

Karakteristik I-V dan P-V *Photovoltaic Array* Berbasis Model Matematik Matlab/Simulink

¹Yanu Shalahuddin, ²Fajar Yumono, ³Mochtar Yahya

^{1,2,3} Teknik Elektro, Universitas Islam Kediri, Kediri

¹ yanu@uniska-kediri.ac.id, ² fajaryumono@uniska-kediri.ac.id, ³ mochtaryahya@uniska-kediri.ac.id

Abstract – The performance and the operating curves of Photovoltaic (PV) array are mostly affected by array configuration, temperature module, and solar irradiance. Therefore, the PV array requires many design consideration due to varying weather condition which change the solar irradiation level as well as the cell operating temperature of PV array. This paper presents a step by step procedure the simulation of PV array based on mathematical modelling with Matlab/Simulink. Single Diode Model (SDM) equivalent circuit is employed in order to investigate I-V and P-V characteristics. The characteristic curves of the model simulink shows that the output current and power decreases when solar irradiance reduces from 1100 to 800 W/m². When the temperature increases from 25 to 60 °C, the output voltage and power decreases marginally whereas the output current almost keeps constant.

Keywords — PV array, I-V and P-V curves, Single Diode Model, simulink.

Abstrak—Kinerja dan kurva-kurva operasi dari PV array sangat dipengaruhi oleh konfigurasi array, suhu modul, dan iradiasi sinar matahari. Oleh sebab itu PV array memerlukan banyak pertimbangan desain karena berbagai kondisi cuaca yang mengubah tingkat iradiasi matahari serta suhu operasi modul PV. Penelitian ini membahas tentang langkah demi langkah simulasi dari PV array berbasis model matematik menggunakan Matlab/Simulink. Rangkaian ekuivalen *single diode model* (SDM) digunakan untuk menyelidiki karakteristik I-V dan P-V. Karakteristik kurva-kurva hasil pemodelan menunjukkan bahwa keluaran arus dan daya menurun saat iradiasi sinar matahari berkurang dari 1100 sampai 800 W/m². Sedangkan saat suhu naik dari 25 °C sampai 60°C, keluaran tegangan dan daya menurun sedikit sedangkan arus hampir tetap konstan.

Kata Kunci— PV array, Kurva I-V and P-V, Single Diode Model, simulink.

I. Pendahuluan

Pengembangan energi listrik berbasis sinar matahari merupakan salah satu solusi pengganti energi fosil. *Photovoltaic* (PV) system adalah generator untuk mengubah radiasi sinar matahari (*irradiance*) menjadi arus listrik. PV sistem yang kemudian bisa disebut PV array terdiri dari serangkaian PV panel/modul, dimana PV panel berupa

gabungan dari PV sel. PV array terbuat dari bahan semikonduktor yang bersifat statis, tidak berpolusi, diam, dan membutuhkan biaya operasional dan perawatan yang kecil.

Instalasi PV array semakin banyak digunakan sebagai sumber energi listrik secara *stand alone* maupun *distributed*. Meskipun demikian masih terdapat tantangan dalam pemanfaatannya disebabkan karakteristik output tidak linier terhadap perubahan suhu dan tingkat *irradiance* sinar matahari.

Karakteristik I-V dan P-V sangat penting dipelajari agar didapat cara yang tepat untuk mendapat daya maksimal pada berbagai kondisi suhu dan *irradiance*. Model simulasi PV array secara kontinu diperbaharui oleh banyak peneliti agar cara kerjanya dapat dipahami lebih baik.

Beberapa penelitian sebelumnya dengan subyek yang sama diantaranya; Pemodelan dan simulasi PV array berbasis Matlab/Simulink digunakan untuk mempelajari karakteristik I-V dan P-V pada kondisi *irradiance* tidak merata dan *partial shading*[1]. Simulasi karakteristik I-V dan P-V dilakukan dengan menggunakan rangkaian ekuivalen SDM yang lebih mudah diaplikasikan dengan hasil yang cukup akurat[2]. Karakteristik output PV array yang tersusun dari rangkaian seri 36 sel PV yang di simulasikan menggunakan Simulink. Model matematik simulink didasarkan pada rangkaian ekuivalen *single diode*[3]. Simulasi model matematik PV array menggunakan toolbox dari SimPowerSystem Simulink. Model diterapkan untuk mempelajari efek dari *partial shading* yang menimpa PV array[4]. Parameter *nonlinear* I-V didapat dengan merubah kurva pada tiga titik; *open circuit*, *short circuit*, dan daya maksimum yang bisa didapat berdasar *datasheet* PV array komersial[5].

Penelitian yang diusulkan yaitu membangun model simulink PV array secara bertahap sehingga mudah untuk diikuti bagi peneliti lain dalam mempelajari karakteristik I-V dan P-V untuk memantau dan menilai unjuk kerja PV array guna mendapatkan cara mencapai *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Pemodelan berbasis pada persamaan matematik rangkaian ekuivalen PV SDM.

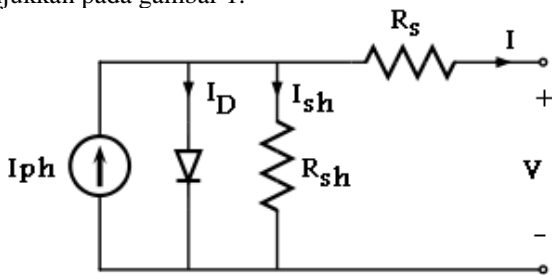
II. Metode Penelitian

A. PV Array

Sel PV terbuat dari semikonduktor *p-n junction* berbasis photodiode. Semikonduktor photodiode apabila terkena cahaya matahari akan menghasilkan arus listrik. Sel PV dapat dibuat dari berbagai material semikonduktor, tetapi yang paling umum dipakai dari jenis material *mono-crystalline silicon* dan *poly-crystalline silicon*[1][6]. Gabungan sel PV yang terangkai seri dan parallel membentuk modul PV. Untuk mensuplai beban besar modul-modul dapat dirangkai sehingga membentuk PV array.

B. Single Diode Model dengan R_s dan R_{sh} (SDM)

Secara umum rangkaian ekuivalen sel PV terdiri dari sumber arus *photocurrent* (I_{ph}), diode (D) yang dilewati arus diode (I_D), hambatan *shunt* (R_{sh}) yang mengalir arus bocor (I_{sh}) dan hambatan seri (R_s) yang menggambarkan hambatan dalam dimana arus beban (I) mengalir. Rangkaian ekuivalen SDM ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian ekuivalen PV SDM

C. Model Matematik

Photocurrent (I_{ph}) yang dibangkitkan terbagi menjadi arus diode (I_D), arus bocor (I_{sh}) dan arus output (I) sehingga didapatkan persamaan arus sebagai berikut:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \dots\dots\dots (1)$$

SDM dapat di modelkan secara matematis pada persamaan (2), (3), (4), (5), dan (6). *Photocurrent* (I_{ph}) ditunjukkan melalui persamaan (2). Arus diode (I_D) diberikan melalui persamaan (3), sedangkan arus saturasi pada diode (I_o) pada persamaan (4). Persamaan (5) menunjukkan arus saturasi *reverse*. Arus bocor yang melalui hambatan *shunt* dinyatakan pada persamaan (6).

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \dots\dots\dots (2)$$

Dari persamaan 2, dapat diketahui bahwa besarnya arus yang terbangkit pada sel PV berbanding lurus dengan besarnya iradiansi sinar matahari (G) dalam satuan W/m^2 .

$$I_D = I_o \left(\left[e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n.K.T}} \right] - 1 \right) \dots\dots\dots (3)$$

Arus yang mengalir melalui diode merupakan fungsi dari arus saturasi I_o dan arus saturasi reverse I_{rs} .

$$I_o = I_{rs} \cdot \left[\frac{T}{T_n} \right]^3 \cdot e^{\left[\frac{q.E.g_0 \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n.K} \right]} \dots\dots\dots (4)$$

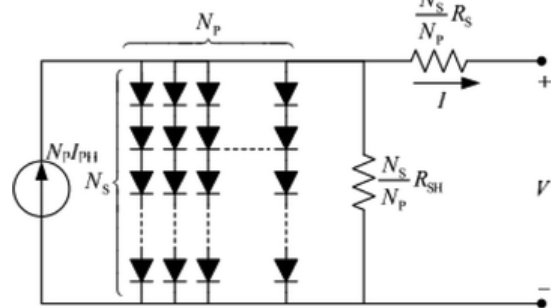
$$I_{rs} = I_{sc} / \left[e^{\left(\frac{q.V_{oc}}{n.K.T} \right)} - 1 \right] \dots\dots\dots (5)$$

$$I_{sh} = \left[\frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \right] \dots\dots\dots (6)$$

Persamaan (6) menyatakan besarnya arus bocor pada sel PV, dimana nilainya berbanding terbalik dengan nilai hambatan shunt (R_{sh}).

D. PV Array

PV array merupakan gabungan sel PV tunggal yang terangkai dalam sejumlah N_s sambungan seri dan sejumlah N_p sambungan parallel. Rangkaian ekuivalen PV array seperti terlihat pada gambar 2. Diode berjejer parallel sebanyak N_p dimana setiap lajur tersambung seri sebanyak N_s . Arus *photocurrent* yang dibangkitkan menjadi $N_p \times I_{ph}$. Sedangkan hambatan seri dan hambatan *shunt* berubah sesuai rasio N_s/N_p .



Gambar 2. Rangkaian ekuivalen PV array

Arus yang terbangkit pada *photocurrent* menjadi $N_p \times I_{ph}$. Sedangkan hambatan seri dan hambatan *shunt* berubah sesuai rasio N_s/N_p . Persamaan arus output I menjadi:

$$I = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_D - I_{sh} \dots\dots\dots (7)$$

Arus I_D berubah menjadi persamaan (8):

$$I_D = I_o \left(\left[e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n.K.N_s.T}} \right] - 1 \right) \dots\dots\dots (8)$$

Sedangkan persamaan arus saturasi *reverse* I_{rs} berubah menjadi:

$$I_{rs} = I_{sc} / \left[e^{\left(\frac{q.V_{oc}}{n.K.N_s.T} \right)} - 1 \right] \dots\dots\dots (9)$$

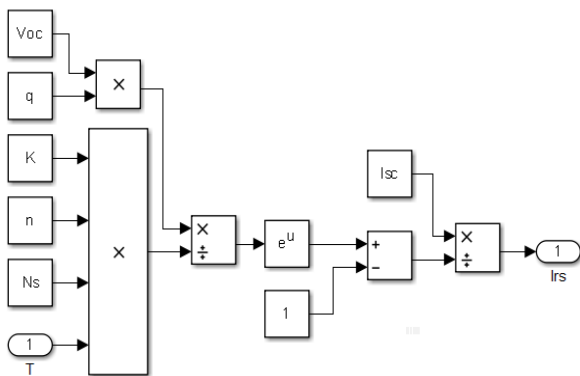
Variabel dan konstanta yang digunakan dalam persamaan matematik serta satuan besaran ditampilkan pada tabel 1.

Tabel 1. Nomenklatur

Nama	Keterangan	Satuan
I	Arus output PV	Ampere
V	Tegangan Output PV	Volt
T _n	Suhu referensi = 298 K (=25 ⁰ C)	Kelvin
T	Suhu kerja PV	Kelvin
K	Konstanta Boltzman = 1,3805 x 10 ⁻²³	J/K
q	Muatan Elektron = 1,6 x 10 ⁻¹⁹ C	Coulomb
G	Irradiansi matahari	W/m ²
k _i	Koefisien suhu I _{sc} = 0,0017	A/ ^o C
n	Ideality factor diode	1.2
E _{go}	Energi celah silikon = 1,1 eV	eV
I _{ph}	Arus terbangkit pada PV	Ampere
I _D	Arus diode	Ampere
I _o	Arus saturasi	Ampere
I _{rs}	Arus reverse saturasi	Ampere
I _{sh}	Arus shunt	Ampere
I _{sc}	Arus hubung singkat	Ampere
V _{oc}	Tegangan rangkaian terbuka	Volt
R _s	Hambatan seri	Ohm
R _{sh}	Hambatan parallel	Ohm

E. Simulink Model

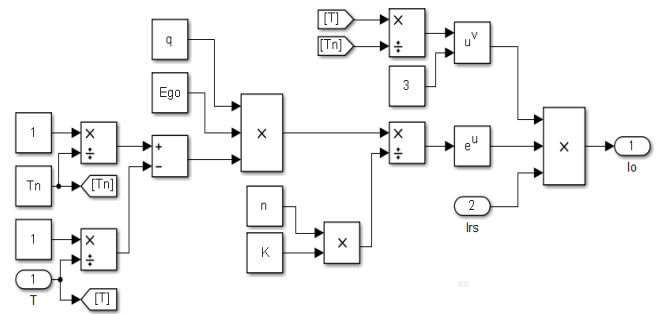
Pemodelan menggunakan software Matlab/Simulink 2013. Model simulink dibuat berdasar persamaan matematik rangkaian ekuivalen PV array. Model simulink I_{rs} ditampilkan pada gambar 3.



Gambar 3. Arus Saturasi reverse I_{rs}

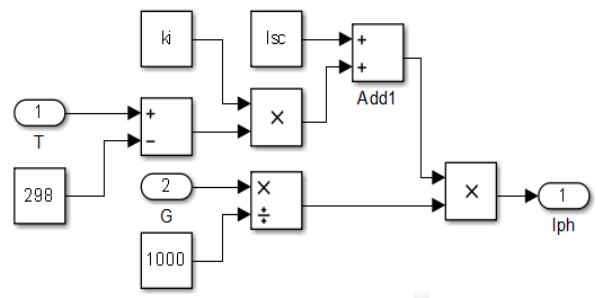
Berdasarkan persamaan (9), input T yaitu suhu dengan sejumlah konstanta n, K, N_s, q, V_{oc}, dan I_{sc}. Output yang dihasilkan berupa arus saturasi reverse (I_{rs}).

Langkah berikutnya dibuat model berdasarkan persamaan (4) yaitu arus saturasi I_o. Input berasal dari suhu T dan arus saturasi reverse I_{rs}. Konstanta yang digunakan yaitu, q, Ego, n, K, serta T_n. Model arus saturasi I_o diperlihatkan pada gambar 4.



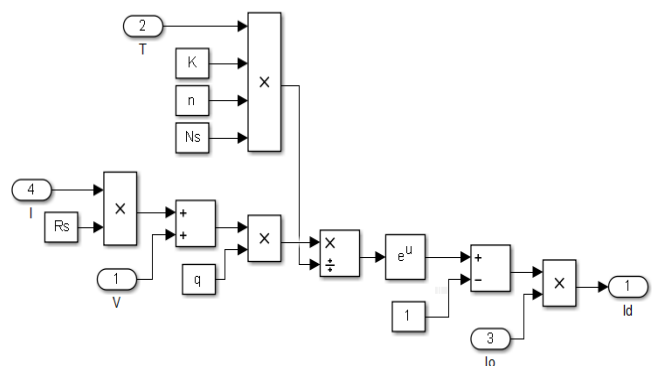
Gambar 4. Arus saturasi (I_o)

Model simulink photocurrent I_{ph} dirancang berdasarkan persamaan (2). Koefisien suhu (k_i) yang digunakan sebesar 0,0017 Ampere/^oC.



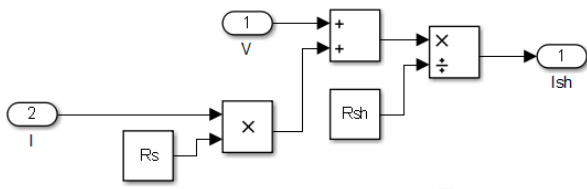
Gambar 5. Photocurrent (I_{ph})

Langkah selanjutnya merancang model arus yang melewati diode I_D. Variabel suhu (T), arus output PV (I), tegangan output PV (V) dan arus saturasi (I_o) dijadikan input. Model arus diode berdasarkan persamaan (8).



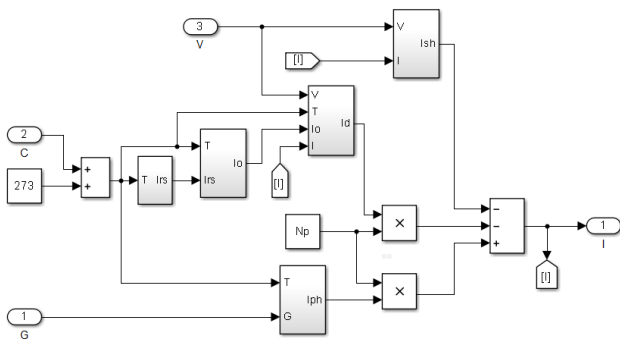
Gambar 6. Arus diode (I_D)

Selanjutnya dirancang model arus shunt I_{sh} yang didasarkan pada persamaan (6). Input berupa arus output (I) dan tegangan output (V). Model diperlihatkan pada gambar 7.



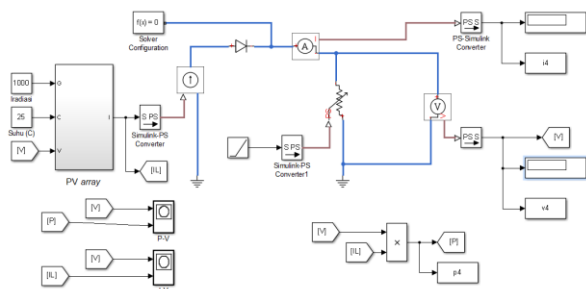
Gambar 7. Arus Shunt (I_{sh})

Tahap berikutnya masing-masing model yang telah dibuat dijadikan sub-system. Terdapat lima sub-system yaitu, arus saturasi reverse, arus saturasi, *photocurrent*, arus diode, dan arus shunt. kemudian seluruh sub-system digabungkan berdasarkan persamaan 7, seperti diperlihatkan pada gambar 8. Gabungan ini kemudian dijadikan sub-system PV array dengan input tegangan (V), suhu (C), dan iradiansi matahari (G) dengan output arus (I).



Gambar 8. PV array

Tahap berikutnya dirancang model penelitian dengan menggabungkan subsystem PV array dengan Simscape toolbox. Output yang di sensor adalah arus, tegangan dan daya. Hasilnya di plotting dalam bentuk kurva I-V dan P-V menggunakan command plot (x,y).



Gambar 9. Model Penelitian

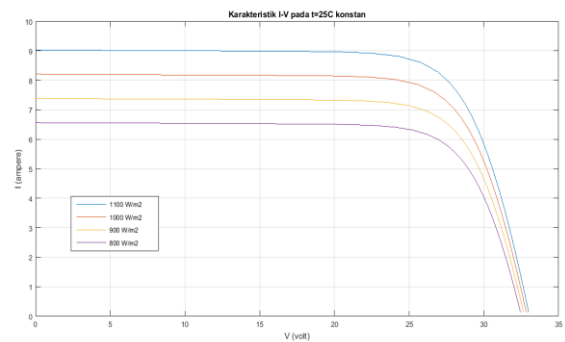
Tabel 2. Spesifikasi Elektris Modul PV

Rated Power (W_{MP})	200W
Voltage at maximum power (V_{MP})	26,4V
Current at maximum power (I_{MP})	7,58A
Tegangan <i>open circuit</i> (V_{oc})	32,9V
Arus <i>short circuit</i> (I_{sc})	8,21A
Jumlah sel PV sambungan seri (N_s)	54
Jumlah sel PV sambungan parallel (N_p)	1
<i>Ideality</i> Faktor	1,2

III. Hasil dan Pembahasan

Pengujian dilakukan melalui beberapa fase, dimana masing-masing fase diterapkan perbedaan dari salah satu masukan dan masukan yang lain tetap. Keluaran berupa grafik kurva I-V dan kurva P-V. Berdasarkan karakteristik grafik I-V dan P-V dapat dipelajari besar arus, tegangan serta titik dimana daya maksimum bisa didapat.

Fase pertama pengujian dilakukan dengan memberikan masukan temperatur tetap, yaitu $25^{\circ}C$ (273K) dengan variasi iradiansi $1100 W/m^2$, $1000 W/m^2$, $900 W/m^2$, $800 W/m^2$. Kurva I-V hasil simulasi diperlihatkan pada gambar 9.



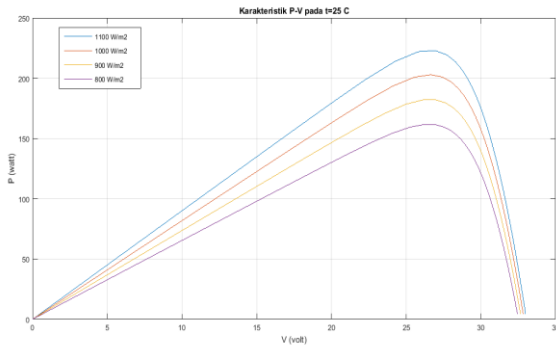
Gambar 9. Karakteristik I-V pada $t=25^{\circ}C$ dengan G berubah

Kurva I-V memperlihatkan bahwa pada suhu tetap yaitu $25^{\circ}C$ atau 273K penurunan iradiansi sinar matahari menyebabkan menurunnya arus output PV. Kurva juga memperlihatkan dimulai tegangan 0 sampai 21 Volt besarnya arus cenderung tetap dan saat tegangan melebihi 21 V arus menurun dengan cepat sampai 0 Ampere saat tegangan output mencapai 32.5 V.

Saat masukan G diberikan $1100 W/m^2$ arus output sebesar 9 ampere, $G = 1000 W/m^2$ arus output sebesar 8,2 Ampere, $G = 900 W/m^2$ arus output sebesar 7,4 Ampere, sedangkan saat $G = 800 W/m^2$ arus output sebesar 6,6 Ampere. Sehingga dapat disimpulkan setiap penurunan iradiansi sinar matahari sebesar $100 W/m^2$ arus output menurun pula sebesar 0,8 Ampere.

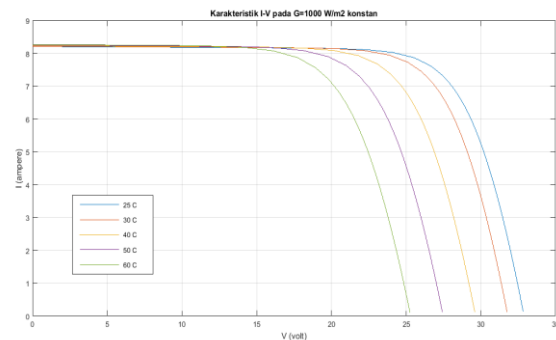
Kurva P-V pada gambar 10 memperlihatkan menurunnya iradiansi sinar matahari akan menurunkan pula output daya listrik. Berdasarkan kurva P-V daya maksimum akan didapat

saat tegangan sebesar 26,4 V sesuai dengan spesifikasi modul PV yang diuji.



Gambar 10. Karakteristik P-V pada $t=25^{\circ}\text{C}$ dengan G berubah

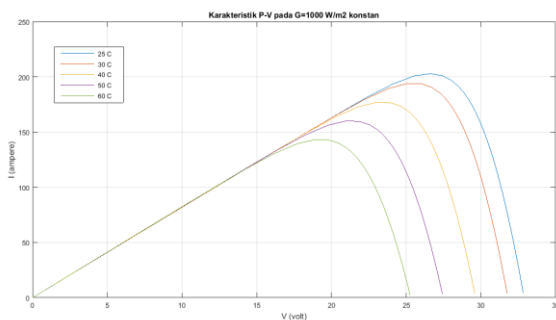
Fase selanjutnya dilakukan simulasi dengan memberikan masukan iradiansi matahari tetap sebesar 1000 W/m². Suhu akan divariasikan sebesar 25, 30, 40, 50, dan 60 dalam satuan °C. Hasil kurva I-V diperlihatkan pada gambar 11.



Gambar 11. Karakteristik I-V pada $G=1000\text{ W/m}^2$ dengan T berubah

Berdasarkan kurva pada gambar 11, peningkatan suhu modul PV menyebabkan penurunan tegangan. Sedangkan arus output tidak terpengaruh oleh adanya perubahan suhu modul.

Kurva berikutnya diperlihatkan pada gambar 12, berupa karakteristik P-V dengan masukan suhu yang berubah dimulai dari 25°C sampai dengan 60°C dan masukan iradiansi matahari tetap sebesar 1000 W/m².



Gambar 12. Karakteristik P-V pada $G=1000\text{ W/m}^2$ dan T berubah

Berdasarkan gambar 12, peningkatan suhu modul PV mengakibatkan penurunan tegangan dan daya output.

IV. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi berbentuk kurva karakteristik I-V dan P-V dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Perubahan iradiansi sinar matahari berbanding lurus dengan perubahan arus dan daya output PV array.
2. Perubahan suhu modul PV array berbanding terbalik dengan perubahan tegangan dan daya outputnya.

V. Daftar Pustaka

- [1] H. Patel, V. Agarwal, "MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV characteristics," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 23, 2008, pp. 302–310.
- [2] K. Ding, X.G. Bian, H.H. Liu, T. peng, "A MATLAB-Simulink-Based PV Module Model and Its Application Under Conditions of Nonuniform Irradiance," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol 27, 2012, No. 4.
- [3] N. Padiarajan, R. Muthu, "Mathematical Modeling of Photovoltaic Module With Simulink," in *International Conference on Electrical Energy System (ICEES 2011)*, 2011, pp. 3–5.
- [4] S. Said, A. Massoud, M. Benammar, S. Ahmed, "A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems ToolBox," in *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 6, 2012.
- [5] M.G. Villalva, J.R. Gazoli, E.R. Vilno, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 24, 2009. no. 3.
- [6] A.A. Hassan, F.H. Fahmy, A.A. Nafeh, M.A. El-Sayed, "Modeling and Simulation of a single phase grid connected photovoltaic system," *WSEAS Transaction on System and Control*, Vol 5, 2010, pp. 16–25.