ANALISIS KOMPARATIF PENGARUH *SHADING* DAN SUDUT KEMIRINGAN TERHADAP KINERJA PLTS 40 WP PADA SISTEM *GROUND-MOUNTED* DAN *ROOFTOP* DI FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA

[1]*Wiwin Winan Muryantari**, [2]*Eva Magdalena Silalahi*, [3]*Stepanus*
[1,2,3]*Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia*
Jl. Mayjen Sutoyo No.2 Cawang, Jakarta Timur 13630, DKI Jakarta
[2]eva.silalahi@uki.ac.id, [3]stepanus@uki.ac.id,
**Corresponding author*: [1]wiwinwinanmuryantari@gmail.com

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sumber Energi Baru Terbarukan (EBT) yang memiliki potensi besar di Indonesia karena ketersediaan radiasi matahari yang melimpah sepanjang tahun. Kinerja sistem PLTS dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti sudut kemiringan panel, kondisi pemasangan, dan partial shading. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh partial shading 50% dan variasi sudut kemiringan panel (10°, 20°, 30°) terhadap kinerja PLTS 40 Wp pada konfigurasi Rooftop dan Ground-mounted, mengevaluasi produksi energi harian berdasarkan Peak Sun Hour (PSH), serta memvalidasi hasil dengan simulasi PVsyst . Penelitian dilaksanakan di Gedung FT UKI Jakarta Timur pada Maret–Mei 2026. Hasil menunjukkan konfigurasi Ground-mounted 10° menghasilkan performa terbaik dengan energi harian tanpa shading 94,379 Wh dan pencapaian PSH 49,16% sedangkan pada kondisi kombinasi variasi sudut kemiringan dengan partial shading 50% turun menjadi 81,432 Wh dan pencapaian PSH 42,41%. Simulasi PVsyst menunjukkan tren yang konsisten dengan pengukuran lapangan *meskipun* nilainya lebih tinggi.

Kata Kunci: PLTS, *Peak Sun Hour* (PSH), *PVsyst*, bayangan parsial, sudut kemiringan

ABSTRACT

Solar Photovoltaic (PV) systems are among the renewable energy technologies with significant potential in Indonesia due to abundant solar radiation throughout the year. PV system performance is influenced by panel tilt angle, installation configuration, and partial shading conditions. This study analyzes the effect of 50% partial shading and tilt angle variations (10°, 20°, 30°) on the performance of a 40 Wp PV system in Rooftop and Ground-mounted configurations, evaluates daily energy production based on Peak Sun Hour (PSH), and validates field measurements using PVsyst simulation. The research was conducted at FT UKI, East Jakarta during March–May 2026. The results show that the Ground-mounted configuration with a 10° tilt angle achieved the best performance, producing a daily energy output of 94.379 Wh under unshaded conditions with a PSH achievement of 49.16%. Under the combined condition of tilt angle variation and 50% partial shading, the daily energy output decreased to 81.432 Wh with a PSH achievement of 42.41%. The PVsyst simulation results showed a trend consistent with the field measurements, although the simulated values were generally higher than the measured results.

Keywords: *PLTS, Peak Sun Hour (PSH), PVsyst , partial shading, tilt angle*

PENDAHULUAN

Laporan *Indonesia Energy Transition Outlook* (IETO) 2026 bertajuk *"Retorika atau Realitas: Menyelaraskan Pertumbuhan Ekonomi dengan Transisi Energi"* menegaskan bahwa Indonesia berada pada momen krusial untuk mengubah komitmen tertulis menjadi aksi nyata dekarbonisasi demi menyelaraskan pertumbuhan ekonomi nasional. Sektor bangunan dan lingkungan akademis perkotaan memegang peranan strategis sebagai katalis dalam mempercepat pemanfaatan energi surya yang selama ini belum dioptimalkan secara maksimal (*Institute for Essential Services Reform* (IESR), 2026).

Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di lingkungan akademis Indonesia mengalami pertumbuhan masif sebagai bagian dari komitmen transisi energi bersih dan reduksi emisi karbon (PT Astra International, 2026). Universitas Kristen Indonesia, khususnya Fakultas Teknik, memiliki potensi radiasi matahari harian yang cukup tinggi untuk dikembangkan sebagai kawasan mandiri energi. Evaluasi komprehensif terhadap potensi energi surya pada berbagai wilayah kepulauan dan urban di Jakarta membuktikan bahwa penetrasi PLTS sangat aplikatif untuk memenuhi beban listrik lokal secara mandiri (Novita, Silalahi, Widodo, & Purba, 2024).

Penentuan sudut kemiringan (*tilt angle*) yang tepat pada sel fotovoltaik memegang peranan krusial dalam meminimalkan kerugian daya, sebab variasi derajat kecuraman panel akan memengaruhi intensitas iradiasi matahari yang diterima oleh permukaan modul sepanjang (Hardika Aufa Faturrahman & Yuli Mafendro Dedet Eka Saputra, 2026).

Keberadaan bayangan pada permukaan sel fotovoltaik memicu penurunan performa penangkapan radiasi matahari secara signifikan, yang berdampak langsung pada terjadinya *drop* arus listrik hingga mencapai 82,79% serta menurunkan kuantitas total daya keluaran yang dihasilkan (Agung Heriansyah, 2023).

Validasi hasil pemodelan digital dengan data aktual di lapangan sangat krusial, mengingat pendekatan eksperimental pada sistem fotovoltaik atap (*rooftop*) sering kali menunjukkan kesesuaian parameter produksi energi harian yang optimal jika dievaluasi menggunakan analisis simulasi berbasis data iradiasi lokal (Khan et al., 2022).

Selain rekayasa sudut kemiringan, ketepatan penentuan orientasi azimuth dan kapasitas sistem melalui pemodelan simulasi PVsyst terbukti memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan nilai *performance ratio* serta maksimalisasi produksi energi tahunan pada instalasi panel surya (Arif, Al Ghozy, Zulfatman, & Humaidi, 2025).

Potensi energi yang dikonversi oleh sel fotovoltaik sangat bergantung pada durasi insolasi efektif harian, di mana nilai *Peak Sun Hour* (PSH) bertindak sebagai indikator kritis yang nilainya dipengaruhi secara langsung oleh letak geografis, orientasi pemasangan, tingkat kecuraman sudut kemiringan, serta ketinggian penempatan panel surya (Megantoro, Syahbani, Sukmawan, Perkasa, & Vigneshwaran, 2022).

Karakteristik penurunan daya pada panel surya sangat dipengaruhi oleh orientasi penempatan, di mana konfigurasi *ground-mounted* cenderung menghadapi kendala *self-shading* antar baris modul, sementara konfigurasi *rooftop* lebih rentan terhadap *near-shading* akibat keberadaan struktur bangunan atau objek tetap di sekitar lokasi instalasi (Imanuel Novan

Dwi Pradika, Ismail Yusuf, & Ayong Hiendro, 2026).

Estimasi kerugian daya akibat hambatan bayangan di lingkungan universitas memerlukan pemodelan tiga dimensi yang akurat, karena fenomena *near shading* yang disebabkan oleh struktur arsitektur atau objek di sekitar panel dapat dianalisis secara presisi menggunakan perangkat lunak PVsyst guna meminimalkan ketidakpastian produksi energi tahunan (Kayri, 2024).

Optimasi kinerja pembangkit fotovoltaik terintegrasi pada bangunan atau kawasan institusi sangat bergantung pada konfigurasi geometri panel, di mana rekayasa orientasi arah dan sudut kemiringan (*tilt angle*) yang presisi melalui simulasi PVsyst terbukti efektif mendongkrak efisiensi konversi daya serta meminimalkan rugi-rugi lingkungan (Hosseini, Mansoori Al-yasin, Gheibi, & Moezzi, 2025).

Pemilihan jenis penempatan panel surya menuntut analisis komparatif yang cermat terhadap geometri pemasangan, sebab variasi kombinasi sudut kemiringan (*tilt*) dan azimuth pada ruang instalasi yang terbatas sangat menentukan optimalisasi penyerapan iradiasi harian (Keseev, 2026).

Desain pemasangan panel fotovoltaik pada infrastruktur kampus memerlukan kajian geometri yang presisi, mengingat rekayasa orientasi arah dan optimasi sudut kemiringan panel melalui simulasi PVsyst terbukti memberikan dampak langsung terhadap peningkatan efisiensi konversi energi total (Hosseini, Mansoori Al-yasin, Gheibi, & Moezzi, 2025).

Konfigurasi pemasangan sel fotovoltaik menuntut analisis spasial dan geometris yang komprehensif, mengingat variasi orientasi azimuth (seperti arah selatan atau timur-barat) serta rekayasa sudut kemiringan panel sangat menentukan optimalisasi penyerapan iradiasi dan profil distribusi energi harian yang dihasilkan (Keseev, 2025).

Optimalisasi orientasi geometris melalui rekayasa sudut kemiringan (tilt angle) pada iklim tropis memegang peranan krusial dalam mendongkrak efisiensi fotovoltaik, di mana deviasi atau ketidaktepatan penentuan sudut pasang terbukti secara signifikan menurunkan nilai produksi energi harian (*normalized energy*) serta Performance Ratio (PR) dari sistem PLTS (Prasetyo et al., 2025).

Perencanaan dan evaluasi kinerja sistem pembangkit listrik tenaga surya di wilayah DKI Jakarta memerlukan pemodelan parameter lingkungan yang komprehensif, di mana simulasi tekno-ekonomi terbukti efektif dalam memprediksi kontribusi produksi energi harian serta memastikan stabilitas pasokan daya dari array fotovoltaik (Veronika, Silalahi, Widodo, & Purba, 2024).

Karakteristik keluaran daya dari sistem panel surya sangat fluktuatif akibat pengaruh kondisi lingkungan, sehingga analisis mendalam terhadap parameter kelistrikan serta penggunaan sistem konversi elektronika daya sangat penting untuk mengoptimalkan stabilitas energi listrik yang dihasilkan (Waruwu, Silalahi, & Widodo, 2025).

Validasi parameter lingkungan seperti iradiasi matahari lokal dan fluktuasi iklim harian sangat krusial dalam perancangan fotovoltaik, di mana pemanfaatan perangkat lunak PVsyst terbukti andal dalam memprediksi efisiensi sistem serta mengoptimalkan produksi energi tahunan sebelum instalasi fisik dilakukan (Rehalia, Hafiz, & Sharma, 2025).

Evaluasi teknis terhadap potensi energi surya di lingkungan kampus perlu memperhitungkan parameter ketidakpastian matematis, mengingat fluktuasi iradiasi lokal dan geometri atap

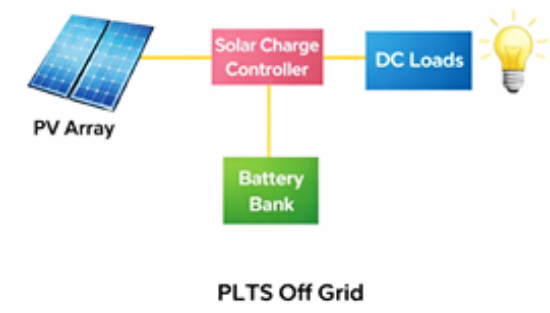
gedung dapat memicu deviasi yang signifikan pada hasil perhitungan total keluaran daya harian panel surya (Álvarez-Piñeiro, Blanco-Muelas, Berna-Escriche, & Bastida-Molina, 2025).

Gedung Fakultas Teknik UKI (FT UKI) dipilih sebagai lokasi karena memiliki area *Ground-mounted* dan *Rooftop* yang representatif. Penelitian ini secara komparatif menganalisis pengaruh *shading* parsial 50% dan variasi sudut 10°, 20°, 30° terhadap kinerja PLTS 40 Wp pada kedua konfigurasi, serta memvalidasinya dengan simulasi PVsyst dan analisis regresi linear berganda.

KERANGKA TEORI

A. Pembangkit Listrik Tenaga Surya

PLTS mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Indonesia memiliki penyinaran rata-rata 4,8 kWh/m²/hari . Sel surya menggunakan sambungan p-n yang membentuk medan listrik internal untuk memisahkan elektron dan hole saat foton diserap, menghasilkan arus DC.



Gambar 1. Sistem PLTS *Off-Grid*.

Disebut juga sistem PV mandiri, PLTS *Off-Grid* memanfaatkan radiasi matahari untuk produksi listrik secara mandiri melalui modul fotovoltaik, tanpa memerlukan konektivitas dengan jaringan PLN karena energi yang diproduksi disimpan dalam baterai. Hal ini memungkinkan sistem beroperasi tanpa terganggu saat terjadi pemadaman PLN, menjadikannya pilihan untuk industri dan wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik.

B. Komponen Sistem PLTS

Modul surya pada Gambar 2 terdiri dari beberapa sel fotovoltaik yang mengubah energi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik.



Gambar 2. Modul panel surya.

Sel surya umumnya terbuat dari bahan semikonduktor seperti silikon kristal yang dilengkapi elektroda positif dan negatif, dan dapat dikonfigurasikan secara seri atau paralel untuk memperoleh tegangan dan arus yang diinginkan.



Gambar 3. *Solar Charge Controller* [9]

Solar Charge Controller (SCC) berfungsi mengatur proses pengisian energi dari modul surya ke baterai, mencegah *overcharging* maupun *overdischarging*, sehingga membantu menjaga stabilitas sistem PLTS.



Gambar 4. Baterai.

Baterai menyimpan energi listrik yang dihasilkan modul surya pada siang hari agar dapat digunakan pada malam hari atau saat radiasi matahari tidak tersedia, mengingat sistem *off-grid* tidak terhubung dengan PLN.

C. Karakteristik dan Efisiensi Sel Fotovoltaik

Kinerja PLTS bertumpu pada konversi radiasi foton menjadi arus searah (DC) melalui struktur p-n junction. Karakteristik keluaran daya dipetakan melalui kurva arus-tegangan (V×I) dan daya-tegangan (P×V) untuk mengidentifikasi titik daya maksimum (*Maximum Power Point*/MPP). Efisiensi konversi sistem (η) ditentukan oleh rasio antara daya keluaran (P_{out}) dengan daya input radiasi matahari (P_{in}) yang menyinari luas permukaan panel (A).

Daya keluaran sistem dihitung mengunakan persamaan:

$$P_{out} = V \times I \quad (1)$$

Daya input sistem dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{in} = A \times G \quad (2)$$

dimana:
A = Luas Panel (m^2)
G = Intensitas radiasi matahari (W/m²)
P = Daya keluaran (Watt)
V = Tegangan (Volt)
I = Arus (Ampere)

Sudut kemiringan (*tilt angle*) adalah sudut antara permukaan modul dan bidang horizontal. Radiasi efektif yang diterima panel dirumuskan:

$$G_{eff} = G\cos(\theta) \quad (3)$$

dimana:
G_{eff} = radiasi efektif yang diterima panel (W/m²)
G = intensitas radiasi matahari yang datang (W/m²)
θ = sudut datang radiasi matahari terhadap garis normal permukaan panel (°)

Semakin kecil sudut datang θ, semakin besar energi yang diserap panel. Pada wilayah tropis Indonesia, sudut optimal berkisar 0°–20°.

Efisiensi konversi modul dihitung:

$$\eta = \frac{P_{out} \times 100\%}{G \times A} \quad (4)$$

dimana:
η = Efisiensi sistem (%)
P_{out} = Daya keluaran panel (W)
G = Intensitas radiasi matahari (W/m²)
A = Luas permukaan panel (m²)

Shading terjadi ketika sebagian permukaan modul tertutup objek tertentu. Pada rangkaian seri, sel yang terhalangi bayangan membatasi arus total seluruh rangkaian (*current mismatch*), menurunkan daya keluaran secara tidak linier. Efek *shading* 50% luas panel mengakibatkan penurunan daya hingga 88,2%. Jenis *shading* diklasifikasikan menjadi: parsial, total, statis, dan dinamis.
Peak Sun Hour (PSH) merepresentasikan jam penyinaran ekuivalen pada intensitas 1000 W/m². Energi teoritis PLTS dihitung:

$$E = P_{rata-rata} \times t \quad (5)$$

dengan PSH Jakarta Timur 4,8 jam, potensi teoritis panel 40 Wp adalah 192 Wh/hari.

Ground-mounted menawarkan fleksibilitas sudut penuh dan sirkulasi udara lebih baik sehingga temperatur operasi lebih rendah. *Rooftop* lebih efisien lahan namun permukaan beton berisiko meningkatkan temperatur panel. Dalam penelitian ini, sistem *Rooftop* ditempatkan pada ketinggian ±10 m dari permukaan tanah.

PVsyst adalah perangkat lunak untuk perancangan dan evaluasi sistem fotovoltaik. Simulasi dilakukan dengan input lokasi geografis (PVGIS), spesifikasi modul 40 Wp, baterai, beban,

sistem *off-grid*, dan variasi sudut 10°, 20°, 30°. Output berupa *Energy Load* dan *Energy User* digunakan sebagai pembanding data lapangan.

METODE PENELITIAN

A. Jenis dan Lokasi Penelitian

Penelitian menggunakan metode *Research and Development* (R&D) bersifat eksperimental. Dilaksanakan di Gedung FT UKI, Jl. Mayjen Sutoyo No. 2, Cawang, Jakarta Timur, periode Maret–Mei 2026. Data diambil setiap 15 menit pukul 08.00–16.00 WIB selama 6 hari (5–11 Mei 2026). Data PSH diperoleh dari PVGIS.

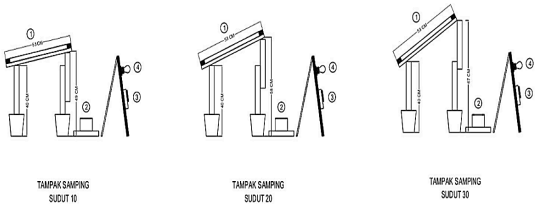
B. Spesifikasi Komponen

Tabel 1 menyajikan spesifikasi komponen panel surya yang digunakan dalam penelitian ini.

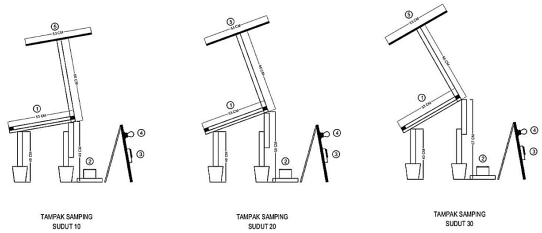
Tabel 1. Spesifikasi Panel Surya Maysun 40 Wp

Parameter	Nilai
Rated Power (P_{max})	40 W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	22,0 V
Short Circuit Current (I_{sc})	2,46 A
Voltage at P_{max} (V_{mp})	18 V
Current at P_{max} (I_{mp})	2,22 A
Cell Technology	Mono-Si
Dimensi (cm)	53×45×2,5

Komponen lainnya meliputi: SCC PWM 10A 12/24V, baterai Tianneng 12V 14Ah, beban lampu LED DC 20W, rangka besi, fitting, kabel PV dan NYAF. Alat ukur: multimeter digital XL830L (8 unit), *irradiance* meter AS803 (2 unit), busur manual. *Shading* parsial 50% disimulasikan menggunakan penutup triplek 53×43 cm.

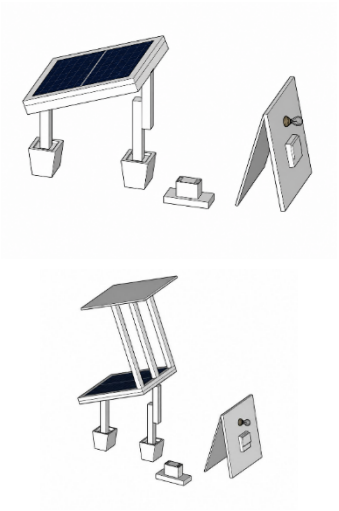


Gambar 5. Tampak samping desain 2D prototipe PLTS tanpa *shading*.



Gambar 6. Tampak samping desain 2D prototipe PLTS dengan *shading* parsial 50%.

Keterangan: (1) Modul Surya, (2) Baterai, (3) *Solar Charge Controller*, (4) Lampu LED, (5) Triplek.



Gambar 7. Tampak samping desain 3D prototipe PLTS.

C. Diagram Alir

Penelitian ini dilaksanakan secara sistematis melalui tahapan: (1) identifikasi masalah dan studi literatur; (2) observasi lokasi dan pengumpulan data radiasi (PSH); (3) perancangan sistem; (4)

pembuatan dan instalasi prototipe; (5) pengujian dan pengambilan data lapangan; (6) simulasi dan analisis data (termasuk analisis statistik dan regresi linear berganda); serta (7) penarikan kesimpulan dan rekomendasi, yang disajikan dalam Gambar 8.

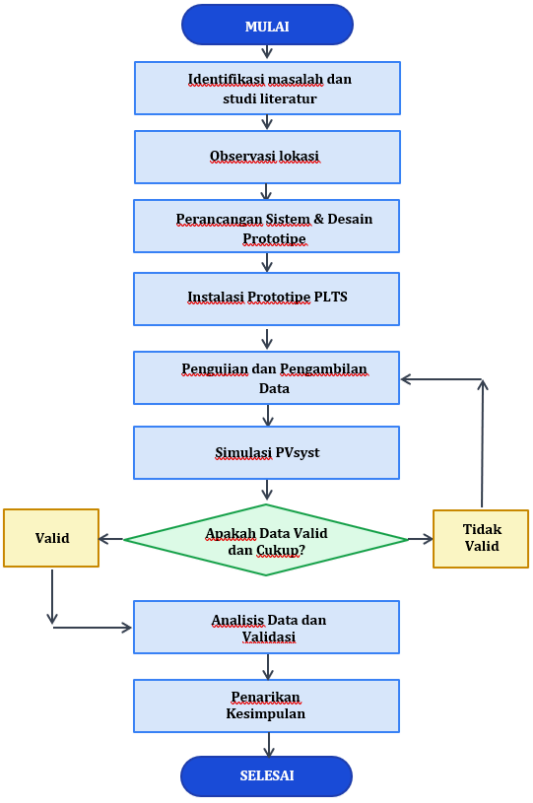
D. Variabel Penelitian

Variabel bebas yang divariasikan secara eksperimental terdiri dari tiga jenis: (1) sudut kemiringan (10°, 20°, 30°); (2) kondisi *shading* (tanpa *shading* dan *shading* parsial 50%); (3) lokasi pemasangan (*Rooftop* dan *Ground-mounted*). Selain itu, intensitas radiasi matahari dan temperatur lingkungan direkam sebagai variabel bebas tambahan (kovariat lingkungan) yang turut disertakan dalam analisis regresi linear berganda, karena kedua faktor tersebut tidak dapat dikendalikan secara eksperimental namun terbukti memengaruhi kinerja sistem. Sistem menggunakan konfigurasi komponen identik pada kedua lokasi sehingga perbedaan kinerja hanya dipengaruhi oleh variabel penelitian.

E. Teknik Analisis

Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan komparatif-deskriptif berdasarkan parameter performa yang dihitung melalui Persamaan (1) - (5). Daya keluaran sesaat dihitung melalui perkalian arus dan tegangan aktual, sedangkan akumulasi energi harian (Wh) diperoleh dengan mengintegrasikan nilai daya terhadap interval waktu penyinaran. Efisiensi konversi sistem dihitung dengan membandingkan daya elektrikal keluaran terhadap daya input radiasi matahari.

Untuk memperkuat analisis deskriptif, dilakukan pula uji hipotesis statistik (uji-t dan uji-F) serta regresi linear berganda terhadap dua variabel terikat (P_{out} dan efisiensi) dengan lima variabel bebas (sudut, *shading*, konfigurasi, intensitas radiasi, dan temperatur) untuk mengidentifikasi variabel yang paling dominan secara kuantitatif dan mengontrol pengaruh faktor lingkungan yang tidak dapat dijaga konstan secara eksperimental.



Gambar 8. Diagram alir penelitian.

Penentuan konfigurasi paling optimal ditentukan melalui analisis matriks yang menggabungkan tiga indikator: variasi sudut yang menghasilkan efisiensi tertinggi saat solar noon, persentase degradasi daya paling minimum pada skenario *shading* 50% (indeks ketahanan *shading*), serta stabilitas performa terhadap kenaikan temperatur operasi sel. Hasil akhir dikonfrontasikan dengan data teoritis PSH Jakarta Timur sebesar 4,8 jam (192 Wh untuk kapasitas 40 Wp).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan dan pengolahan data, diperoleh beberapa parameter utama untuk menganalisis kinerja sistem PLTS 40 Wp pada konfigurasi *Rooftop* dan *Ground-mounted* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.

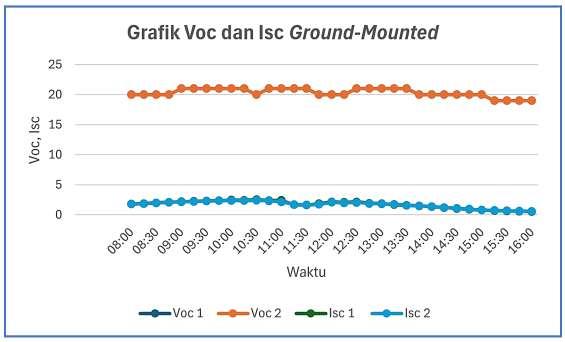
Parameter yang dianalisis meliputi pengaruh *shading* parsial 50% terhadap tegangan, arus, dan daya keluaran; pengaruh variasi sudut kemiringan terhadap energi harian dan efisiensi; analisis pencapaian energi berdasarkan PSH; regresi linear berganda; serta validasi hasil pengukuran dengan simulasi PVsyst.



Gambar 9. Alat penelitian: kiri sistem *Ground-mounted*, kanan sistem *Rooftop*.

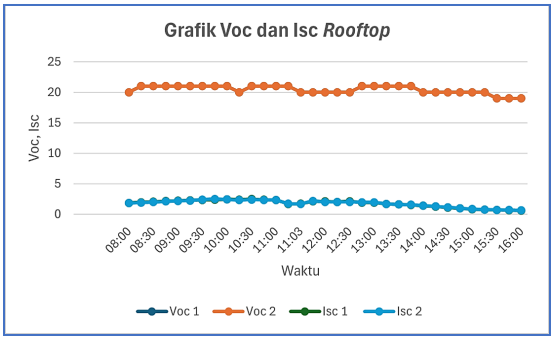
A. Analisis Karakteristik Dasar Panel Surya

Berdasarkan grafik Voc (*Open Circuit Voltage*) pada Gambar 10 dan 11, seluruh variasi pengujian baik pada *Rooftop* maupun *Ground-mounted* menunjukkan pola perubahan tegangan yang hampir sama: nilai Voc meningkat ketika intensitas radiasi meningkat pada siang hari dan menurun pada sore hari. Kesamaan pola ini menunjukkan bahwa proses pengambilan data dan sistem pengukuran bekerja dengan baik dan konsisten, sehingga kedua sistem layak untuk dibandingkan.



Gambar 10. Grafik perbandingan V_{oc} dan I_{sc} konfigurasi *Ground-mounted*.

Berdasarkan grafik I_{sc} (*Short Circuit Current*) pada Gambar 10 dan 11, pola serupa terlihat: nilai arus hubung singkat meningkat pada siang hari ketika radiasi maksimum dan menurun pada pagi maupun sore hari, menunjukkan sistem pengukuran arus bekerja secara stabil.



Gambar 11. Grafik perbandingan V_{oc} dan I_{sc} konfigurasi *Rooftop*.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kondisi *shading* parsial 50% menyebabkan penurunan arus dan daya

keluaran pada kedua konfigurasi pemasangan. Penurunan terjadi karena sebagian permukaan panel tidak menerima radiasi matahari secara optimal sehingga kemampuan panel menghasilkan arus listrik berkurang. Tegangan panel relatif stabil dibandingkan arus, namun tetap mengalami sedikit penurunan akibat berkurangnya intensitas penyinaran.

Secara umum, konfigurasi *Ground-mounted* menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh *shading* dibandingkan *Rooftop*, ditunjukkan oleh kemampuannya mempertahankan nilai tegangan, arus, dan daya yang lebih stabil selama pengujian. Penurunan paling terlihat pada arus keluaran yang kemudian diikuti penurunan daya dan energi.

B. Pengaruh Variasi Sudut Kemiringan terhadap Daya dan Efisiensi

Seluruh konfigurasi menunjukkan pola harian serupa: daya meningkat dari pagi, mencapai puncak pada pukul 11.00–13.00 WIB, lalu menurun pada sore hari. Tabel 2 merangkum daya rata-rata dan efisiensi sistem untuk variasi sudut kemiringan tanpa *shading*.

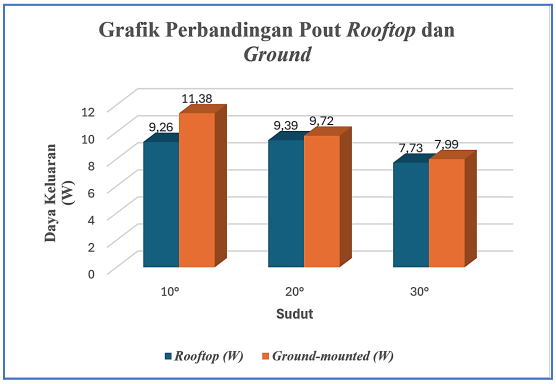
Tabel 2. Daya Rata-Rata dan Efisiensi Sistem Tanpa *Shading*.

Sudut	*Rooftop* $\bar{P}$ (W)	*Rooftop* η (%)	GM $\bar{P}$ (W)	GM η (%)
10°	9,26	8,91	11,38	16,90
20°	9,39	11,83	9,72	14,66
30°	7,73	8,95	7,99	9,80

Ground-mounted 10° menghasilkan daya rata-rata tertinggi 11,38 W dan efisiensi 16,90%. Daya puncak mencapai 13,76 W pada pukul 13.00 WIB (V = 13,9 V; I = 0,99 A). Sudut 10° paling mendekati tegak lurus terhadap arah matahari di lokasi tropis sehingga radiasi yang diserap lebih besar.

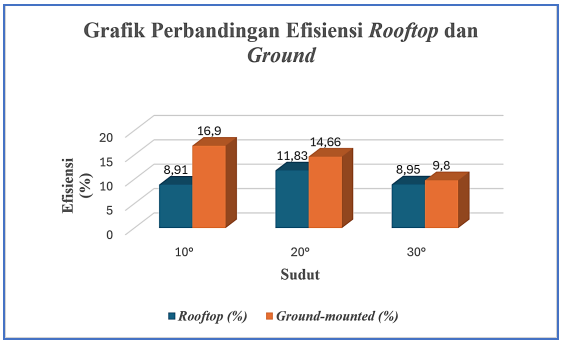
Pada sudut 20°, *Rooftop* justru mencatat efisiensi tertinggi (11,83%) karena orientasi panel lebih sesuai. Namun *Ground-mounted* mengalami penurunan efisiensi akibat kenaikan temperatur panel mendekati 40°C saat intensitas radiasi tinggi (>1.179 W/m²). Menurut teori fotovoltaik, kenaikan suhu menurunkan Voc sehingga sebagian keuntungan radiasi tinggi hilang.

Sudut 30° menghasilkan daya dan efisiensi paling rendah pada kedua lokasi. Kemiringan yang terlalu besar menyebabkan sebagian radiasi dipantulkan kembali (efek kosinus), energi yang diserap panel berkurang, dan arus keluaran turun signifikan.



Gambar 12. Grafik perbandingan rata-rata daya keluaran pada setiap sudut kemiringan.

Berdasarkan rata-rata daya keluaran, sudut 10° pada *Ground-mounted* merupakan konfigurasi terbaik (11,38 W). Pada *Rooftop*, daya tertinggi diperoleh pada sudut 20° (9,39 W). Peningkatan sudut hingga 30° menyebabkan penurunan daya keluaran pada kedua lokasi karena sudut datang sinar matahari menjadi kurang optimal.



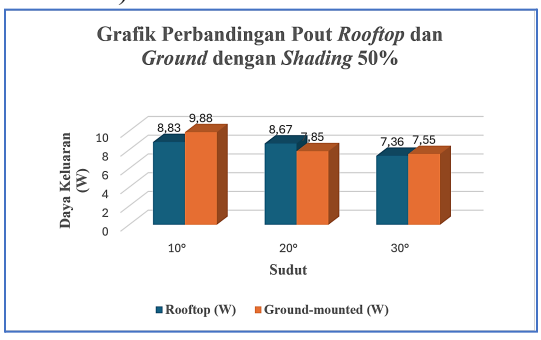
Gambar 13. Grafik perbandingan rata-rata efisiensi pada setiap sudut kemiringan.

Efisiensi sistem pada *Ground-mounted* cenderung lebih tinggi dibandingkan *Rooftop* untuk seluruh variasi sudut. *Ground-mounted* dengan sudut 10° merupakan konfigurasi terbaik (efisiensi 16,90%), sedangkan *Rooftop* terbaik pada sudut 20° (11,83%). Secara umum, sudut 10°–20° memberikan kinerja lebih baik dibandingkan 30°, baik dari sisi efisiensi maupun daya keluaran.

C. Pengaruh *Shading* Parsial 50% Kombinasi dengan Variasi Sudut Kemiringan

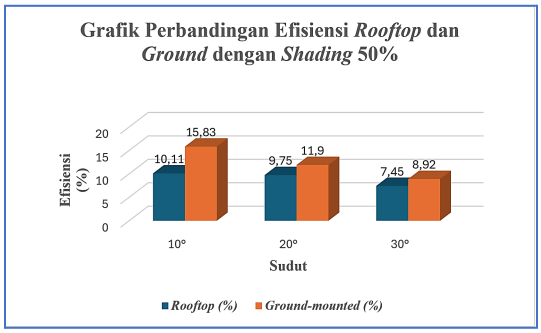
Gambar 14 memperlihatkan grafik perbandingan rata-rata daya keluaran pada pengaruh *shading* parsial dan variasi sudut

Dibandingkan kondisi tanpa *shading*, seluruh nilai daya mengalami penurunan karena sebagian sel surya tidak menerima intensitas cahaya yang sama sehingga arus keluaran panel berkurang. Sel yang terhalangi membatasi aliran arus dari keseluruhan rangkaian modul (*current mismatch*).



Gambar 14. Grafik perbandingan rata-rata daya keluaran pada pengaruh *shading* parsial dan variasi sudut.

Pada kondisi *shading* parsial 50%, *Ground-mounted* sudut 10° tetap paling optimal dengan daya rata-rata 9,88 W, sedangkan *Rooftop* tertinggi juga pada sudut 10° (8,83 W). Peningkatan sudut hingga 30° menyebabkan penurunan daya keluaran yang cukup signifikan pada kedua lokasi.



Gambar 15. Grafik perbandingan rata-rata efisiensi pada pengaruh *shading* parsial dan variasi sudut.

Hasil efisiensi sejalan dengan data daya keluaran: sudut 10° menghasilkan daya rata-rata tertinggi pada kedua lokasi. Sebaliknya, pada sudut 30° baik daya maupun efisiensi mengalami penurunan, menunjukkan bahwa kombinasi kemiringan besar dan *shading* parsial menurunkan performa sistem secara keseluruhan.

Ground-mounted sudut 10° memberikan efisiensi rata-rata terbaik pada kondisi *shading* (15,83%), sedangkan *Rooftop* tertinggi juga pada sudut 10° (10,11%). Sudut 10° merupakan sudut paling optimal untuk mempertahankan efisiensi ketika terjadi *shading* parsial 50%.

D. Kinerja Energi Harian terhadap PSH

Tabel 2 dan Tabel 3 menyajikan produksi energi harian dan pencapaian terhadap nilai PSH 4,8 jam (potensi teoritis 192 Wh/hari).

Tabel 3. Kinerja Harian Terhadap PSH Tanpa *Shading*.

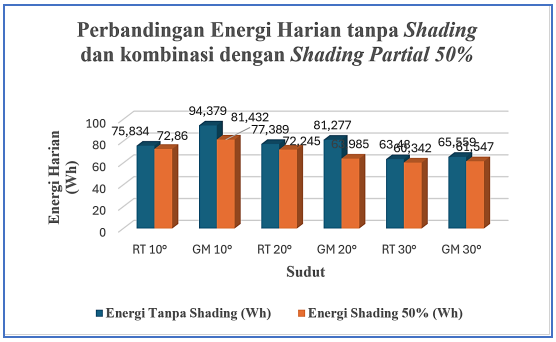
Lokasi & Sudut	Energi Harian (Wh)	Pencapaian PSH (%)
RT – 10°	75,834	39,50
GM – 10°	94,379	49,16
RT – 20°	77,389	40,31
GM – 20°	81,277	42,33
RT – 30°	63,480	33,06
GM – 30°	65,559	34,15

Ground-mounted menghasilkan kinerja lebih baik dibandingkan *Rooftop* pada seluruh variasi sudut. Sudut 10° memberikan performa terbaik dengan energi harian tertinggi (94,379 Wh pada GM; 75,834 Wh pada RT), efisiensi masing-masing 49,16% dan 39,50%. Sudut 30° menghasilkan energi dan efisiensi terendah (65,559 Wh/34,15% GM; 63,480 Wh/33,06% RT). Sudut 10° dapat dianggap sebagai sudut paling optimal pada lokasi penelitian ini.

Tabel 4. Kinerja Harian Terhadap PSH Dengan *Shading* Parsial 50%.

Lokasi & Sudut	Energi Harian (Wh)	Pencapaian PSH (%)
RT – 10°	72,860	37,95
GM – 10°	81,432	42,41
RT – 20°	72,245	37,63
GM – 20°	63,985	33,33
RT – 30°	60,342	31,43
GM – 30°	61,547	32,06

Ground-mounted 10° menghasilkan energi harian tertinggi (81,432 Wh, efisiensi 42,41%), sedangkan *Rooftop* 10° menghasilkan 72,860 Wh (37,95%). Peningkatan sudut ke 20° dan 30° menyebabkan penurunan energi dan efisiensi pada kedua lokasi; nilai terendah pada *Rooftop* 30° (60,342 Wh; 31,43%).



Gambar 16. Grafik perbandingan kinerja energi harian tanpa *shading* vs *shading* parsial 50%.

Seluruh konfigurasi mengalami penurunan produksi energi harian akibat berkurangnya radiasi matahari yang diterima modul saat *shading* diterapkan. Penurunan terbesar terjadi pada *Ground-mounted* 20° (21,28%), sedangkan penurunan terkecil pada *Rooftop* 10° (3,92%). Meskipun mengalami penurunan, *Ground-mounted* 10° tetap menghasilkan energi harian tertinggi (81,432 Wh).

Hasil penelitian menunjukkan sudut kemiringan 10°, khususnya pada konfigurasi *Ground-mounted*, memiliki kemampuan terbaik dalam memanfaatkan radiasi matahari dan mempertahankan produksi energi saat terjadi bayangan parsial, sehingga menjadi konfigurasi paling optimal pada lokasi penelitian.

E. Analisis Regresi Linear Berganda

Analisis regresi dilakukan pada dua model terpisah (Pout dan efisiensi) dengan lima variabel bebas (N = 396). Model Pout menghasilkan R^2 = 0,620 (F = 127,276; p < 0,001), dengan sudut kemiringan sebagai prediktor paling dominan (Beta = -0,668; p < 0,001), diikuti *shading* (Beta = -0,352) dan konfigurasi (Beta = -0,216). Model efisiensi menghasilkan R^2 = 0,239 (F = 24,481; p < 0,001), dengan intensitas radiasi sebagai prediktor paling dominan

(Beta = -0,347), diikuti sudut (Beta = -0,203) dan suhu (Beta = -0,172); variabel *shading* dan konfigurasi tidak signifikan terhadap efisiensi ($p > 0,05$). Hasil ini menegaskan secara kuantitatif bahwa sudut kemiringan adalah faktor paling berpengaruh terhadap daya keluaran, sedangkan efisiensi lebih dipengaruhi faktor lingkungan.

F. Perbandingan Simulasi PVsyst dengan Pengukuran Riil

Perbandingan hasil pengukuran lapangan dengan simulasi PVsyst pada dua parameter utama, yaitu *Energy Load* dan *Energy User*, disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Pengukuran Langsung Dengan Simulasi PVsyst.

Parameter	Sudut	*Rooftop* (kWh)	GM (kWh)	PVsyst (kWh)
Energy Load	10°	2,28	2,77	5,70
	20°	2,33	2,42	5,70
	30°	1,92	1,96	5,70
Energy User	10°	1,93	2,36	3,99
	20°	1,98	2,06	4,02
	30°	1,63	1,67	3,86

Pada parameter *Energy Load*, nilai pengukuran berkisar 1,92–2,77 kWh, jauh lebih rendah dibandingkan simulasi yang bernilai konstan 5,70 kWh di semua sudut, karena simulasi menggunakan beban tetap berdasarkan kapasitas sistem yang dimodelkan, sedangkan pengukuran lapangan menggunakan beban riil (lampu LED 20 W) dengan konsumsi energi aktual yang jauh lebih kecil.

Pada parameter *Energy User* (energi yang benar-benar dapat dimanfaatkan setelah memperhitungkan efisiensi *round-trip* baterai 85%), hasil simulasi juga selalu lebih tinggi dibandingkan pengukuran langsung. Pada sudut 10°, *Rooftop* menghasilkan 1,93 kWh dan *Ground-mounted* 2,36 kWh, sedangkan simulasi menunjukkan 3,99 kWh; pola serupa terjadi pada sudut 20° dan 30°. Perbedaan nilai antara pengukuran dan simulasi disebabkan oleh kondisi operasi aktual, variasi cuaca, dan rugi-rugi sistem yang tidak sepenuhnya terwakili dalam asumsi simulasi, namun secara keseluruhan pola tren hasil pengukuran tetap konsisten dengan hasil simulasi PVsyst.

KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1) *Shading* parsial 50% menyebabkan penurunan kinerja PLTS pada seluruh konfigurasi, terutama pada arus keluaran yang berdampak langsung terhadap penurunan daya dan energi harian.
2) Sudut kemiringan 10° menghasilkan performa terbaik pada kedua konfigurasi, sedangkan sudut 30° menghasilkan daya dan energi paling rendah karena penerimaan radiasi tidak optimal di lokasi tropis.
3) *Ground-mounted* 10° merupakan konfigurasi paling optimal: energi harian tertinggi 94,379 Wh (tanpa *shading*) dan 81,432 Wh (*shading* 50%), pencapaian PSH 49,16% dan 42,41%, serta stabilitas performa terbaik.
4) Analisis regresi linear berganda mengonfirmasi sudut kemiringan sebagai prediktor paling dominan terhadap daya keluaran (Beta = -0,668), sedangkan efisiensi lebih dipengaruhi oleh intensitas radiasi dan temperatur lingkungan.
5) Simulasi PVsyst menunjukkan tren konsisten dengan pengukuran lapangan; hasil pengukuran *Energy*

Load 51–66% dan *Energy User* 41–58% lebih rendah dibandingkan simulasi akibat perbedaan asumsi beban dan kondisi operasi ideal, sehingga PVsyst tetap dapat digunakan sebagai alat bantu perencanaan yang valid.

6) Rekomendasi untuk implementasi PLTS di FT UKI: gunakan konfigurasi *Ground-mounted* sudut kemiringan 10° untuk memaksimalkan produksi energi dan efisiensi sistem.

B. SARAN

1) Kembangkan sistem monitoring berbasis IoT (Arduino/ESP32) untuk pengambilan data otomatis *real-time*.
2) Perpanjang periode pengujian menjadi bulanan untuk memperoleh data representatif variasi cuaca musiman.
3) Tambahkan sensor suhu panel dan kelembapan untuk analisis faktor cuaca lebih mendalam, serta evaluasi aspek ekonomi investasi PLTS.

DAFTAR PUSTAKA

Agung Heriansyah. (2023). *Analisis Pengaruh Effect Shading Terhadap Daya Output Pembangkit Listrik Tenaga Surya* (Skripsi). Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan. Retrieved from http://repository.umsu.ac.id/bitstream/123456789/23819/1/SKRIPSI%20AGUNG%20HERIANSYAH.pdf

Álvarez-Piñeiro, L., Blanco-Muelas, D., Berna-Escriche, C., & Bastida-Molina, P. (2025). *Method for Estimating the Uncertainty in Solar PV Rooftop Potential*. In *2025 6th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)* (pp. 1–5). IEEE. doi:10.1109/CIEES66347.2025.11300181

Arif, D. J. A., Al Ghozy, N., Zulfatman, Z., & Humaidi, H. N. A. (2025). Analisa Efisiensi Dan Optimalisasi Kinerja Pada Sistem PLTS On-Grid Gudang Sidoarjo 265,29 kWp. *Equivalent: Jurnal Ilmiah Sosial Teknik*, *7*(2), 111–130. doi:10.59261/jequi.v7i2.226

rdika Aufa Faturrahman, & Yuli Mafendro Dedet Eka Saputra. (2026). Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Surya Terhadap Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di PT XYZ. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*, *15*(2), 2252–2257. Retrieved from https://prosiding.pnj.ac.id/index.php/sntm/article/view/5154

sseini, S. A., Mansoori Al-yasin, S. A., Gheibi, M., & Moezzi, R. (2025). Evaluation of Solar Energy Performance in Green Buildings Using PVsyst: Focus on Panel Orientation and Efficiency. *Eng*, *6*(7), 137. doi:10.3390/eng6070137

anuel Novan Dwi Pradika, Ismail Yusuf, & Ayong Hiendro. (2026). Studi Pengaruh Self Shading Dan Near Shading Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya. *Jurnal Penelitian Ilmiah Multidisiplin*, *10*(2). Retrieved from https://sejurnal.com/pub/index.php/jpim/article/view/353

titute for Essential Services Reform (IESR). (2026). Indonesia energy transition outlook 2026: Rhetoric or reality: Aligning economic growth with energy transition. Retrieved June 28, 2026, from https://iesr.or.id/pustaka/indonesia-energy-transition-outlook-ieto-2026/

yri, İ. (2024). Investigation of Near Shading Losses in Photovoltaic Systems with PVsyst Software. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, *12*(1), 10–19. doi:10.17694/bajece.1418426

seev, V. (2025). Analysis of photovoltaic systems with south and east-west photovoltaic panel azimuths. *E3S Web of Conferences*, *638*, 02008. doi:10.1051/e3sconf/202563802008

Keseev, V. (2026). Comparison of Photovoltaic System Configurations with Different Azimuths and Tilts for Optimal Use of Available Installation Spaces. *Eng*, *7*(6), 268. doi:10.3390/eng7060268

Khan, M. A., Islam, N., Abdul Mateen Khan, M., Irshad, K., Hanzala, M., Ali Pasha, A., & Mursaleen, M. (2022). Experimental and simulation analysis of grid-connected rooftop photovoltaic system for a large-scale facility. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *53*, 102773. doi:10.1016/j.seta.2022.102773

Megantoro, P., Syahbani, M. A., Sukmawan, I. H., Perkasa, S. D., & Vigneshwaran, P. (2022). Effect of peak sun hour on energy productivity of solar photovoltaic power system. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, *11*(5), 2442–2449. doi:10.11591/eei.v11i5.3962

Novita, M., Silalahi, E. M., Widodo, B., & Purba, R. (2024). *Evaluation of solar power's potential to fulfill Tidung Island's electricity demands* (p. 020005). doi:10.1063/5.0209810

Prasetyo, S. D., Trisnoaji, Y., Munir, M., Permatasari, M. P., Mahadi, A. A., Rizkita, M. A., & Arifin, Z. (2025). Optimization of solar panel orientation and tracking systems for standalone PV applications. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, *16*(4), 2721. doi:10.11591/ijpeds.v16.i4.pp2721-2730

PT Astra International. (2026, January 19). Instalasi Panel Surya: Pengertian, Cara Kerja, dan Manfaatnya. Retrieved May 21, 2026, from https://www.astra.co.id/blogs-and-articles/instalasi-panel-surya-pengertian-cara-kerja-dan-manfaatnya

Rehalia, V., Hafiz, T., & Sharma, N. K. (2025). *Evaluating the performance and optimization of grid connected solar photovoltaic using PVsyst and HOMER software* (p. 020020). doi:10.1063/5.0292093

ronika, E., Silalahi, E. M., Widodo, B., & Purba, R. (2024). *Analysis of the hybrid power plants of PLTD and PLTS on Tidung Island, Seribu Islands, DKI Jakarta using homer* (p. 020004). doi:10.1063/5.0209809

ıruwu, B. , Silalahi, E. M. , & Widodo, B. (2025). Analisis energi listrik PLTS on-grid dengan boost converter dan inverter berbasis Matlab/Simulink. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, *13*(1). doi:10.23960/jitet.v13i1.5959