SINERGI *Polmed*: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

EVALUASI PENGARUH SUDUT KEMIRINGAN DAN AZIMUT TERHADAP DAYA KELUARAN PANEL SURYA POLIKRISTALIN PADA KONDISI BAYANGAN PARSIAL

Dewi Sholeha[a]*, Sri Ulina[b]

[a]*Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Prima Indonesia, Jl. Sampul No. 3, Sei Putih Barat, Medan Petisah, Kota Medan, Sumatera Utara, Indonesia*
[b]*Program Studi Teknologi Elektromedis, Fakultas Sains, Teknologi dan Informasi, Universitas Sari Mutiara Indonesia, Jl. Kapten Muslim No. 79, Helvetia Tengah, Kota Medan, Sumatera Utara 20123, Indonesia*

**Penulis korespondensi: dewisholeha@unprimdn.ac.id; alkhansadewi@gmail.com, (D. Sholeha), Tel.: +62823-7966-9365*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 18 Maret 2026
Direvisi pada 05 Agustus 2026
Disetujui pada 08 Oktober 2026
Tersedia daring pada 06 November 2026

Kata kunci:
Bayangan parsial; sudut kemiringan; azimut; daya keluaran; fotovoltaik.

Keywords:

Partial shading; tilt angle; azimuth; output power; photovoltaic module.

ABSTRAK

Pemanfaatan energi surya di wilayah tropis memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan. Namun, kinerja sistem fotovoltaik (PV) sering mengalami penurunan akibat fenomena *partial shading* yang tidak dapat dihindari dalam kondisi lapangan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara eksperimental pengaruh sudut kemiringan (*tilt angle*) dan sudut azimut terhadap kinerja panel surya polikristalin berkapasitas 200 Wp pada kondisi *partial shading*. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan sudut kemiringan antara 10° hingga 40° dan sudut azimut antara 10° hingga 40°, serta tingkat bayangan sebesar 0%, 25%, 50%, dan 75% dari luas permukaan panel. Pengukuran parameter listrik berupa tegangan dan arus dilakukan pada rentang waktu 10.00–14.00 WIB untuk menghitung daya keluaran panel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa bayangan, sudut kemiringan 20° menghasilkan daya rata-rata tertinggi sebesar 98,01 W. Sebaliknya, pada kondisi *partial shading*, terjadi penurunan daya rata-rata hingga 60,96% dibandingkan kondisi tanpa bayangan. Selain itu, *partial shading* juga menyebabkan pergeseran orientasi optimal panel, di mana kombinasi sudut kemiringan 30° dan sudut azimut 20° menghasilkan daya rata-rata tertinggi sebesar 44,724 W. Temuan ini menegaskan bahwa *partial shading* tidak hanya menurunkan kinerja panel surya secara signifikan, tetapi juga memengaruhi orientasi optimal modul PV. Oleh karena itu, faktor bayangan parsial perlu dipertimbangkan secara komprehensif dalam perancangan dan instalasi sistem PV, khususnya di wilayah tropis.

ABSTRACT

The utilization of solar energy in tropical regions has great potential as a renewable energy source. However, the performance of (PV) systems often experiences a decline due to the phenomenon of partial shading that cannot be avoided in field conditions. This study aims to experimentally analyze the effect of tilt angle and azimuth angle on the performance of a 200 Wp polycrystalline solar panel under partial shading conditions. Tests were conducted by varying the tilt angle between 10° to 40° and the azimuth angle between 10° to 40°, as well as the shading level of 0%, 25%, 50%, and 75% of the panel surface area. Measurements of electrical parameters in the form of voltage and current were carried out between 10:00–14:00 WIB to calculate the panel output power. The results showed that under conditions without shading, a tilt angle of 20° produced the highest average power of 98.01 W. Conversely, under partial shading conditions, there was a decrease in average power of up to 60.96% compared to conditions without shading. In addition, partial shading also causes a shift in the optimal orientation of the panel, where the combination of a tilt angle of 30° and an azimuth angle of 20° produces the highest average power of 44,724 W. This finding confirms that partial shading not only significantly reduces the performance of solar panels, but also affects the optimal orientation of PV modules. Therefore, partial shading factors need to be considered comprehensively in the design and installation of PV systems, especially in tropical regions.

1. PENGANTAR

Pengembangan energi terbarukan mendorong pemanfaatan modul fotovoltaik (PV) di wilayah tropis, termasuk di Indonesia (Sholeha dan Harahap, 2023). Potensi penyinaran matahari yang relatif tinggi mendukung pemanfaatan teknologi ini, tetapi daya listrik yang dihasilkan di lapangan dipengaruhi oleh iradiasi, temperatur, orientasi pemasangan, dan keberadaan bayangan pada permukaan modul (Li dkk., 2023; Prakoso dkk., 2024).

Bayangan parsial terjadi ketika sebagian permukaan panel terhalang oleh bangunan, pepohonan, atau objek lain. Pada modul yang sel-sel fotovoltaiknya terhubung secara seri, bayangan parsial dapat menyebabkan ketidakseragaman arus dan penurunan daya keluaran yang tidak proporsional terhadap luas permukaan yang tertutup (Gultom & Irwanto, 2025). Selain pola bayangan, sudut kemiringan dan azimut panel menentukan besarnya radiasi yang diterima. Oleh karena itu, evaluasi pengaruh orientasi dalam kondisi ternaungi perlu dilakukan berdasarkan hasil pengukuran langsung.

Penelitian terdahulu telah membahas karakteristik modul PV akibat bayangan parsial dan pengaruh penyesuaian orientasi panel (Sarkar dkk., 2024; Sholeha dkk., 2025). Namun, keterkaitan sudut kemiringan, sudut azimut, dan bayangan parsial dalam pengujian lapangan pada lokasi yang sama masih memerlukan data eksperimental yang terukur. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi daya keluaran panel surya polikristalin berdaya nominal 200 Wp pada variasi kemiringan 10°-40°, azimut 10°-40°, dan kondisi bayangan yang ditetapkan selama pengukuran di Medan. Kontribusi penelitian berupa perbandingan konfigurasi orientasi yang menghasilkan daya rata-rata tertinggi dalam rentang pengujian; hasilnya tidak dimaksudkan sebagai orientasi optimum tahunan.

1.1. Prinsip Kerja Panel Surya Polikristalin

Modul fotovoltaik mengubah energi cahaya menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik pada material semikonduktor. Sel silikon polikristalin digunakan secara luas karena tersedia secara komersial dan memiliki biaya produksi yang relatif terjangkau (Miglioli dkk., 2023; Rezk dkk., 2020). Hubungan arus dan tegangan pada modul bersifat nonlinier serta dipengaruhi oleh tingkat penyinaran dan temperatur. Karakteristik listrik modul dapat dijelaskan menggunakan kurva arus-tegangan (I-V) dan daya–tegangan (P-V), yang berubah ketika intensitas penyinaran pada sel tidak seragam (Napitupulu dan Sholeha, 2025).

1.2. Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimut

Sudut kemiringan menunjukkan posisi bidang panel terhadap horizontal, sedangkan sudut azimut menunjukkan arah hadap panel pada bidang horizontal. Kedua parameter memengaruhi sudut datang radiasi matahari dan, pada akhirnya, daya keluaran modul. Pada wilayah tropis, orientasi terbaik bergantung pada lintang lokasi, waktu pengamatan, musim, dan kendala pemasangan (Sholeha dan Harahap, 2023; Sholeha dkk., 2025). Oleh sebab itu, konfigurasi yang menghasilkan daya tertinggi pada satu rentang waktu pengukuran belum tentu memberikan energi tahunan tertinggi.

Ketika sebagian sel ternaungi, arus rangkaian seri dapat dibatasi oleh sel yang menerima iradiasi lebih rendah. Kondisi tersebut dapat memicu rugi ketidakcocokan (*mismatch loss*) dan, pada konfigurasi tertentu, menimbulkan titik panas (*hot spot*) (Napitupulu dan Sholeha, 2025). Dampak bayangan juga dipengaruhi oleh letak area tertutup, susunan sel, dan karakteristik dioda bypass, sehingga persentase luas bayangan saja belum cukup untuk menjelaskan seluruh perubahan daya keluaran (Salimi dkk., 2020).

1.3. Penurunan Daya Akibat Bayangan Parsial

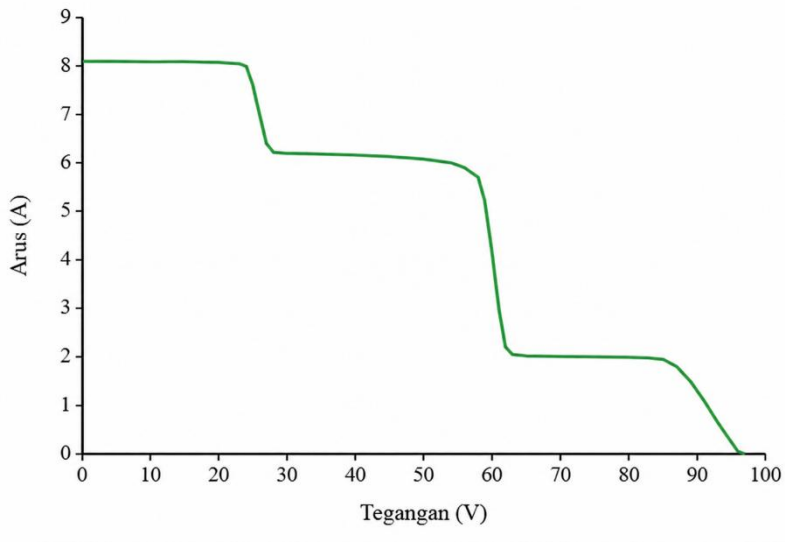
Bayangan parsial menyebabkan sebagian sel atau kelompok sel menerima iradiasi berbeda. Perbedaan ini dapat memunculkan beberapa puncak pada kurva daya–tegangan dan menurunkan daya yang dapat diperoleh dari modul (Abdulmawjood dkk., 2022). Besarnya penurunan bergantung pada pola bayangan, kondisi lingkungan, dan konfigurasi kelistrikan modul. Karena itu, interpretasi kinerja perlu mengacu pada daya terukur dan kondisi pengujian, bukan hanya luas permukaan yang tertutup.

1.4. Penyesuaian Orientasi pada Kondisi Bayangan Parsial

Perubahan sudut kemiringan dan azimut dapat mengubah arah datang cahaya serta distribusi penyinaran di permukaan panel. Dengan demikian, konfigurasi yang memberikan daya terbesar pada kondisi tanpa bayangan tidak selalu sama dengan konfigurasi pada kondisi ternaungi (He dkk., 2024). Penelitian berbasis model dan eksperimen telah mengkaji perubahan performa modul akibat bayangan parsial (Rezk dkk., 2020; Sarkar dkk., 2024), tetapi hasilnya perlu ditafsirkan berdasarkan lokasi, waktu, dan bentuk bayangan pada masing-masing pengujian.

Studi mengenai sistem PV pada kondisi bayangan parsial menunjukkan bahwa daya keluaran cenderung berkurang ketika bagian permukaan panel yang tidak menerima cahaya semakin luas (Abdulmawjood dan Morsi, 2025; Timur dan Uzundağ, 2025). Namun, hubungan tersebut tidak harus linier karena hasil pengukuran juga ditentukan oleh jalur interkoneksi sel dan pengaktifan dioda bypass. Oleh karena itu, perbandingan antarskenario memerlukan penjelasan pola bayangan dan kondisi iradiasi saat pengambilan data.

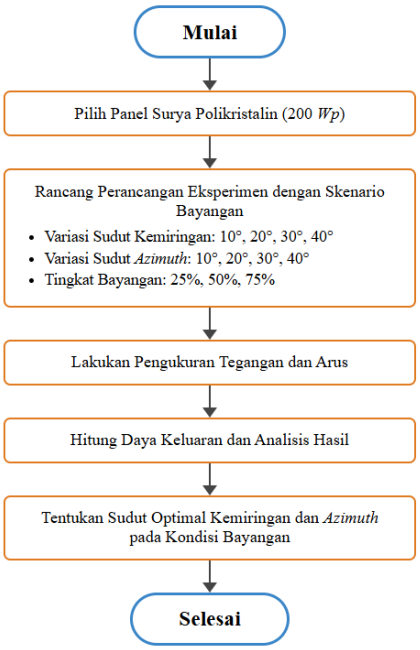
Temperatur sel dan ketidakseragaman penyinaran dapat mengubah tegangan maupun arus keluaran modul (Özkalay dkk., 2024). Ketika beberapa kelompok sel ternaungi, bentuk kurva I–V juga dapat mengalami perubahan sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1 (Vieira dkk., 2020). Dalam penelitian ini, hasil pengukuran tegangan dan arus digunakan untuk menghitung daya listrik melalui hubungan $P = V \times I$. Perbedaan daya selanjutnya dibandingkan berdasarkan sudut kemiringan, sudut azimut, dan kondisi bayangan.



Gambar 1: Ilustrasi karakteristik arus–tegangan modul PV pada kondisi bayangan parsial (Vieira dkk., 2020).

2. METODE

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Politeknik Penerbangan Medan, Jl. Penerbangan No. 85, Kecamatan Medan Selayang, Kota Medan, Sumatera Utara (3,5325° LU; 98,6425° BT), pada Agustus–September 2024. Objek penelitian berupa modul surya silikon polikristalin berdaya nominal 200 Wp. Pengamatan mencakup sudut kemiringan 10°, 20°, 30°, dan 40°; variasi sudut azimut 10°, 20°, 30°, dan 40°; serta kondisi tanpa bayangan dan bayangan parsial sebagaimana dijelaskan dalam rancangan pengujian. Alur pelaksanaan penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2: Diagram alir pelaksanaan penelitian

Pengukuran dimulai dari posisi panel surya dengan kemiringan 10° dari sumbu x dan arah panel 0° ke arah timur sampai kepada kemiringan 40° terhadap sumbu x dan kondisi luas penampang panel surya yang terpapar matahari mulai dari *full* terpapar, kemudian *shading* 25% kemudian 50% dan 75%. Masing posisi kemiringan akan dibandingkan dengan posisi sudut *azimuth* bumi mulai dari 10°, 20°, 30°, dan 40°. Sudut 10°, 20°, 30°, dan 40° tanpa *shading* dan dengan *shading* ditunjukkan pada Tabel 1 sampai 8.

Tabel 1: Hasil Pengukuran Pada Kemiringan 10° Tanpa Bayangan

Sudut Panel	Jam	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
10°	10.00	33,4	2,5	83,5
	11.00	36,2	4,2	152,04
	12.00	33,7	1,2	40,44
	13.00	33,9	1,2	40,68

Sudut Panel	Jam	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
	14.00	36,2	2,4	86,88
Rata-rata				80,708

Tabel 2: Hasil Pengukuran Pada Kemiringan 20° Tanpa Bayangan

Sudut Panel	Jam	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
20°	10.00	32,8	2,2	72,16
	11.00	36,7	4,4	161,48
	12.00	35,2	2,6	91,52
	13.00	36,1	3,3	119,13
	14.00	35,2	1,3	45,76
Rata-rata				98,01

Tabel 3: Hasil Pengukuran Pada Kemiringan 30° Tanpa Bayangan

Sudut Panel	Jam	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
30°	10.00	32,1	1,7	54,57
	11.00	36,4	4,1	149,24
	12.00	34,3	1,6	54,88
	13.00	35,2	2,8	98,56
	14.00	34,8	1,09	37,932
Rata-rata				79,0364

Tabel 4: Hasil Pengukuran Pada Kemiringan 40° Tanpa Bayangan

Sudut Panel	Jam	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
40°	10.00	32,4	1,4	45,36
	11.00	36,5	3,4	124,1
	12.00	34,8	1,7	59,16
	13.00	35,8	3,08	110,264
	14.00	34,7	1,2	41,64
Rata-rata				76,1048

Tabel 5: Daya Keluaran Pada Kemiringan 10° dalam Kondisi Bayangan

Vertikal	Azimut	Pukul	Daya Rata-Rata per Jam (W)
10°	0	10.00	35,8
		11.00	63,28
		12.00	60,62
		13.00	15
		14.00	32,48
Rata-rata Keseluruhan			41,436

Tabel 6: Daya Keluaran Pada Kemiringan 20° Dalam Kondisi Bayangan

Vertikal	Azimut	Pukul	Daya Rata-Rata per Jam (W)
20°	0	10.00	32,56
		11.00	16,12
		12.00	36,14
		13.00	52,8
		14.00	18,93
Rata-rata Keseluruhan			31,31

Tabel 7: Daya Keluaran Pada Kemiringan 30° Dalam Kondisi Bayangan

Vertikal	Azimut	Pukul	Daya Rata-Rata per Jam (W)
30°	0	10.00	26,63
		11.00	61,22
		12.00	26,24
		13.00	46,06
		14.00	17,14
Rata-rata Keseluruhan			35,85

Tabel 8: Daya Keluaran Pada Kemiringan 40° Dalam Kondisi Bayangan

Vertikal	Azimut	Pukul	Daya Rata-Rata per Jam (W)
40°	0	10.00	20,58
		11.00	50,09
		12.00	14,87
		13.00	53,79
		14.00	19,36
Rata-rata Keseluruhan			31,738

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

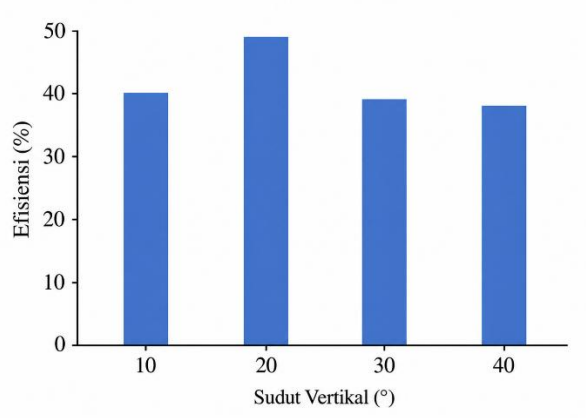
Pada penelitian ini dilakukan pengukuran eksperimental secara langsung pada panel surya dengan kapasitas 200WP jenis Polikristalin dengan memvariasikan sudut kemiringan (10°, 20°, 30° dan 40°), sudut *Azimuth* (10°, 20°, 30° dan 40°) dan tingkat *partial shading* (0%, 25%, 50%, 75%). Data yang dihasilkan dari keluaran yang diukur pada panel surya adalah berupa daya (W), tegangan (V), dan arus (A) dalam beberapa posisi sudut dari panel surya dengan kondisi suhu, kelembaban dan intensitas dari cahaya Matahari. Waktu penelitian dilaksanakan pada jam 10.00 WIB sampai dengan jam 14.00WIB dan data diambil setiap satu jam sekali, yaitu jam 10.00, jam 11.00, jam 12, 13.00, dan jam 14.00. Pengambilan data pada jam tersebut dikarenakan intensitas cahaya matahari paling maksimum dalam satu hari.

3.1. Pengaruh Sudut Kemiringan pada Orientasi Acuan

Pada kelompok pertama, kemiringan panel diatur sebesar 10°, 20°, 30°, dan 40°, sedangkan orientasi horizontal dipertahankan pada posisi acuan. Nilai daya diukur ketika permukaan panel tidak ternaungi dan ketika diberikan bayangan parsial. Data pengukuran ditampilkan pada Tabel 1-8. Karena kondisi atmosfer dapat berubah sepanjang hari, perbandingan hasil ini mencerminkan rentang dan pengaturan yang diuji, bukan kinerja tahunan modul.

3.1.1. Kondisi Tanpa Bayangan

Pada kondisi tanpa bayangan, daya keluaran rata-rata untuk setiap kemiringan dihitung dari lima pengukuran per jam sebagaimana disajikan pada Tabel 1-4. Perbandingan rasio daya rata-rata terhadap daya nominal modul ditunjukkan pada Gambar 3.

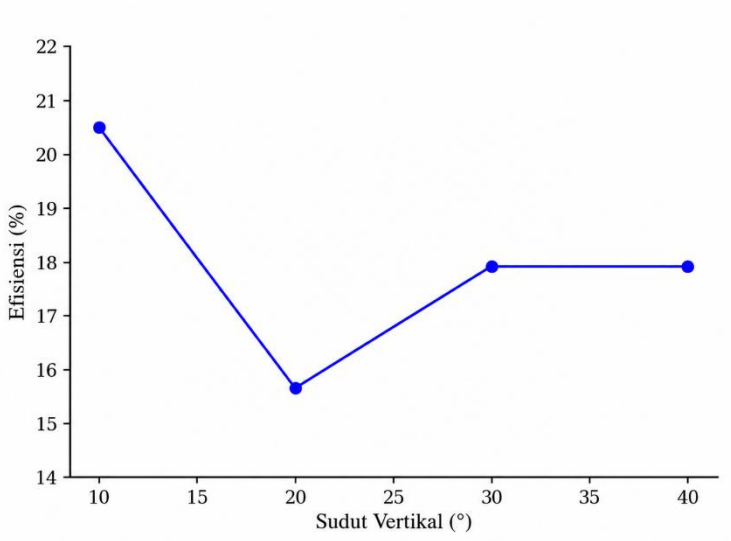


Gambar 3: Perbandingan rasio daya rata-rata terhadap daya nominal pada variasi kemiringan tanpa bayangan

Berdasarkan Tabel 1-4, sudut kemiringan 20° menghasilkan daya rata-rata tertinggi sebesar 98,01 W selama periode pengukuran. Angka tersebut setara dengan 49,01% daya nominal 200 Wp. Persentase ini merupakan rasio daya terukur terhadap daya nominal pada kondisi uji, bukan efisiensi konversi fotovoltaik. Hasil tersebut menggambarkan keluaran listrik pada rentang waktu pengamatan dan tidak dapat langsung digeneralisasi untuk seluruh musim.

3.1.2. Kondisi Bayangan Parsial

Pengujian dengan bayangan dilakukan pada variasi kemiringan 10°, 20°, 30°, dan 40°. Tabel 5-8 menyajikan daya keluaran pada orientasi acuan selama pukul 10.00–14.00 WIB. Informasi pada tabel belum memisahkan nilai pengukuran untuk bayangan seluas 25%, 50%, dan 75%; karena itu, hasil yang tersedia hanya dapat dibandingkan sebagai kelompok pengujian dengan bayangan, bukan sebagai kurva respons terhadap masing-masing tingkat bayangan.



Gambar 4: Perbandingan rasio daya rata-rata terhadap daya nominal pada variasi kemiringan dalam kondisi bayangan

Rasio daya terhadap kapasitas nominal dihitung dari daya keluaran rata-rata dibagi daya nominal modul, kemudian dikalikan 100%. Nilai tertinggi pada Tabel 5-8 dijadikan dasar perbandingan konfigurasi pada orientasi acuan. Perhitungan ini tidak sama dengan efisiensi konversi energi surya yang memerlukan data iradiasi dan luas aktif modul.

$$\mathrm{Ap} = \frac{35{,}85}{200} \times 100 = 17{,}92\ \% \tag{1}$$

Pada persamaan tersebut, Ap adalah efisiensi panel surya (%), 35,85 adalah daya keluaran rata-rata keseluruhan pada kondisi *shading* (W), dan 200 adalah kapasitas daya nominal panel (Wp). Berdasarkan Persamaan 1, diperoleh nilai efisiensi panel surya (Ap) sebesar 17,92%.

3.2. Pengaruh Kombinasi Sudut Kemiringan dan Azimut

Pengujian kedua membandingkan variasi sudut kemiringan 10°, 20°, 30°, dan 40° dengan sudut azimut 10°, 20°, 30°, dan 40°. Pengukuran mencakup kondisi tanpa bayangan dan kondisi bayangan sebagaimana disajikan pada Tabel 9 dan Tabel 10. Perbandingan diarahkan pada daya yang dicatat untuk masing-masing kombinasi sudut sebagaimana tercantum dalam kedua tabel.

3.2.1 Kondisi Tanpa Bayangan

Daya keluaran rata-rata pada berbagai kombinasi kemiringan dan azimut dalam kondisi tanpa bayangan disajikan pada Tabel 9. Nilai pada tabel digunakan untuk mengidentifikasi konfigurasi dengan daya rata-rata terbesar dalam rentang sudut dan waktu pengujian.

Tabel 9: Daya Keluaran Rata-Rata Pada Variasi Kemiringan dan Azimut Tanpa Bayangan

Vertikal	Azimut	Daya Rata-Rata per Jam (W)	Daya Rata-Rata Maksimum (W)
10	10	94,98	
10	20	98,814	
10	30	106,146	
10	40	92,274	
20	10	62,214	
20	20	61,324	106,146
20	30	74,288	
20	40	69,932	
30	10	97,264	
30	20	100,22	

Vertikal	Azimut	Daya Rata-Rata per Jam (W)	Daya Rata-Rata Maksimum (W)
30	30	97,958	
30	40	85,534	
40	10	89,56	
40	20	90,85	
40	30	90,89	
40	40	96,4572	

Berdasarkan Tabel 9, daya rata-rata tertinggi tercatat sebesar 106,146 W pada kemiringan 10° dan azimut 30°. Angka tersebut adalah hasil pengukuran tertinggi dalam kombinasi yang diuji, bukan bukti bahwa konfigurasi tersebut optimal untuk kondisi penyinaran sepanjang tahun.

$$Ap = \frac{106{,}146}{200} x100 = 53{,}07\% \quad (2)$$

Rasio daya 106,146 W terhadap daya nominal modul 200 Wp adalah 53,073% atau sekitar 53,07%. Besaran ini menyatakan tingkat keluaran relatif terhadap daya nominal, bukan efisiensi sel surya yang dihitung dari iradiasi pada bidang modul.

3.2.2 Kondisi Bayangan Parsial

Pengujian selanjutnya dilakukan pada panel surya dalam kondisi naungan parsial (*partial shading*). Pengukuran dilakukan dengan memvariasikan sudut vertikal panel sebesar 10°, 20°, 30°, dan 40°, serta sudut datang sinar matahari sebesar 10°, 20°, 30°, dan 40°. Hasil pengukuran pada kondisi tersebut disajikan dalam Tabel 10.

Tabel 10: Daya Keluaran Rata-Rata Pada Variasi Kemiringan dan Azimut Dalam Kondisi Bayangan

Vertikal	Azimut	Daya Rata-Rata per Jam (W)	Daya Rata-Rata Maksimum (W)
10	10	41,116	
10	20	40,32	
10	30	43,296	
10	40	44,384	
20	10	27,534	
20	20	26,648	
20	30	31,95	
20	40	31,956	
30	10	43,642	
30	20	44,724	
30	30	43,61	
30	40	38,61	
40	10	38,554	44,724
40	20	40,486	
40	30	41,366	
40	40	43,604	

Pada kondisi bayangan dalam Tabel 10, kombinasi kemiringan 30° dan azimut 20° menghasilkan daya rata-rata terbesar, yaitu 44,724 W. Konfigurasi ini dinilai terbaik hanya di antara kombinasi yang diuji dan dalam kondisi pengukuran yang dilaporkan.

$$Ap = \frac{44{,}724}{200} x100 = 22{,}36\% \quad (3)$$

Berdasarkan Persamaan 3, diperoleh nilai Ap sebesar 22,36% (Abdulmawjood dkk., 2022).Temuan bahwa kombinasi sudut kemiringan 30° dan *azimuth* 20° menghasilkan daya rata-rata tertinggi pada kondisi *shading* (44,724 W) dapat dikaitkan dengan posisi geografis lokasi pengujian di Kota Medan yang terletak sangat dekat dengan garis khatulistiwa (3,5325° LU). Pada lintang rendah seperti ini, lintasan harian matahari cenderung tinggi dan mendekati posisi *zenith*, dengan pergerakan sudut *altitude* dan *azimuth* matahari yang relatif cepat sepanjang jendela pengukuran pukul 10.00–14.00 WIB. Sudut kemiringan 30° berada pada rentang menengah dari rentang uji (10°–40°) dan diduga menghasilkan sudut datang sinar matahari yang secara rata-rata paling mendekati tegak lurus terhadap permukaan panel selama rentang waktu tersebut, dibandingkan sudut yang lebih landai (10°–20°) yang cenderung optimal hanya pada saat matahari rendah, maupun sudut yang lebih curam (40°) yang cenderung optimal pada kondisi lintasan matahari yang berbeda. Rotasi azimut sebesar 20° dari posisi awal (menghadap arah datangnya matahari pukul 10.00 WIB) diduga turut mengompensasi pergeseran posisi matahari dari pagi menuju siang, sehingga sudut datang efektif matahari terhadap bidang panel tetap relatif tinggi pada rentang waktu yang lebih panjang.

Dari sudut pandang distribusi iradiasi pada permukaan sel yang mengalami partial shading, orientasi yang menghasilkan sudut datang matahari lebih tegak lurus terhadap bidang panel berpotensi memperkecil luas bayangan efektif yang jatuh pada sel-sel yang

tertutup, sehingga mengurangi jumlah dan durasi aktifnya *bypass diode* pada modul (sebagaimana dijelaskan pada Gambar 1). Dengan aktivasi *bypass diode* yang lebih singkat, string sel yang tidak ternaungi dapat mempertahankan tegangan dan arus keluaran yang lebih tinggi pada rentang waktu yang lebih lama, sehingga daya rata-rata yang dihasilkan pada kombinasi sudut 30° dan *azimuth* 20° menjadi lebih tinggi dibandingkan orientasi lain yang diuji. Hasil perbandingan *Azimuth* tanpa *shading* dan dengan *shading* ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11: Perbandingan Rasio Daya Terhadap Daya Nominal Pada Kondisi Tanpa Bayangan dan Bayangan

Sudut kemiringan (°)	tanpa bayangan (%)	dengan bayangan (%)
10	40,35	20,50
10	46,00	15,65
10	39,52	17,92
10	38,05	17,92

Tabel 11 menyajikan perbandingan rasio daya rata-rata terhadap daya nominal modul pada kondisi tanpa bayangan dan dengan bayangan untuk setiap sudut kemiringan. Hasil perbandingan tersebut menunjukkan perubahan daya keluaran akibat kondisi bayangan pada rentang pengujian yang dilakukan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi sudut kemiringan, azimut, dan kondisi bayangan berkaitan dengan perbedaan daya keluaran panel surya polikristalin berkapasitas 200 Wp selama pengujian. Pada kondisi tanpa bayangan dengan orientasi acuan, sudut kemiringan 20° menghasilkan daya rata-rata tertinggi sebesar 98,01 W. Ketika sudut kemiringan dan azimut divariasikan secara bersamaan, daya rata-rata tertinggi pada kondisi tanpa bayangan mencapai 106,146 W pada kemiringan 10° dan azimut 30°, setara dengan 53,07% dari daya nominal panel. Sementara itu, pada kondisi bayangan parsial, daya rata-rata tertinggi sebesar 44,724 W diperoleh pada kemiringan 30° dan azimut 20°, atau 22,36% dari daya nominal. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi dengan keluaran daya tertinggi tidak sama antara kondisi tanpa bayangan dan bayangan parsial dalam rentang pengujian yang dilakukan. Hasil penelitian ini memberikan informasi awal mengenai pengaruh pengaturan orientasi panel fotovoltaik terhadap daya keluaran pada lokasi yang berpotensi mengalami bayangan parsial. Namun, pengaruh masing-masing tingkat bayangan belum dapat ditentukan secara kuantitatif karena data bayangan 25%, 50%, dan 75% tidak disajikan secara terpisah. Selain itu, pengukuran iradiasi matahari, temperatur panel, dan karakteristik bayangan belum terdokumentasi secara memadai. Oleh karena itu, pengujian lanjutan dengan pengendalian kondisi lingkungan, variasi waktu pengamatan, dan pengulangan eksperimen diperlukan untuk menentukan konfigurasi orientasi yang lebih andal pada kondisi operasi aktual.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami memberikan penghargaan dan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada Program Studi Teknik Elektro Universitas Prima Indonesia (UNPRI) atas segala dukungan dan fasilitas yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat memengaruhi pelaksanaan atau pelaporan hasil penelitian ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

KONTRIBUSI PENULIS

Dewi Sholeha : Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Validasi Data, Dan Penyusunan Draf Awal.
Sri Ulina : Visualisasi, Tinjauan dan Penyuntingan.
Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan. Seluruh penulis juga bertanggung jawab atas integritas, keakuratan, dan keabsahan isi artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Abdulmawjood, K., Alsadi, S., Refaat, S. S., & Morsi, W. G. (2022). Characteristic Study of Solar Photovoltaic Array under Different Partial Shading Conditions. IEEE Access, 10.

Abdulmawjood, K., & Morsi, W. G. (2025). Analyzing Partial Shading in PV Systems Using Wavelet Packet Transform and Empirical Mode Decomposition Techniques. IEEE Access, 13.

Aninat, R., Bakker, K., Henzel, J., Zardetto, V., Dogan, I., Gevaerts, V., Veenstra, S., & Theelen, M. (2026). Mapping the Partial Shading Degradation in a Monolithically Integrated Perovskite Module. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 34(1).

Faizol, Z., & Zubir, F. (2023). Detection Method of Partial Discharge on Transformer and Gas-Insulated Switchgear: A Review.

He, Y., Tan, C. L., Lu, Y., Qu, Y., & Liu, J. (2024). Solar radiation and daily light integral characteristics of photovoltaic-green roof system in tropical area: A case study in Singapore. Solar Energy, 279.

Li, J., Liu, Z., Li, K. J., Guo, Z., Li, B., & Feng, J. (2023). An Improved Maximum Power Point Tracking Method under Partial Shading Condition. 2023 IEEE IAS Industrial and Commercial Power System Asia, I and CPS Asia 2023.

Miglioli, A., Aste, N., Del Pero, C., & Leonforte, F. (2023). Photovoltaic-thermal solar-assisted heat pump systems for building applications: Integration and design methods. In Energy and Built Environment (Vol. 4, Number 1).

Napitupulu, J., & Sholeha, D. (2025). Studi Manajemen Energi Bangunan dan Gedung Perkantoran.

Napitupulu, J., Sholeha, D., & Munthe, I. (2023). Solar Panel Module Output Energy Analiysis Using Flat Mirror. International Journal of Advanced Research, 11(01), 1726–1731.

Napitupulu, J., Sholeha, D., Sinaga, J., Sitohang, R., & Napitupulu, R. (2023). Study Perencanaan PLTS Sistem Off Grid Skala Kecil Rumah Tangga. Jurnal Darma Agung, 31(1).

Özkalay, E., Valoti, F., Caccivio, M., Virtuani, A., Friesen, G., & Ballif, C. (2024). The effect of partial shading on the reliability of photovoltaic modules in the built-environment. EPJ Photovoltaics, 15.

Prakoso, R. N., Efendi, M. Z., & Habibi, M. N. (2024). Design and Implementation Mountaineering Team-Based Optimization Algorithm for MPPT on Partial Shading Conditions. 2024 International Electronics Symposium: Shaping the Future: Society 5.0 and Beyond, IES 2024 - Proceeding.

Rezk, H., Al-Dhaifallah, M., Hassan, Y. B., & Ziedan, H. A. (2020). Optimization and Energy Management of Hybrid Photovoltaic-Diesel-Battery System to Pump and Desalinate Water at Isolated Regions. IEEE Access, 8.

Salimi, H., Ahmadi Danesh Ashtiani, H., Mirabdolah Lavasani, A., & Fazaeli, R. (2020). Experimental analysis and modeling of weather condition effects on photovoltaic systems' performance: Tehran case study. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects.

Sarkar, S., Uma Rao, K., Prema, V., Bhaskar, M. S., Padmanaban, S., & Bhargav, J. (2024). A model for effect of partial shading on PV panels with experimental validation. Energy Reports, 12.

Shaban, W. M., Kabeel, A. E., El Hadi Attia, M., & Talaat, F. M. (2024). Optimizing photovoltaic thermal solar systems efficiency through advanced artificial intelligence driven thermal management techniques. Applied Thermal Engineering, 247.

Sholeha, D., & Harahap, M. (2023). Analisis Penggunaan Photovoltaic dalam Pengembangan Teknologi Sistem Pembangkit Listrik Hybrid Untuk Rumah Tinggal Di Kabupaten Aceh Tenggara. Jurnal Darma Agung, 31(2).

Sholeha, D., Simamora, A. M., Sinaga, J., & Faisal, A. (2025). The Relationship between the Intensity of Solar Radiation and the Output Photovoltaic Using Multiple Linier Regression Methods in North Sumatera. JESCE (Journal of Electrical and System Control Engineering), 8(2), 200–226.

Timur, O., & Uzundağ, B. K. (2025). Design and Analysis of a Hybrid MPPT Method for PV Systems Under Partial Shading Conditions. Applied Sciences (Switzerland), 15(13).

T. T. Gultom, & M. Irwanto. (2025). Evaluation of Wireless Solar Power Transfer System Performance in Partial Shadowing Situation," ELKHA: Jurnal Teknik Elektro, vol.. 17, no.2, 2025, pp. 211 – 218, doi: 10.26418/elkha.v17i2.97636

Vieira, R., de Araújo, F., Dhimish, M., & Guerra, M. (2020). A Comprehensive Review on Bypass Diode Application on Photovoltaic Modules. Energies, 13(10), 2472.