

Analisis Kinerja Sistem PLTS Bifasial 595 Wp Terhadap Variasi Sudut dan Jarak Penempatan Reflektor Cermin Datar

Putri Iriyani Purnama Sari¹, I Made Ari Nrrartha^{2*}, Agung Budi Muljono³, I Made Ginarsa⁴, Sultan⁵, I Nyoman Wahyu Satiawan⁶

^{1,2,3,4,5,6}Jurusan Teknik Elektro, FT, UNRAM; Jl. Majapahit No. 62 Mataram; +6287765512543

Received: 02-02-2026
Accepted: 10-08-2026

Keywords:

Bifacial photovoltaic;
Flat mirror reflector;
Tilt angle;
Power output;
Experimental study.

Correspondent Email:

nrrartha@unram.ac.id

Abstrak. Panel surya bifasial menjadi teknologi yang semakin berkembang karena mampu menyerap radiasi matahari dari dua sisi, sehingga menghasilkan daya listrik yang lebih tinggi dibandingkan panel monofacial. Sebuah reflektor diperlukan untuk mengarahkan energi matahari ke sisi-sisi tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan daya keluaran terbaik dari panel surya bifasial 595 Wp apabila dilengkapi dengan reflektor cermin datar. Penempatan cermin datar dianalisis berdasarkan variasi sudut kemiringan dan jarak reflektor terhadap panel surya bifasial. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental dengan sembilan variasi pengujian, yang terdiri dari kombinasi sudut reflektor (45°, 55°, dan 65°) dan jarak reflektor (50 cm, 100 cm, dan 150 cm). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi sudut reflektor 45° dengan jarak 150 cm menghasilkan daya keluaran sebesar 301,35 W dibandingkan dengan tanpa reflektor yang hanya sebesar 116,99 W pada kondisi iradiasi yang hampir sama yaitu sekitar 920 W/m². Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa pemilihan sudut dan jarak reflektor yang tepat berperan penting dalam meningkatkan dan mengoptimalkan kinerja panel surya bifasial.

Abstract. Bifacial solar panels are an increasingly developed technology because they are capable of absorbing solar radiation from both sides, resulting in higher electrical power output compared to monofacial solar panels. Therefore, a reflector is required to direct solar energy toward both sides of the panel. This study aims to obtain the optimal power output of a 595 Wp bifacial solar panel equipped with a flat mirror reflector. The placement of the flat mirror reflector was analyzed based on variations in the tilt angle and the distance between the reflector and the bifacial solar panel. An experimental method was employed with nine testing variations, reflector angles (45°, 55°, and 65°) and reflector distances (50 cm, 100 cm, and 150 cm). The results show that the combination of a 45° reflector angle and a 150 cm reflector distance produced a power output of 301.35 W, which is significantly higher than the output without a reflector, which was only 116.99 W under nearly identical irradiance conditions of approximately 920 W/m². Based on these results, it can be concluded that appropriate selection of reflector angle and distance plays a crucial role in enhancing and optimizing the performance of bifacial solar panels.

1. PENDAHULUAN

Energi listrik umumnya dihasilkan melalui proses konversi energi dari berbagai sumber, seperti energi kinetik pada turbin dan

pembakaran bahan bakar fosil pada mesin diesel. Di Indonesia, sebagian besar pembangkit listrik yang dikelola oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN) masih

bergantung pada batu bara dan tenaga uap. Ketergantungan yang berkelanjutan terhadap bahan bakar fosil berpotensi menyebabkan krisis energi dan permasalahan lingkungan di masa depan. Oleh karena itu, pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi terbarukan yang bersih dan berkelanjutan semakin mendapat perhatian [1]–[3].

Seiring dengan upaya peningkatan efisiensi sistem PLTS, berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan daya keluaran panel surya. Beberapa studi melaporkan bahwa panel surya bifasial mampu menghasilkan energi 15.12% sampai 17.31% [4], hingga 20% [5], lebih tinggi dibandingkan panel surya monofacial, karena kemampuannya menyerap radiasi matahari dari sisi depan dan belakang modul dan besarnya peningkatan tergantung albedo dan kondisi instalasi [6]. Adopsi global teknologi panel surya bifasial meningkat secara signifikan, International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV) melaporkan bahwa modul bifasial menyumbang sekitar 63% dari pasar modul PV global pada tahun 2024 dan diperkirakan akan terus tumbuh di tahun-tahun mendatang, mencerminkan tren industri menuju penerapan bifasial [7][8].

Kinerja panel surya bifasial sangat dipengaruhi oleh nilai albedo permukaan di sekitar panel. Permukaan dengan albedo tinggi, seperti area bersalju, dilaporkan mampu meningkatkan daya keluaran hingga lebih dari 19% [9] dan sekitar 20% pada kondisi tertentu [10]. Namun, kondisi tersebut sulit diaplikasikan di wilayah beriklim tropis seperti Indonesia. Oleh karena itu, beberapa penelitian mulai mengkaji penggunaan reflektor buatan, seperti ubin putih dan batu putih [11] dapat meningkatkan daya panel surya bifasial lebih dari 20% bahkan hingga > 30%, dan semua permukaan berwarna terang dapat meningkatkan daya panel surya bifasial [12]. Oleh karena itu, beberapa penelitian mulai mengkaji penggunaan reflektor buatan, seperti cermin datar yang ditempatkan di bawah panel surya bifasial, untuk meningkatkan intensitas radiasi yang diterima oleh sisi belakang panel [13]–[15].

Meskipun penggunaan reflektor cemin datar terbukti dapat meningkatkan daya keluaran, sebagian besar penelitian sebelumnya masih terbatas pada jenis reflektor atau kondisi

pemasangan tertentu. Kajian mendalam mengenai pengaruh variasi sudut kemiringan dan jarak reflektor terhadap peningkatan daya keluaran panel surya bifasial, khususnya pada kondisi iklim tropis, masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis peningkatan daya keluaran panel surya bifasial akibat variasi sudut dan jarak reflektor cermin datar, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam optimalisasi kinerja panel surya bifasial.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pengukuran kinerja dari sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) membutuhkan alat ukur yang dapat dipertanggungjawabkan. Alat ukur dapat didesain sendiri menggunakan sensor-sensor seperti sensor arus, tegangan, sensor iradiasi, sensor suhu pada panel surya. Disamping kebutuhan sensor diperlukan juga mikrokontroler untuk membaca dan validasi hasil pengukuran sensor-sensor tersebut. Data hasil pengukuran sangat penting disimpan pada media simpan secara real time sehingga analisis kinerja sistem PLTS dapat dilakukan dengan lebih komprehensif [16]–[20].

Sistem PLTS bifasial *off-grid* terdiri dari beberapa komponen utama seperti panel surya bifasial, *solar charge controller* (SCC), dan baterai. Komponen tambahan untuk koneksi sistem seperti kabel DC khusus untuk sistem PLTS dengan ukuran kemampuan hantar arus (kHA) kabel yang disesuaikan dengan kapasitas daya dari panel surya. Sistem pengaman seperti MCB DC dan *Surge Protection Device* (SPD) untuk proteksi arus/hubung singkat dan pengaman petir [21][22].

Variabel yang penting untuk mengetahui kinerja sistem PLTS adalah iradiasi matahari, suhu panel surya, tegangan output dari panel surya, tegangan baterai, dan tegangan pada beban. Disamping tegangan hasil ukur arus output dari panel surya, arus baterai dan arus beban untuk mendapatkan daya panel surya bifasial dan baterai. Persamaan (1) adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung daya input panel surya.

$$P_{in,PV} = A * Irr \quad (1)$$

Dimana A dan Irr adalah luas penampang panel surya (m²) dan iradiasi matahari (W/m²).

Persamaan (2) dan (3) adalah persamaan daya output panel surya dan fill factor (faktor pengisian) dari panel surya.

$$P_{out,PV} = V * I * FF \quad (2)$$

Dimana V, I dan FF adalah tegangan output (V), arus output panel surya (Ampere) dan faktor pengisian.

$$FF = \frac{V_{PM} * I_{PM}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (3)$$

Dimana V_{PM} , I_{PM} , V_{oc} , dan I_{sc} adalah tegangan panel surya pada daya maksimum, arus panel surya pada daya maksimum, tegangan panel surya pada terminal output terbuka dan arus panel surya pada terminal output hubung singkat.

Daya baterai dapat dihitung menggunakan Persamaan (4) berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus yang masuk atau keluar dari baterai.

$$P_{bat} = V_{bat} * I_{bat} \quad (4)$$

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang bertujuan untuk mengetahui peningkatan daya output dari panel surya bifasial 595 Wp akibat variasi sudut dan jarak dari reflektor cermin datar yang ditempatkan di belakang panel surya bifasial.

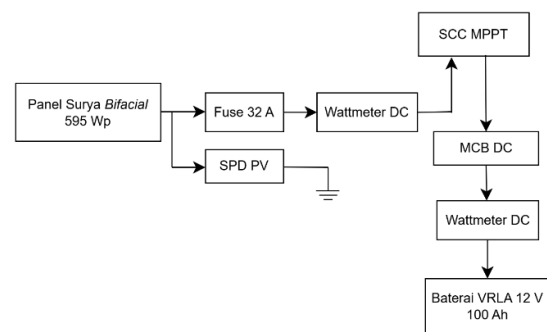
3.1. Rancangan Sistem PLTS Bifasial

Komponen-komponen untuk pembangunan sistem PLTS bifasial adalah panel surya bifasial 595 Wp, SCC MPPT 60 A, Baterai VRLA 12V 100Ah, fuse DC, SPD DC, MCB DC dan kabel DC ditambah skun kabel. Blok diagram dan rancangan sistem PLTS bifasial ditunjukkan pada Gambar (1) dan (2).

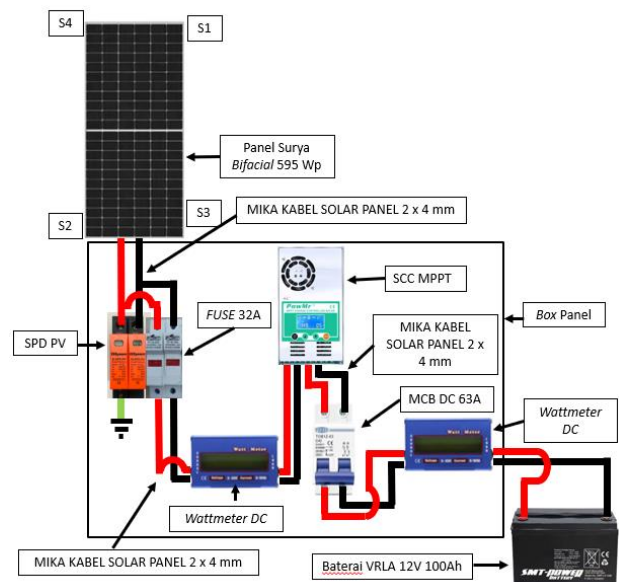
3.2. Rancangan Data Logger

Data logger yang dirancang untuk penelitian ini berfungsi untuk merekam data sensor-sensor pada sistem PLTS bifasial setiap saat secara real time. Komponen dari data logger untuk mengukur dan merekam variabel

pengukuran seperti suhu, arus, tegangan dan iradiasi matahari yang disimpan pada SD-Card adalah yaitu DS18B20 sebagai sensor suhu, ACS712 (20 A) dan WCS1800 (60 A) sebagai sensor arus pada output panels urya bifasial dan arus baterai, sensor tegangan tegangan DC menggunakan pembagi tegangan dan Op Amp dan PYR20 sebagai sensor iradiasi matahari. Mikrokontroler adalah ESP32 dan modul SD-Card untuk interface media simpan (SD-Card). Kalibrasi hasil ukur dari sensor arus menggunakan clamp meter, sensor tegangan menggunakan voltmeter, sensor suhu menggunakan termometer, dan sensor PYR20 menggunakan Solar Power Meter.



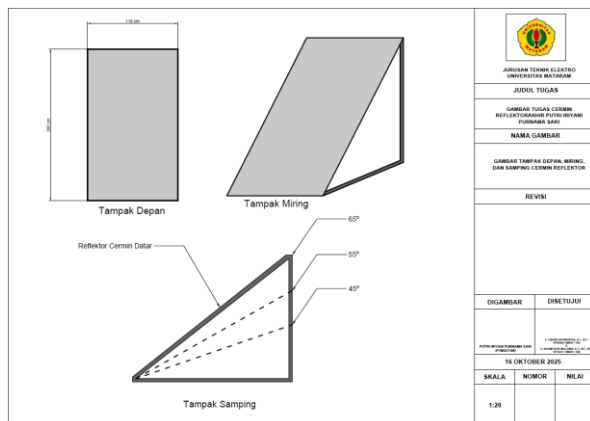
Gambar 1. Blok diagram sistem PLTS bifasial



Gambar 2. Rancangan sistem PLTS bifasial

3.3. Rancangan Reflektor Cermin Datar

Reflektor adalah sebuah cermin datar dengan ukuran panjang 240 cm dan lebar 110 cm. Rancangan reflektor cermin datar ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rancangan reflektor cermin datar

3.4. Skenario eksperimen

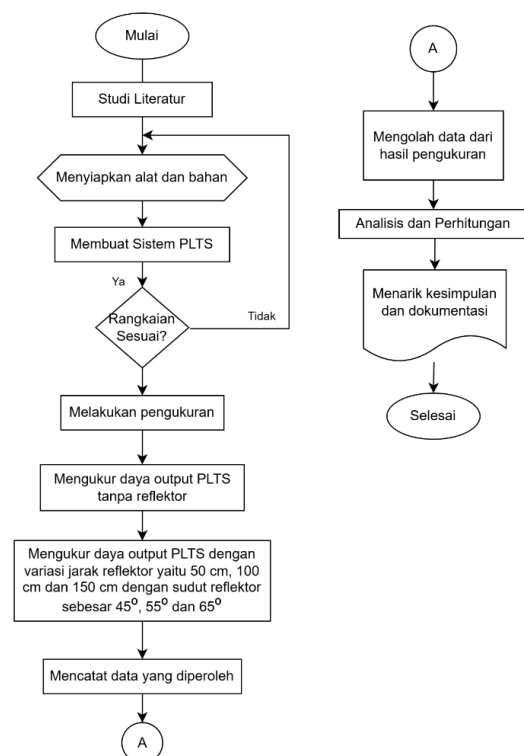
Pengukuran kinerja panel surya bifasial terhadap variasi sudut dan jarak penempatan reflektor cermin dilakukan dalam beberapa skenario. Skenario tersebut adalah pengukuran kinerja panel surya bifasial tanpa reflektor, dilanjutkan dengan penempatan reflektor cermin datar dengan sudut 45° dengan jarak 50, 100 dan 150 cm dan setiap perubahan jarak dilakukan pada hari berikutnya. Kemudian dilanjutkan dengan merubah sudut reflektor cermin datar menjadi 55° dengan jarak 50 cm, 100 cm dan 150 cm. Dilanjutkan dengan sudut reflektor cermin datar 65° dengan jarak 50 cm, 100 cm dan 150 cm, sehingga total waktu eksperimen pada penelitian ini adalah sepuluh (10) hari, mulai pukul 08.00-17.00 WITA. Beban pada penelitian ini adalah baterai VRLA 12V 100Ah, tanpa menggunakan beban yang lain. Setiap akhir pengukuran (setelah pukul 17.00 WITA), baterai dikuras sampai diperoleh *Depth of Discharge* (DoD) baterai 40,74%. Pengurusan ini bertujuan untuk memastikan kondisi beban (baterai sama untuk setiap skenario variasi sudut dan penempatan reflektor cermin datar).

Data logger ditempatkan pada PLTS bifasial untuk mengukur kinerja secara real time. Data yang diukur dari sensor-sensor kemudian disimpan setiap menit pada SD-Card yang digunakan sebagai dasar untuk analisis kinerja PLTS bifasial.

3.5. Diagram Alir Penelitian

Untuk mendukung penyusunan penelitian, digunakan kerangka kerja yang menjelaskan tahapan pelaksanaan penelitian secara sistematis. Kerangka kerja penelitian

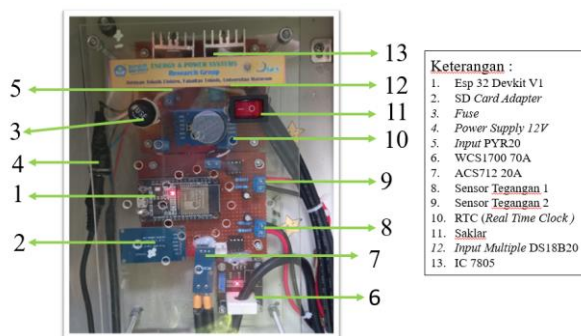
ditunjukkan pada Gambar 4. Tahapan awal penelitian dimulai dari studi literatur, menyiapkan alat dan bahan yang meliputi alat ukur standar untuk validasi pengukuran data logger, bahan-bahan untuk pembuatan data logger sampai diperoleh data logger dengan hasil pengukuran yang akurat. Pengukuran real time dengan hasil pengukuran yang disimpan setiap menit pada data logger di SD-Card. Skenario pengukuran selama sepuluh (10) hari dengan pengukuran kinerja panel surya bifasial tanpa reflektor cermin datar, kemudian dilanjutkan dengan variasi sudut reflektor cermin datar sebesar 45° , 55° , dan 65° dengan variasi jarak setiap perubahan sudut reflektor variasi jarak reflektor dari cermin datar 50, 100 dan 150 cm. Setiap skenario dilakukan pada kondisi cuaca cerah, sehingga hasil perbandingan setiap skenario cukup valid. Hasil pengukuran diolah berdasarkan iradiasi yang sama setiap skenario. Hasil tersebut sebagai dasar perbandingan kinerja PLTS bifasial akibat variasi sudut dan jarak reflektor dari panel surya bifasial. Selanjutnya dilakukan analisis hasil pengukuran dan menarik kesimpulan serta dokumentasi.



Gambar 4. Diagram alir penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bentuk fisik data logger yang digunakan untuk mendapatkan hasil ukur kinerja PLTS bifasial ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil kalibrasi pengukuran setiap sensor yang digunakan pada data logger ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 5. Bentuk fisik data logger

Tabel 1. Hasil kalibrasi sensor pada data logger

Sensor	Kesalahan ukur (%)	R ²	Alat ukur standar
DS18B20 1	0,18	1,0000	Termometer
DS18B20 2	0,44	1,0000	Termometer
DS18B20 3	0,17	1,0000	Termometer
DS18B20 4	0,21	1,0000	Termometer
ACS712 (20A)	0,21	1,0000	Clamp meter
WCS1800 (60A)	0,82	0,9996	Clamp meter
Tegangan 1	0,32	1,0000	Multimeter
Tegangan 2	0,19	1,0000	Multimeter
PYR20	4,00	0,9770	Solar Power Meter

Hasil ukur sensor pada Tabel 1 menunjukkan pendekatan linier digunakan mempunyai koefisien determinasi (R^2) sama dengan satu dan mendekati satu, hal ini menunjukkan hasil ukur sensor sangat baik dan sesuai dengan hasil ukur alat ukur standar. Reflektor ditempatkan di belakang panel surya dengan variasi jarak dan sudut yang bervariasi yaitu jarak 50, 100, dan 150 cm dari kerangka panel dengan variasi sudut 45°, 55° dan 65° guna memantulkan cahaya sehingga sisi belakang panel surya bifasial mendapatkan iradiasi matahari hasil pantulan dari reflektor cermin datar tersebut. Salah satu posisi penempatan reflektor ditunjukkan pada Gambar 6.

Penempatan reflektor cermin datar tersebut dengan jarak 150 cm dan sudut 45°.

Struktur rangka dari reflektor berbahan besi hollow yang memiliki beberapa kelebihan antara lain tidak dimakan rayap, lebih kokoh, dan mampu meredam suhu udara panas. Selain itu material konstruksi besi juga mempunyai ketahanan yang kuat terhadap karat serta tidak mudah keropos.



Gambar 6. Jarak reflektor dari panel surya bifasial sebesar 150 cm dan sudut 45°

Hasil perbandingan perbandingan daya output panel surya bifasial tanpa dan dengan penambahan reflektor cermin datar sesuai dengan skenario penelitian dituliskan pada Tabel 2. Setiap skenario baterai VRLA 12V 100Ah sebagai beban pada PLTS dikosongkan setiap hari setelah pengambilan data kinerja sistem (pengosongan baterai setelah pukul 17.00) dengan DoD baterai 40,74%.

Tabel 2 menunjukkan hasil perbandingan berdasarkan data iradiasi yang diterima panel surya bifasial sesuai dengan skenario yang dikelompokkan dalam 4 rentang iradiasi. Iradiasi pada rentang 449,30 – 456,65 W/m². Pada rentang ini daya panel bifasial tanpa reflektor sebesar 45,26 W dengan efisiensi 3,69% (pada iradiasi 453,63 W/m²), sedangkan dengan reflektor daya meningkat secara signifikan walaupun dengan iradiasi yang lebih rendah untuk skenario sudut cermin 65° dengan jarak 150 cm (449,30 W/m² menghasilkan daya output 86,28 W dengan efisiensi 7,11%). Peningkatan tertinggi diperoleh pada pemasangan reflektor dengan sudut 45° dan jarak 150 cm yaitu sebesar 108,94 W pada iradiasi 451,87 W/m² dengan efisiensi 8,93%.

Iradiasi pada rentang 528,85 – 548,06 W/m², daya panel surya bifasial tanpa reflektor sebesar 53,93 W dengan efisiensi 3,77% pada iradiasi 528,85 W/m². Reflektor dengan sudut 45° dan jarak 150 menunjukkan hasil terbaik dengan daya output panel surya bifasial sebesar

218,57 W dengan efisiensi 14,94% pada iradiasi 541,94 W/m² (selisih iradiasi tanpa reflektor 13,09 dengan peningkatan daya 4,05 kali).

Tabel 2. Kinerja panel surya bifasial 595 Wp

Metode Pengukuran	Iradiasi (W/m ²)	Daya Output Panel (Watt)	Efisiensi (%)
Tanpa Reflektor Cermin Datar	453,63	45,26	3,69
	528,85	53,93	3,77
	736,36	117,10	5,89
	922,04	116,99	4,70
Reflektor Cermin Datar Sudut 45° dengan Jarak 50 cm	455,65	95,03	7,72
	547,31	162,68	11,01
	726,95	197,53	10,06
	924,05	218,92	8,77
Reflektor Cermin Datar Sudu 45° dengan Jarak 100 cm	450,65	67,07	5,51
	536,57	133,13	9,19
	730,57	148,22	7,51
	928,92	182,50	7,28
Reflektor Cermin Datar Sudut 45° dengan Jarak 150 cm	451,87	108,94	8,93
	541,94	218,57	14,94
	731,47	310,91	15,74
	926,40	301,35	12,06
Reflektor Cermin Datar Sudut 55° dengan Jarak 50 cm	451,33	67,07	5,50
	528,67	84,95	5,95
	736,36	159,27	8,01
	923,86	169,41	6,79
Reflektor Cermin Datar Sudut 55° dengan Jarak 100 cm	456,65	74,58	6,05
	542,61	83,95	5,73
	733,00	35,23	1,78
	928,15	44,82	1,79
Reflektor Cermin Datar Sudut 55° dengan Jarak 150 cm	451,59	60,71	4,98
	541,61	126,48	8,65
	725,27	157,16	8,03
	931,78	72,05	2,86
Reflektor Cermin Datar Sudut 65° dengan Jarak 50 cm	450,95	64,72	5,32
	548,06	74,30	5,02
	731,40	82,27	4,17
	921,03	68,05	2,74
Reflektor Cermin Datar Sudut 65° dengan Jarak 100 cm	453,63	67,44	5,51
	543,32	137,02	9,34
	729,30	190,59	9,68
	931,44	197,44	7,85
Reflektor Cermin Datar Sudut 65° dengan Jarak 150 cm	449,30	86,28	7,11
	543,28	141,94	9,68
	728,30	187,23	9,52
	920,70	217,82	8,76

Iradiasi pada rentang 725,27 – 736,36 W/m², daya panel surya bifasial tanpa reflektor sebesar 117,10 W dengan efisiensi 5,89% pada iradiasi 736,36 W/m². Pada rentang iradiasi ini reflektor dengan sudut 45° jarak 150 cm dari panel surya bifasial menghasilkan daya tertinggi 310,91 W dengan efisiensi 15,74% pada iradiasi 731,47 W/m². Iradiasi pada rentang 920,70 – 931,78 W/m², daya panel

surya tanpa reflektor sebesar 116,99 W dengan efisiensi 4,70% pada iradiasi 922,04 W/m². Penempatan reflektor terbaik pada rentang iradiasi ini adalah sudut 45° dengan jarak 150 cm, daya output panel surya bifasial sebesar 301,35 W dengan efisiensi 12,06 pada iradiasi 926,40 W/m².

Secara keseluruhan, penempatan reflektor cermin datar berdasarkan skenario percobaan mampu meningkatkan daya output panel surya bifasial. Skenario terbaik adalah dengan menempatkan reflektor pada sudut 45° dan jarak 150 cm dari panel surya bifasial. Hasil ukur suhu panel surya bifasial pada penempatan reflektor dengan sudut 45° dan jarak 150 cm ditabelkan pada Tabel 3. Data yang dituliskan pada tabel adalah data sesaat setiap jam.

Tabel 3. Data hasil suhu panel surya bifasial

Pukul	Iradiasi (W/m ²)	Suhu (°C)				Cuaca
		1	2	3	4	
08:00	451,87	32,88	30,12	32,44	33,94	Cerah
09:00	541,94	42,22	36,81	42,94	42,75	Cerah
10:00	731,47	44,19	44,44	46,50	45,50	Cerah
11:00	924,73	52,50	55,31	67,00	60,31	Cerah
12:00	985,16	60,38	59,75	57,94	64,44	Cerah
13:00	961,66	61,38	63,13	57,13	54,06	Cerah
14:00	886,45	50,75	51,56	52,88	50,44	Cerah
15:00	795,12	49,06	51,94	52,56	49,63	Cerah
16:00	419,05	38,94	40,00	40,81	40,19	Cerah
17:00	342,83	31,31	31,62	31,44	31,44	Cerah

Berdasarkan hasil ukur suhu di setiap pojok panel surya bifasial, suhu panel relatif merata pada setiap pojok panel dengan selisih 0,31 °C pada pukul 17:00, tetapi selisih suhu yang cukup ekstrim pada pukul 11:00 yaitu sebesar 14,50 °C. Suhu meningkat seiring meningkatnya iradiasi matahari dan suhu juga turun dengan turunnya iradiasi matahari menjelang sore hari pada kondisi cuaca cerah.

Gambar 7 adalah grafik iradiasi matahari terhadap waktu pada skenario penempatan reflektor cermin datar dengan sudut 45° jarak 150 cm. Iradiasi meningkat sejak pukul 08:00, mencapai puncak pada pukul 12:00 yaitu sebesar 985,16 W/m², kemudian terus turun mencapai 342,83 W/m² pada pukul 17:00. Fluktuasi iradiasi terjadi antara pukul 09:00-10:00 yang ditunjukkan pada Gambar 7. Cuaca pada saat tersebut cerah tetapi terdapat pergerakan awan yang mengakibatkan sinar

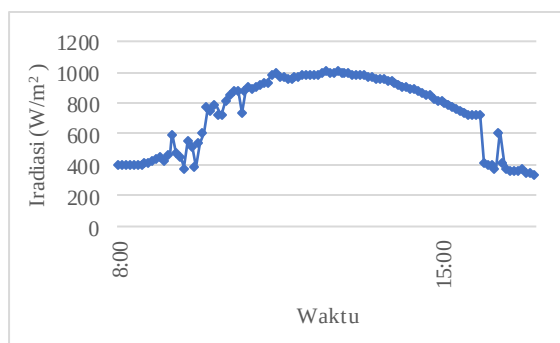
matahari tertutup awan sehingga sensor iradiasi tidak menerima iradiasi penuh dari matahari.

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara iradiasi matahari dan tegangan output panel surya bifasial pada penempatan reflektor cermin datar dengan sudut 45° pada jarak 150 cm. Tegangan output panel surya bifasial berfluktuasi dan tegangan relatif stabil pada rentang 40–43 V.

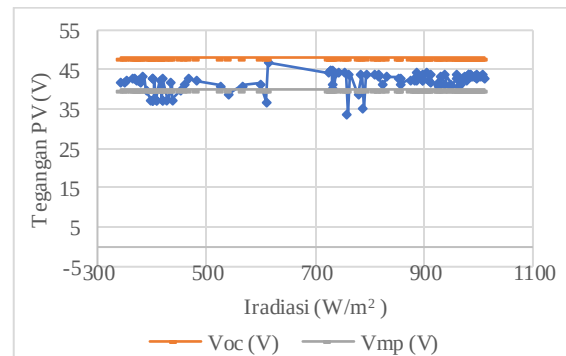
Gambar 9 menunjukkan hubungan antara perubahan iradiasi terhadap arus output panel surya bifasial dengan penempatan reflektor cermin datar dengan sudut 45° pada jarak 150 cm. Arus output panel surya berfluktuasi dan meningkat seiring kenaikan iradiasi.

Gambar 10 menunjukkan tegangan pengisian baterai dengan penempatan reflektor cermin datar pada sudut 45° dan jarak 150 cm. Tegangan tertinggi tercatat sebesar 14,21 V pada pukul 14:00 pada saat SCC masih bekerja pada mode MPPT. Perubahan tegangan pengisian mengikuti mode kerja SCC, yaitu MPPT untuk memperoleh daya pengisian maksimum, mode tegangan konstan untuk menjaga tegangan konstan saat pengisian, dan floating untuk mempertahankan tegangan rendah guna mencegah *overcharge* pada baterai.

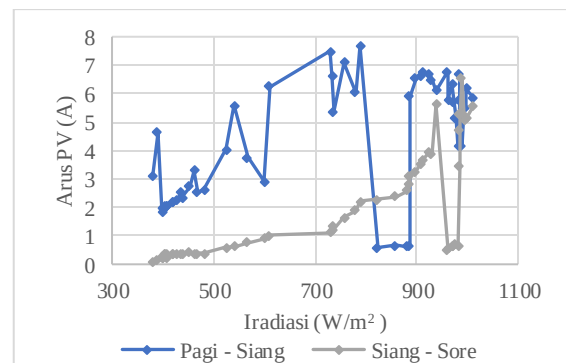
Gambar 11 menunjukkan hubungan antara iradiasi matahari dengan arus pengisian baterai akibat penempatan reflektor cermin datar dengan sudut 45° pada jarak 150 cm. Arus pengisian berfluktuasi dan arus meningkat seiring kenaikan iradiasi.



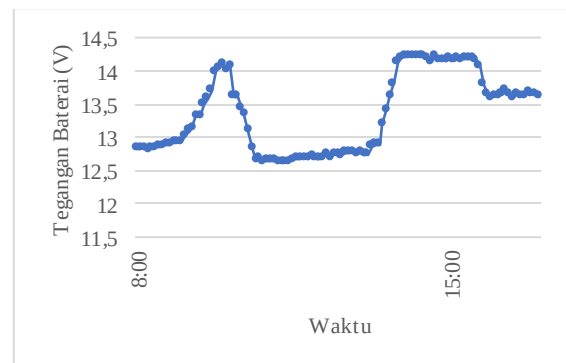
Gambar 7. Perubahan iradiasi terhadap waktu



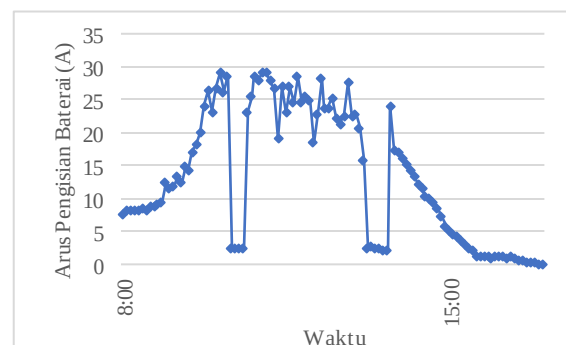
Gambar 8. Tegangan panel surya bifasial



Gambar 9. Arus output panel surya bifasial



Gambar 10. Perubahan tegangan pengisian baterai



Gambar 11. Arus pengisian baterai VRLA

Peningkatan suhu yang diakibatkan oleh penempatan reflektor juga diukur menggunakan kamera termal. Pengukuran ini bertujuan mendapatkan distribusi panas pada sisi belakang panel surya bifasial akibat penempatan reflektor cermin. Gambar 12 adalah hasil citra dari kamera termal pada sisi belakang panel surya bifasial. Gradasi warna dari ungu hingga kuning merepresentasikan distribusi suhu, di mana ungu menunjukkan suhu terendah dan kuning menunjukkan suhu tertinggi. Hasil pengukuran (ditandai kotak merah) menunjukkan suhu permukaan panel sebesar 42,2 °C, sedikit lebih tinggi dibandingkan suhu lingkungan sekitar yang tercatat 41,5 °C. Perbedaan suhu sebesar 0,7°C antara permukaan panel surya dan lingkungan sekitar mengindikasikan adanya akumulasi panas pada permukaan panel selama proses konversi energi matahari menjadi energi listrik. Visualisasi termal digunakan untuk mengidentifikasi potensi hotspot yang mungkin mempengaruhi kinerja panel surya bifasial akibat reflektor.



Gambar 12. Citra termal sisi belakang panel

5. KESIMPULAN

- a. Penempatan reflektor cermin datar pada sisi belakang panel surya bifasial mampu meningkatkan daya output panel surya bifasial. Berdasarkan hasil uji sepuluh

(10) skenario penempatan cermin datar dapat disimpulkan reflektor cermin datar yang ditempatkan di belakang panel surya bifasial dengan sudut 45° pada jarak 150 cm memberikan peningkatan daya tertinggi sebesar 310,91 W dengan efisiensi 15,74% pada iradiasi 730,57 W/m².

- b. Suhu di setiap sudut panel surya bifasial relatif merata dengan selisih minimum 0,31 °C pada pukul 17:00, tetapi cukup ekstrim pada pukul 11:00 yaitu sebesar 14,50 °C. Suhu panel surya bifasial cenderung meningkat seiring meningkatnya iradiasi matahari dan sebaliknya pada cuaca cerah. Penelitian lanjutan diperlukan untuk analisis suhu pada panel surya bifasial akibat reflektor untuk mengetahui potensi blank spot yang dapat merusak panel surya bifasial.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Mataram yang sudah memberikan dukungan dana untuk pengadaan bahan-bahan pembangunan PLTS bifasial *off-grid* melalui dana penelitian PNPB Fakultas Teknik 2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Ferdyson and J. Windarta, "Overview Pemanfaatan dan Perkembangan Sumber Daya Energi Surya Sebagai Energi Terbarukan di Indonesia," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, 2023, doi: 10.14710/jebt.2023.15714.
- [2] H. Mukhtar and I. Syaukani, "Metode Evaluasi Performa Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia," *Rekayasa Elektr. dan Energi*, vol. 8, no. 1, pp. 280–289, 2025, doi: 10.30596/rele.v8i1.22193.
- [3] N. I. Sijabat and Y. R. Pasalli, "Perencanaan PLTS Off-Grid Gedung Kantor Kelurahan Amban Manokwari Papua Barat," *Electr. J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 03, pp. 349–357, 2025, doi: 10.23960/elc.v19n3.2899.
- [4] G. Badran and M. Dhinish, "A comparative study of bifacial versus monofacial PV systems at the UK's largest solar plant," *Clean Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 248–260, Aug. 2024, doi: 10.1093/ce/zkae043.
- [5] O. H. AL-Zoubi, H. Al-Tahaine, R. A. Damseh, A. H. AL-Zubi, A.-S. A. Odat, and

- B. Shboul, "Evaluating the real-world performance of vertically installed bifacial photovoltaic panels in residential settings: empirical findings and implications," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 19, pp. 386–442, Jan. 2024, doi: 10.1093/ijlct/ctad138.
- [6] L. Kahana, "PVsyst-based comparative analysis for bifacial, monofacial PV projects," https://www.pv-magazine.com/2023/10/31/pvsyst-based-comparative-analysis-for-bifacial-monofacial-pv-projects/?utm_source=chatgpt.com (accessed Jul. 28, 2025).
- [7] M. Fischer, M. Woodhouse, and P. Baliozian, "International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV) 2023 Results," *Vdma*, no. May, p. 75, 2024, [Online]. Available: itrpv.vdma.org
- [8] S. Enkhardt, "ITRPV says solar module prices fell 50% in 2023," *pvmagazine.com*, 2024. https://www.pv-magazine.com/2024/06/05/itrpv-says-solar-module-prices-fell-50-in-2023/?utm_source=chatgpt.com (accessed Jul. 28, 2025).
- [9] K. S. Hayibo, A. Petsiuk, P. Mayville, L. Brown, and J. M. Pearce, "Monofacial vs Bifacial Solar Photovoltaic Systems in Snowy Environments," 2022. doi: 10.2139/ssrn.4056922.
- [10] F. Dincer and E. Ozer, "Numerical Analysis of Bifacial Photovoltaic Systems Under Different Snow Climatic Conditions," *Sustainability*, vol. 17, no. 14, p. 6350, 2025. doi: 10.3390/su17146350.
- [11] M. Alam, M. S. Gul, and T. Muneer, "Performance analysis and comparison between bifacial and monofacial solar photovoltaic at various ground albedo conditions," *Renew. Energy Focus*, vol. 44, pp. 295–316, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.01.005>.
- [12] H. Al-Sallal and M. Hamdan, "Bifacial Photovoltaic (PV) Systems Performance Enhancement Using a Selective Surface Reflector," *Int. J. Energy Convers.*, vol. 10, p. 37, Mar. 2022, doi: 10.15866/irecon.v10i2.21609.
- [13] W. Rizkika, M. I. Marzuki, and S. Prayogi, "The effect of concentrator reflector design on the energy conversion efficiency of bifacial solar cells," *TEKNOSAINS J. Sains, Teknol. dan Inform.*, vol. 13, no. 1 SE-Articles, Jan. 2026, doi: 10.37373/tekno.v13i1.1514.
- [14] H.-J. Song, D. Lee, C. Kim, and J.-H. Na, "Improved Performance of Bifacial Photovoltaic Modules with Low-Temperature Processed Textured Rear Reflector," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 19, p. 8718, 2024. doi: 10.3390/app14198718.
- [15] R. Barokah, N. Suryaman, and A. Rajani, "Experimental Study of Bifacial Solar Panels with Reflective Surface Variations in Bandung, Indonesia," *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) J.*, vol. 10, pp. 81–88, Aug. 2025, doi: 10.21070/r.e.m.v10i2.1758.
- [16] M. W. Aminullah, A. G. Gumilang, T. D. U. Rasyda, P. Pramadhony, R. Setiawan, and M. R. Al Fiansha, "Analisis Sistem Monitoring Dan Pencatatan Data Pada Panel Surya Dengan Menggunakan Solar Tracker Analysis of Monitoring and Data Logging System on Solar Panel Using Solar Tracker," *Ampere*, vol. 10, no. 2, pp. 251–260, 2025, doi: 10.31851/ampere.
- [17] A. Asnil, K. Krismadinata, I. Husnaini, H. Hazman, and E. Astrid, "Real-Time Monitoring System Using IoT for Photovoltaic Parameters," *TEM*, vol. 12, no. 3, pp. 1316–1322, 2023, doi: 10.18421/TEM123.
- [18] G. Shukla, A. K. Shukla, K. N. Shukla, and S. Dixit, "IoT-enabled solar PV systems: real-time monitoring and efficiency optimization," *Results Opt.*, vol. 22, p. 100949, 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rio.2025.100949>.
- [19] M. H. Khowarizmi and S. Setiyono, "Real-Time Monitoring System for Solar Power Plants Using PLC and IoT-Based Architecture," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 13, no. 2, pp. 215–227, 2025, doi: 10.26760/elkomika.v13i2.215.
- [20] I. M. A. Nnatha *et al.*, "Performance Analysis of On-Grid Rooftop Solar Power Plant with 600 Wp Capacity Based on Data Logger," *J. Renew. Energy, Electr. Comput. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 131–141, 2024, doi: 10.29103/jreece.v4i2.18303.
- [21] H. Sugiharto, T. H. Nufus, and C. S. Abadi, "Perencanaan Sistem Proteksi pada PLTS Atap Off-Grid untuk Suplai Utama Kebutuhan Listrik pada Rumah," in *Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, 2024, pp. 513–519. [Online]. Available: <http://prosiding.pnj.ac.id>
- [22] U. Muhammad, "Identifikasi Permasalahan Pengoperasian PLTS Offgrid," *J. Electr. Enggining*, vol. 4, no. 2, pp. 33–42, 2023, doi: 10.61141/joule.v4i1.440.