

## **PERFORMANCE PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ATAP BERKAPASITAS 1,1 MWP DI INDUSTRI DALAM KONTEKS PENINGKATAN KEMANDIRIAN ENERGI DAN PENGURANGAN BIAYA OPERASIONAL**

Ewaldo Gavra Jumpon<sup>1</sup>, Deria Pravitasari<sup>2</sup>, Andriyatna Agung Kurniawan<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tidar  
Jl. Kapten Suparman No.39, Potrobangsari, Kec. Magelang Utara, Kota Magelang,  
Jawa Tengah 56116  
e-mail: ewaldo.gavra.jumpon@students.untidar.ac.id<sup>1</sup>, deria.pravitasari@untidar.ac.id<sup>2</sup>,  
andriyatna@untidar.ac.id<sup>3</sup>

### **ABSTRAK**

Sektor industri merupakan salah satu konsumen energi terbesar di dunia dan di Indonesia, sektor ini menyumbang sebagian besar konsumsi energi nasional. Hal tersebut mendorong peningkatan perhatian terhadap sumber energi terbarukan pada sektor industri, salah satunya PLTS. Analisis *performance* PLTS 1,1 MWp di industri dalam periode satu tahun dilakukan untuk mengetahui tingkat keoptimalan dari sistem. Parameter *performance* berdasarkan standar IEC 61724 terdiri dari *yield factor* (yf), *reference yield* (yr), *Performance Ratio* (PR), dan *Capacity Utilization Factor* (CUF). Sistem kemudian disimulasikan menggunakan perangkat lunak PVsyst sebagai perbandingan kemudian dilakukan perhitungan penurunan emisi serta analisis keekonomian. Sistem PLTS 1,1 MWp ini telah menghasilkan energi sebesar 1.523.540 kWh pada tahun 2023. Hasil *yield factor*, *reference yield*, *Performance Ratio*, dan *Capacity Utilization Factor* berturut-turut adalah 112,36 h/month, 143,5 h/month, 78,13%, dan 15,38%. Hasil produksi energi simulasi PVsyst memiliki nilai yang lebih besar sebanyak 154,160 kWh. Selama satu tahun, pemanfaatan PLTS ini berdampak untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub> hingga 1.538,8 tonCO<sub>2</sub>eq. Biaya investasi awal yang dibutuhkan sebesar Rp9.950.728.907 dengan *payback period* selama 7,1 tahun. Dengan proyeksi keuangan selama 25 tahun, didapatkan nilai NPV sebesar Rp10.482.503.414 dan LCOE sebesar Rp348,59/kWh. Selama tahun 2023, pemanfaatan PLTS mampu menghemat biaya listrik hingga Rp1.698.350.980.

**Kata kunci** : *performance*, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), IEC 61724, PVsyst, analisis keekonomian

### **ABSTRACT**

*The industrial sector is one of the largest energy consumers in the world, and in Indonesia, this sector accounts for a significant portion of national energy consumption. This has led to increased attention towards renewable energy sources in the industrial sector, one of which is solar power plants. An analysis of the performance of a 1.1 MWp solar power plant in the industry over a one-year period was conducted to determine the system's optimality level. The performance parameters based on IEC 61724 standards consist of yield factor (Yf), reference yield (Yr), Performance Ratio (PR), and Capacity Utilization Factor (CUF). The system was then simulated using PVsyst software for comparison, followed by emission reduction calculations and economic analysis. This 1.1 MWp solar power plant system produced 1,523,540 kWh of energy in 2023. The yield factor, reference yield, Performance Ratio, and Capacity Utilization Factor were 112.36 h/month, 143.5 h/month, 78.13%, and 15.38%, respectively. The simulated energy production using PVsyst was higher by 154,160 kWh. Over one year, the utilization of this PLTS reduced CO<sub>2</sub> emissions by up to 1,538.8 tons CO<sub>2</sub>eq. The initial investment cost required was Rp9,950,728,907 with a payback period of 7.1 years. With a financial projection over 25 years, the NPV value was Rp10,482,503,414 and the LCOE was Rp348.59/kWh. During 2023, the use of solar power plant saved electricity costs up to Rp1,698,350,980.*

**Keywords** : *performance, solar power plant (PLTS), IEC 61724, PVsyst, economic analysis*

## I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk dan kebutuhan masing-masing individu telah meningkat secara drastis selama beberapa tahun terakhir. Menurut Rancangan Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) tahun 2021, pertumbuhan kebutuhan energi listrik diperkirakan akan meningkat 4,9% per tahun. Sumber energi terbarukan memiliki porsi yang lebih besar dari energi fosil dalam memenuhi pertumbuhan penyediaan energi listrik. Rencana pembangunan pembangkit listrik menurut RUPTL tahun 2021 mencapai 40.575 MW, dengan rincian 20.923 MW atau setara dengan 51,6% berasal dari energi terbarukan, dan 19.652 MW atau 48,4% berasal dari energi fosil.

Data Kementerian ESDM pada tahun 2021 menunjukkan adanya peningkatan yang signifikan dari tahun 2020 hingga tahun 2021. Menurut data tahun 2020, kapasitas penggunaan PLTS adalah 168,3 MW yang meningkat menjadi 195,4 MW. Kenaikan penggunaan PLTS memerlukan evaluasi *performance* Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk menilai performa PLTS dalam jangka waktu tertentu, mengurangi emisi CO<sub>2</sub>, serta mengevaluasi nilai investasi dari sistem yang sudah ada [1].

Penelitian mengenai analisis *performance* PLTS sebelumnya telah dilakukan di tempat lain dengan membandingkan kondisi aktual dengan hasil simulasi. Analisis *performance* yang dilakukan pada sistem PLTS *carport* di Jakarta, didapatkan hasil energi aktual selama tahun 2021 sebesar 21.694,67 kWh, dengan nilai *yf*, *yr*, *PR*, dan *CUF* sebesar 573 kWh/kWp, 1.679,9 kWh/kW, 34% dan 6,6%. Hasil berbeda ditunjukkan pada hasil simulasi menggunakan PVsyst, didapatkan produksi energi sebesar 53.910 kWh dengan nilai *yf*, *yr*, *PR*, dan *CUF* sebesar 1.426,19 kWh/kWp, 1.751,9 kWh/kW, 81,4% dan 16% [2].

Produksi energi dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) bergantung pada berbagai faktor. Beberapa faktor yang memengaruhi produksi PLTS meliputi tingkat radiasi matahari, suhu, penumbraan, dan kemiringan panel surya. Hal-hal ini berperan penting dalam menentukan efisiensi dan *performance* keseluruhan dari sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya. Selain itu, faktor-faktor tersebut juga memengaruhi potensi energi yang dapat dihasilkan oleh PLTS dalam kondisi tertentu. Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap variabel-variabel ini penting dalam merancang, mengoptimalkan, dan memelihara sistem PLTS [3].

Saat melakukan evaluasi ekonomi terhadap sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), terdapat beberapa indikator yang umumnya digunakan. Indikator tersebut meliputi Periode Pengembalian Investasi *Payback Period* (PP), *Net Present Value* (NPV) Penggunaan indikator-indikator ini memungkinkan untuk mengukur kelayakan ekonomi dari investasi dalam PLTS, serta membantu dalam

pengambilan keputusan terkait proyek-proyek energi terbarukan. Setiap indikator memiliki peran dan metode perhitungan yang berbeda-beda, sehingga pemilihan indikator yang tepat sangat penting untuk memperoleh pemahaman yang holistik terhadap aspek ekonomi dari sistem PLTS.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis *performance* dan menentukan keoptimalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap. Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini memanfaatkan metode dan standar khusus yang telah diakui dalam dunia teknik, dengan fokus utama pada parameter-parameter IEC 61724 yang melibatkan beberapa parameter performa sistem PLTS, dan aspek penurunan emisi serta potensi penghematan ekonomi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi yang tepat guna pengambilan keputusan strategis terkait implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di sektor industri, dengan potensi untuk menjadi acuan bagi perusahaan lain dalam mengadopsi teknologi terbarukan untuk mencapai target pertumbuhan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).

## II. LANDASAN TEORI

### A. Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya adalah sebuah pembangkit listrik yang menggunakan radiasi matahari sebagai sumbernya dengan konversi sel fotovoltaik. Semakin besar tingkat radiasi matahari yang diterima oleh sel fotovoltaik, semakin besar produksi energi listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS. PLTS merupakan pilihan pembangkit listrik berbasis energi ramah lingkungan yang sangat potensial di Indonesia, mengingat letak geografisnya yang berada di daerah tropis. Pada tahun 2021, Indonesia memiliki potensi energi surya hingga mencapai 400 MW.

Penggunaan PLTS saat ini banyak diterapkan melalui PLTS Atap. PLTS Atap merupakan proses menghasilkan listrik dengan menggunakan modul fotovoltaik yang ditempatkan di dinding, atap, atau bagian lain dari suatu gedung. Namun, dalam pemanfaatan PLTS, perlu diperhatikan bahwa sumber energi surya tidak selalu tersedia atau memiliki sifat intermiten yang dapat mempengaruhi produksi listrik. Hal ini dapat disebabkan oleh ketiadaan sinar matahari pada malam hari, kondisi langit yang berawan, atau adanya obyek lain yang menghalangi panel surya [4].

### B. Parameter Analisis Performa IEC 61724

Menurut standar IEC 61724, terdapat parameter-parameter yang dapat digunakan untuk menganalisis *performance* sistem PLTS. Parameter tersebut antara lain *yield factor* (*yf*), *reference yield* (*yr*), *Performance Ratio* (*PR*), dan *Capacity Utilization Factor* (*CUF*) [5].

1. *Yield factor* (yf)

*Yield factor* atau faktor hasil dari sebuah sistem PLTS, adalah sebuah parameter yang menentukan jumlah energi AC yang dihasilkan per kWp kapasitas daya maksimal array PLTS yang dipasang dengan *Standart Test Condition*, yaitu *irradiance* 1kW/m<sup>2</sup> dan suhu 25°C.

$$Yf = \frac{E_{AC}}{P_{PV}} \left( \frac{kWh_{AC}}{kW_{pDC}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

keterangan:

E<sub>AC</sub> : keluaran energi AC ke jaringan (kWh<sub>AC</sub>);  
P<sub>PV</sub> : kapasitas maksimum PLTS (kWp<sub>DC</sub>).

2. *Reference yield* (yr)

*Reference yield* adalah besaran radiasi matahari yang diserap oleh bidang array dalam satuan kWh/m<sup>2</sup>, dibagi dengan *irradiance* array pada kondisi *Standart Test Condition* sebesar 1kW/m<sup>2</sup>.

$$Yr = \frac{HT}{G_{STC}} \left( \frac{kWh}{kW} \right) \dots \dots \dots (2)$$

keterangan:

HT : *irradiance* pada bidang array (kWh/m<sup>2</sup>);  
G<sub>STC</sub> : *irradiance* kondisi STC (1kW/m<sup>2</sup>).

3. *Performance Ratio* (PR)

*Performance ratio* merupakan parameter kinerja suatu sistem PLTS dalam mengkonversi energi surya menjadi energi listrik [6].

$$PR = \frac{Yf}{Yr} \times 100\% \dots \dots \dots (3)$$

keterangan:

Yf : *yield factor* (kWh/kWp);  
Yr : *reference yield* (kWh/kW).

4. *Capacity Utilization Factor* (CUF)

*Capacity utilization factor* (CUF) adalah rasio *performance* sistem PLTS yang menunjukkan efisiensi sistem dalam menghasilkan energi listrik dalam suatu periode.

$$CUF = \frac{Y_f}{24h \times T} \dots \dots \dots (4)$$

Y<sub>f</sub> : *final yield* (kWh/kWp) (h);  
T : periode waktu sistem (day).

C. **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 CO<sub>2</sub> yang tidak dilepaskan saat menggunakan pengganti pembangkit berbahan bakar fosil.

$$CO_2 \text{ Emmision} = Energy(kWh) \times EF \left( \frac{kg}{kWh} \right) \dots \dots \dots (5)$$

keterangan :

EF : Emission Factor

D. **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*) [7].

1. *Payback period*

*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*.

$$Payback \ period = \frac{initial \ investment}{cash \ in \ flows} \dots (6)$$

2. *Net Present Value*

*Net present value* 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.

$$NPV = \sum \frac{Ci}{(1+r)^i} - initial \ investment \dots (7)$$

keterangan:

Ci : alur kas period ke-n;  
r : *interest rate*;  
i : tahun.

3. *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.

$$LCOE = \frac{Annual \ (Cost)}{Average \ (Output)} \dots \dots \dots (8)$$

E. **Perhitungan Optimal PLTS**

Perhitungan nilai optimal PLTS ditentukan oleh besarnya nilai *Performance Ratio* (PR). *Performance Ratio* (PR) adalah perbandingan antara energi listrik AC yang dihasilkan oleh pembangkit dengan hasil yang diestimasi secara teoretis dari pembangkit tersebut jika modul mengubah *irradiance* yang diterima menjadi energi listrik sesuai dengan

kapasitasnya. Estimasi ini menggunakan data *irradiance* yang sesuai dengan kondisi aktual.

*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 *irradiance* menjadi energi listrik [8].

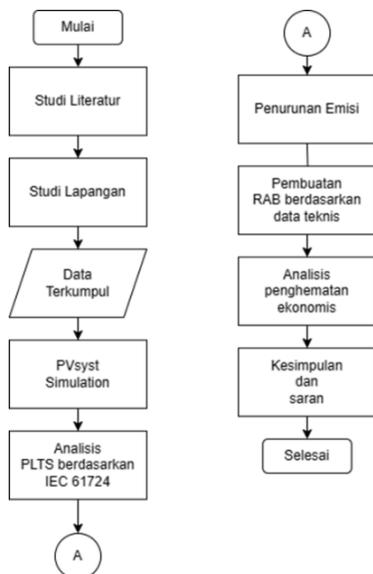
### III. METODE

#### A. Objek Penelitian

Objek penelitian yang digunakan adalah bangunan yang memiliki PLTS atap bersistem *on-grid* yang sudah berjalan selama beberapa tahun. Penelitian dilakukan di salah satu industri otomotif yang terletak di Kawasan Industri Mitra Karawang, Parungmulya, Kecamatan Ciampel, Karawang, Jawa Barat.

#### B. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian digunakan sebagai basis alir kerja dari penelitian yang akan di dilakukan. Tahapan penelitian terdapat dalam diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Keadaan geografis dan lingkungan sekitar Pembangkit Listrik Tenaga Surya memiliki dampak yang signifikan terhadap hasil energi yang dihasilkan. Panel surya yang terletak di kawasan industri dengan tingkat polusi udara yang tinggi akan meningkatkan potensi penempelan debu pada panel. Menurut data IQAir pada tahun 2023, Karawang menjadi daerah dengan indeks polusi udara yang paling tinggi diantara

daerah-daerah lain yang ada di Indonesia. Tingkat pencemaran udara yang tinggi dapat mempengaruhi tingkat radiasi yang diterima dari matahari.

Penurunan hasil energi dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya juga dapat disebabkan oleh temperatur dan durasi siang hari (matahari terbit hingga terbenam) pada lokasi PLTS. Menurut data dari weatherspark.com pada tahun 2023 temperatur di Kabupaten Karawang memiliki temperatur yang rendah pada periode Januari hingga Februari dan temperatur yang tinggi pada periode September hingga awal November. Sementara untuk durasi siang hari di Kabupaten Karawang, durasi tersingkat terdapat pada periode Mei hingga Juli dengan durasi rata-rata selama 11 jam 45 menit dengan durasi terlama pada periode Desember dengan rata-rata durasi selama 12 jam 30 menit.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dipasang pada atap gedung dengan jenis alumunium dengan kemiringan atap yaitu  $11^\circ$ . Area atap yang terpasang PLTS menghadap arah barat daya dan timur laut. Luas area atap keseluruhan adalah  $25.500 \text{ m}^2$  dengan luas area yang terpasang PLTS adalah  $9.210 \text{ m}^2$ . *Layout* panel surya yang terpasang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. *Layout* PLTS

Panel surya yang dipakai adalah Jinko Solar 460 Wp JKM460M-7RL3-V sejumlah 2.458 unit dengan struktur monokristalin. Sementara *inverter* yang digunakan dalam sistem PLTS atap *on-grid* ini yaitu Huawei SUN2000-100KTL-M1 berjumlah 8 unit dan Huawei SUN2000-36KTL-M3 berjumlah 1 unit. *Inverter* Huawei SUN2000-36KTL-M3 memiliki kapasitas yang lebih kecil dan jumlah yang lebih sedikit dibandingkan dengan *inverter* Huawei SUN2000-100KTL-M1.

#### A. Produksi Energi PLTS

Data energi PLTS diambil dalam rentang 12 bulan dimulai dari Januari 2023 hingga Desember 2023 dengan total energi sebesar 1.523.540 kWh Hasil produksi energi dari sistem PLTS ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil energi PLTS

Bulan	Energi Aktual (kWh)
Januari	121.650
Februari	100.390
Maret	127.310
April	133.280
Mei	115.020
Juni	116.590
Juli	128.130
Agustus	139.380
September	143.900
Oktober	155.370
November	121.660
Desember	120.860
<b>Total</b>	<b>1.523.540</b>

### B. Produksi Energi Simulasi

Total energi yang dihasilkan pada simulasi sebesar 1.677.700 kWh, lebih besar 154,160 kWh dibandingkan dengan kondisi aktual. Energi yang dihasilkan oleh sistem berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst 7.2 ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil energi PLTS berdasarkan simulasi

Bulan	Energi Simulasi (kWh)
Januari	110.800
Februari	128.200
Maret	132.600
April	140.600
Mei	146.500
Juni	143.900
Juli	155.700
Agustus	158.900
September	155.500
Oktober	156.500
November	126.300
Desember	122.100
<b>Total</b>	<b>1.677.700</b>

### C. Analisis Performance Kondisi Aktual

Berdasarkan produksi energi selama 12 bulan pada tahun 2023, dilakukan analisis *performance* sesuai dengan kondisi aktual. Parameter yang digunakan

untuk analisis antara lain *yield Factor* (yf), *reference yield* (yr), *Performance Ratio* (PR), dan *Capacity Utilization Factor* (CUF). Hasil perhitungan *performance* ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Performance PLTS kondisi aktual

Bulan	yf	yr	PR	CUF
Januari	107,65	135	79,74%	14,47%
Februari	88,84	126	70,51%	13,22%
Maret	112,66	152	74,12%	15,14%
April	117,95	145	81,34%	16,38%
Mei	101,79	146	69,72%	13,68%
Juni	103,18	134	77,00%	14,33%
Juli	113,39	144	78,74%	15,24%
Agustus	123,35	153	80,62%	16,58%
September	127,35	152	83,78%	17,69%
Oktober	137,5	158	87,02%	18,48%
November	107,66	136	79,16%	14,95%
Desember	106,96	141	75,86%	14,38%
<b>Total</b>	<b>1348,27</b>	<b>1722</b>	<b>78,13%</b>	<b>15,38%</b>
<b>Rata-rata</b>	<b>112,36</b>	<b>143,5</b>		

### D. Analisis Performance Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan untuk mengetahui estimasi energi selama 12 bulan dari sistem PLTS. Hasil simulasi menggunakan PVsyst digunakan sebagai perbandingan dengan kondisi aktual dari *performance* PLTS. Berdasarkan hasil estimasi energi selama 12 bulan, dilakukan analisis *performance* sesuai dengan data estimasi energi dengan menggunakan PVsyst 7.2. Hasil perhitungan *performance* simulasi ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Performance PLTS hasil simulasi

Bulan	yf	yr	PR	CUF
Januari	97,28	117,9	82,51%	13,08%
Februari	112,55	136,6	82,40%	16,75%
Maret	116,42	142,1	81,93%	15,65%
April	123,44	150,3	82,13%	17,14%
Mei	128,62	156	82,45%	17,29%
Juni	126,34	153	82,57%	17,55%
Juli	136,7	165,5	82,60%	18,37%
Agustus	139,51	169,2	82,45%	18,75%
September	136,52	167	81,75%	18,96%
Oktober	137,4	167,8	81,88%	18,47%
November	110,89	134,5	82,44%	15,40%
Desember	107,2	129,5	82,78%	14,41%
<b>Total</b>	<b>1472,87</b>	<b>1789,4</b>	<b>82,32%</b>	<b>16,82%</b>
<b>Rata-rata</b>	<b>122,74</b>	<b>149,12</b>		

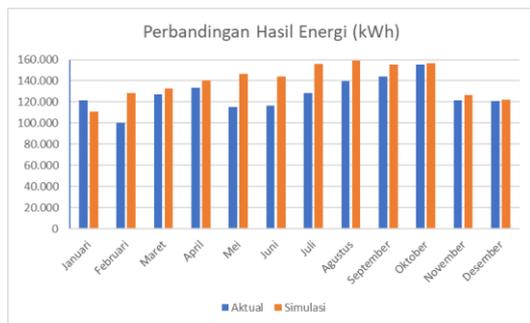
### E. Perbandingan Analisis Performance

Perbandingan dilakukan untuk mengetahui tingkat kemiripan sistem yang dipasang dengan estimasi energi yang disimulasikan menggunakan PVsyst.

Perbandingan ini menunjukkan bahwa sistem estimasi energi cukup mirip dengan energi aktual yang dihasilkan oleh sistem. Perbandingan performa bertujuan untuk memberikan data yang berguna untuk menjaga tingkat *performance* sistem PLTS.

### 1. Hasil Energi

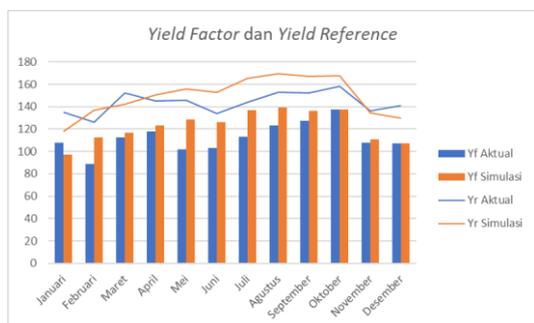
Pada kondisi aktual, sistem PLTS menghasilkan total energi sebesar 1.523.540 kWh sementara hasil estimasi melalui simulasi PVsyst sistem menghasilkan total energi sebesar 1.677.700 kWh. Perbedaan total energi yang dihasilkan oleh sistem PLTS secara aktual dengan simulasi adalah sebesar 154,160 kWh. Grafik perbandingan energi ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik perbandingan hasil energi

### 2. Yield factor (yf)

*Yield factor* pada kondisi aktualnya selama 12 bulan memiliki total nilai sebesar 1348,27 h/year dengan nilai rata-rata sebesar 112,36 h/month. Sementara untuk *yield factor* hasil dari simulasi memiliki total nilai sebesar 1472,87 h/year dengan nilai rata-rata sebesar 122,74 h/month. Selisih nilai total *yield factor* antara kondisi aktual dengan hasil simulasi adalah sebesar 124,6 h/year dan selisih nilai rata-rata sebesar 10,38 h/month. Grafik perbandingan *yield factor* ditunjukkan pada Gambar 4.

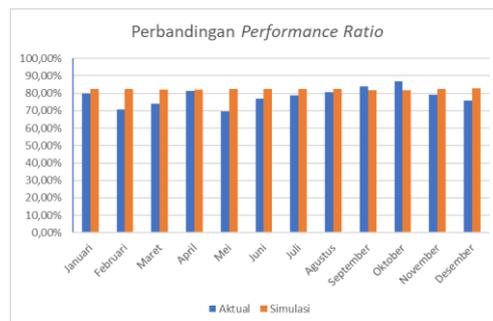


Gambar 4. Perbandingan nilai *yield factor* dan *yield reference*

### 3. Performance Ratio (PR)

Nilai *Performance Ratio* menunjukkan kemampuan sistem dalam mengubah radiasi matahari menjadi

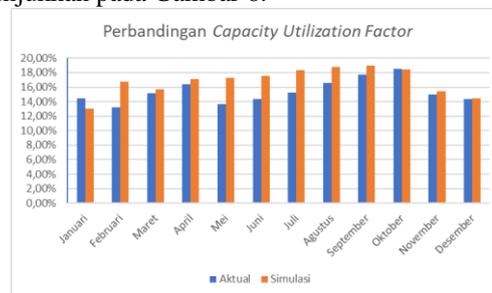
energi listrik. *Performance Ratio* rata-rata tahunan pada kondisi aktual memiliki nilai sebesar 78,13%, sedangkan untuk rata-rata tahunan simulasi memiliki nilai sebesar 82,32%. Grafik perbandingan nilai *Performance Ratio* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan nilai *Performance Ratio*

### 4. Capacity Utilization Factor (CUF)

Nilai *Capacity Utilization Factor* antara kondisi aktual dan hasil simulasi memiliki selisih nilai rata-rata sebesar 1,44% dengan nilai rata-rata aktual sebesar 15,38% dan nilai rata-rata hasil simulasi sebesar 16,82%. Perbandingan nilai *Capacity Utilization Factor* antara kondisi aktual dengan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan nilai *Capacity Utilization Factor*

## F. Penurunan Emisi

Hasil produksi energi listrik dari sistem PLTS berkapasitas 1,1 MWp ini selama 12 bulan pada tahun 2023 adalah sebesar 1.523.540 kWh. Berdasarkan hasil produksi energi listrik tersebut, dapat dihitung pengurangan emisi CO<sub>2</sub> dari penggunaan sistem PLTS. Faktor emisi yang digunakan didasarkan pada jenis bahan bakar dan jaringan listrik. Faktor emisi 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 kgCO<sub>2</sub>/kWh dan batubara jenis *sub-bituminous* yaitu 0,96 kgCO<sub>2</sub>/kWh. Perhitungan penurunan emisi CO<sub>2</sub> berdasarkan jenis bahan bakarnya ditunjukkan sebagai berikut:

*CO<sub>2</sub> Emission Potential Lignite Coal*

$$= 1.523.540 \text{ kWh} \times 1,01 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

$$= \mathbf{1.538,8 \text{ tonCO}_2\text{eq avoided}}$$

*CO<sub>2</sub> Emission Potential Sub – bitumious Coal*

$$= 1.523.540 \text{ kWh} \times 0,96 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

$$= \mathbf{1.462,6 \text{ tonCO}_2\text{eq avoided}}$$

Sistem PLTS ini terhubung dengan jaringan listrik Jamali (Jawa, Madura, Bali). Nilai faktor emisi jaringan listrik Jamali adalah sebesar 0,84 kg CO<sub>2</sub> per kWh. Perhitungan penurunan emisi CO<sub>2</sub> berdasarkan jenis jaringan listrik ditunjukkan sebagai berikut:

*CO<sub>2</sub> Emission Potential Jamali*

$$= 1.523.540 \text{ kWh} \times 0,84 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

$$= \mathbf{1.279,8 \text{ tonCO}_2\text{eq avoided}}$$

Perbandingan emisi CO<sub>2</sub> yang dihindarkan selama penggunaan PLTS tahun 2023 dengan daya serap CO<sub>2</sub> tanaman ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan daya serap CO<sub>2</sub> tanaman

No	Jenis Tanaman	Daya Serap CO <sub>2</sub> (Kg/pohon/tahun)	Jumlah Pohon (Lignite)	Jumlah Pohon (Sub-bitumious)	Jumlah Pohon (Jamali)
1	Trambesi	28.448,39	54	51	45
2	Cassia	5.295,47	291	276	242
3	Kenanga	756,59	2.034	1.933	1.692
4	Pingku	720,49	2.136	2.030	1.776
5	Beringin	535,9	2.871	2.729	2.388
6	Matoa	329,76	4.666	4.435	3.881
7	Mahoni	295,73	5.203	4.946	4.328
8	Saga	221,18	6.957	6.613	5.786
9	Bungkur	160,14	9.609	9.133	7.992
10	Jati	135,27	11.376	10.812	9.461
11	Nangka	126,51	12.163	11.561	10.116
12	Akasia	48,68	31.610	30.045	26.290

**G. Analisis Keekonomian Sistem**

Analisis lain yang penting dalam sistem PLTS adalah analisis keekonomian. Analisis dilakukan agar dalam penerapannya, sistem PLTS tersebut tidak mengakibatkan kerugian karena biaya yang dikeluarkan cukup tinggi. Total biaya keseluruhan yang dibutuhkan dalam instalasi sistem PLTS berkapasitas 1,1 MWp ini adalah Rp9.950.728.907. Analisis keekonomian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) melibatkan beberapa indikator penting seperti *Payback Period*, *Net Present Value* (NPV), *Levelized Cost of Electricity* (LCOE), dan penghematan bulanan.

1. *Payback Period*

*Payback Period* merupakan waktu yang dibutuhkan untuk pengembalian biaya investasi yang dikeluarkan melalui penghematan energi yang diperoleh. Nilai kas masuk didapat dari estimasi energi yang dihasilkan dengan degradasi panel sebesar 0,6% setiap tahun

dikalikan dengan tarif listrik golongan I3 senilai Rp1.114,74. Nilai OPEX (*operational expenditure*) sebagai kas keluar diasumsikan sebesar 1% dari biaya investasi awal PLTS. Tingkat diskonto sebesar 5,46% berdasarkan rata-rata suku bunga Bank Indonesia dalam 10 tahun terakhir. Perhitungan *payback period* ditunjukkan sebagai berikut:

$$PP = \text{Tahun sebelum PP} + \frac{\text{Kas sebelum PP}}{\text{Kas sesudah PP}}$$

$$= 7 + \frac{954.303.576}{10.002.029.864}$$

$$PP = \mathbf{7,1 \text{ Tahun}}$$

Berdasarkan perhitungan, didapatkan nilai *payback period* selama 7,1 tahun. Waktu tersebut menunjukkan waktu pengembalian modal investasi awal sistem PLTS ini terjadi pada tahun ke-7, jika sistem berjalan baik tanpa adanya penggantian komponen.

2. *Net Present Value* (NPV)

*Net Present Value* menghitung nilai kini dari kas masuk yang dihasilkan oleh PLTS sepanjang umur proyek, yang idealnya bernilai positif untuk menunjukkan profitabilitas. Perhitungan NPV dengan nilai diskonto sebesar 5,46% sesuai dengan rata-rata

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

$$= \left( \frac{Rp 1.609.033.796}{(1+5,46\%)^1} + \frac{Rp 1.598.843.691}{(1+5,46\%)^2} + \dots + \frac{Rp 1.379.309.210}{(1+5,46\%)^{25}} \right) - Rp 9.950.728.907$$

$$NPV = \mathbf{Rp10.482.503.414}$$

suku bunga Bank Indonesia selama 10 tahun terakhir, ditunjukkan sebagai berikut:

Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan nilai *Net Present Value* selama 25 tahun sebesar Rp10.482.503.414. Hal ini menunjukkan bahwa setelah mengurangi semua biaya, proyek PLTS akan memberikan keuntungan bersih sebesar Rp10.482.503.414 dalam nilai kini. Jumlah nilai kas masuk selama 25 tahun merupakan total biaya listrik yang dihemat sesuai dengan estimasi energi PLTS yaitu mencapai Rp39.776.437.741.

3. *Levelized Cost Of Electricity* (LCOE)

*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 1,1 MWp ini diharapkan dapat menghasilkan total energi sebesar 35.682.255 kWh selama 25 tahun, dengan memperhitungkan degradasi panel sebesar 0,6%. Total estimasi biaya yang dikeluarkan mulai dari biaya investasi awal hingga biaya operasional selama 25 tahun adalah Rp12.438.411.132. Perhitungan LCOE ditunjukkan sebagai berikut:

$$LCOE = \frac{\text{Annual (Cost)}}{\text{Average (Output)}} = \frac{Rp\ 12.438.411.132}{35.682.255\ kWh}$$

$$LCOE = \mathbf{Rp348,59/kWh}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan nilai LCOE sebesar Rp348,59/kWh. Nilai dari hasil perhitungan LCOE tersebut merupakan tarif yang dikeluarkan per kWh selama penggunaan PLTS. Tarif tersebut memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan LCOE PLTU yaitu 3 cent atau sebesar Rp491,30.

#### 4. Penghematan bulanan

Sistem PLTS 1,1 MWp ini telah menghasilkan total energi sebesar 1.523.540 kWh selama 12 bulan pada tahun 2023. Berdasarkan total energi yang dihasilkan tersebut, dapat diketahui penghematan tiap bulan dari penggunaan PLTS selama tahun 2023. Hasil penghematan tiap bulan dari penggunaan PLTS ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Penghematan bulanan PLTS tahun 2023

Bulan	Konsumsi Listrik (kWh)	Harga Listrik Tarif B	Biaya Listrik (Rp)	Output PLTS (kWh)	Biaya setelah menggunakan PLTS	Penghematan
Januari	930.300	Rp 1.114,74	Rp1.037.042.622	121.650	Rp 901.434.501	Rp 135.608.121
Februari	1.440.960	Rp 1.114,74	Rp1.606.295.750	100.390	Rp 1.494.387.002	Rp 111.908.749
Maret	1.933.020	Rp 1.114,74	Rp2.154.814.715	127.310	Rp 2.012.897.165	Rp 141.917.549
April	1.161.420	Rp 1.114,74	Rp1.294.681.331	133.280	Rp 1.146.108.784	Rp 148.572.547
Mei	1.998.360	Rp 1.114,74	Rp2.227.651.826	115.020	Rp 2.099.434.432	Rp 128.217.395
Juni	1.864.980	Rp 1.114,74	Rp2.078.967.805	116.590	Rp 1.949.000.269	Rp 129.967.537
Juli	2.087.220	Rp 1.114,74	Rp2.326.707.623	128.130	Rp 2.183.875.987	Rp 142.831.636
Agustus	2.139.240	Rp 1.114,74	Rp2.384.696.398	139.380	Rp 2.229.323.936	Rp 155.372.461
September	2.107.440	Rp 1.114,74	Rp2.349.247.666	143.900	Rp 2.188.836.580	Rp 160.411.086
Oktober	2.058.480	Rp 1.114,74	Rp2.294.669.995	155.370	Rp 2.121.472.841	Rp 173.197.154
November	2.077.080	Rp 1.114,74	Rp2.315.404.159	121.660	Rp 2.179.784.891	Rp 135.619.268
Desember	1.570.560	Rp 1.114,74	Rp1.750.766.054	120.860	Rp 1.616.038.578	Rp 134.727.476
<b>Rata-rata</b>						Rp 141.529.248
<b>Total</b>						Rp 1.698.350.980

Berdasarkan data pada Tabel 6, dapat diketahui bahwa dari penggunaan PLTS, perusahaan dapat menghemat biaya rata-rata sebesar Rp141.529.248 setiap bulannya dengan total penghematan biaya selama tahun 2023 sebesar Rp1.698.350.980.

#### V. KESIMPULAN

Analisis *performance* aktual PLTS 1,1 MWp di sebuah industri otomotif pada tahun 2023 didapatkan hasil *Performance Ratio* sebesar 78,13%, sedangkan hasil yang diperoleh pada simulasi PVsyst 7.2 didapatkan *Performance Ratio* sebesar 82,32%. Hasil *Performance Ratio* pada kondisi aktual dan simulasi PVsyst7.2 menunjukkan *performance* yang optimal sesuai dengan range standar *Performance Ratio* PLTS yaitu 75% hingga 85%. Sistem PLTS ini berdampak dalam pengurangan emisi hingga 1.538,8 tonCO<sub>2</sub>eq dalam satu tahun. Instalasi sistem PLTS ini membutuhkan biaya investasi awal sebesar Rp9.950.728.907. Dengan biaya investasi awal tersebut, pemanfaatan PLTS mampu menghemat biaya rata-rata sebesar Rp141.529.248 per bulan pada tahun 2023, dengan total penghematan biaya sepanjang tahun 2023 mencapai Rp1.698.350.980. Penggunaan PLTS mampu menghemat biaya listrik hingga total

Rp39.776.437.741 selama 25 tahun pemakaiannya sesuai dengan estimasi energi yang dihasilkan serta menghasilkan keuntungan bersih sesuai dengan nilai sekarang (*Net Present Value*) sebesar Rp10.482.503.414. Berdasarkan hasil analisis ekonomi didapatkan nilai *payback periode* selama 7,1 tahun dan *Levelized Cost of Electricity* sebesar Rp 348,59/kWh.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ramdhan, L., Pravitasari, D., & Kurniawan, A. A. (2023). KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ATAP ON-GRID RESIDENSIAL BERKAPASITAS 46,6 KWP SERPONG, TANGERANG. *THETA OMEGA: Journal of Electrical Engineering*.
- [2] Raffhel Panjaitan, K., Ayu Dwi Giriantari., Nyoman Setiawan, I. (2023). ANALISIS UNJUK KERJA PLTS CARPORT 37,8 KWP DI AREA PERKANTORAN KEMENTERIAN ESDM REPUBLIK INDONESIA JAKARTA PUSAT . *Jurnal SPEKTRUM*(Vol. 10, Issue 1).
- [3] Gunawan, N., Kumara, Irawati, R. (2019). UNJUK KERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) 26,4 KWP PADA SISTEM SMART MICROGRID UNUD. *Jurnal SPEKTRUM*, 6(3), 1-9.
- [4] Muis, S. K. Al, Pravitasari, D., & Setiawan, H. T. (2023). *PERANCANGAN ENERGY MANAGEMENT SYSTEM PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ATAP ON GRID*.
- [5] El Hacem Jed, M., Ihaddadene, R., Ihaddadene, N., Elhadji Sidi, C. Elb., & el Bah, M. (2020). *Performance analysis of 954,809 kWp PV array of Sheikh Zayed solar power plant (Nouakchott, Mauritania)*. *Renewable Energy Focus*, 32, 45–54. <https://doi.org/10.1016/J.REF.2019.11.002>
- [6] Ogliari, E., Dolara, A., Mazzeo, D., Manzolini, G. and Leva S. (2023). "Bifacial and Monofacial PV Systems Performance Assessment Based on IEC 61724-1 Standard," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 13, no. 5, pp. 756-763, Sept. 2023, doi: 10.1109/JPHOTOV.2023.3295869.
- [7] Abdul-Ganiyu, S., Quansah, D. A., Ramde, E. W., Seidu, R., & Adaramola, M. S. (2021). *Techno-economic analysis of solar photovoltaic (PV) and solar photovoltaic thermal (PVT) systems using exergy analysis. Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47.
- [8] Mertens, K. (2014). *Photovoltaics Fundamentals, Technology and Practice*.