



Evaluasi Kinerja PLTS Atap Berdasarkan *Capacity Utilization Factor* (CUF) di Area Komersial

Ahmad Sahefi^{1*}, Dhami Johar Damiri²

¹⁻²Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: ahmadsahefi@gmail.com¹, dhami@itpln.ac.id²

*Penulis Korespondensi: ahmadsahefi@gmail.com

Abstract. This study analyzes the performance of a 59.94 kWp rooftop solar power plant consisting of 162 monocrystalline modules rated at 370 Wp each. The system uses two inverters: Inverter 1 serves 81 west-facing modules, while Inverter 2 serves 81 east-facing modules. The analysis combines t-tests, z-tests, and ANOVA applied to production data from August 2021 to October 2024, simulations using PVsyst 7.2 and HelioScope, and techno-economic and environmental assessments. During 2021–2022, no significant performance difference was found between the two inverters, with average daily production of 97.65 kWh for Inverter 1 and 97.15 kWh for Inverter 2. However, during 2023–2024, Inverter 1 experienced a significant decline, averaging 65.54 kWh/day compared with 87.21 kWh/day for Inverter 2. This decline was also reflected in Inverter 1's consecutive daily Capacity Utilization Factor values of 13.71%, 12.20%, 9.92%, and 9.11%. After corrective action in December 2024, Inverter 1 returned to optimal performance and became comparable with Inverter 2. The repair increased the solar power contribution to the load from 32.75% to 38.17% and reduced dependence on the PLN grid to 61.83%. Post-repair, 95.31% of generated energy was absorbed by the consumer load, while 4.69% was exported to the grid. Environmentally, the repair reduced CO₂ emissions by an amount equivalent to 31,457.46 tons of lignite coal. Economically, the system has a 25-year payback period, an NPV of IDR 10,727,123, and an LCOE of IDR 791.59/kWh.

Keywords: Capacity Utilization Factor; Environmental Impact; Performance Analysis; Rooftop Solar Power Plant; Techno-Economic Analysis.

Abstrak. Penelitian ini menganalisis kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap berkapasitas 59,94 kWp yang terdiri dari 162 unit modul surya *Monocrystalline* 370 Wp. Sistem ini dibagi menjadi dua inverter, yaitu Inverter 1 (81 modul menghadap barat) dan Inverter 2 (81 modul menghadap timur). Metode analisis yang digunakan meliputi uji statistik (t-Test, z-Test, dan ANOVA) terhadap data produksi aktual periode Agustus 2021–Oktober 2024, simulasi menggunakan PVsyst 7.2 dan Helioscope, serta analisis tekno-ekonomi dan lingkungan. Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa pada periode 2021–2022 tidak terdapat perbedaan kinerja yang signifikan antara kedua inverter meskipun berbeda arah hadap modul suryanya, dengan rata-rata produksi harian masing-masing sebesar 97,65 kWh (Inverter 1) dan 97,15 kWh (Inverter 2). Namun, pada periode 2023–2024 terjadi penurunan kapasitas produksi yang signifikan pada Inverter 1 dengan rata-rata 65,54 kWh/hari dibandingkan Inverter 2 yang mencapai 87,21 kWh/hari. Hal ini diperkuat oleh penurunan *Capacity Utilization Factor* (CUF) harian pada Inverter 1 secara berturut-turut (13,71%; 12,2%; 9,92%; 9,11%). Setelah dilakukan tindakan perbaikan pada Desember 2024, kinerja Inverter 1 kembali optimal dan setara dengan Inverter 2. Perbaikan ini meningkatkan total kontribusi suplai PLTS ke beban dari 32,75% menjadi 38,17%, sekaligus menurunkan ketergantungan pada PLN menjadi 61,83%. Pasca-perbaikan, penyerapan energi ke beban adalah 95,31% dan sisa 4,69% dikirim ke *grid* PLN. Dari aspek lingkungan, perbaikan ini berkontribusi mereduksi emisi CO₂ setara hingga 31.457,46 Ton *Lignite Coal*. Secara ekonomi, sistem ini menghasilkan *Payback Period* selama 25 tahun, nilai *Net Present Value* (NPV) sebesar Rp 10.727.123,-, dan *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) sebesar Rp 791,59/kWh.

Kata kunci: Analisis Kinerja; Dampak Lingkungan; PLTS Atap; Tekno-Ekonomi; Utilization Factor.

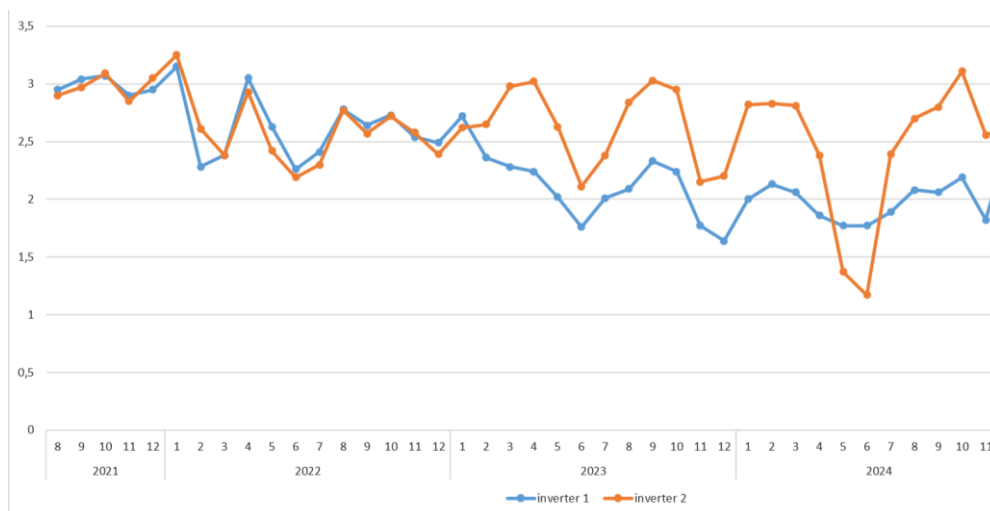
1. LATAR BELAKANG

Berdasarkan Rencana Umum Energi Daerah Banten 2022–2050 (Pemerintah Provinsi Banten, 2022), bauran energi primer tahun 2021 di Banten didominasi oleh energi fosil yang menghasilkan emisi karbon dimana pemakaian Batu bara 50,1%, Gas Bumi 19,00%, Minyak 24,9% dan sedangkan Energi Baru Terbarukan (EBT) yang ramah lingkungan baru mencapai 5,9%. Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap di Provinsi Banten

memiliki potensi besar untuk memenuhi kebutuhan energi sekaligus mendukung upaya transisi energi terbarukan di Indonesia. Banten, dengan kondisi geografis yang menerima paparan sinar matahari sepanjang tahun, menyediakan kondisi ideal bagi pemanfaatan energi surya.

Di era transisi energi saat ini, pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap menjadi salah satu pilar utama bagi sektor industri dan komersial untuk mencapai target *net-zero emission* sekaligus efisiensi biaya operasional. *Marketing Office* sebagai pusat representasi bisnis dan pelayanan konsumen, idealnya menjadi contoh terdepan (*role model*) dalam penerapan teknologi hijau ini. Pemasangan PLTS Atap di area ini diharapkan mampu menyuplai kebutuhan listrik harian secara mandiri dan berkelanjutan. Namun dalam operasionalnya, sistem PLTS Atap sering kali menghadapi tantangan teknis berupa degradasi atau penurunan kapasitas produksi listrik. Faktor-faktor seperti penuaan komponen (*ageing*), efisiensi inverter, akumulasi debu (*soiling*), hingga kondisi cuaca/iklim mikro di sekitar bangunan menjadi penyebab utama penurunan performa ini. Dalam penelitian ini ada beberapa kendala yang diangkat berdasarkan masalah – masalah yang terjadi pada PLTS atap ini

- Pemasangan PLTS Atap sejak 2021, namun belum ada kajian mengenai seberapa optimal PLTS Atap ini terpasang
- Adanya penurunan kapasitas produksi PLTS Atap yang terpasang, dimana PLTS atap yang terpasang terbagi menjadi 2 inverter dengan pembagian modul surya dengan jumlah dan kapasitas yang sama, hasil produksi 2021 hingga 2024 bisa dilihat dalam grafik di bawah:



Gambar 1. Grafik Hasil Produksi 2021 hingga 2024.

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa pada periode tahun 2021 -2022 produksi antara Inverter 1 dan 2 tidak ada perbedaan yang signifikan hasil produksinya, namun sejak bulan 2 (Februari) 2023 mulai mengalami perbedaan yang cukup signifikan dimana inverter 1 mulai

mengalami penurunan kapasitas produksi energi listrik, sedangkan penurunan produksi pada inverter 2 mengalami penurunan drastis juga di bulan Mei–Juni 2024. Sehingga perlu dilakukan kajian pada PLTS Atap yang terpasang ini untuk dianalisa penyebab penurunan dan perbaikan yang perlu dilakukan untuk mengoptimalkan kapasitas produksi dari Inverter 1 dan 2.

Di sisi lain, integrasi PLTS Atap dengan jaringan *grid* PLN melibatkan mekanisme ekspor-impor daya. Kinerja eksim ini sangat bergantung pada keseimbangan antara dinamika beban listrik internal *Marketing Office* (yang cenderung berfluktuasi tinggi pada jam kerja) dan kapasitas produksi aktual dari PLTS. Ketika kapasitas PLTS menurun, neraca ekspor-impor energi akan terganggu, yang pada akhirnya berdampak langsung pada nilai keekonomian operasional dan efisiensi investasi (*Return on Investment*). Sehingga peneliti melakukan kajian terhadap kinerja pada PLTS atap 59,9 kWp yang berada di area komersial *Marketing Office* Suvana Sutra di Tangerang, Banten.

2. KAJIAN TEORITIS

PLTS Atap

Berdasarkan SNI 8395:2017, PLTS dengan PV adalah sistem pembangkit listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaik. Sistem fotovoltaik mengubah radiasi sinar matahari menjadi listrik. Semakin tinggi intensitas radiasi (iradiasi) matahari yang mengenai sel fotovoltaik, semakin tinggi daya listrik yang dihasilkannya. Teknologi PLTS yang umum di Indonesia terdapat tiga jenis PLTS yang sering ditemui, yaitu PLTS off-grid, PLTS on-grid, serta PLTS Hybrid dengan teknologi lainnya; yang dibedakan berdasarkan karakteristik penyimpanan dayanya.

Berdasarkan Peraturan Menteri ESDM nomor 26 Tahun 2021 (Mineral et al., 2021), Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang selanjutnya disebut Sistem PLTS Atap adalah proses pembangkitan tenaga listrik menggunakan modul fotovoltaik yang dipasang dan diletakkan pada atap, dinding, atau bagian lain dari bangunan milik peianggan PLTS atap serta menyalurkan energi listrik melalui sistem sambungan listrik peianggan PLTS atap. Pelanggan PLTS Atap adalah setiap orang atau badan yang memasang Sistem PLTS Atap yang terhubung pada sistem tenaga listrik pemegang izin usaha penyediaan tenaga listrik untuk kepentingan umum.



Gambar 2. Diagram PLTS Atap.

Dalam pemanfaatan ada beberapa komponen penting PLTS atap yaitu modul surya, inverter. Kualitas sebuah modul surya, antara lain dinilai berdasarkan efisiensinya untuk mengkonversi radiasi sinar matahari menjadi listrik DC. Efisiensi modul surya, antara lain bergantung pada material sel fotovoltaik dan proses produksinya. Secara umum, sel fotovoltaik terbuat dari material jenis crystalline dan non-crystalline (film tipis). Untuk jenis crystalline, terbagi atas tipe mono-crystalline dan tipe poly-christalline, dengan efisiensi konversi sekitar 12 – 20%. Berikut perbandingan antara poly-crystalline dan mono-crystalline.

Analisa Parameter Kinerja CUF (Capacity Utilization Factor) PLTS berdasarkan Standar IEC 61724

Salah satu standar internasional yang berfokus pada pemantauan kinerja sistem fotovoltaik (PV) atau sistem tenaga surya yaitu IEC 61724. Standar ini memberikan pedoman teknis untuk mengukur, mencatat, dan menganalisis data operasional sistem PV, dengan tujuan meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem tersebut. Berikut adalah beberapa parameter unjuk kerja PLTS dipresentasikan ke dalam formula sebagai berikut (International Electrotechnical Commission, 2021) (7) (Assiddiq., 2012).

Yield Factor (Y_F) adalah parameter yang mengukur energi listrik yang dihasilkan oleh sistem PV dibandingkan kapasitas nominalnya selama periode tertentu. Y_F bisa ditetapkan dalam periode tahunan, bulan, atau harian dari produksi energi AC dibagi dengan daya puncak dari PV array pabrikan sesuai kondisi pengujian standar (STC) pada iradiasi surya 1000W/m^2 dengan temperatur sel 25°C .

$$Y_F = \frac{E_{pv}}{P_o} (kWh_{AC}/kWh_{DC}) \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

P_o = daya puncak (kWp DC)

E_{pv} = energi ke jaringan (kWh AC)

Hasil acuan atau *reference yield* (Y_R) adalah jumlah energi matahari yang tersedia (iradiasi) pada bidang modul PV, dinyatakan dalam jam per hari atau per periode tertentu. total dari insulasi matahari pada suatu bidang (HT) dalam satuan kWh/m² dibagi dengan iradiasi array acuan (1 kW/m²), oleh karena itu Y_R adalah jumlah dari *peak sun – hours*.

$$Y_R = \frac{H_T}{G_{STC}} \text{ (kWh/m}^2\text{/kWp) (2.2)}$$

Dimana:

H_T = iradiasi pada bidang array (kWh/m²)

G_{STC} = iradiasi referensi STC (1kW/m²)

Performance Ratio (PR) adalah parameter utama untuk mengevaluasi efisiensi keseluruhan sistem PV, dengan memperhitungkan kerugian sistem seperti suhu, efisiensi inverter, dan lainnya. PR biasanya dinyatakan dalam persentase, yang menunjukkan rugi total sistem saat mengkonversi dari DC menjadi keluaran AC (Stackhouse et al., 2018).

$$P_R = \frac{Y_F}{Y_R} \text{ (2.3)}$$

Performance Ratio yang baik berada dalam kisaran antara 75% hingga 85%. Hal ini menunjukkan bahwa dari total energi yang bisa dihasilkan oleh pembangkit, sekitar 75% hingga 85% dapat diubah menjadi energi listrik yang siap digunakan. Rasio ini memberikan gambaran tentang keoptimalan operasional PLTS, di mana semakin tinggi nilai rasio, semakin optimal pembangkit tersebut dalam mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik (Muñoz-Rodríguez et al., 2023).

Capacity Utilization Factor (CUF) adalah rasio antara energi listrik yang dihasilkan oleh sistem PV selama periode tertentu dibandingkan dengan kapasitas maksimal yang dapat dihasilkan jika sistem beroperasi pada daya penuh sepanjang waktu (24 jam setiap hari selama setahun) biasanya dinyatakan dalam.

$$CUF = \frac{Y_F}{24 \times 365} \text{ (2.4)}$$

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja PLTS

PLTS dalam memproduksi energi listriknya dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain sebagai berikut. Pertama, adalah iradiasi, pada saat iradiasi menurun, arus yang dihasilkan modul surya akan menurun secara proporsional, sedangkan penurunan tegangan tanpa beban relative lebih kecil dibandingkan dengan penurunan arus listriknya. Kedua, ketika suhu modul meningkat, arus yang dihasilkan mengalami kenaikan sangat sedikit atau dapat dikatakan praktis tidak berubah, sedangkan tegangan menurun. Ketiga adalah shading, pada saat

bayangan menutupi modul, hubungan P-N pada sel surya berhenti menghasilkan energi dan menjadi beban pasif. Keempat, iklimasi dan orientasi pada modul surya, jika sudut kemiringan ideal atau optimum maka keluaran daya dari modul akan optimum, sehingga tilt angle pada modul berpengaruh terhadap produksi energi PLTS (Owusu et al., 2016). Kelima yakni soiling, losses daya karena soiling pada modul PV dapat dikurangi dengan pembersihan rutin (Fikri et al., 2024).

Penurunan Emisi

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) bisa dijadikan pilihan untuk mengurangi efek gas rumah kaca karena tidak menghasilkan emisi karbon. Perhitungan penurunan emisi dilakukan dengan menghitung jumlah CO₂ yang tidak dilepaskan saat menggunakan pengganti pembangkit berbahan bakar fosil.

$$CO_2 \text{ Emmission} = \text{Energy (kWh)} \times EF \text{ (kg/kWh)} \dots \dots \dots (2.5)$$

keterangan :

EF : Emission Factor

Energy : adalah energi yang dihasilkan PLTS

Faktor emisi (EF) yang dipakai untuk tipe bahan bakar adalah batubara jenis *lignite* dan *sub-bituminous* karena jenis batubara tersebut adalah batubara yang sering digunakan pada PLTU. Faktor emisi batubara jenis *lignite* yaitu 1,01 kgCO₂/kWh dan batubara jenis *sub-bituminous* yaitu 0,96 kgCO₂/kWh.

Analisis Keekonomian

Analisis ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) melibatkan tiga metode utama yaitu periode pengembalian modal (payback period), nilai bersih kini (Net Present Value), dan biaya listrik terbarukan (Levelized Cost of Electricity) (Assiddiq, H., 2012).

Payback period merupakan jangka waktu yang diperlukan untuk mengganti seluruh investasi yang telah dikeluarkan dari hasil yang diperoleh dari sistem. *Payback period* pada umumnya mempertimbangkan faktor *operational expenditure*, yang umumnya melibatkan perawatan PLTS dan penggantian komponen PLTS jika terjadi kerusakan. Nilai kas didapat dari produksi tahunan dikalikan dengan tarif dasar listrik yang hasilnya dikurangi dengan *operational expenditure*.

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Initial Investment (Rp)}}{\text{Cash in flows (Rp)}} \dots \dots \dots (2.6)$$

Net Present Value (NPV) adalah nilai proyek yang dihasilkan dengan membandingkan selisih antara nilai cashflow yang diperoleh dan investasi yang dikeluarkan. Sistem dapat

dikatakan layak jika nilai NPV lebih dari 0, jika nilai NPV kurang dari 0, sistem tersebut dianggap tidak layak (Jumpon et al., 2024).

$$NPV = \sum \frac{Ci}{(1+r)^i} - \text{initial investment} \dots \dots \dots (2.7)$$

keterangan:

Ci : alur kas period ke-n;

r : *interest rate*;

i : tahun.

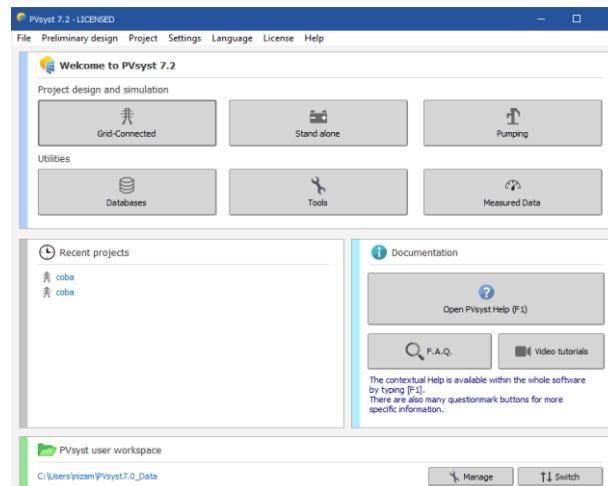
Levelized Cost of Electricity (LCOE) mengestimasi keseluruhan biaya yang digunakan selama masa operasional pembangkit listrik tenaga surya dan membaginya dengan total pendapatan energi yang dihasilkan selama masa pakai pembangkit listrik tersebut. LCOE memiliki beberapa parameter yang berhubungan secara langsung dengan hasilnya.

$$LCOE = \frac{\text{Annual Cost (Rp)}}{\text{Average Output (kWh)}} \dots \dots \dots (2.8)$$

Simulasi Perangkat Lunak PLTS

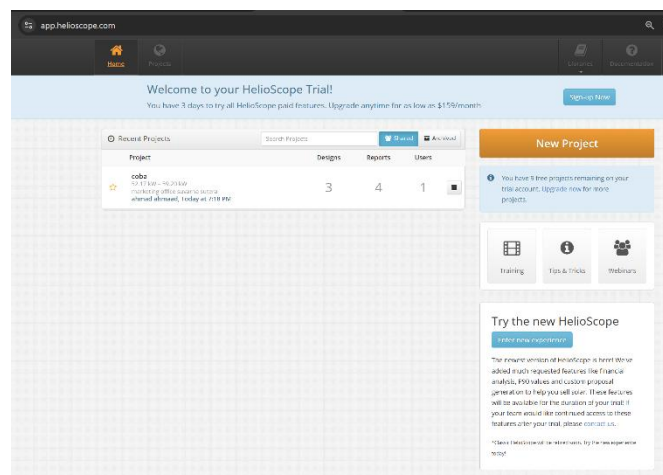
Kinerja pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) juga tidak hanya bisa dilakukan melalui pengukuran di kondisi nyata, tetapi juga bisa menggunakan simulasi perangkat lunak (Mineral et al., 2021). Salah satu perangkat lunak yang bisa digunakan untuk meramalkan energi pembangkit listrik tenaga surya adalah PVsyst. PVsyst memungkinkan pengguna untuk melakukan estimasi produksi energi berdasarkan kondisi cuaca dan iklim. Selain faktor eksternal terdapat juga shading, wiring, efisiensi komponen, mismatch dari panel surya, dan losses lain yang dapat mempengaruhi sistem (Wibowo, F, F., 2019).

PVsyst adalah perangkat lunak khusus untuk simulasi dan desain sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) (Panjaitan et al., 2023). Dikembangkan oleh André Mermoud di Swiss, PVsyst digunakan secara luas oleh profesional di bidang energi terbarukan, termasuk insinyur, konsultan, dan perencana proyek PV, untuk memodelkan performa sistem PV dan mengevaluasi kelayakan teknis maupun ekonominya. PVsyst membantu memprediksi produksi energi listrik sistem PV berdasarkan parameter teknis, kondisi geografis, dan data cuaca (Mukromin et al., 2020).



Gambar 3. Tampilan Awal Perangkat Lunak PVsyst 7.2

Selain PVSyst, terdapat perangkat lunak HelioScope yaitu perangkat lunak untuk menganalisa PLTS berbasis web, sehingga penggunaanya dilakukan melalui web browser dan mengharuskan terhubung dengan internet. Kelebihan dari perangkat lunak ini adalah cukup ringan karena berbasis web, praktis dalam menentukan data potensi energi matahari, tersedia berbagai data PV dan inverter (Febriana et al., 2024).



Gambar 4. Tampilan Awal Web Helioscop

3. METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Lokasi yang dipilih merupakan lokasi pemasangan PLTS, dalam penelitian ini terdapat dua lokasi penelitian yang keduanya merupakan kantor marketing. Berikut adalah lokasi penelitian yang berada di daerah tangerang, banten :

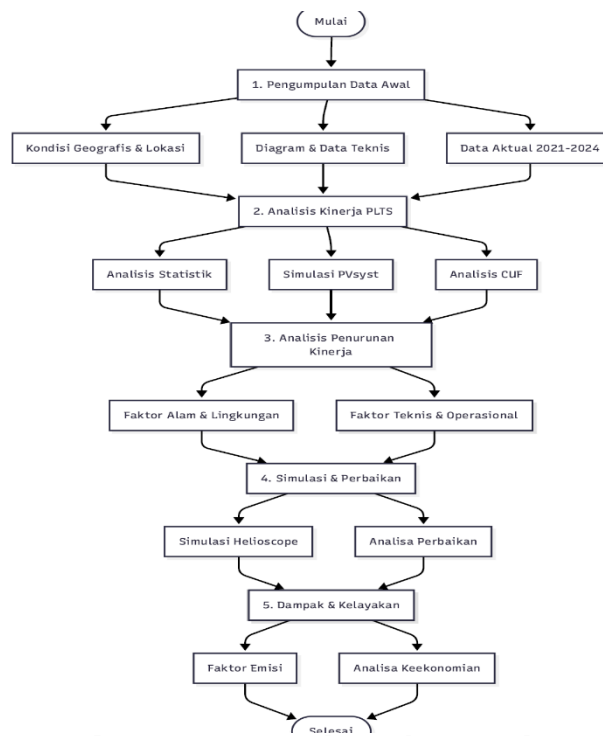
Koordinat : -6.1996752,106.5175546

Kapasitas total modul surya : 59.940 Wp

Kapasitas inverter	: 2 x 25.000 watt
Tipe modul surya	: Monocrystalline 370Wp
Sistem	: Ongrid+kWH Exim
Mulai Operasi	: 12 Juli 2021
Daya kWH Listrik	: 82.500 kVA

Desain Penelitian

Berikut adalah diagram alur dalam penelitian ini untuk mengevaluasi kinerja PLTS yaitu sebagai berikut:



Gambar 5. Diagram Alur Dalam Penelitian

Metode Pengumpulan Data

Berikut adalah beberapa software yang digunakan untuk pengumpulan data

Tabel 1. Peralatan yang digunakan

No	Alat yang digunakan	Data
1	HelioScope (Web)	Simulasi PLTS
2	PVSyst 7.2	Simulasi PLTS
3	Solis Cloud Monitoring	Data Produksi PLTS
4	Microsoft Excel	Data Analisis
5	Nasa Power (Web)	Data Intensitas Matahari

- Data hasil energi PLTS aktual dapat diunduh melalui *web based* Solis yang sudah terpasang data logger pada saat pemasangan PLTS tersebut selama periode 2021-2025 dan kemudian data tersebut diinput ke excel. Data yang diambil dalam data logger yaitu data harian-bulanan daya yang dihasilkan PLTS dan pemakaian daya konsumsi (Bansal et al., 2021).
- Data radiasi matahari diunduh dari NASA POWER untuk periode waktu dari mulai dari 01 Agustus sampai 31 Desember 2025 dengan lokasi yang dipilih dengan memasukan koordinat lokasi penelitian. Data harian dari Nasa Power yang dikumpulkan mencakup radiasi matahari global dapat dilihat pada waktu siang hari (*Local Solar Time*) pada lampiran A.

Metode Analisis Data

- Perbandingan hasil aktual pemasangan PLTS dengan metode statistik dengan analisa data Microsoft Excel
- Evaluasi hasil produksi PLTS aktual selama 3 tahun dibandingkan dengan perangkat lunak PVsyst dan Helioscope
- Evaluasi hasil produksi PLTS aktual selama 3 tahun dan dengan standar IEC 61724 dapat diketahui kinerja suatu sistem PLTS yaitu antara lain dengan *Yield Factor* (Yf), *Reference Yield* (Yr) *Performance Ratio* (PR), dan *Capacity Utilization Factor* (CUF)
- Simulasi penyebab penurunan kinerja PLTS aktual dengan Helioscope dengan beberapa kondisi

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kinerja PLTS

- Analisa kinerja produksi PLTS aktual berdasarkan metode statistik (*descriptive statistic*, Two Sample Assuming Equal Variances (t-Test, z-Test) dan t-Test:Paired Two Sample for Means serta Anova

Berikut adalah hasil pengolahan data dengan bantuan Microsoft Excel hasil dari data harian produksi antara Inverter 1 dan 2

Descriptive Statistics	2021		2022		2023		2024 all		2024 (dikurangi data gangguan total)	
	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2
Mean	97,65	97,15	87,35	86,71	71,75	88,82	65,54	87,21	66,02	87,21
Standard Error	1,98	2,38	1,40	1,41	1,07	1,49	1,04	1,68	1,09	1,68
Median	104,10	104,30	88,80	86,30	71,85	90,95	65,90	87,15	66,20	87,15
Mode	106,00	90,50	94,90	55,60	78,30	104,90	77,80	64,50	77,80	64,50
Standard Deviation	24,55	29,50	26,55	26,75	20,13	28,14	18,05	28,15	18,26	28,15
Sample Variance	602,79	870,15	704,85	715,80	405,38	791,90	325,85	792,29	333,42	792,29
Kurtosis	0,59	0,86	0,36	0,17	1,25	0,60	0,35	0,34	0,39	0,34
Skewness	-0,81	-0,96	-0,29	0,05	-0,04	-0,61	-0,14	-0,07	-0,17	-0,07
Range	126,60	138,60	155,40	157,70	131,60	144,30	108,20	149,00	108,20	149,00
Minimum	12,40	7,90	6,40	12,10	6,10	8,10	0,90	8,20	0,90	8,20
Maximum	139,00	146,50	161,80	169,80	137,70	152,40	109,10	157,20	109,10	157,20
Sum	14940,90	14863,20	31358,19	31130,20	25542,20	31621,30	15859,60	24418,90	18485,20	24418,90
Count	133,00	133,00	359,00	359,00	356,00	356,00	303,00	280,00	280,00	280,00
Confidence Level(95,0%)	3,92	4,71	2,78	2,78	2,10	2,93	2,04	3,31	2,15	3,31

Gambar 6. Analisa data dengan Microsoft Excel data produksi Inverter 1&2 2021-2024

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances	2021		2022		2023		2024 all		2024 (dikurangi data gangguan total)	
	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2
Mean	97,65	97,15	87,35	86,71	71,75	88,82	65,54	87,21	66,02	87,21
Variance	602,79	870,15	704,85	715,80	405,38	791,90	325,85	792,29	333,42	792,29
Observations	153,00	153,00	359,00	359,00	356,00	356,00	303,00	280,00	280,00	280,00
Pooled Variance	736,47		710,32		598,64		549,84		562,86	
Hypothesized Mean Difference	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
df	304,00		716,00		710,00		581,00		558,00	
t Stat	0,16		0,32		-9,31		-11,15		-10,57	
P(T<=t) one-tail	0,44		0,37		7,7E-20		1,4E-26		3,2E-24	
t Critical one-tail	1,65		1,65		1,6E+00		1,6E+00		1,6E+00	
P(T<=t) two-tail	0,87		0,75		1,5E-19		2,8E-26		6,4E-24	
t Critical two-tail	1,97		1,96		2,0E+00		2,0E+00		2,0E+00	

 : Nilai Probabilitas lebih besar dari alfa 5%
 : Nilai Probabilitas lebih kecil dari alfa 5%

z-Test: Two Sample for Means	2021		2022		2023		2024 all		2024 (dikurangi data gangguan total)	
	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2
Mean	97,65	97,15	87,35	86,71	71,75	88,82	65,54	87,21	66,02	87,21
Known Variance	602,79	870,15	704,85	715,80	405,38	791,90	325,85	792,29	333,42	792,29
Observations	153,00	153,00	359,00	359,00	356,00	356,00	303,00	280,00	280,00	280,00
Hypothesized Mean Difference	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
z	0,16		0,32		-9,31		-10,96		-10,57	
P(Z<=z) one-tail	0,43		0,37		0,00		0,00		0,00	
z Critical one-tail	1,64		1,64		1,64		1,64		1,64	
P(Z<=z) two-tail	0,87		0,75		0,00		0,00		0,00	
z Critical two-tail	1,96		1,96		1,96		1,96		1,96	

 : Nilai Probabilitas lebih besar dari alfa 5%
 : Nilai Probabilitas lebih kecil dari alfa 5%

Gambar 7. Analisa data dengan Microsoft Excel data produksi Inverter 1&2 2021-2024

Berdasarkan *descriptive statistic* perbandingan hasil produksi rata-rata harian pada tahun 2021 di inverter 1 97,65 kWh/hari dan 2 97,15 kWh/hari dan pada 2022 inverter 1 87,35 kWh/hari dan inverter 2 86,71 kWh/hari hasil tersebut memiliki nilai relatif sama, hal ini didukung dengan metode statistik lainnya yaitu Two Sample Assuming Equal Variances (t-Test, z-Test) dan t-Test:Paired Two Sample for Means serta Anova (bisa dilihat dalam lampiran A) pada tahun 2021-2022 dimana hasil nilai probabilitas lebih besar dari pada alfa 0,05 sehingga tidak memiliki perbedaan signifikan pada alfa 5%, sedangkan di tahun 2023 dan 2024 hasilnya berbeda antara inverter 1 dan 2, dimana berdasarkan *descriptive statistic* perbandingan hasil produksi rata-rata harian cukup jauh dan didukung dengan metode statistik lainnya yaitu Two Sample Assuming Equal Variances (t-Test, z-Test) dan t-Test:Paired Two Sample for Means pada tahun 2023-2024 dimana hasil nilai probabilitas lebih kecil dari alfa 0,05 sehingga ada perbedaan signifikan (Nugroho, 2021)

Perbandingan Hasil Produksi PLTS Aktual Dengan Simulasi PVsyst

Data pemasangan PLTS dapat dimonitor hasil produksinya yaitu sebagai berikut dan kemudian dibandingkan dengan simulasi PVsyst yaitu sebagai berikut:

Bulan	Produksi PLTS Aktual (MWh)								Produksi PLTS Simulasi PVSyst (MWh)	
	2021		2022		2023		2024			
	inverter 1	inverter 2	inverter 1	inverter 2	inverter 1	inverter 2	inverter 1	inverter 2	inverter 1	inverter 2
januari	Belum terpasang		3,15	3,25	2,72	2,62	2	2,82	3,347	3,352
februari			2,28	2,61	2,36	2,65	2,13	2,83	3,644	3,596
maret			2,38	2,38	2,28	2,98	2,06	2,81	3,761	3,761
april			3,05	2,93	2,24	3,02	1,86	2,38	3,799	3,859
mei			2,63	2,42	2,02	2,63	1,77	1,37	3,672	3,666
juni			2,26	2,19	1,76	2,11	1,77	1,17	3,64	3,631
juli				2,41	2,3	2,01	2,38	1,89	2,39	3,896
agustus	2,95	2,9	2,78	2,77	2,09	2,84	2,08	2,7	4,08	4,044
september	3,04	2,97	2,64	2,57	2,33	3,03	2,06	2,8	4,065	4,094
oktober	3,07	3,09	2,73	2,72	2,24	2,95	2,19	3,11	4,366	4,358
november	2,9	2,85	2,54	2,58	1,77	2,15			3,692	3,743
desember	2,95	3,05	2,49	2,39	1,64	2,2			3,486	3,507
Total produksi (MWh)	14,91	14,86	31,34	31,11	25,46	31,56	19,81	24,38	38,27	38,238
Rata-rata produksi (MWh/Bulan)	2,98	2,97	2,61	2,59	2,12	2,63	1,98	2,44	3,83	3,82
Perbandingan rata rata produksi YoY (%)			-12,42%	-12,77%	-18,76%	1,45%	-6,63%	-7,30%		

Gambar 8. Perbandingan Produksi Inverter 1-2 dengan simulasi PVsyst

Dari hasil di atas dapat dilihat bahwa hasil simulasi PVsyst lebih besar dibandingkan aktualnya, dimana hasil produksi modul surya pada Inverter 1 38,27 MWh dengan rata – rata produksi adalah 3,83 MWh/bulan dan Inverter 2 total 38,238 MWH dengan rata -rata 3,82 MWh/bulan, hal ini disebabkan karena salah satunya belum ada faktor *losses* dalam simulasi tersebut. Kinerja terbaik PLTS aktual berada pada periode pertama dengan di tahun 2021 dengan total rata -rata produksi 2,98 MWh/bulan pada inverter 1 dan inverter 2 2,97 MWh/bulan, dan kemudian menurun menjadi 2,61 MWh/bulan inverter 1 dan inverter 2 2,59 MWh/bulan di tahun 2022 namun kinerja aktual modul surya pada hasil produksi inverter 1 dan 2 adalah relatif sama baik di 2021 dan 2022 (Martha et al., 2022). Tetapi di tahun 2023 rata rata produksinya kembali menurun cukup signifikan karena kinerja hasil produksi modul surya di inverter 1 mengalami penurunan cukup signifikan dengan rata rata produksi di 2023 2,12 MWh/bulan dengan penurunan -18,76% dibanding tahun 2022 sedangkan inverter 2 di tahun 2023 mengalami kenaikan rata rata produksi menjadi 2,63 MWh/bulan naik 1,45% dibanding tahun 2022 hal ini juga bisa disebabkan karena berdasarkan data Nasa Power terjadi kenaikan intensitas matahari yaitu 153,76 kWh/m2/bulan (naik 12,41% dibandingkan tahun 2022). Dari hasil simulasi PVsyst dapat dilihat bahwa perbedaan pemasangan modul surya yang menghadap timur (inverter 2) dengan yang barat (inverter 1) tidak memiliki perbedaan signifikan dari hasil produksi PLTSnya dan secara aktual pun untuk tahun 2021 dan 2022 hasil produksi inverter 1 dan 2.

Bulan	Intensitas Matahari (kWH/m2/Bulan)					Simulasi Pvsyst
	Aktual Berdasarkan Data Nasa Power					
	2021	2022	2023	2024		
januari		147,47	143,30	135,97	129,20	
februari		121,56	113,44	127,11	138,90	
maret		139,77	148,71	137,04	145,00	
april		141,26	153,59	143,52	147,30	
mei		132,98	146,31	141,05	140,80	
juni		124,09	149,64	133,14	138,90	
juli		137,18	146,00	147,26	148,60	
agustus	152,91	151,05	169,24	164,64	155,60	
september	160,11	141,39	180,81	163,50	156,90	
oktober	157,30	138,09	182,63	174,84	168,70	
november	130,75	133,20	147,49		142,90	
desember	141,09	133,29	163,92		135,10	
Total intensitas matahari	742,16	1641,33	1845,08	1468,08	1747,90	
Rata-rata intensitas matahari	148,43	136,78	153,76	146,81	145,66	

Gambar 9. Perbandingan data intensitas matahari berdasarkan Nasa Power dan PVsyst

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa nilai rata – rata intensitas matahari setiap bulan relatif sama antara simulasi PVsyst dan data aktual dari Nasa Power di tahun 2024, dan di tahun

2023 cukup tinggi nilai intensitas matahari sehingga mendorong nilai rata – rata produksi energi listrik aktual cukup tinggi juga di tahun tersebut.

Analisa Kinerja PLTS dengan *Capacity Utilization Factor (CUF)*

Berikut adalah hasil *Yield Factor*, *Reference yield* dan *Performance Ratio* berdasarkan persamaan (1) (2) (3)(4):

Bulan	Yield Factor (Yf) Berdasarkan Data Aktual Produksi PLTS								Reference Yield (Yr)			
	Yield Factor 2021		Yield Factor 2022		Yield Factor 2023		Yield Factor 2024		Aktual berdasarkan data Nasa Power			
	inverter 1	Inverter 2	inverter 1	Inverter 2	inverter 1	Inverter 2	inverter 1	Inverter 2	2021	2022	2023	2024
januari	Belum terpasang		105,11	108,44	90,76	87,42	66,73	94,09	Belum terpasang	147,47	143,30	135,97
februari			76,08	87,09	78,75	88,42	71,07	94,43		121,56	113,44	127,11
maret			79,41	79,41	76,08	99,43	68,74	93,76		139,77	148,71	137,04
april			101,77	97,76	74,74	100,77	62,06	79,41		141,26	153,59	143,52
mei			87,75	80,75	67,40	87,75	59,06	45,71		148,63	146,31	141,05
juni			75,41	73,07	58,73	70,40	59,06	39,04		124,09	149,64	133,14
juli			80,41	76,74	67,07	79,41	63,06	79,75		137,18	146,00	147,26
agustus	98,43	96,76	92,76	92,43	69,74	94,76	69,40	90,09	152,91	151,05	169,24	164,64
september	101,43	99,10	88,09	85,75	77,74	101,10	68,74	93,43	160,11	141,39	180,81	163,50
oktober	102,44	103,10	91,09	90,76	74,74	98,43	73,07	103,77	157,30	138,09	182,63	174,84
november	96,76	95,10	84,75	86,09	59,06	71,74			130,75	133,20	147,49	
desember	98,43	101,77	83,08	79,75	54,72	73,41			141,09	133,29	163,92	
Rata-rata Yf	99,50	99,17	87,14	86,50	70,79	87,75	66,10	81,35	148,43	138,08	153,76	146,81
Perbandingan rata rata Yf YoY (%)			-12,42%	-12,77%	-18,76%	1,45%	-6,63%	-7,30%		-6,97%	11,35%	-4,52%

Gambar 10. Hasil Yield Factor, Reference yield 2021-2024

Di tahun 2021 dan 2022 untuk kinerja kedua inverter relatif sama sedangkan mulai tahun 2023 mengalami perbedaan cukup signifikan dimana untuk inverter 1 mengalami penurunan kinerja cukup drastis dibandingkan inverter 2. Nilai *Yield Factor* sangat dipengaruhi hasil produksi energi listrik dari masing - masing inverter.

Reference Yield dipengaruhi oleh nilai dari intensitas matahari yang dihasilkan di area tersebut. Hasil *Reference Yield* terbaik berada pada tahun 2023

Bulan	Performance Ratio berdasarkan data aktual PLTS dan Nasa Power							
	PR 2021		PR 2022		PR 2023		PR 2024	
	Inverter 1	Inverter2	Inverter 1	Inverter2	Inverter 1	Inverter2	Inverter 1	Inverter2
januari	Belum terpasang		72,63%	73,63%	63,52%	61,31%	54,18%	76,59%
februari			71,56%	71,72%	69,30%	75,89%	56,02%	78,04%
maret			56,94%	56,89%	51,38%	69,82%	50,33%	70,03%
april			72,11%	73,63%	50,16%	67,48%	43,31%	58,80%
mei			66,09%	65,66%	46,25%	59,98%	42,08%	38,68%
juni			60,82%	59,32%	39,45%	50,57%	44,33%	55,56%
juli			58,67%	57,45%	46,12%	59,37%	43,01%	54,27%
agustus	64,55%	66,05%	61,50%	61,34%	42,66%	56,72%	42,13%	54,68%
september	63,48%	65,94%	62,37%	63,39%	43,07%	59,16%	41,98%	56,87%
oktober	65,10%	66,99%	66,11%	66,62%	41,07%	57,26%	41,89%	59,37%
november	74,24%	75,56%	67,51%	65,86%	40,07%	55,56%	46,23%	64,91%
desember	70,95%	72,15%	62,56%	59,83%	39,57%	55,08%		
Rata-rata PR	67,66%	69,34%	64,91%	64,61%	47,72%	60,68%	48,51%	62,28%

Gambar 11. Hasil Performance Ratio

Di tahun 2021 dan 2022 untuk kinerja ke dua inverter relative sama sedangkan mulai tahun 2023 mengalami perbedaan cukup signifikan dimana untuk inverter 1 mengalami penurunan kinerja cukup drastic.

Bulan	Capacity Utilization Factor (CUF)							
	CUF 2021		CUF 2022		CUF 2023		CUF 2024	
	Inverter 1	Inverter2	Inverter 1	Inverter2	Inverter 1	Inverter2	Inverter 1	Inverter2
januari	Belum terpasang		14,40%	14,59%	12,23%	11,81%	9,90%	14,00%
februari			12,94%	12,97%	11,70%	12,81%	10,60%	14,76%
maret			10,70%	10,69%	10,27%	13,96%	9,27%	12,90%
april			14,15%	14,45%	10,70%	14,39%	8,63%	11,72%
mei			11,81%	11,74%	9,10%	11,79%	7,98%	7,33%
juni			10,48%	10,22%	8,20%	10,51%	8,20%	10,27%
juli			10,82%	10,59%	9,05%	11,65%	8,51%	10,74%
agustus	13,27%	13,58%	12,49%	12,45%	9,71%	12,90%	9,32%	12,10%
september	14,12%	14,66%	12,25%	12,45%	10,82%	14,86%	9,53%	12,92%
oktober	13,76%	14,16%	12,27%	12,36%	10,08%	14,06%	9,84%	13,95%
november	13,48%	13,72%	12,49%	12,18%	8,21%	11,38%	8,44%	11,47%
desember	13,90%	14,14%	11,58%	11,08%	9,01%	12,54%		
Rata-rata CUF	13,71%	14,05%	12,20%	12,15%	9,92%	12,72%	9,30%	12,00%

Gambar 12. Hasil *Capacity Utilization Factor* 2021 - 2024

Dari hasil perbandingan *Capacity Utilization Factor (CUF)* rata-rata terbaik ada pada tahun pertama dimana inverter 1 dari modul surya menghadap barat memiliki nilai 13,71% dan inverter 2 dengan modul surya 14,71% dan masih cukup jauh dengan *CUF* simulasi PVsyst. Di tahun 2021 dan 2022 untuk kinerja ke dua inverter relatif sama sedangkan mulai tahun 2023 mengalami perbedaan cukup signifikan dimana untuk inverter 1 mengalami penurunan *CUF* cukup drastis. Dari hasil ini dapat dilihat bahwa terjadi penurunan pada inverter 1 salah satunya disebabkan karena menurunnya hasil produksi energi listrik dari modul surya di Inverter 1.

Analisa Pengaruh Penurunan Kinerja CUF pada PLTS Atap

Dari beberapa hasil di atas dapat terlihat bahwa terjadi ketidaknormalan hasil produksi pada inverter 1 di tahun 2023 dan 2024 yang perlu dilakukan penyebab masalah dan tindakan perbaikan yang perlu dilakukan.

Kinerja Efisiensi Inverter

Inverter bisa menjadi salah satu faktor penyebab menurunnya produksi energi listrik dari energi DC masukan yang dibandingkan dengan energi AC keluaran dari inverter, pengukuran dilakukan melalui monitoring aplikasi Solis pada tanggal 28 November 2024 dengan hasil sebagai berikut:

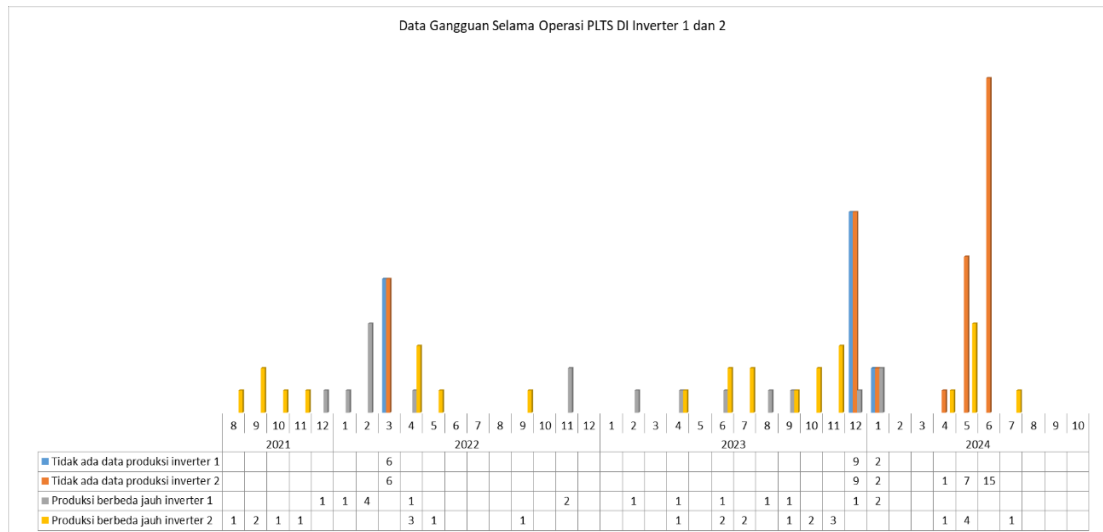
Jam	Inverter 1				Inverter 2				
	Temperature	Daya input DC (kW)	Daya Output AC (kW)	Efisiensi	Temperature	Daya input DC (kW)	Daya Output AC (kW)	Efisiensi	
06.00	27,1	0,33	0,32	96,97	29,1	0,45	0,51	113,33	
07.00	32,2	1,89	1,82	96,30	33,8	2,51	2,5	99,60	
08.00	35,2	3,44	3,35	97,38	38,6	4,57	4,53	99,12	
09.00	38,7	6,59	6,53	99,09	48,6	9,9	9,83	99,29	
10.00	51,2	16,48	16,13	97,88	69,5	21,94	21,51	98,04	
11.00	42,8	7,88	7,77	98,60	56,7	10,04	9,77	97,31	
12.00	52,2	14,45	14,2	98,27	69,8	19,87	19,56	98,44	
13.00	47,6	7,81	7,62	97,57	62	10,42	10,15	97,41	
14.00	38,7	2,55	2,34	91,76	47	3,09	2,9	93,85	
15.00	34,8	3,75	3,55	94,67	41,6	4,82	4,74	98,34	
16.00	33,3	2,19	2,08	94,98	40,3	2,7	2,77	102,59	
17.00	34,6	0,945	0,9	95,24	38,5	1,13	1,11	98,23	
Rata - rata efisiensi Inverter 1				96,56	Rata - rata efisiensi Inverter 2				97,96

Gambar 13. Perbandingan kinerja inverter 1-2

Efisiensi inverter dapat dihitung melalui perbandingan antara energi keluaran AC dengan energi input DC. Dari hasil efisiensi rata – rata dalam sehari baik inverter 1 dan 2 mengalami penurunan efisiensi bila dibandingkan spesifikasi pabrikan inverter yaitu di sekitar 98,3% – 98,8%, namun demikian efisiensi inverter 2 memiliki nilai yang lebih baik dengan rata rata 97,96% dan inverter satu hanya 96,56%.

Kendala Operasional PLTS Atap

Dalam operasional PLTS atap terdapat kendala berkaitan monitoringnya yang mendukung kinerja PLTS Atap tersebut, salah satunya adalah ketersediaan layanan internet sepanjang waktu di perangkat sehingga setiap data hasil produksi maupun konsumsi energi listrik dapat dikirim secara *real time* dan tercatat dengan baik. Berikut adalah jumlah hari adanya gangguan pada layanan internet pada perangkat sehingga data tidak bisa tercatat baik hasil produksi maupun konsumsi energi listrik



Gambar 14. Grafik Data Gangguan Pada Sistem PLTS pada inverter 1 dan 2

Berdasarkan data di atas dapat dilihat ada dua kategori gangguan internet yaitu tidak ada data pada satu hari baik energi produksi maupun konsumsi dan kategori produksi antara inverter 1 dan 2 sangat berbeda jauh hal ini bisa terjadi karena terjadi masalah pada salah satu inverter baik internet maupun invertornya sehingga dalam sehari terdapat data yang hilang pada

jam- jam tertentu. Tidak tercatatnya hasil produksi akan menurunkan kinerja dari PLTS atap tersebut, sebagai contoh di bulan Juni 2024 terjadi 15 hari tidak tercatat data produksinya pada inverter 2 sehingga di bulan tersebut nilai rasio performa pada inverter 2 hanya 29,32% (terendah) dengan produksi tercatat hanya 1,17 MWh dibandingkan dengan di bulan Juli 2024 tidak ada gangguan di inverter 2 mengalami kenaikan rasio performa menjadi 54,15% dengan produksi tercatat 2,39 MWh

Soiling pada Modul Surya

Salah satu faktor lainnya yang mempengaruhi kinerja PLTS adalah debu atau partikel yang menutupi modul surya, sehingga dilakukan pembersihan pada modul surya tanggal 22 Mei 2024, maka dicoba dilakukan perbandingan untuk mengetahui pengaruh hasil produksi sebelum dilakukan pembersihan dan sesudahnya yaitu data harian inverter 1 sebelum pembersihan : 21 April – 21 Mei 2024 dibandingkan dengan data harian inverter 1 sesudah pembersihan: 23 Mei – 22 Juni 2024

Inverter 1			
sebelum		sesudah	
Mean	55,4645161	Mean	60,277419
Standard Error	2,55150198	Standard Error	2,4184182
Median	56,3	Median	62,9
Mode	#N/A	Mode	43,4
Standard Deviation	14,2061618	Standard Deviation	13,465183
Sample Variance	201,815032	Sample Variance	181,31114
Kurtosis	-0,8785564	Kurtosis	-1,346109
Skewness	-0,2085769	Skewness	-0,276354
Range	52,9	Range	42,2
Minimum	24,9	Minimum	37,4
Maximum	77,8	Maximum	79,6
Sum	1719,4	Sum	1868,6
Count	31	Count	31

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances

Inverter 1	
sebelum	sesudah
Mean	55,464516 60,277419
Variance	201,81503 181,31114
Observations	31 31
Pooled Variance	191,56309
Hypothesized Me	0
df	60
t Stat	-1,369043
P(T<=t) one-tail	0,0880446
t Critical one-tail	1,6706489
P(T<=t) two-tail	0,1760893
t Critical two-tail	2,0002978

z-Test: Two Sample for Means

Inverter 1	
sebelum	sesudah
Mean	55,464516 60,277419
Known Variance	201,815 181,311
Observations	31 31
Hypothesized Mean Difference	0
z	-1,369043
P(Z<=z) one-tail	0,0854929
z Critical one-tail	1,6448336
P(Z<=z) two-tail	0,1709858
z Critical two-tail	1,959964

Gambar 15. Gambar perbandingan hasil inverter 1 sebelum dan sesudah dibersihkan

Dari metode t-Test dan z-Test di atas karena nilai Probabilitas lebih besar dari 0.05, H0 diterima. Artinya nilai produksi PV di inverter 1 sebelum dan sesudah dibersihkan modul suryanya tidak ada perbedaan signifikan. Meskipun tidak ada pengaruh, hasil rata – rata produksi di inverter 1 mengalami kenaikan rata – rata dari sebelumnya 55,46 kWh/hari menjadi 60,28 kWh/hari

Hal selanjutnya dilakukan pada Inverter 2 dengan data sebelum pembersihan : 21 April – 21 Mei 2024 dan data sesudah pembersihan: 18 Juni – 18 Juli 2024 (24 Mei-17 Juni data kosong)

Descriptive analysis Inverter 2				t-Test: Paired Two Sample for Means Inverter 2			z-Test: Two Sample for Means Inverter 2		
	sebelum		sesudah		sebelum	sesudah		sebelum	sesudah
Mean	63,232258	Mean	75,951613	Mean	63,232258	75,951613	Mean	63,232258	75,951613
Standard Error	4,8076292	Standard E	3,5581464	Variance	716,51226	392,47258	Known Var	716,5126	392,4753
Median	67,4	Median	81,8	Observations	31	31	Observatic	31	31
Mode	#N/A	Mode	#N/A	Pearson Correlation	-0,037383		Hypothesi:	0	
Standard Deviation	26,767747	Standard D	19,810921	Hypothesized Mean Difference	0		z	-2,126584	
Sample Variance	716,51226	Sample Va	392,47258	df	30		P(Z<=z) on	0,0167273	
Kurtosis	-0,379775	Kurtosis	2,0596845	t Stat	-2,089562		z Critical oi	1,6448536	
Skewness	-0,745778	Skewness	-1,386381	P(T<=t) one-tail	0,0226189		P(Z<=z) tw	0,0334547	
Range	90,4	Range	86,1	t Critical one-tail	1,6972609		z Critical tv	1,959964	
Minimum	8,2	Minimum	14,2	P(T<=t) two-tail	0,0452379				
Maximum	98,6	Maximum	100,3	t Critical two-tail	2,0422725				
Sum	1960,2	Sum	2354,5						
Count	31	Count	31						

Gambar 16. Gambar perbandingan hasil inverter 1 sebelum dan sesudah dibersihkan

Dari metode di atas karena nilai P lebih kecil 0.05, H_0 ditolak. Artinya, nilai produksi PV pada inverter 2 sebelum dan sesudah dibersihkan modul suryanya ada perbedaan signifikan dan ada pengaruh hasil produksi PLTS terhadap pembersihan modul surya tersebut

Simulasi PLTS dengan *Helioscope*

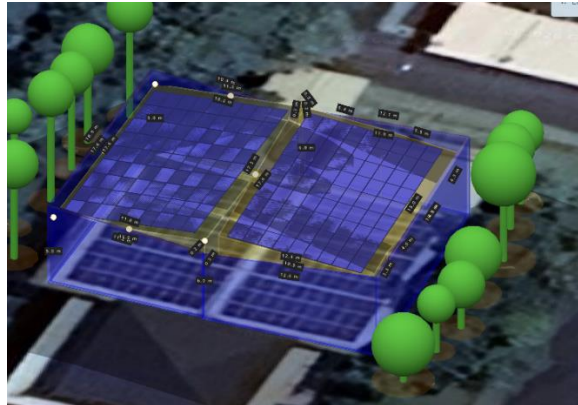
Berdasarkan hasil analisa produksi listrik dan performa kinerja PLTS *on-grid* 59,94 kWp yang terbagi menjadi 2 inverter dengan kapasitas masing – masing modul surya 29,97 kWp yang kemudian dibandingkan hasil aktual bahwa pada tahun 2021 dan 2022 memiliki nilai relatif sama antara inverter 1 dengan 2 dan terjadi perbedaan signifikan mulai tahun 2023 dan 2024. Artinya penempatan modul surya tidak ada pengaruh signifikan terhadap produksi karena di tahun 2023-2024 tidak ada perubahan penempatan modul surya. Kemudian antara hasil produksi antara simulasi PVsyst dan dengan hasil aktual dimana terjadi perbedaan signifikan karena dalam simulasi PVsyst belum ditambahkan efek *shading*.

Setelah dilakukan pengamatan secara visual pada tahun 2024 pada gambar di bawah dan dokumentasi saat awal pemasangan modul surya dapat terlihat bahwa pohon yang berada di sekitar PLTS mengalami perubahan signifikan yang mengakibatkan dapat menghalangi radiasi matahari ke modul surya terutama pada sisi barat yang dapat dilihat pada gambar di bawah



Gambar 17. Pertumbuhan pohon penyebab shading menutupi kelompok modul surya

Dari visual di atas kemudian dibuatkan simulasi untuk menghasilkan analisa yang lebih komperensif dengan kondisi aktual



Gambar 18. Pengaturan modul surya sesuai dengan kondisi aktual pada Helioscope

No	Keterangan	Aktual (2022)		Aktual (2023)		Simulasi Helioscope					
		Inverter 1	Inverter 2	Inverter 1	Inverter 2	Kondisi A		Kondisi B		Kondisi C	
1	Total produksi per bulan (MWh/tahun)	31,92	31,79	25,96	33,31	27,70	37,90	36	37,50	37,20	37,90
2	Rata- rata produksi per bulan (MWh/bulan)	2,66	2,65	2,16	2,78	2,31	3,16	3,00	3,13	3,10	3,16
3	Deviasi total produksi PLTS (Inverter 1- Inverter 2)(MWh/tahun)	-0,13		7,35		10,20		1,50		0,70	
4	Persentase deviasi	-0,20%		12,40%		15,55%		2,04%		0,93%	

kondisi a: simulasi helioscope dengan pengurangan satu string pada inverter 1 dan inverter 2 normal
 kondisi b: simulasi helioscope dengan efek *shading* pohon di modul surya pada inverter 1 dan inverter 2
 kondisi c: simulasi helioscope tanpa efek *shading* pohon di modul surya pada inverter 1 dan inverter 2

Gambar 19. Perbandingan aktual dan simulasi Helioscope

Dengan hasil ini di atas maka kemungkinan besar terjadi kerusakan rangkaian pada satu string pada inverter 1 yang mengakibatkan terjadinya penurunan kapasitas produksi dengan deviasi 10,2 MWh dengan inverter 2. Apabila dilanjut dengan simulasi pengurangan 2-4 string PLTS maka semakin besar deviasinya sehingga untuk simulasi pengurangan satu string sudah cukup.

Analisa Perbaikan Kinerja PLTS Atap

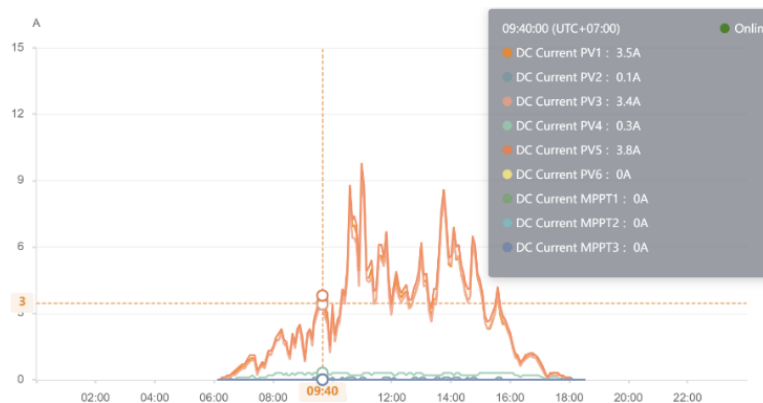
Dari beberapa penyimpangan dilakukan analisa data dengan anomali penurunan kapasitas produksi dan dibandingkan dengan dua inverter yang sebelumnya nilainya memiliki kesamaan di tahun 2021&2022 namun di bulan Februari 2023 terjadi perbedaan signifikan antara produksi inverter 1 dan 2.

Bulan	Produksi PLTS Aktual (MWh)							
	2021		2022		2023		2024	
	inverter 1	inverter 2	inverter 1	inverter 2	inverter 1	inverter 2	inverter 1	inverter 2
januari			3,15	3,25	2,72	2,62	2	2,82
februari			2,28	2,61	2,36	2,65	2,13	2,83
maret			2,38	2,38	2,28	2,98	2,06	2,81
april			3,05	2,93	2,24	3,02	1,86	2,38
mei			2,63	2,42	2,02	2,63	1,77	1,37
juni			2,26	2,19	1,76	2,11	1,77	1,17
juli			2,41	2,3	2,01	2,38	1,89	2,39
agustus	2,95	2,9	2,78	2,77	2,09	2,84	2,08	2,7
september	3,04	2,97	2,64	2,57	2,33	3,03	2,06	2,8
oktober	3,07	3,09	2,73	2,72	2,24	2,95	2,19	3,11
november	2,9	2,85	2,54	2,58	1,77	2,15	1,82	2,56
desember	2,95	3,05	2,49	2,39	1,64	2,2		
Total produksi (MWh)	14,91	14,86	31,34	31,11	25,46	31,56	21,63	26,94
Rata-rata produksi (MWh/Bulan)	2,98	2,97	2,61	2,59	2,12	2,63	1,97	2,45

Gambar 20. Perbandingan Hasil Produksi PLTS Inverter 1 dan 2

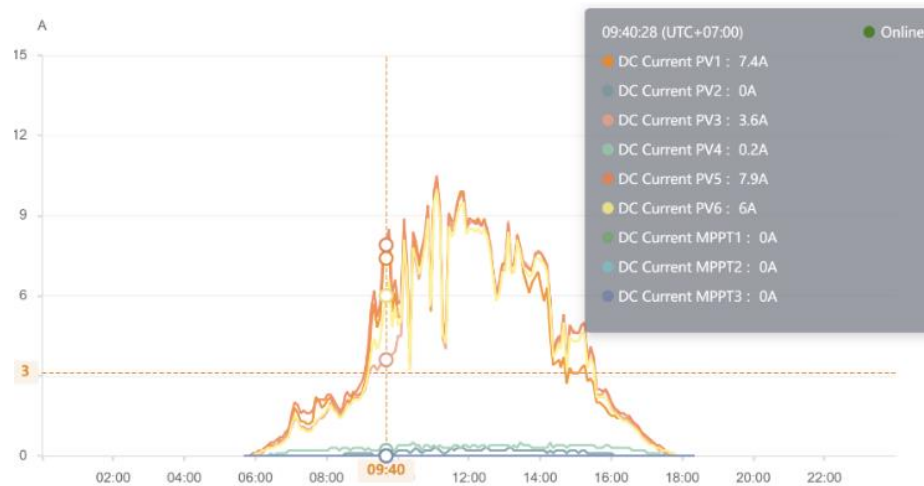
Sehingga kemudian ditelusuri dari monitoring pada database ditemukan bahwa terdapat jaringan yang putus di salah satu string PLTS di inverter 1 yang menyebabkan tidak ada aliran energi listrik dari string tersebut ke dalam inverter yang dimulai sejak 27 Februari 2023 dan menyebabkan secara keseluruhan produksi energi listrik pada inverter 1 menurun

- 27 februari 2023 di inverter 1 mulai terjadi gangguan pada string 6 (tidak ada arus mengalir)



Gambar 21. Grafik Arus Dari Setiap String di Inverter 1 (Sesudah Terjadi Kerusakan)

- 30 November 2024 di sistem PLTS inverter 1 sudah diperbaiki sehingga PV 6 sudah mengalirkan arus kembali



Gambar 22. Grafik Arus Dari Setiap String di Inverter 1 (Sesudah Diperbaiki)

Masalah utama sistem ini terlihat pada ketidakseimbangan arus antar string PV yaitu PV1, PV3, PV5, PV6) sedangkan pada PV2, PV4 merupakan dummy string / tidak digunakan kesalahan dalam penyusunan design di web base. Dari grafik 4.22 dapat dilihat dalam keadaan normal pada setiap string PV1, PV3, PV5 menghasilkan arus DC yang bervariasi 3,4-3,5 A di jam 09:10 tanggal 27 Februari 2023, sedangkan pada string PV6 terjadi anomali yaitu tidak mengalirkan arus (0 A). Sehingga terjadi indikasi kerusakan atau terputusnya arus listrik dari string PV6. Pada grafik 4.23 setelah dilakukan perbaikan pada string PV6 dapat dilihat dalam pada setiap string PV1, PV3, PV5, PV6 menghasilkan arus DC yang bervariasi 3,6 - 7,9 A di jam 09:40 tanggal 30 November 2024

Bulan	Produksi PLTS Aktual (MWh)			
	2024		2025	
	inverter 1	inverter 2	inverter 1	inverter 2
januari	2	2,82	1,54	1,63
februari	2,13	2,83	2,59	2,62
maret	2,06	2,81	2,7	2,80
april	1,86	2,38	2,51	2,50
mei	1,77	1,37	2,37	2,42
juni	1,77	1,17		
juli	1,89	2,39		
agustus	2,08	2,7		
september	2,06	2,8		
oktober	2,19	3,11		
november	1,82	2,56		
desember	2,53	2,63		
Total produksi (MWh)	24,16	29,57	11,71	11,97
Rata-rata produksi (MWh/Bulan)	2,01	2,46	2,34	2,39
Rata-rata total produksi inverter 1+2 (MWh/Bulan)	2,24		2,37	

Gambar 23. Energi Produksi PLTS Sebelum dan Sesudah Diperbaiki

Dari tabel di atas dapat dianalisa bahwa sebelum dilakukan perbaikan selisih produksi inverter 1 dan 2 adalah 0,74 MWh di bulan November 2024 menjadi hanya 0,1 MWh. Hal ini membuktikan bahwa penyebab menurunnya produksi inverter 1 adalah karena terjadinya kerusakan pada satu string yang menyebabkan berkurangnya juga produksi energi listrik pada inverter 1

Analisa Faktor Emisi PLTS Atap

Dari hasil produksi energi listrik pada PLTS berkapasitas 59,94 kWp dari hasil simulasi PVSyst, Helioscope, dan aktual produksinya dapat dihitung pengurangan emisi karbon dioksida dengan mensubstitusi faktor emisi yang digunakan didasarkan pada jenis bahan bakar dan jaringan listrik yang menghasilkan karbon dioksida salah satunya adalah batu bara. Faktor emisi batubara jenis lignite yaitu 1,01 kg CO₂/kWh dan batubara jenis sub-bituminous yaitu 0,96 kgCO₂/kWh. Perhitungan penurunan emisi CO₂ berdasarkan jenis bahan bakarnya ditunjukkan sebagai berikut:

Tabel 2. Perhitungan Faktor Emisi Antar Aktual dan Simulasi PV

No	Faktor Emisi	Produksi PV (MWh / tahun)		CO ₂ Emission Potential			
				Inverter 1		Inverter 2	
		Inverter 1	Inverter 2	Lignite Coal (Ton)	Sub-bituminous Coal (Ton)	Lignite Coal (Ton)	Sub-bituminous Bituminous Coal (Ton)
1	Simulasi PVSyst	45,45	45,49	45902,48	43630,08	45942,88	43668,48
2	Simulasi Helioscope	36,00	37,50	36360	34560	37875	36000
3	Aktual (Sebelum perbaikan)	25,96	33,31	26218,59	24920,64	33639,06	31973,76
4	Aktual (Sesudah perbaikan)	29,43	31,15	29723,29	28251,84	31457,46	29900,16

Dari hasil di atas dapat dilihat bahwa nilai faktor emisi karbon sangat dipengaruhi oleh hasil produksi energi listrik. Semakin besar produksi energi listrik dari PLTS maka semakin besar pula emisi karbon dioksida yang bisa dikurangi. Hasil simulasi memiliki jauh lebih besar dari aktual yang disebabkan karena faktor losses yang belum diperhitungkan. Dari hasil produksi pada aktual sesudah perbaikan yaitu di tahun 2025 memiliki peningkatan emisi lebih baik pada inverter 1 dibanding 2024 sebelum dilakukan perbaikan dengan kenaikan sebesar 13,34% sedangkan di inverter 2 mengalami penurunan 6,49%.

Analisa Keekonomian PLTS Atap

Metode analisis lain yang penting dalam sistem PLTS adalah analisis keekonomian. Analisis dilakukan agar dalam penerapannya, sistem PLTS tersebut tidak mengakibatkan

kerugian karena biaya PLTS yang dikeluarkan cukup tinggi dan adanya kerusakan pada PLTS juga akan mempengaruhi nilai keekonomisan dari PLTS. Total biaya keseluruhan dalam instalasi sistem PLTS berkapasitas 59,94 kWp ini adalah Rp1.137.780.000,-.

Payback Period pada PLTS disini adalah waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan biaya investasi yang telah dikeluarkan di awal melalui penghematan energi yang diperoleh dari pemasangan PLTS. Nilai kas masuk didapat dari estimasi energi yang dihasilkan dengan degradasi modul surya sebesar 0.55% setiap tahun sesuai dengan degradasi modul surya dikalikan dengan tarif listrik golongan tarif bisnis (B2) senilai Rp1.444,7. Nilai OPEX (*Operational Expenditure*) sebagai kas keluar diasumsikan sebesar 0,5% dari biaya investasi awal PLTS. Tingkat diskonto disimulasikan sebesar 5,67% berdasarkan rata-rata suku bunga Bank Indonesia dalam 11 bulan terakhir (Januari hingga November 2025. Perhitungan ditunjukkan sebagai berikut:

Keterangan	Tahun	Produksi PV (MWh/ Tahun)	Estimasi Biaya Penghematan (Rp/Tahun)	Faktor Diskonto	Nilai Saat ini
Aktual	0			1,00	
	1	63,71	Rp92.043.281,70	0,95	Rp87.393.924,90
	2	59,27	Rp85.620.145,50	0,90	Rp77.188.794,91
	3	55,93	Rp80.796.292,20	0,86	Rp69.160.620,31
	4	60,58	Rp87.512.702,50	0,81	Rp71.125.886,74
Estimasi dengan degradasi 0,55%	5	60,24	Rp87.031.382,64	0,77	Rp67.161.692,33
	6	59,91	Rp86.552.710,03	0,73	Rp63.418.441,91
	7	59,58	Rp86.076.670,13	0,70	Rp59.883.821,19
	8	59,25	Rp85.603.248,44	0,66	Rp56.546.202,22
	9	58,93	Rp85.132.430,57	0,63	Rp53.394.605,12
	10	58,60	Rp84.664.202,21	0,60	Rp50.418.661,97
	11	58,28	Rp84.198.549,09	0,57	Rp47.608.582,73
	12	57,96	Rp83.735.457,07	0,54	Rp44.955.122,98
	13	57,64	Rp83.274.912,06	0,51	Rp42.449.553,56
	14	57,32	Rp82.816.900,04	0,48	Rp40.083.631,80
	15	57,01	Rp82.361.407,09	0,46	Rp37.849.574,46
	16	56,70	Rp81.908.419,35	0,44	Rp35.740.032,10
	17	56,38	Rp81.457.923,05	0,41	Rp33.748.064,87
	18	56,07	Rp81.009.904,47	0,39	Rp31.867.119,74
	19	55,77	Rp80.564.350,00	0,37	Rp30.091.008,91
	20	55,46	Rp80.121.246,07	0,35	Rp28.413.889,44
	21	55,15	Rp79.680.579,22	0,34	Rp26.830.244,07
	22	54,85	Rp79.242.336,03	0,32	Rp25.334.863,01
	23	54,55	Rp78.806.503,18	0,30	Rp23.922.826,87
	24	54,25	Rp78.373.067,42	0,29	Rp22.589.490,44
	25	53,95	Rp77.942.015,55	0,27	Rp21.330.467,37
Total					Rp1.148.507.123,93
Total Investment+Maintenance					Rp1.137.780.000,00
NPV					Rp10.727.123,93

Gambar 24. Perhitungan Payback Period dengan Kondisi Aktual Sudah diperbaiki

Levelized Cost of Electricity (LCOE) pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah parameter yang digunakan untuk menghitung biaya rata-rata per unit energi (kWh) yang dihasilkan oleh PLTS selama masa operasionalnya. Sistem PLTS 59,94 kWp ini diharapkan dapat menghasilkan total energi sebesar 1437,34 MWh selama 25 tahun, dengan memperhitungkan degradasi panel sebesar 0,55%. Total estimasi biaya yang dikeluarkan mulai dari biaya investasi awal hingga biaya operasional selama 25 tahun adalah Rp1.137.780.000,-. Perhitungan LCOE ditunjukkan sebagai berikut:

$$\text{LCOE} = \frac{\text{Rp } 1.137.780.000}{1437,34 \times 1000 \text{ kWh}}$$

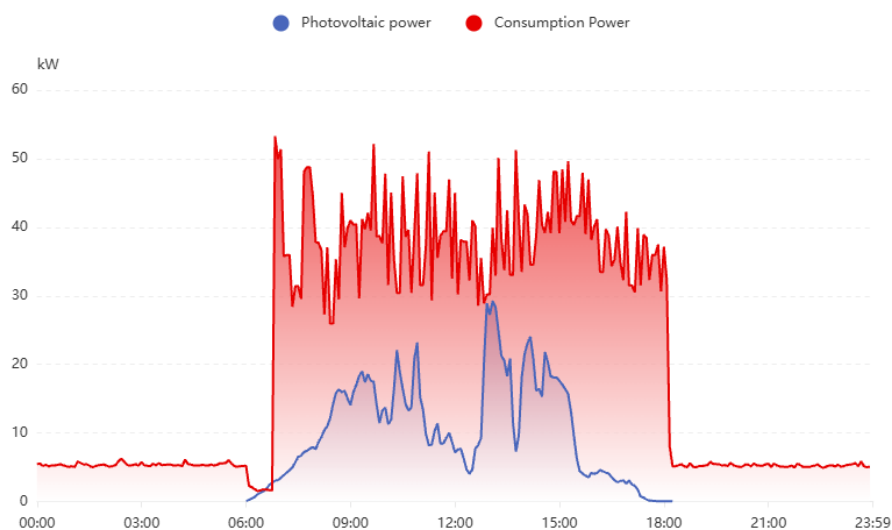
$$LCOE = \text{Rp } 791,59/\text{kWh}$$

Dari analisa hasil perhitungan LCOE di atas, didapatkan nilai LCOE sebesar Rp 791,59 /kWh. Tarif tersebut memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan tarif PLN golongan bisnis (B2) saat ini yaitu Rp 1444,7/ kWh

Evaluasi Kinerja PLTS Atap berdasarkan Capacity Utilization Factor (CUF) di Area Komersial

Dalam beberapa penelitian di Indonesia yang membahas Capacity Utilization Factor (CUF) pada PLTS bisa dijadikan referensi tambahan Dari penelitian PLTS on-Grid 11,2 kWp di Residensial Bukit Gading Mediterania, Kelapa Gading, Jakarta Utara selama satu tahun (bulan Juni 2021 – Mei 2022) dengan nilai aktual 14,1% dan simulasi PVSyst 14,8% (Assiddiq, H., 2012) (7). PLTS Carport 37,8 kWp di area perkantoran Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Jakarta Pusat secara berurutan dengan kondisi riil tahun 2021 6,6%, simulasi PVSyst 9,7% (Julian, B, R., 2023). Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap berkapasitas 1,1 MWp di industri nilai rata-rata aktual sebesar 15,38% dan nilai rata-rata hasil simulasi sebesar 16,82% (Mukromin, R, I., 2020).

Sedangkan dalam penelitian ini membahas di area komersial khususnya area marketing office kawasan perumahan di Tangerang, Banten.



Gambar 25. Pemakaian beban listrik dan Produksi Energi PLTS pada 09 Juni 2026

Pemakaian konsumsi listrik mulai dari jam 07.00 untuk penyalaan AC (*Air Conditioning*), penerangan kantor, dimana di awal pemakaian cukup besar, sedangkan untuk produksi PLTS sendiri mulai dari jam 06.00 walaupun belum terlalu besar produksinya hingga jam 18.00. Dalam Rasio konsumsi pemakaian listrik dengan produksi PLTS bahwa sebagian

besar produksi PLTS belum bisa memenuhi pemakaian listrik sepenuhnya disebabkan karena pemasangan PLTS hanya 56,69 kWP 65% dari daya tersambung 81,5 kVA. Berikut adalah detail tabel produksi PLTS dan konsumsi.

Tahun	Bulan	Data Solarman (kWh)				Data PLN (kWh)	
		Konsumsi Beban	Produksi PV Inverter 1	Produksi PV Inverter 2	Total Produksi PV	impor	ekspor
2023	november	14936	1771	2456	4227	10921	81
	desember	10649	1944	2706	4650	10193	125
	januari	13572	2208	3121	5329	9092	325
2024	februari	13818	2134	2973	5107	8870	254
	maret	13613	2067	2876	4943	8800	199
	april	13718	1863	2529	4392	9480	249
	mei	14468	1779	1635	3414	10897	40
	juni	14901	1769	2217	3986	10921	39
	juli	14431	1898	2395	4293	10100	20
	agustus	15309	2079	2698	4777	10522	24
	september	15030	2057	2787	4844	10217	84
	oktober	15984	2195	3111	5306	10695	47
	nov	13464	1822	2558	4380	9204	172
	desember	12932	2528	2627	5155	7996	349
	januari	12820	2810	2940	5750	7753	511
2025	februari	12192	2585	2624	5209	7295	371
	maret	12400	2811	2782	5593	7360	583
	april	12787	2598	2538	5136	8536	229
	mei	13924	2372	2400	4772	9231	116
	juni	13308	1959	1967	3926	9235	45
	juli	13738	2316	2315	4631	9195	85
	agustus	13340	2266	2459	4725	8683	117
	september	13685	2294	2620	4914	8867	124
	oktober	13928	2469	2881	5350	8734	188
	Total	315020	60318	59334	109459	214064	4185
	Rata-rata	13706	2191	2592	4784	9283	182

Gambar 26. Tabel Data Solarman (Web base PLTS) dan Data PLN untuk Ekspor Impor Daya Pelanggan

Dari tabel di atas dapat terlihat bahwa secara total produksi PV dengan rata - rata 4.784 kWh dengan PV 1 2.191 kWh dan PV2 2.592 kWh. PV1 mengalami penurunan kinerja produksi sehingga produksinya tidak tipikal dengan PV2, namun setelah diperbaiki di bulan desember 2024 terjadi peningkatan produksinya, begitu pula impornya dengan meningkatnya produksi maka impor atau energi listrik yang dikirim dari *grid* PLN menurun. Pada bulan desember 2023 terjadi penurunan konsumsi energi listrik karena adanya masalah dari jaringan internet sehingga tidak tercatat dengan baik dalam sistem.

Untuk dapat melihat lebih jelas mengenai kontribusi PV 1 dan 2 dalam menyuplai energi listrik ke beban dapat dianalisa dalam tabel di bawah

Tahun	Bulan	Data Konsumsi Beban & Produksi PV Berdasarkan Solarman			Data PLN	Selisih data Konsumsi (Solarman - PLN (kWh Exim)
		Konsumsi (kWh)	Kontribusi PV1 (%)	Kontribusi PV2 (%)	Suplai PLN (%)	
2023	11	14936,4	11,86	16,44	73,12	1,42
	12	10649,2	18,25	25,41	95,72	39,39
2024	1	13571,6	16,27	23,00	66,99	6,25
	2	13817,6	15,44	21,52	64,19	1,15
	3	13613,2	15,18	21,13	64,65	0,96
	4	13718,4	13,58	18,44	69,11	1,12
	5	14468	12,30	11,30	75,32	-1,08
	6	14901,2	11,87	14,88	73,29	0,04
	7	14431,2	13,15	16,60	69,99	-0,26
	8	15308,8	13,58	17,62	68,73	-0,06
	9	15030,4	13,69	18,54	67,98	0,21
	10	15984	13,73	19,46	66,91	0,11
	11	13464,4	13,53	19,00	68,36	0,89
	12	12931,6	19,55	20,31	61,83	1,69
2025	1	12820	21,92	22,93	60,48	5,33
	2	12192	21,20	21,52	59,84	2,56
	3	12400,4	22,67	22,43	59,35	4,45
	4	12787,2	20,32	19,85	66,76	6,92
	5	13923,6	17,04	17,24	66,30	0,57
	6	13308	14,72	14,78	69,40	-1,10
	7	13737,6	16,86	16,85	66,93	0,64
	8	13339,6	16,99	18,43	65,09	0,51
	9	13685,2	16,76	19,14	64,79	0,70
	10	13928	17,73	20,68	62,71	1,12
Rata-rata			16,17	19,06	67,83	3,06

Gambar 27. Kontribusi PV dan Suplai PLN terhadap Beban Konsumen

Untuk kontribusi PV sendiri November 2023 hingga November 2024 sebelum dilakukan perbaikan untuk PV1 dan PV2 terdapat selisih cukup signifikan, PV 1 dengan rata - rata kontribusinya hanya 14,03% sedangkan PV2 rata - rata kontribusinya adalah 18,72% dengan total kontribusi PV1 dan PV2 adalah 32,75% sedangkan kontribusi dari sisi suplai PLN adalah 67,25%. Setelah dilakukan perbaikan mulai Desember 2024 hingga Oktober 2025 mengalami peningkatan rata-rata kontribusi PV1 adalah 18,70%, PV2 dengan 19,47%, dengan total kontribusi total PV 38,17% sedangkan suplai PLN menjadi 61,83%

Untuk CUF hanya dipengaruhi oleh produksi PLTS dan monitoringnya datanya, tetapi dalam segi pemanfaatan juga perlu dianalisis karena akan berbeda tipikal konsumsi penggunaan listrik sehari-harinya. Dalam penelitian ini dapat dianalisa juga seberapa banyak produksi energi listrik dari sistem PLTS yang bisa diserap oleh beban konsumen dibandingkan dengan energi yang terkirim ke *grid* PLN. Data tersebut dapat dianalisis dengan membandingkan produksi PV dari Web base PLTS dengan data kWh Ekspor Impor PLN, dimana Ekspor berarti energi yang dihasilkan PLTS terkirim ke *grid* PLN karena adanya kelebihan produksi energi listrik dari PLTS dibandingkan beban konsumen sendiri, sedangkan impor merupakan kekurangan produk energi listrik sehingga *grid* PLN memberikan suplai ke beban konsumen karena kekurangan suplai dari PLTS.

Tahun	Bulan	Produksi Listrik PV terhadap Beban	
		Energi Terserap (%)= (Produksi PV - Ekspor PLN) / Produksi PV	Energi Tidak Terserap (%) = Ekspor PLN / Produksi PV
2023	11	98,08	1,92
	12	97,32	2,68
2024	1	93,90	6,10
	2	95,02	4,98
	3	95,98	4,02
	4	94,33	5,67
	5	98,83	1,17
	6	99,02	0,98
	7	99,53	0,47
	8	99,51	0,49
	9	98,27	1,73
	10	99,11	0,89
	11	96,07	3,93
	12	93,23	6,77
2025	1	91,12	8,88
	2	92,89	7,11
	3	89,58	10,42
	4	95,55	4,45
	5	97,57	2,43
	6	98,85	1,15
	7	98,17	1,83
	8	97,53	2,47
	9	97,48	2,52
	10	96,48	3,52
Rata-rata		96,39	3,61

Gambar 28. Serapan produksi PLTS pada beban konsumen

Dapat dilihat bahwa dari produksi PV rata - rata energi listrik mulai 11-2023 hingga 10-2025 yang diproduksi PV 96,39% akan diserap oleh beban konsumen, sedangkan 3,61% terkirim ke *grid* PLN. Dimana sebelum dilakukan perbaikan energi listrik PV terserap ke beban konsumen adalah 97,31% dan 2,69% terkirim ke *grid* PLN. Sedangkan setelah dilakukan perbaikan energi listrik PV yang terserap hanya 95,31% dan yang terkirim ke *grid* adalah 4,69%.

Dari kondisi di atas penyerapan produksi PV dapat menurun disebabkan karena adanya waktu libur operasional di kantor Marketing yang menyebabkan produksi energi listrik tidak terserap dan tidak maksimal dimanfaatkan untuk mengurangi listrik yang disuplai oleh PLN. Dimana penyerapan energi produksi PLTS di bulan Januari dan Maret 2025 yang paling rendah hanya 91,12% dan 89,58% karena sisanya energi listrik tersebut banyak terkirim ke *grid* PLN

Tahun	Bulan	Gangguan Monitoring Data (Internet)				CUF				Kondisi
		Tidak ada data produksi inverter 1	Tidak ada data produksi inverter 2	Produksi berbeda jauh inverter 1	Produksi berbeda jauh inverter 2	Inv 1	Inv 2	Deviasi	Rata-Rata	
2021	8				1	13,27%	13,58%	-0,31%	-0,04%	Normal
	9				2	14,12%	14,66%	-0,55%		
	10				1	13,76%	14,16%	-0,40%		
	11				1	13,48%	13,72%	-0,24%		
	12			1		13,90%	14,14%	-0,24%		
2022	1			1		14,40%	14,59%	-0,20%		
	2			4		12,94%	12,97%	-0,03%		
	3	6	6			10,70%	10,69%	0,01%		
	4			1	3	14,15%	14,45%	-0,30%		
	5				1	11,81%	11,74%	0,08%		
	6					10,48%	10,22%	0,26%		
	7					10,82%	10,59%	0,22%		
	8					12,49%	12,45%	0,03%		
	9				1	12,25%	12,45%	-0,20%		
	10					12,27%	12,36%	-0,09%		
	11			2		12,49%	12,18%	0,31%		
	12					11,58%	11,08%	0,51%		
2023	1					12,23%	11,81%	0,43%	-3,00%	Adanya gangguan di 1 string Inverter-1
	2			1		11,70%	12,81%	-1,11%		
	3					10,27%	13,96%	-3,69%		
	4			1	1	10,70%	14,39%	-3,69%		
	5					9,10%	11,79%	-2,70%		
	6			1	2	8,20%	10,51%	-2,31%		
	7				2	9,05%	11,65%	-2,60%		
	8			1		9,71%	12,90%	-3,20%		
	9			1	1	10,82%	14,86%	-4,04%		
	10				2	10,08%	14,06%	-3,97%		
	11				3	8,21%	11,38%	-3,17%		
	12	9	9	1		9,01%	12,54%	-3,53%		
2024	1	2	2	2		9,90%	14,00%	-4,09%		
	2					10,60%	14,76%	-4,17%		
	3					9,27%	12,90%	-3,63%		
	4		1		1	8,63%	11,72%	-3,09%		
	5		8		4	7,98%	7,33%	0,65%		
	6		15			8,20%	10,27%	-2,08%		
	7				1	8,51%	10,74%	-2,23%		
	8					9,32%	12,10%	-2,78%		
	9					9,53%	12,92%	-3,38%		
	10					9,84%	13,95%	-4,11%		
	11					8,44%	11,47%	-3,03%		
	12					11,34%	11,78%	-0,44%		
2025	1	15	15	2		6,01%	7,30%	-1,29%	-0,26%	Setelah Diperbaiki
	2					11,60%	11,77%	-0,18%		
	3					12,62%	12,55%	0,06%		
	4	1	1			11,24%	11,21%	0,02%		
	5					10,64%	10,85%	-0,21%		
	6	1	1			8,79%	8,83%	-0,04%		
	7					10,39%	10,38%	0,01%		

Gambar 29. Tabel perbandingan gangguan dan kinerja CUF 2021 - 2025

Pada tahun Agustus 2021 sampai Januari 2023 rata-rata deviasi antara inverter 1 dan 2 berada di angka 0,04% dengan rata-rata CUF inverter 1 adalah 12,62% sedangkan Inverter 2 12,66%. Pada tabel di atas pada periode saat mulai terjadi gangguan string pada Inverter 1 yaitu mulai periode Februari 2023 hingga November 2024 dimana terjadi lonjakan deviasi yang besar antara Inverter 1 dan 2 yang disebabkan menurunnya produksi Inverter 1 karena ada gangguan 1 string yang tidak menyuplai, dengan rata-rata deviasi selama periode tersebut mencapai 3%. Kemudian pada tabel diatas saat sudah mulai dilakukan perbaikan pada Inverter 1 mulai periode Desember 2024 sampai Juni 2025 data terakhir terjadi peningkatan pada kinerja kinerja CUF di Inverter 1 dengan rata-rata CUF 10,33% meningkat sebesar 12,97% dibandingkan periode sebelumnya dengan deviasi rata-rata dengan Inverter 2 adalah 0,26% selama periode tersebut dan untuk Inverter 2 rata-rata CUF adalah 10,58% turun 14,71% dibandingkan dengan periode sebelumnya.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam penelitian pada PLTS atap yang terpasang dengan kapasitas 59,94 kWp di area komersial, Kontribusi PV sejak November 2023 hingga November 2024 sebelum dilakukan perbaikan untuk PV1 dan PV2 terdapat selisih cukup signifikan, PV 1 dengan rata - rata kontribusinya hanya 14,03% sedangkan PV2 rata - rata kontribusinya adalah 18,72% dengan total kontribusi PV1 dan PV2 adalah 32,75% sedangkan kontribusi dari sisi suplai PLN adalah 67,25%. Setelah dilakukan perbaikan mulai Desember 2024 hingga Oktober 2025 mengalami peningkatan rata-rata kontribusi PV1 adalah 18,70%, PV2 dengan 19,47%, dengan total kontribusi total PV 38,17% sedangkan suplai PLN menjadi 61,83%. Dari sisi ekonomi dianalisis biaya investasi dan alur kas selama investasi PLTS setelah perbaikan dengan biaya investasi awal dan operasional yang dibutuhkan sebesar Rp 1.137.780.000,- maka *payback period* yang diperlukan adalah 25 tahun. Dengan proyeksi keuangan selama 25 tahun, didapatkan nilai NPV sebesar Rp10.727.123,- dan LCOE sebesar Rp 791,59/kWh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Artikel ilmiah ini merupakan bagian dan luaran dari penelitian Tesis penulis di Program Studi Magister Teknik Elektro, IT PLN. Penulis menyampaikan terima kasih kepada para dosen pembimbing dan tim penguji atas arahan, kritik, dan saran yang membangun hingga artikel ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR REFERENSI

- Assiddiq, H. (2019). Analisis pengaruh perubahan temperatur panel terhadap daya dan efisiensi keluaran sel surya polycrystalline. *Dinamika: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 11(1), 33–39. <https://doi.org/10.33772/djitm.v11i1.9285>
- Bansal, N., Pany, P., & Singh, G. (2021). Visual degradation and performance evaluation of utility-scale solar photovoltaic power plant in hot and dry climate. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101010.
- Febriana, A. H., Mulyana, E., & Trisno, B. (2024). Evaluasi kinerja sistem pembangkit listrik tenaga surya hybrid pada Gedung Centre of Excellence Universitas Pendidikan Indonesia. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 31–39.
- Fikri, M., Makkulau, A., Nurwahyudi, A., & Samsurizal. (2024). Optimasi daya keluaran PLTS berdasarkan sudut kemiringan di Institut Teknologi PLN Jakarta. *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 18(1), 30–32.
- Jumpon, E. G., Pravitasari, D. P., & Kurniawan, A. A. (2024). Performance pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap berkapasitas 1,1 MWp di industri dalam konteks peningkatan kemandirian energi dan pengurangan biaya operasional. *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 7(1).

- Julian, B. R. (2023). Analisis pengaruh radiasi matahari dan temperatur terhadap daya keluaran fotovoltaik menggunakan SPSS. *AJEETECH*, 3(1).
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2021). *Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2021–2030*.
- Martha, G. A. R., Giriantari, I. A. D., & Sukerayasa, I. W. (2022). Studi performance PLTS rooftop 3 kWp frameless with on-grid system di lingkungan Perumahan Kori Nuansa Jimbaran. *Jurnal Indonesia Sosial Sains*, 3(2), 268–280.
- Mukromin, R. I. (2020). *Prediksi daya panel surya kapasitas 50 Wp menggunakan model regresi linier majemuk*. ResearchGate.
- Mukromin, R. I. (2020). Prediksi daya panel surya kapasitas 50 Wp menggunakan model regresi linier majemuk. *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*, 10(2), 58–65.
- Nugroho, R. A., Winardi, B., & Sudjadi. (2021). Perancangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) hybrid di Gedung ICT Universitas Diponegoro menggunakan software PVsyst 7.0. *TRANSIENT*, 10, 377–383.
- Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 3(1), 1167990.
- Panjaitan, K. R., Giriantari, I. A. D., & Setiawan, I. N. (2023). Analisis unjuk kerja PLTS carport 37,8 kWp di area perkantoran Kementerian ESDM Republik Indonesia Jakarta Pusat. *SPEKTRUM*, 10(1), 25–31.
- Stackhouse, P. W., Whitlock, C. H., & Hoell, J. M. (2018). The Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) Project: A NASA contribution to the renewable energy sector. *American Meteorological Society*.
- Wibowo, F. F. (2019). Efek penempatan panel surya terhadap produksi energi pembangkit listrik tenaga surya Cirata 1 MW. *e-Proceeding of Engineering*.