



Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri (SINTA)

Homepage: sinta.eng.unila.ac.id



Analisis Kinerja Teknis dan Potensi Energi Sistem Fotovoltaik Atap Berdasarkan Luas Atap Fakultas Teknik Universitas Lampung

Herri Gusmedi ^{a*}, Ahmad Saudi Samosir^b, Dikpride Despa^c

^{abc}Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Lampung Jl. Soemanthro Brojonegoro 1 Bandar Lampung

^aDoktor Ilmu Lingkungan, Universitas Lampung Jl. Soemanthro Brojonegoro 1 Bandar Lampung

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima 24/11/2025

Direvisi 24/12/2025

Kata kunci:

Kata PLTS Atap

Kata Helioscope

Kata *Performance Ratio*

Kata *Specific Yield*

Kata Universitas Lampung

ABSTRAK

Transisi menuju energi bersih kini menjadi prioritas nasional yang selaras dengan target bauran energi terbarukan. Institusi pendidikan tinggi memegang peran strategis dalam percepatan adopsi dan diseminasi teknologi ini. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja teknis dan potensi hasil energi dari sistem Fotovoltaik (PV) atap yang dirancang pada lingkungan kampus dengan topologi atap yang terfragmentasi. Menggunakan perangkat lunak simulasi HelioScope, penelitian memodelkan sistem PV berkapasitas total 1,40 MWp yang terdistribusi di berbagai gedung Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Evaluasi kinerja mengacu pada metrik standar internasional, meliputi Performance Ratio (PR) dan Specific Yield (SY). Hasil simulasi memproyeksikan produksi energi tahunan mencapai 1.738 MWh (atau 1,74 GWh). Sistem menunjukkan kinerja yang solid dengan nilai Specific Yield sebesar 1.244,2 kWh/kWp dan Performance Ratio sebesar 79,1%. Analisis rugi-rugi (losses) mengidentifikasi temperatur sebagai faktor dominan penurunan kinerja (10,7%), diikuti oleh rugi-rugi ketidaksesuaian (mismatch) sebesar 3,4% yang timbul akibat karakteristik desain multi-atap. Studi ini menyimpulkan bahwa pemanfaatan atap gedung yang terfragmentasi di lingkungan kampus merupakan strategi yang layak untuk mencapai kapasitas pembangkitan skala besar. Kinerja sistem yang tetap optimal, terlepas dari kompleksitas desain, mengonfirmasi potensi signifikan PV atap sebagai pilar desentralisasi energi di kawasan urban.

1. Pendahuluan

Komitmen global untuk dekarbonisasi telah mendorong percepatan transisi menuju sistem energi yang berkelanjutan, dengan energi terbarukan sebagai pilar utamanya. Indonesia, sebagai salah satu negara dengan pertumbuhan ekonomi yang pesat, telah menetapkan target ambisius dalam bauran energi nasional, yaitu mencapai 23% kontribusi energi terbarukan pada tahun 2025 tetapi realisasi baru 13% - 14% (PT. Perusahaan Listrik Negara, 2019). Di antara berbagai sumber energi terbarukan, energi surya

memiliki potensi terbesar di Indonesia, diperkirakan mencapai 207,8 GWp.⁴ Namun, pemanfaatannya hingga saat ini masih sangat terbatas, dengan kapasitas terpasang hanya sekitar 0,15 GWp. Kesenjangan yang signifikan antara potensi dan realisasi ini menyoroti urgensi untuk akselerasi implementasi proyek-proyek Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) (Suparwoko & Qamar, 2022).

Lokasi geografis Indonesia di garis khatulistiwa memberikan keuntungan fundamental berupa paparan iradiasi matahari yang tinggi dan relatif stabil sepanjang

* Herri Gusmedi

E-mail: herri.gusmedi@eng.unila.ac.id

tahun. Rata-rata iradiasi harian di Indonesia berkisar antara 4,5 hingga 5,1 kWh/m²/hari, yang merupakan kondisi ideal untuk pembangkitan listrik fotovoltaik (Arief et al., 2023). Namun, iklim tropis juga menghadirkan tantangan teknis yang spesifik. Suhu ambien yang tinggi dan kelembaban dapat secara signifikan menurunkan efisiensi konversi modul fotovoltaik, karena kinerja sel surya berbanding terbalik dengan temperaturnya. Paradoks ini sumber daya surya yang melimpah namun disertai kondisi lingkungan yang dapat menurunkan efisiensi memerlukan analisis kinerja yang cermat untuk merancang sistem yang optimal (Himabindu et al., 2021).

Institusi pendidikan tinggi seperti universitas memiliki peran unik sebagai pusat inovasi, penelitian, dan agen perubahan dalam mendorong adopsi teknologi berkelanjutan. Implementasi PLTS di lingkungan kampus tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi bersih untuk memenuhi kebutuhan operasional, tetapi juga sebagai laboratorium hidup (*living laboratory*) untuk kegiatan penelitian, pendidikan, dan percontohan bagi masyarakat luas (Elshamy et al., 2023). Namun, lingkungan kampus memiliki tantangan tersendiri, terutama keterbatasan lahan yang mendorong pemanfaatan atap bangunan (*rooftop*). Berbeda dengan instalasi skala utilitas di lahan terbuka, atap-atap gedung di kampus seringkali terfragmentasi, memiliki orientasi (*azimuth*), kemiringan (*tilt*), dan tingkat bayangan (*shading*) yang sangat beragam (Meriläinen et al., 2022).

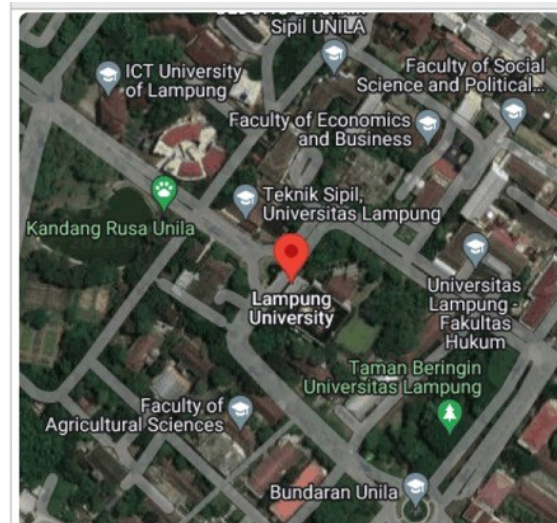
Meskipun telah banyak studi yang menganalisis kinerja PLTS di Indonesia, penelitian yang secara spesifik mengevaluasi sistem skala megawatt yang mengagregasi puluhan atap kecil dengan karakteristik yang heterogen masih terbatas (Putri et al., 2020). Studi ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan melakukan analisis mendalam terhadap studi kasus di Fakultas Teknik Universitas Lampung. Tujuan spesifik dari penelitian ini adalah menganalisis potensi produksi energi tahunan dari sistem PLTS atap terfragmentasi, mengevaluasi metrik kinerja teknis utama sistem, yaitu *Specific Yield (SY)* dan *Performance Ratio (PR)*, mengidentifikasi dan mengkuantifikasi berbagai sumber rugi-rugi energi yang mempengaruhi kinerja sistem dan menelaah implikasi dari pemanfaatan lanskap atap yang terfragmentasi untuk mencapai kapasitas pembangkitan energi yang signifikan.

2. Metodologi

2.1. Lokasi dan Data Meteorologi

Studi kasus ini berlokasi di kompleks gedung Fakultas Teknik, Universitas Lampung (Unila), yang terletak di Kota Bandar Lampung, Indonesia. Koordinat Geografis Latitude -5.36° S, Longitude 105.24° E, dan

Altitude 125 m terlihat pada gambar 1. Sebagai wilayah beriklim tropis, lokasi ini menerima iradiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun. Data potensi iradian matahari dan temperature pada table 1.



Gambar 1. Lokasi Gedung Fak. Teknik Unila

Tabel 1. Data Iradiasi Matahari dan Suhu

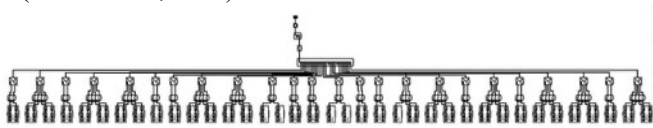
Bulan	GHI (kWh/m ² /bulan)	Suhu (°C)
Januari	153,1	26,6
Februari	146,5	26,5
Maret	161,3	26,9
April	150,5	26,9
Mei	144,2	27,4
Juni	133,1	26,6
Juli	141,9	26,6
Agustus	141,9	26,9
September	145,4	26,7
Oktober	164,4	27,4
November	147,6	26,7
Desember	155,5	26,8
Rata-Rata Per Tahun.	148,7	26,8

Berdasarkan Tabel 1 penyinaran iradiasi tertinggi terjadi pada bulan Oktober dengan nilai sebesar 5,30 kWh/m²/day dan penyinaran iradiasi terendah terjadi pada bulan Juni dengan nilai sebesar 4,44 kWh/m²/day serta nilai rata-rata iradiasi per tahun sebesar 4,89 kWh/m²/day. Suhu memiliki nilai tertinggi terjadi pada bulan Mei dan Oktober sebesar 27,4° C dan nilai terendah terjadi pada bulan Februari sebesar 26,5° C serta nilai rata-rata suhu per tahun sebesar 26,8° C. Fluktuasi GHI ini mempengaruhi profil produksi energi bulanan dari sistem PLTS (Gusmedi et al., 2025).

2.2. Spesifikasi Teknis Sistem PLTS

Sistem PLTS yang dianalisis dirancang dengan spesifikasi teknis yang komprehensif untuk memaksimalkan pemanfaatan area atap yang tersedia. Sistem ini memiliki total kapasitas terpasang sisi DC sebesar 1,40 MWp dan kapasitas

sisi AC sebesar 1,12 MWp, menghasilkan rasio DC-ke-AC sebesar 1,25. Rasio ini merupakan strategi desain umum untuk meningkatkan panen energi selama periode iradiasi rendah hingga sedang, meskipun berpotensi menyebabkan rugi-rugi pemangkasan (clipping loss) pada saat puncak iradiasi. Sistem ini menggunakan total 2.540 unit modul fotovoltaik monokristalin dari JA Solar (model JAM72530-550/MR) dengan daya nominal 550 Wp per modul (Gusmedi et al., 2025). Untuk mengoptimalkan konversi daya dari string-string panel yang memiliki kondisi operasi yang beragam, sistem ini mengadopsi strategi multi-inverter (26 Inverter) yang berbagai merek dan kapasitas, termasuk Huawei, Growatt, dan Ginlong terlihat terlihat pada Gambar 2 (Hazim et al., 2023).



Gambar 2. Topologi Jaringan Multi Inverter

Keunikan utama dari studi kasus ini terletak pada arsitektur sistemnya yang terdesentralisasi. Sistem PLTS ini tidak terpasang pada satu bidang atap tunggal yang luas, melainkan didistribusikan ke lebih dari 70 segmen atap yang berbeda di berbagai gedung di lingkungan Fakultas Teknik terlihat pada gambar 3. Kapasitas yang terpasang pada setiap segmen sangat bervariasi, mulai dari instalasi yang sangat kecil sebesar 550 W (hanya satu modul) hingga segmen yang lebih besar mencapai 85,8 kWp, detail masing-masing kapasitas PV atap terfragmentasi terlihat pada tabel 2.

Heterogenitas ini juga tercermin pada orientasi dan kemiringan atap. Segmen-segmen atap tersebut menghadap ke berbagai arah mata angin, dengan nilai azimuth yang berkisar dari 24° hingga 354°. Sebagian besar modul dipasang dengan metode flush mount, yaitu mengikuti kemiringan atap yang ada (sudut kemiringan efektif 0° terhadap atap) terlihat pada gambar 3, sebuah praktik yang umum di Indonesia untuk mengurangi beban angin dan menyederhanakan proses instalasi.

Pendekatan desain ini merepresentasikan sebuah pergeseran paradigma. Alih-alih mencari satu lokasi atap yang ideal, strategi ini memperlakukan setiap petak atap yang tersedia tidak peduli seberapa kecil atau tidak ideal orientasinya sebagai sebuah aset pembangkitan energi terdistribusi. Agregasi dari puluhan aset kecil inilah yang pada akhirnya memungkinkan pencapaian kapasitas total skala megawatt (Pan et al., 2022). Strategi ini sangat relevan dan dapat direplikasi di lingkungan perkotaan padat lainnya, seperti kompleks perkantoran, kawasan industri, atau perumahan, di mana lahan merupakan kendala utama. Dengan demikian, studi ini berfungsi sebagai model kuantitatif untuk implementasi konsep Distributed Energy Resources (DER) pada level bangunan (Pinna & Massidda, 2023).



Gambar 3. Penempatan Modul PV Fakultas Teknik

Tabel 2. Potensi PV atap FT Unila

Gedung	Modules	Power	Gedung	Modules	Power
FT A2Arsitek	63	34.7kW	FT O7	8	4.40kW
FT A3Arsitek	70	38.5kW	FT O8	8	4.40kW
FT A1	80	44.0kW	FT P1	21	11.6kW
FT B1	80	44.0kW	FT P2	15	8.25kW
FT F3	8	4.40kW	FT P3	18	9.90kW
FT F3	8	4.40kW	FT Q1	99	54.5kW
FT F4	9	4.95kW	FT Q2	63	34.7kW
FT G1	156	85.8kW	FT R1	71	39.1kW
FT G2	117	64.4kW	FT R2	50	27.5kW
FT H1	61	33.6kW	FT S1	30	16.5kW
FT H2	37	20.4kW	FT T1	36	19.8kW
FT H3	3	1.65kW	FT T2	11	6.05kW
FT H4	1	550.0W	FT I7	5	2.75kW
FT I1	63	34.7kW	FT K6	64	35.2kW
FT I2	15	8.25kW	FT K7	34	18.7kW
FT I3	108	59.4kW	FT U1	19	10.5kW
FT J1	11	6.05kW	FT U2	13	7.15kW
FT J2	15	8.25kW	FT U3	9	4.95kW
FT J3	10	5.50kW	FT M2	20	11.0kW
FT J4	74	40.7kW	FT M3	44	24.2kW
FT I2	10	5.50kW	FT L6	7	3.85kW
FT K1	90	49.5kW	FT N1	84	46.2kW
FT K2	40	22.0kW	FT N2	63	34.7kW
FT K3	9	4.95kW	FT N3	16	8.80kW
FT K4	17	9.35kW	FT O1	14	7.70kW
FT I4	12	6.60kW	FT O2	12	6.60kW
FT I6	6	3.30kW	FT O3	8	4.40kW
FT I5	5	2.75kW	FT O4	8	4.40kW
FT L1	35	19.3kW	FT O5	5	2.75kW
FT L2	24	13.2kW	FT O6	4	2.20kW
FT L3	4	2.20kW	FT O7	8	4.40kW
FT L4	8	4.40kW	FT O8	8	4.40kW
FT L5	6	3.30kW	FT P1	21	11.6kW
FT M1	76	41.8kW	FT P2	15	8.25kW
FT M2	20	11.0kW	FT P3	18	9.90kW
FT M3	44	24.2kW	FT Q1	99	54.5kW
FT L6	7	3.85kW	FT Q2	63	34.7kW
FT N1	84	46.2kW	FT R1	71	39.1kW
FT N2	63	34.7kW	FT R2	50	27.5kW
FT N3	16	8.80kW	FT S1	30	16.5kW
FT O1	14	7.70kW	FT T1	36	19.8kW
FT O2	12	6.60kW	FT T2	11	6.05kW
FT O3	8	4.40kW	FT I7	5	2.75kW
FT O4	8	4.40kW	FT K6	64	35.2kW
FT O5	5	2.75kW	FT K7	34	18.7kW
FT O6	4	2.20kW	FT U1	19	10.5kW

2.3. Sizing Berbasis Area Atap

Ini adalah pendekatan Bottom-Up yang dibatasi oleh realitas fisik ruang yang tersedia (Thanomsat & Lekngam, 2020) menggunakan persamaan (1)

$$Kapasitas(kWp) = Luas\ atap\ tersedia(m^2) \times Kepadatan\ daya\ Modul\ (Kwp/m^2) \quad (1)$$

2.4. Algoritma Menentukan Daya PV

Untuk menghitung daya keluaran PV (P_{PV}) pada satu waktu tertentu, langkah-langkah formulasinya adalah (Thanomsat & Lekngam, 2020) :

1. Dapatkan data cuaca (GHI, DNI, DHI, T_{amb} parameter lokasi (latitude, longitude), parameter modul P_{STC} , γ , T_{NOCT} dan parameter desain β Azimuth ψ
2. Tentukan sudut zenith θ_z dan azimuth matahari ψ_s berdasarkan waktu dan lokasi.
Hitung Angle of Incidence θ menggunakan β dan ψ
Hitung $G_{beam} = DNI \times \cos(\theta)$
Hitung $G_{diffuse} = DHI \times (1 + \cos(\beta))/2$
Hitung $G_{ground} = GHI \times \rho \times (1 - \cos(\beta))/2$
Jumlahkan: $G_{POA} = G_{beam} + G_{diffuse} + G_{ground}$
3. Hitung T_{cell} (Efek Temperatur) Gunakan T_{amb} dan G_{POA} (dari langkah 3) ke dalam formula NOCT:
 $T_{cell} = T_{amb} + (G_{POA}/800) \times (T_{NOCT} - 20)$ (2)
4. Hitung Daya Keluaran P_{PV} Masukkan semua nilai ke dalam persamaan utama

$$P_{PV} = P_{STC} \times \left(\frac{G_{POA}}{1000}\right) \times [1 + \gamma(T_{cell} - 25)] \quad (3)$$

Dimana:

P_{STC} adalah daya nominal modul STC (Wp).

G_{POA} adalah iradiasi efektif pada bidang kolektor (W/m^2).

γ konstanta Temperature Coefficient of Power.

Ini adalah parameter krusial yang menunjukkan seberapa sensitif daya keluaran modul terhadap perubahan suhu. Nilai ini selalu negative yaitu -0.35% atau, dalam bentuk decimal -0.0035 .

Persamaan (3) yang menjadi dasar untuk simulasi *time-series* dalam menentukan hasil energi (kWh) tahunan dari sebuah sistem PLTS.

2.5. Performance Ratio (PR)

PR adalah metrik kualitas yang mengukur efisiensi sistem secara keseluruhan, membandingkan energi aktual yang dihasilkan dengan energi ideal teoritis terlihat pada persamaan (4) (Yadav & Bajpai, 2018).

$$PR = \frac{E_{AC}}{E_{Ideal}} = \frac{E_{AC}}{A_{array} \times G_{inc, total} \times \eta_{STC}} \quad (4)$$

Atau, dalam bentuk yang lebih sederhana yang digunakan persamaan (5).

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} = \frac{(E_{out}/P_{nom,STC})}{(H_{i, total}/G_{STC})} \quad (5)$$

Dimana:

Y_f adalah Final Yield (kWh/kWp) (Produksi AC dibagi P_{nom}).

Y_r adalah Reference Yield (kWh/kWp) (Total iradiasi pada panel dibagi G_{STC}

E_{out} adalah energi AC bersih yang dihasilkan.

$P_{nom,STC}$ adalah daya nominal total array.

α_p adalah koefisien daya termal modul.

T_{cell} adalah suhu sel, dan T_{STC} adalah suhu STC ($25^\circ C$).

2.6. Solar Fraction.

Solar Fraction adalah metrik kunci untuk sistem self-consumption, menunjukkan fraksi kebutuhan energi pengguna yang dipenuhi oleh sistem PLTS persamaan (6) (Afonaa-Mensah et al., 2024).

$$SF = \frac{E_{Solar}}{E_{User}} = \frac{E_{PV \rightarrow User} + E_{Batt \rightarrow User}}{E_{User, total}} \quad (6)$$

Dimana:

E_{Solar} adalah total energi dari sumber surya yang dikonsumsi pengguna.

E_{User} adalah total konsumsi energi pengguna.

2.7. Metodologi Simulasi dan Metrik Kinerja

Analisis kinerja sistem dilakukan melalui simulasi komputasi menggunakan perangkat lunak HelioScope. Simulasi ini menggunakan data cuaca Typical Meteorological Year (TMY) yang bersumber dari Meteoronorm dengan resolusi grid 10 km, yang dianggap representatif untuk kondisi cuaca jangka panjang di lokasi studi. Untuk memastikan akurasi perhitungan, simulasi ini menerapkan model-model fisika yang telah tervalidasi, termasuk Model untuk menghitung iradiasi pada permukaan miring dan Model Suhu Difusi untuk memprediksi efek temperatur pada kinerja sel fotovoltaik (Sameera et al., 2024).

Evaluasi kinerja didasarkan pada metrik-metrik yang mengacu pada standar IEC 61724 18, yaitu Hasil Energi Tahunan E_{AC} Total energi listrik AC (dalam kWh atau GWh) yang dihasilkan oleh sistem dan dikirim ke jaringan dalam periode satu tahun. Hasil Spesifik (Specific Yield, SY) merupakan normalisasi hasil energi tahunan terhadap kapasitas terpasang DC $P_{DC,STC}$ dinyatakan dalam kWh/kWp (Ayora et al., 2023). Metrik ini sangat berguna untuk membandingkan produktivitas sistem fotovoltaik dengan kapasitas berbeda di lokasi yang berbeda.

Rasio Kinerja (*Performance Ratio, PR*) Adalah Indikator kualitas sistem secara keseluruhan, yang mengukur efektivitas sistem dalam mengubah energi

surya yang tersedia menjadi energi listrik setelah memperhitungkan semua sumber rugi-rugi (Shabani et al., 2021). PR dihitung sebagai rasio antara hasil energi aktual E_{AC} dengan hasil energi referensi E_{ref} , di mana

$$E_{ref} = H_{POA} \times A \times \eta_{modul}$$

atau lebih sederhana,

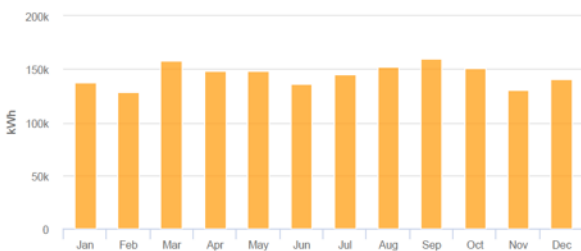
$PR = SY/Y_r$ di mana Y_r adalah reference yield. Faktor Kapasitas (Capacity Factor, CF) adalah Rasio antara output energi aktual selama periode waktu tertentu terhadap output energi potensial jika sistem beroperasi pada daya nominalnya secara terus-menerus selama periode tersebut.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Potensi Produksi Energi dan Profil Bulanan

Berdasarkan hasil simulasi, sistem PLTS atap 1,40 MWp di Fakultas Teknik Unila diproyeksikan mampu menghasilkan energi listrik sebesar 1.738 GWh per tahun. Produksi energi ini memiliki potensi untuk memberikan kontribusi yang signifikan dalam memenuhi kebutuhan listrik kampus dan mengurangi jejak karbonnya.

Gambar 4 menyajikan data proyeksi hasil energi listrik bulanan yang dihasilkan oleh sistem fotovoltaik (PV) atap yang disimulasikan untuk studi kasus di Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Fluktuasi produksi energi sepanjang tahun, yang secara inheren dipengaruhi oleh variabilitas faktor meteorologi di lokasi studi, terutama iradiasi matahari bulanan dan kondisi cuaca (seperti tutupan awan dan curah hujan). Kinerja sistem mencapai puncaknya pada bulan September, dengan estimasi produksi energi mencapai nilai tertinggi sekitar 159.000 kWh. Sebaliknya, hasil energi terendah diproyeksikan terjadi pada bulan Februari (sekitar 128.000 kWh) dan November (sekitar 129.000 kWh).



Gambar 4. Proyeksi Produksi Energi Bulanan Sistem PLTS 1,40 MWp

3.2. Evaluasi Kinerja Sistem Fotovoltaik

Untuk mengevaluasi efektivitas dan kualitas sistem secara keseluruhan, metrik kinerja utama dianalisis dan disajikan pada Tabel 3. Sistem ini mencapai nilai *Specific Yield (SY)* sebesar 1.244,2 kWh/kWp. Nilai ini menunjukkan tingkat produktivitas energi yang sangat tinggi, yang merupakan karakteristik dari instalasi PLTS

di lokasi tropis dengan sumber daya surya yang melimpah. Sementara itu, Performance Ratio (PR) sistem tercatat sebesar 79,1%, yang mengindikasikan bahwa sistem beroperasi dengan efisiensi keseluruhan yang baik dan berada dalam rentang yang diharapkan untuk sistem yang dirancang secara profesional.

Tabel 3. Metrik Kinerja Tahunan

Metrik Kinerja	Nilai
Produksi Energi Tahunan	1,738 GWh
Specific Yield (SY)	1.244,2 kWh/kWp
Performance Ratio (PR)	79,1%

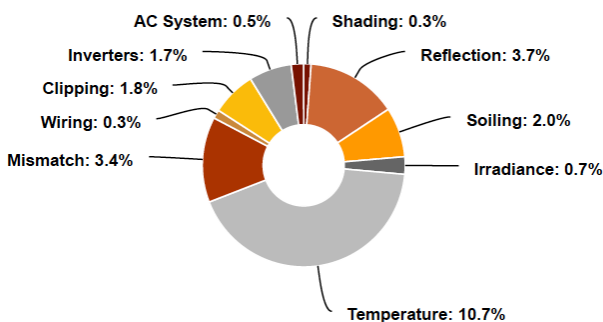
Fakta bahwa kinerja yang solid ini dicapai pada sistem yang sangat terfragmentasi merupakan temuan penting. Hal ini menunjukkan bahwa kompleksitas desain yang timbul dari arsitektur multi-atap dan multi-orientasi tidak secara signifikan menurunkan kualitas dan efisiensi sistem secara keseluruhan jika dibandingkan dengan instalasi yang lebih homogen. Temuan ini membantah anggapan bahwa pemanfaatan atap yang tidak ideal akan menghasilkan kinerja yang buruk. Sebaliknya, ini membuktikan bahwa teknologi modern, seperti perangkat lunak desain yang canggih dan inverter dengan pelacak titik daya maksimum ganda (multi-MPPT), telah berhasil mengatasi tantangan-tantangan tersebut.

3.2. Analisis Faktor rugi-rugi Sistem (System Loss Factor Analysis)

Analisis mendalam terhadap sumber-sumber rugi-rugi energi memberikan gambaran yang jelas mengenai faktor-faktor yang membatasi kinerja sistem. Rincian faktor rugi-rugi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rincian Faktor rugi-rugi Energi Sistem

Faktor	Persentase (%)
Temperatur	10,7
Ketidaksesuaian (Mismatch)	3,4
Pengotoran (Soiling)	2,0
Pemangkasan (Clipping)	1,8
Inverter	1,7
Iradiasi	0,7
Sistem AC	0,5
Bayangan (Shading)	0,3
Pengkabelan (Wiring)	0,3
Refleksi	3,7



Gambar 5 . Rugi-rugi Sistem PLTS

Rugi-rugi terbesar bersumber dari temperatur (10,7%). Hal ini mengkonfirmasi bahwa degradasi kinerja akibat suhu tinggi adalah tantangan utama bagi teknologi fotovoltaik di iklim tropis, sejalan dengan temuan studi lain di Indonesia. Simulasi menunjukkan suhu sel operasi rata-rata mencapai 43,1°C, jauh di atas Suhu Uji Standar (STC) sebesar 25°C yang menjadi acuan daya nominal modul.

Sumber rugi-rugi signifikan kedua adalah ketidaksesuaian (mismatch) sebesar 3,4%. Rugi-rugi ini merupakan konsekuensi langsung dari arsitektur sistem yang terfragmentasi. Modul-modul yang terpasang pada atap dengan orientasi dan kemiringan yang berbeda akan menerima tingkat iradiasi yang berbeda pada waktu yang sama. Hal ini menyebabkan ketidaksesuaian arus dan tegangan dalam satu string atau antar string yang terhubung ke MPPT yang sama, sehingga menurunkan output daya total.

Rugi-rugi akibat pemangkasan (clipping) sebesar 1,8% adalah hasil yang dapat diprediksi dari strategi desain yang menggunakan rasio DC/AC sebesar 1,25. Pada saat iradiasi matahari mencapai puncaknya, daya DC yang dihasilkan oleh modul dapat melebihi kapasitas daya AC maksimum inverter. Akibatnya, kelebihan energi tersebut tidak dapat dikonversi dan dipangkas.

Distribusi rugi-rugi ini mencerminkan karakteristik unik dari sistem dan lingkungannya. Rugi-rugi temperatur yang tinggi adalah karakteristik dari iklim tropis (Ayora et al., 2023). Rugi-rugi mismatch yang relatif tinggi adalah khas dari desain multi-atap yang terfragmentasi. Sementara itu, rugi-rugi clipping adalah indikasi dari strategi inverter oversizing. Analisis ini menunjukkan bahwa para perancang sistem telah membuat trade-off yang diperhitungkan dengan mereka menerima rugi-rugi mismatch dan clipping yang lebih tinggi sebagai konsekuensi dari upaya memaksimalkan pemanfaatan seluruh area atap yang tersedia untuk mencapai hasil energi tahunan yang optimal. Hal ini mencerminkan pendekatan desain yang matang dan teroptimasi, bukan sekadar instalasi panel surya dibuat

secara spontan, tanpa perencanaan yang matang, dan hanya untuk memenuhi kebutuhan sesaat.

3.3. Analisis Dampak Lingkungan

Pada bagian ini, analisis difokuskan pada kuantifikasi keluaran energi bersih (net energy output) dari sistem PLTS yang disimulasikan, yang menjadi dasar untuk seluruh perhitungan dampak lingkungan. Berdasarkan data simulasi yang disajikan pada tabel 4, nilai Energy to Grid adalah 1.738.091,3 kWh per tahun. Angka ini merupakan metrik paling kritis karena merepresentasikan jumlah energi listrik aktual yang diekspor ke jaringan setelah memperhitungkan seluruh faktor rugi-rugi (losses) dalam sistem.

Analisis dampak lingkungan, di mana kontribusi positif sistem PLTS dikuantifikasi secara matematis. Emisi Terhindar (Avoided Emissions) dihitung dengan mengalikan total energi bersih tahunan yang diekspor ke jaringan E_{PV} dengan Faktor Emisi Jaringan (Filote et al., 2023).

Data Perhitungan Energi Bersih Tahunan E_{PV} sebesar 1.738.091,3 kWh/tahun. Faktor Emisi Jaringan interkoneksi grid PLN sumbagsel sebesar 734 gram CO_2 /kWh atau 0,734 kg CO_2 . Perhitungan Emisi tereduksi menggunakan persamaan (7).

$$\begin{aligned}
 Emisi_{Terhindar} & (\text{ton } CO_{2eq}/\text{tahun}) \\
 & = E_{PV} \text{ (kWh/tahun)} \\
 & \times \text{Faktor Emisi (ton } CO_{2eq}/\text{kWh)}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 Emisi_{Terhindar} & = 1.738.091,3 \text{ kWh/tahun} \\
 & \times 0,000734 \text{ ton } CO_{2eq}/\text{kWh} \\
 Emisi_{Terhindar} & = 1.275,66 \text{ ton } CO_{2eq}/\text{tahun}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, sistem PLTS yang disimulasikan memiliki potensi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 1.275,66 ton CO_2 ekuivalen per tahun. Angka ini merepresentasikan jumlah emisi yang berhasil dihindari dari pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang sebaliknya harus memproduksi energi sebesar 1.738 MWh untuk memenuhi permintaan jaringan. Untuk mengkontekstualisasikan dampak lingkungan ini, potensi mitigasi emisi tersebut setara dengan kapasitas serapan karbon tahunan dari Ruang Terbuka Hijau (RTH) perkotaan seluas 22 hektar di Bandar Lampung (Hesty et al., 2019).

4. Kesimpulan

Sistem PLTS atap berkapasitas 1,40 MWp di Fakultas Teknik Universitas Lampung memiliki potensi produksi energi tahunan yang sangat besar, mencapai 1,738 GWh/tahun. Jumlah ini cukup untuk memberikan kontribusi signifikan terhadap pemenuhan kebutuhan

energi di lingkungan kampus. Meskipun dirancang di atas lanskap atap yang sangat terfragmentasi dengan berbagai orientasi dan ukuran, sistem ini menunjukkan kinerja teknis yang solid. Nilai Specific Yield sebesar 1.244,2 kWh/kWp dan Performance Ratio sebesar 79,1% menunjukkan bahwa sistem ini sangat produktif dan efisien, serta kompetitif jika dibandingkan dengan sistem PLTS atap lain di Indonesia. Analisis rugi-rugi sistem mengkonfirmasi bahwa degradasi kinerja akibat temperatur tinggi (10,7%) adalah tantangan utama di iklim tropis. Namun, besarnya sumber daya surya yang tersedia lebih dari cukup untuk mengkompensasi rugi-rugi ini, sehingga menghasilkan produktivitas energi yang tinggi secara keseluruhan. Rugi-rugi mismatch (3,4%) yang cukup signifikan merupakan cerminan langsung dari kompleksitas desain multi-atap.

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Lampung yang telah memberikan fasilitas sehingga penelitian ini dapat terselesaikan.

Daftar Pustaka

- Afona-Mensah, S., Odoi-Yorke, F., & Babatunde Majeed, I. (2024). Evaluating the impact of industrial loads on the performance of solar PV/diesel hybrid renewable energy systems for rural electrification in Ghana. *Energy Conversion and Management: X*, 21(October 2024), 100525. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100525>
- Arief, Y. Z., Wilyanti, S., & Al-Hakim, R. R. (2023). Desain Plts Atap Spklu Di Pln Unit Induk Distribusi Jakarta Raya Design of a Solar Rooftop for Pevcs At Pln Distribution Main Unit in Greater Jakarta. *Jelc*, 9(1).
- Ayora, E., Munji, M., Kabere, K., & Thomas, B. (2023). Performance analysis of 600 kWp grid-tied rooftop solar photovoltaic systems at strathmore university in Kenya. *Results in Engineering*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101302>
- Elshamy, A. I., Hussein, A. A., Elbadry, S., Elshazly, E., Moussa, R. R., & El-Mahallawi, I. S. (2023). Techno-economic Evaluation and Environmental Benefit of PV-based Electric Vehicle Charging Station on University Campus. *2023 2nd International Conference on Smart Cities 4.0, Smart Cities 4.0 2023*, 49–54. <https://doi.org/10.1109/SmartCities4.056956.2023.10525983>
- Filote, C., Felseghi, R. A., Raboaca, M. S., Aşchilean, I., Sun, B., Filote, C., Felseghi, R. A., Raboaca, M. S., Aşchilean, I., Dharmawan, I. P., Kumara, I. N. S., Budiastira, I. N., Liu, G., Xue, Y., Chinthavali, M. S., Tomsovic, K., Prem, P., Sivaraman, P., Sakthi Suriya Raj, J. S., ... Fu, R. (2023). Environmental impact assessment of green energy systems for power supply of electric vehicle charging station. *Renewable Energy*, 44(13), 10471–10494. <https://doi.org/10.1002/er.5678>
- Gusmedi, H., Putra, R. P., Samosir, A. S., Lampung, U., & Lampung, K. B. (2025). *Desain Pembangkit Listrik*. 13(1).
- Hazim, H. I., Baharin, K. A., Gan, C. K., Sabry, A. H., & Humaidi, A. J. (2023). Review on Optimization Techniques of PV/Inverter Ratio for Grid-Tie PV Systems. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/app13053155>
- Hesty, R. S., Gunawan, A., Prasetyo, L. B., Munandar, A., Kehutanan, F., & Bogor, I. P. (2019). *Perbandingan Berbagai Teknik Estimasi Kebutuhan Ruang Terbuka Hijau di Kota Bandar Lampung Comparison of Various Techniques for Estimating Green Open Space in Bandar Lampung City*. 59–70.
- Himabindu, N., Hampannavar, S., Deepa, B., & Swapna, M. (2021). Analysis of microgrid integrated Photovoltaic (PV) Powered Electric Vehicle Charging Stations (EVCS) under different solar irradiation conditions in India: A way towards sustainable development and growth. *Energy Reports*, 7, 8534–8547. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.10.103>
- Meriläinen, A., Puranen, P., Kosonen, A., & Ahola, J. (2022). Optimization of rooftop photovoltaic installations to maximize revenue in Finland based on customer class load profiles and simulated generation. *Solar Energy*, 240(November 2021), 422–434. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.057>
- Pan, D., Bai, Y., Chang, M., Wang, X., & Wang, W. (2022). The technical and economic potential of urban rooftop photovoltaic systems for power generation in Guangzhou, China. *Energy and Buildings*, 277, 112591. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112591>
- Pinna, A., & Massidda, L. (2023). A Complete and High-Resolution Estimate of Sardinia's Rooftop Photovoltaic Potential. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/app13010007>
- PT. Perusahaan Listrik Negara. (2019). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2019–2028. *PT. Perusahaan Listrik Negara*, 2019–2028.
- Putri, D. N. N., Syatriawan, A., Rizanulhaq, F., & ... (2020). Techno-economic of photovoltaic rooftop in indonesia for commercial and residential customer. ... *and Design (ICCED)*. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9415847/>
- Sameera, Tariq, M., & Rihan, M. (2024). Analysis of the impact of irradiance, temperature and tilt angle on the performance of grid-connected solar power plant. *Measurement: Energy*, 2(December 2023), 100007. <https://doi.org/10.1016/j.meae.2024.100007>
- Shabani, M., Dahlquist, E., Wallin, F., & Yan, J. (2021). Techno-economic impacts of battery performance models and control strategies on optimal design of a grid-connected PV system. *Energy Conversion and Management*, 245(June), 114617. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114617>
- Suparwoko, & Qamar, F. A. (2022). Techno-economic analysis of rooftop solar power plant implementation and policy on mosques: an Indonesian case study. *Dental Science Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08968-6>
- Thanomsat, N., & Lekngam, S. (2020). Impact of Different Roof Types on Produced Power of Photovoltaic

Rooftop System. *Proceedings of the 2020 International Conference on Power, Energy and Innovations, ICPEI 2020*, 233–236. <https://doi.org/10.1109/ICPEI49860.2020.9431563>

Yadav, S. K., & Bajpai, U. (2018). Performance evaluation of a rooftop solar photovoltaic power plant in Northern India. *Energy for Sustainable Development*, 43, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.01.006>