

Pemodelan Modul Fotovoltaik Sederhana menggunakan MATLAB/SIMULINK

Korinus Nixon Waimbo*

Departemen Teknik Sistem Energi, Universitas Internasional Papua, Jayapura, Indonesia

Email: korinus.waimbo@iup.ac.id

ABSTRACT

Improving the performance of photovoltaic (PV) technology requires understanding the electrical characteristics of PV modules. One of the electrical characteristics of PV modules is shown by the current-voltage (I - V) curve and power-voltage (P - V) curve. This research aims to develop a simple model of PV module to understand the I - V curve characteristics of PV module. Model design and simulation of the results were performed using Matlab/Simulink software. Solarex MSX-60 PV module is used as a reference for model validation. The simulation results show that the current, voltage and output power of the PV module are strongly influenced by the irradiance level, module temperature and the semiconductor material used.

Keywords: Photovoltaic; I - V Curve; Modeling.

ABSTRAK

Meningkatkan performa teknologi fotovoltaik (PV) membutuhkan pemahaman karakteristik kelistrikan dari modul PV. Salah satu karakteristik kelistrikan modul PV ditunjukkan oleh kurva arus-tegangan (I - V) dan kurva daya-tegangan (P - V). Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model sederhana modul PV untuk memahami karakteristik kurva I - V dari modul PV. Desain model dan simulasi hasil dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab/Simulink. Modul PV Solarex MSX-60 dipakai sebagai referensi untuk validasi model. Hasil simulasi menunjukkan bahwa arus, tegangan dan daya keluaran dari modul PV sangat dipengaruhi oleh tingkat iradiansi, temperatur modul dan material semikonduktor yang digunakan.

Kata Kunci: Fotovoltaik; Kurva I - V ; Pemodelan.

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](#) license



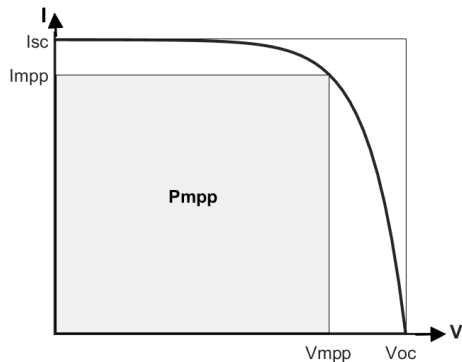
1. PENDAHULUAN

Teknologi fotovoltaik (PV) merupakan salah satu teknologi konversi energi cahaya menjadi listrik yang mendominasi dunia namun gagasan awal tentang fenomena fotolistrik telah ada sejak 2 abad silam melalui eksperimen sel elektrolitik berbahan *photosensitive* yang dilakukan oleh Alexander Edmond Becquerel tahun 1839 [1],[2]. Becquerel menemukan bahwa sel elektrolitiknya mengalirkan arus listrik ketika terpapar cahaya. Melalui penemuannya, empat dekade kemudian sel PV pertama berhasil dibuat dari bahan selenium oleh Charles Fritts [2]. Namun, material tersebut memiliki efisiensi yang sangat kecil, yakni kurang dari 1% [2], [3]. Sel PV modern pertama dengan efisiensi hingga 8% dari bahan kristal silikon baru berhasil dibuat tahun 1950 di Laboratorium Bell oleh Calvin Fuller, Daryl Chapin dan Gerald Person [2], [4]. Sel PV kristal silikon mampu menghasilkan daya listrik yang signifikan sehingga dapat digunakan pada satelit luar angkasa dan menjadi basis sel PV yang banyak digunakan sekarang.

Sel PV adalah alat semikonduktor yang digunakan untuk mengkonversi energi cahaya dari matahari menjadi listrik dalam hal ini listrik yang dihasilkan

adalah listrik arus searah atau *direct current* (DC). Perkembangan IPTEK yang pesat mendorong adanya penemuan berbagai material dan teknik manufaktur baru yang dapat meningkatkan efisiensi sel PV hingga mencapai 47.6% pada skala riset saat ini [6], [7]. Teknologi PV bersifat modular sehingga dapat dikonfigurasi dengan menggabungkan sel-sel PV secara seri-paralel menjadi modul dan atau panel PV untuk menghasilkan daya keluaran ratusan hingga ribuan Watt. Keunggulan teknologi PV adalah *lifetime* operasinya yang lama (lebih dari 20 tahun), tidak bising dan bebas emisi dalam penggunaannya sehingga telah banyak digunakan dalam berbagai alat-alat elektronik modern [8], [9].

Karakteristik performa dari modul PV sangat bergantung pada jenis material, teknologi manufaktur dan kondisi operasi. Gambar 1 menunjukkan kurva arus-tegangan atau *current-voltage* (I - V) yang menggambarkan karakteristik kelistrikan dari modul PV



Gambar 1 – Kurva I-V dari sel atau modul PV

Tiga titik penting kurva I-V pada Gambar 1 adalah:

1. I_{sc} (arus *short-circuit*) adalah arus maximum dimana tegangan sel atau modul PV nol
2. V_{oc} (tegangan *open-circuit*) adalah tegangan maximum dimana arus sel atau modul PV nol
3. MPP (*maximum power point* atau titik daya maksimum) adalah titik operasi dimana sel atau modul PV menghasilkan daya maksimum (P_{mpp}) yang didefinisikan oleh $I_{MPP} \times V_{MPP}$.

Kurva I-V dari sel atau modul PV bervariasi terhadap perubahan irradiansi, temperatur, dan beban (*load*). Dari ketiga faktor ini, yang dapat dikontrol adalah beban. Dengan mengontrol beban, tegangan sel atau modul PV dapat dilacak pada titik MPP dalam kondisi irradiansi dan temperatur yang bervariasi sehingga sel atau modul PV dapat tetap menghasilkan daya maksimum.

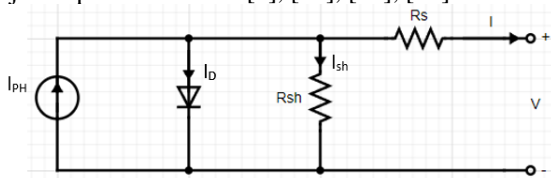


Gambar 2. Diagram Alir Metodologi Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Model Matematis Sel dan Modul PV

Sifat kelistrikan sel PV dapat dimodelkan menggunakan rangkaian diode tunggal seperti ditunjukkan pada Gambar 3 [9], [10], [11], [12].



Gambar 3. Rangkaian ekuivalen sel PV

Dengan menggunakan hukum arus Kirchhoff (*Kirchhoff's current law*), arus keluaran (I) dari sel PV dapat dituliskan menggunakan persamaan (1) [10].

$$I = I_{PH} - I_D - I_{sh} \tag{1}$$

Dimana

I adalah arus keluaran dari sel PV [A],

I_{PH} adalah arus fotolistrik (*photoelectric current*) [A],

I_D adalah arus total yang mengalir pada dioda [A],

I_{sh} adalah arus bocor (*leakage current*) [A] karena adanya hambatan *shunt* (R_{sh}) yang kecil.

Hambatan *shunt* biasanya muncul karena cacat produksi atau manufaktur (*manufacture defect*) pada lapisan metal dan bahan semikonduktor sel PV yang menimbulkan terjadinya aliran arus (arus bocor) yang dapat menurunkan arus dan atau daya keluaran sel PV. Sedangkan hambatan seri (R_s) timbul karena faktor material dan desain sel PV yang dapat menurunkan tegangan dan atau daya keluaran sel PV. Dalam kondisi ideal, hambatan *shunt* dianggap sangat besar sehingga tidak ada arus bocor pada sel PV sedangkan hambatan seri dianggap sangat kecil mendekati nol. Dengan

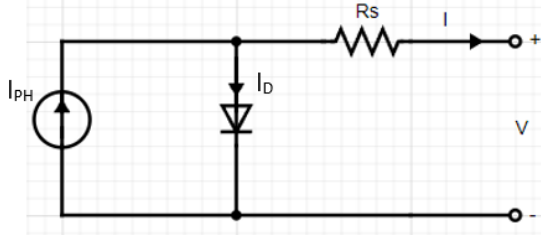
Guna meningkatkan efisiensi atau performa teknologi PV diperlukan pemahaman karakteristik kelistrikan dari teknologi PV. Salah satu metode yang efektif dan efisien dari sisi waktu dan biaya adalah melalui pemodelan komputer. Studi ini dimaksudkan untuk membuat pemodelan modul PV sederhana menggunakan perangkat lunak Matlab/Simulink. Tujuan dari pemodelan ini adalah untuk memahami perilaku kelistrikan modul PV dalam mengubah cahaya matahari menjadi listrik, serta mengembangkan model interaktif yang dapat digunakan untuk analisis dan perancangan sistem PV yang lebih kompleks.

2. METODE

Tujuan studi ini adalah membuat model simulasi sederhana yang dapat menggambarkan karakteristik arus-tegangan atau *current-voltage* (I-V) dan daya-tegangan atau *power-voltage* (P-V) dari modul PV. Software yang digunakan untuk desain model dan simulasi adalah MATLAB/Simulink R2021b. Pendekatan metodologis dalam studi ini adalah sebagai berikut (Lihat Gambar 2):

1. Studi literatur untuk memperoleh model matematis yang menggambarkan karakteristik arus-tegangan (kurva I-V) dan daya-tegangan (kurva P-V) dari sel atau modul PV.
2. Desain model blok Matlab/Simulink sesuai model matematis yang diperoleh pada tahap pertama.
3. Simulasi dan validasi model Simulink menggunakan spesifikasi dari modul PV aktual.
4. Desain model interaktif berbasis Matlab/Simulink.

demikian, rangkaian ekivalen sel PV pada Gambar 3 dapat disederhanakan atau dibuat ideal menjadi rangkaian ekuivalen pada Gambar 4



Gambar 4. Rangkaian ekivalen sel PV ideal

Model matematis yang menggambarkan karakteristik I - V dari sel PV ideal dapat dinyatakan dengan persamaan (2) sampai (8) [9], [11], [12].

$$I = I_{PH} - I_D \quad (2)$$

$$I_{PH} = [I_{SC} + (T_C - T_{Ref})K_I] \frac{E}{E_{ref}} \quad (3)$$

$$I_D = I_S \left[\exp\left(\frac{qV}{kT_{CA}}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$I_S = I_{RS} \left(\frac{T_C}{T_{Ref}}\right)^3 \exp\left[\frac{E_G}{kA} \left(\frac{1}{T_{Ref}} - \frac{1}{T_C}\right)\right] \quad (5)$$

$$T_C = T_{Amb} + \left(\frac{T_{NOCT}-20}{0.8}\right) E \quad (6)$$

$$I_{RS} = \frac{I_{SC}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{kAT_{Ref}}\right) - 1} \quad (7)$$

$$P = V \cdot I \quad (8)$$

Dimana:

I_S adalah arus gelap jenuh (*dark saturation current*) dioda [A],

q adalah muatan elektron [=1.6 x 10⁻¹⁹ C],

V adalah tegangan keluaran sel PV [V],

k adalah konstanta Boltzman [=1.38 x 10⁻²³ J/K],

T_C adalah temperatur sel PV [°C],

A adalah faktor ideal (*ideality factor*) bahan semikonduktor sel PV [bervariasi dari 1 sampai 2],

K_I adalah koefisien temperatur arus *short-circuit* [mA/°C],

T_{Ref} adalah temperatur acuan sel PV, diambil suhu kamar [25°C],

E adalah irradiansi [W/m²],

E_{ref} adalah irradiansi acuan [W/m²],

I_{RS} adalah arus jenuh balik (*reverse saturation current*), diukur pada temperatur dan irradiansi acuan [A],

E_G adalah energi celah pita bahan semikonduktor yang digunakan dalam sel PV [1 eV = 1.602 x 10⁻¹⁹ J],

T_{Amb} adalah suhu lingkungan [K],

T_{NOCT} adalah temperatur sel PV dalam kondisi operasi nominal [°C], diukur pada temperatur lingkungan 20°C, AM 1.5, irradiansi 0.8 kW/m², dan kecepatan angin kurang atau sama dengan 1 m/s,

I_{SC} adalah arus *short-circuit* sel PV [A], diukur pada suhu 25°C dan irradiansi 1 kW/m²,

V_{oc} adalah tegangan *open-circuit* [V],

P adalah daya keluaran sel PV [W].

Satu sel PV umumnya hanya menghasilkan daya dan tegangan keluaran yang sangat kecil, sekitar 2 W dan 0,5

V[13]. Oleh karena itu untuk menghasilkan daya dan tegangan keluaran yang cukup tinggi, sel-sel PV biasanya dirangkai secara seri-paralel menjadi satu modul PV. Selanjutnya modul-modul PV dapat dirangkai secara seri-paralel menjadi satu panel PV untuk meningkatkan daya-tegangan keluaran yang lebih tinggi sesuai kebutuhan [9], [13]. Secara matematis, modul PV ideal dapat dimodelkan menggunakan persamaan (9) dimana tegangan keluaran modul PV meningkat proporsional dengan jumlah sel seri (N_s) dan arus keluarannya meningkat proporsional dengan jumlah sel paralel (N_p).

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_S \left[\exp\left(\frac{qV}{N_s k T_{CA}}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

Dimana:

N_p adalah jumlah sel PV yang dirangkai paralel, N_s adalah jumlah sel PV yang dirangkai seri.

Dalam desain modul PV, tegangan dan arus keluaran aktual perlu disesuaikan ke titik MPP untuk mencapai daya output maksimum. Salah satu cara sederhana memodelkan pelacak MPP (*MPP tracker*) didasarkan pada hubungan linieritas tegangan *open-circuit* (V_{oc}) dan tegangan MPP (V_{MPP}). V_{oc} pada temperatur dan irradiansi yang berbeda atau $V_{oc,Amb}$ dapat diturunkan dari persamaan (9) dengan mengatur arus keluaran sel PV sama dengan nol sehingga diperoleh persamaan (10).

$$V_{oc,Amb} = \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_S} + 1\right) \frac{N_s k T_{CA}}{q} \quad (10)$$

Hubungan linier V_{MPP} dan $V_{oc,Amb}$ dapat dinyatakan menggunakan persamaan (11):

$$V_{MPP} = m \times V_{oc,Amb} + C \quad (11)$$

Dimana:

m dan C adalah parameter *fitting*

Model Simulink Modul PV

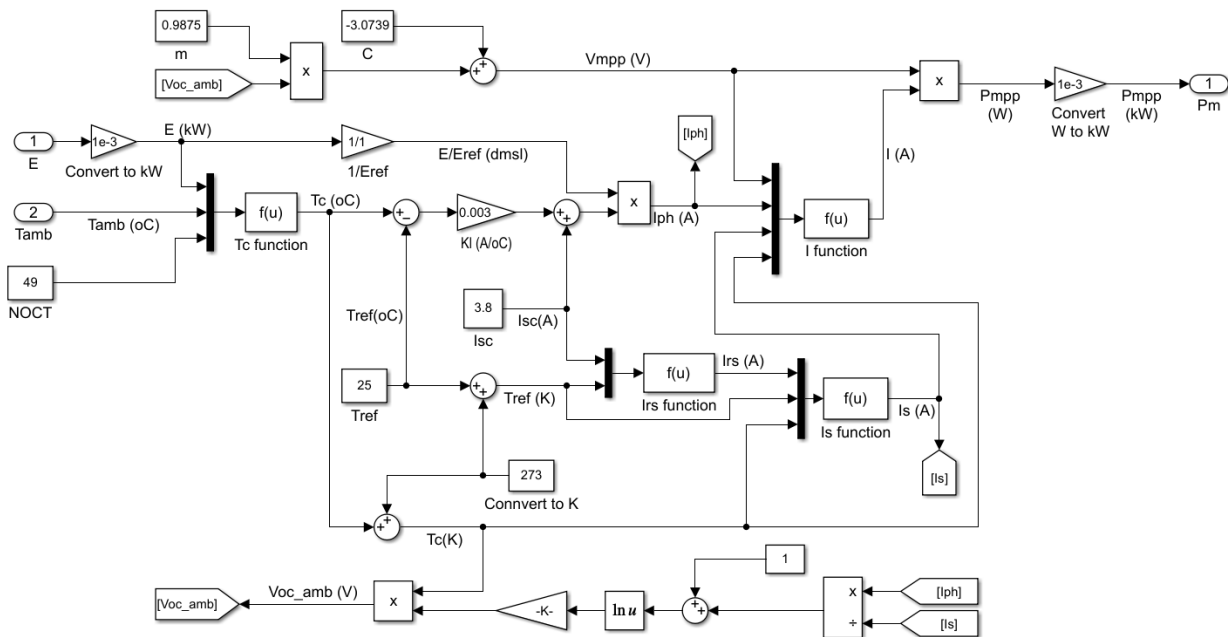
Dengan menggunakan model matematis pada persamaan (2) sampai (11), model blok Simulink dapat didesain seperti ditunjukkan dalam Gambar 5. Parameter input model Simulink modul PV di atas terdiri atas input eksternal dari lingkungan yakni irradiansi (E) dan temperatur lingkungan (T_{amb}) dan input internal yang berhubungan dengan desain modul PV antara jumlah sel seri (N_s) dan paralel (N_p) modul PV, jenis material sel PV yang direpresentasikan oleh faktor ideal (A), NOCT, koefisien temperatur arus *short-circuit* (K_I), arus *short-circuit* (I_{sc}) dan tegangan *open-circuit* (V_{oc}).

Simulasi dan Validasi Model Simulink

Untuk tujuan validasi model Simulink, digunakan modul PV tipe Solarex MSX-60 sebagai parameter desain. Spesifikasi utama dari Solarex MSX-60 diberikan dalam Tabel 1.

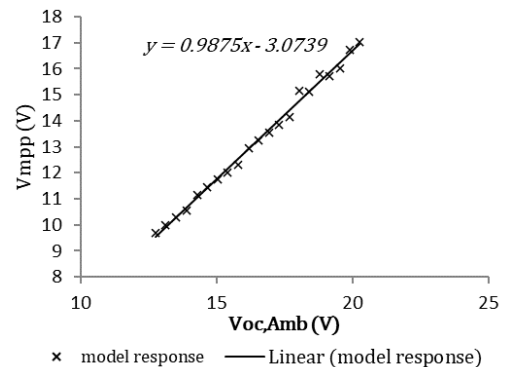
Tabel 1. Spesifikasi Modul PV tipe Solarex MSX-60 [11][14]

Karakteristik	Spesifikasi
Daya puncak (P_p)	60 W
Tegangan pada daya puncak (V_{pp})	17.1 V
Arus pada daya puncak (I_{pp})	3.5 A
Arus short-circuit (I_{sc})	3.8 A
Tegangan open-circuit (V_{oc})	21.1V
Koefisien Temperatur Tegangan open-circuit	-73 mV/°C
Koefisien Temperatur Arus short-circuit (K_i)	3 mA/°C
Pengaruh temperatur terhadap daya keluaran	-0.38 W/°C
Temperatur operasi nominal sel (NOCT)	49°C
Faktor ideal untuk dioda Si-poly	1.3
Jumlah konfigurasi sel seri	36
Jumlah konfigurasi sel paralel	1



Gambar 5 Model Blok Simulink Modul PV Ideal

Gambar 6 menunjukkan hubungan tegangan *open-circuit* (V_{oc}) dan tegangan MPP (V_{MPP}) pada iradiansi 1 kW/m² dan temperatur yang berbeda ($V_{oc,Amb}$). Hasil *curve fitting* menunjukkan bahwa untuk modul PV Solarex MSX-60, nilai m dan C pada persamaan (11) adalah 0.9875 dan -3.0739. Gambar 7 menunjukkan hasil simulasi karakteristik kurva $I-V$ dan $P-V$ untuk modul PV Solarex MSX-60 pada nilai iradiansi tetap 1000 W/m² dan temperatur bervariasi mulai 0°C sampai 100°C dengan kenaikan 25°C. Hasil simulasi kurva $I-V$ dari model Simulink yang dibuat menunjukkan adanya kesesuaian dengan kurva $I-V$ dengan referensi dan datasheet Solax MSX-60 [11], [14]. Hasil simulasi sesuai dengan prinsip kerja Modul PV bahwa semakin tinggi temperatur sel atau modul PV, tegangan keluaran PV akan berkurang signifikan walau arus keluaran juga meningkat namun tidak signifikan



Gambar 6 $V_{oc,Amb}$ versus V_{mpp}

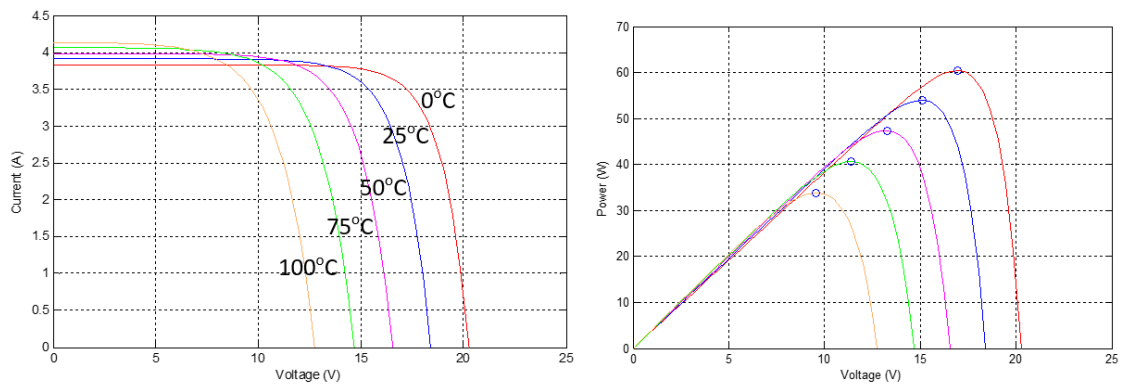
Gambar 8 menunjukkan hasil simulasi karakteristik kurva $I-V$ dan $P-V$ untuk modul PV Solarex MSX-60 pada nilai temperatur tetap 25°C dan iradiansi bervariasi

mulai 200 W/m² sampai 1000 W/m² dengan kenaikan 200 W. Hasil simulasi sesuai dengan prinsip kerja Modul PV bahwa semakin tinggi iradiansi, arus keluaran meningkat signifikan namun tegangan keluaran tidak berubah signifikan.

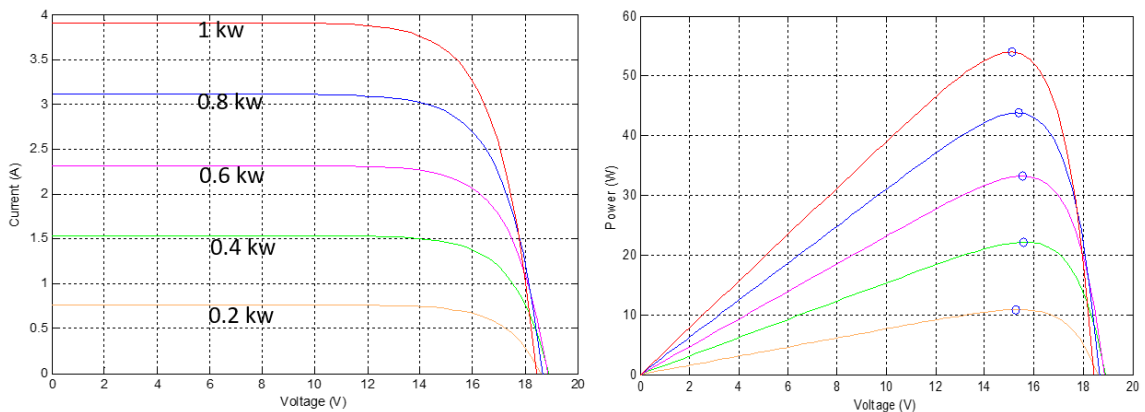
Tabel 2 menampilkan hasil simulasi daya maksimum (P_{MPP}) Solarex MSX-60 pada berbagai variasi temperatur dan iradiansi. Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa pada iradiansi 1 kW/m² setiap kenaikan temperatur sel PV 25°C, daya maksimum berkurang 25-27%. Sedangkan pada temperatur tetap 25°C, setiap kenaikan iradiansi 200 W, daya maksimum meningkat 5-6%.

Tabel 2 Daya maksimum (P_{MPP}) pada variasi Iradiansi dan Temperatur (T_{Amb})

T_{Amb} [°C]	P_{MPP} [W] @1kW/m ²	Iradiansi [kW/m ²]	P_{MPP} [W] @25°C
0	60.43	0.2	10.88
25	53.99	0.4	22.19
50	47.37	0.6	33.24
75	40.63	0.8	43.87
100	33.83	1	53.99



Gambar 7 Kurva $I-V$ dan $P-V$ pada temperatur yang berbeda dan iradiansi 1 kW/m². Tanda o pada kurva $P-V$ menunjukkan P_{MPP}



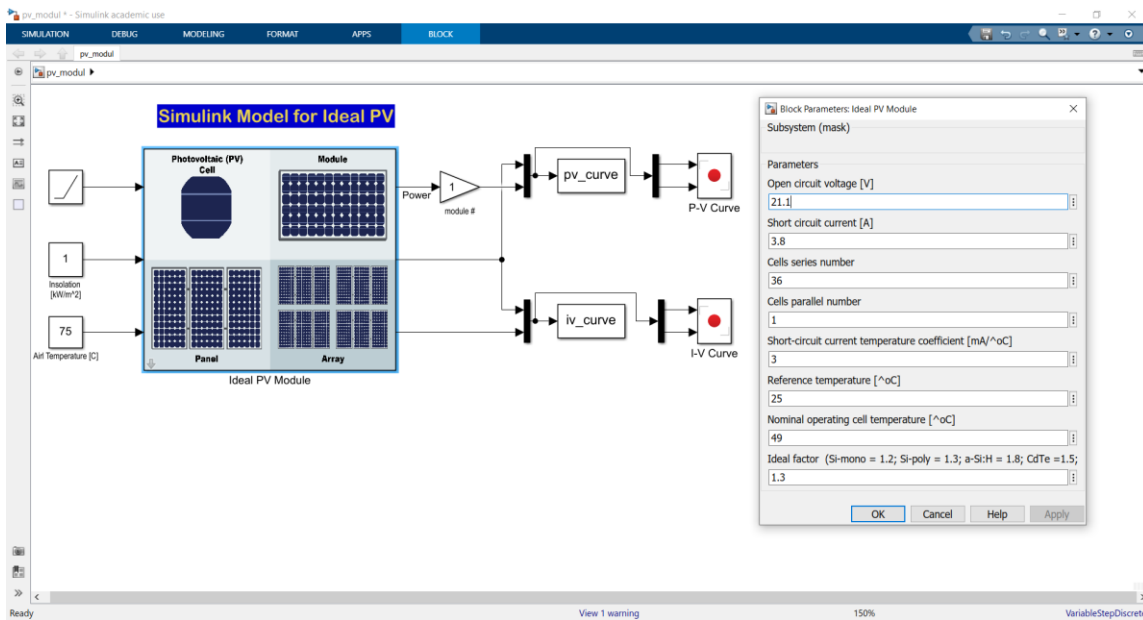
Gambar 8 Kurva $I-V$ dan $P-V$ pada iradiansi yang berbeda dan temperatur udara 25°C. Tanda o pada kurva $P-V$ menunjukkan P_{MPP}

Implementasi Model menggunakan Model Interaktif

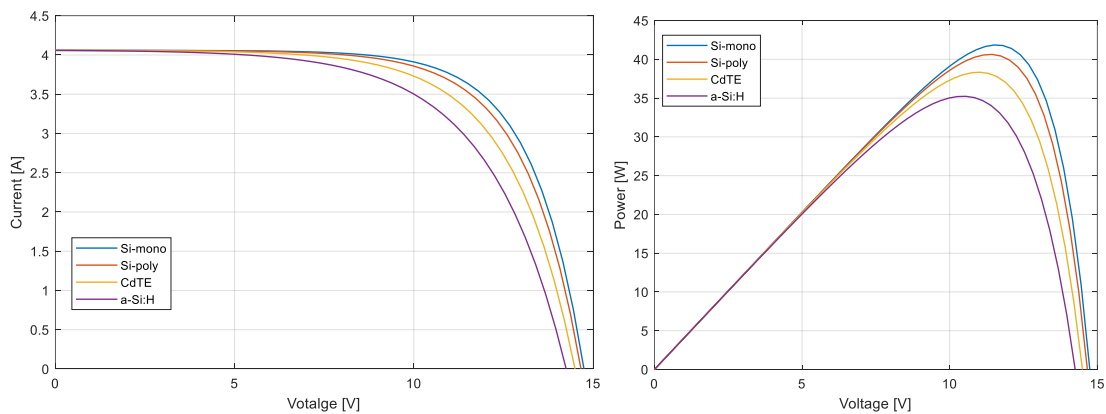
Model Simulink yang telah dibuat dapat dikonversi menjadi model interaktif. Gambar 9 menunjukkan tampilan model interaktif berbasis Matlab/Simulink dimana spesifikasi modul PV sebagai input internal dan kondisi lingkungan (iradiansi dan temperatur) dapat divariasikan untuk menghasilkan tegangan, arus dan daya keluaran yang dikehendaki. Gambar 10 menunjukkan implementasi model dengan mengambil variasi material PV yakni *monocrystalline silicon* (Si-mono), *polycrystalline silicon* (Si-poly), *Cadmium*

telluride (CdTE), dan *hydrogenated amorphous silicon* (a-Si:H) yang direpresentasikan oleh nilai faktor ideal 1.2, 1.3, 1.5, dan 1.8 secara berturut-turut [11].

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi iradiansi dan temperatur tetap, maka semakin tinggi nilai Faktor Ideal, tegangan-daya keluaran semakin kecil. Selain faktor ideal, variasi konfigurasi seri-paralel dari sel PV dapat juga disimulasikan untuk menghasilkan arus, tegangan dan daya keluaran yang berbeda-beda



Gambar 9 Model Interaktif Modul PV berbasis Matlab/Simulink



Gambar 10 Karakteristik Kurva $I-V$ dan $P-V$ berdasarkan nilai Faktor Ideal pada Iradiansi 1 kW/m^2 dan temperatur 75°C untuk satu modul PV dengan konfigurasi 36 sel.

4. KESIMPULAN

Sel PV sebagai teknologi konversi energi surya telah lama dikembangkan. Untuk mendesain modul PV dengan performa optimal, perlu pemahaman karakteristik kelistrikan dari modul PV. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah melalui pemodelan dan simulasi modul PV. Mengacu pada model matematis dari rangkaian ekivalen modul PV ideal menggunakan dioda tunggal, model Simulink modul PV telah dikembangkan. Validasi menggunakan modul PV Solarex MSX-60 menunjukkan adanya kesesuaian hasil simulasi model dengan data aktual. Arus-tegangan keluaran modul PV sangat dipengaruhi oleh temperatur modul dan iradiansi. Selain itu material semikonduktor yang digunakan juga mempengaruhi performa atau karakteristik kurva $I-V$ dan $P-V$ dari modul PV.

Penelitian ini masih banyak keterbatasan karena adanya penyederhanaan model sehingga untuk hasil yang lebih aktual perlu dipertimbangkan parameter-parameter yang tidak disertakan dalam model ini. Namun demikian, model interaktif yang telah dibuat dapat dikembangkan lebih lanjut untuk digunakan sebagai model desain sederhana panel PV yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban dan kondisi lingkungan (iradiansi dan temperatur) aktual.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. C. Brusso, "A Brief History of the Energy Conversion of Light [History]," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 25, no. 4. 2019. doi: 10.1109/MIAS.2019.2908804.

- [2] L. M. Fraas, "History of Solar Cell Development," in *Low-Cost Solar Electric Power*, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-07530-3_1.
- [3] L. Thomas, C. H. Don, and J. D. Major, "An investigation into the optimal device design for selenium solar cells," *Energy Reports*, vol. 8, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.05.045.
- [4] M. A. Green, "Silicon photovoltaic modules: A brief history of the first 50 years," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 13, no. 5. 2005. doi: 10.1002/pip.612.
- [5] N. Schalager and J. Weisblatt, *Alternative Energy*, vol. 3. Detroit, Mich. : UXL: Gale, 2006.
- [6] NREL, "Best Research-Cell Efficiency Chart." Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [7] M. A. Green *et al.*, "Solar cell efficiency tables (version 62)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 31, no. 7, 2023, doi: 10.1002/pip.3726.
- [8] E. D. Dunlop, D. Halton, and H. A. Ossenbrink, "20 years of life and more: Where is the end of life of a PV module?," in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2005. doi: 10.1109/PVSC.2005.1488449.
- [9] K. N. Waimbo, "Hybrid Renewable Energy Conversion System Modelling and Simulation," Unpublished MSc Thesis, University of South Wales, formerly the University of Glamorgan, Pontypridd, 2013.
- [10] D. Jena and V. V. Ramana, "Modeling of photovoltaic system for uniform and non-uniform irradiance: A critical review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52. 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.07.079.
- [11] H. L. Tsai, "Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink," *Solar Energy*, vol. 84, no. 7, 2010, doi: 10.1016/j.solener.2010.04.012.
- [12] C. Wang, "Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems," PhD Thesis, Montana State University, Montana, 2006.
- [13] A. El Hammoumi, S. Chtita, S. Motahhir, and A. El Ghzizal, "Solar PV energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of PV systems: A focus on solar trackers and floating solar panels," *Energy Reports*, vol. 8. 2022. doi: 10.1016/j.egy.2022.09.054.
- [14] Solarex, "MSX-60 PDF Spec sheet." Maryland, 1997. Accessed: Feb. 01, 2024. [Online]. Available: https://www.solarelectricsupply.com/media/sparsh/product_attachment/custom/upload/Solarex-MSX64.pdf