

Analisis Pengaruh Bayangan Sebagian Terhadap Karakteristik Daya Listrik pada PV Array

Luqi Abidin¹, Ciptian Weried Priananda^{2*}, Khafit Imron Muzaki², Fauzi Imaduddin Adhim²,
Lucky Putri Rahayu², Arif Musthofa²

¹PT PLN UPDL Padang, Padang, Indonesia

²Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

*Email: ciptian@eea.its.ac.id

Abstract— Fenomena *Photovoltaic Array* (PV Array) tertutup bayangan sebagian sangat berpotensi terjadi pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Fenomena tersebut dapat menyebabkan penurunan perolehan daya listrik pada PLTS. Penurunan daya listrik ini dipengaruhi oleh seberapa besar bayangan yang timbul pada area PV Array. Pada penelitian ini dilakukan pengujian melalui pendekatan simulasi (*software*) dan eksperimental (*hardware*) untuk mengetahui efek tertutup bayangan sebagian terhadap penurunan daya listrik keluaran PV Array. Penelitian ini melakukan pengujian secara praktis pada PV Array yang tersusun dari 25 modul PV 3-watt peak. PV Array ini memiliki konfigurasi 5 string dengan daya total 75-watt peak. Pada proses pengujian, digunakan beberapa skema tertutup bayangan sebagian dengan nilai persentase dan bentuk yang bervariasi. Pengujian dilakukan dengan mengambil data arus dan tegangan pada satu daya keluaran PV Array. Selanjutnya daya PV Array dihitung dengan mengalikan nilai arus dan tegangan. Perhitungan ini kemudian disajikan dalam bentuk kurva karakteristik P-V (Daya-Tegangan). Berdasarkan hasil pengujian, masing-masing skema tertutup bayangan sebagian memberikan dampak yang berbeda terhadap penurunan nilai daya listrik serta bentuk kurva karakteristik P-V yang dihasilkan selama proses pengujian. Pada kurva karakteristik P-V, ditemukan adanya sejumlah titik puncak daya (maksimum *power point*) dengan beragam variasi nilai puncak.

Keyword: Maksimum *power point*, *photovoltaic Array*, PLTS.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA sebagai sebuah wilayah yang berada di khatulistiwa menjadikan potensi pemanfaatan energi sinar matahari sangat berlimpah [1]. Selain itu, sinar matahari menjadi sumber energi yang minimum polutan untuk dimanfaatkan dalam berbagai keperluan [2]. Sinar matahari dapat dimanfaatkan untuk memproduksi energi listrik dengan memanfaatkan

perangkat yang disebut *photovoltaic* (PV). Energi matahari yang diterima oleh PV akan dikonversikan menjadi energi listrik melalui fenomena efek *photo-current* [3].

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) membutuhkan beberapa modul PV yang dirangkai menjadi sebuah PV Array. Rangkaian PV Array dapat dikonfigurasi secara seri, paralel, maupun seri-paralel sesuai dengan kapasitas daya dan tegangan sistem yang dibutuhkan [1], [3], [4]. Dalam implementasinya, instalasi PV Array pada PLTS bisa mencakup wilayah yang luas sehingga dimungkinkan dalam pengoperasiannya setiap hari terdapat beberapa bagian PV yang tidak terpapar sinar matahari dengan intensitas yang seragam. Sebagian area PV Array dapat tertutup bayangan yang dihasilkan oleh beberapa hal seperti bayangan awan, gedung, pepohonan, maupun objek yang lain di sekitar PLTS. Fenomena ini selanjutnya disebut sebagai PV Array tertutup bayangan sebagian [5].

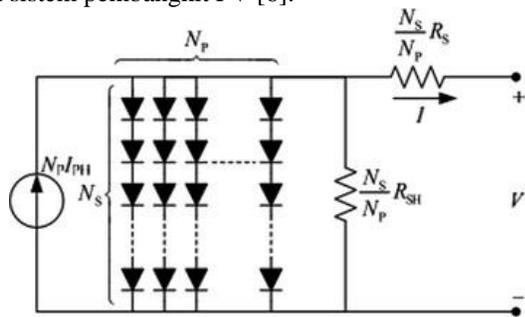
Fenomena tertutup bayangan sebagian memberikan dampak yang cukup serius dimana salah satunya adalah jumlah daya listrik yang dihasilkan oleh PV Array tidak optimal [4], [6], [7]. Para peneliti telah banyak melakukan penelitian untuk mempelajari berbagai macam kemungkinan dampak penurunan daya listrik dari berbagai skema efek bayangan sebagian pada PV Array dan pendekatan simulasi menjadi populer digunakan [4]–[16].

Pada penelitian ini, selain dilakukan pendekatan pemodelan matematis serta simulasi, telah dilakukan pula pendekatan eksperimen efek tertutup bayangan sebagian pada *hardware* PV Array dengan konfigurasi lima string dengan kapasitas total 75 watt peak. Eksperimen efek tertutup bayangan sebagian dengan beberapa skema dalam bentuk persentase dan pola yang berbeda dilakukan dalam penelitian ini. Pada proses pengujian, akan diambil data tegangan, arus, dan daya dari PV Array yang telah diberikan skema tertutup bayangan sebagian. Selanjutnya, data tegangan dan daya akan disajikan dalam bentuk grafik kurva karakteristik P-V (Daya-Tegangan) dari PV Array. Hasil pengujian dengan pendekatan simulasi dan eksperimen akan dikombinasikan serta dianalisis untuk mengetahui pengaruh efek tertutup bayangan sebagian terhadap penurunan daya maksimum serta bentuk kurva karakteristik dari PV.

II. METODOLOGI

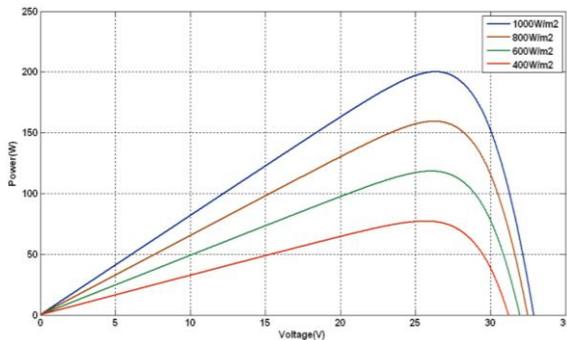
A. Sistem Photovoltaic (PV)

Gambar 1 merupakan ilustrasi dari PV cells. I_{pH} adalah arus yang dikeluarkan oleh PV cells. Besarnya arus yang dikeluarkan oleh PV cells sebanding dengan kuantitas radiasi sinar matahari yang diterima oleh PV cells. R_{sh} dan R_s masing-masing adalah resistansi *shunt* intrinsik dan resistansi seri yang nilainya tergantung dari material PV cells tersebut. Secara umum nilai R_{sh} sangat besar jika dibandingkan dengan nilai R_s , sehingga dalam analisisnya bisa diabaikan untuk model yang sederhana. Secara praktis, PV cells dikelompokkan menjadi lebih besar menjadi satu unit yang disebut modul PV. Modul-modul PV ini terhubung dalam seri atau paralel untuk membuat PV Array yang digunakan untuk menghasilkan listrik dalam sistem pembangkit PV [6].



Gambar. 1. Rangkaian Ekuivalen PV cells [6]

Gambar 1 menunjukkan model PV yang digunakan dalam pembahasan. Sementara Gambar 2 menunjukkan kurva karakteristik pengaruh jumlah intensitas sinar matahari serta tinggi rendahnya temperatur terhadap daya (watt) yang dikeluarkan oleh PV [3].



Gambar. 2. Kurva Karakteristik P-V dengan Variasi Paparan Radiasi [7]

Arus keluaran (I_{pH}) dirumuskan dengan Persamaan 1 berikut:

$$I_{pH} = [I_{sc} + K_i (T-298)] \times I_r / 1000 \dots \dots \dots (1)$$

dimana:

- I_{pH} : Arus photovoltaic (ampere)
- I_{sc} : Arus hubung singkat (ampere)
- K_i : Arus hubung singkat saat 25°C dan 1000 watt/m²
- T : Suhu operasi (°C)
- I_r : Radiasi Matahari (watt/m²)

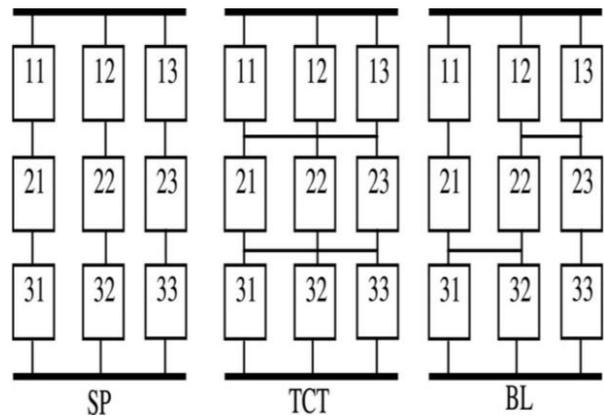
Daya listrik yang dikeluarkan oleh PV bersifat *non-linier* dan berubah terhadap waktu (*time-varying*) serta dipengaruhi oleh jumlah paparan intensitas radiasi, temperatur PV cells, kondisi beban, dan beberapa faktor lainnya. Paparan intensitas matahari yang tidak maksimal serta temperatur PV cells yang tinggi, dapat menyebabkan tidak maksimalnya perolehan daya listrik dari kapasitas maksimal *photovoltaic* [3]. Pada penelitian ini, digunakan modul PV dengan spesifikasi yang ditunjukkan oleh Tabel 1.

TABEL I
SPESIFIKASI MODUL PV

Tipe	GH3P-18	
Pmax	3	watt peak
Vmp	9	volt
Imp	0,34	ampere
Voc	10,4	volt
Isc	0,36	ampere

B. Konfigurasi PV Array

Photovoltaic Array (PV Array) terdiri dari beberapa modul PV yang dirangkai dengan skema konfigurasi tertentu. Modul PV yang dikonfigurasi secara seri akan memiliki tegangan yang berlipat sesuai jumlah tegangan kerja PV yang dirangkai seri. Sedangkan PV yang dikonfigurasi secara paralel akan menghasilkan arus yang berlipat sejumlah arus kerja PV yang dirangkai paralel [2]. Tiga skema konfigurasi PV Array yang paling banyak digunakan adalah konfigurasi Seri-Paralel (SP), Total Cross Tied (TCT), dan Bridge Linked (BL) [1], [3]. Ilustrasi skema konfigurasi PV Array ditunjukkan oleh Gambar 3 berikut ini:

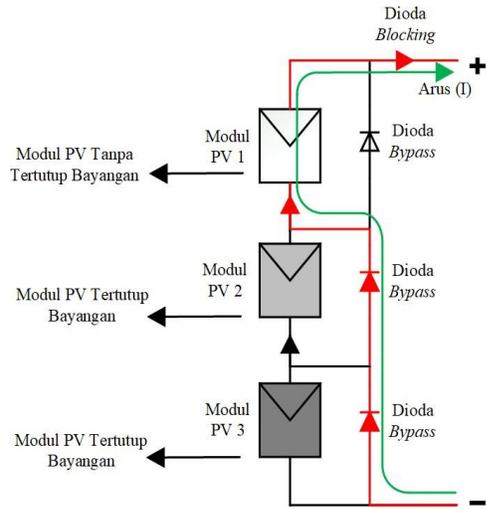


Gambar. 3. Ilustrasi Skema Konfigurasi PV Array [6]

Bayangan yang menutupi modul PV menyebabkan status modul PV menjadi tidak aktif (tidak memproduksi tegangan dan arus) karena ketiadaan radiasi matahari yang mengenainya sesuai persamaan 1. Sebagian modul PV yang tidak aktif pada rangkaian PV Array berpotensi menjadi beban bagi modul PV aktif lainnya yang menyebabkan terjadinya disipasi daya listrik. Disipasi daya listrik ini menghasilkan fenomena *hotspot* (peningkatan temperatur sel PV) yang dapat merusak modul

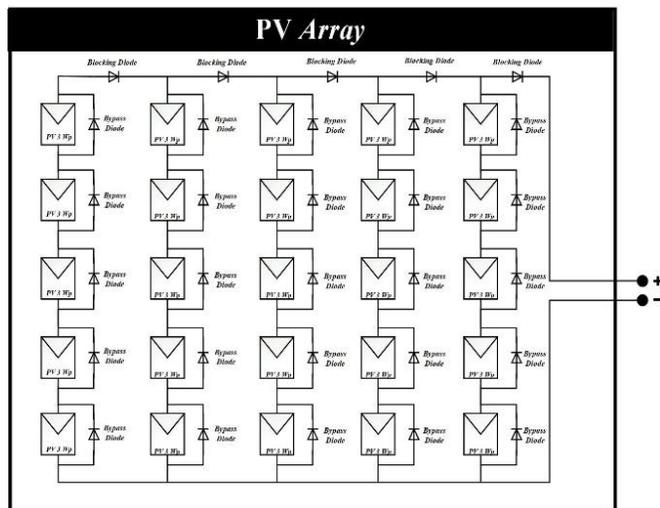
PV yang tidak aktif. Untuk mengatasi *hotspot*, maka diberikan *bypass diode* yang dirangkai paralel dengan modul PV.

Jika modul PV terkena kondisi normal tanpa tertutup bayangan, *bypass diode* akan berada pada keadaan *cut-off* terbalik. Jika salah satu modul PV terkena bayangan, *bypass diode* selanjutnya mengalami *reverse bias* sehingga *bypass diode* ini menjadi jalur arus menuju beban [1], [3]. Pemasangan *bypass diode* pada rangkaian modul PV ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar. 4. Ilustrasi Dioda Bypass pada Rangkaian Modul PV [8]

Penambahan dioda *blocking* sebagai pengamanan diperlukan dalam satu *string* modul PV agar tidak ada arus kembali ke satu rangkaian seri PV tersebut dari *string* yang lain. Dioda *blocking* dan *bypass diode* ini telah diterapkan pada konfigurasi PV Array yang digunakan di penelitian ini seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.



Gambar. 5. Skema Konfigurasi PV Array dengan Dioda Bypass

PV Array yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan konfigurasi Seri-Paralel (SP) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5. PV Array ini terdiri dari lima *string* dimana masing-masing *string* terdiri dari lima modul

PV berkapasitas 3 watt *peak* yang dirangkai secara seri. Dengan demikian total daya PV Array adalah sebesar 75 watt *peak*. Skema konfigurasi pada Gambar 5, memiliki spesifikasi PV Array seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.

TABEL 2
SPESIFIKASI MODUL PV

Besaran	Nilai	Satuan
P_{max}	75	watt peak
V_{mp}	45	volt
I_{mp}	1,7	ampere
V_{oc}	52	volt
I_{sc}	1,8	ampere

C. Skema PV Array Tertutup Bayangan Sebagian

Pada penelitian ini, telah ditentukan skema tertutup bayangan sebagian pada PV Array dengan beberapa nilai variasi persentase tertutup bayangan. Selain itu juga telah ditentukan variasi bentuk bayangan tertutup bayangan sebagian pada PV Array. Skema tertutup bayangan sebagian pada PV Array secara lengkap diilustrasikan pada Tabel 3.

TABEL 3
SKEMA PENGUJIAN PVARRAY

Persentase Tertutup Bayangan Sebagian (%)	Skema 1	Skema 2	Skema 3
12			
24			
36			
40			
52			
80			

Berdasarkan Tabel 3, modul PV yang terpapar skema tertutup bayangan sebagian diilustrasikan berwarna abu-abu, sedangkan PV yang tidak terpapar bayangan diilustrasikan dengan warna putih. Adapun secara eksperimen bayangan pada PV Array menggunakan penutup karton tebal sebagaimana terdokumentasi pada Gambar 6.

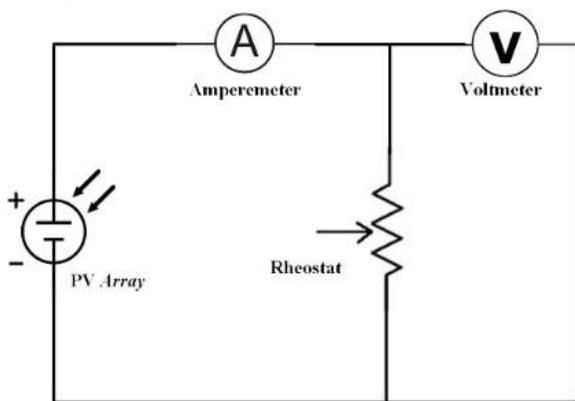


Gambar 6. Ilustrasi Pengimplementasi Skema Tertutup Bayangan Sebagian

D. Eksperimen PV Array Tertutup Bayangan Sebagian

Setelah menentukan nilai persentase skema tertutup bayangan sebagian serta skema bentuknya, maka selanjutnya dilakukan penentuan pengimplementasian skema tersebut dalam hardware PV Array untuk proses pengujian yang akan dilakukan selanjutnya. Pengimplementasian bayangan dilakukan dengan membuat bayangan buatan berupa menutup modul PV dengan objek penutup berupa kardus box seperti pada Gambar 6.

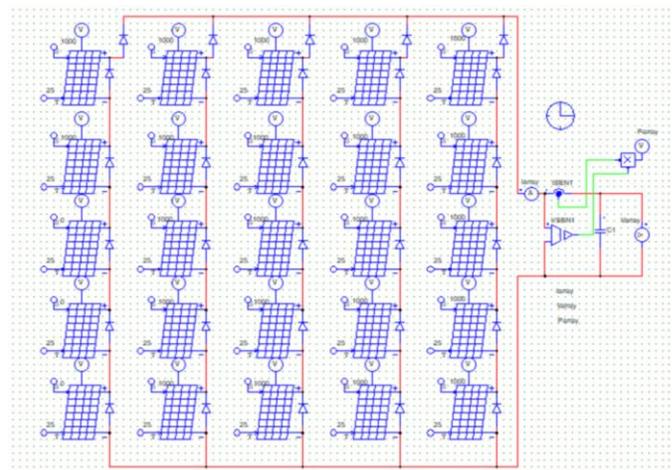
Dalam setiap skema tertutup bayangan sebagian, dilakukan pengujian dengan mengambil data tegangan (volt) dan arus (ampere) dari PV Array dengan menggunakan alat ukur Voltmeter dan Amperemeter. Dalam pengukuran arus dan tegangan, digunakan resistor geser (rheostat) sebagai beban variabel yang menyebabkan perubahan arus dan tegangan pada rangkaian. Perubahan arus dan tegangan dicatat serta ditabulasikan kemudian diplot dan dianalisa pada hasil dan pembahasan. Rangkaian untuk pengambilan data tegangan dan arus ditunjukkan oleh Gambar 7.



Gambar 7. Rangkaian Eksperimen PV Array

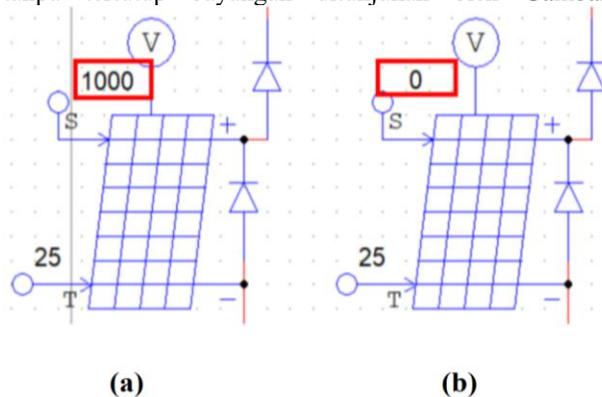
E. Simulasi PV Array Tertutup Bayangan Sebagian

Setelah menentukan skema tertutup bayangan sebagian yang meliputi persentase nilai dan bentuk skemanya pada PV Array, maka selanjutnya ditentukan rancangan simulasi tertutup bayangan sebagian dengan menggunakan software Power Simulator (PSIM). Gambar 8 adalah skematik rangkaian simulasi PV Array yang digunakan pada PSIM. Pada PSIM, skematik atau konfigurasi rangkaian PV-Array dibuat semirip mungkin dengan PV Array yang telah dibangun. Spesifikasi setiap komponen yaitu modul PV, bypass diode, maupun blocking diode dikonfigurasi sesuai dengan spesifikasi PV yang digunakan pada pengujian eksperimental yang juga akan dilakukan. Pada rangkaian PV Array tersebut juga telah ditambahkan sensor tegangan dan juga sensor arus yang masing-masing akan menampilkan besaran tegangan (volt) dan arus (ampere) dari output daya PV Array.



Gambar 8. Simulasi Skema Tertutup Bayangan Sebagian pada PSIM

Pada simulasi dengan software PSIM ini, skema tertutup bayangan sebagian baik meliputi besar nilai maupun bentuk area yang tertutup bayangan disesuaikan dengan perancangan skema tertutup bayangan sebagian yang telah ditentukan sebelumnya. Hal tersebut dilakukan dengan cara mengatur parameter light intensity setiap PV modul pada nilai 1000 (untuk skema tanpa tertutup bayangan) dan nilai 0 (untuk skema tertutup bayangan). Ilustrasi parameter light intensity untuk menentukan PV dalam kondisi tertutup bayangan atau tanpa tertutup bayangan ditunjukkan oleh Gambar 9.



Gambar 9. Ilustrasi PV tanpa bayangan (a) dan PV dengan bayangan (b)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, disajikan semua data pengujian efek tertutup bayangan sebagian pada PV Array baik pengujian dengan pendekatan eksperimental maupun simulasi. Data yang disajikan berupa tegangan, arus, dan daya yang dikeluarkan oleh PV Array pada keseluruhan skema tertutup bayangan sebagian. Selanjutnya data tegangan dan daya akan di-plot menjadi grafik karakteristik P-V (Daya terhadap Tegangan) untuk dilakukan proses analisis pengaruh skema tertutup bayangan sebagian terhadap penurunan daya maksimum serta bentuk kurva karakteristik P-V yang dihasilkan oleh PV Array. Tabel 4 merupakan salah satu contoh data hasil pengujian eksperimental skema tertutup bayangan sebagian dalam bentuk tabel yang juga disajikan ulang dalam bentuk plot grafik P-V agar lebih mudah dianalisis menjadi Gambar 10 (a) dan (b).

TABEL 4
DATA PV ARRAY SKEMA TIDAK TERTUTUP BAYANGAN (SKEMA TERTUTUP BAYANGAN SEBAGIAN 0%)

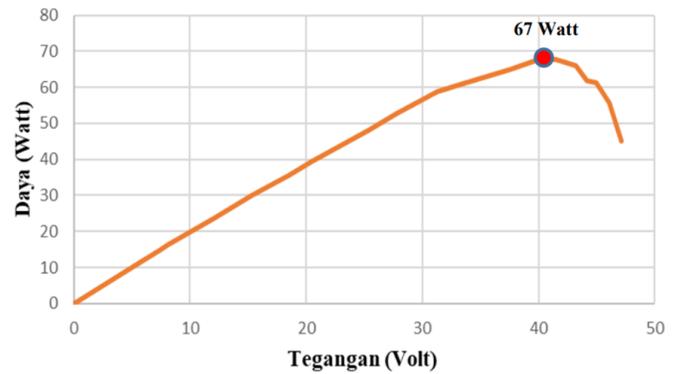
No.	Temperatur Sel PV (°celsius)	Intensitas Sinar Matahari (watt/m ²)	Tegangan (volt)	Arus (ampere)	Daya (watt)
1			0,10	2,01	0,20
2			5,79	2,01	11,64
3			6,32	2,01	12,70
4			7,42	2,01	14,91
5			8,12	2,01	16,32
6			12,00	1,97	23,64
7			15,30	1,96	29,99
8			18,50	1,93	35,71
9			20,50	1,93	39,57
10			25,40	1,90	48,26
11	36,6	735,5	27,70	1,90	52,63
12			31,30	1,88	58,84
13			33,20	1,83	60,76
14			37,50	1,73	64,88
15			40,00	1,69	67,60
16			41,50	1,63	67,65
17			43,20	1,53	66,10
18			44,20	1,40	61,88
19			45,00	1,36	61,20
20			46,10	1,21	55,78
21			47,10	0,96	45,22

A. Pengujian Tertutup Bayangan Sebagian 0% (tidak tertutup bayangan atau kondisi uniform)

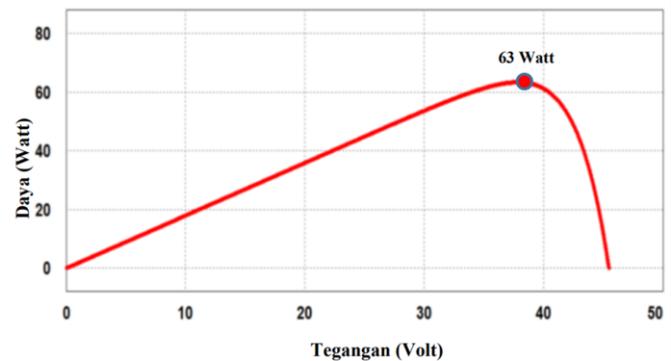
Gambar 10 (a) merupakan hasil plot kurva P-V yang dihasilkan oleh PV Array berdasarkan hasil pengujian secara eksperimental (lihat Tabel 4), sementara Gambar 10 (b) adalah hasil simulasinya. Berdasarkan Gambar 10. (a), dapat diketahui bahwa titik puncak daya maksimum pada hasil pengujian eksperimental bernilai 67 watt. Berdasarkan Gambar 10. (b), dapat diketahui bahwa titik puncak daya maksimum pada hasil simulasi bernilai 63 watt.

Nilai daya maksimum masing-masing hasil pengujian secara simulasi maupun secara eksperimental tidak mencapai nilai maksimum daya PV Array secara perhitungan yaitu 75-watt dikarenakan adanya komponen yang diasumsikan tidak ideal serta *Standard Test Condition* tidak tercapai (intensitas sinar matahari tidak sama dengan 1000w/m² dan temperatur

permukaan PV Array tidak sama dengan 25° Celsius). Selanjutnya dapat dilihat pada Gambar 10 bahwa jumlah titik puncak daya (maksimum *power point*) baik dari hasil pengujian eksperimental maupun simulasi masing-masing mempunyai satu titik puncak. Hal ini dikarenakan pada kondisi uniform atau tanpa tertutup bayangan, semua *string* pada PV Array memiliki level tegangan yang sama.



(a)



(b)

Gambar 10. Kurva Karakteristik PV Array dengan Skema Tertutup Bayangan Sebagian 0 % Berdasarkan Hasil Eksperimen (a) dan Simulasi (b)

B. Pengujian Tertutup Bayangan Sebagian Persentase 12%

Gambar 11 yang merupakan hasil pengujian secara eksperimental maupun secara simulasi pada persentase tertutup bayangan sebagian 12% menunjukkan adanya kemiripan kurva karakteristik PV Array baik dalam segi bentuk maupun jumlah titik puncak daya. Hasil pengujian persentase tertutup bayangan sebagian 12% dengan skema yang dapat lihat pada Tabel 4, secara eksperimen (Gambar 11. (a)) menunjukkan bahwa titik puncak daya maksimum pada skema-1: 63 watts; skema-2: 53 watts; dan skema-3: 53 watts. Hasil pengujian persentase tertutup bayangan sebagian 12% secara simulasi (Gambar 11. (b)) menunjukkan bahwa titik puncak daya maksimum pada skema-1: 45 watts; skema- 2: 50 watts; dan skema-3: 50 watts. Dari hasil pengujian simulasi, daya puncak maksimum PV Array pada skema tertutup bayangan 12 % ini mengalami penurunan sebesar 13-watt pada keseluruhan skema. Sedangkan pada hasil pengujian ekeperimen mengalami penurunan sebesar 4-watt pada skema-1, 14-watt pada skema-

2, dan 14-watt pada skema-3.

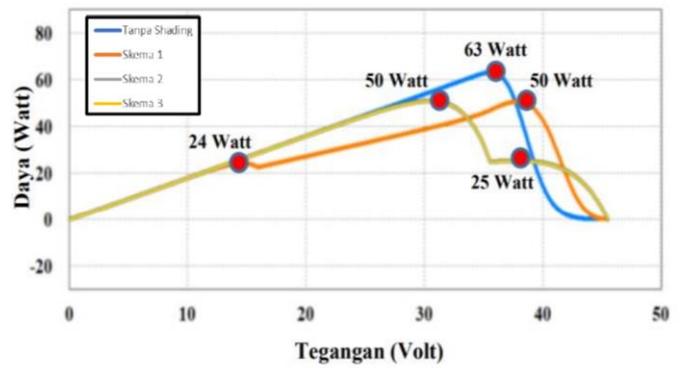
Pada pengujian skema-1, terdapat 1 *string* (*string-1*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 3 buah serta 4 *string* (*string-2*, *string-3*, *string-4*, dan *string-5*) yang memiliki kesamaan jumlah modul PV yang tidak tertutup bayangan. Dikarenakan terdapat 2 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 12% tertutup bayangan skema-1 ini adalah sebanyak 2 buah titik puncak daya.

Pada pengujian skema-2, terdapat 3 *string* (*string-1*, *string-2*, dan *string-3*) yang memiliki kesamaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah serta 2 *string* (*string-4* dan *string-5*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 3 buah. Dikarenakan terdapat 2 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 12% tertutup bayangan skema-2 ini adalah sebanyak 2 buah titik puncak daya.

Pada pengujian skema-3, terdapat 3 *string* (*string 1*, *string 2* dan *string 3*) yang memiliki kesamaan jumlah modulPV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah serta 2 *string* (*string 4*, dan *string 5*) yang memiliki kesamaan jumlah modul PV yang tidak tertutup bayangan. Dikarenakan terdapat 2 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 12% tertutup bayangan skema-3 ini adalah sebanyak 2 buah titik puncak daya. Dengan persentase yang sama, bentuk kurva karakteristik PV Array berbeda-beda bergantung dengan skema tertutup bayangan yang terjadi.



(a)



(b)

Gambar. 11. Kurva Karakteristik PV Array dengan Tertutup Bayangan 12 % Berdasarkan Hasil Eksperimen (a) dan Simulasi (b)

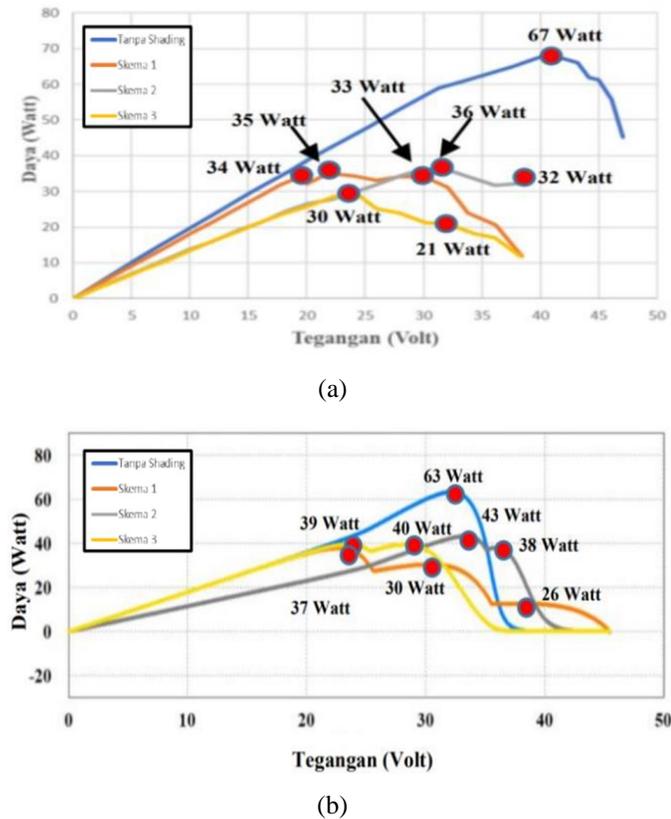
C. Pengujian Tertutup Bayangan Sebagian Persentase 24%

Berdasarkan Gambar 12, hasil pengujian secara eksperimental maupun secara simulasi pada persentase tertutup bayangan sebagian 24% menunjukkan adanya kemiripan kurva karakteristik PV Array baik dalam segi bentuk maupun jumlah titik puncak daya. Hasil pengujian persentase tertutup bayangan sebagian 24% dengan skema yang dapat dilihat pada Tabel 4, secara eksperimen (Gambar 12 (a)) menunjukkan bahwa titik puncak daya maksimum pada skema-1: 35 watt; skema-2: 36 watt; dan skema-3: 30 watt. Hasil pengujian prosentase tertutup bayangan sebagian 24% secara simulasi (Gambar 12. (b)) menunjukkan bahwa titik puncak daya maksimum pada skema-1: 39 watt; skema-2: 43 watt; dan skema-3: 40 watt. Dari hasil pengujian simulasi, daya puncak maksimum PV Array pada skema tertutup bayangan 24 % ini mengalami penurunan sebesar 24 watt pada skema-1; 20 watt pada skema-2, dan 26 watt pada skema-3. Sedangkan pada hasil pengujian ekeperimen mengalami penurunan sebesar 32 watt pada skema-1, 31 watt pada skema-2, dan 37 watt pada skema-3.

Pada pengujian skema-1, terdapat 2 *string* (*string-1* dan *string-4*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 2 buah, 2 *string* (*string-2* dan *string-3*) yang memiliki kesamaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah, serta 1 *string* (*string-4*) yang memiliki jumlah modul PV yang tidak tertutup bayangan. Dikarenakan terdapat 3 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 24% tertutup bayangan skema-1 ini adalah sebanyak 3 buah titik puncak daya. Pada pengujian skema-2, terdapat 1 *string* (*string-1*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah serta 3 *string* (*string-3*, *string-4* dan *string-5*) yang memiliki jumlah modul PV yang tidak tertutup bayangan. Dikarenakan terdapat 2 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 24% tertutup bayangan skema-2 ini adalah sebanyak 2 buah titik puncak daya.

Pada pengujian skema-3, terdapat 1 *string* (*string 1*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 2

buah serta 4 *string* (*string-2*, *string-3*, dan *string-4*, dan *string-5*) yang memiliki kesamaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah. Dikarenakan terdapat 2 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian prosentase 24% tertutup bayangan skema-3 ini adalah sebanyak 2 buah titik puncak daya. Dengan persentase yang sama, bentuk kurva karakteristik PV Array berbeda-beda bergantung dengan skema tertutup bayangan yang terjadi.



Gambar. 12. Kurva Karakteristik PV Array dengan Tertutup Bayangan 24 % Berdasarkan Hasil Eksperimen (a) dan Simulasi (b)

D. Pengujian Tertutup Bayangan Sebagian Persentase 36%

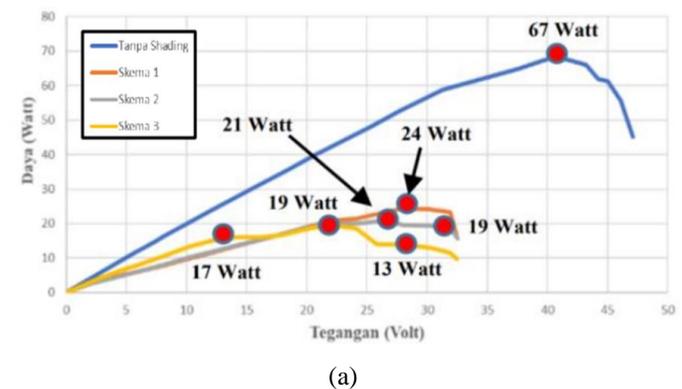
Berdasarkan Gambar 13, hasil pengujian secara eksperimental maupun secara simulasi pada persentase tertutup bayangan sebagian 36% menunjukkan adanya kemiripan kurva karakteristik PV Array baik dalam segi bentuk maupun jumlah titik puncak daya. Hasil pengujian persentase tertutup bayangan sebagian 36% dengan skema yang dapat lihat pada Tabel 4, secara eksperimen (Gambar 14 (a)) menunjukkan bahwa titik puncak daya maksimum pada skema-1: 24 watt; skema-2: 21 watt; dan skema-3: 19 watt. Hasil pengujian prosentase tertutup bayangan sebagian 36% secara simulasi (Gambar 13. (b)) menunjukkan bahwa titik puncak daya maksimum pada skema-1: 39 watt; skema- 2: 32 watt; dan skema-3: 28 watt. Dari hasil pengujian simulasi, daya puncak maksimum PV Array pada skema tertutup bayangan 36 % ini mengalami penurunan sebesar 24 watt pada skema-1; 31 watt pada skema-2, dan 35

watt pada skema-3. Sedangkan pada hasil pengujian ekeperimen mengalami penurunan sebesar 43 watt pada skema-1, 46 watt pada skema-2, dan 48 watt pada skema-3.

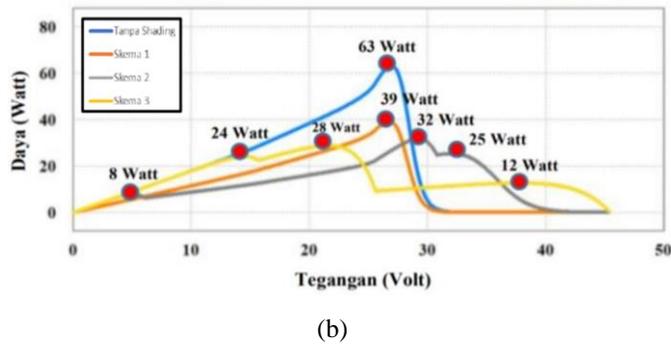
Pada pengujian skema-1, hanya terdapat satu kelompok *string* dengan jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah (*string-1*, *string-2*, *string-3*, dan *string-4*). Dikarenakan terdapat 1 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 36% tertutup bayangan skema-1 ini adalah sebanyak 1 buah titik puncak daya.

Pada pengujian skema-2, terdapat 2 *string* (*string-1* dan *string-2*) yang memiliki jumlah modul PV yang tidak tertutup bayangan, 1 *string* (*string-3*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah, serta 2 *string* (*string-4* dan *string-5*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 4 buah. Dikarenakan terdapat 3 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 36% tertutup bayangan skema-2 ini adalah sebanyak 3 buah titik puncak daya.

Pada pengujian skema-3, terdapat 1 *string* (*string 1*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 3 buah, 3 *string* (*string-2*, *string-3*, dan *string-5*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 2 buah, serta 1 *string* (*string-4*) yang memiliki kesamaan jumlah modul PV yang tidak tertutup bayangan. Dikarenakan terdapat 3 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 36% tertutup bayangan skema-3 ini adalah sebanyak 3 buah titik puncak daya. Dengan persentase yang sama, bentuk kurva karakteristik PV Array berbeda-beda bergantung dengan skema tertutup bayangan yang terjadi.



(a)



Gambar. 13. Kurva Karakteristik PV Array dengan Tertutup Bayangan 36 % Berdasarkan Hasil Eksperimen (a) dan Simulasi (b)

E. Pengujian Tertutup Bayangan Sebagian Persentase 40%

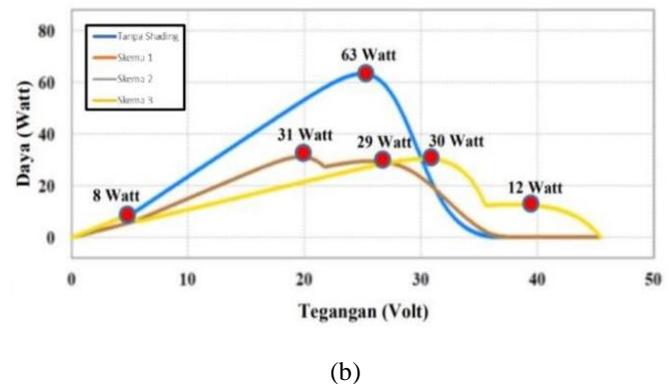
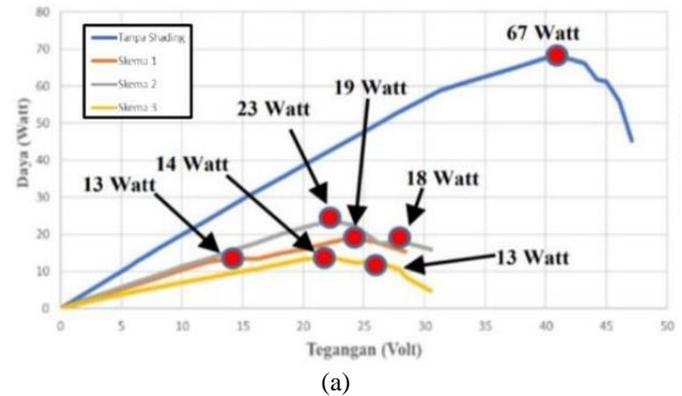
Berdasarkan Gambar 14, hasil pengujian secara eksperimental maupun secara simulasi pada persentase tertutup bayangan sebagian 40% menunjukkan adanya kemiripan kurva karakteristik PV Array baik dalam segi bentuk maupun jumlah titik puncak daya. Hasil pengujian persentase tertutup bayangan sebagian 40% dengan skema yang dapat lihat pada Tabel 4, secara eksperimen (Gambar 14 (a)) menunjukkan bahwa titik puncak daya maksimum pada skema-1: 19 watt; skema-2: 23 watt; dan skema-3: 14 watt. Hasil pengujian prosentase tertutup bayangan sebagian 40% secara simulasi (Gambar 15. (b)) menunjukkan bahwa titik puncak daya maksimum pada skema-1: 31 watt; skema- 2: 31 watt; dan skema-3: 30 watt. Dari hasil pengujian simulasi, daya puncak maksimum PV Array pada skema tertutup bayangan 40 % ini mengalami penurunan sebesar 32 watt pada skema-1; 32 watt pada skema-2, dan 33 watt pada skema-3. Sedangkan pada hasil pengujian eksperimen mengalami penurunan sebesar 48 watt pada skema-1, 44 watt pada skema-2, dan 53 watt pada skema-3.

Pada pengujian skema-1, terdapat 1 string (*string-1*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah, serta 3 string (*string-2*, *string-3*, dan *string-4*) yang memiliki kesamaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah. Dikarenakan terdapat 2 kelompok string yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 40% tertutup bayangan skema-1 ini adalah sebanyak 2 buah titik puncak daya.

Pada pengujian skema-2, terdapat 1 string (*string-4*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah, serta 3 string (*string-1*, *string-2*, dan *string-3*) yang memiliki kesamaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah. Dikarenakan terdapat 2 kelompok string yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 40% tertutup bayangan skema-2 ini adalah sebanyak 2 buah titik puncak daya.

Pada pengujian skema-3, terdapat 1 string (*string 1*) yang memiliki jumlah modul PV yang tidak tertutup bayangan, 2 string (*string-2* dan *string-3*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah, serta 2 string (*string-4* dan *string-5*) yang memiliki kesamaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 2 buah. Dikarenakan terdapat 3

kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 40% tertutup bayangan skema-3 ini adalah sebanyak 3 buah titik puncak daya. Dengan persentase yang sama, bentuk kurva karakteristik PV Array berbeda-beda bergantung dengan skema tertutup bayangan yang terjadi.



Gambar. 14. Kurva Karakteristik PV Array dengan Tertutup Bayangan 40 % Berdasarkan (a) Hasil Eksperimen dan (b) Simulasi

F. Pengujian Tertutup Bayangan Sebagian Persentase 52%

Berdasarkan Gambar 15, hasil pengujian secara eksperimental maupun secara simulasi pada persentase tertutup bayangan sebagian 52% menunjukkan adanya kemiripan kurva karakteristik PV Array baik dalam segi bentuk maupun jumlah titik puncak daya. Hasil pengujian persentase tertutup bayangan sebagian 52% dengan skema yang dapat lihat pada Tabel 4, secara eksperimen (Gambar 15 (a)) menunjukkan bahwa titik puncak daya maksimum pada skema-1: 9 watt; skema-2: 10 watt; dan skema-3: 12 watt. Hasil pengujian prosentase tertutup bayangan sebagian 52% secara simulasi (Gambar 15. (b)) menunjukkan bahwa titik puncak daya maksimum pada skema-1: 39 watt; skema- 2: 21 watt; dan skema-3: 21 watt. Dari hasil pengujian simulasi, daya puncak maksimum PV Array pada skema tertutup bayangan 40 % ini mengalami penurunan sebesar 34 watt pada skema-1; 42 watt pada skema-2, dan 42 watt pada skema-3. Sedangkan pada hasil pengujian ekeperimen mengalami penurunan sebesar 56 watt pada skema-1, 57 watt pada skema-2, dan 55 watt pada skema-3.

Pada pengujian skema-1, hanya terdapat satu kelompok

string dengan jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah (*string-1*, *string-2*, *string-3*, dan *string-4*). Dikarenakan terdapat 1 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 52% tertutup bayangan skema-1 ini adalah sebanyak 1 buah titik puncak daya.

Pada pengujian skema-2, terdapat 3 *string* (*string-1*, *string-2*, dan *string-3*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 3 buah, serta 2 *string* (*string-4* dan *string-5*) yang memiliki kesamaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 2 buah. Dikarenakan terdapat 2 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 52% tertutup bayangan skema-2 ini adalah sebanyak 2 buah titik puncak daya.

Pada pengujian skema-3, terdapat 3 *string* (*string-1*, *string-2*, dan *string-3*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 3 buah serta 2 *string* (*string-4* dan *string-5*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 2 buah. Dikarenakan terdapat 2 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 52% tertutup bayangan skema-3 ini adalah sebanyak 2 buah titik puncak daya. Dengan persentase yang sama, bentuk kurva karakteristik PV Array berbeda-beda bergantung dengan skema tertutup bayangan yang terjadi.

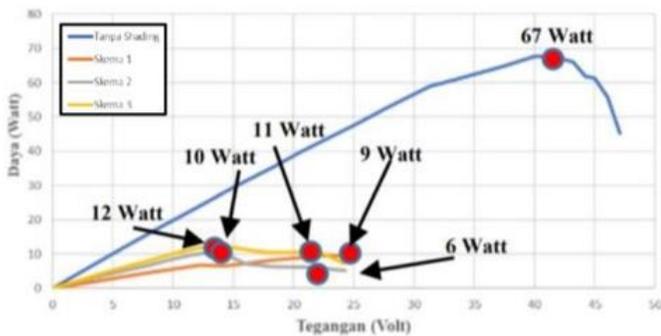
G. Pengujian Tertutup Bayangan Sebagian Persentase 80%

Berdasarkan Gambar 16, hasil pengujian secara eksperimental maupun secara simulasi pada persentase tertutup bayangan sebagian 80% menunjukkan adanya kemiripan kurva karakteristik PV Array baik dalam segi bentuk maupun jumlah titik puncak daya. Hasil pengujian persentase tertutup bayangan sebagian 80% dengan skema yang dapat lihat pada Tabel 4, secara eksperimen (Gambar 16 (a)) menunjukkan bahwa titik puncak daya maksimum pada skema-1: 1,5 watt; skema-2: 1,5 watt; dan skema-3: 1,3 watt. Hasil pengujian persentase tertutup bayangan sebagian 80% secara simulasi (Gambar 16. (b)) menunjukkan bahwa titik puncak daya maksimum pada skema-1: 7 watt; skema- 2: 12 watt; dan skema-3: 10 watt. Dari hasil pengujian simulasi, daya puncak maksimum PV Array pada skema tertutup bayangan 80 % ini mengalami penurunan sebesar 56 watt pada skema-1; 51 watt pada skema-2, dan 53 watt pada skema-3. Sedangkan pada hasil pengujian ekeperimen mengalami penurunan sebesar 65,5 watt pada skema-1, 65,5 watt pada skema-2, dan 65,7 watt pada skema-3.

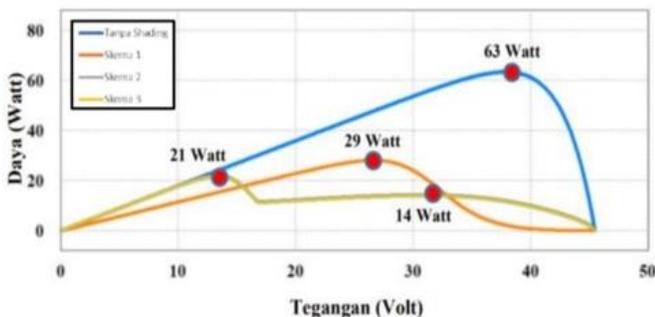
Pada pengujian skema-1, hanya terdapat satu kelompok *string* dengan jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah (*string-1*, *string-2*, *string-3*, *string-4*, dan *string-5*). Dikarenakan terdapat 1 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 80% tertutup bayangan skema-1 ini adalah sebanyak 1 buah titik puncak daya.

Pada pengujian skema-2, hanya terdapat satu kelompok *string* dengan jumlah modul PV yang tidak tertutup bayangan (*string-5*). Dikarenakan terdapat 1 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 80% tertutup bayangan skema-1 ini adalah sebanyak 1 buah titik puncak daya.

Pada pengujian skema-3, terdapat 1 *string* (*string-4*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 4 buah serta 1 *string* (*string-5*) yang memiliki jumlah modul PV yang tertutup bayangan sebanyak 1 buah. Dikarenakan terdapat 2 kelompok *string* yang memiliki perbedaan jumlah modul PV yang tertutup bayangan, maka jumlah titik puncak daya yang terbentuk pada pengujian persentase 80% tertutup bayangan skema-3 ini adalah sebanyak 2 buah titik puncak daya. Dengan persentase yang sama, bentuk kurva karakteristik PV Array berbeda-beda bergantung dengan skema tertutup bayangan yang terjadi.

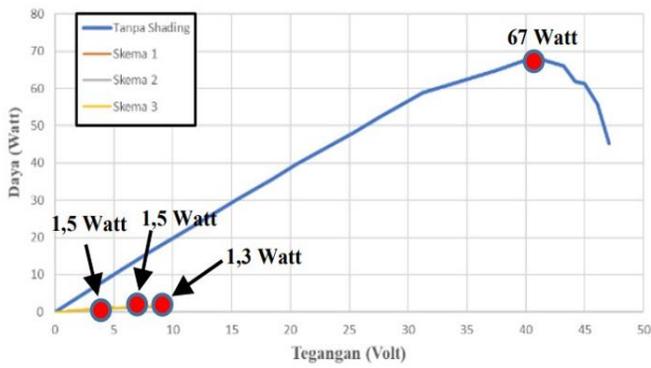


(a)

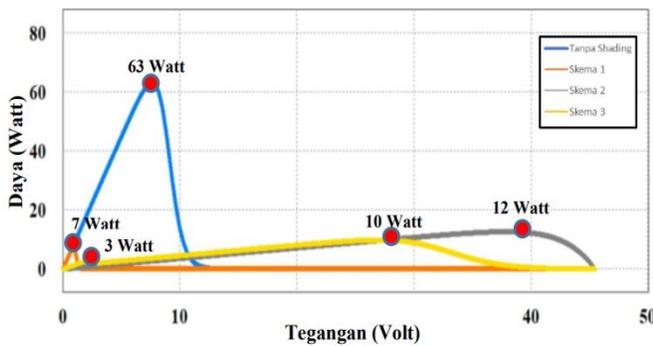


(b)

Gambar. 15. Kurva Karakteristik PV Array dengan Tertutup Bayangan 52 % Berdasarkan Hasil Eksperimen (a) dan Simulasi (b)



(a)



(b)

Gambar. 16. Kurva Karakteristik PV Array dengan Tertutup Bayangan 80% Berdasarkan Hasil Eksperimen (a) dan Simulasi (b)

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penurunan daya listrik PV Array selain dipengaruhi oleh besarnya intensitas radiasi matahari juga berbanding lurus dengan besarnya persentase area yang tertutup bayangan. Jumlah titik puncak daya pada kurva karakteristik PV Array tidak dipengaruhi oleh nilai persentase tertutup bayangan sebagian, tetapi ditentukan oleh jumlah kelompok string yang memiliki jumlah modul tidak aktif yang sama sesuai skema tertutup bayangan sebagian. Jumlah titik puncak daya pada kurva karakteristik PV Array berbanding lurus dengan jumlah kelompok string yang memiliki jumlah modul tidak aktif yang sama sesuai skema tertutup bayangan sebagian. Dengan demikian, adanya penelitian ini diharapkan dapat membantu peneliti dalam merancang strategi untuk mengatasi permasalahan PV Array tertutup bayangan sebagian.

B. Saran

Pada penelitian ini, pengujian eksperimental belum sepenuhnya memenuhi *standard test condition* (intensitas sinar matahari sama dengan 1000w/m^2 dan temperatur permukaan PV Array sebesar 25° celsius). Penulis menyarankan agar pengujian eksperimental dapat dilakukan pada nilai *standard test condition* yang terpenuhi, sehingga hasil pengujian yang

didapatkan lebih sempurna dan mendekati hasil simulasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih untuk Laboratorium Electric Drives and Power Electronics System Departemen Teknik Elektro Otomasi-Fakultas Vokasi-ITS dan PT. PLN UPDL Padang-Sumatera Barat yang telah memberi kami kesempatan untuk melakukan proyek luar biasa ini. Kedua kami juga ingin mengucapkan terima kasih kepada orang tua dan teman-teman yang banyak membantu menyelesaikan proyek ini dalam kerangka waktu yang terbatas.

REFERENSI

- [1] C. W. Priananda, D. C. Riawan, and S. Soedibyo, "Desain Model Mppt Baru Pada Topologi PV Farm Berbasis Cluster Yang Tertutup Bayangan Sebagian - ITS Repository," *Thesis*. <https://123dok.com/document/ydx8oggz-desain-topologi-berbasis-cluster-tertutup-bayangan-sebagian-repository.html> (accessed Nov. 03, 2022).
- [2] "Manfaat Energi Matahari, Alternatif Energi yang Ramah Lingkungan Halaman all - Kompas.com." <https://www.kompas.com/sains/read/2021/05/23/090200823/manfaat-energi-matahari-alternatif-energi-yang-ramah-lingkungan?page=all> (accessed Nov. 03, 2022).
- [3] C. W. Priananda, A. Rajaguguk, D. C. Riawan, Soedibyo, and M. Ashari, "New approach of maksimum power point tracking for static miniature photovoltaic farm under partially shaded condition based on new cluster topology," *QiR 2017 - 2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017-December, pp. 444–449, Dec. 2017, doi: 10.1109/QIR.2017.8168527.
- [4] A. Rajaguguk, D. C. Riawan, and M. Ashari, "Optimization of photovoltaic farm under partial shading effects using artificial intelligent based matrix switch controller," *ICITACEE 2015 - 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering: Green Technology Strengthening in Information Technology, Electrical and Computer Engineering Implementation, Proceedings*, pp. 187–192, Mar. 2016, doi: 10.1109/ICITACEE.2015.7437796.
- [5] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, "Maksimum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," *IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, no. 1, pp. 59–64, Jan. 1995, doi: 10.1049/IP-GTD:19951577.
- [6] S. Khatoun, Ibraheem, and M. F. Jalil, "Analysis of solar photovoltaic Array under partial shading conditions for different Array configurations," *Proceedings of the International Conference on Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with Their Impact on Humanity, CIPECH 2014*, pp. 452–456, Jan. 2014, doi: 10.1109/CIPECH.2014.7019127.
- [7] H. Kawamura *et al.*, "Simulation of I-V characteristics of a PV module with shaded PV cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 75, no. 3–4, pp. 613–621, Feb. 2003, doi: 10.1016/S0927-0248(02)00134-4.
- [8] R. Kadri, J. P. Gaubert, and G. Champenois, "An Improved maksimum power point tracking for photovoltaic grid-connected inverter based on voltage-oriented control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 66–75, Jan. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2044733.
- [9] Jafari, Leila & Salavatian, Mamak. (2022). Evaluation of photovoltaic performance integrated with shading system in optimizing building energy consumption in hot arid climates (Case study: an office building in Shiraz).
- [10] Akinyemi, E & Abdulkareem, Hassan & Bello, Habeeb & Abdu-Aguye, U. (2022). Technical Review of Partial Shading Detection and Global Maksimum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems Operated Under Shading Condition. *Journal of Science Education and Technology*. 2. 283-293.

- [11] Salih, Salih & Taha, Mohammed. (2012). Performance Analysis of Photovoltaic Modules Under Shading Effect. *Journal of Engineering, Technology and Innovation*. 1. 228-235.
- [12] Li, Qingxiang & Zhu, Li & Sun, Yong & Yang, Yang & Lu, Lin. (2020). Performance prediction of Building Integrated Photovoltaics under no-shading, shading and masking conditions using a multi-physics model. *Energy*. 213. 118795. 10.1016/j.energy.2020.118795.
- [13] Nunes, Hugo & Morais, F. & Pombo, José & Mariano, S. & Calado, Maria Do Rosário. (2022). *Bypass diode* effect and photovoltaic parameter estimation under partial shading using a hill climbing neural network algorithm. *Frontiers in Energy Research*. 10. 837540. 10.3389/fenrg.2022.837540.
- [14] Fethi, Khelaifa & Lamamra, Kheireddine & Khechekhouche, Abderrahmane & Labiod, Chouaib. (2022). Partial shading conditions for photovoltaic system using artificial neural networks technique. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*. 10. 46-55. 10.21533/pen.v10i5.2124.
- [15] Zhu, Li & Li, Qingxiang & Chen, Mengdong & Cao, Kaiyue & Sun, Yong. (2019). A simplified mathematical model for power output predicting of Building Integrated Photovoltaic under partial shading conditions. *Energy Conversion and Management*. 180. 831-843. 10.1016/j.enconman.2018.11.036.
- [16] Salih, Salih. (2014). Maksimum Power Point Evaluation Of Photovoltaic Modules Under Shading Effect. *European Scientific Journal (ESJ) ISSN: 1857 - 7881 (Print)*. 10.