

Estimasi Daya Keluaran Fotovoltaik Menggunakan Algoritma Genetik

¹⁾ Sri Intan Bago

Universitas Prima Indonesia, Jl. Sampul No.3, Kec. Medan Petisah, Sumatera Utara, Indonesia 201118
E-Mail: intanbago09@gmail.com

²⁾ Muhammad Irwanto

Universitas Prima Indonesia, Jl. Sampul No.3, Kec. Medan Petisah, Sumatera Utara, Indonesia 201118
E-Mail: muhammadirwanto@unprimdn.ac.id

ABSTRACT

The development of renewable energy systems is a major focus in efforts to reduce environmental impacts and dependence on fossil energy sources. One promising renewable energy source is solar energy, which can be utilized through photovoltaic technology. However, to increase the efficiency of the photovoltaic system, an accurate estimate of the output power produced is required. This study aims to develop a photovoltaic output power estimation model using MATLAB-based Genetic Algorithm (GA). Genetic Algorithm was chosen because of its ability to find optimal solutions to a problem using the principles of natural selection. In this study, parameters that affect the performance of the photovoltaic system, such as sunlight intensity, cell temperature, and panel tilt angle, will be analyzed and modeled. The results of this photovoltaic output power estimation model are expected to provide more accurate predictions, so that they can be used for decision making in the planning and development of solar energy systems. Through simulation and data analysis, this study is expected to make a significant contribution to the development of photovoltaic technology in Indonesia and increase the efficiency of its use.

Keyword : Photovoltaik, Output power, Genetic Algorithm, MATLAB, Renewable Energy

PENDAHULUAN

Sistem energi terbarukan, terutama fotovoltaik (PV), menjadi salah satu solusi utama dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Algoritma genetik (AG) adalah metode optimasi yang terinspirasi dari proses evolusi biologis. Dalam sistem PV, salah satu tantangan utama adalah memaksimalkan daya keluaran dibawah kondisi lingkungan yang bervariasi, seperti intensitas cahaya matahari dan suhu. estimasi daya keluaran yang optimal sangat penting untuk perencanaan dan pengelolaan sistem PV yang efisien.

Algoritma ini mampu menemukan solusi optimal dari masalah kompleks, termasuk masalah non-linear yang melibatkan berbagai parameter. dalam konteks estimasi daya keluaran PV algoritma genetika digunakan untuk menemukan model atau fungsi terbaik yang mampu merepresentasikan hubungan antara variabel lingkungan dan daya keluaran yang dihasilkan. Oleh karena itu penelitian ini menggunakan AG untuk mengestimasi daya keluaran optimal dari sistem PV berdasarkan variabel lingkungan. Metode ini terbukti efektif dalam menyelesaikan permasalahan non-linier dan kompleks yang melibatkan banyak variabel, seperti halnya dalam sistem PV yang sangat dipengaruhi oleh parameter lingkungan yang dinamis.

Dengan melakukan pencarian solusi optimal secara iteratif, AG dapat menghasilkan estimasi

yang lebih akurat dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Penerapan AG dalam studi ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi operasional sistem PV sekaligus mendukung pengembangan teknologi energi terbarukan yang lebih cerdas dan berkelanjutan. Penelitian ini secara khusus difokuskan pada penerapan algoritma genetika untuk mengestimasi daya keluaran fotovoltaik berdasarkan parameter lingkungan utama. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan model estimasi yang lebih presisi dan dapat diintegrasikan ke dalam sistem pemantauan maupun pengendalian energi berbasis data.

METODE PENELITIAN

2.1. Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sebuah model estimasi daya keluaran fotovoltaik (PV) dengan menggunakan algoritma genetika. Algoritma genetika merupakan salah satu teknik optimasi yang meniru proses evolusi biologis untuk menemukan solusi optimal atau mendekati optimal. Dalam konteks penelitian ini, algoritma genetika akan diterapkan untuk memprediksi daya keluaran dari panel fotovoltaik berdasarkan parameter-parameter tertentu seperti intensitas cahaya matahari, suhu, dan karakteristik panel. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang mengedepankan pengolahan data dan pengujian model secara matematis. Data yang

digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari parameter PV dan dengan pemberian intensitas cahaya matahari, suhu di dalam simulasi yang dilakukan.

2.2. Data Modul Fotovoltaik

Modul PV silikon monokristal sharp (NUS0E3E) berdaya 180 w, 30 V digunakan dalam makalah ini. Modul PV ini terdiri dari 48 sel surya yang dikonfigurasi dalam rangkaian seri. Lembar data lengkap pada modul PV ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter Listrik Modul PV Silikon Mono-Kristal
(STC: AM 1,5G, +25°C, 1000 W/m²)

Parameter Listrik	Nilai
Titik daya maksimum (P_{MPP})	180 W
Arus modul pada titik daya maksimum dan kondisi STC (I_{MPP})	7.60 A
Arus hubung singkat pada kondisi pengujian (I_{sc})	8.37 A
Suhu Nominal menurut STC (T_N)	25°C
Koefisien suhu arus hubung singkat (TC_i)	+0,53%/K
Koefisien suhu tegangan rangkaian terbuka (TC_v)	-0,104V/K
Tegangan terbuka pada 25°C dan iradiasi matahari rendah (V_{min})	27 tahun
Tegangan terbuka pada 25°C dan iradiasi matahari rendah (V_{max})	30 V
Tegangan terbuka modul bongkar (V_{oc})	30 V
Irradiansi Matahari rendah (a_{min})	200W/m ²
Irradiansi matahari tinggi (a_{max})	1000W/m ²

2.3. Model Matematika Modul Fotovoltaik

Yang paling populer adalah kasus khusus dari rangkaian sel surya seri. Dalam aplikasi terestrial, modul standar PV tersusun dari sejumlah sel surya yang dihubungkan secara seri. Jumlahnya biasanya 33 hingga 36 tetapi asosiasi yang berbeda juga tersedia. Pemodelan matematika arus rangkai dan tegangan rangkaian terbuka dari karakteristik listrik modul PV mengikuti apa yang diusulkan oleh, menggunakan GA arus rangkaian yang diatur waktunya berdasarkan tentang tegangan rangkaian terbuka untuk menghasilkan daya dan daya maksimum modul PV. Untuk menggunakan model ini diperlukan mengetahui tegangan modul terbuka V_{min} dan V_{max} didua titik operasi dengan daya surya yang tingkat iradiasi a_{min} berbeda (misalnya 200W/m²) dan a_{max} (1000w/m²). Pada suhu nominal yang sama T_N (25°C) selain itu keempat parameter ini model memerlukan lima parameter tambahan dari lembar data modul PV yang merupakan singkatan arus sirkuit I_{sc} tegangan V_{MPP} dan arus I_{MPP} didalam titik daya maksimum semua pada STC serta koefisien temperatur arus hubung singkat TC_i dan tegangan terbuka TC_v . Parameter "b" adalah parameter kecocokan model PV ini mempengaruhi Kurva I-V pada titik daya maksimum. Arus rangkai $I(a, T, V)$ dan tegangan rangkaian terbuka $V_{oc}(a, T)$

sebagai fungsi tugas dari iradiasi matahari, temperatur dan tegangan diberikan oleh :

$$I(a, T, V) = \frac{a}{1000 \frac{W}{m^2}} \cdot I_{sc} \cdot T_i(T).$$

$$1 - e^{\left[\frac{b \cdot \left(1 + \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max}} \cdot \frac{a - a_{max}}{a_{max} - a_{min}} \right) (V_{max} + \tau_v(T)) - \frac{1}{b}}{1 - e^{\frac{1}{b}}} \right]}$$

Ketika $I(a, T, V) = 0$ A, Tegangan rangkaian terbuka diberikan oleh

$$V_{oc}(a, T) = \left[1 + \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max}} \cdot \frac{a - a_{max}}{a_{max} - a_{min}} \right] \cdot [V_{max} + \tau_v(T)]$$

$$T_i(T) = 1 + \frac{TC_i}{100\%} \cdot (T - T_N)$$

$$\tau_v(T) = TC_v \cdot (T - T_N)$$

2.4. Algoritma Genetik Untuk Estimasi Daya Keluaran Fotovoltaik

Algoritma genetika diterapkan untuk mengoptimalkan fungsi estimasi daya keluaran PV. Beberapa parameter penting dari algoritma genetika yang perlu ditentukan adalah:

- Populasi awal
- Operator seleksi
- Crossover dan mutasi

Algoritma akan diterasi hingga mencapai konvergensi, yaitu ketika solusi yang optimal atau mendekati optimal telah ditemukan. Pada tahap ini, algoritma genetika diimplementasikan dalam bahasa pemrograman seperti Python atau MATLAB.

2.4.1. Pelatihan dan Pengujian Model

Model yang dikembangkan akan dilatih menggunakan data pelatihan dan diuji menggunakan data uji untuk mengevaluasi performanya [8]. Kriteria performa model diukur menggunakan persentase kesalahan, e. Hasil simulasi ini dibandingkan dengan data sheet yang ada, seperti ditunjukkan oleh persamaan.

$$e = \left(\frac{P_{sim} - P_{ds}}{P_{ds}} \right) \times 100\%$$

dimana :

P_{sim} = Daya keluaran fotovoltaik hasil simulasi

P_{ds} = Daya keluaran fotovoltaik dari data sheet

δ = presentase kesalahan

2.4.2. Evaluasi dan Analisis Hasil

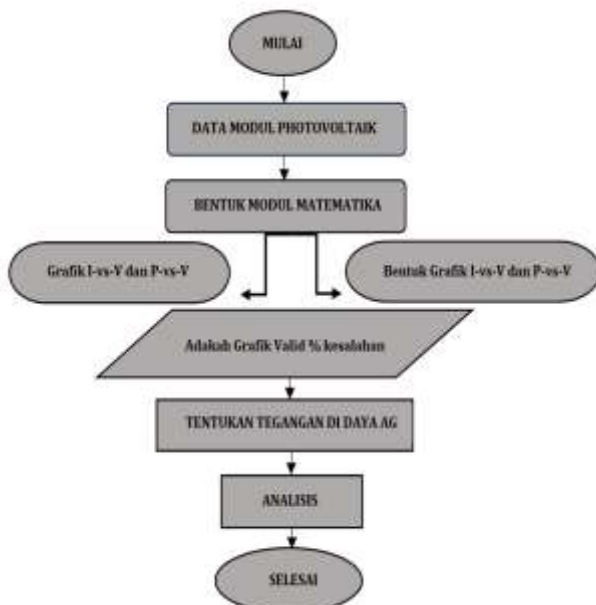
Hasil dari estimasi daya keluaran panel fotovoltaik dengan menggunakan algoritma genetika akan dibandingkan dengan nilai daya aktual yang diperoleh dari pengukuran [9]. Evaluasi dilakukan untuk melihat keakuratan model dalam memprediksi daya keluaran serta efektivitas algoritma genetika dalam menangani permasalahan optimasi ini. Hasil dari evaluasi tersebut dianalisis untuk mengetahui sejauh mana algoritma genetika mampu meningkatkan performa

estimasi daya. Analisis ini juga akan membahas faktor-faktor yang mempengaruhi performa model, seperti pemilihan parameter algoritma genetika dan karakteristik data input.

2.5 Diagram Alir Penelitian

Diagram Alir penelitian ini menunjukkan langkah-langkah analisis modul fotovoltaik, dimulai dari pengumpulan data arus, tegangan, dan daya; dilanjutkan dengan membentuk model matematika modul; membuat grafik arus-tegangan (I-V) dan daya-tegangan (P-V); mengevaluasi grafik dengan menghitung persentase kesalahan untuk memastikan kesesuaiannya dengan data asli; menentukan tegangan saat daya maksimum (titik kerja optimal); melakukan analisis performa berdasarkan hasil tersebut; dan diakhiri dengan kesimpulan dari proses analisis.

Gambar 1 Diagram Alir Penelitian



HASIL DAN PEMBAHASAN

2.1 Hasil Penelitian

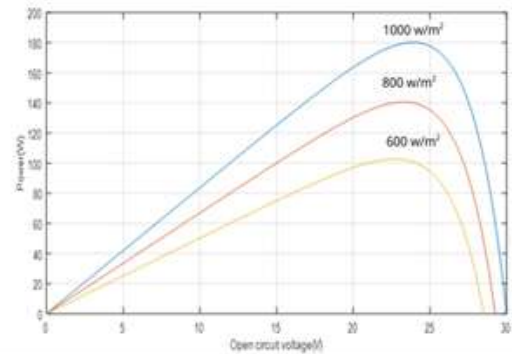
Bab ini akan memaparkan hasil penelitian yang dilakukan untuk mengestimasi daya keluaran fotovoltaik (PV) menggunakan algoritma genetika yang diimplementasikan dalam MATLAB. Hasil yang akan dibahas mencakup validasi model matematika dengan menggunakan algoritma genetika, pengaruh sinaran matahari pada daya keluaran fotovoltaik dan pengaruh sinaran matahari dan temperature terhadap daya keluaran fotovoltaik yang dibentuk dalam grafik 3 dimensi.

3.2 Pembahasan

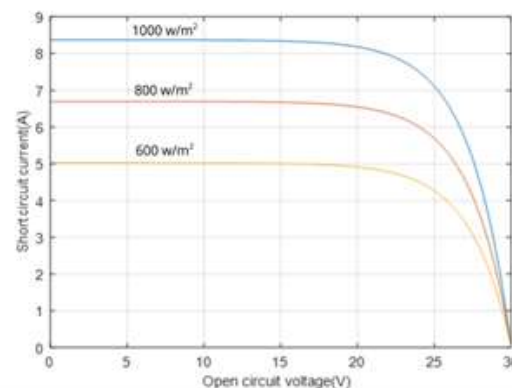
3.2.1 Validasi Model Matematika Dengan Menggunakan Algoritma Genetik

Untuk memvalidasi pemodelan matematika karakteristik modul PV menggunakan GA, lembar data modul seperti yang ditunjukkan pada tabel disimulasikan untuk radiasi matahari 600 W/m², 800 W/m², 1000 W/m², dan suhu konstan 25°C.

Hasil simulasi dari kurva arus-tegangan dan daya-tegangan dibandingkan dengan kurva arus-tegangan dan daya tegangan dibandingkan dengan dengan lembar data. Kurva-kurva tersebut ditunjukkan pada gambar 1 dan 2.



Gambar 2 Kurva Arus-Tegangan Modul PV dari Simulasi



Gambar 3. Kurva Daya-Tegangan Modul PV dari Simulasi

3.2.2 Pengaruh sinaran Matahari Pada Daya Keluaran Fotovoltaik

Secara keseluruhan, pengaruh sinar matahari terhadap daya keluaran system fotovoltaik bersifat kompleks dan multifaktorial. Intensitas iradiasi matahari memiliki korelasi positif yang signifikan terhadap daya keluaran, semakin tinggi intensitas cahaya yang diterima sel surya, semakin besar jumlah elektron yang dihasilkan dan, akibatnya, semakin tinggi arus dan daya yang dihasilkan. Namun, hubungan ini tidak selalu linier sempurna, karena faktor-faktor lain seperti suhu dan spektrum cahaya juga ikut berperan. Spektrum cahaya matahari yang ideal bagi sel surya akan memaksimalkan penyerapan foton dan konversi energi. Namun, kondisi atmosfer seperti awan, polusi, dan debu dapat mengubah spektrum cahaya dan mengurangi daya keluaran. Selain itu, suhu operasi yang tinggi dapat menurunkan efisiensi sel surya, sehingga mengurangi daya keluaran meskipun intensitas cahaya cukup tinggi. Oleh karena itu, untuk mencapai efisiensi optimal, desain dan instalasi sistem fotovoltaik harus mempertimbangkan faktor-faktor ini, termasuk orientasi panel, kemiringan, dan sistem pendinginan untuk meminimalkan efek negatif suhu tinggi. Pemodelan dan simulasi yang akurat juga penting untuk memprediksi dan

memaksimalkan daya keluaran sistem berdasarkan kondisi lingkungan setempat. Dengan memahami interaksi kompleks antara intensitas cahaya, spektrum, suhu, dan desain sistem, kita dapat meningkatkan pemanfaatan energi surya dan mencapai efisiensi yang lebih tinggi.

3.2.3 Pengaruh Perubahan Sinaran Matahari dan Temperatur Terhadap Daya Keluaran

Fotovoltaik yang dibentuk dalam grafik 3 dimensi analisis grafik tiga dimensi yang memetakan hubungan antara iradiasi matahari, temperatur sel surya, dan daya keluaran sistem fotovoltaik memberikan pemahaman yang jauh lebih akurat dan komprehensif dibandingkan dengan analisis dua dimensi. Grafik ini tidak hanya mengilustrasikan korelasi positif umum antara iradiasi dan daya keluaran, tetapi juga mengungkapkan kompleksitas interaksi non-linier antara kedua variabel tersebut, serta pengaruh signifikan temperatur.

1. Kehilangan energi: Pada tingkat iradiasi tinggi, sebagian energi cahaya dapat hilang karena refleksi, penyerapan, dan rekombinasi elektron-lubang.

Hubungan antara iradiasi dan daya keluaran bukanlah hubungan linier sederhana. Pada tingkat iradiasi rendah hingga menengah, peningkatan iradiasi menghasilkan peningkatan daya keluaran yang signifikan dan hampir proporsional. Ini karena semakin banyak foton yang mengenai sel surya, semakin banyak elektron yang dihasilkan, dan semakin besar arus listrik yang dihasilkan. Namun, seiring dengan peningkatan iradiasi menuju tingkat yang sangat tinggi, laju peningkatan daya keluaran melambat dan akhirnya mencapai titik jenuh. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk:

- Keterbatasan internal sel surya: Sel surya memiliki kapasitas maksimum dalam mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik. Pada tingkat iradiasi yang sangat tinggi, sel surya mencapai batas kemampuannya, dan peningkatan iradiasi selanjutnya hanya sedikit meningkatkan daya keluaran.
- Efek pemanasan: Iradiasi yang tinggi menyebabkan peningkatan temperatur sel surya. Peningkatan temperatur ini, sebagaimana dijelaskan di bawah, memiliki efek negatif terhadap efisiensi konversi energi.

2. Dan ini sangat penting, grafik dengan jelas menunjukkan pengaruh negatif temperatur sel surya terhadap daya keluaran. Pada setiap tingkat iradiasi, peningkatan temperatur menyebabkan penurunan daya keluaran yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh beberapa mekanisme fisik:

- Penurunan tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}): Peningkatan temperatur mengurangi tegangan sirkuit terbuka sel surya, yang

merupakan faktor penting dalam menentukan daya keluaran.

- Penurunan arus hubung singkat (I_{sc}): Meskipun peningkatan temperatur dapat sedikit meningkatkan arus hubung singkat pada beberapa jenis sel surya, efek penurunan V_{oc} biasanya lebih dominan, sehingga mengakibatkan penurunan daya keluaran secara keseluruhan.
- Peningkatan resistansi internal: Temperatur yang lebih tinggi meningkatkan resistansi internal sel surya, yang menyebabkan kehilangan energi lebih besar selama konversi energi.

Oleh karena itu, grafik tiga dimensi ini memberikan representasi yang jauh lebih akurat dari pada analisis dua dimensi karena secara eksplisit menggabungkan pengaruh simultan dari iradiasi dan temperatur. Poin daya keluaran maksimum terletak pada kombinasi iradiasi tinggi dan temperatur rendah. Penyimpangan dari kondisi optimal ini, baik karena iradiasi rendah maupun temperatur tinggi, akan menyebabkan penurunan daya keluaran yang signifikan. Pemahaman yang mendalam tentang interaksi kompleks ini sangat penting untuk optimasi desain, pemilihan lokasi, dan strategi manajemen termal sistem fotovoltaik, untuk memaksimalkan efisiensi energi dan pengembalian investasi. Model tiga dimensi ini memungkinkan prediksi daya keluaran yang jauh lebih akurat dan informatif dibandingkan dengan model yang hanya mempertimbangkan satu variabel saja.

3.2.4 Uraian Data Simulasi Pengaruh Iradiasi Matahari Terhadap Karakteristik Modul PV

Simulasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi intensitas Iradiasi matahari (200-1000 W/m^2) terhadap Arus hubung singkat (I_{sc}), Daya maksimum, dan Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) pada modul PV, dengan mempertimbangkan variasi suhu dari 25°C hingga 65°C. Berikut tabel dan penjelasan berdasarkan data :

1. Arus Hubung Singkat (I_{sc})

Tabel 2 Arus hubung singkat (I_{sc})

Temp (Deg.C) Sol (W/m^2)	25	35	45	55	65
200	1.67	1.74	1.80	1.87	1.94
400	3.34	3.48	3.61	3.75	3.88
600	5.02	5.22	5.42	5.62	5.83
800	6.69	6.96	7.23	7.50	7.77
1000	8.37	8.70	9.04	9.38	9.71

Table diatas menunjukan bahwa nilai arus meningkat secara linier terhadap peningkatan intensitas iradiasi.

- Pada suhu 25°C :
 - Iradiasi 200 $W/m^2 \rightarrow I_{sc} = 1.67$ A

- Iradiasi 1000 W/m² → I_{sc} = 8.37 A
- Pada suhu 65°C :
 - Iradiasi 200 W/m² → I_{sc} = 1.94 A
 - Iradiasi 1000 W/m² → I_{sc} = 9.71 A

Hal ini menunjukkan bahwa iradiasi sangat memengaruhi jumlah arus yang dihasilkan oleh modul PV. Selain itu, semakin tinggi suhu, arus juga sedikit meningkat walaupun tidak sekuat pengaruh iradiasi.

2. Daya Maksimum

Pada table dibawah Daya listrik yang dihasilkan juga menunjukkan kenaikan signifikan terhadap peningkatan iradiasi.

- Pada suhu 25°C :

- 200 W/m² → 32.4361 W
- 1000 W/m² → 180.2007 W
- Pada suhu 65°C :
 - 200 W/m² → 32.4397 W
 - 1000 W/m² → 180.2207 W

Hal ini menunjukan bahwa iradiasi sangat memengaruhi jumlah arus yang dihasilkan oleh modul PV. Selain itu, meskipun terjadi peningkatan suhu, daya tetap menunjukkan peningkatan seiring dengan iradiasi, walaupun pengaruh suhu terhadap daya tidak sebesar pengaruh iradiasi. Dapat disimpulkan bahwa iradiasi merupakan faktor utama dalam menentukan besar kecilnya daya listrik yang dihasilkan oleh modul PV.

Tabel 3. Daya Maksimum

TEmp (Deg. C) Sol (W/m ²)	25	35	45	55	65
200	27	27	27	27	27
400	27.75	27.75	27.75	27.75	27.75
600	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5
800	29.25	29.25	29.25	29.25	29.25
1000	30	30	30	30	30

3. Daya Tegangan Terbuka (V_{oc})

Tabel 4. Daya Tegangan Terbuka (V_{oc})

Temp. (Deg. C) Sol (W/m ²)	25	35	45	55	65
200	32.4361	32.5729	32.6191	32.5747	32.4397
400	66.6743	66.9554	67.0503	66.9591	66.6816
600	102.7144	103.1475	103.2938	103.1529	102.7254
800	140.5565	141.1493	141.3494	141.1571	140.572
1000	180.2007	180.9606	181.2172	180.9706	180.2207

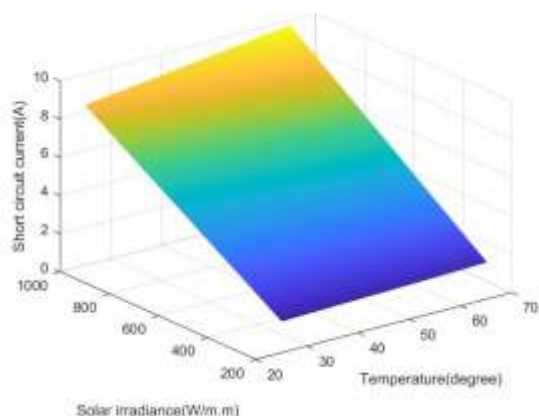
Tabel diatas menunjukan bahwa Nilai tegangan meningkat seiring dengan peningkatan intensitas radiasi, namun tidak dipengaruhi oleh perubahan suhu.

- Pada suhu 25°C:
 - Iradiasi 200 W/m² → V_{oc} = 27 V
 - Iradiasi 1000 W/m² → V_{oc} = 30 V
- Pada suhu 65°C :
 - Iradiasi 200 W/m² → V_{oc} = 27 V
 - Iradiasi 1000 W/m² → V_{oc} = 30 V

Hal ini menunjukkan bahwa iradiasi sangat berpengaruh terhadap tegangan yang dihasilkan oleh modul PV. tegangan meningkat secara linier dengan intensitas iradiasi. Sementara itu, kenaikan suhu tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai tegangan V_{oc} , yang tetap stabil pada setiap tingkat iradiasi.

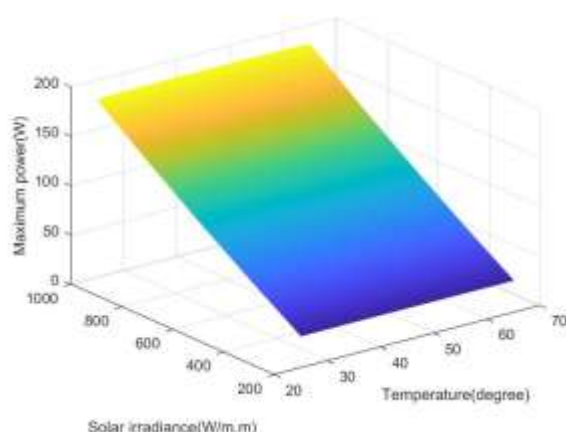
3.2.5 Diagram 3 Dimensi Kinerja Panel Surya Terhadap Iradiasi Dan Suhu

Gambar diagram 3.3 menunjukan bahwa arus hubung singkat (I_{sc}) meningkat seiring peningkatan iradiasi matahari, sedangkan tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) menurun saat suhu naik. Ini mencerminkan karakteristik sel surya, di mana arus sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya, sementara tegangan menurun akibat efek suhu yang mempercepat kehilangan energi.



Gambar 4 Diagram 3D Arus Hubung Singkat dan Tegangan Rangkaian Terbuka

Gambar diagram 3.4 menunjukkan bahwa daya maksimum panel surya meningkat seiring naiknya iradiasi matahari, namun menurun saat suhu meningkat. Hal ini menggambarkan karakteristik bahwa panel surya bekerja paling efisien pada intensitas cahaya tinggi dan suhu rendah.



Gambar 5 Diagram 3D Daya Maksimum

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai estimasi daya keluaran fotovoltaik dengan menggunakan algoritma genetik, dapat disimpulkan bahwa algoritma ini mampu memberikan prediksi daya yang lebih akurat dibandingkan metode estimasi konvensional. Proses optimasi yang dilakukan oleh algoritma genetik memungkinkan pencarian solusi terbaik dari berbagai kombinasi parameter, seperti intensitas radiasi matahari, secara signifikan mempengaruhi daya keluaran fotovoltaik.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa algoritma genetik memiliki keunggulan dalam menyesuaikan diri terhadap perubahan kondisi lingkungan, sehingga estimasi daya yang dihasilkan tetap stabil dan andal. Selain itu, algoritma ini terbukti efisien dalam proses komputasi, dengan waktu konvergensi yang relatif cepat tanpa mengorbankan akurasi. Dengan demikian, penggunaan algoritma genetik dalam sistem estimasi daya fotovoltaik memberikan

kontribusi positif dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas sistem pembangkit tenaga surya. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa algoritma genetik adalah salah satu pendekatan yang layak dan potensial untuk diterapkan dalam sistem energi terbarukan, khususnya pada teknologi fotovoltaik, dalam rangka mengoptimalkan daya keluaran dan mendukung pengelolaan energi yang lebih berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Y. G. Hegazy, S. M. Tag Eldin, dan E. F. El-Saadany, "Optimasi kinerja sistem PV menggunakan algoritma genetik," *Energy Reports*, vol. 2, hlm. 221–228, 2019.
2. M. Z. Saharudin, A. B. M. Sharif, dan M. A. M. Radzi, "Pengaruh kondisi lingkungan terhadap kinerja sistem fotovoltaik: Tinjauan," *Jurnal Kejuruteraan Elektrik dan Tenaga*, vol. 10, no. 2, hlm. 22–29, 2020.
3. Sutanto, D., & Pramono, S. H. (2018). Optimasi Keluaran Energi Panel Surya Menggunakan Metode Algoritma Genetika. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 7(2), 102–108.
4. Guzman Razo, D. E., Müller, B., Madsen, H., & Wittwer, C. (2020). Pendekatan Algoritma Genetika sebagai Alat Pembelajaran Mandiri dan Optimasi untuk Simulasi Daya PV dan Pembuatan Kembar Digital. *Energies*, 13(24), 6712.
5. Alayi, R., Harasii, H., & Pourderogar, H. (2021). Pemodelan dan Optimasi Sel Fotovoltaik dengan Algoritma Genetika. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(4), 181–186.
6. Irwanto, M., Badlishah, R., Masri, M., Irwan, Y. M., & Gomes, N. (2014). Optimasi karakteristik listrik modul fotovoltaik menggunakan algoritma (hlm. 532–536). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2014.6814486>
7. Riandra, J. (2020). Analisis dan implementasi algoritma genetik untuk estimasi daya keluaran PLTH fotovoltaik dan diesel.
8. Waimbo, K. (2024). Pemodelan Modul Fotovoltaik Sederhana Menggunakan MATLAB/Simulink. *Jurnal Fisika Papua*, 3(1), 1–7.
9. Alayi, R., Harasii, H., & Pourderogar, H. (2021). Pemodelan dan optimasi sel fotovoltaik dengan algoritma genetik. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(4), 181–186.
10. Gunasekaran, V., Kovi, K. K., Arja, S., & Chimata, R. (2021). Peramalan radiasi matahari menggunakan algoritma genetik. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2106.13956>

11. A. H. Alami, A. H. Salim, dan M. J. Khan, "Pengaruh temperatur dan iradiasi terhadap kinerja modul fotovoltaik," *Energy Reports*, vol. 7, hlm. 3856–3864, 2021. Tersedia secara daring: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.081>
12. A. Mellit dan S. A. Kalogirou, "Teknik kecerdasan buatan untuk aplikasi fotovoltaik: Sebuah tinjauan," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, no. 5, hlm. 574–632, 2018.
13. L. Wang, C. Wang, dan Y. Wang, "Prediksi keluaran daya PV menggunakan jaringan saraf tiruan yang dioptimalkan dengan algoritma genetika," *Renewable Energy*, vol. 146, hlm. 2033–2045, 2020.
14. M. Esfahanian dan B. Vahidi, "Meningkatkan kinerja sistem PV menggunakan estimasi parameter berbasis GA," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 3, hlm. 1205–1213, 2019.

