

## MODEL MATEMATIKA PANEL SURYA SATELIT KOMUNIKASI ORBIT RENDAH EKUATORIAL MENGGUNAKAN SIMULINK

Desti Ika Suryanti<sup>1</sup>, Ahmad Fauzi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)  
Email: dest004@brin.go.id, <sup>2</sup>ahma041@brin.go.id

(Naskah masuk: 18 Maret 2022, diterima untuk diterbitkan: 11 April 2022)

### Abstrak

Sel surya atau *photovoltaic* merupakan sumber energi terbarukan sebagai pembangkit energi listrik yang memiliki kemampuan mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Sel surya yang terdiri dari susunan seri dan paralel membentuk sebuah panel surya. Teknologi panel surya banyak digunakan, salah satunya adalah teknologi antariksa, khususnya teknologi satelit. Sel surya yang digunakan dalam satelit menghasilkan energi yang dibutuhkan untuk operasi satelit. Untuk merancang panel surya pada mikro-satelit memiliki tantangan karena keterbatasan dimensi, namun satelit harus mampu menyelesaikan setiap misi dari operasi satelit. Untuk merancang susunan sel surya berdasarkan daya yang diharapkan dan atau daya yang diproduksi salah satunya dengan menggunakan metode pemodelan matematika. Tujuan riset ini untuk membuat suatu model yang dapat digunakan untuk langkah awal mengetahui karakteristik sel surya serta sebagai alat untuk mendesain persyaratan sel surya yang diperlukan dalam setiap proyek. Sebuah model matematika dari panel surya dikembangkan dan disajikan dalam tulisan ini menggunakan aplikasi GUI Matlab-Simulink. Metode yang digunakan pada model matematika ini menggunakan persamaan rangkaian dasar dari sel surya termasuk didalamnya efek *solar irradiance* dan perubahan suhu. Berdasarkan pemodelan tersebut hasil diperoleh berupa kurva karakteristik keluaran model sesuai dengan karakteristik setiap panel surya satelit komunikasi orbit rendah ekuatorial. Daya yang dihasilkan panel surya akan bertambah ketika *solar irradiance* mengalami peningkatan pada suhu tetap. Ketika suhu menurun dan *solar irradiance* tetap, daya keluaran dan tegangan meningkat sedikit sedangkan arus keluaran mendekati konstan.

**Kata kunci:** *Sel surya, photovoltaic, panel surya, teknologi satelit, model matematika*

## MATHEMATICAL MODELING OF SOLAR PANEL EQUATORIAL LOW ORBIT COMMUNICATION SATELLITE USING SIMULINK

### Abstract

*Solar cells or photovoltaic is a renewable energy source as a generator of electrical energy that has the ability to convert sunlight energy into electrical energy. Solar cells consist of series and parallel arrangement form a solar panel. Solar panel technology is widely used, one of which is space technology, especially satellite technology. Solar cells used in the satellites produce the energy needed for the operation of the satellites. To design solar panels on a micro-satellite has challenges due to dimensional limitations, but the satellite must be able to complete every mission of the satellite operation. To design the arrangement of solar cells based on the expected power and or the power produced, one of them is by using mathematical modeling methods. The purpose of this research is to create a model that can be used for the initial step of knowing the characteristics of solar cells and as a tool to design the requirements of solar cells needed in each project. A mathematical model of solar panels was developed and presented in this paper using the Matlab-Simulink GUI application. The method used in this mathematical model uses the basic circuit equations of solar cells including the effects of solar irradiance and temperature changes. Based on the modeling, the results obtained in the form of a model output characteristic curve according to the characteristics of each solar panel of the equatorial low orbit communication satellite. The power generated by the solar panel will increase when the solar irradiance increases at a constant temperature. When the temperature decreases and the solar irradiance remains constant, the output power and voltage increase slightly while the output current approaches a constant.*

**Keywords:** *Solar cells, photovoltaic, solar panels, satellite technology, mathematical models*

## 1. PENDAHULUAN

Energi surya merupakan sumber energi utama untuk misi luar angkasa. Penelitian yang pernah dilakukan terkait pemodelan panel surya salah satunya adalah penelitian mempelajari, memodelkan, dan mensimulasikan karakteristik listrik sel surya satelit luar angkasa kemudian membuat perbandingan antara efisiensi sel surya untuk menentukan pilihan sel surya terbaik yang akan membawa kinerja yang baik untuk digunakan dalam desain panel surya [1]. Pada penelitian ini pemodelan sel surya digunakan untuk tahap awal mengetahui karakteristik sel surya dan kemudian sebagai alat untuk mendesain panel surya satelit sesuai persyaratan daya yang diperlukan satelit.

Satelit mikro merupakan satelit kecil yang kebanyakan berbentuk kubus serta memiliki berat kurang dari 150 kg. Karena satelit mikro memiliki dimensi yang terbatas, oleh karena itu pemilihan teknologi sel surya memiliki nilai yang sangat penting, mengingat panel surya merupakan satu-satunya sumber energi untuk mensuplai daya ke satelit mikro. Di bawah sinar matahari, panel surya memiliki fungsi seperti generator dan mengubah cahaya (foton) menjadi energi listrik untuk menyediakan energi yang cukup untuk berbagai sub-sistem elektronik *on-board* dari satelit mikro [2][3]. Satelit mikro pada umumnya adalah satelit yang memiliki orbit LEO dengan array surya yang dapat menghasilkan energi listrik maksimum saat kondisi *daylight*, dan energi listrik tersebut digunakan oleh satelit saat kondisi *eclipse*, karena satelit orbit LEO mengalami masa orientasi pergerakan orbit fase kondisi *daylight* dan *eclipse* [4].

Teknologi sel fotovoltaik yang tersedia terdiri dari sel sambungan tunggal (Si) berbasis silikon, sel sambungan ganda GaInP<sub>2</sub>/GaAs (Indium gallium phosphide/ Gallium arsenide) dan sel sambungan rangkap tiga InGaP/GaAs/Ge (Indium gallium phosphide/ Gallium arsenide / germanium). Salah satu terobosan teknologi sel fotovoltaik yang layak untuk disematkan pada satelit mikro yang mengorbit di LEO (*Low Earth Orbit*) adalah triple-junction, karena alasan berikut [5][6]:

- Nilai efisiensi yang lebih tinggi hingga 30% dibandingkan dengan sel surya yang berbasis silikon yang memiliki efisiensi 17% dengan ukuran sel surya yang sama.
- Ketahanan radiasi dan koefisien suhu yang lebih baik sehingga dapat memastikan pengiriman daya yang lebih besar sampai masa EOL (*End of Life*).
- Tegangan keluaran yang lebih tinggi 2,35 V sedangkan sel surya yang berbasis silikon memiliki tegangan keluaran 0,6 V, hal ini mengakibatkan penggunaan sel surya yang lebih sedikit dalam susunan serial sel untuk mencapai tingkat tegangan yang diinginkan.

Model matematika digunakan untuk memprediksi kinerja dari suatu perangkat. Model matematika digunakan untuk merancang susunan sel surya untuk

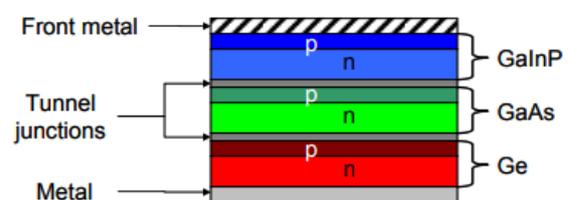
berbagai aplikasi salah satunya aplikasi untuk sistem satelit berdasarkan daya yang diharapkan atau daya yang diproduksi oleh susunan sel surya tersebut. Model matematika juga dapat digunakan untuk memantau kinerja panel surya aktual versus yang diprediksi selama masa pakai sistem fotovoltaik, dan dengan demikian membantu mendiagnosis masalah pada kinerja panel surya. Dalam kegiatan ini, pemodelan dan simulasi panel surya satelit komunikasi orbit rendah ekuatorial menggunakan sel surya *triple-junction* GaInP/GaAs /Ge tipe 3G30A dari AZURSPACE.

Makalah ini disusun sebagai berikut: Pendahuluan dipaparkan pada bagian 1. Sel surya untuk aplikasi ruang angkasa dipaparkan pada bagian 2, kemudian pemodelan panel surya dipaparkan pada bagian 3 dan terakhir beberapa kesimpulan singkat pada bagian 4.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Sel Surya Untuk Aplikasi Ruang Angkasa

Sel surya untuk bidang keantariksaan harus memiliki efisiensi yang tinggi serta mampu bertahan ribuan siklus termal di orbit di mana suhunya bervariasi dari -150 °C hingga lebih dari 120 °C. Agar memiliki efisiensi konversi tertinggi, sel surya untuk bidang keantariksaan dikembangkan dari bahan monokristalin. Sebelumnya sel surya berbasis silikon merupakan sel surya yang paling banyak digunakan dan memiliki efisiensi tidak lebih tinggi dari 14%. Munculnya sel surya berbasis GaAs pada dekade terakhir abad ke-20 memiliki efisiensi mencapai 19%, dan saat ini sel surya *triple junction* menunjukkan efisiensi lebih dari 30% [7]. Teknologi sel surya yang efisien untuk sebuah mikrosatelit adalah sel surya *triple junction*, teknologi ini terdiri dari tiga sub-sel yang dipasang di atas satu sama lain, yaitu GaInP, GaAs, dan Ge, masing-masing sub-sel memiliki bentuk PN junction sendiri dan celah yang berbeda, masing-masing sub-sel dipisahkan oleh *tunnel junction* seperti yang ditunjukkan pada Gambar.1. *Tunnel junction* memungkinkan aliran arus antara lapisan [8].



Gambar 1. Struktur triple junction cell

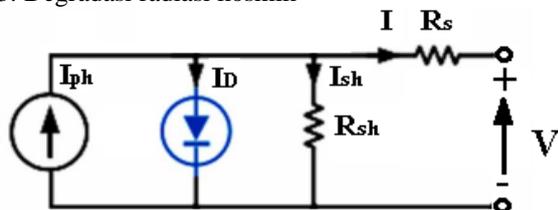
## 3. PEMODELAN PANEL SURYA

### 3.1 Rangkaian Ekuivalen Sel Surya

Rangkaian ekuivalen sel surya ditunjukkan pada Gambar 2. Sumber arus  $I_{ph}$  mewakili arus foto sel.  $R_{sh}$  dan  $R_s$  masing-masing adalah resistansi shunt intrinsik dan seri sel [9][10]. Biasanya nilai  $R_{sh}$  sangat besar dan nilai  $R_s$  sangat kecil, sehingga dapat

diabaikan untuk menyederhanakan analisis [11]. Model matematika sel surya harus memperhitungkan faktor-faktor yang mampu mempengaruhi karakteristik sel surya diantaranya yaitu:

1. Intensitas cahaya datang.
2. Suhu mutlak operasi.
3. Degradasi radiasi kosmik



Gambar 2. Rangkaian ekivalen sel surya

### 3.2 Model Panel Surya

Panel surya terdiri dari beberapa sel surya yang dihubungkan secara seri atau paralel, susunan sel surya secara seri akan meningkatkan tegangan, sedangkan susunan sel surya secara paralel (string) akan meningkatkan arus [12]. Persamaan karakteristik tegangan dengan arus sel surya diberikan sebagai modul *photo-current* ( $I_{ph}$ ) ditunjukkan pada persamaan (1).

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - Tr)] \times Ir/I_{r_0} \dots\dots\dots(1)$$

Di mana  $I_{ph}$  adalah *photo-current* (A);  $I_{sc}$  adalah arus hubung singkat sel surya pada suhu 28 °C dan 1000 W/m<sup>2</sup> = 0.4565 A;  $K_i$  adalah arus hubung singkat sel pada suhu 28 °C dan penyinaran matahari sebesar 1000 W/m<sup>2</sup>;  $T$  adalah suhu operasi (K);  $T_r$  adalah suhu referensi = 298.15 K;  $I_r$  adalah penyinaran matahari (W/m<sup>2</sup>);  $I_{r_0}$  = 1000 W/m<sup>2</sup>. Modul *reverse* arus saturasi  $I_{rs}$  ditunjukkan pada persamaan (2).

$$I_{rs} = I_{sc}/[\exp \exp \left( \frac{qV_{oc}}{N_s k n T} \right) - 1] \dots\dots\dots(2)$$

Dimana  $q$  adalah muatan elektron =  $1.6 \times 10^{-19}$  C;  $V_{oc}$  adalah tegangan rangkaian terbuka sel surya pada suhu 28 °C dan 1000 W/m<sup>2</sup> = 2.69 V;  $N_s$  adalah jumlah sel surya yang dihubungkan secara seri;  $k$  adalah Konstanta Boltzmann, =  $1.3805 \times 10^{-23}$  J/K;  $n$  adalah faktor idealitas dioda. Arus saturasi modul  $I_0$  bervariasi dengan suhu sel, yang ditunjukkan pada persamaan (3).

$$I_0 = I_{rs} \left[ \frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left[ \frac{q \times E_{g0}}{nk} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \dots\dots\dots(3)$$

Dimana,  $T_r$  adalah suhu referensi = 298,15 K;  $E_{g0}$  adalah energi celah pita semikonduktor (eV); Output dari panel surya ditunjukkan pada persamaan (4).

$$I = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_0 \times \left[ \exp \exp \left( \frac{V + I \times R_s}{N_s \times n \times V_t} \right) - 1 \right] - I_{sh} \dots\dots\dots(4)$$

dengan

$$V_t = \frac{k \times T}{q} \dots\dots\dots(5)$$

dan

$$I_{sh} = \frac{V \times \frac{N_p}{N_s} + I \times R_s}{R_{sh}} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana,  $N_p$  adalah jumlah array surya yang terhubung secara paralel;  $R_s$  adalah resistansi seri, biasanya nilai resistor ini sangat kecil = 0.0001Ω;  $R_{sh}$  adalah resistansi shunt, biasanya nilai resistor ini sangat besar= 1000 Ω;  $V_t$  adalah tegangan termal dioda (V).

### 3.3 Hasil dan Diskusi

Sel surya *triple-junction* GaInP/GaAs/Ge AZURSPACE tipe 3G30A dipilih karena memiliki efisiensi BOL (*Beginning of Life*) mencapai 30%. Selain itu sel surya ini dilengkapi dengan dioda perlindungan terintegrasi Schottky. Satelit mikro dengan daya maksimum 250 W diambil sebagai referensi untuk simulasi dan parameter rinci seperti data elektrik dan data gradien suhu ditunjukkan pada Tabel 1 [13].

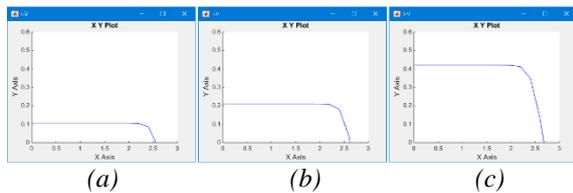
Tabel 1. Data elektrik dan data gradien suhu sel surya

Parameter	Nilai
Average Open Circuit ( $V_{oc}$ )	2690 mV
Average Short Circuit ( $I_{sc}$ )	456.5 mA
Voltage at max. Power ( $V_{mp}$ )	2409 mV
Current at max. Power ( $I_{mp}$ )	441.5 mA
Average Efficiency $\eta_{bare}$ (1367 W/m <sup>2</sup> )	29.3
Open Circuit Voltage ( $\Delta V_{oc}/ \Delta T \uparrow$ )	-6.2 mV/ °C
Short Circuit Current ( $\Delta I_{sc}/ \Delta T \uparrow$ )	0.32 mA/ °C
Voltage at max. Power ( $\Delta V_{mp}/ \Delta T \uparrow$ )	-6.7 mV/ °C
Current at max. Power ( $\Delta I_{mp}/ \Delta T \uparrow$ )	0.21 mA/ °C
Total number of cells in series ( $N_s$ )	16
Total number of cells in parallel ( $N_p$ )	4
Range of operation temperature	-40 °C s/d 80 °C

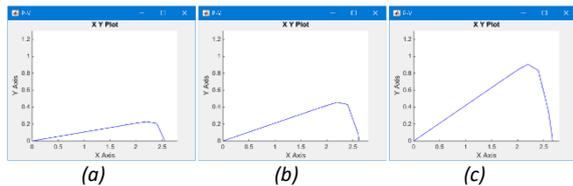
\* Standard: CASOLBA 2005 (05-20MV1, etc); Spectrum: AMO WRC = 1367 W/m<sup>2</sup>; T = 28 °C

Pemodelan matematis panel surya termasuk komponen dasar seperti dioda, sumber arus, resistor seri dan resistor paralel dimodelkan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak Matlab Simulink. Simulasi panel surya didasarkan pada persamaan yang telah dipaparkan pada sub bagian sebelumnya. Hasil pemodelan pada kegiatan ini menggunakan beberapa pemodelan seperti berikut:

1. Pemodelan pertama ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Pemodelan ini memperlihatkan karakteristik kurva I-V dan kurva P-V dari sebuah sel surya dengan memberikan variasi input pada *solar irradiance* ( $250 \text{ W/m}^2$ ,  $500 \text{ W/m}^2$ , dan  $1000 \text{ W/m}^2$ ) dengan suhu  $28^\circ\text{C}$ . Berdasarkan gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa peningkatan nilai *solar irradiance* mengakibatkan perubahan nilai arus dan tegangan yang semakin besar. Perubahan nilai arus dan tegangan yang semakin besar mengakibatkan perubahan daya yang semakin meningkat, begitu pula sebaliknya. Apabila *solar irradiance* mengalami penurunan, maka arus dan tegangan semakin kecil dan mengakibatkan penurunan daya.

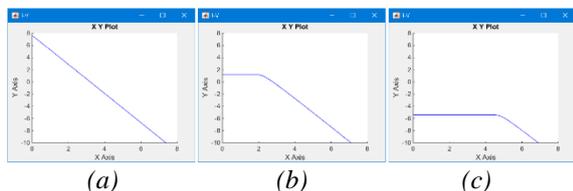


Gambar 3. Kurva I-V dari sebuah sel surya dengan variasi solar irradiance (a)  $250 \text{ W/m}^2$ , (b)  $500 \text{ W/m}^2$ , dan (c)  $1000 \text{ W/m}^2$  dengan suhu  $28^\circ\text{C}$ .



Gambar 4. Kurva P-V dari sebuah sel surya dengan variasi solar irradiance (a)  $250 \text{ W/m}^2$ , (b)  $500 \text{ W/m}^2$ , dan (c)  $1000 \text{ W/m}^2$  dengan suhu  $28^\circ\text{C}$ .

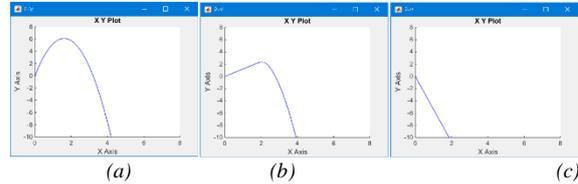
2. Pemodelan kedua ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Pemodelan ini memperlihatkan karakteristik kurva I-V dan kurva P-V dari sebuah sel surya dengan memberikan variasi input pada suhu ( $-25^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ , dan  $50^\circ\text{C}$ ) dengan *solar irradiance*  $1000 \text{ W/m}^2$ . Berdasarkan gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa ketika terjadi penurunan suhu, tegangan keluaran mengalami peningkatan yang mengakibatkan peningkatan daya.



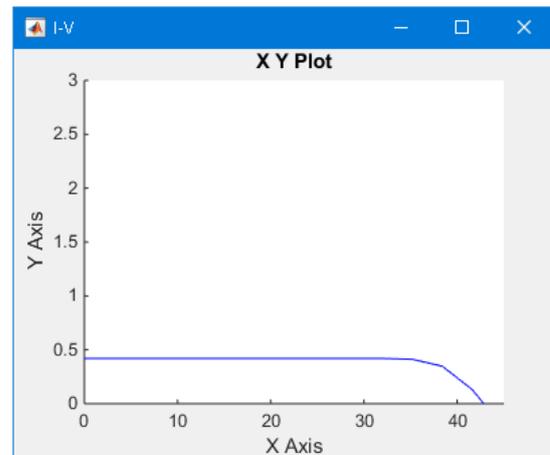
Gambar 5. Kurva I-V dari sebuah sel surya dengan variasi suhu (a)  $-25^\circ\text{C}$ , (b)  $25^\circ\text{C}$ , dan (c)  $50^\circ\text{C}$  dengan solar irradiance  $1000 \text{ W/m}^2$ .

3. Pemodelan ketiga ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Pemodelan ini memperlihatkan karakteristik kurva I-V dan kurva P-V dengan menggunakan variasi jumlah  $N_s$ . Jumlah  $N_s$  yang digunakan pada pemodelan ini adalah  $16s1p$

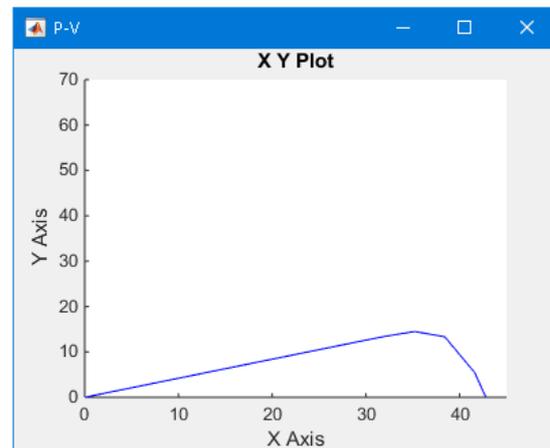
artinya array surya terdiri dari 1 string dan 1 string terdiri dari 16 sel surya yang disusun seri. Berdasarkan gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai keluaran tegangan merupakan 16 kali dari tegangan keluaran 1 buah sel surya, sedangkan nilai arus keluaran adalah tetap.



Gambar 6: Kurva P-V dari sebuah sel surya dengan variasi suhu (a)  $-25^\circ\text{C}$ , (b)  $25^\circ\text{C}$ , dan (c)  $50^\circ\text{C}$  dengan solar irradiance  $1000 \text{ W/m}^2$ .



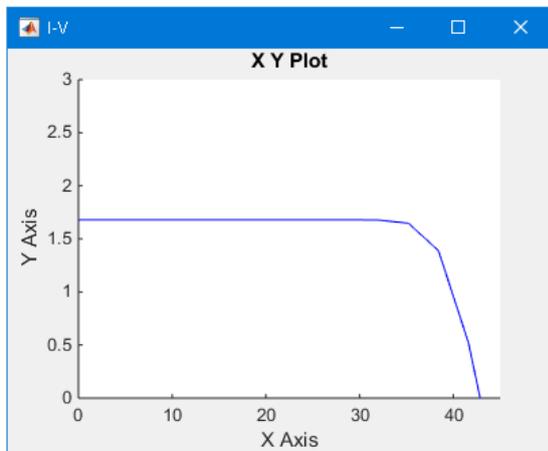
Gambar 7: Kurva I-V arraysurya dengan susunan  $16s1p$  pada suhu  $28^\circ$  dengan solar irradiance  $1000 \text{ W/m}^2$ .



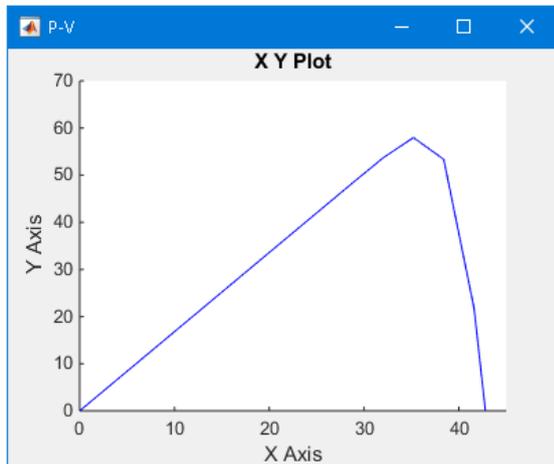
Gambar 8: Kurva P-V arraysurya dengan susunan  $16s1p$  pada suhu  $28^\circ$  dengan solar irradiance  $1000 \text{ W/m}^2$ .

4. Pemodelan keempat ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10. Pemodelan ini memperlihatkan karakteristik kurva I-V dan kurva P-V dengan menggunakan variasi jumlah  $N_s$  dan jumlah  $N_p$ . Jumlah  $N_s$  dan jumlah  $N_p$  yang digunakan pada pemodelan ini adalah  $16s4p$  artinya panel surya terdiri dari 4 string dan masing-masing string terdiri dari 16 sel surya yang disusun seri. Berdasarkan gambar tersebut dapat disimpulkan

bahwa nilai tegangan keluaran merupakan 16 kali dari nilai tegangan keluaran 1 buah sel surya, sedangkan nilai arus keluaran merupakan 4 kali dari nilai arus keluaran 1 buah sel surya.



Gambar 9: Kurva I-V arraysurya dengan susunan 16s4p pada suhu 28° dengan solar irradiance 1000 W/m<sup>2</sup>.



Gambar 10: Kurva P-V arraysurya dengan susunan 16s4p pada suhu 28° dengan solar irradiance 1000 W/m<sup>2</sup>.

Model yang diusulkan memiliki keunggulan tidak hanya dalam mempelajari pengaruh susunan sel surya tetapi juga dalam melakukan penelitian terkait kondisi lingkungan seperti penyinaran matahari dan suhu yang bervariasi.

#### 4. KESIMPULAN

Pemodelan ini digunakan sebagai alat bantu untuk memprediksi perilaku sel surya, array surya, dan panel surya dalam berbagai kondisi lingkungan (*solar irradiance* dan suhu) dan parameter fisik lainnya seperti resistensi seri, hambatan shunt, faktor idealitas dan sebagainya. Hasil dari pemodelan ini juga memuat informasi terkait kurva operasi I-V dan P-V agar mudah dipahami, sesuai dengan kebutuhan desain yang dibuat

#### DAFTAR PUSTAKA

[1] A. H. Dida and M. Bekhti, "Study, modeling

and simulation of the electrical characteristic of space satellite solar cells," *2017 6th Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 983–987, 2017, doi: 10.1109/ICRERA.2017.8191205.

- [2] C. Nieto-peroy, "applied sciences CubeSat Mission : From Design to Operation," pp. 1–24, 2019.
- [3] S. Hegedus, *Photovoltaic Science*. 2003.
- [4] H. Park and H. Cha, "Electrical design of a solar array for LEO satellites," *Int. J. Aeronaut. Sp. Sci.*, vol. 17, no. 3, pp. 401–408, 2016, doi: 10.5139/IJASS.2016.17.3.401.
- [5] N. S. Fatemi, H. E. Pollard, H. Q. Hou, and P. R. Sharps, "Solar array trades between very high-efficiency multi-junction and Si space solar cells," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, vol. 2000-Janua, pp. 1083–1086, 2000, doi: 10.1109/PVSC.2000.916075.
- [6] M. Raja Reddy, "Space solar cells-tradeoff analysis," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 77, no. 2, pp. 175–208, 2003, doi: 10.1016/S0927-0248(02)00320-3.
- [7] K. Nishioka, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, and T. Fuyuki, "Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar cell's structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator photovoltaic systems," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 9, pp. 1308–1321, 2006, doi: 10.1016/j.solmat.2005.08.003.
- [8] S. Chtita, Y. Chaibi, A. Derouich, and J. Belkadid, "Modeling and Simulation of a Photovoltaic Panel Based on a Triple Junction Cells for a Nanosatellite," *Int. Symp. Adv. Electr. Commun. Technol. ISAECT 2018 - Proc.*, no. 1, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/ISAECT.2018.8618840.
- [9] P. Ri *et al.*, "0\$7/\$% 6lpxolqn prgholqj ri 3krwryrowdlf &hoov iru xqghuvwdqglqj vkdgrz hiihfw," vol. 5, pp. 3–6, 2016.
- [10] E. M. G. Rodrigues, R. Godina, M. Marzband, and E. Pouresmaeil, "Simulation and comparison of mathematical models of PV cells with growing levels of complexity," *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018, doi: 10.3390/en11112902.
- [11] N. Pandiarajan and R. Muthu, "Mathematical modeling of photovoltaic module with Simulink Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink," *Electr. Energy Syst. (ICEES), 2011 1st Int. Conf.*, no. October, pp. 3–5, 2015.
- [12] D. L. King, W. E. Boyson, and J. A. Kratochvil, "Photovoltaic array performance model," *Sandia Rep. No. 2004-3535*, vol. 8, no. November, pp. 1–19, 2004, doi: 10.2172/919131.
- [13] Azur Space Solar Power GmbH, "30% Triple Junction GaAs Solar Cell Assembly, Type: TJ

Solar Cell Assembly 3G30A,” 2019, [Online].  
Available:  
[http://www.azurspace.com/images/006050-01-00\\_DB\\_3G30C-Advanced.pdf](http://www.azurspace.com/images/006050-01-00_DB_3G30C-Advanced.pdf)