

**SIMULASI SEL SURYA MODEL DIODA DENGAN HAMBATAN SERI DAN
HAMBATAN SHUNT BERDASARKAN VARIASI INTENSITAS RADIASI,
TEMPERATUR, DAN SUSUNAN MODUL**

**M. Dirgantara¹, M. Saputra², P. Aulia³, Z. Deofarana⁴, B. Setiadi⁵,
H. Syafutra⁶, A. Kartono⁷**

¹Departemen Fisika Institut Pertanian Bogor, Bogor^{1*,2,3,4,5,6,7}

Email: dirgantaramade@gmail.com

ABSTRAK

Sel surya sebagai salah satu sumber energi terbarukan semakin banyak digunakan saat ini. Kualitas sel surya dapat dilihat dari daya yang dihasilkan. Banyak faktor yang mempengaruhi daya yang dihasilkan sel surya diantaranya intensitas radiasi, temperatur dan susunan sel surya dalam modul. Makalah ini membahas karakteristik kurva I-V dan P-V berdasarkan variasi intensitas radiasi, temperatur dan susunan sel surya dalam modul. Karakteristik tersebut diperoleh melakukan simulasi secara numerik dengan Metode *Newton Raphson*. Hasil yang diperoleh dalam simulasi ini menunjukkan intensitas radiasi lebih berpengaruh terhadap perubahan daya maksimum dibandingkan dengan perubahan temperatur. Susunan kombinasi seri-paralel menghasilkan daya maksimum lebih besar dibandingkan susunan seri atau paralel saja.

Kata kunci: intensitas radiasi, temperatur, susunan modul, *Newton-Raphson*, daya

1 PENDAHULUAN

Kebutuhan energi dunia terus meningkat seiring dengan tingkat kemajuan peradaban umat manusia. Pemanfaatan sumber energi konvensional seperti batu bara, bahan bakar minyak, gas alam, dan lain-lain di satu sisi memiliki biaya operasional murah, namun di sisi lainnya menghadapi kendala yang semakin besar. Kendala tersebut adalah sumbernya yang semakin berkurang dan yang lebih penting lagi munculnya persoalan polusi lingkungan hidup yang membahayakan bagi kehidupan umat manusia itu sendiri. Oleh karena itu pengembangan sumber tenaga alternatif yang terbarukan dan bebas polusi menjadi kebutuhan mendesak bagi seluruh umat manusia. Sumber-sumber tenaga terbarukan tersebut seperti tenaga surya, tenaga angin, tenaga air, tenaga gelombang air laut dan lain-lain.

Indonesia terletak di sepanjang garis khatulistiwa, sehingga sumber-sumber energi terbarukan di atas sangat melimpah. Dalam hal energi surya, Indonesia menerima radiasi

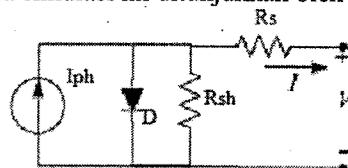
energi harian rata-rata persatuan luas persatuan waktu sebesar kira-kira 4.8kW/m^2 [1]. Namun demikian pemanfaatan energi tersebut belum dilakukan secara optimal baik dalam bidang riset maupun terapannya.

Sel surya secara sederhana, merupakan sambungan dua semikonduktor tipe P dan N. Dalam sambungan P-N tersebut terbentuk tiga daerah berbeda. Pertama daerah tipe P, yang mayoritas pembawa muatannya adalah *hole*, kedua daerah tipe N dengan mayoritas pembawa muatan adalah elektron dan ketiga adalah daerah pengosongan (*depleksi*) yang memiliki medan listrik internal dengan arah dari N ke P [2]. Ketika radiasi mengenai sel surya maka akan terbentuk elektron dan hole, sehingga pengaruh medan listrik internal menyebabkan *hole* bergerak menuju P (mayoritas pembawa muatan adalah hole) dan elektron bergerak menuju N (mayoritas pembawanya elektron). Fenomena ini menghasilkan arus foto-difusi. Sedangkan pada daerah pengosongan dapat pula terjadi pasangan *hole* dan elektron karena pengaruh medan internal yang sama akan bergerak menuju ke arah mayoritasnya, sehingga menghasilkan arus generasi.

Makalah ini membahas tentang pengaruh variasi intensitas radiasi, temperatur dan susunan sel dalam modul terhadap arus, tegangan dan daya maksimum yang dihasilkan oleh sel surya. Sel surya yang digunakan adalah model diode dengan hambatan seri dan hambatan *Shunt*. Simulasi ini menggunakan parameter sel surya dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [3].

2 METODE PENELITIAN

Model sel surya pada simulasi ini ditunjukkan oleh skema rangkaian pada Gambar 1.



Gambar 1 Model Sel Surya

Rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada Gambar 1 terdiri atas arus *fotovoltaik*, sebuah dioda, sebuah resistor paralel yang menggambarkan kebocoran arus dan sebuah resistor seri yang menunjukkan hambatan internal terhadap aliran arus. Persamaan yang menunjukkan karakteristik arus dan tegangan dari rangkaian di atas [4] adalah

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{NkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

di mana,

I_{ph} adalah arus *fotovoltaik* yang dibangkitkan oleh energi radiasi matahari (A),

I_s adalah arus saturasi ketika tidak ada energi radiasi matahari yang mengenai sel surya (A),

q adalah muatan elektron ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

k adalah konstanta Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

T adalah temperatur sel surya (K),

N adalah faktor ideal,

R_{sh} adalah resistansi *Shunt*, dan

R_s adalah resistansi seri sel surya.

Arus *fotovoltaik* dipengaruhi oleh intensitas radiasi dan temperatur sel yang digambarkan oleh persamaan^[4]

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - T_{ref})] \frac{\beta}{1000 \text{ W/m}^2} \quad (2)$$

di mana,

I_{sc} adalah arus *short circuit* sel surya pada 25 °C dan 1 kW/m²,

K_i adalah koefisien temperatur untuk arus *short circuit*,

T_{ref} adalah temperatur referensi sel surya (298 K),

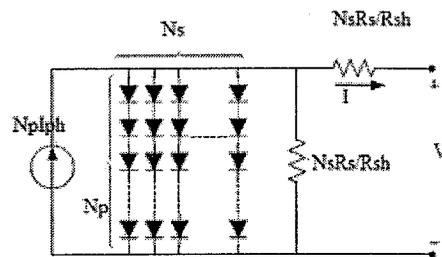
β adalah intensitas radiasi (W/m²)

Arus saturasi bervariasi terhadap temperatur sel berdasarkan persamaan^[4]

$$I_s(T) = I_s \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \frac{E_G}{NkT} \right] \quad (3)$$

di mana E_G adalah energi *gap* dari semikonduktor yang digunakan pada sel.

Sebuah modul sel surya terdiri dari sejumlah sel surya yang dihubungkan secara seri, paralel atau keduanya. Skema rangkaian ekuivalen sebuah modul sel surya disusun dari sejumlah N_p sel paralel dan N_s sel seri ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Rangkaian Ekuivalen Susunan Sel Surya dalam Modul

Persamaan (4) menunjukkan hubungan arus dengan variasi susunan sel surya dalam modul berdasarkan jumlah sel yang disusun seri (N_s) dan jumlah sel yang disusun paralel (N_p) [4].

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V + IR_s}{N_s N_p} \right)}{NkT} - 1 \right) - \frac{N_p V + IR_s}{R_{sh}} \right] \quad (4)$$

Nilai arus pada persamaan (1) dan (4) merupakan fungsi dari arus itu sendiri. Persamaan (1) dan (4) dapat diubah menjadi persamaan (5) dan (6) sebagai berikut

$$f(I) = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{NkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - I = 0 \quad (5)$$

$$f(I) = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V + IR_s}{N_s N_p} \right)}{NkT} - 1 \right) - \frac{N_p V + IR_s}{R_{sh}} \right] - I = 0 \quad (6)$$

Persamaan (5) dan (6) merupakan persamaan homogen yang memiliki akar bernilai I . Akar persamaan tersebut dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan *Newton-Raphson*. Nilai I untuk V tertentu dihitung secara numerik melalui serangkaian proses iterasi i dengan perumusan

$$I_{i+1} = I_i - \frac{f(I)}{f'(I)} \quad (7)$$

di mana $f(I)$ merupakan turunan pertama dari $f'(I)$ terhadap I . Daya yang dihasilkan rangkaian sel surya adalah P . Setiap nilai P merupakan hasil perkalian masing-masing nilai arus dan tegangan.

Simulasi pengaruh intensitas radiasi dilakukan dengan memvariasikan nilai β pada persamaan (2). Nilai β yang digunakan adalah 1.000 W/m^2 , 900 W/m^2 , 800 W/m^2 , 700 W/m^2 dan 600 W/m^2 . Nilai I_{ph} yang diperoleh dari perhitungan tersebut dimasukkan ke persamaan

(1) untuk menghitung nilai arus yang dihasilkan sel surya dengan menggunakan pendekatan *Newton-Raphson* pada persamaan (7). Hasil simulasi disajikan dalam bentuk grafik hubungan arus terhadap tegangan dan grafik hubungan daya terhadap tegangan.

Simulasi pengaruh temperatur sel surya dilakukan dengan memvariasikan nilai T pada persamaan (3). Nilai T yang digunakan adalah 25 °C, 27,5 °C, 30 °C, 32,5 °C dan 35 °C. Nilai I_s yang diperoleh dari perhitungan tersebut dimasukkan ke persamaan (1) untuk menghitung nilai arus yang dihasilkan sel surya dengan menggunakan pendekatan *Newton-Raphson* pada persamaan (7). Hasil simulasi disajikan dalam bentuk grafik hubungan arus terhadap tegangan dan grafik hubungan daya terhadap tegangan.

Nilai intensitas radiasi diturunkan sebesar 10 % dari nilai awal dan nilai temperatur ditingkatkan sebesar 10 % dari nilai awal untuk setiap variasi. Perubahan nilai daya maksimum (P_{max}) untuk setiap perubahan intensitas radiasi dan temperatur dapat dibandingkan. Hasil perbandingan akan menunjukkan variabel yang lebih berpengaruh terhadap daya maksimum yang dihasilkan sel surya.

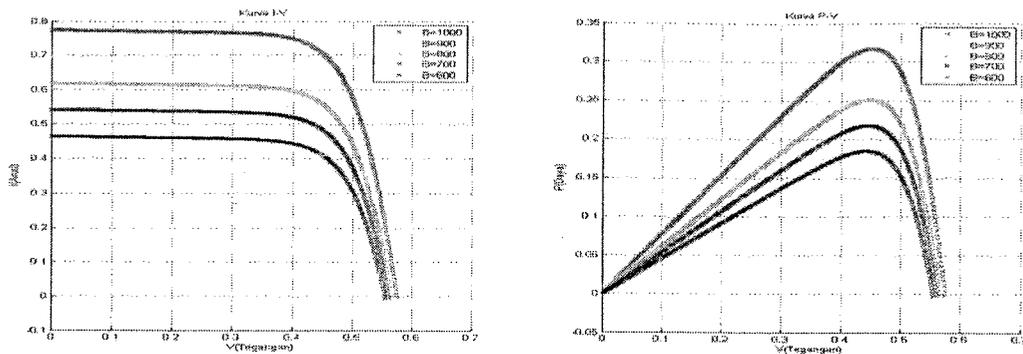
Simulasi pengaruh susunan sel surya dalam modul dilakukan dengan memvariasikan nilai N_s dan N_p pada persamaan (4). Variasi nilai yang digunakan adalah $N_s=9$ dan $N_p=1$, $N_s=1$ dan $N_p=9$ serta $N_s=5$ dan $N_p=5$. Nilai-nilai tersebut digunakan untuk menghitung nilai arus yang dihasilkan dengan menggunakan pendekatan *Newton-Raphson* pada persamaan (7). Hasil simulasi disajikan dalam bentuk grafik hubungan arus terhadap tegangan dan grafik hubungan daya terhadap tegangan.

Nilai-nilai parameter diperoleh dari data penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Nilai I_{ph} adalah 0,7608 A, I_s adalah 0,3223 μ A, R_s adalah 0,0364 Ω , R_{sh} adalah 0.0186 Ω dan N adalah 1,4837 [3]. Bahan yang digunakan adalah silicon dengan nilai E_G sebesar 1,2 eV [5].

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Efek Variasi Intensitas Radiasi terhadap Arus, Tegangan dan Daya

Intensitas radiasi sangat mempengaruhi besar kecilnya arus yang dihasilkan. Berdasarkan persamaan (2), intensitas radiasi sel surya berbanding lurus dengan arus yang dihasilkan. Hasil simulasi hubungan arus dan tegangan ditunjukkan pada Gambar 3(a) sementara hubungan daya dan tegangan ditunjukkan pada Gambar 3(b).



(a) (b)

Gambar 3 (a) Grafik I-V untuk variasi intensitas radiasi

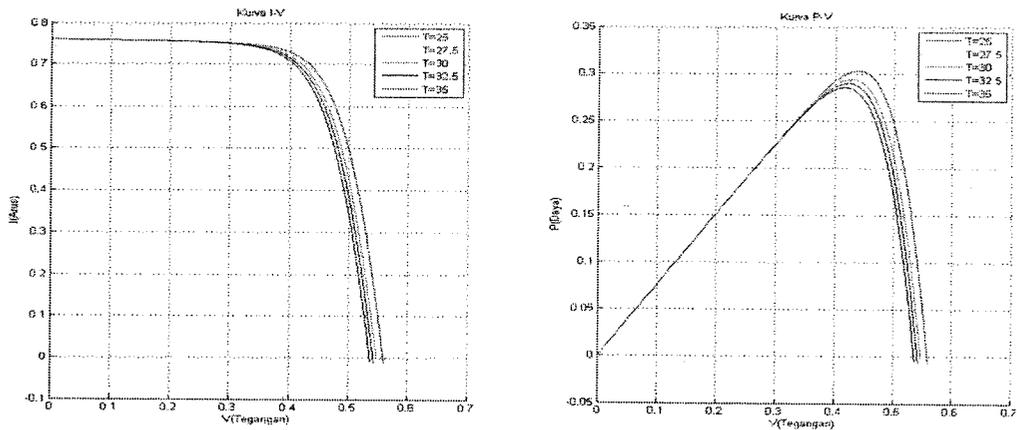
(b) Grafik P-V untuk variasi intensitas radiasi

Hasil simulasi yang menunjukkan arus *short circuit* mengalami penurunan ketika intensitas radiasi yang diterima oleh sel surya berkurang. Intensitas radiasi yang berkurang menyebabkan elektron-elektron yang terlepas semakin sedikit sehingga arus listrik menurun. Gambar di atas juga memperlihatkan intensitas radiasi berpengaruh terhadap perubahan tegangan *open circuit*. Tegangan *open circuit* semakin berkurang ketika intensitas radiasi dikurangi tetapi perubahannya tidak signifikan.

Gambar 3(b) menunjukkan bahwa semakin kecil intensitas radiasi yang diterima sel surya maka daya maksimum yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini dikarenakan daya merupakan perkalian antara arus dan tegangan, dimana arus dan tegangan maksimum akan mengecil dengan mengecilnya radiasi yang diterima.

3.2 Efek Variasi Temperatur terhadap Arus, Tegangan dan Daya

Hasil simulasi efek variasi temperatur terhadap arus, tegangan dan daya dapat dilihat pada Gambar 4(a) dan 4(b). Gambar 4(a) memperlihatkan bahwa semakin besar temperatur maka nilai tegangan *open circuit* akan semakin kecil. Hal ini disebabkan penurunan energi *gap* ketika temperatur meningkat^[6]. Gambar 4(b) memperlihatkan bahwa semakin besar suhu maka daya maksimum semakin kecil. Hal ini disebabkan tegangan maksimum berkurang terhadap kenaikan suhu.



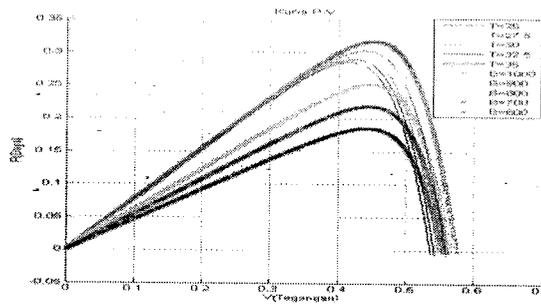
(a) (b)

Gambar 4. (a) Grafik I-V untuk Variasi Temperatur

(b) Kurva P-V untuk Variasi Temperatur

3.3 Perbandingan Pengaruh Intensitas Radiasi dan Temperatur Terhadap Daya

Simulasi pengaruh intensitas radiasi menunjukkan setiap kenaikan intensitas radiasi sebesar 10% meningkatkan daya maksimum sebesar 0,0331 W. Simulasi pengaruh temperatur menunjukkan setiap kenaikan temperatur sebesar 10% menurunkan daya maksimum sebesar 0,0044 W. Perbandingan hasil ini menunjukkan bahwa perubahan intensitas radiasi lebih berpengaruh terhadap daya maksimum yang dihasilkan.



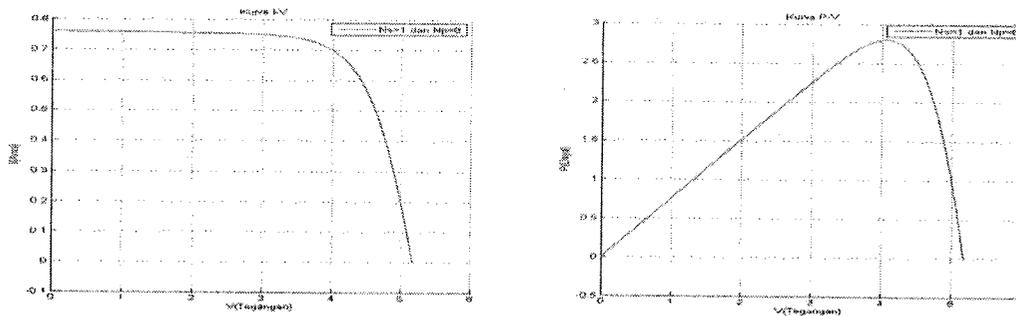
Gambar 5 Perbandingan Antara Intensitas Radiasi dan Temperatur

3.4 Pengaruh Susunan Sel Surya dalam Modul

3.4.1 Susunan Seri Sel Surya dalam Modul

Hasil simulasi susunan seri sel surya dalam modul menunjukkan besar tegangan maksimumnya 5,1670 V dan arus maksimumnya sebesar 0,7602 A dan daya maksimumnya sebesar 2,8025 W. Gambar 6(a) menunjukkan hubungan antara arus dan tegangan dan

Gambar 6(b) menunjukkan hubungan antara daya dan tegangan. Hasil simulasi diatas menunjukkan bahwa penyusunan seri meningkatkan tegangan tetapi arus konstan.

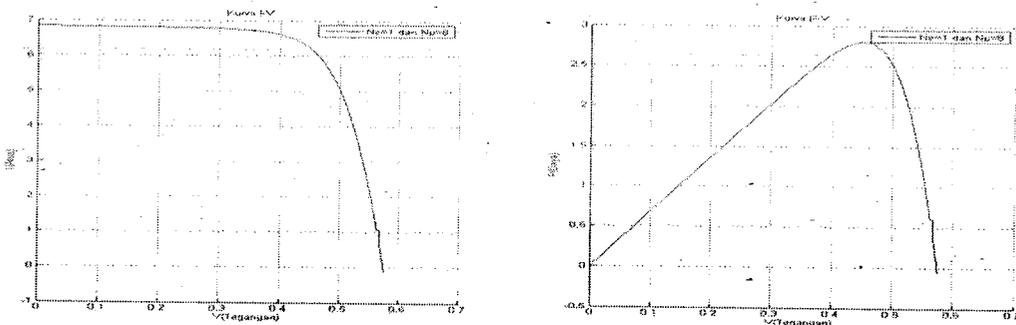


(a) (b)

Gambar 6 (a) Grafik I-V Susunan Seri, (b) Grafik P-V Susunan Seri

3.4.2 Susunan Paralel Sel Surya dalam Modul

Hasil simulasi susunan paralel sel surya dalam modul menunjukkan besar tegangan maskimum 0,5750 V , arus maksimum sebesar 6,8425 A dan daya maksimum sebesar 2,8025 W. Gambar 7 (a) menunjukkan hubungan antara arus dan tegangan dan Gambar 7 (b) menunjukkan hubungan antara daya dan tegangan. Hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa penyusunan seri meningkatkan arus tetapi tegangan konstan.



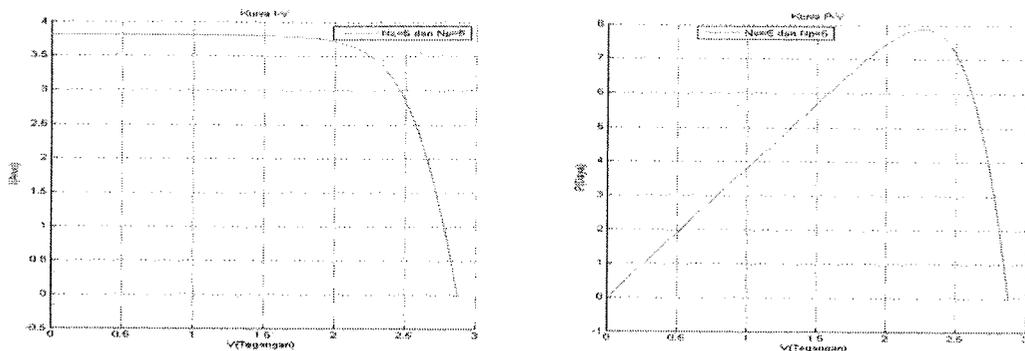
(a) (b)

Gambar 7 (a) Grafik I-V Susunan Seri, (b) Grafik P-V Susunan Paralel

3.4.3 Kombinasi Susunan Seri dan Paralel Sel Surya dalam Modul

Hasil simulasi susunan paralel sel surya dalam modul menunjukkan besar tegangan maskimum 2,87399 V dan arus maksimum sebesar 3,80399 A dan daya maksimum sebesar 7,87955 W. Gambar 8 (a) menunjukkan hubungan antara arus dan tegangan dan Gambar 8 (b) menunjukkan hubungan antara daya dan tegangan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa

kombinasi susunan seri dan paralel menghasilkan daya yang besar dengan meningkatkan arus dan tegangan.

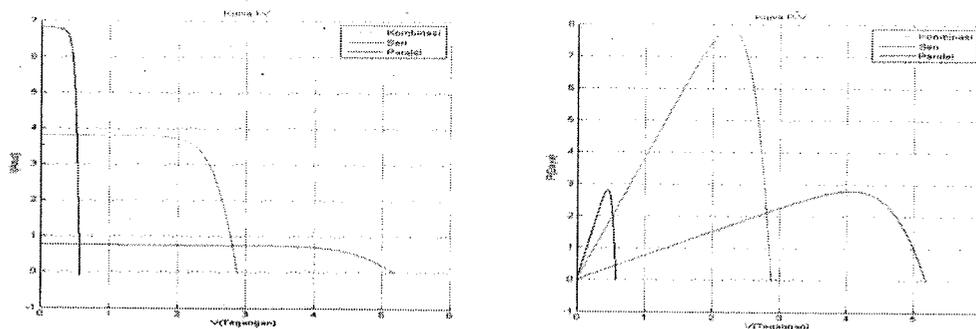


(a) (b)

Gambar 8 (a) Grafik I-V dan (b) Grafik P-V Kombinasi Seri-Paralel

3.4.3 Perbandingan Susunan Seri, Paralel dan Kombinasi Sel Surya dalam Modul

Perbandingan susunan seri, paralel dan kombinasi seri-paralel sel surya dalam modul dapat dilihat pada Gambar 9. Gambar 9 (a) memperlihatkan hubungan arus terhadap tegangan, terlihat susunan seri memiliki tegangan maksimum tertinggi, susunan paralel memiliki arus maksimum tertinggi dan susunan kombinasi seri-paralel memiliki tegangan dan arus di antara kedua susunan tersebut. Gambar 9 (b) memperlihatkan hubungan daya terhadap tegangan, terlihat daya maksimum antara susunan seri dan paralel hampir sama, dan susunan kombinasi seri-paralel mempunyai daya maksimum lebih besar dibandingkan seri atau paralel saja.



(a) (b)

Gambar 9 (a) Perbandingan Grafik I-V dan (b) Perbandingan Grafik P-V untuk Susunan Seri, Paralel dan Kombinasi Seri-Paralel

4 KESIMPULAN

Peningkatan intensitas radiasi meningkatkan daya maksimum yang dihasilkan sel surya. Peningkatan temperatur sel surya menurunkan daya maksimum yang dihasilkan sel surya. Perubahan intensitas radiasi lebih berpengaruh terhadap perubahan daya maksimum dibandingkan dengan perubahan temperatur. Susunan kombinasi seri-paralel menghasilkan daya maksimum lebih besar dibandingkan susunan seri atau paralel saja.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Archie WC. 1984. *Prinsip-prinsip Konversi Energi* (Terjemahan) oleh Darwin S. Jakarta: Erlangga.
- [2] Ricaud A. 1997. *Photopoles solaire*. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romande.
- [3] Nehaoua N, Chergui Y, Mekki DE. 2011. A New Model for Extracting the Physical Parameters from I-V Curves of Organic and Inorganic Solar Cells. *Silicons Wafer-Based Technologies* : 53-66.
- [4] Sonal P, Saini RP. 2012. Development and Simulation of Solar Photovoltaic Model using MATLAB/Simulink and Its Parameter Extraction. *International Conference on Computing and Control Engineering*. Roorke: Coimbatore Institute of Information Technology
- [5] Low JJ, Kreider ML, Pulsifer DP. Band Gap Energy in Sillicon. *American Journal of Undergraduate Research* 7(1): 27-32
- [6] Zeghbroeck BV. 2011. *Principles of Semiconductor Devices*. Colorado: University of Colorado Boulder.