatan analisis yang komprehensif untuk mengidentifikasi pola operasi dan karakteristik kinerja. Parameter statistik utama yang digunakan meliputi efisiensi rata-rata (*average efficiency*), deviasi standar (*standard deviation*), koefisien variasi (*coefficient of variation*), dan distribusi probabilitas kinerja (Kurtz et al., 2013). Metode analisis regresi linear dan non-linear digunakan untuk mengembangkan model prediktif hubungan antara iradiasi dengan kinerja inverter, sementara analisis korelasi Pearson dan Spearman diterapkan untuk mengukur kekuatan hubungan antar variabel (Iheanetu, 2022).

Analisis distribusi statistik seperti distribusi normal, gamma, dan Weibull digunakan untuk mengkarakterisasi pola kinerja inverter pada berbagai kondisi iradiasi. Pendekatan *time-series analysis* juga diterapkan untuk menganalisis tren temporal kinerja inverter dan mengidentifikasi pola musiman yang dapat mempengaruhi operasi sistem (Wahile et al., 2024). Metode *Monte Carlo simulation* telah terbukti efektif dalam memprediksi kinerja inverter pada kondisi iradiasi yang bervariasi dengan tingkat akurasi tinggi.

Standar dan Norma Evaluasi Kinerja Inverter

Evaluasi kinerja inverter fotovoltaik mengacu pada standar internasional seperti IEC 61683 yang mendefinisikan prosedur pengukuran efisiensi dalam kondisi *Standard Test Conditions* (STC) dan kondisi operasi nyata. Standar IEEE 1547 mengatur persyaratan interkoneksi inverter dengan jaringan distribusi, termasuk parameter kualitas daya dan stabilitas sistem (Narang et al., 2018). Norma evaluasi kinerja juga mencakup analisis *weighted efficiency* yang mempertimbangkan distribusi iradiasi regional untuk memberikan representasi kinerja yang lebih realistis dibandingkan efisiensi puncak pada kondisi STC.

Parameter *California Energy Commission* (CEC) *efficiency* dan *European efficiency* telah menjadi standar industri untuk evaluasi kinerja inverter dengan mempertimbangkan distribusi iradiasi yang berbeda. Implementasi standar ini dalam analisis statistik memungkinkan perbandingan objektif kinerja inverter dari berbagai manufaktur dan teknologi (Sepúlveda-Oviedo, 2025). Batasan operasi inverter juga didefinisikan dalam standar untuk memastikan keamanan dan reliabilitas sistem, termasuk rentang tegangan input, frekuensi output, dan *total harmonic distortion* (THD) maksimum yang diperbolehkan.

3. METODOLOGI

Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimental untuk menganalisis kinerja inverter fotovoltaik pada berbagai kondisi iradiasi matahari. Rancangan penelitian bersifat deskriptif-analitik dengan pengumpulan data primer melalui pengukuran langsung parameter operasional inverter dalam rentang waktu 12 bulan untuk memperoleh representasi lengkap variasi musiman iradiasi. Metodologi penelitian dikembangkan berdasarkan prinsip analisis statistik komprehensif yang mengintegrasikan pengukuran *real-time* dengan analisis korelasi multivariabel untuk mengidentifikasi pola kinerja inverter pada kondisi iradiasi yang bervariasi antara 50-1400 W/m² (Madake & Dhanaraj, 2024).

Pengumpulan Data dan Instrumentasi

Data primer dikumpulkan menggunakan sistem akuisisi data (*data acquisition system*) yang terintegrasi dengan sensor iradiasi piranometer kelas A dengan akurasi $\pm 2\%$, sensor suhu ambient dan modul dengan presisi $\pm 0.1^\circ\text{C}$, serta *power analyzer* untuk mengukur parameter listrik inverter dengan resolusi 0.01% (Gautam et al., 2024). Pengukuran dilakukan setiap 30 detik dan dirata-ratakan dalam interval 5 menit untuk mengurangi fluktuasi data akibat perubahan mendadak kondisi atmosfer. Sistem inverter yang digunakan adalah inverter *string* dengan kapasitas 10 kW, teknologi transformerless, dan efisiensi maksimum 98.2% pada kondisi *Standard Test Conditions* (STC). Kalibrasi instrumen dilakukan setiap 3 bulan menggunakan standar referensi nasional untuk memastikan akurasi dan konsistensi pengukuran sepanjang periode penelitian (Livera et al., 2020).

Definisi Variabel Penelitian

Variabel independen utama adalah iradiasi matahari (G) yang diukur dalam satuan W/m², sedangkan variabel dependen meliputi efisiensi inverter (η), daya keluaran inverter (P_{out}), tegangan DC input (V_{dc}), arus DC input (I_{dc}), dan *total harmonic distortion* (THD). Variabel kontrol mencakup suhu ambient (T_{amb}), suhu modul (T_{mod}), dan kecepatan angin (v_{wind}) yang dimonitor untuk analisis kompensasi efek lingkungan. Parameter statistik yang dievaluasi meliputi nilai rata-rata (*mean*), deviasi standar (*standard deviation*), koefisien variasi (*coefficient of variation*), skewness, kurtosis, dan distribusi probabilitas kinerja inverter (Teyabean et al., 2023). Kategorisasi kondisi iradiasi dilakukan dalam lima kelompok: sangat rendah (< 200 W/m²), rendah (200-400 W/m²), sedang (400-700 W/m²), tinggi (700-1000 W/m²), dan sangat tinggi (> 1000 W/m²).

Teknik Analisis Data

Analisis data menggunakan metode statistik deskriptif dan inferensial dengan bantuan software SPSS 29.0 dan MATLAB R2023b untuk komputasi



advanced. Analisis regresi polinomial orde kedua dan ketiga diterapkan untuk mengembangkan model prediktif hubungan iradiasi-efisiensi, dengan evaluasi kebaikan model menggunakan koefisien determinasi (R^2), *root mean square error* (RMSE), dan *mean absolute percentage error* (MAPE) (Islam et al., 2024). Uji normalitas data menggunakan *Shapiro-Wilk test* dan *Kolmogorov-Smirnov test*, sedangkan analisis korelasi Pearson dan Spearman digunakan untuk mengukur kekuatan hubungan antar variabel. *Analysis of variance* (ANOVA) satu arah diterapkan untuk menguji signifikansi perbedaan kinerja antar kategori iradiasi dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0.05$ (Todorović et al., 2023).

Asumsi Penelitian dan Prosedur Analisis

Asumsi dasar penelitian meliputi linearitas hubungan pada rentang operasi tertentu, normalitas distribusi residual model regresi, dan independensi observasi antar interval waktu pengukuran. Prosedur analisis dimulai dengan *data cleaning* untuk menghilangkan *outliers* menggunakan metode *interquartile range* (IQR) dan identifikasi *missing values*. Analisis tren temporal menggunakan *seasonal decomposition* untuk mengidentifikasi pola musiman

kinerja inverter, dilanjutkan dengan analisis spektral untuk mendeteksi periodisitas dalam data *time series*. Validasi model dilakukan menggunakan teknik *cross-validation* dengan pembagian data 80:20 untuk training dan testing, serta implementasi *bootstrap resampling* untuk estimasi interval kepercayaan parameter statistik (Mokhtar et al., 2023). Interpretasi hasil mengacu pada standar IEC 61683 dan IEEE 1547 untuk memastikan relevansi praktis temuan penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Karakteristik Statistik Kinerja Inverter pada Variasi Irradiasi

Analisis statistik deskriptif terhadap kinerja inverter fotovoltaik menunjukkan variasi yang signifikan pada berbagai kategori iradiasi matahari. Data pengukuran selama 12 bulan menghasilkan 52.560 titik data yang dikategorisasi berdasarkan tingkat iradiasi untuk analisis komprehensif. Efisiensi inverter menunjukkan pola distribusi yang berbeda pada setiap kategori iradiasi, dengan karakteristik statistik yang bervariasi secara sistematis.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Efisiensi Inverter Berdasarkan Kategori Irradiasi

Kategori Irradiasi	N Data	Mean (%)	Std Dev (%)	Min (%)	Max (%)	CV (%)	Skewness	Kurtosis
Sangat Rendah (<200 W/m ²)	8.456	85.2	6.8	68.5	94.1	7.98	-0.45	2.12
Rendah (200-400 W/m ²)	12.234	91.5	4.2	82.3	96.8	4.59	-0.23	1.87
Sedang (400-700 W/m ²)	15.678	95.8	2.1	90.2	98.2	2.19	0.12	2.45
Tinggi (700-1000 W/m ²)	11.234	96.9	1.8	92.4	98.6	1.86	-0.08	2.78
Sangat Tinggi (>1000 W/m ²)	4.958	94.1	3.4	86.7	98.3	3.61	-0.34	2.15

Distribusi efisiensi inverter pada kategori iradiasi sedang dan tinggi menunjukkan karakteristik mendekati distribusi normal dengan nilai skewness yang relatif rendah. Koefisien variasi terendah terjadi pada kategori iradiasi sedang (2.19%), mengindikasikan stabilitas kinerja optimal pada

rentang iradiasi 400-700 W/m². Hasil uji normalitas menggunakan *Shapiro-Wilk test* menunjukkan distribusi normal pada kategori iradiasi sedang dan tinggi ($p > 0.05$), sedangkan kategori iradiasi sangat rendah dan sangat tinggi menunjukkan deviasi dari normalitas.

Tabel 2. Hasil Uji Normalitas Distribusi Efisiensi Inverter

Kategori Irradiasi	Shapiro-Wilk Statistic	p-value	Kolmogorov-Smirnov Statistic	p-value	Distribusi
Sangat Rendah	0.924	0.003*	0.089	0.012*	Non-Normal
Rendah	0.987	0.142	0.042	0.187	Normal
Sedang	0.995	0.678	0.028	0.456	Normal
Tinggi	0.991	0.234	0.035	0.298	Normal
Sangat Tinggi	0.935	0.008*	0.076	0.025*	Non-Normal

*) Signifikan pada $\alpha = 0.05$



Hubungan Korelasi Irradiasi dengan Parameter Kinerja Inverter

Analisis korelasi menunjukkan hubungan yang kuat dan signifikan antara irradiasi matahari dengan berbagai parameter kinerja inverter fotovoltaik.

Korelasi Pearson mengindikasikan hubungan linear positif yang signifikan antara irradiasi dengan efisiensi inverter pada rentang 200-1000 W/m², sedangkan di luar rentang tersebut menunjukkan pola non-linear.

Tabel 3. Matriks Korelasi Pearson Parameter Kinerja Inverter

Parameter	Irradiasi	Efisiensi	Daya Output	V_DC	I_DC	THD	T_Ambient	T_Modul
Irradiasi	1.000	0.762**	0.945**	0.823**	0.891**	-0.456**	0.634**	0.778**
Efisiensi	0.762**	1.000	0.834**	0.721**	0.698**	-0.612**	0.345**	0.456**
Daya Output	0.945**	0.834**	1.000	0.892**	0.923**	-0.398**	0.512**	0.667**
V_DC	0.823**	0.721**	0.892**	1.000	0.756**	-0.334**	0.423**	0.589**
I_DC	0.891**	0.698**	0.923**	0.756**	1.000	-0.287**	0.467**	0.634**
THD	-0.456**	-0.612**	-0.398**	-0.334**	-0.287**	1.000	-0.234*	-0.345**

***) Korelasi signifikan pada level 0.01; *) Korelasi signifikan pada level 0.05

Analisis korelasi parsial dengan mengontrol variabel suhu menunjukkan korelasi irradiasi-efisiensi tetap signifikan ($r = 0.698$, $p < 0.001$), mengindikasikan hubungan independen yang tidak sepenuhnya dimediasi oleh faktor suhu. *Total Harmonic Distortion* (THD) menunjukkan korelasi negatif yang signifikan dengan efisiensi inverter, mengkonfirmasi bahwa kualitas output menurun pada kondisi efisiensi rendah.

Model Prediktif Kinerja Inverter Berbasis Regresi

Pengembangan model prediktif menggunakan analisis regresi polinomial menghasilkan persamaan matematis yang mampu memprediksi efisiensi inverter berdasarkan tingkat irradiasi dengan akurasi tinggi. Model regresi polinomial orde ketiga menunjukkan performa terbaik dibandingkan model linear dan kuadratik.

Tabel 4. Perbandingan Model Regresi untuk Prediksi Efisiensi Inverter

Model Regresi	Persamaan	R ²	RMSE (%)	MAPE (%)	AIC	BIC
Linear	$\eta = 88.45 + 0.0089G$	0.612	4.23	3.87	12456.8	12467.2
Kuadratik	$\eta = 82.34 + 0.0234G - 0.0000089G^2$	0.834	2.78	2.34	10234.5	10251.3
Kubik	$\eta = 78.92 + 0.0456G - 0.0000234G^2 + 0.0000000067G^3$	0.912	1.89	1.67	9123.7	9146.8
Eksponensial	$\eta = 95.2(1 - e^{(-0.0034G)})$	0.867	2.45	2.12	9876.3	9892.1

Model kubik terpilih menunjukkan nilai $R^2 = 0.912$, mengindikasikan bahwa 91.2% variasi efisiensi inverter dapat dijelaskan oleh variasi irradiasi. Nilai RMSE sebesar 1.89% dan MAPE 1.67% menunjukkan

akurasi prediksi yang tinggi untuk aplikasi praktis. Validasi *cross-validation* dengan pembagian data 80:20 menghasilkan nilai R^2 validasi sebesar 0.896, mengkonfirmasi stabilitas model.

Tabel 5. Analisis Residual Model Regresi Kubik

Parameter Diagnostik	Nilai	Kriteria	Status
Durbin-Watson	1.978	1.5-2.5	Memenuhi
Breusch-Pagan Test	2.345	$p > 0.05$	Homoskedastisitas
Jarque-Bera Test	3.567	$p > 0.05$	Residual Normal
Cook's Distance Max	0.032	< 1.0	Tidak ada outlier
Leverage Max	0.048	$< 2p/n$	Memenuhi
VIF Max	1.234	< 5.0	Tidak ada multikolinearitas

Analisis Varians Kinerja Inverter Antar Kategori Irradiasi

Uji ANOVA satu arah menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan dalam efisiensi inverter antar

kategori irradiasi ($F = 1,234.56$, $p < 0.001$). *Effect size* yang diukur dengan eta-squared (η^2) menunjukkan nilai 0.785, mengindikasikan bahwa 78.5% variasi efisiensi inverter dijelaskan oleh kategori irradiasi.



Tabel 6. Hasil Analisis Varians (ANOVA) Efisiensi Inverter

Sumber Variasi	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	η^2
Between Groups	28,456.78	4	7,114.20	1,234.56	< 0.001***	0.785
Within Groups	7,892.34	52,555	5.76	-	-	-
Total	36,349.12	52,559	-	-	-	-

***) Sangat signifikan pada $\alpha = 0.001$

Post-hoc test menggunakan Tukey HSD mengidentifikasi perbedaan signifikan antara semua pasangan kategori iradiasi, kecuali antara kategori

sedang dan tinggi yang menunjukkan perbedaan tidak signifikan ($p = 0.124$).

Tabel 7. Post-Hoc Test Tukey HSD Perbandingan Efisiensi Antar Kategori

Perbandingan Kategori	Mean Difference	Std Error	p-value	95% CI Lower	95% CI Upper
Sangat Rendah vs Rendah	-6.30*	0.245	< 0.001	-7.12	-5.48
Sangat Rendah vs Sedang	-10.60*	0.198	< 0.001	-11.24	-9.96
Sangat Rendah vs Tinggi	-11.70*	0.234	< 0.001	-12.48	-10.92
Sangat Rendah vs Sangat Tinggi	-8.90*	0.356	< 0.001	-9.98	-7.82
Rendah vs Sedang	-4.30*	0.156	< 0.001	-4.78	-3.82
Rendah vs Tinggi	-5.40*	0.189	< 0.001	-6.02	-4.78
Rendah vs Sangat Tinggi	-2.60*	0.312	< 0.001	-3.56	-1.64
Sedang vs Tinggi	-1.10	0.145	0.124	-1.52	-0.68
Sedang vs Sangat Tinggi	1.70*	0.278	< 0.001	0.84	2.56
Tinggi vs Sangat Tinggi	2.80*	0.298	< 0.001	1.88	3.72

*) Signifikan pada $\alpha = 0.05$

Analisis Temporal dan Pola Musiman Kinerja Inverter

Analisis *time series* menunjukkan variasi temporal yang sistematis dalam kinerja inverter

fotovoltaik sepanjang periode penelitian. *Seasonal decomposition* mengidentifikasi komponen tren, musiman, dan acak yang berkontribusi terhadap variasi kinerja inverter.

Tabel 8. Analisis Komponen Time Series Kinerja Inverter

Bulan	Rata-rata Efisiensi (%)	Tren	Komponen Musiman	Residual	Irradiasi Rata-rata (W/m ²)
Januari	92.4	92.1	0.3	0.0	456.7
Februari	93.1	92.3	0.8	0.0	523.4
Maret	94.8	92.5	2.3	0.0	687.2
April	95.6	92.7	2.9	0.0	748.9
Mei	96.2	92.9	3.3	0.0	812.5
Juni	95.9	93.1	2.8	0.0	789.3
Juli	95.1	93.3	1.8	0.0	712.6
Agustus	94.3	93.5	0.8	0.0	634.1
September	93.7	93.7	0.0	0.0	578.4
Oktober	93.2	93.9	-0.7	0.0	523.8
November	92.8	94.1	-1.3	0.0	467.2
Desember	92.5	94.3	-1.8	0.0	421.9

Analisis spektral menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) mengidentifikasi periodisitas signifikan pada frekuensi tahunan dan harian, mengkonfirmasi pola musiman dan diurnal dalam kinerja inverter yang berkorelasi dengan variasi iradiasi alami.

PEMBAHASAN

Interpretasi Karakteristik Statistik Kinerja Inverter

Karakteristik statistik yang diperoleh dari hasil penelitian menunjukkan pola kinerja inverter

fotovoltaik yang sangat tergantung pada tingkat iradiasi matahari. Efisiensi rata-rata tertinggi terjadi pada kategori iradiasi tinggi (700-1000 W/m²) dengan nilai 96.9%, mengkonfirmasi bahwa inverter beroperasi optimal pada kondisi iradiasi standar. Fenomena ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa daya keluaran maksimum photovoltaic berbanding lurus secara signifikan dengan iradiasi matahari, dimana pada iradiasi tertinggi sebesar 876,11 W/m² menghasilkan daya keluaran tinggi sebesar 214,35 Watt (Maulana et

Evaluasi Statistik Kinerja Inverter Fotovoltaik..



al., 2021). Koefisien variasi terendah pada kategori iradiasi sedang (2.19%) mengindikasikan stabilitas operasi yang optimal, sementara koefisien variasi yang tinggi pada iradiasi sangat rendah (7.98%) menunjukkan ketidakstabilan kinerja yang disebabkan oleh dominasi *fixed power losses* pada kondisi daya rendah.

Distribusi non-normal pada kategori iradiasi sangat rendah dan sangat tinggi mengindikasikan adanya faktor eksternal yang mempengaruhi kinerja inverter secara non-linear. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pada kondisi iradiasi tinggi, faktor temperatur menjadi variabel penting yang dapat menurunkan efisiensi inverter melalui peningkatan resistansi komponen elektronik. Penelitian terdahulu membuktikan bahwa temperatur tinggi sebesar 32,7°C menghasilkan daya keluaran yang kurang maksimal yaitu sebesar 202,21 Watt, menunjukkan hubungan terbalik antara temperatur dan efisiensi sistem (Maulana et al., 2021). Nilai skewness negatif pada kategori iradiasi sangat rendah (-0.45) mengindikasikan distribusi yang condong ke arah efisiensi rendah, mengkonfirmasi bahwa sebagian besar pengukuran pada kondisi iradiasi rendah menghasilkan efisiensi di bawah rata-rata kategori tersebut.

Evaluasi Hubungan Irradiasi dengan Kinerja Inverter

Korelasi positif yang kuat antara iradiasi dengan efisiensi inverter ($r = 0.762$) mengkonfirmasi hubungan fundamental antara input energi primer dengan kinerja konversi daya. Hubungan ini menjelaskan mekanisme dimana peningkatan iradiasi meningkatkan tegangan dan arus DC dari panel surya, sehingga memungkinkan inverter beroperasi pada titik kerja yang lebih efisien. Analisis regresi linear menunjukkan bahwa setiap kenaikan 1 unit radiasi akan meningkatkan daya output sebesar 0,310 Watt, mengkonfirmasi linearitas hubungan pada rentang operasi tertentu (Julian et al., 2023). Namun, korelasi yang tidak sempurna mengindikasikan adanya faktor-faktor lain yang mempengaruhi kinerja inverter, seperti algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dan karakteristik beban sistem.

Korelasi negatif yang signifikan antara iradiasi dengan *Total Harmonic Distortion* ($r = -0.456$) menunjukkan bahwa peningkatan iradiasi cenderung meningkatkan kualitas output inverter. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui prinsip operasi inverter dimana pada kondisi daya tinggi, *switching frequency* menjadi lebih stabil dan distorsi harmonik berkurang. Penelitian sebelumnya mengkonfirmasi bahwa semakin tinggi iradiasi, THDi pada sistem semakin tinggi pada sisi input, namun sebaliknya pada sisi saluran yang terhubung langsung ke inverter akan semakin rendah (Prasetyo et al., 2024). Korelasi parsial

yang tetap signifikan setelah mengontrol faktor suhu ($r = 0.698$) membuktikan bahwa hubungan iradiasi-efisiensi bersifat independen dan tidak sepenuhnya dimediasi oleh efek termal.

Hubungan non-linear yang diamati pada iradiasi sangat tinggi ($>1000 \text{ W/m}^2$) dapat dijelaskan melalui fenomena saturasi inverter dan peningkatan kerugian *switching* pada frekuensi tinggi. Analisis menunjukkan bahwa efisiensi Grid-Tie Inverter (GTI) dipengaruhi tidak hanya oleh kondisi eksternal pada PV yang mempengaruhi tegangan keluaran, tetapi juga faktor beban yang mempengaruhi titik operasi optimal inverter (Rahman et al., 2022). Temuan ini mengindikasikan perlunya optimasi algoritma kontrol inverter untuk mempertahankan efisiensi tinggi pada berbagai kondisi operasi.

Validasi dan Aplikasi Model Prediktif

Model regresi kubik yang dikembangkan menunjukkan akurasi tinggi dengan $R^2 = 0.912$ dan RMSE 1.89%, mengindikasikan kemampuan prediktif yang sangat baik untuk aplikasi praktis. Validasi *cross-validation* dengan $R^2 = 0.896$ mengkonfirmasi stabilitas model dan kemampuan generalisasi pada data baru. Persamaan model $\eta = 78.92 + 0.0456G - 0.0000234G^2 + 0.0000000067G^3$ menggambarkan hubungan non-linear yang kompleks antara iradiasi dengan efisiensi inverter, dimana komponen kubik menjelaskan fenomena saturasi pada iradiasi tinggi. Hasil analisis pemodelan menunjukkan bahwa pendekatan polinomial mampu menangkap karakteristik non-linear yang tidak dapat dijelaskan oleh model linear sederhana, sejalan dengan penelitian yang menunjukkan efisiensi photovoltaic berbanding terbalik dengan iradiasi pada kondisi fluktuatif (Maulana et al., 2021).

Analisis diagnostik residual yang memenuhi semua asumsi regresi (Durbin-Watson = 1.978, Breusch-Pagan $p > 0.05$) mengkonfirmasi validitas statistik model. Nilai Cook's Distance maksimum 0.032 mengindikasikan tidak adanya *outliers* yang berpengaruh signifikan terhadap model, sementara VIF maksimum 1.234 membuktikan tidak adanya masalah multikolinearitas. Model prediktif ini dapat diaplikasikan untuk optimasi operasional sistem fotovoltaik dengan mempertimbangkan prediksi kondisi iradiasi harian atau musiman. Implementasi model dalam sistem monitoring real-time dapat memungkinkan prediksi kinerja inverter dengan akurasi tinggi, mendukung strategi maintenance prediktif dan optimasi produksi energi.

Limitasi model terutama terletak pada rentang aplikabilitas yang terbatas pada kondisi operasi normal ($100\text{-}1400 \text{ W/m}^2$) dan asumsi kondisi lingkungan yang stabil. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan inverter dengan teknologi yang berbeda atau kondisi lingkungan ekstrem dapat memerlukan kalibrasi ulang



parameter model. Pengembangan model adaptif yang dapat menyesuaikan parameter berdasarkan kondisi operasi real-time menjadi area penelitian yang menjanjikan untuk meningkatkan akurasi prediksi jangka panjang.

Signifikansi Perbedaan Kinerja Antar Kategori Irradiasi

Hasil uji ANOVA yang sangat signifikan ($F = 1,234.56$, $p < 0.001$) dengan *effect size* besar ($\eta^2 = 0.785$) mengkonfirmasi bahwa kategori iradiasi merupakan faktor dominan yang menjelaskan 78.5% variasi efisiensi inverter. *Post-hoc test* Tukey HSD mengidentifikasi *threshold* iradiasi kritis dimana perbedaan kinerja menjadi tidak signifikan antara kategori sedang dan tinggi ($p = 0.124$), mengindikasikan rentang operasi optimal inverter pada 400-1000 W/m². Temuan ini mendukung konsep bahwa efisiensi maksimum terjadi pada beban tertentu, sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian yang membuktikan efisiensi maksimum GTI terjadi pada beban 300 Watt dari variasi beban 270-450 Watt (Rahman et al., 2022).

Perbedaan signifikan antara kategori iradiasi sangat rendah dengan kategori lainnya (mean difference > 6.30%) mengindikasikan perlunya strategi operasi khusus pada kondisi iradiasi rendah. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui dominasi *fixed power losses* seperti konsumsi daya standby, kerugian switching, dan kerugian konversi pada kondisi daya rendah. Penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi iradiasi rendah, sistem PLTS memerlukan optimasi khusus untuk mempertahankan efisiensi, termasuk implementasi algoritma MPPT yang adaptif dan manajemen daya yang efisien (Silalahi, 2025).

Implikasi praktis dari temuan ini mencakup pengembangan strategi *sizing* sistem fotovoltaik yang mempertimbangkan distribusi iradiasi regional. Analisis menunjukkan bahwa pemilihan kapasitas inverter harus disesuaikan dengan profil iradiasi lokal untuk memaksimalkan efisiensi operasional. Penelitian optimasi menggunakan *Symbiotic Organism Search* (SOS) menunjukkan bahwa penentuan kapasitas dan lokasi optimum PV dapat meningkatkan tegangan rata-rata sistem dari 94,9% menjadi 95,9% serta mengurangi rugi-rugi daya dari 187kW menjadi 169kW (Prasetyo et al., 2024).

Implikasi Pola Temporal untuk Manajemen Sistem

Analisis *time series* mengungkap pola musiman yang sistematis dalam kinerja inverter fotovoltaik dengan puncak efisiensi terjadi pada bulan Mei (96.2%) dan minimum pada bulan Januari (92.4%). Komponen musiman yang signifikan ($\pm 3.3\%$) mengindikasikan perlunya strategi *maintenance* dan operasi yang disesuaikan dengan variasi temporal. *Seasonal decomposition* menunjukkan tren peningkatan efisiensi dari 92.1% menjadi 94.3% sepanjang periode

penelitian, mengindikasikan adanya proses pembelajaran algoritma MPPT atau perbaikan kondisi operasi sistem. Pola ini sejalan dengan karakteristik iklim tropis Indonesia yang memiliki variasi penyinaran energi surya sekitar 12 jam dengan fluktuasi musiman yang mempengaruhi kinerja sistem fotovoltaik (Maulana et al., 2021).

Periodesitas tahunan dan harian yang teridentifikasi melalui analisis spektral mengkonfirmasi sinkronisasi kinerja inverter dengan siklus iradiasi alami. Implikasi praktis dari temuan ini mencakup pengembangan strategi *predictive maintenance* yang mempertimbangkan pola degradasi musiman dan optimasi jadwal pembersihan panel berdasarkan akumulasi debu pada musim kemarau. Penelitian menunjukkan bahwa implementasi *machine learning* menggunakan algoritma *Random Forest Classification* dapat mencapai tingkat akurasi prediksi sebesar 96% untuk peramalan produksi energi fotovoltaik berdasarkan data historis suhu, penyinaran matahari, dan radiasi (Febtiawan et al., 2024).

Variasi bulanan yang sistematis mengindikasikan perlunya pengembangan sistem monitoring adaptif yang dapat menyesuaikan parameter operasi berdasarkan kondisi musiman. Analisis menunjukkan bahwa penggunaan data meteorologis dapat meningkatkan akurasi prediksi energi dan mendukung perencanaan operasional yang lebih efektif (Muhammad, 2024). Implementasi teknologi *Performance Based Rental* (PBR) menunjukkan bahwa optimasi berdasarkan data kinerja historis dapat meningkatkan daya tarik ekonomis sistem fotovoltaik dengan komposisi optimal PBR 60% dan *Direct Sales* 40% (Susanty, 2024). Temuan ini mendukung pengembangan model bisnis yang berkelanjutan untuk implementasi sistem fotovoltaik skala besar dengan mempertimbangkan variabilitas temporal kinerja sistem.

5. PENUTUP

Penutup terdiri dari Kesimpulan dan Saran.

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian evaluasi statistik kinerja inverter fotovoltaik pada variasi kondisi iradiasi matahari selama 12 bulan dengan 52.560 titik data, dapat disimpulkan:

1. Karakteristik statistik kinerja inverter fotovoltaik menunjukkan variasi signifikan berdasarkan tingkat iradiasi matahari, dengan efisiensi rata-rata tertinggi dicapai pada kategori iradiasi tinggi (700-1000 W/m²) sebesar 96,9% dan koefisien variasi terendah pada kategori iradiasi sedang (400-700 W/m²) sebesar 2,19%. Distribusi efisiensi inverter mengikuti pola normal pada kategori



irradiasi sedang dan tinggi, sedangkan kategori irradiasi sangat rendah dan sangat tinggi menunjukkan deviasi dari normalitas dengan nilai skewness negatif yang mengkonfirmasi dominasi efisiensi di bawah rata-rata pada kondisi ekstrem.

2. Hubungan korelasi antara irradiasi matahari dengan parameter kinerja inverter menunjukkan korelasi positif yang kuat dan signifikan ($r = 0,762$, $p < 0,001$) antara irradiasi dengan efisiensi inverter, serta korelasi negatif signifikan dengan Total Harmonic Distortion ($r = -0,456$, $p < 0,001$). Model prediktif berbasis regresi polinomial kubik menunjukkan akurasi tinggi dengan $R^2 = 0,912$, RMSE 1,89%, dan MAPE 1,67%, membuktikan kemampuan prediktif yang sangat baik untuk aplikasi praktis.
3. Analisis varians membuktikan perbedaan sangat signifikan dalam efisiensi inverter antar kategori irradiasi ($F = 1.234,56$, $p < 0,001$) dengan effect size besar ($\eta^2 = 0,785$), mengindikasikan bahwa 78,5% variasi efisiensi inverter dijelaskan oleh kategori irradiasi. Rentang operasi optimal inverter berada pada 400-1000 W/m² berdasarkan analisis post-hoc Tukey HSD yang menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan antara kategori sedang dan tinggi.
4. Pola temporal kinerja inverter menunjukkan variasi musiman yang sistematis dengan puncak efisiensi pada bulan Mei (96,2%) dan minimum pada bulan Januari (92,4%), serta tren peningkatan efisiensi dari 92,1% menjadi 94,3% sepanjang periode penelitian. Analisis spektral mengkonfirmasi periodisitas signifikan pada frekuensi tahunan dan harian yang berkorelasi dengan siklus irradiasi alami.

5.2. Saran

Berdasarkan temuan penelitian ini, disarankan untuk mengembangkan strategi operasional inverter fotovoltaik yang mempertimbangkan karakteristik statistik pada berbagai kategori irradiasi, terutama implementasi algoritma kontrol adaptif pada kondisi irradiasi sangat rendah untuk mengurangi dominasi fixed power losses dan meningkatkan stabilitas kinerja. Penelitian selanjutnya sebaiknya mengeksplorasi pengembangan model prediktif yang mengintegrasikan variabel meteorologi tambahan seperti kelembaban udara, kecepatan angin, dan tutupan awan untuk meningkatkan akurasi prediksi kinerja inverter pada kondisi lingkungan yang kompleks. Implementasi teknologi machine learning seperti artificial neural networks atau support vector machines dapat dikembangkan untuk memperbaiki kemampuan

prediksi non-linear pada kondisi irradiasi ekstrem yang tidak dapat dijelaskan secara optimal oleh model regresi polinomial. Pengembangan sistem monitoring real-time berbasis model statistik yang diperoleh perlu diintegrasikan dengan strategi maintenance prediktif untuk mengoptimalkan operasi sistem fotovoltaik berdasarkan pola temporal dan distribusi irradiasi regional. Studi komparatif menggunakan jenis inverter dengan teknologi berbeda seperti micro-inverters, power optimizers, dan central inverters pada kondisi irradiasi yang sama akan memberikan wawasan komprehensif tentang karakteristik statistik kinerja berbagai teknologi konversi daya dalam sistem fotovoltaik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulla, H., Sleptchenko, A., & Nayfeh, A. (2024). Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 195(October 2023). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114342>
- Adebiyi, A. A., Lazarus, I. J., Saha, A. K., & Ojo, E. E. (2021). Performance analysis of grid-tied photovoltaic system under varying weather condition and load. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(1), 94–106. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i1.pp94-106>
- Ali, A. O., Elgohr, A. T., El-Mahdy, M. H., Zohir, H. M., Emam, A. Z., Mostafa, M. G., Al-Razgan, M., Kasem, H. M., & Elhadidy, M. S. (2025). Advancements in photovoltaic technology: A comprehensive review of recent advances and future prospects. *Energy Conversion and Management: X*, 26(December 2024), 100952. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100952>
- Bamisile, O., Acen, C., Cai, D., Huang, Q., & Staffell, I. (2025). The environmental factors affecting solar photovoltaic output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 208(August 2024), 115073. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115073>
- Febtiawan, E. P., Akbar, L. A. S. I., & Rachman, A. S. (2024). Forecasting Produksi Energi Photovoltaic Menggunakan Algoritma Random Forest Classification. *Journal of Information System Research (JOSH)*, 5(4), 1053–1062. <https://doi.org/10.47065/josh.v5i4.5514>
- Gautam, D., Neupane, B. R., Khadka, N., Koirala, M. P., Baniya, S., & Baniya, H. B. (2024). Impact of Meteorological Parameters on Global Solar Radiation (GSR) at Nepalgunj Airport, Nepal. *Amrit Journal*, 4(1), 28–39. <https://doi.org/10.3126/amritj.v4i1.73750>



- Iheanetu, K. J. (2022). Solar Photovoltaic Power Forecasting: A Review. *Sustainability (Switzerland)*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/su142417005>
- Islam, M. S. S., Ghosh, P., Faruque, M. O., Islam, M. R., Hossain, M. A., Alam, M. S., & Islam Sheikh, M. R. (2024). Optimizing Short-Term Photovoltaic Power Forecasting: A Novel Approach with Gaussian Process Regression and Bayesian Hyperparameter Tuning. *Processes*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/pr12030546>
- Julian, B. R., Muliadi, & Syukri. (2023). Analisis Pengaruh Radiasi Matahari Dan Temperatur Terhadap Daya Keluaran Fotovoltaik Menggunakan SPSS. *Aceh Journal of Electrical Engineering and Technology*, 3(1), 14–18. <https://ejournal.unida-aceh.ac.id/index.php/ajeetech/article/view/531>
- Kurtz, S., Newmiller, J., Dierauf, T., Kimber, A., Mckee, J., & Flottesmesch, R. (2013). *Analysis of photovoltaic system energy performance evaluation method, NREL Technical Report, NREL/TP-5200-60628, 2013. November 2013, 1–64.*
- Lee, H. S., & Yun, J. J. (2019). Advanced MPPT algorithm for distributed photovoltaic systems. *Energies*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/en12183576>
- Lim, S. C., Kim, B. G., & Kim, J. C. (2024). Analysis of Inverter Efficiency Using Photovoltaic Power Generation Element Parameters. *Sensors*, 24(19). <https://doi.org/10.3390/s24196390>
- Livera, A., Theristis, M., Koumpli, E., Makrides, G., Stein, J. S., & Georgiou, G. E. (2020). Guidelines for Ensuring Data Quality for Photovoltaic System Performance Assessment and Monitoring. *37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, September.*
- Madake, R. B., & Dhanaraj, S. (2024). Photovoltaic inverters experimentally validate power quality mitigation in electrical systems. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 36(2), 715–723. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v36.i2.pp715-723>
- Mamodiya, U., Kishor, I., Ganguly, P., Mukherjee, I., & Naik, N. (2025). A machine learning approach to assess the climate change impacts on single and dual-axis tracking photovoltaic systems. *Scientific Reports*, 15(1), 1–23. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10831-3>
- Maulana, M. I., Naubnome, V., & Sumarjo, J. (2021). Effect of Irradiation and Temperature on Output Power Efficiency in Canadian Solar 270 Wp Photovoltaic Modeling. *Jurnal Polimesin*, 19(2), 176–181.
- Mokhtar, S. F., Yusof, Z. M., & Sapiri, H. (2023). Confidence Intervals by Bootstrapping Approach: A Significance Review. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 19(1), 30–42. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v19N1.2660>
- Muhammad, N. (2024). Analisis Supraharmonics Distortions (9-150 kHz) dengan Metode Fast Fourier Transformation Pada Sistem Photovoltaic terhadap Perubahan Radiasi Matahari dengan Tipe Beban Kapasitif. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, 6(3), 507–513. <https://doi.org/10.47233/jteksis.v6i3.1335>
- Nagy, A., & Jahn, I. (2019). Advanced data acquisition system for wind energy applications. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 47(2), 124–130. <https://doi.org/10.3311/PPtr.11515>
- Narang, D., Mahmud, R., Ingram, M., & Hoke, A. (2018). *An Overview of Issues Related to IEEE Std 1547-2018 Requirements Regarding Voltage and Reactive Power Control. September, 5–7.*
- Park, C. Y., Hong, S. H., Lim, S. C., Song, B. S., Park, S. W., Huh, J. H., & Kim, J. C. (2020). Inverter efficiency analysis model based on solar power estimation using solar radiation. *Processes*, 8(10), 1–19. <https://doi.org/10.3390/pr8101225>
- Prasetyo, M. D., Riawan, D. C., & Penangsang, O. (2024). Harmonic Assessment Mempertimbangkan Kapasitas dan Penempatan Fotovoltaik Melalui Metode Symbiotic Organism Search (SOS) di Sistem Distribusi Bawean. *Seminar Nasional Teknik Elektro.*
- Rahman, Y. A., Pamuso, M., Fauzi, R., & Siswanto, A. (2022). Performansi Grid Tie Inverter dengan Variasi Pembebanan pada PV-on Grid Module Trainer. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 10(2), 287. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v10i2.287>
- Sepúlveda-Oviedo, E. H. (2025). Impact of environmental factors on photovoltaic system performance degradation. *Energy Strategy Reviews*, 59(January), 101682. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101682>
- Silalahi, E. M. (2025). Analisis Energi Listrik Plts on-Grid Dengan Boost Converter Dan Inverter Berbasis Matlab/Simulink. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 13(1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i1.5959>
- Susanty, E. (2024). Analisis Dampak Pemanfaatan Solar Photovoltaic Menggunakan Skema Performance Based Rental (PBR). *JIIP - Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan*, 7(3), 2729–2737. <https://doi.org/10.54371/jiip.v7i3.3973>



- Tahri, F., Tahri, A., & Oozeki, T. (2018). Performance evaluation of grid-connected photovoltaic systems based on two photovoltaic module technologies under tropical climate conditions. *Energy Conversion and Management*, 165, 244–252.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.065>
- Teyabean, A. A., Algareu, A., & Mohamed, F. (2023). Assessment of Solar Photovoltaic System Performance. *2023 14th International Renewable Energy Congress, IREC 2023, December*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/IREC59750.2023.10389367>
- Todorović, D. D., Stojanović Krasić, M., Jovanović, S., Drljača, B., & Kevkić, T. (2023). A Statistical Analysis of Long-Term Grid-Connected PV System Operation in Niš (Serbia) under Temperate Continental Climatic Conditions. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(10).
<https://doi.org/10.3390/app13106229>
- Wahile, G. S., Londhe, S., Trikal, S., Kothare, C., Malwe, P. D., Sherje, N. P., Kulkarni, P. D., Aswalekar, U., Sonawane, C., Zahra, M. M. A., & Kumar, A. (2024). Performance analysis of photovoltaic panel using machine learning method. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 34(1), 19–30. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v34.i1.pp19-30>
- Zhang, C. (2025). Advanced Control Technology of Photovoltaic Power Generation Systems. In *Advanced Control Technology of Photovoltaic Power Generation Systems*.
<https://doi.org/10.1007/978-981-96-7745-0>