

# Desain Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Bifacial*: Pendekatan Sudut Inklinasi

Haogqea Dhiyah Ayu<sup>1</sup>, Rishal Asri<sup>2\*</sup>, Putty Yunesti<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sistem Energi, Institut Teknologi Sumatera

<sup>1,2,3</sup>Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi. Kec. Jati Agung, Kab Lampung Selatan, Lampung 35365, Indonesia

E-mail: haogqea.120340015@student.itera.ac.id<sup>1</sup>, rishal.asri@tse.itera.ac.id<sup>2</sup>, putty.yunesti@tse.itera.ac.id<sup>3</sup>

## Abstrak

### Info Naskah:

Naskah masuk: 4 Juni 2024

Direvisi: 22 Juni 2024

Diterima: 7 Juli 2024

Pada era ini, kebutuhan energi meningkat seiring pertumbuhan populasi dan perkembangan teknologi. Energi merupakan kebutuhan pokok yang ketersediaannya semakin berkurang, sehingga dibutuhkan sumber energi terbarukan, seperti energi surya. Namun penggunaan fotovoltaik saat ini hanya mengandalkan satu sisi saja. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan metode *bifacial* pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang bertujuan mengurangi pemakaian energi konvensional dengan mengidentifikasi hubungan antara sudut inklinasi terhadap *internal shading* yang mempengaruhi performa fotovoltaik *bifacial*. Sistem PLTS dirancang dengan sudut inklinasi 8°, 15°, dan 20° untuk meminimalkan *shading* dan memaksimalkan efisiensi. Hasil simulasi PVsyst menunjukkan sudut 8° menghasilkan 22868 kWh/tahun, sudut 15° sebesar 22724 kWh/tahun, dan sudut 20° sebesar 22464 kWh/tahun. *Shading* memengaruhi produksi energi, namun sudut 8° memiliki penurunan daya paling rendah. Pemilihan sudut inklinasi yang tepat dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja PLTS.

## Abstract

### Keywords:

bifacial;

inclination;

shading;

solar power plant.

In this era, energy demand is increasing along with population growth and technological development. Energy is a basic need, and its availability is decreasing, necessitating renewable energy sources like solar energy. However, the current use of solar Photovoltaic (PV) relies only on one side. In this study, the bifacial method is used in solar power plants (PLTS) to reduce conventional energy consumption by identifying the relationship between the tilt angle and internal shading that affects the performance of bifacial photovoltaics. The PLTS system is designed with inclination angles of 8°, 15°, and 20° to minimize shading and maximize efficiency. PVsyst simulation results show that an 8° angle produces 22868 kWh/year, a 15° angle produces 22724 kWh/year, and a 20° angle produces 22464 kWh/year. Shading affects energy production, but the 8° angle has the lowest power reduction. Choosing the right inclination angle can improve PLTS efficiency and performance.

\*Penulis korespondensi:

Rishal Asri

E-mail: rishal.asri@tse.itera.ac.id

## 1. Pendahuluan

Energi merupakan kebutuhan pokok karena sumber energi adalah kunci utama dalam segala aspek kehidupan. Tantangan besar yang dihadapi dunia saat ini adalah bagaimana memenuhi kebutuhan energi yang terus bertambah sambil menjaga keseimbangan lingkungan dan menekan dampak emisi yang ditimbulkan. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan energi terbarukan. Energi baru terbarukan (EBT) adalah sumber energi alternatif yang berasal dari alam dan dapat diperbaharui dengan cepat dan tidak menimbulkan emisi [1]. Energi baru terbarukan di Indonesia masih terus dikembangkan untuk mencapai target bauran energi 23% pada 2025 [2]. Potensi EBT di Indonesia cukup besar, dengan energi surya sebesar 207.9 GW, energi hidro sebesar 94.47 GW, dan energi angin sebesar 60.64 GW [3]. Pemanfaatan EBT memiliki banyak manfaat seperti mengurangi ketergantungan terhadap energi konvensional, mengurangi emisi karbon, dan memperbaiki keseimbangan energi. Selain itu, pengembangan EBT juga memberikan efek positif bagi lingkungan hidup dan ekonomi.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan solusi energi terbarukan yang semakin berkembang pesat di Indonesia. Sebagai negara tropis, Indonesia memiliki kesempatan besar untuk mengembangkan PLTS karena memiliki potensi besar. Namun, hambatan seperti infrastruktur industri yang belum berkembang masih perlu diatasi. Inovasi terbaru dalam teknologi fotovoltaik, yaitu penggunaan panel *bifacial*. Pada beberapa studi penelitian, perbandingan kinerja modul fotovoltaik *bifacial* dengan modul fotovoltaik *monofacial* menunjukkan bahwa modul fotovoltaik *bifacial* memiliki peningkatan energi hingga 20% [4],[5],[6]. Jadi, modul fotovoltaik *bifacial* jauh lebih efektif dan efisien dibandingkan dengan modul fotovoltaik *monofacial*.

Fotovoltaik *bifacial* menawarkan potensi peningkatan energi yang signifikan, namun masih ada beberapa tantangan yang perlu diatasi untuk meningkatkan penggunaannya. Orientasi dan penempatan panel yang tidak optimal dapat mengurangi kinerja panel khususnya sudut inklinasi yang dapat menciptakan *shading* kemudian mempengaruhi kinerja panel *bifacial*. Oleh karena itu, meskipun panel surya *bifacial* sudah lebih efisien secara umum, masih ada ruang untuk peningkatan dan inovasi di beberapa aspek. Dalam satu kasus modul *bifacial* yang dimiringkan menghasilkan energi sebesar 7.85% lebih banyak dibandingkan dengan modul *monofacial*. Peningkatan albedo modul *bifacial* menghasilkan keluaran energi sebesar 16.2% lebih tinggi dibandingkan dengan modul *monofacial*. Albedo merujuk pada kemampuan permukaan di sekitar panel surya untuk memantulkan cahaya matahari kembali ke panel sehingga dapat ditarik kesimpulan, bahwa modul *bifacial* yang dipasang dengan mempertimbangkan albedo dan kemiringan tertentu akan memiliki keluaran energi lebih tinggi dibandingkan panel yang dipasang secara datar [7],[8]. Hal tersebut menjadi dasar penelitian ini untuk memecahkan tantangan dan mempercepat adopsi panel *bifacial* menjadi potensi energi terbarukan yang lebih luas mengingat energi baru terbarukan saat ini semakin kompetitif. Panel *bifacial* memiliki kemampuan yang dapat menjadi pertimbangan bagi orang atau instansi yang akan memasang PLTS, yaitu

dari ciri khusus yang membedakannya dari panel surya konvensional adalah dapat menyerap radiasi matahari dari kedua sisi, baik dari arah langsung maupun dari pantulan permukaan di sekitarnya [9]. Oleh karena itu, menjadikan fotovoltaik *bifacial* lebih efisien karena dapat menghasilkan lebih banyak energi listrik dibandingkan dengan panel surya konvensional [10]. Selanjutnya, karena kemampuan panel *bifacial* untuk menyerap cahaya dari kedua sisi membuatnya lebih toleran terhadap efek bayangan yang artinya jika salah satu bagian panel tertutup oleh bayangan, bagian lainnya masih dapat menghasilkan listrik, mengakibatkan pengurangan dampak bayangan pada kinerja keseluruhan sistem dan menjadikan fotovoltaik *bifacial* lebih efektif dari fotovoltaik *monofacial* [11].

Pada konteks penerapan energi fotovoltaik *bifacial*, sistem *on-grid* menjadi pilihan yang strategis. Sistem *on-grid* memungkinkan integrasi langsung dengan jaringan listrik umum dan mendukung distribusi energi terbarukan secara luas. Salah satu faktor penting yang dapat mempengaruhi kinerja dan efisiensi modul fotovoltaik *bifacial* adalah pengaruh bayangan. Pengaruh bayangan pada modul fotovoltaik *bifacial* dapat bervariasi. Bayangan parsial pada permukaan depan atau belakang modul dapat menyebabkan efek bayangan yang kompleks, termasuk efek penurunan tegangan dan arus yang signifikan pada area yang tertutup bayangan. Selain itu, perubahan sudut datangnya sinar matahari pada modul fotovoltaik *bifacial* juga dapat mempengaruhi distribusi arus dan tegangan pada permukaan modul, terutama saat bayangan bergerak selama periode waktu tertentu [6].

Pemahaman mendalam tentang pengaruh bayangan pada modul fotovoltaik *bifacial* penting untuk mengoptimalkan kinerja sistem. Pada praktiknya, *shading* pada fotovoltaik *bifacial* dapat dilakukan dengan variasi sudut inklinasi. Sudut inklinasi adalah sudut kemiringan panel surya terhadap dataran horizontal. Sudut inklinasi sangat penting dalam merancang sistem PLTS karena dapat mempengaruhi paparan panel surya terhadap sinar matahari. Variasi sudut inklinasi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebesar 8°, 15°, dan 20°.

Ketika panel fotovoltaik *bifacial* diatur dengan variasi sudut, masalah *shading* dapat muncul sebagai tantangan utama dalam optimalisasi kinerja sistem. Perubahan sudut penempatan panel surya *bifacial* dapat mengakibatkan bayangan parsial pada permukaan depan atau belakang modul, yang dapat menyebabkan efek penurunan signifikan dalam produksi energi listrik. Namun dari seluruh tinjauan literatur yang dilakukan pada saat penelitian ini diimplementasikan belum ditemukan penelitian yang membahas mengenai variasi sudut inklinasi terhadap PLTS *Bifacial*.

Penelitian ini menganalisis pengaruh bayangan pada modul fotovoltaik *bifacial* dengan variasi sudut inklinasi, menggunakan perangkat lunak PVsyst. Fokus khusus pada aplikasi di kantor Dinas Lingkungan Hidup Lampung, diharapkan memberikan gambaran praktis dan meningkatkan efisiensi serta kinerja sistem fotovoltaik *bifacial* untuk rumah tangga, kantor, maupun industri. Penelitian ini dapat memberikan gambaran umum mengenai

pemanfaatan PLTS menggunakan jenis *bifacial* yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan elektrifikasi.

## 2. Metode

### 2.1 Data Meteorologi dan Lokasi

Beberapa penelitian sebelumnya memberikan referensi penggunaan PLTS *bifacial* diletakkan pada lahan yang luas. Sebagai tambahan, survei lapangan dilaksanakan untuk mengumpulkan data yang diperlukan untuk merancang sistem tenaga surya atap di Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung. Berdasarkan observasi lapangan di lokasi penelitian, yaitu di Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung. Lokasi ini dipilih karena memiliki potensi teknis untuk pemasangan PV *bifacial* dan memiliki lahan yang dapat digunakan untuk pemasangan PLTS

Beban penggunaan energi di kantor tersebut terus meningkat signifikan selama jam kerja, aksesibilitas dan ketersediaan data mudah diakses, serta lokasi ini mendukung perkembangan energi terbarukan. Observasi lapangan ini bertujuan untuk mendapatkan data yang diperlukan serta melakukan pengamatan langsung terhadap area atau lokasi geografis tertentu untuk memahami karakteristik fisik, lingkungan, dan fenomena yang terjadi di tempat tersebut. Modul PV akan dirancang atau ditempatkan di kantor Dinas Lingkungan Hidup Lampung dengan koordinat geografis – 5.385572116909054 dan 105.30367761429571. Letak geografis lokasi penelitian dan penempatan fotovoltaik ditunjukkan dalam Gambar 1.



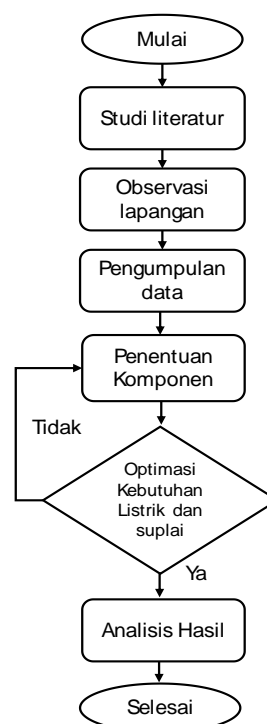
Gambar 1. Letak Geografis Lokasi Penelitian

Potensi energi matahari di suatu wilayah dapat dievaluasi dengan menggunakan data GHI (*Global Horizontal Irradiance*) dan DNI (*Direct Normal Irradiance*) yang tersedia dari *Global Solar Atlas* (GSA). GSA adalah suatu *platform online* yang menyediakan akses terhadap data radiasi matahari dan informasi potensial energi surya di seluruh dunia [12]. Selain GSA pada perangkat lunak PVsyst juga menyediakan data GHI yang bersumber dari *Meteonorm 8*.

GHI merujuk pada total radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi dari segala arah, sedangkan DNI merupakan tingkat radiasi matahari langsung yang jatuh tepat ke permukaan tanah. Pada perancangan PLTS di Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung didapatkan total GHI sebesar 1782.7 kWh/m<sup>2</sup> dan DNI sebesar 943.1 kWh/m<sup>2</sup>. Kedua jenis data ini digunakan untuk mengidentifikasi rencana dan perancangan PLTS yang

sesuai dengan potensi yang tersedia di wilayah kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung

Tahap berikutnya adalah pengumpulan data, yang dilakukan melalui observasi dan wawancara langsung dengan subjek penelitian. Hasil wawancara menunjukkan bahwa lokasi penelitian memiliki rencana untuk memasang PLTS sebagai salah satu alternatif untuk memenuhi kebutuhan listrik harian kantor. Data primer yang diperoleh melalui observasi mencakup kebutuhan listrik bulanan gedung dan dimensi gedung. Data ini akan diolah dan dijadikan acuan untuk merancang PLTS *bifacial ground-mounted* sistem *on-grid* yang optimal. Perancangan ini mempertimbangkan variasi sudut inklinasi untuk mengurangi efek *shading* yang dapat menyebabkan penurunan produksi energi. Diagram alir diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir

### 2.2 Pemilihan Spesifikasi Komponen

#### a) Panel Surya *Bifacial*

Penentuan kesesuaian kapasitas sistem PLTS yang dipasang (kWp) dengan kebutuhan energi listrik yang ada, memerlukan beberapa langkah yaitu mengidentifikasi kebutuhan listrik, melakukan perhitungan kebutuhan kWp, dan mengevaluasi kondisi lingkungan. Fotovoltaik *bifacial* adalah teknologi panel surya yang memungkinkan panel surya menangkap energi matahari dari kedua sisi, baik dari bagian depan maupun belakang panel. Hal ini meningkatkan efisiensi energi yang dihasilkan dari panel karena memanfaatkan cahaya yang biasanya terbuang pada panel konvensional. Data spesifikasi fotovoltaik *bifacial* ditunjukkan oleh Tabel 1 [13].

Tabel 1. Spesifikasi Fotovoltaik *Bifacial*

<i>Testing Condition</i>	<b>STC</b>	<b>NOCT</b>
<i>Maximum Power (Pmax) [W]</i>	545	407.4
<i>Power Tolerance [%]</i>	± 3	± 3
<i>Open Circuit Voltage (Voc) [V]</i>	49.65	46.68
<i>Short Circuit Voltage (Isc) [A]</i>	13.92	11.23
<i>Voltage at Maximum Power (Vmp)[V]</i>	41.80	39.00
<i>Current at Maximum Power (Imp) [A]</i>	13.04	10.45
<i>Module Efficiency [%]</i>	21.1	21.1

STC (*Standard Testing Condition*) merupakan suatu kondisi pengujian standar yang menyediakan kondisi ideal untuk mengukur kinerja modul surya. Dalam kondisi ini, intensitas radiasi matahari atau irradian diatur pada 1000 W/m<sup>2</sup>, suhu sel surya dipertahankan pada 25° *Celsius*, dan distribusi spektral mengikuti standar *Air Mass (AM) 1.5*. Parameter tersebut menciptakan lingkungan yang stabil untuk mengevaluasi daya hasil modul surya [14].

NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*), atau Kondisi Operasional Sel Nominal, adalah kondisi yang lebih realistis di lapangan. Dalam NOCT, intensitas radiasi matahari dikurangi menjadi 800 W/m<sup>2</sup>, suhu lingkungan dipertahankan pada 20° *Celsius*, dan *wind speed* (kecepatan angin) disetel pada 1 m/s, dengan spektrum AM 1.5 yang tetap [15]. Kondisi ini menciptakan situasi yang lebih mirip dengan pengoperasian modul surya di lapangan, dengan perubahan suhu dan intensitas radiasi yang lebih realistis. Spesifikasi *power* fotovoltaik *bifacial* yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Spesifikasi Power Fotovoltaik *Bifacial*

<i>Power Gain (STC)</i>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>	<b>25%</b>
<i>Maximum Power (Pmax) [W]</i>	572	600	627	654	681
<i>Open Circuit Voltage (Voc) [V]</i>	49.65	49.65	49.75	49.75	49.75
<i>Short Circuit Voltage (Isc) [A]</i>	14.61	15.31	16.00	16.70	17.39
<i>Voltage at Maximum Power (Vmp) [V]</i>	41.80	41.80	41.90	41.90	41.90
<i>Current at Maximum Power (Imp) [A]</i>	13.69	14.34	14.99	15.65	16.30

Tabel 3. Spesifikasi Fotovoltaik *Bifacial Mechanical Specification*

<i>Details</i>	<i>Value</i>
<i>Cell Type</i>	Hi-Mono 5
<i>Number of Cell</i>	144 pcs
<i>Dimension</i>	2278 mm × 1134 mm × 35 mm
<i>Weight</i>	32.6 kg
<i>Frame</i>	Anodized Aluminium Alloy
<i>Junction Box</i>	IP 68.3 Three Diodes
<i>Cable Output</i>	4 mm <sup>2</sup> , + 400, -200 mm/±1400 mm

## b) Inverter

Inverter yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis inverter *string*, yaitu inverter *grid-tie* yang digunakan dalam sistem fotovoltaik untuk mengkonversi arus searah yang dihasilkan oleh panel surya menjadi arus bolak balik. Inverter ini dapat mengikat jaringan surya dengan fungsi pembatas bawaan yang mencegah kelebihan daya masuk ke jaringan publik. Hal tersebut menjadikan inverter ini efisien untuk waktu kerja dan mudah dipasang. Spesifikasi dari inverter yang akan digunakan pada penelitian ditunjukkan oleh Tabel 4 [16]. Data yang digunakan menyesuaikan ketersediaan peralatan yang ada di lapangan dan lokasi penelitian.

Tabel 4. Spesifikasi Inverter

<i>Details</i>	<i>Value</i>
<i>Rate Voltage Range</i>	600 V
<i>Max Input Voltage</i>	160 V–950 V
<i>Max Input current per MPPT</i>	22 A
<i>Start-up Voltage</i>	200 V
<i>Max Output Current</i>	20 A
<i>Rate Output Voltage</i>	220 Vac/380 Vac, 230 Vac/400 Vac, 3 W + N + PE
<i>Rate Output Power</i>	12.000 W
<i>Frequency Range</i>	60 Hz / 60 Hz
<i>Power Factor</i>	0.8 <i>leading</i> , 0.8 <i>lagging</i>
<i>Output Waveform</i>	<i>Pure Sine Wave</i>
<i>Max Efficiency</i>	98.50%
<i>MPPT Efficiency</i>	99%



Gambar 3. Simulasi dan Perancangan Pvsyst

## 2.3 Data dan Simulasi Sesuai

Setelah pemilihan komponen, tahap berikutnya adalah menyesuaikan kapasitas sistem PLTS dengan kebutuhan energi listrik. Ini dilakukan dengan mempertimbangkan standar *output* energi yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024 tentang PLTS Atap. Standar *output* energi melibatkan kebutuhan energi, letak geografis, kapasitas sistem, sudut inklinasi, dan orientasi panel surya untuk efisiensi penangkapan sinar matahari [17].

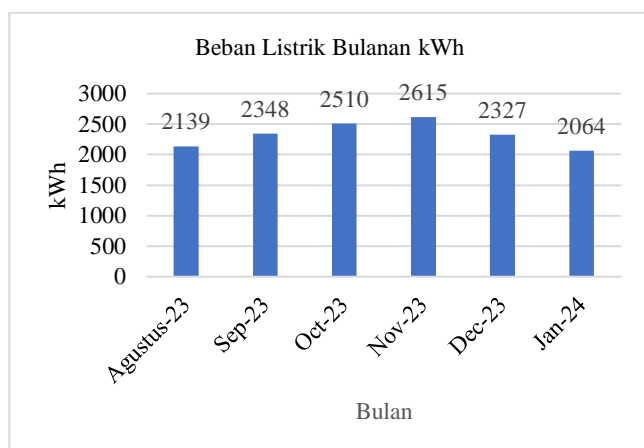
Penentuan sudut inklinasi penting untuk mengurangi *shading* yang mempengaruhi efisiensi sistem PLTS. Indikator kelayakan teknis meliputi *Yield Factor* (YF), *Capacity Factor* (CUF), dan *Performance Ratio* (PR). Perancangan dilakukan menggunakan perangkat lunak PVsyst 7.3, yang dapat memprediksi kinerja panel surya, mengevaluasi *shading*, optimasi arah modul, dan menghitung produksi energi selama periode tertentu. Kapasitas total yang dapat dipasang di lokasi penelitian adalah 15.3 kWp dengan 28 modul. Hasil simulasi dan perancangan sistem PLTS pada PVsyst ditunjukkan dalam Gambar 3.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Perencanaan PLTS

Analisis kelistrikan Gedung diperlukan untuk memastikan perencanaan teknis pada PLTS dilakukan sesuai dengan standar yang ada. Pada Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung daya listrik yang terpasang adalah sebesar 33.000 VA dengan golongan P-1/TR sebesar Rp 1.444,70/kWh. Peraturan pemerintah yang mengatur mengenai pemasangan PLTS Atap yang terhubung ke jaringan tenaga listrik pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum (IUPTLU) adalah Peraturan Menteri ESDM nomor 26 tahun 2024 [17]. Pada peraturan tersebut, ditentukan bahwa kapasitas PLTS yang dapat dipasang dapat disesuaikan dengan kapasitas kebutuhan berdasarkan kondisi sistem tenaga listrik pemegang IUPTLU. Artinya, kapasitas maksimal PLTS yang dapat dipasang di Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung sebesar 33 kWp.

Berdasarkan observasi, pada periode bulan Agustus 2023 – Januari 2024, pemakaian listrik Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung rata-rata sebesar 2333.3 kWh dan pemakaian listrik harian sebesar 291.7 kWh. Beban listrik Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Beban Listrik Bulanan Periode Agustus 2023 – Januari 2024

#### a) Penentuan Kapasitas PLTS

Mengacu pada Peraturan Menteri ESDM nomor 26 tahun 2024 telah menetapkan kapasitas maksimal PLTS atap yang dapat dipasang di Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung adalah sebesar 33 kWp. Namun dengan

pertimbangan area dan regulasi mengenai instalasi PLTS atap yang berlaku, pada penelitian ini kapasitas perancangan PLTS *on-grid* di kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung adalah sebesar 15.3 kWp. Diperkirakan rencana PLTS tersebut dapat menyumbang daya sebesar 50% untuk mensuplai beban pada Kantor. Berikut merupakan perhitungan kapasitas yang dapat dipasang di Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung.

#### 1) Kapasitas Optimal (kWp)

Metode analisis kebutuhan beban digunakan untuk menentukan kapasitas PLTS pada Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung. Penelitian ini menggunakan kompleksitas struktur beban harian untuk mengevaluasi kapasitas Gedung yang akan dirancang. Diasumsikan bahwa Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung beroperasi selama 12 jam, dengan beban puncak selama 8 jam kerja, nilai energi per jam cenderung stabil, sehingga diperoleh nilai rata-rata energi harian siang sebesar 194.48 kWh dan nilai keluar PV harian sebesar 27201 kWh/kWp. Waktu penyinaran efektif matahari selama 4 jam. Langkah selanjutnya adalah menentukan kapasitas optimal PLTS, berdasarkan persamaan 1 didapatkan hasil perhitungan kapasitas optimal PLTS adalah sebesar 7.15 kWp.

$$kWp\ optimal = \frac{kWh\ rata-rata\ harian}{PVout\ Harian} \quad (1)$$

#### 2) Daya Puncak

Setelah kapasitas optimal diketahui, selanjutnya adalah menghitung daya puncak/*peak load*. Berdasarkan persamaan 2 perhitungan daya puncak didapatkan sebesar 12.78 kWp dengan nilai rugi-rugi sistem sebesar 25%.

$$Peak\ load = kWp\ optimal \times (kWp\ optimal \times rugi - rugi\ sistem) \quad (2)$$

#### 3) Kapasitas PLTS

Langkah terakhir dalam menentukan kapasitas PLTS yaitu dengan mengalikan daya puncak dengan faktor keamanan. Berdasarkan persamaan 3 perancangan kapasitas PLTS di Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung didapatkan hasil sebesar 15.3 kWp.

$$Kapasitas\ PLTS = Peak\ Load \times Faktor\ Keamanan \quad (3)$$

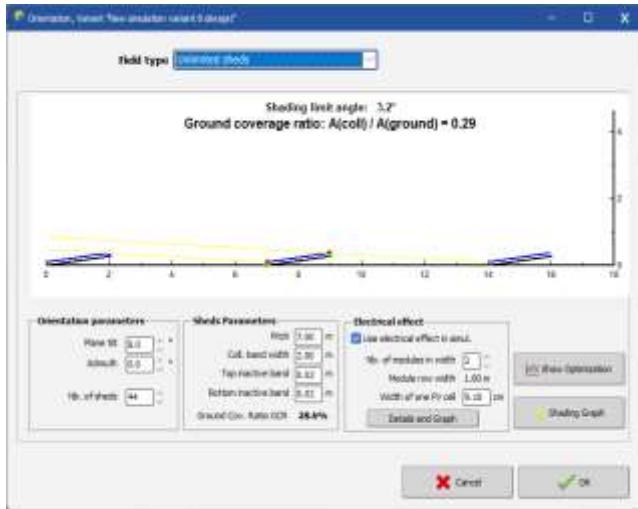
#### b) Penentuan Orientasi

Pada perancangan menggunakan luas lahan sebesar 160 m<sup>2</sup>, Total luas area pada lokasi penelitian sebesar 5063 m<sup>2</sup>, akses yang disediakan untuk pemasangan PLTS sebesar 200 m<sup>2</sup>. Jenis modul surya yang digunakan yaitu PV *bifacial* dengan jumlah modul PV sebanyak 28 modul kapasitas masing-masing modul sebesar 545 Wp dan daya inverter yang digunakan sebesar 12 kW 160 – 950 V. Desain perancangan PLTS di Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung dilakukan menggunakan perangkat lunak PVsyst 7.3.

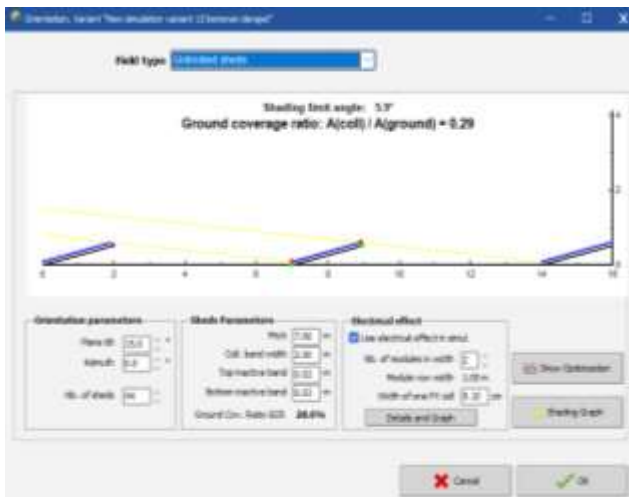
Acuan desain pada PVsyst sebelumnya sudah ditentukan yaitu berkapasitas 15.3 kWp. Selanjutnya



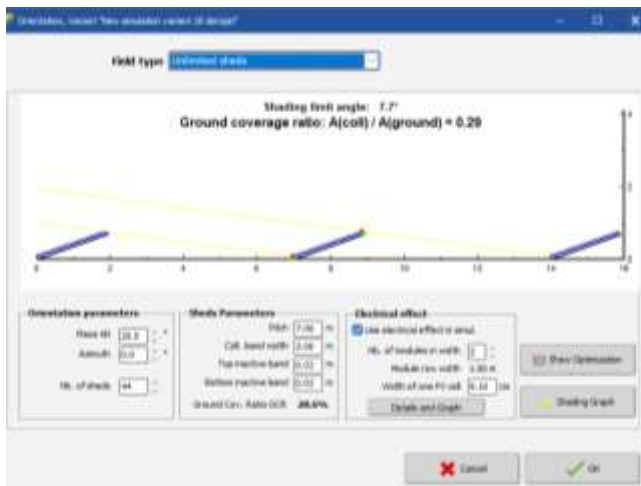
menentukan orientasi perancangan PLTS, dengan *azimuth* 0° dan variasi sudut inklinasi modul surya untuk mengetahui pengaruh sudut terhadap *shading* internal modul surya. Sudut inklinasi tersebut akan divariasikan menjadi 8°, 15°, dan 20°. Pada Gambar 5 ditunjukkan mengenai detail perbedaan sudut.



Gambar 5. Desain Fotovoltaik Sudut 8°



Gambar 6. Desain Fotovoltaik Sudut 15°



Gambar 7. Desain Fotovoltaik Sudut 20°

Pada Gambar 6 ditunjukkan mengenai detail perbedaan sudut sebesar 15%. Sudut tersebut menghasilkan sudut inklinasi lebih besar dibandingkan sebelumnya. Gambar 7 memperlihatkan mengenai sudut terbesar yaitu 20° dimana sudut tersebut menghasilkan sudut inklinasi lebih besar dibandingkan sebelumnya. dari hasil perbedaan setiap sudut ini dilakukan perbandingan performa dan kapasitas daya yang dihasilkan.

### 3.2 Analisis Teknis Perancangan PLTS

#### a) Produksi Energi

PLTS dikatakan layak apabila parameter yang didapat dari hasil simulasi sesuai dengan standar seperti potensi energi matahari, lokasi, kemiringan dan orientasi, serta efisiensi produksi energi yang dapat dihasilkan oleh sistem. pada Tabel 5 ditunjukkan detail produksi energi.

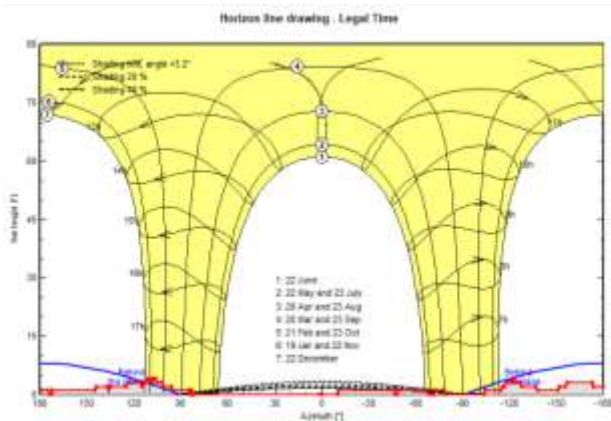
Tabel 5. Produksi Energi Sistem PLTS

Sudut	Produksi Energi kWh/tahun	Performance Ratio %
8°	22868	83.7
15°	22724	83.9
20°	22464	84.0

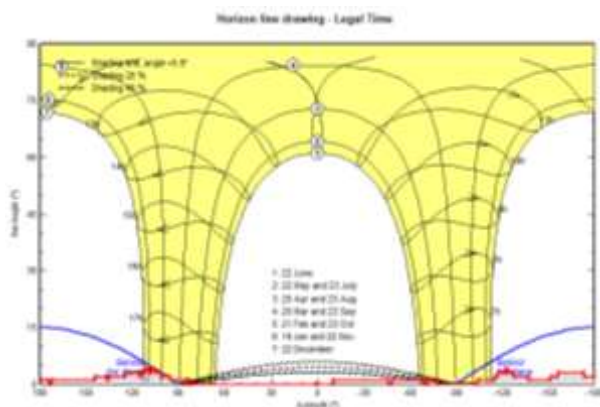
Berdasarkan Tabel 5 terlihat bahwa sistem PLTS yang telah dirancang dan disimulasikan dengan variasi sudut inklinasi 8° menghasilkan energi listrik sebesar 22868 kWh/tahun, *Performance Ratio* rata-rata sebesar 83.7% per tahun. Variasi sudut inklinasi 15° menghasilkan energi listrik sebesar 22724 kWh/tahun dengan *Performance Ratio* rata-rata 83.8%. Terakhir variasi sudut inklinasi 20° menghasilkan energi listrik sebesar 22462 kWh/tahun dengan *Performance Ratio* rata-rata sebesar 83.9%. Pada variasi tersebut sudut 8° produksi energinya lebih tinggi dibandingkan dengan sudut 15° dan 20°. Masing-masing variasi sudut produksi energi yang dihasilkan paling banyak pada bulan Maret, sedangkan produksi energi paling rendah berada di bulan Februari. Hal tersebut terjadi karena posisi matahari yang berbeda di setiap bulannya. Matahari akan berada di posisi tertinggi (sudut elevasi 90°) yang menyebabkan waktu penyinaran matahari cenderung lebih panjang sehingga nilai *losses* dapat lebih kecil dibanding dengan periode bulan lainnya. Selain itu, matahari berada pada posisi terendah (sudut elevasi 60°) sehingga menyebabkan waktu penyinaran lebih singkat dan berakibat nilai iradiasi dan produksi energi di bulan tersebut menurun terjadi pada bulan februari.

#### b) Analisis Shading

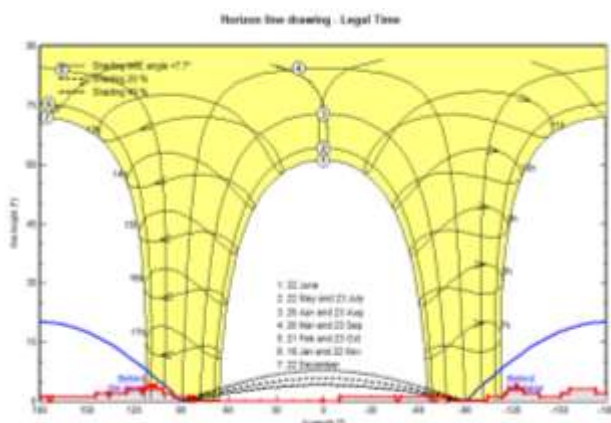
*Shading* merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi performa dari suatu sistem PLTS. *Shading* yang menghalangi panel bisa berupa *shading internal* dan *eksternal*. Diagram analisis *shading* pada sistem PLTS yang dirancang di Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung ditunjukkan pada Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10.



Gambar 8. Diagram *Shading* Sudut Inklinasi 8°



Gambar 9. Diagram *Shading* Sudut Inklinasi 15°



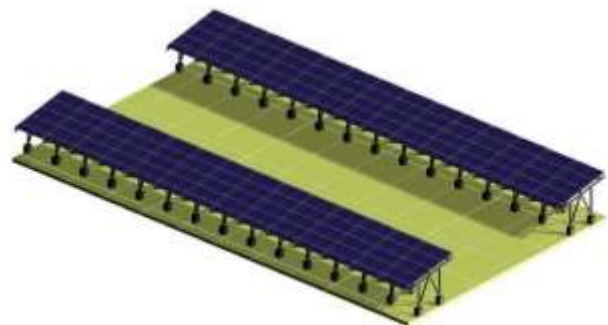
Gambar 10. Diagram *Shading* Sudut Inklinasi 20°

Pada Gambar 8 dan Gambar 9 menunjukkan diagram *shading* dari sudut 8° dan sudut 15°. Tampak sudut inklinasi ini menghasilkan lebih sedikit bayangan dibandingkan dengan sudut inklinasi yang lebih besar. Gambar 10 merupakan diagram *shading* sudut 20° dimana sudut tersebut bayangannya lebih besar dari pada sudut sebelumnya. Dengan sudut yang lebih besar, permukaan panel surya tidak sejajar dengan tanah, sehingga bayangan dari objek di sekitar atau dari panel surya bertambah.

*Shading* pada modul PV yang ditunjukkan oleh Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10 dengan variasi sudut 8°, 15°, dan 20° terjadi pada pukul 06.00 – 07.00 dan pukul 17.00 – 18.00. *Shading* lebih kompleks terjadi pada pukul

06.00 – 07.00 ditandai dengan warna abu-abu pada diagram. Sekilas terlihat *shading* pada ketiga variasi tersebut sama namun garis yang melintang pada setiap variasi berbeda. Garis putus-putus pada diagram menyatakan jalur matahari menunjukkan faktor hilangnya bayangan di berbagai waktu dalam sehari, sedangkan garis biru menyatakan jalur matahari berada di belakang PV. Pada variasi sudut inklinasi 8° garis tersebut lebih rendah dibanding dengan dua sudut lainnya, yang artinya produksi energi pada sudut tersebut lebih besar dari sudut 15° dan 20° karena bayangan modul PV kecil dan modul dapat memproduksi energi lebih efisien. Waktu penyinaran matahari secara optimal rata-rata secara umum yaitu pukul 10.00 – 14.00, karena di waktu tersebut sinar matahari jatuh secara vertikal dan memiliki intensitas yang lebih tinggi, sehingga panel dapat menyerap energi matahari dengan efisien. Jadi, pada variasi tersebut sudut inklinasi 8° dapat meminimalkan efek *shading* pada modul PV.

Penempatan panel surya harus mempertimbangkan arah matahari dan jarak antar panel. Jarak yang tepat antar panel akan memaksimalkan pengoptimalan produksi energi karena meminimalisir efek *shading*. Penempatan yang terlalu rapat dapat menyebabkan bayangan antar panel, sedangkan jarak yang terlalu jauh dapat mengakibatkan peningkatan biaya instalasi dan penggunaan lahan yang tidak efisien. Pada desain yang telah dibuat menggunakan *azimuth* 0° dengan variasi sudut kemiringan panel sebesar 8°, 15°, dan 20°, total lahan yang dialokasikan kantor untuk pemasangan PLTS sebesar 200 m<sup>2</sup> dan yang digunakan seluas 160 m<sup>2</sup>. Dalam perancangan fotovoltaik *bifacial* menggunakan perangkat lunak PVsyst, panjang *pitch* sebesar 7 m, dengan ketinggian modul 1 meter, serta dimensi *top and bottom inactive band* sebesar 0.02 meter. Efek *shading* menjadi faktor penting yang harus dipertimbangkan secara teliti. Ukuran modul panjangnya mencapai 2.278 meter dan lebarnya 1.134 meter, hal tersebut dapat menimbulkan efek *shading* ketika ada objek yang menutupi panel. Gambaran perancangan dari sistem PLTS yang telah dirancang menggunakan salah satu variasi sudut yaitu 8° ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Desain PLTS

### c) Analisis Rugi-rugi Sistem PLTS

Analisis rugi-rugi sistem PLTS penting untuk mengevaluasi efisiensi dan kinerja keseluruhan sistem. Rugi-rugi mengacu pada kehilangan energi yang terjadi selama proses konversi, distribusi, dan penggunaan listrik. Rugi-rugi pada sistem dapat dipengaruhi oleh beberapa

faktor seperti perbedaan temperatur, *shading*, rugi-rugi pada kabel dan lainnya. Analisis rugi-rugi daya membantu dalam mengidentifikasi area-area di mana efisiensi sistem dapat ditingkatkan, serta memastikan bahwa sistem PLTS beroperasi secara optimal dan memberikan kinerja yang maksimal. Meminimalkan rugi-rugi, dan efisiensi dapat meningkatkan produktivitas keseluruhan sistem, yang kemudian akan menghasilkan penghematan energi dan biaya yang signifikan dalam jangka panjang. Rugi-rugi sistem PLTS yang dirancang dan disimulasikan pada Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Rugi-rugi Sistem PLTS

Sudut		8°	15°	20°
Faktor IAM (%)		1.98	1.92	1.9
Temperatur		6.58	6.54	6.48
Bagian Depan	Penurunan Daya (kWh/m <sup>2</sup> )	1262	1268	1276
	Bayangan	0.15	0.54	0.97
Bagian Belakang	Penurunan Daya (kWh/m <sup>2</sup> )	271	280	286
	Bayangan	15.96	16.65	17.27

Pada Tabel 6 tersebut dapat dianalisis mengenai rugi-rugi dari sistem perancangan PLTS di Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung. Hasil yang didapatkan faktor IAM dari perancangan sistem yang paling baik ditunjukkan oleh sudut 8°. Faktor IAM (*Incidence Angle Modifier*) adalah faktor koreksi yang digunakan untuk menghitung efisiensi modul surya tergantung pada sudut datangnya sinar matahari ke permukaan modul [18]. Faktor IAM penting untuk memperoleh perhitungan yang akurat tentang kinerja sistem PLTS, terutama ketika diperlukan untuk mengoptimalkan penempatan dan orientasi modul surya agar sesuai dengan kondisi lingkungan setempat. Selanjutnya analisis penurunan daya pada variasi 8° lebih kecil dibandingkan dengan variasi sudut 15° dan 20°. *Shading* yang ditimbulkan juga paling kecil ada di variasi sudut 8°, maka bisa dikatakan sudut 8° merupakan sudut optimal perancangan PLTS sistem di Kantor Dinas Lingkungan Hidup Bandar Lampung. Selain *shading* rugi-rugi juga disebabkan oleh temperatur pada sudut 8° rugi-rugi akibat temperatur sebesar 6.58%, sudut 15° rugi-rugi temperatur sebesar 6.54% dan sudut 20° rugi-rugi temperatur sebesar 6.48%. Kenaikan temperatur akan berpengaruh terhadap daya listrik yang dihasilkan, dimana kenaikan temperatur permukaan panel surya sebesar 1°C dari temperatur standar (25°) akan menyebabkan penurunan produksi energi Listrik sebesar 0.5%.

#### d) Analisis Kinerja PLTS

Analisis kinerja PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) adalah proses evaluasi yang bertujuan untuk memahami seberapa efisien dan efektif sistem PLTS dalam menghasilkan energi listrik. Parameter sistem PLTS

dikatakan layak adalah apabila performa dari sistem PLTS telah memenuhi standar parameter performa yang telah ditentukan. Parameter performansi yang dapat ditinjau pada sistem PLTS antara lain nilai *Yield Factor*, *Capacity Factor*, *Performance Ratio*. Performansi sistem PLTS yang sudah dirancang dapat dihitung menggunakan persamaan 4 dan persamaan 5.

#### 1. Yield Factor (YF)

$$Y_f = \frac{E_{Grid} \left( \frac{kWh}{tahun} \right)}{PV_{Array} (kWp)} \quad (4)$$

- *Yield Factor* Variasi Sudut Inclinasi 8°

$$YF (kWh/kWp) = \frac{22868 \frac{kWh}{tahun}}{15.3 kWp} = 1495 kWh/kWp$$

- *Yield Factor* Variasi Sudut Inclinasi 15°

$$YF (kWh/kWp) = \frac{22724 \frac{kWh}{tahun}}{15.3 kWp} = 1485 kWh/kWp$$

- *Yield Factor* Variasi Sudut Inclinasi 20°

$$YF (kWh/kWp) = \frac{22464 \frac{kWh}{tahun}}{15.3 kWp} = 1468 kWh/kWp$$

#### 2. Capacity Factor (CUF)

$$CUF = \frac{Y_f}{24h \times T} \times 100\% \quad (5)$$

- *Capacity Factor* Variasi Sudut 8°

$$Capacity Factor = \frac{1495 \frac{kWh}{tahun}}{8760 jam} \times 100\% = 17.1\%$$

- *Capacity Factor* Variasi Sudut 15°

$$Capacity Factor = \frac{1485 \frac{kWh}{tahun}}{8760 jam} \times 100\% = 17\%$$

- *Capacity Factor* Variasi Sudut 20°

$$Capacity Factor = \frac{1468 \frac{kWh}{tahun}}{8760 jam} \times 100\% = 16.9\%$$

Pada Tabel 6 variasi sudut 8° memiliki nilai *Yield Factor* dan *Capacity Factor* lebih tinggi dibanding dengan variasi sudut inclinasi 15° dan 20°. Nilai *Yield Factor* merupakan faktor untuk menentukan nilai kWh/kWp pada suatu sistem PLTS sedangkan *Reference Yield* merupakan total penyerapan radiasi matahari pada suatu bidang [19].



Tabel 7. Detail Kinerja Perancangan Sistem PLTS

Sudut	8°	15°	20°
<i>Yield Factor</i> (kWh/kWp)	1495	1485	1468
<i>Capacity Factor</i> (%)	17.1	17	16.8
<i>Performance Ratio</i> (%)	83.7	83.9	84
<i>Reference Yield</i> (kWh/m <sup>2</sup> /day)	4904	4865	4804
<i>Bifacial Performance</i> (%)	72.2	71.9	71.6

*Capacity Factor* merupakan rasio kinerja sistem PLTS [20], pada perancangan PLTS dengan variasi 8°, 15°, dan 20°. *Capacity Factor* tertinggi berada di variasi sudut 8° dengan nilai 17.1%, yang artinya variasi sudut 8° memiliki ratio energi lebih aktual dibandingkan dengan variasi sudut 15° dan 20°.

*Performance Ratio* adalah rasio perbandingan nilai output energi aktual yang dihasilkan dengan output pada kondisi optimal. Pada perancangan nilai *Performance Ratio* yang paling bagus ditunjukkan oleh variasi sudut 8° karena saat pengkonversian energi sudut inklinasi 8° lebih efisien dan tidak kehilangan banyak energi, hal tersebut dibuktikan dengan produksi energi dan performa modul *bifacial* yang dihasilkan lebih banyak. Jadi, pada perancangan PLTS dengan variasi sudut inklinasi 8°, 15° dan 20°, dapat dikatakan variasi sudut inklinasi 8° lebih efisien dan optimal dibandingkan dengan variasi sudut 15° dan 20°.

#### 4. Kesimpulan

Hasil simulasi PVsyst menunjukkan bahwa PLTS *bifacial ground-mounted* layak dibangun dengan rekomendasi sudut 8°. *Shading* mempengaruhi produksi energi listrik. Pada variasi sudut 8° memiliki penurunan daya dan bayangan lebih rendah dibandingkan sudut 15° dan 20° baik sisi depan maupun belakang modul. Rata-rata persentase penurunan produksi energi pada sudut 8° dibandingkan dengan sudut 15° adalah sebesar 0.63% dan sudut 8° dibanding sudut 20° adalah 1.77%. Sudut inklinasi juga mempengaruhi kinerja fotovoltaiik *bifacial*, maka dari itu pemilihan sudut inklinasi yang tepat dalam merancang PLTS dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja dari PLTS. Pada variasi sudut 8° memiliki kinerja paling baik diantara variasi sudut lainnya. Hal tersebut dibuktikan dengan hasil *Yield Factor* (YF), *Capacity Factor* (CuF) dan *Performance Ratio*. Sudut 8° nilai *Yield Factor* sebesar 14.95 kWh/kWp, nilai *Capacity Factor* sudut 8° sebesar 12.1% dan *Performance Ratio* sudut 8° sebesar 83.7%, dari hasil yang didapat sudut 8° lebih unggul dibandingkan dengan dua variasi sudut lainnya.

#### Daftar Pustaka

- [1] N. Aryanto, A. Jaya, and C. Hudaya, "Pemodelan Energi Baru Terbarukan (EBT) Melalui Pendekatan Dinamis Untuk Ketahanan Energi Kabupaten Sumbawa 2017–2027," *Jurnal Tambora Vol. 4 No. 2a Juli 2020*, Pp. 123–132, 2020.
- [2] Kementerian Keuangan Republik Indonesia, "Bauran Energi baru terbarukan Ditargetkan 23 Persen di 2025," Kementerian Keuangan Republik Indonesia.
- [3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Potensi Energi Baru Terbarukan (EBT) Indonesia," Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral.
- [4] O. Kilci and M. Koklu, "Bifacial and Monofacial Photovoltaic Module with Tracker System Analysis," *Journal of Amasya University The Institute of Science and Technology (JAUIST)* 2020.
- [5] A. A. Widayat, S. Ma'arif, K. D. Syahindra, A. F. Fauzi, and E. Adhi Setiawan, "Comparison and Optimization of Floating Bifacial and Monofacial Solar PV System in a Tropical Region," in *2020 9th International Conference on Power Science and Engineering, ICPSE 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2020, pp. 66–70. doi: 10.1109/ICPSE51196.2020.9354374.
- [6] X. Sun, M. R. Khan, C. Deline, and M. A. Alam, "Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective," *Appl Energy*, vol. 212, pp. 1601–1610, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.041.
- [7] "Bifacial PV System A Technological and Financial Comparison Between Bifacial and Standard PV Panels," UPSALA Universitas, Juni 2018
- [8] M. Alam, M. S. Gul, and T. Muneer, "Performance analysis and comparison between bifacial and monofacial solar photovoltaic at various ground albedo conditions," *Renewable Energy Focus*, vol. 44, pp. 295–316, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ref.2023.01.005.
- [9] M. Prasad and R. Prasad, "Bifacial vs monofacial grid-connected solar photovoltaic for small islands: A case study of Fiji," *Renew Energy*, vol. 203, pp. 686–702, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2022.12.068.
- [10] G. Raina and S. Sinha, "A simulation study to evaluate and compare monofacial Vs bifacial PERC PV cells and the effect of albedo on bifacial performance," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 5242–5247. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.632.
- [11] A. Abotaleb and A. Abdallah, "Performance of bifacial-silicon heterojunction modules under desert environment," *Renew Energy*, vol. 127, pp. 94–101, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.04.050.
- [12] G. Bakti Muntoha, D. Septi Nur Afifah, D. Hayuhantika, M. Pendidikan Matematika, and U. J. Bhinneka PGRI Mayor Sujadi Timur No, "Potensi Pantai Sine Kabupaten Tulungagung Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) The Potential of Sine Beach Tulungagung Regency as a Solar Power Plant," 2023.
- [13] L. Solar, "Spesifikasi Bifacial Hi-MO-5-LR-5-72-HBD-535-555-M-35-30-and-15-G2-V16-413169f990," *Longi*.
- [14] M. F. Zambak, S. Surianto, and A. Faisal, "Kajian Efektivitas Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya," *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 13, no. 3, p. 155, Oct. 2022, doi: 10.22441/jte.2022.v13i3.005.
- [15] E. Prasetyono, R. Wigas Wicaksana, N. A. Windarko, and M. Z. Efendi, "Pemodelan Dan Prediksi Daya Ouput Photovoltaic Secara Real Time Berbasis Mikrokontroler," 2015.
- [16] Huawei, "Efficiency Curve Circuit Diagram Smart PV Controller." *Huawei*, 2020.
- [17] P. Menteri, E. Dan, and S. Daya Mineral, "Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2024 Tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung Pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik Untuk Kepentingan Umum."
- [18] D. Fuaddin, A. Daud, M. E. Program, S. T. Pembangkit, and T. Listrik, "Rancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga

- Surya On-Grid Kapasitas 20 kWp untuk Residensial,” vol. 10, 2020.
- [19] A. Shrivastava, R. Sharma, M. Kumar Saxena, V. Shanmugasundaram, M. Lal Rinawa, and Ankit, “Solar energy capacity assessment and performance evaluation of a standalone PV system using PVSYST,” *Mater Today Proc.*, vol. 80, pp. 3385–3392, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.258.
- [20] L. Asdiyan Salsabila Ayu, I. Ayu Dwi Giriantari, I. Nyoman Setiawan, J. Raya Kampus Unud Jimbaran, K. Kuta Sel, and K. Badung, “Analisis Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Atap On-Grid 11,2 Kwp Di Residensial Bukit Gading Mediterania, Jakarta Utara,” 2023.