

Evaluasi PLTS Off-Grid 4 kWp ITN Malang di Bawah Kondisi Partial Shading dengan Metode Rekonfigurasi Array PV Untuk Meningkatkan Kinerja PLTS

¹Yohanes Christian Dwi Cahya Samori, ²Awan Uji Krismanto, ST.,MT.,Ph.D , ³Prof. Dr. Eng. Ir. I Made Wartana, MT
Institut Teknologi Nasional, Malang, Indonesia
¹samoriyohanes31@gmail.com, ²awan_uji_krismanto@lecturer.itn.ac.id, ³m.wartana@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Dalam sistem PV, setiap susunan terdiri dari banyak modul PV yang dihubungkan secara seri maupun paralel dengan tujuan untuk menghasilkan daya keluaran yang diinginkan. Kondisi bayangan parsial membuat sistem PV mengalami penurunan daya, sehingga mengakibatkan kemampuan pembangkitan daya tidak mencapai titik maksimum. Dan bayangan parsial ini adalah masalah serius pada suatu PLTS. Untuk meningkatkan hasil daya keluaran PLTS yang mengalami penurunan, maka dalam penelitian ini menyajikan analisis susunan PV dengan beberapa metode konfigurasi yang digunakan yaitu konfigurasi Series Parallel (SP), Honey Comb (HC), Bridge Link (BL), dan Total Cross Tie (TCT) dengan menggunakan software MATLAB. Disini diperoleh perbandingan konfigurasi yang memberi peningkatan daya yang lebih baik saat terjadi kondisi partial shading dari susunan modul PV konfigurasi awal. Penelitian ini dilakukan pada PLTS Off-Grid ITN Malang, dengan susunan PV 10 x 4 yang terhubung dengan dioda bypass. Hasil simulasi dari empat metode konfigurasi yang diusulkan, menunjukkan bahwa konfigurasi Total Cross Tie (TCT) menghasilkan peningkatan daya paling baik pada susunan modul PV di bawah kondisi partial shading. Peningkatan daya konfigurasi Total Cross Tie (TCT) sebesar 4,5 % untuk pagi hari dan 3,8 % untuk sore hari, terhadap konfigurasi Series Parallel sebagai Basecase dari penelitian ini.

Kata Kunci— Bridge Link, Honey Comb, Partial Shading, PLTS Off-Grid, Series Parallel, Total Cross Tie.

I. PENDAHULUAN

Saat ini energi listrik berperan penting dalam pembangunan ekonomi dan kehidupan seperti pendidikan, transportasi, komunikasi, dll, konsumsi daya listrik saat ini cenderung meningkat secara signifikan. Dalam jangka panjang, penggunaan energi fosil harus dikurangi mengingat penipisan minyak bumi dan ketidaklestarian lingkungan [1], [2]. Saat ini, penelitian tentang sumber energi terbarukan meningkat secara signifikan [3]. Energi fotovoltaik (PV) menjadi alternatif yang menjanjikan karena ada dimana – mana, tersedia secara bebas, ramah lingkungan, dan memiliki biaya operasional dan pemeliharaan yang lebih rendah [4]. Pada tahun 2016, sekitar 75 GW kapasitas fotovoltaik surya dipasang diseluruh dunia, yang hampir 50% dari sekitar 50 GW pada tahun 2015 [5].

Dalam sistem PV, setiap susunan PV terdiri dari banyak panel PV yang dihubungkan secara seri dan paralel untuk menghasilkan tegangan dan arus tinggi, dengan tujuan meningkatkan daya keluaran susunan PV [6]. Penggunaan energi terbarukan ini dikaitkan dengan banyaknya tantangan teknis dan ekonomi. Salah satu tantangan ini

adalah efek naungan sebagian panel. Fenomena ini disebabkan oleh bayang – bayang awan, pepohonan, gedung tinggi, menara transmisi, tiang distribusi listrik, dan sebagainya [7]. Karena kondisi *partial shading*, sistem PV menghasilkan rugi – rugi daya yang tidak sesuai, sehingga kemampuan pembangkitan daya maksimum dan efisiensi sistem PV menurun. Kondisi ini menyebabkan konversi PV tidak dapat mencapai daya maksimum [8], [9].

Sangat penting untuk memahami karakteristik solar *photovoltaic* dalam kondisi naungan parsial untuk memaksimalkan keluarannya dan untuk menggunakan instalasi *photovoltaic* surya secara efektif dalam semua kondisi [10]. Karena masalah *shading* dalam susunan PV surya, daya sebenarnya yang dihasilkan susunan PV jauh lebih kecil daripada daya yang dirancang dan *hot spot* lokal dalam modul PV yang terhubung dalam susunan dapat merusak seluruh sistem PV [11]. Kerugian karena naungan parsial tidak sebanding dengan area yang diarsir tetapi bergantung pada pola naungan, konfigurasi larik, dan lokasi modul yang diarsir dalam larik. Konfigurasi *array* yang berbeda telah diusulkan dalam literatur untuk mengurangi kerugian ketidakcocokan dalam *array*. Empat skema interkoneksi yaitu, *Series-Parallel* (SP), *Total Cross Tie* (TCT), *Honey Comb* (HC) and *Bridge Link* (BL) dibandingkan untuk faktor pengisian kerugian, keandalan, daya maksimum dan hasil energi karena ketidaksesuaian yang disebabkan oleh toleransi pabrikan dalam karakteristik modul dan dengan naungan parsial. Struktur ini membantu mendistribusikan efek naungan ke seluruh area larik sehingga mengurangi efek naungan modul di baris yang sama [12], [13].

Adapun gangguan yang terjadi pada PLTS *off-grid* ITN Malang adalah modul PV mengalami *partial shading* dari gedung kuliah dan pohon di sekitar area PLTS. Untuk mengetahui hal tersebut dalam penelitian ini maka, diadakan kajian berupa evaluasi PLTS *off-grid* 4 kWp di ITN Malang dibawah kondisi partial shading dengan melakukan simulasi rekonfigurasi susunan panel surya yang menggunakan software MATLAB / SIMULINK.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pengaruh Radiasi dan Suhu pada modul PV

Tegangan dan daya modul PV dapat dipengaruhi oleh suhu dan intensitas sinar matahari (radiasi), kedua faktor ini sangat berpengaruh terhadap efisiensi modul PV. pola operasi yang umum pada PLTS *off-grid*, sebagai berikut :

- Radiasi

Radiasi sinar matahari adalah istilah yang digunakan dalam radiometri yaitu mengukur kekuatan radiasi elektromagnetik per satuan luas, ini diukur dalam watt per meter persegi (W/m^2). Radiasi mempengaruhi variasi arus fotolistrik dan resistansi shunt seperti yang ditunjukkan pada

$$I_{ph,G} = I_{ph,Gstc} \frac{G}{G_{stc}} \quad (1)$$

$$I_{sc,G} = I_{sc,Gstc} \frac{G_{stc}}{G} \quad (2)$$

Dimana $I_{ph,G}$ adalah arus fotovoltaik pada radiasi $G W/m^2$ (A). $I_{ph,Gstc}$ adalah arus fotovoltaik pada kondisi uji standar (STC) ($1000 W/m^2$) (A). $I_{sc,G}$ adalah arus hubung singkat pada radiasi $G W/m^2$ (A). $I_{sc,Gstc}$ merupakan arus hubung singkat pada kondisi uji standar (A).

- Suhu

Suhu yang lebih tinggi menyebabkan penurunan titik daya maksimum (MPP) sel surya. Suhu mempengaruhi variasi tegangan rangkaian terbuka dan arus fotolistrik dan dinyatakan dengan

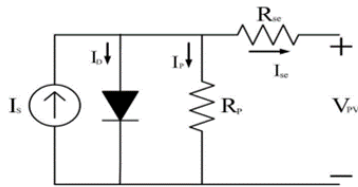
$$I_{sc,T} = I_{sc,Tstc} + K_i (T - T_{stc}) \quad (3)$$

$$V_{oc,T} = V_{oc,Tstc} + K_v (T - T_{stc}) \quad (4)$$

Dimana $I_{sc,T}$ merupakan arus hubung singkat pada suhu T °C (A). $I_{sc,Tstc}$ adalah arus hubung singkat pada kondisi uji standar ($25^\circ C$) (A). $V_{oc,T}$ adalah tegangan rangkaian terbuka pada suhu T °C (V). $V_{oc,Tstc}$ adalah tegangan rangkaian terbuka pada kondisi uji standar (V). K_i merupakan koefisien suhu arus ($A/^\circ C$) dan K_v adalah koefisien suhu tegangan ($V/^\circ C$) [2].

B. Pemodelan Modul PV

Model modul PV diilustrasikan oleh rangkaian ekuivalen yang berisi dioda seperti yang ditunjukkan pada gambar 1 ("Model Dioda Tunggal").



Gambar 1. Model Dioda Tunggal

Dari gambar 1 rangkaian ekuivalen dioda tunggal menggunakan Hukum arus dan tegangan Kirchhoff (KCL, KVL), arus modul dapat dihitung dengan

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{a N_s V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

Dimana I adalah arus *output* (A). V adalah *output* tegangan (V). I_{ph} merupakan arus fotovoltaik pada kondisi uji standar

(STC) ($1000 W/m^2$ dan $25^\circ C$) (A). I_o adalah arus saturasi (A). V_{th} adalah ambang tegangan (V). N_s adalah Jumlah sel yang di seri dalam modul. a adalah Faktor idealitas. R_s merupakan Hambatan seri (Ω). R_{sh} adalah Hambatan shunt (Ω) [2].

C. Pemodelan Konfigurasi Array PV

Bagian ini menjelaskan pemodelan konfigurasi susunan PV surya dibawah kondisi *partial shading* yang berbeda.

- 1) Konfigurasi Series Parallel (SP)

Konfigurasi ini diperoleh dengan menghubungkan modul surya secara seri untuk membentuk rangkaian yang mampu memberikan tegangan yang dibutuhkan oleh inverter dan string dihubungkan secara paralel untuk meningkatkan arus total [18].

- 2) Konfigurasi Honey Comb (HC)

Konfigurasi ini semua modul PV saling berhubungan, mirip dengan bentuk segi enam dari bentuk sarang lebah. Konfigurasi *Honey Comb* memiliki jumlah sambungan listrik antar modul PV lebih banyak dibandingkan dengan konfigurasi array *series-parallel*, dan memiliki jumlah sambungan seri yang lebih sedikit dibandingkan dengan konfigurasi array *series-parallel* [19].

- 3) Konfigurasi Bridge Link (BL)

Konfigurasi ini dapat dimodelkan dengan menghubungkan masing – masing dari empat modul sebagai struktur penyearah jembatan dan semua jembatan diikat dengan bantuan ikatan silang. Untuk mencapai tingkat tegangan dan arus keluaran yang diinginkan, tegangan seri dan arus paralel ditambahkan [14].

- 4) Konfigurasi Total Cross Tie (TCT)

Dalam konfigurasi *Total Cross Tie*, pemodelan modul dihubungkan secara paralel untuk membentuk grup penghubung paralel dan kemudian akan dihubungkan secara seri. Jadi konfigurasi ini menjadikan modul PV terhubung sepenuhnya [20].

D. Analisis Parameter Kinerja

Untuk melihat kinerja semua dicapai dengan metode yang diusulkan ini, perbandingan komprehensif dilakukan pada semua metode ini dalam hal (a) kerugian daya yang tidak sesuai (b) Rugi daya dalam bentuk persen (c) persentase peningkatan daya [22].

- a) Kerugian daya yang tidak sesuai

Kerugian ketidaksesuaian biasanya terjadi ketika modul PV tidak beroperasi pada titik daya maksimumnya. Dengan demikian, perbedaan antara dua titik seperti daya maksimum tanpa kondisi naungan parsial $P_{max_unshaded}$ dan daya maksimum yang mungkin terjadi pada kondisi naungan parsial P_{GMPP} dianggap sebagai kehilangan daya ketidakcocokan dan dapat dihitung sebagai [7]

$$P_{mismatch_loss} = P_{max_unshaded} - P_{GMPP} \quad (6)$$

b) *Rugi daya dalam bentuk persen*

Terjadinya beberapa puncak adalah salah satu alasan utama ketidaksesuaian kerugian daya. persentase kerugian daya didefinisikan sebagai rasio antara perbedaan daya maksimum global pada *Standard Test Condition (STC)* & *Partial Shading Condition (PSC)* dengan daya maksimum global pada STC array dihitung dan diberikan oleh [22]

$$(\%) Power Loss = \frac{G_{MPP_STC} - G_{MPP_PSC}}{G_{MPP_STC}} \times 100 \quad (7)$$

c) *Peningkatan Daya*

Perbedaan daya total antara nilai konvensional dan nilai metode yang diusulkan pada puncak daya global dikenal sebagai peningkatan daya persentase dan dihitung sebagai [22]

$$(\%)PE = \frac{G_{MPP\text{proposed_method}} - G_{MPP\text{conventional}}}{G_{MPP\text{conventional}}} \times 100 \quad (8)$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini di fokuskan untuk melakukan evaluasi *partial shading* yang ada pada PLTS off-grid ITN Malang. Jadi untuk lokasi pengambilan data berada pada PLTS *off-grid* 4 kWp yang berlokasi di utara gedung laboratorium elektro ITN Malang. Lebih tepatnya di kampus 2 ITN Malang di jalan raya Karanglo Km.2, kabupaten Malang.

A. PLTS Off-Grid ITN Malang

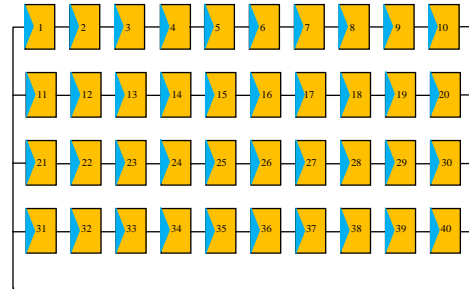
Tabel 1. Model LUM100P

I_{mp}	5.49 A
V_{mp}	18.2 V
$P_{max,e}$	100 W
I_{sc}	6.0 A
V_{oc}	22.1 V
K_v	-0.34% V/K
K_i	0.0576% A/K
N_s	36 (4 × 9)

B. Metode Penelitian

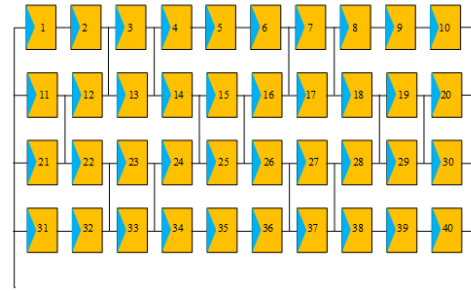
Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah melakukan pengumpulan data radiasi pada modul PV PLTS *off-grid* yang ada di ITN Malang. Kemudian melakukan pembuatan skema konfigurasi, dan disini disajikan *array* PV 10 × 4 sesuai kondisi PLTS yang terpasang. Dan untuk simulasi modul PV tersebut menggunakan *software* MATLAB. Simulasi dijalankan dengan mensimulasikan pengoperasian modul PV dengan empat konfigurasi yang telah diusulkan.

- Konfigurasi I : *Series Parallel (SP)*



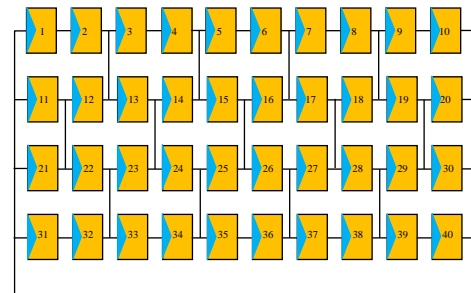
Gambar 2. Konfigurasi Series Parallel pada modul PV

- Konfigurasi II : *Honey Comb (HC)*



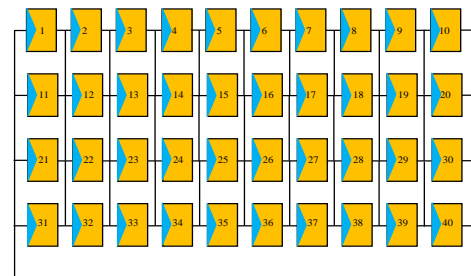
Gambar 3. Konfigurasi Honey Comb pada modul PV

- Konfigurasi III : *Bridge Link (BL)*



Gambar 4. Konfigurasi Bridge Link pada modul PV

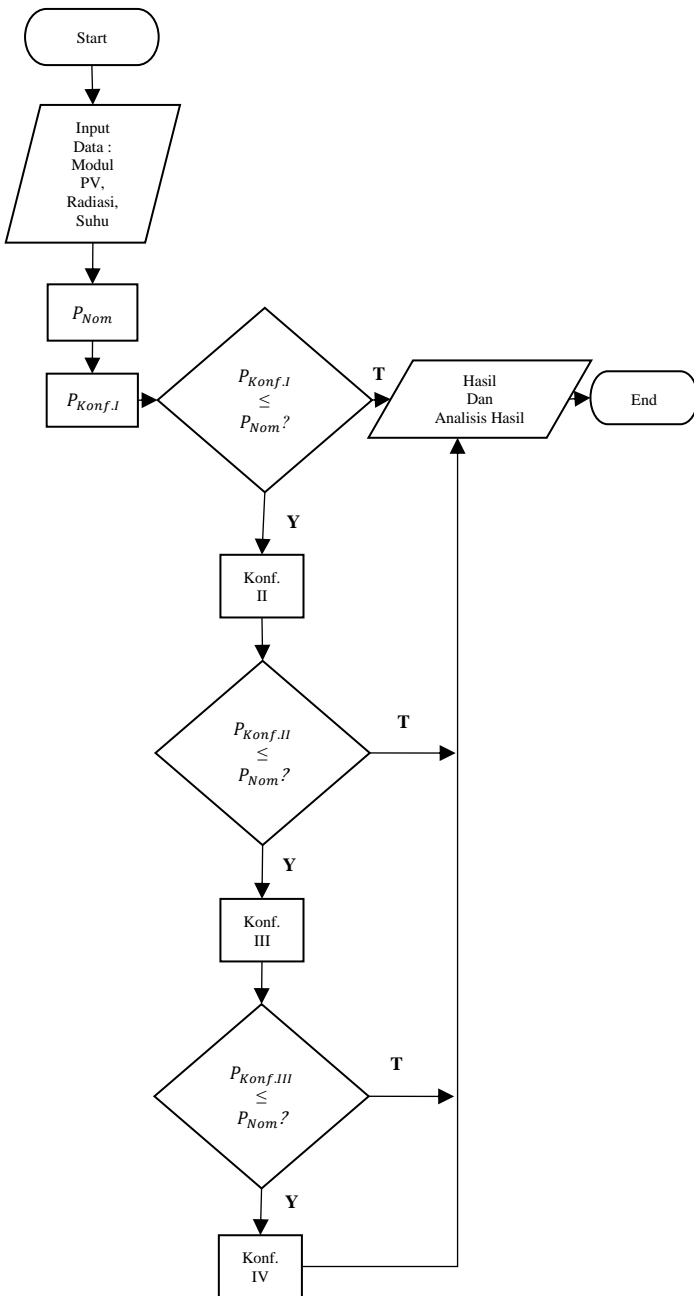
- Konfigurasi IV : *Total Cross Tie (TCT)*



Gambar 5. Konfigurasi Total Cross Tie pada modul PV

C. Flowchart Penelitian

Alur dari penelitian ini, dapat dilihat pada diagram alir yang ada dibawah ini:



Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

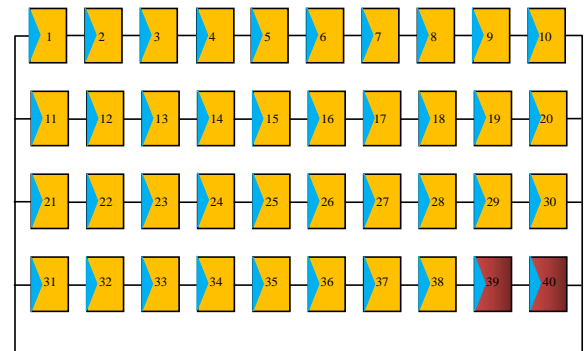
IV. HASIL DAN ANALISIS HASIL

A. Data Penelitian PLTS Off-grid

Tabel 2. Hasil pengukuran radiasi pagi hari

Hari / Tanggal	Waktu	Modul PV	Radiasi (W/m ²)	Keterangan
Senin, 13 Februari 2023	08.00 – 09.00	31	804	Cerah
	09.00 – 10.00		737	Cerah
	10.00 – 11.00		335	Mendung
	11.00 – 12.00	(No Shading)	447	Mendung
	08.00 – 09.00	40	235	Cerah
	09.00 – 10.00		737	Cerah
	10.00 – 11.00		335	Mendung
	11.00 – 12.00	(Shading)	447	Mendung
	08.00 – 09.00	39	235	Cerah
	09.00 – 10.00		737	Cerah
	10.00 – 11.00		335	Mendung
	11.00 – 12.00		447	Mendung

Pada Tabel 2, merupakan hasil pengukuran radiasi pada modul PV kondisi radiasi seragam (diambil salah satu modul PV) dan modul PV kondisi *shading*, pada pagi hari. Data yang diambil pada pukul 08.00–09.00 adalah nilai yang akan digunakan untuk simulasi, karena pada pukul tersebut *partial shading* terjadi pada pagi hari. Pada pagi hari diketahui kondisi *shading* pada modul PV 39 dan modul PV 40. Modul PV yang mengalami *shading* diberikan arsir warna lebih gelap, dapat dilihat pada Gambar 7.

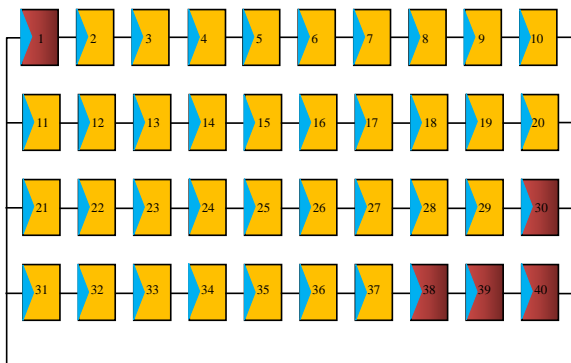


Gambar 7. Kondisi *Partial Shading* Pagi Hari

Pada Tabel 3, merupakan hasil pengukuran radiasi pada modul PV kondisi radiasi seragam (diambil salah satu modul PV) dan modul PV kondisi *shading* pada sore hari. Data yang diambil pada pukul 15.00 – 16.00 adalah nilai yang akan digunakan untuk simulasi, karena pada pukul tersebut *partial shading* terjadi pada sore hari. Diketahui kondisi *shading* yang terjadi sore hari pada modul PV 1, modul PV 30, modul PV 38, modul PV 39 dan modul PV 40. Modul PV yang mengalami *shading* diberikan arsir warna lebih gelap, dapat dilihat pada Gambar 8.

Tabel 3. Hasil pengukuran radiasi sore hari

Hari / Tanggal	Waktu	Modul PV	Radiasi (W/m^2)	Keterangan
Kamis, 02 Maret 2023	12.00 – 13.00	37	1155	Cerah
	13.00 – 14.00		1026	Cerah
	14.00 – 15.00		1162	Cerah
	15.00 – 16.00		981	Cerah
	12.00 – 13.00	38	1155	Cerah
	13.00 – 14.00		1026	Cerah
	14.00 – 15.00		1162	Cerah
	15.00 – 16.00		479	Cerah
	12.00 – 13.00	39	1155	Cerah
	13.00 – 14.00		1026	Cerah
	14.00 – 15.00		1162	Cerah
	15.00 – 16.00		380	Cerah
	12.00 – 13.00	40	1155	Cerah
	13.00 – 14.00		1026	Cerah
	14.00 – 15.00		1162	Cerah
	15.00 – 16.00		380	Cerah
	12.00 – 13.00	30	1155	Cerah
	13.00 – 14.00		1026	Cerah
	14.00 – 15.00		1162	Cerah
	15.00 – 16.00		550	Cerah
12.00 – 13.00	1	1155	Cerah	
13.00 – 14.00		1026	Cerah	
14.00 – 15.00		1162	Cerah	
15.00 – 16.00		566	Cerah	

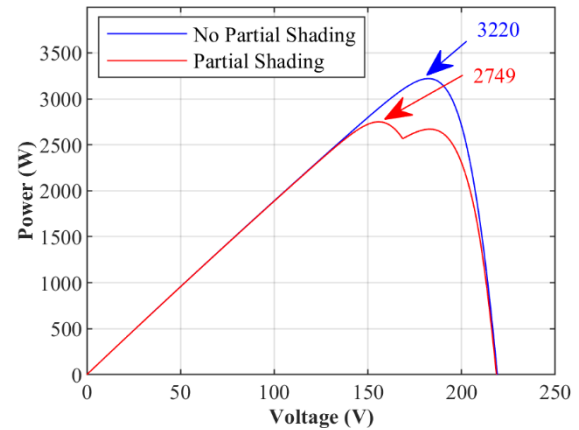


Gambar 8. Kondisi *Partial Shading* Sore Hari

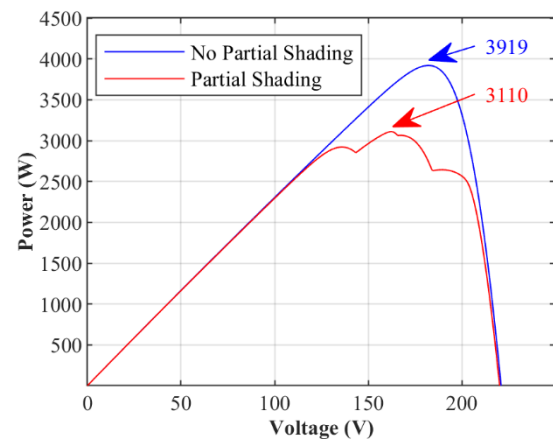
B. Simulasi *Partial Shading*

Pada penelitian ini dilakukan dua kali simulasi dengan empat kali konfigurasi untuk membuktikan metode yang diusulkan, pada saat kondisi tanpa adanya bayangan parsial (*uniform*) dan kondisi saat bayangan parsial (*PSC*) pada modul PV, yang dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB / SIMULINK. Simulasi dilakukan untuk data pada pagi hari dan pada sore hari dengan menggunakan konfigurasi *Series Parallel* yang dijadikan sebagai *Base Case* dari penelitian ini, selanjutnya menggunakan konfigurasi *Honey Comb*, konfigurasi *Bridge Link* dan konfigurasi *Total Cross Tie* dengan susunan modul PV 10×4 .

• Simulasi Konfigurasi I : *Series Parallel*



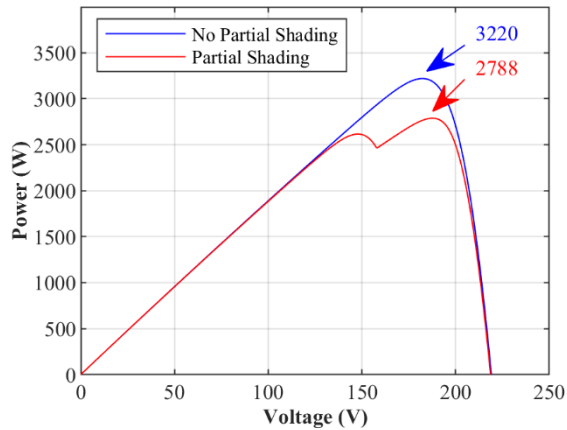
Gambar 9(a). Kurva Karakteristik P-V Konfigurasi Series Parallel Pagi Hari



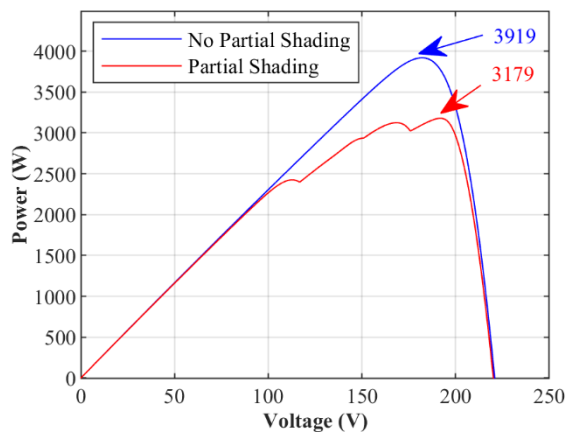
Gambar 9(b). Kurva Karakteristik P-V Konfigurasi Series Parallel Sore Hari

Gambar 9(a) dan 9(b) merupakan hasil simulasi dari pengukuran daya pada saat kondisi normal (*uniform radiation*) dan pada kondisi *partial shading* pada pagi hari. Pada Gambar 9(a), dimana *line* warna biru menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya radiasi seragam dari modul PV sebesar 3220 (W), dan *line* warna merah menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya saat terjadi kondisi *partial shading* sebesar 2749 (W). Pada Gambar 9(b), *line* warna biru menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya tanpa adanya *partial shading* dari modul PV sebesar 3919 (W), dan *line* warna merah menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya saat terjadi kondisi *partial shading* sebesar 3110 (W).

- Simulasi Konfigurasi II : *Honey Comb*



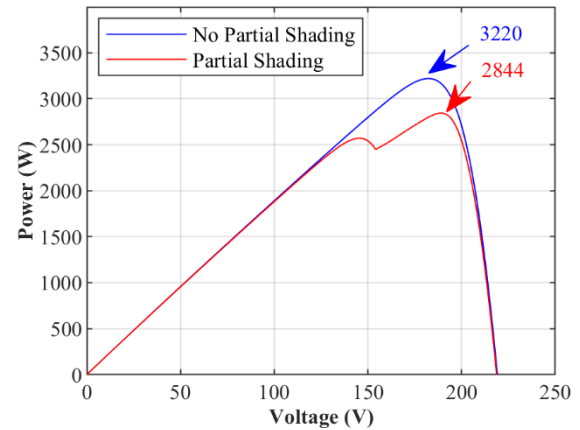
Gambar 10(a). Kurva Karakteristik P-V Konfigurasi *Honey Comb* Pagi Hari



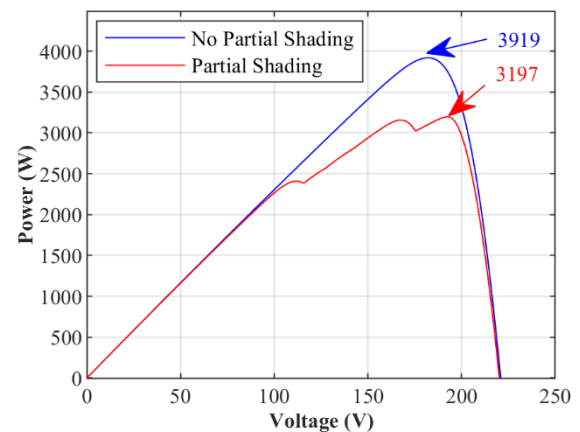
Gambar 10(b). Kurva Karakteristik P-V Konfigurasi *Honey Comb* Sore Hari

Gambar 10(a) dan 10(b) merupakan hasil simulasi dari pengukuran daya pada saat kondisi normal (*uniform radiation*) dan pada kondisi *partial shading* pada pagi hari. Pada Gambar 10(a), dimana *line* warna biru menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya radiasi seragam dari modul PV sebesar 3220 (W), dan *line* warna merah menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya saat terjadi kondisi *partial shading* sebesar 2788 (W). Pada Gambar 10(b), *line* warna biru menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya tanpa adanya *partial shading* dari modul PV sebesar 3919 (W), dan *line* warna merah menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya saat terjadi kondisi *partial shading* sebesar 3179 (W).

- Simulasi Konfigurasi III : *Bridge Link*



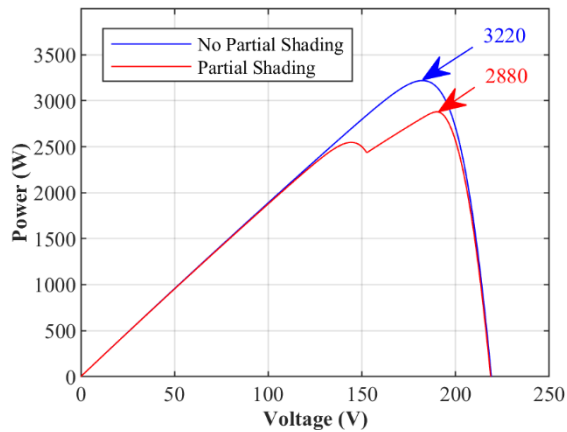
Gambar 11(a). Kurva Karakteristik P-V Konfigurasi *Bridge Link* Pagi Hari



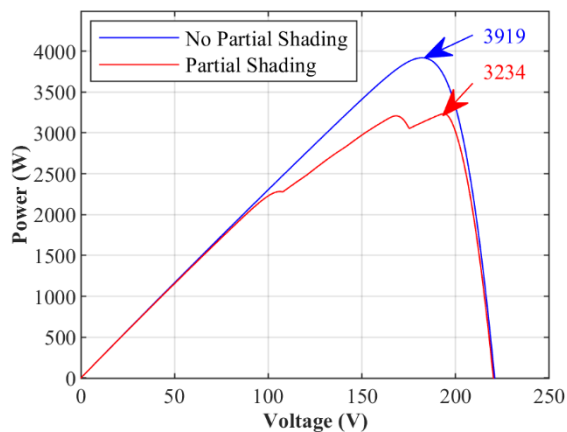
Gambar 11(b). Kurva Karakteristik P-V Konfigurasi *Bridge Link* Sore Hari

Gambar 11(a) dan 11(b) merupakan hasil simulasi dari pengukuran daya pada saat kondisi normal (*uniform radiation*) dan pada kondisi *partial shading* pada pagi hari. Pada Gambar 9(a), dimana *line* warna biru menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya radiasi seragam dari modul PV sebesar 3220 (W), dan *line* warna merah menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya saat terjadi kondisi *partial shading* sebesar 2844 (W). Pada Gambar 9(b), *line* warna biru menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya tanpa adanya *partial shading* dari modul PV sebesar 3919 (W), dan *line* warna merah menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya saat terjadi kondisi *partial shading* sebesar 3197 (W).

- Simulasi Konfigurasi IV : *Total Cross Tie*



Gambar 12(a). Kurva Karakteristik P-V Konfigurasi *Total Cross Tie* Pagi Hari



Gambar 12(b). Kurva Karakteristik P-V Konfigurasi *Total Cross Tie* Sore Hari

Gambar 12(a) dan 12(b) merupakan hasil simulasi dari pengukuran daya pada saat kondisi normal (*uniform radiation*) dan pada kondisi *partial shading* pada pagi hari. Pada Gambar 12(a), dimana *line* warna biru menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya radiasi seragam dari modul PV sebesar 3220 (W), dan *line* warna merah menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya saat terjadi kondisi *partial shading* sebesar 2880 (W). Pada Gambar 12(b), *line* warna biru menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya tanpa adanya *partial shading* dari modul PV sebesar 3919 (W), dan *line* warna merah menunjukkan kondisi PLTS menghasilkan daya saat terjadi kondisi *partial shading* sebesar 3234 (W).

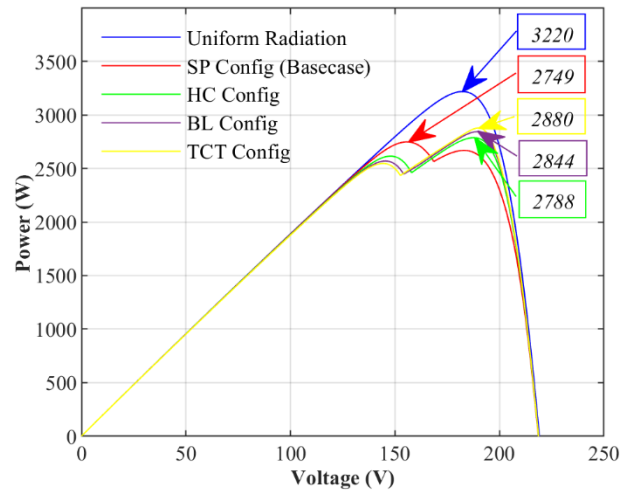
C. Perbandingan Empat Metode Konfigurasi Yang Diusulkan

Setelah melakukan simulasi dengan metode yang di usulkan sesuai konsep penelitian pagi dan sore hari. Selanjutnya melakukan perbandingan metode konfigurasi yang diusulkan, untuk hasil dari kinerja masing - masing disajikan dalam bentuk kurva karakteristik yang terdapat pada Gambar dibawah ini dan untuk nilainya terdapat pada tabel dibawah ini.

- Simulasi Konfigurasi Pagi Hari

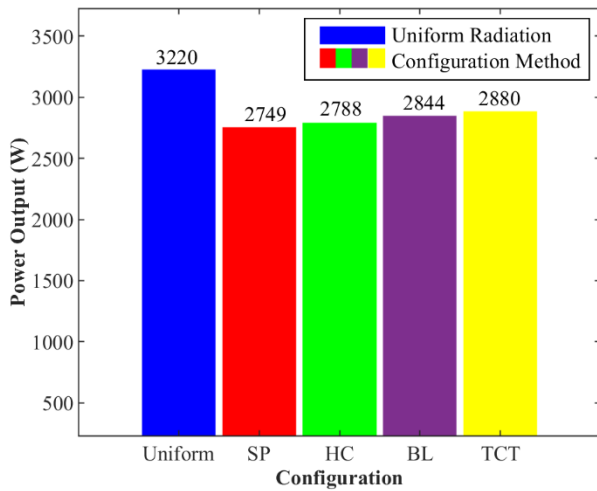
Tabel 4. Perbandingan Metode yang Diusulkan Pagi Hari

Konfigurasi	Radiasi Seragam			Partial Shading		
	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)
Series Parallel	182.52	17.64	3220	156.10	17.61	2749
Honey Comb	182.52	17.64	3220	187.50	14.87	2788
Bridge Link	182.52	17.64	3220	188.70	15.07	2844
Total Cross Tie	182.52	17.64	3220	189.70	15.18	2880



Gambar 13(a). Kurva Karakteristik P-V Perbandingan Empat Konfigurasi Pagi Hari

Dapat dilihat pada Gambar 13(a), *Line* di dalam plot menunjukkan adanya bayangan parsial memberi dampak keluaran daya pada PLTS. Disini *line* warna biru menunjukkan konfigurasi *Base Case* dari susunan modul PV saat tidak mengalami *partial shading* (Radiasi Seragam), dan susunan modul PV menghasilkan daya maksimum sebesar 3220 (W). Sedangkan dibawah kondisi *partial shading*, untuk *line* warna merah pada plot menunjukkan konfigurasi *Series Parallel*, metode yang diusulkan ini menghasilkan daya maksimum sebesar 2749 (W). Untuk *line* warna hijau pada plot menunjukkan konfigurasi *Honey Comb*, metode yang diusulkan ini menghasilkan daya maksimum sebesar 2880 (W). Untuk *line* warna violet pada plot menunjukkan konfigurasi *Bridge Link*, metode yang diusulkan ini menghasilkan daya maksimum sebesar 2844 (W). Untuk *line* warna kuning pada plot menunjukkan konfigurasi *Total Cross Tie*, metode yang diusulkan ini menghasilkan daya maksimum sebesar 2880 (W).



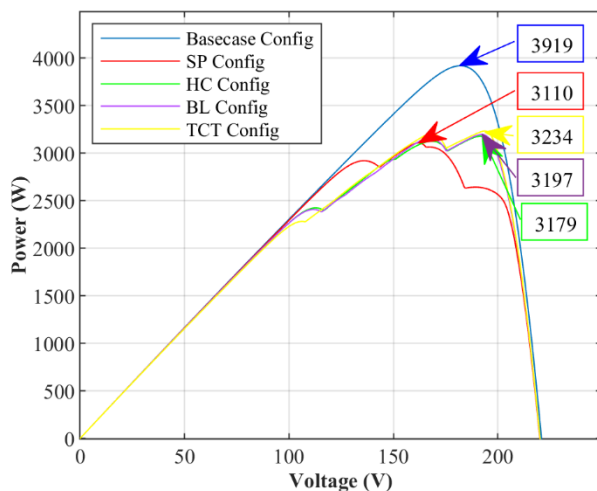
Gambar 13(b). Grafik Perbandingan Metode yang Diusulkan pada Pagi Hari

Pada gambar 13(b) adalah grafik perbandingan dari empat konfigurasi *Series Parallel* (SP), *Honey Comb* (HC), *Bridge Link* (BL), *Total Cross Tie* (TCT). Nilai dari grafik tersebut sama dengan nilai yang ada pada plot kurva karakteristik P-V pada Gambar 13(a).

- Simulasi Konfigurasi Sore Hari

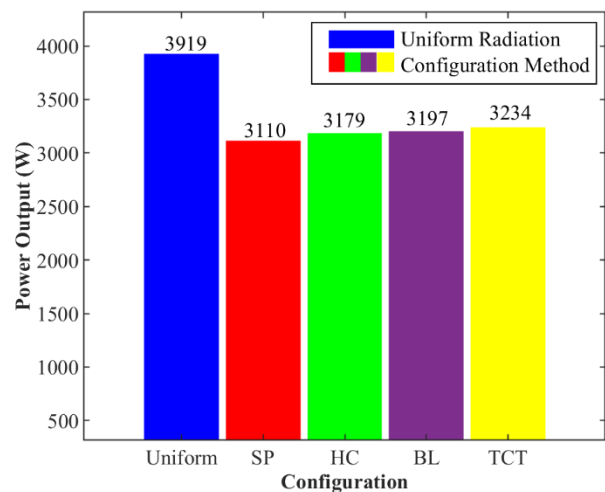
Tabel 5. Perbandingan Metode yang Diusulkan Sore Hari

Konfigurasi	Radiasi Seragam			Partial Shading		
	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)
Series Parallel	182.30	21.50	3919	161.90	19.21	3110
Honey Comb	182.30	21.50	3919	191.61	16.59	3179
Bridge Link	182.30	21.50	3919	192.03	16.65	3197
Total Cross Tie	182.30	21.50	3919	193.90	16.68	3234



Gambar 14(a). Kurva Karakteristik P-V Perbandingan Empat Konfigurasi Sore Hari

Dapat dilihat pada gambar 14(a), *line* di dalam plot menunjukkan adanya bayangan parsial memberi dampak keluaran daya pada PLTS. Disini *line* warna biru menunjukkan konfigurasi *Base Case* dari susunan modul PV saat tidak mengalami *partial shading*, dan susunan modul PV menghasilkan daya maksimum sebesar 3919 (W). Sedangkan dibawah kondisi *partial shading*, untuk *line* warna merah pada plot menunjukkan konfigurasi *Series Parallel*, metode yang diusulkan ini menghasilkan daya maksimum sebesar 3110 (W). Untuk *line* warna hijau pada plot menunjukkan konfigurasi *Honey Comb*, metode yang diusulkan ini menghasilkan daya maksimum sebesar 3179 (W). Untuk *line* warna violet pada plot menunjukkan konfigurasi *Bridge Link*, metode yang diusulkan ini menghasilkan daya maksimum sebesar 3197 (W). Untuk *line* warna kuning pada plot menunjukkan konfigurasi *Total Cross Tie*, metode yang diusulkan ini menghasilkan daya maksimum sebesar 3234 (W).



Gambar 14(b). Grafik Perbandingan Metode yang Diusulkan pada Sore Hari

Pada gambar 14(b) adalah grafik perbandingan dari empat konfigurasi *Series Parallel* (SP), *Honey Comb* (HC), *Bridge Link* (BL), *Total Cross Tie* (TCT). Nilai dari grafik tersebut sama dengan nilai yang ada pada plot kurva karakteristik P-V pada Gambar 14(a).

D. Analisis Parameter Kinerja

Ada 3 parameter untuk melihat kinerja masing – masing metode yang diusulkan, yaitu (a) kerugian daya yang tidak sesuai (*mismatch power loss*) (b) Kerugian daya yang akan ditampilkan dalam bentuk persentase (c) peningkatan daya dalam bentuk persentase. Disajikan pada tabel dibawah ini.

Tabel 6. *Mismatch Power Loss* Pagi Hari

Konfigurasi	Daya Tanpa Shading (W)	Daya Dibawah PSC (W)	Mismatch Power Loss (W)
Series Parallel (Base Case)	3220	2749	471
Honey Comb	3220	2788	432
Bridge Link	3220	2844	376
Total Cross Tie	3220	2880	340

Pada Tabel 6, merupakan hasil perhitungan antara daya maksimum yang dihasilkan oleh simulasi pada pagi hari dan pada saat kondisi *partial shading*. Kerugian daya yang tidak sesuai (*Mismatch Power Loss*) pada empat metode konfigurasi array PV menunjukkan bahwa konfigurasi *Series Parallel* sebesar 471 (W), konfigurasi *Honey Comb* sebesar 432 (W), konfigurasi *Bridge Link* sebesar 376 (W) dan konfigurasi *Total Cross Tie* sebesar 340 (W). Disini dapat dikatakan bahwa konfigurasi *Total Cross Tie* lebih baik, karena kerugian yang dialami paling rendah daripada metode konfigurasi yang lain.

Tabel 7. Rugi Daya (%) Dan Peningkatan Daya (%) Pagi Hari

Konfigurasi	Daya Dibawah PSC (W)	Rugi Daya (%)	Peningkatan Daya (%)
Series Parallel	2749	14.63	Base Case
Honey Comb	2788	13.42	1.4
Bridge Link	2844	11.68	3.3
Total Cross Tie	2880	10.56	4.5

Untuk persentase kerugian daya *Series Parallel* sebanyak 14.63 %, *Honey Comb* sebanyak 13.42 %, *Bridge Link* sebanyak 11.68 % dan *Total Cross Tie* sebanyak 10.56 %, Nilai ini dapat dilihat pada Tabel 7. Untuk peningkatan daya diantara metode yang diusulkan, konfigurasi *Series Parallel* merupakan metode yang digunakan sebagai perbandingan yaitu *base case* dari simulasi dan penelitian ini. Dari hasil perhitungan yang dihasilkan simulasi pagi hari, peningkatan daya dari konfigurasi *Honey Comb* sebanyak 1.4 %, dan peningkatan daya dari konfigurasi *Bridge Link* sebanyak 3.3 %, untuk peningkatan daya dari konfigurasi *Total Cross Tie* sebanyak 4.5 %.

Tabel 8. *Mismatch Power Loss* Sore Hari

Konfigurasi	Daya Tanpa Shading (W)	Daya Dibawah PSC (W)	Mismatch Power Loss (W)
Series Parallel (Base Case)	3919	3110	809
Honey Comb	3919	3179	740
Bridge Link	3919	3197	722
Total Cross Tie	3919	3234	685

Pada Tabel 8, hasil perhitungan antara daya maksimum yang dihasilkan oleh simulasi pada sore hari dan pada saat kondisi *partial shading*. Kerugian daya yang tidak sesuai (*Mismatch Power Loss*) pada empat metode konfigurasi array PV menunjukkan bahwa konfigurasi *Series Parallel* sebesar 809 (W), konfigurasi *Honey Comb* sebesar 740 (W), konfigurasi *Bridge Link* sebesar 722 (W) dan konfigurasi *Total Cross Tie* sebesar 685 (W).

Tabel 9. Rugi Daya (%) Dan Peningkatan Daya (%) Pagi Hari

Konfigurasi	Daya Dibawah PSC (W)	Rugi Daya (%)	Peningkatan Daya (%)
Series Parallel	3110	20.64	Base Case
Honey Comb	3179	18.88	2.2
Bridge Link	3197	18.42	2.7
Total Cross Tie	3234	17.48	3.8

Pada tabel 9, kerugian yang dialami dari masing – masing konfigurasi menunjukkan bahwa konfigurasi *Series Parallel*

dengan persentase kerugian daya sebanyak 20.64 %. Untuk konfigurasi *Honey Comb* dengan persentase kerugian daya sebanyak 18.88 %. Konfigurasi *Bridge Link* dengan persentase kerugian daya sebanyak 18.42 % dan dari konfigurasi *Total Cross Tie* persentase kerugian daya sebanyak 17.48 %. Dari hasil perhitungan ini peningkatan daya dari konfigurasi *Honey Comb* sebanyak 2.2 %, dan peningkatan daya dari konfigurasi *Bridge Link* sebanyak 2.7 %, untuk peningkatan daya dari konfigurasi *Total Cross Tie* sebanyak 3.8 %.

V. KESIMPULAN

Metode yang diusulkan terbukti dapat meningkatkan daya keluaran dari susunan modul PV 10×4 yang terhubung dioda *bypass* pada PLTS *Off-grid* ITN Malang di bawah kondisi *partial shading*. Peningkatan daya yang dihasilkan konfigurasi *Honey Comb* sebesar 1,4 % , untuk peningkatan daya dari konfigurasi *Bridge Link* sebesar 3,3 % dan peningkatan daya dari konfigurasi *Total Cross Tie* 4.5 %. Konfigurasi *Total Cross Tie* mampu mengurangi kerugian paling kecil diantara konfigurasi yang lainnya.

VI. REFERENSI

- [1] A. Lomi *et al.*, “Model design of an architectural grid-connected photovoltaic system,” *PEAS*, vol. 71, no. 4, p. 326, 2022, doi: 10.3176/proc.2022.4.03.
- [2] S. Phiouthonekham and S. Chaitusaney, “Mitigating impact of partial shading on photovoltaic array configuration by using rearrangement,” in *2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Hua Hin, Chiam, Thailand: IEEE, Jun. 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/ECTICon.2015.7207052.
- [3] A. Soetedjo, Y. I. Nakhoda, A. Lomi, and G. E. Hendroyono, “Development of PV simulator by integrating software and hardware for laboratory testing,” in *2015 International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT)*, Bandung, Indonesia: IEEE, Oct. 2015, pp. 96–100. doi: 10.1109/ICACOMIT.2015.7440183.
- [4] K. Sundareswaran, P. Sankar, P. S. R. Nayak, S. P. Simon, and S. Palani, “Enhanced Energy Output From a PV System Under Partial Shaded Conditions Through Artificial Bee Colony,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 198–209, Jan. 2015, doi: 10.1109/TSTE.2014.2363521.
- [5] J. C. Teo, R. H. G. Tan, V. H. Mok, V. K. Ramchandaramurthy, and C. Tan, “Impact of Partial Shading on the P-V Characteristics and the Maximum Power of a Photovoltaic String,” p. 22, 2018.
- [6] H. Li, D. Yang, W. Su, J. Lu, and X. Yu, “An Overall Distribution Particle Swarm Optimization MPPT Algorithm for Photovoltaic System Under Partial Shading,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 1, pp. 265–275, Jan. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2829668.

- [7] H. R. Mirazizi and M. A. Shafiyi, "A Comprehensive Analysis of Partial Shading Effect on Output Parameters of a Grid-connected PV System," *IJECE*, vol. 8, no. 2, p. 749, Apr. 2018, doi: 10.11591/ijece.v8i2.pp749-762.
- [8] S. R. Pendem and S. Mikkili, "Modelling and performance assessment of PV array topologies under partial shading conditions to mitigate the mismatching power losses," *Solar Energy*, vol. 160, pp. 303–321, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.12.010.
- [9] "Modeling and Simulation of MPPT Sepic Converter Using Modified PSO to Overcome Partial Shading Impact on DC Microgrid System," in *2017 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA)*, Surabaya, Indonesia: IEEE, 2017.
- [10] S. Khatoun, Ibraheem, and M. F. Jalil, "Feasibility analysis of solar photovoltaic array configurations under partial shading conditions," in *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, New Delhi, India: IEEE, Dec. 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/INDICON.2015.7443701.
- [11] V. B. Raju and Ch. Chengaiah, "Power Enhancement of Solar PV Arrays Under Partial Shading Conditions with Reconfiguration Methods," in *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, Vellore, India: IEEE, Mar. 2019, pp. 1–7. doi: 10.1109/i-PACT44901.2019.8960012.
- [12] B. I. Rani, G. S. Ilango, and C. Nagamani, "Enhanced Power Generation From PV Array Under Partial Shading Conditions by Shade Dispersion Using Su Do Ku Configuration," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 594–601, Jul. 2013, doi: 10.1109/TSTE.2012.2230033.
- [13] M. F. Jalil, R. Saxena, M. S. Ansari, and N. Ali, "Reconfiguration of photo voltaic arrays under partial shading conditions," in *2016 Second International Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their Impact on Humanity (CIPECH)*, Ghaziabad, India: IEEE, Nov. 2016, pp. 193–200. doi: 10.1109/CIPECH.2016.7918765.
- [14] B. Ramadhani, *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dos dan Don'ts*. Jakarta: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH dan Energising Development (EnDev) Indonesia, 2018.
- [15] V. P. Deshpande and S. B. Bodkhe, "Analysis of Various Connection Configuration of Photovoltaic Module under Different Shading Conditions," vol. 12, no. 16, 2017.
- [16] K. Lappalainen and S. Valkealahti, "Photovoltaic mismatch losses caused by moving clouds," *Solar Energy*, vol. 158, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.10.001.
- [17] H. Ali and H. A. Khan, "Evaluation of Low-Voltage Loss Under Partial Shading Conditions in Solar Photovoltaic Systems," in *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland, OR, USA: IEEE, Sep. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ECCE.2018.8558269.
- [18] P. K. Bonthagorla and S. Mikkili, "Optimal PV array configuration for extracting maximum power under partial shading conditions by mitigating mismatching power loss," *CSEE JPES*, 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.02730.
- [19] P. T. Sawant and C. L. Bhattar, "Optimization of PV System Using Particle Swarm Algorithm under Dynamic Weather Conditions," in *2016 IEEE 6th International Conference on Advanced Computing (IACC)*, Bhimavaram, India: IEEE, Feb. 2016, pp. 208–213. doi: 10.1109/IACC.2016.47.
- [20] M. Balato, L. Costanzo, and M. Vitelli, "Series-Parallel PV array re-configuration: Maximization of the extraction of energy and much more," *Applied Energy*, vol. 159, pp. 145–160, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.073>.
- [21] S. R. Pendem and S. Mikkili, "Modeling, simulation and performance analysis of solar PV array configurations (Series, Series-Parallel and Honey-Comb) to extract maximum power under Partial Shading Conditions," *Energy Reports*, vol. 4, pp. 274–287, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2018.03.003>.
- [22] T. Andrianajaina, E. Sambatra, C. Andrianirina, T. D. Razafimahefa, and N. Heraud, "Modeling, analysis and comparison of shading effects in a photovoltaic array using different configurations," Jul. 2017.
- [23] M. K. Al-Smadi and Y. Mahmoud, "Comparative Analysis of Partial Shading Power Losses in Photovoltaic Topologies," in *2019 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Otranto, Italy: IEEE, Jul. 2019, pp. 699–704. doi: 10.1109/ICCEP.2019.8890218.
- [24] B. Dhanalakshmi and N. Rajasekar, "A novel Competence Square based PV array reconfiguration technique for solar PV maximum power extraction," *Energy Conversion and Management*, vol. 174, pp. 897–912, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.08.077.
- [25] M. H. Nahidan, M. Niroomand, and B. M. Dehkordi, "Power Enhancement under Partial Shading Condition Using a Two-Step Optimal PV Array Reconfiguration," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2021, pp. 1–19, Jan. 2021, doi: 10.1155/2021/8811149.
- [26] K. Choi and H. Liu, Eds., "Matlab and Simulink Basics," in *Problem-Based Learning in Communication Systems Using Matlab and Simulink*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2016, pp. 1–15. doi: 10.1002/9781119060239.ch1.

VII. BIODATA PENULIS



Yohanes Christian Dwi Cahya Samori adalah nama penulis dari Skripsi ini. Penulis lahir di Bojonegoro-Jawa Timur, pada tanggal 28 September 1990. Penulis menempuh pendidikan dari SDN I Baureno-Bojonegoro, kemudian melanjutkan pendidikan ke SMPN I Baureno-Bojonegoro, lalu melanjutkan di SMKN 2 Bojonegoro. Kemudian melanjutkan pendidikan S-1 di Institut Teknologi Nasional Malang setelah memperoleh Program Beasiswa Karyawan dari PT. Freeport Indonesia. Alamat e-mail penulis : samoriyohanes31@gmail.com