

Performa Konfigurasi Modul Surya Seri dan Seri Paralel pada Kondisi Mismatch Karakteristik Arus-Tegangan (I-V) terhadap Daya Output

Nurlaila Amna, Ira Devi Sara, dan Tarmizi
Program Studi Magister Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro dan Komputer
Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No.7 Darussalam, Banda Aceh
e-mail: amna1994@mhs.unsyiah.ac.id

Abstrak—Instalasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada kondisi ideal masih menggunakan jenis modul surya dengan karakteristik arus dan tegangan yang sama. Namun kondisi ideal ini bisa berubah apabila modul yang digunakan tidak tersedia lagi di pasaran. Saat terjadi kerusakan atau gangguan dalam operasi sistem seperti retakan pada lempengan modulnya diperlukan waktu yang lama untuk menggantikannya. Kondisi ini dapat menghambat penyaluran daya listrik ke beban yang dilayaninya, untuk itu agar sistem panel surya tetap dapat beroperasi dengan maksimum diperlukan suatu alternatif atau pendekatan dengan menemukan modul pengganti sejenis. Diharapkan modul pengganti memiliki karakteristik arus dan tegangan yang mendekati modul sebelumnya dan dapat membantu mempertahankan kelangsungan kesediaan energi sistem panel surya. Studi ini bertujuan untuk menyelidiki sejauh mana pengaruh ketidakseragaman karakteristik arus dan tegangan dalam suatu instalasi panel surya terhadap daya *output* pada kondisi tertentu. Sistem panel surya yang dirancang menggunakan 20 modul surya dengan kapasitas masing-masing daya 250 W dan disimulasikan dengan menggunakan Simulink. Metode yang digunakan yaitu membuat kondisi mismatch karakteristik arus dan tegangan pada sistem panel surya. Kondisi *mismatch* yang dibuat yaitu mengkombinasikan modul surya dengan karakteristik arus dan tegangan yang berbeda dalam konfigurasi Seri (S) dan Seri Paralel (SP). Simulasi dilakukan dengan menggantikan modul surya utama dengan modul surya pengganti dari 5% sampai 100% banyak modul yang diganti. Pemilihan modul pengganti dilihat berdasarkan I_{sc} yang mendekati sama karena pada dasarnya arus yang mengalir pada rangkaian seri sama. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi *mismatch* sistem panel surya tetap dapat beroperasi dan menghasilkan daya maksimum. Dari dua konfigurasi tersebut saat dikondisikan *mismatch* diperoleh daya maksimum pada konfigurasi Seri Paralel (SP) di kondisi STC. Daya maksimum yang mampu dipertahankan konfigurasi seri paralel mencapai 40% modul yang digantikan.

Kata Kunci: *mismatch panel surya, irradiance, karakteristik panel surya*

Abstract—The installation of a Solar Power System (PLTS) within the ideal conditions still uses the type of solar module with the same current and voltage characteristics. However, these ideal conditions can be different if the commonly used modules are no longer available on the market. Once there is damage or interference in the operating system, such as cracks in the module plate, it will take a significantly long time to replace. This particular condition can obstruct electrical power distribution to its intended loads in the other end. Therefore, creating a robust solar panel system that operates at its maximum capacity requires an alternative or approach to find such a similar module replacement. It is expected that the replacement module will have the I-V characteristics, which relatively resemble that of the earlier module and can help to maintain the energy availability of the solar panel system. This study aims to analyze which factors affect the characteristic irregularity of currents and voltages in a solar panel installation towards the output of a solar panel under certain conditions. The solar panel system is designed using 20 solar modules with each capacity is 250 WP power that is simulated with Simulink. The method creates the mismatch condition of the current and voltage on the solar module in a specific panel configuration. These mismatch conditions are created by combining solar modules with different currents and voltages in the Series (S) and Series-Parallel (SP) configurations. The simulation is carried out by replacing the main solar module with a 5% to 100% replacement solar module. The selection of the replacement module is based on I_{sc} , which is close to the same because the current flowing in the series circuit is the same. The simulation results showed that the solar panel system still functioned properly and produced maximum power under mismatch conditions. Of all three configurations with mismatch conditions, it is found that the best performing configuration works with the Series-Parallel (SP) configuration of the STC conditions. The maximum power which can be sustained with Series-Parallel (SP) configuration reaches up to 40% of the original modules.

Keywords: *mismatch of PV, irradiance, characteristic of PV*

I. PENDAHULUAN

Cahaya matahari merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang semakin banyak digunakan saat ini. Cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan panel surya sebagai alat konversinya [1]. Sebuah modul surya terdiri dari banyak sel surya yang terhubung secara seri dan paralel dengan karakteristik arus dan tegangan tertentu. Selain modul surya dikenal dengan istilah panel surya. Panel surya digunakan untuk menyatakan kumpulan dari beberapa modul surya dalam suatu instalasi tertentu. Biasanya konfigurasi panel surya terdiri dari beberapa modul surya dengan karakteristik arus dan tegangan yang sama. Tujuannya untuk menghindari mismatch saat modul surya beroperasi pada suatu kondisi intensitas radiasi matahari dan suhu tertentu [2].

Daya keluaran yang dihasilkan sistem panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan seperti intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, spektrum cahaya matahari, sudut datang cahaya, parsial shading dan lain-lain [3]. Kerugian daya maksimum ketidakcocokan atau mismatch pada sistem panel surya dapat juga terjadi pada kondisi karakteristik arus short circuit (I_{sc}) dan tegangan open circuit (V_{oc}) panel surya yang tidak sama dalam satu instalasinya.

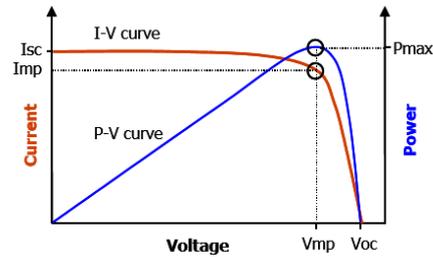
Selama ini kondisi ideal instalasi panel surya masih menggunakan jenis dan tipe modul surya dengan karakteristik arus dan tegangan yang sama, namun kondisi ideal ini bisa berubah apabila modul yang digunakan tidak tersedia lagi di pasaran. Saat terjadi kerusakan atau gangguan dalam operasi sistem seperti retakan pada lempengan modulnya diperlukan waktu yang lama untuk menggantikannya. Kondisi ini dapat menghambat penyaluran daya listrik ke beban yang dilayaninya, untuk itu agar sistem panel surya tetap dapat beroperasi dengan maksimum diperlukan suatu alternatif atau pendekatan menemukan modul pengganti sejenis. Diharapkan modul pengganti memiliki karakteristik I-V yang mendekati modul sebelumnya dan dapat membantu mempertahankan kelangsungan kesediaan energi sistem panel surya.

Berdasarkan studi sebelumnya, kombinasi dua jenis panel surya dengan karakteristik yang berbeda dalam satu instalasinya belum diteliti. Untuk itu dilakukan studi investigasi pengaruh *mismatch* karakteristik arus dan tegangan terhadap daya keluaran panel surya, guna menyelidiki sejauh mana keberhasilan sistem panel surya dan pengaruh ketidakseragaman karakteristik arus-tegangan dalam satu instalasi terhadap keluaran panel surya pada suatu kondisi tertentu.

II. STUDI PUSTAKA

A. Karakteristik Modul Surya

Karakteristik arus dan tegangan (I-V) modul surya menggambarkan kemampuan konversi energi pada kondisi radiasi matahari dan suhu tertentu dari modul surya. Karakteristik I-V modul surya dapat dipertahankan jika



Gambar 1. Karakteristik I-V dan P-V Modul Surya [6]

intensitas radiasi matahari dan suhu konstan. Gambar 1 menunjukkan karakteristik I-V modul surya[6].

Pada karakteristik I-V modul surya, arus *short circuit* (I_{sc}) pada nol volt, sedangkan arus nol pada tegangan *open circuit* (V_{oc}). Normal kerja modul surya memperoleh daya maksimum saat karakteristik I-V pada titik daya maksimum (I_{mp} , V_{mp}).

B. Pemodelan Matematika Modul Surya

Sebuah modul surya terdiri dari banyak sel surya yang terhubung secara seri dan paralel dengan karakteristik arus dan tegangan tertentu. Rangkaian ekuivalen sel surya dapat dilihat pada Gambar 2.

Model matematika yang paling umum digunakan pada sel surya untuk mendapatkan nilai arus keluaran dari sel surya adalah sebagai berikut [10]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{1}$$

Keterangan:

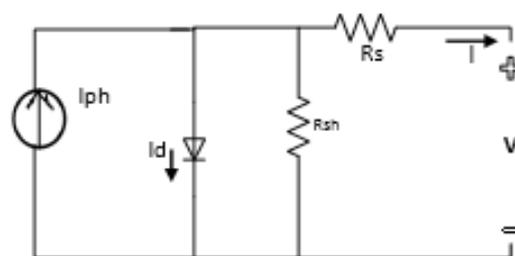
- I = Arus keluaran sel surya [A]
- I_{ph} = Arus foto modul surya [A]
- I_d = Arus dioda [A]
- I_{sh} = Arus pada beban paralel [A]

Arus foto pada modul surya (I_{ph}) dapat dihitung dengan cara berikut:

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i (T - T_r)] G \tag{2}$$

Keterangan:

- I_{sc} = Arus short circuit (A)
- k_i = Koefisien temperatur Arus short circuit pada 25°C dan 1000W/m²
- T = Temperatur kerja modul surya (°C)
- T_r = Temperatur referensi (25°C)
- G = Intensitas radiasi matahari solar sel 1000W/m²
- I_{rs} adalah arus saturasi reverse dari modul surya dapat



Gambar 2. Rangkaian ekuivalen sel surya [7]

dihitung dengan persamaan berikut:

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s knT}\right) - 1} \quad (3)$$

Keterangan:

q = Muatan Elektron [$1,6 \times 10^{-23}$ C]

V_{oc} = Tegangan open circuit [V]

N_s = Sel surya yang terhubung seri

k = Konstanta Boltzmann [$1,3805 \times 10^{-23}$ K/J]

n = Faktor ideal diode (1,2)

I_0 adalah arus saturasi modul surya, tergantung pada suhu kerja modul surya, dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$I_0 = I_{rs} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left[\frac{qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \quad (4)$$

E_g = Semikonduktor energi band gap

Jadi, berdasarkan persamaan (1), maka untuk mendapatkan arus keluaran dari modul surya berdasarkan konfigurasi seri dan seri-paralel, model matematikanya dapat diuraikan seperti persamaan (5)

$$I = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_0 \times \left[\exp \left(\frac{\frac{V}{N_s} + \frac{I \times R_s}{N_p}}{n \times V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V \times \frac{N_p}{N_s} + I \times R_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

Keterangan:

R_s = Resistansi Seri [Ω] (one assumed 0.001 Ω)

R_{sh} = Resistansi parallel [Ω] (one assumed 1000 Ω)

V_t = Tegangan termal sel surya [V]

Tegangan termal sel surya (V_t), tergantung pada suhunya (T) dihitung sesuai dengan rumus berikut:

$$V_t = \frac{k \cdot T}{q} \quad (6)$$

dan

$$I_{sh} = \frac{V \cdot \frac{N_p}{N_s} + T \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (7)$$

C. Faktor yang Mempengaruhi Daya Keluaran Panel Surya

Pada sistem panel surya ada beberapa faktor yang mempengaruhi daya keluaran panel surya yang dihasilkan, diantaranya yaitu pengaruh radiasi matahari terhadap panel surya. Besarnya intensitas radiasi matahari yang diterima sel surya sebanding dengan besarnya daya *output* yang dihasilkan panel surya. Semakin besar intensitas radiasi matahari yang diterima maka semakin besar daya

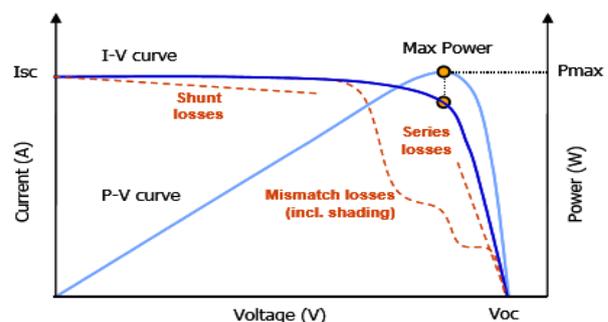
yang dihasilkan panel surya. Intensitas radiasi matahari yang diterima panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya cuaca, letak pemasangan panel surya, gerak semu harian dan bulanan matahari [10]. Kemudian pengaruh suhu, besarnya suhu yang diterima panel surya berbanding terbalik dengan besarnya daya keluaran yang dihasilkan panel surya. Semakin besar suhu yang diterima sel surya maka daya yang dihasilkan panel surya semakin kecil [8][9]. Selanjutnya kondisi *partial shading* dapat menyebabkan kehilangan daya keluaran modul surya. Modul surya yang dibayangi akan berhenti memproduksi listrik dan bekerja pada reverse bias, sehingga modul surya menjadi panas atau terjadi *hotspot* dan dapat menyebabkan kerusakan permanen pada komponen modul surya [13]. Kehilangan daya keluaran modul surya dapat juga disebabkan oleh *mismatch* karakteristik arus dan tegangan, kondisi ini terjadi saat modul yang dipasang antara satu modul dengan modul yang lainnya memiliki karakteristik arus dan tegangan yang berbeda dalam satu konfigurasi [11]. Kondisi tersebut dapat menurunkan kinerja sistem panel surya sehingga menyebabkan daya *output* panel surya juga menurun.

D. Mismatch

Kondisi modul surya yang tidak seragam atau karakteristik I-V modul surya yang tidak sama dalam suatu konfigurasi panel surya dikatakan sistem panel surya dalam kondisi *mismatch*. Pada kondisi *mismatch* panel surya dapat menurunkan daya output maksimum sistem, namun untuk menghasilkan daya yang lebih maksimum dapat dilakukan dengan sejumlah modul dikombinasikan dalam berbagai konfigurasi untuk membentuk sistem panel surya [5].

Karakteristik Arus dan Tegangan (I-V) sistem panel surya pada umumnya dikondisi *mismatch* dapat dilihat pada Gambar 3.

Filippo [4] menyebutkan dampak *mismatch* I-V dapat diabaikan dengan toleransi biasa deviasi (3% –4%). *Mismatch* karakteristik I-V modul surya akibat toleransi produksi adalah dampak arus balik dalam kondisi operasi yang berbeda. Karakteristik I-V yang sesuai dari setiap modul digunakan untuk mengevaluasi perilaku string yang berbeda dan interaksi di antara string yang terhubung untuk menyusun array panel surya.



Gambar 3. Karakteristik I-V sel surya dan saat terjadi mismatch [6]

E. Konfigurasi Panel Surya

Beberapa konfigurasi panel surya yang biasa digunakan pada sistem panel surya, diantaranya adalah:

1. Konfigurasi Panel Surya Seri (S)

Konfigurasi panel surya Seri (S) didasarkan pada pengaturan semua modul surya yang disusun seri. Arus yang mengalir pada rangkaian seri sama dapat dikatakan arus tunggal yang mengalir di seluruh panel surya [12]. Semua modul yang dihubungkan seri memberikan tegangan tinggi dan arus rendah, sedangkan modul yang dihubungkan paralel menghasilkan tegangan rendah dan arus tinggi [5]. Saat konfigurasi panel surya seri bekerja pada kondisi intensitas cahaya matahari yang sama maka semua modul panel surya menghasilkan arus yang sama [4]. Sedangkan tegangan pada konfigurasi seri yang dihasilkan berbeda-beda.

2. Konfigurasi Panel Surya Seri Paralel (SP)

Konfigurasi panel surya Seri Paralel (SP) dibagi menjadi beberapa string seri yang terhubung secara paralel satu sama lain [12]. Modul yang terhubung seri dan paralel tergantung pada tegangan yang diinginkan dan arus. Tegangan keluaran tergantung pada jumlah modul yang terhubung seri dan arus keluaran bergantung pada jumlah string seri yang terhubung secara paralel [5].

Konfigurasi panel surya seri paralel adalah konfigurasi yang paling umum digunakan karena mudah dibangun, ekonomis dan tidak ada koneksi yang berlebihan. Dalam konfigurasi ini, arus di setiap baris dapat bervariasi berdasarkan tingkat insolasi, namun tegangan sama [12].

III. METODE

A. Menetapkan modul yang akan dipakai

Ditetapkan dua modul surya dengan jenis dan karakteristik modul surya yang berbeda untuk digunakan dalam suatu instalasi. Dua jenis karakteristik modul yang berbeda dipilih berdasarkan Isc yang mendekati sama, karena pada dasarnya dalam suatu konfigurasi seri arus yang mengalir dalam satu rangkaian sama. Adapun spesifikasi modul yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

B. Skenario mismatch sistem panel surya

Digunakan dua metode rekonfigurasi yaitu rangkaian konfigurasi Seri (S) dan Seri Paralel (SP). Jumlah modul

Tabel 1. Spesifikasi modul A

Parameter	Keterangan
Daya Maksimum	249,952 W
Tegangan Open Circuit (Voc)	50,93 V
Tegangan maksimum (Vmp)	42,8 V
Arus Short Circuit (Isc)	6,2 A
Arus maksimum(Imp)	5,84 A

Tabel 2. Spesifikasi modul B

Parameter	Keterangan
Daya Maksimum	250,08 W
Tegangan Open Circuit (Voc)	60 V
Tegangan maksimum (Vmp)	48 V
Arus Short Circuit (Isc)	5,79 A
Arus maksimum(Imp)	5,21A

yang digunakan sebanyak 20 modul dengan daya masing-masing modul ±250 W sehingga diperkirakan daya maksimum yang mampu dihasilkan sistem panel surya sebesar ±5000 W. Sistem panel surya yang dimulasikan bekerja pada suhu yang konstan yaitu 25°C dan intensitas radiasi matahari yang menyentuh permukaan modul surya seragam atau sama.

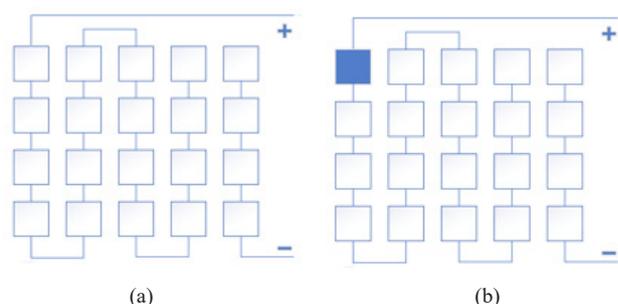
Nilai *output* yang diperhatikan yaitu nilai daya maksimum (Pmax) yang dihasilkan pada kondisi sistem panel surya identik (semua spesifikasi modul surya sama) dan kondisi sistem panel surya non-identik (satu modul surya digantikan dengan jenis spesifikasi lain) sehingga dapat diketahui persentase selisih daya maksimum yang dihasilkan.

1. Konfigurasi Seri (S)

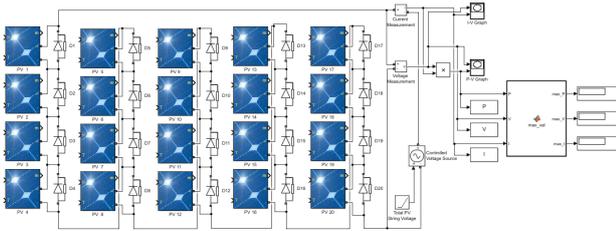
Rangkaian konfigurasi seri sistem panel surya yang dirancang pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.

Modul surya A dengan daya 249,952W sebanyak 20 modul dengan karakteristik arus dan tegangan yang sama (identik) dihubungkan secara seri. Masing-masing modul surya dipasang diode bypass secara paralel. Fungsi diode bypass disini untuk membantu saat salah satu modul surya pada sistem panel surya rusak atau tidak berfungsi optimal. Ketika salah satu panel rusak, maka mengurangi produksi daya sistem secara keseluruhan dan dapat menghasilkan resistansi yang cukup besar. Saat diode *bypass* digunakan arus akan mengalir melalui diode sehingga memaksimalkan daya keluaran.

Alat ukur yang digunakan yaitu *voltage measurement* (pengukuran tegangan) dan *current measurement* (pengukuran arus). Untuk melihat grafik karakteristik I-V (arus dan tegangan) dan P-V (daya dan tegangan) digunakan *x-y graph* pada Simulink. Berdasarkan grafik karakteristik I-V dan P-V maka dapat diketahui nilai daya, tegangan dan arus maksimum yang dihasilkan dengan



Gambar 4. Gambar rancangan konfigurasi seri sistem panel surya (a) modul identik (b) modul non-identik



Gambar 5. Rangkaian Simulink sistem panel surya konfigurasi Seri (S)

menggunakan Matlab *function*. Adapun konfigurasi seri panel surya yang dibuat pada Simulink dapat dilihat pada Gambar 5.

Simulasi dijalankan untuk melihat grafik karakteristik I-V dan P-V modul identik pada konfigurasi seri. Pada suhu konstan 25°C disimulasikan tiga kali dengan intensitas radiasi matahari yang menyentuh permukaan panel surya 1000W/m², 759 W/m² dan 218 W/m², kemudian pada intensitas radiasi matahari konstan 1000W/m² disimulasikan dua kali dengan suhu panel surya 25°C dan 50°C untuk melihat daya output yang dihasilkan.

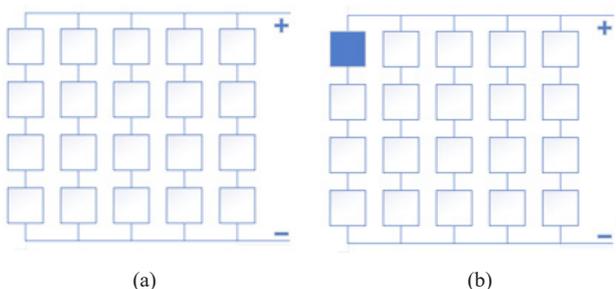
Kemudian salah satu modulnya digantikan dengan modul B dengan daya 250,08 W (kondisi modul non-identik). Simulasi dijalankan untuk melihat grafik karakteristik I-V dan P-V modul non-identik pada konfigurasi seri dan dilakukan langkah yang sama seperti pada kondisi modul identik.

2. Konfigurasi Seri Paralel (SP)

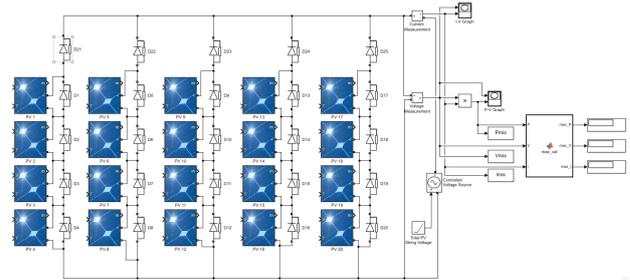
Pada konfigurasi seri paralel modul identik dan non-identik dilakukan langkah yang sama seperti konfigurasi seri, hanya saja pada konfigurasi seri paralel menggunakan *blocking diode*. *Blocking diode* pada konfigurasi seri paralel berfungsi untuk mencegah arus balik. Rangkaian konfigurasi seri paralel sistem panel surya yang dirancang dapat dilihat pada Gambar 6. Rangkaian konfigurasi seri paralel sistem panel surya modul identik dan non-identik pada simulasi Simulink dapat dilihat pada Gambar 7.

C. Pengujian sistem

Pengujian studi ini disimulasikan menggunakan matlab/ Simulink 2018b 64 GB, dengan beberapa skenario yang sudah dijelaskan diatas. Jika sistem yang diuji berhasil menghasilkan daya output, maka dilanjutkan ke tahap analisa terhadap kemampuan kerja. Analisa kemampuan kerja dilihat berdasarkan daya *output* pada keadaan STC



Gambar 6. Gambar rancangan konfigurasi seri paralel sistem panel surya (a) modul identik (b) modul non-identik



Gambar 7. Rangkaian Simulink sistem panel surya konfigurasi Seri Paralel (SP)

dan daya keluaran simulasi dari kedua konfigurasi.

D. Analisa dan Hasil

Dilihat dari karakteristik I-V dan P-V kedua konfigurasi sistem panel surya saat kondisi modul identik dan non identik maka dapat diketahui daya *output* maksimum, arus maksimum dan tegangan maksimum pada masing-masing kondisi. Kemudian berdasarkan data yang diperoleh dapat dihitung berapa persentase selisih daya output yang diperoleh saat kondisi identik dan non-identik.

E. Validasi

Pada studi sistem panel surya dengan karakteristik I-V non-identik memperoleh daya maksimum pada konfigurasi tertentu, dari konfigurasi tersebut dilakukan pengujian dengan tingkat *mismatch* modul yang digantikan divariasi yaitu 5%-100% sehingga dapat diketahui sejauh mana pada kondisi *mismatch* sistem panel surya ini mampu bekerja.

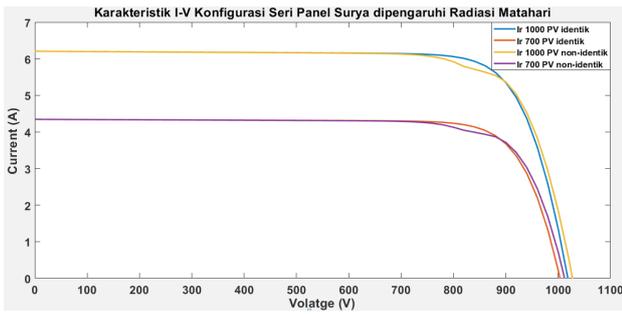
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Konfigurasi Seri (S)

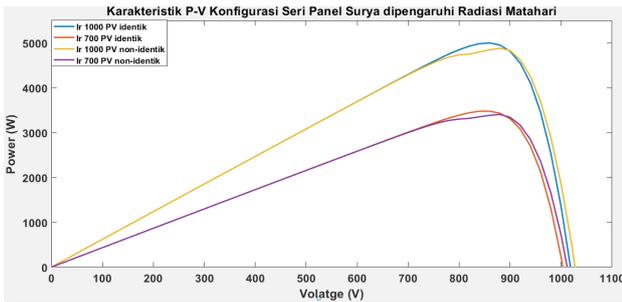
Pengujian sistem panel surya konfigurasi seri modul identik dan non-identik diperoleh grafik karakteristik I-V dan grafik karakteristik P-V. Adapun daya *output* sistem panel surya dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari (I_r) dan suhu (T). Gambar grafik sistem panel surya konfigurasi seri modul identik dan non-identik yang dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.

Sistem panel surya yang dikonfigurasi seri dengan spesifikasi I-V semua modul sama (identik) menghasilkan arus maksimum 5,847 A, tegangan maksimum 855 V dan daya maksimum 4999 W pada kondisi STC (intensitas radiasi matahari menyentuh permukaan panel surya sama 1000W/m² dan T 25°C). Saat satu modul surya digantikan dengan spesifikasi I-V yang berbeda (non-identik) maka arus maksimum 5,517 A, tegangan maksimum 885 V dan daya maksimum 4889 W pada kondisi STC.

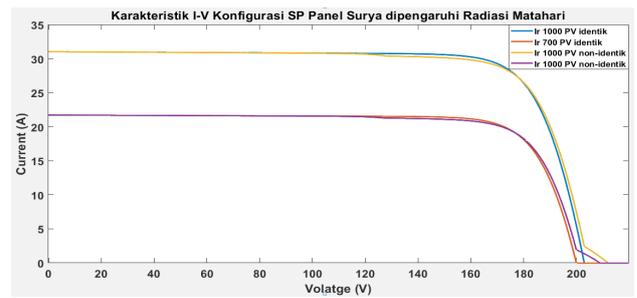
Gambar 9 menunjukkan bahwa semakin besar radiasi matahari yang diterima pada permukaan panel surya semakin besar daya output yang dihasilkan.



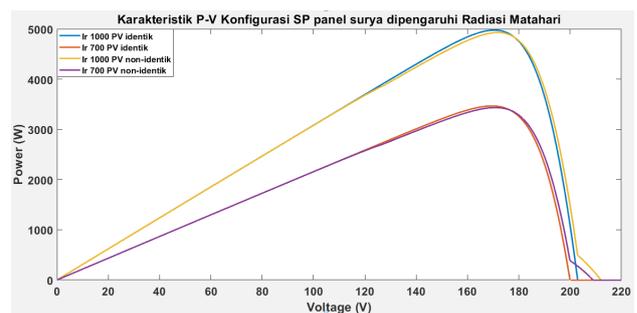
Gambar 8. Karakteristik I-V Konfigurasi Seri (S) sistem panel surya identik dan non-identik dengan Ir beragam



Gambar 9. Karakteristik P-V Konfigurasi Seri (S) sistem panel surya identik dan non-identik dengan Ir beragam

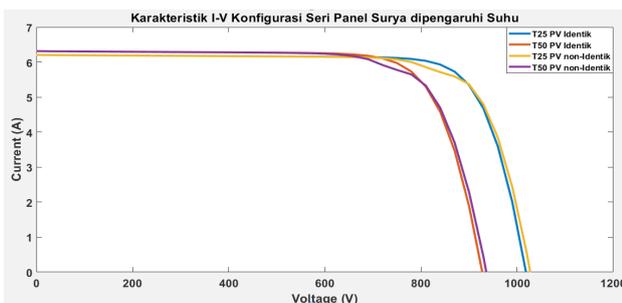


Gambar 12. Karakteristik I-V Konfigurasi Seri Paralel (SP) sistem panel surya pada kondisi identik dan non-identik Ir beragam

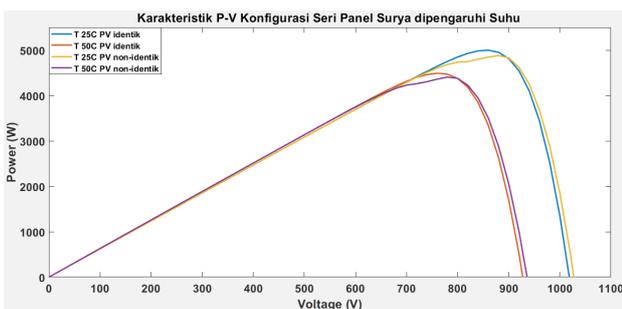


Gambar 13. Karakteristik P-V Konfigurasi Seri Paralel (SP) sistem panel surya pada kondisi identik dan non-identik Ir beragam

Output panel surya dapat juga dipengaruhi oleh suhu. Gambar grafik sistem panel surya konfigurasi seri modul identik dan non-identik yang di pengaruhi oleh suhu dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11. Berdasarkan grafik karakteristik I-V dan P-V panel surya dipengaruhi suhu yang beragam dapat kita ketahui bahwa semakin besar suhu semakin kecil daya *output* yang dihasilkan.



Gambar 10. Karakteristik I-V Konfigurasi Seri (S) sistem panel surya identik dan non-identik dengan T beragam



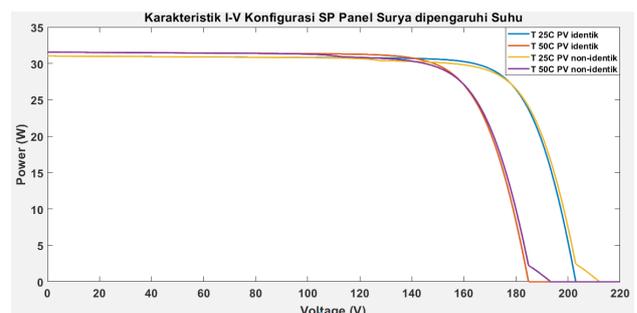
Gambar 11. Karakteristik P-V Konfigurasi Seri (S) sistem panel surya identik dan non-identik dengan T beragam

B. Konfigurasi Seri Paralel (SP)

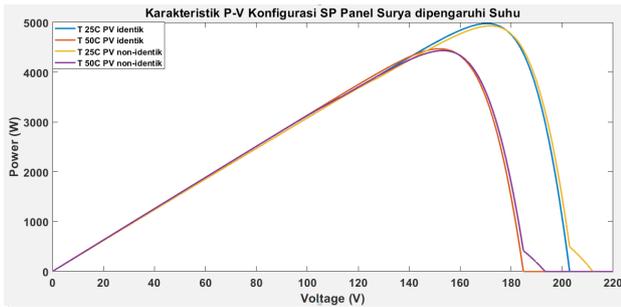
Pengujian sistem panel surya konfigurasi Seri Paralel (SP) modul identik dan non-identik diperoleh karakteristik I-V dan karakteristik P-V. Gambar karakteristik I-V dan P-V konfigurasi SP yang dipengaruhi intensitas radiasi matahari dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13.

Sistem panel surya konfigurasi seri paralel identik menghasilkan arus maksimum 29,18 A, tegangan maksimum 170,6 V dan daya maksimum 4978 W pada kondisi STC dan saat panel surya konfigurasi seri paralel non-identik arus maksimum 28,7A, tegangan maksimum 171,8 V dan daya maksimum 4930 W pada kondisi STC.

Gambar karakteristik I-V dan P-V konfigurasi SP yang dipengaruhi oleh suhu dapat dilihat pada Gambar 14 dan Gambar 15. Dari kedua konfigurasi maka dapat disimpulkan bahwa intensitas matahari sebanding dengan daya *ouput* yang dihasilkan dan suhu berbanding terbalik dengan suhu yang dihasilkan.



Gambar 14. Karakteristik I-V Konfigurasi Seri Paralel (SP) sistem panel surya pada kondisi identik dan non-identik T beragam

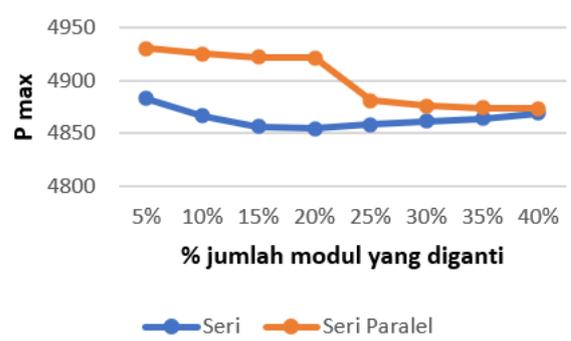


Gambar 15. Karakteristik P-V Konfigurasi Seri Paralel (SP) sistem panel surya pada kondisi identik dan non-identik T beragam

Pada kondisi STC konfigurasi seri modul non-identik (*mismatch*) menghasilkan daya *output* maksimum 4883W dengan *losses* terhadap daya modul identik adalah 2,23%. Konfigurasi seri ini merupakan konfigurasi yang paling umum digunakan dalam perancangan sistem panel surya, namun pada kondisi *mismatch* konfigurasi ini menghasilkan daya lebih rendah dari konfigurasi seri paralel dan *losses* yang dihasilkan juga lebih besar dari konfigurasi seri paralel. Sedangkan konfigurasi seri paralel modul non-identik menghasilkan daya output maksimum 4939 dengan *losses* terhadap daya modul identik adalah 0,96% pada kondisi STC. Pada konfigurasi seri paralel menghasilkan daya keluaran maksimum lebih tinggi dari konfigurasi seri dan *losses* lebih rendah dari konfigurasi seri sehingga dapat dikatakan bahwa konfigurasi seri paralel

Tabel 3. Hasil Simulasi daya maksimum berdasarkan tingkat persentase jumlah modul surya yang diganti

No	"% Jumlah modul yang diganti"	Pmax pada STC (W)	
		S	SP
1	0%	4999	4978
2	5%	4883	4930
3	10%	4866	4925
4	15%	4856	4922
5	20%	4854	4921
6	25%	4858	4881
7	30%	4861	4876
8	35%	4864	4874
9	40%	4869	4873
10	45%	4879	4847
11	50%	4887	4844
12	55%	4893	4843
13	60%	4904	4842
14	65%	4916	4840
15	70%	4924	4844
16	75%	4938	4846
17	80%	4950	4848
18	85%	4960	4899
19	90%	4971	4939
20	95%	4987	4965
21	100%	5002	4983



Gambar 16. Grafik hasil simulasi daya maksimum dengan beberapa tingkat persentase modul yang digantikan

mampu menjadi solusi terbaik dalam mengkonbinasikan sistem panel surya dengan I-V yang berbeda atau non-identik atau saat salah satu modul surya rusak atau terjadi gangguan.

Untuk menyelidiki sejauh mana pengaruh *mismatch* karakteristik arus dan tegangan dalam satu konfigurasi terhadap daya keluaran panel surya maka diuji berdasarkan tingkat persentase *mismatch* atau banyak modul non-identik yang digunakan. Hasil simulasi pergantian modul 5% - 100% dapat dilihat pada Tabel 3.

Dari Tabel 3 dapat kita ketahui daya maksimum yang dihasilkan sistem panel surya konfigurasi seri paralel lebih tinggi dibandingkan dengan konfigurasi seri saat modul surya yang diganti 5% - 40%. Konfigurasi seri paralel ini sangat dipengaruhi oleh letak modul yang digantikan, sehingga disarankan saat ingin menggantikan modul surya yang satu dengan yang lainnya, modul pengganti diletakkan pada string seri pertama dan seterusnya.

Daya keluaran modul surya sangat dipengaruhi oleh modul pengganti, sehingga semakin banyak modul yang diganti dengan karakteristik I-V yang berbeda, semakin besar *mismatch* yang terjadi dan daya yang dihasilkan semakin berkurang. Jika ingin menggantikan modul surya lebih dari 50% maka tidak perlu merekonfigurasi, cukup menggunakan konfigurasi seri pada sistem panel surya.

Grafik daya maksimum yang dihasilkan pada percobaan rekonfigurasi panel surya dengan beberapa tingkat persentase pergantian modul surya dapat dilihat pada Gambar 16.

V. KESIMPULAN

Performa konfigurasi seri dan seri paralel pada kondisi *mismatch* arus dan tegangan (spesifikasi modul non-identik) sistem panel surya dapat diterapkan dalam pengaplikasiannya pada kehidupan sehari-hari jika ada salah satu atau beberapa modul surya yang rusak atau terjadi gangguan. Berdasarkan hasil pengujian kedua konfigurasi mampu menghasilkan daya *output*, namun dari kedua konfigurasi sistem panel surya konfigurasi seri paralel mampu menghasilkan daya lebih maksimum dari konfigurasi seri pada kondisi *mismatch*. Daya maksimum yang mampu dipertahankan konfigurasi seri paralel modul surya mencapai 40% modul yang digantikan.

REFERENSI

- [1] C. Herndon, Y. Erkaya, C. Xin, I. Flory, S. Dhali, and S. X. Marsillac, "Smart combiner for fixed commercial photovoltaic systems using power line communication," in 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014, 2014, pp. 3114-3118.
- [2] P. Manganiello, M. Balato, and M. Vitelli, "A Survey on mismatching and aging of PV modules: The closed loop," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 11, pp. 7276-7286, 2015.
- [3] H. Ziar, S. Farhangi, and B. Asaei, "Modification to wiring and protection standards of photovoltaic systems," IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 4, no. 6, pp. 1603-1609, 2014.
- [4] S. Filippo and J. S. Akilimali, "Are manufacturing I-V mismatch and reverse currents key factors in large photovoltaic arrays," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, pp. 0278-0046, 2009.
- [5] B. Veerasamy, T. Takeshita, A. Jote, and T. Mekonnen, "Mismatch loss analysis of PV array configurations under partial shading conditions," in 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2018, pp. 1162-1183.
- [6] Solmetric Corporation, "Guide to interpreting I-V curve measurements of PV arrays," Appl. Note PVA-600-1, 2011.
- [7] N. Yadav and D. K. Sambariya, "Mathematical modelling and simulation of photovoltaic module using MATLAB/SIMULINK," in 2018 9th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 2018, pp. 1-6.
- [8] T. M. Asyadi, I. D. Sara, and Suriadi, "Metode maximum power point tracking (MPPT) dan boost converter menggunakan fuzzy logic controller (FLC) pada modul surya," *Jurnal Rekayasa Elektrika (JRE)*, vol. 17, no. 1, pp. 1-6, 2021.
- [9] A. N. Hamoodi and R. A. Mohammed, "Photovoltaic modeling and effecting of temperature and irradiation on I-V and P-V characteristics," International Journal of Applied Engineering Research, vol. 13, no. 5, pp. 3123-3127, 2018.
- [10] M. A. bin H. M. Yakup and A. Q. Malik, "Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam," *Renew. Energy*, vol. 24, no. 2, pp. 223-234, 2001.
- [11] A. Tomar, S. Mishra, and C. N. Bhende, "Techno-economical analysis for PV based water pumping system under partial shading/mismatching phenomena," in IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), 2017, pp. 1-6.
- [12] M. Amin, J. Bailey, C. Tapia, and V. Thodimeladine, "Comparison of PV array configuration efficiency under partial shading condition," in IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2018, pp. 1-4.
- [13] D. Pera, J. A. Silva, S. Costa, and J. M. Serra, "Investigating the impact of solar cells partial shading on photovoltaic modules by thermography," in IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2018, pp. 1979-1983.