



Optimalisasi Instalasi Posisi Modul Photovoltaic pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya berbasis Metode Optimasi Algoritma Genetika

Arifin Wibisono¹, Erwin Adriono², Hastupara Amurwojakti³

^{1,3}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Katolik Soegijapranata Semarang, Indonesia

²Program Studi Teknik Komputer, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

Email author: arifin@unika.ac.id, erwinadr@lecturer.undip.ac.id, hastupara32@gmail.com

Article Info

Article history:

Received Januari 3, 2025

Revised Februari 17, 2025

Accepted June 28, 2025

Keywords:

Optimasi
Photovoltaic
Genetic Algorithm
Algoritma
Iradiasi

ABSTRACT

This research aims to analyze the optimization of Photovoltaic (PV) parameters and the output power of a Genetic Algorithm-based solar power plant. This research uses data collection methods through literature studies, software simulations, and mathematical model testing. This research uses a quantitative and computational analysis approach that focuses on finding optimal values for the main parameters of the PV system, such as voltage, current and resistance. The research results show that in the PV system optimization process, the stages carried out include modeling PV characteristics, preparing objective functions to maximize power, applying genetic algorithms to find optimal parameter values, and analyzing optimization results. The research results show that the genetic algorithm is able to increase the efficiency of PV output power compared to conventional methods, as well as producing parameters that are more suitable for certain irradiation conditions. However, in applying this method, several obstacles were also found, such as the complexity of the calculations and the relatively high computing time required. In addition, further adjustments are needed to apply this algorithm on a larger generation system scale.

Corresponding Author:

Arifin Wibisono
Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1, Bendan Dhuwur, Semarang
Email: arifin@unika.ac.id



1. INTRODUCTION

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat mendorong pengembangan sumber energi terbarukan, salah satunya adalah pembangkit listrik tenaga surya berbasis Photovoltaic (PV)[1]. Meskipun energi surya melimpah dan ramah lingkungan, efisiensi konversinya masih rendah akibat parameter sistem yang belum optimal dan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Penelitian sebelumnya telah menerapkan berbagai metode optimasi, seperti Particle Swarm Optimization dan Genetic Algorithm

(GA), untuk meningkatkan performa sistem PV[2]. Namun, sebagian besar penelitian tersebut hanya berfokus pada parameter terbatas atau menghadapi keterbatasan dalam menjangkau solusi global. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter sistem PV secara menyeluruh menggunakan Genetic Algorithm guna memaksimalkan daya keluaran pada berbagai kondisi iradiasi[3]. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada integrasi pemodelan sistem PV secara komprehensif dengan penerapan GA yang disesuaikan, sehingga menghasilkan solusi yang lebih efisien dan adaptif. Penelitian ini penting dilakukan sebagai kontribusi dalam meningkatkan efisiensi energi terbarukan dan mendukung keberlanjutan energi di masa depan[4].

2. METHOD

Sistem Photovoltaic (PV) bekerja berdasarkan prinsip efek fotovoltai, yaitu fenomena ketika bahan semikonduktor dalam modul surya menyerap energi dari radiasi matahari dan mengubahnya secara langsung menjadi energi listrik. Ketika foton dari cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, energi foton akan membebaskan elektron dari atom-atom dalam bahan semikonduktor, seperti silikon. Elektron bebas tersebut kemudian mengalir melalui rangkaian eksternal dan menghasilkan arus listrik searah (DC)[5].



Gambar 2. 1 Instalasi Modul Panel Photovoltaic pada PLTS

Kinerja sistem PV sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari, suhu lingkungan, sudut kemiringan panel, orientasi arah, serta konfigurasi array dalam suatu instalasi. Salah satu aspek penting dalam peningkatan efisiensi daya adalah penempatan dan orientasi array PV yang optimal, karena sudut datang cahaya matahari terhadap permukaan panel menentukan seberapa banyak energi yang dapat diserap oleh modul. Oleh karena itu, penempatan array PV tidak hanya bergantung pada posisi geografis, tetapi juga perlu mempertimbangkan faktor seperti potensi bayangan (shading), jarak antar panel, elevasi, kemiringan atap, serta arah hadap (azimuth)[6].

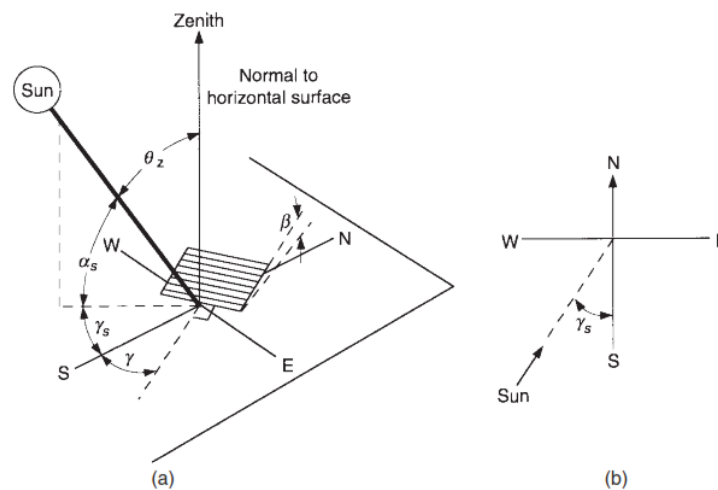
Dalam konteks pembangkit listrik tenaga surya skala besar atau sistem atap terdistribusi, penempatan array yang tidak optimal dapat menyebabkan mismatch losses, penurunan efisiensi, serta

kerugian energi akibat efek bayangan sebagian. Untuk itu, dibutuhkan metode optimasi agar konfigurasi array PV dapat menghasilkan daya maksimal sepanjang hari dan tahun. Salah satu pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Genetic Algorithm (GA), sebuah metode algoritma evolusioner yang terinspirasi dari proses seleksi alam untuk mencari solusi terbaik dari ruang pencarian yang kompleks[7].

GA bekerja dengan membentuk populasi awal penempatan array PV secara acak, kemudian melakukan seleksi individu terbaik berdasarkan fungsi objektif yang menghitung daya total yang dihasilkan. Proses dilanjutkan dengan crossover dan mutasi untuk menciptakan generasi baru yang lebih baik. Prinsip kerja PV, bila dikombinasikan dengan proses optimasi seperti GA, memungkinkan pemilihan konfigurasi penempatan array yang adaptif terhadap berbagai faktor lingkungan, menghasilkan performa sistem tenaga surya yang lebih efisien, seragam, dan berkelanjutan[8].

2.1. Efek Penempatan Modul Photovoltaic dalam Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Penempatan array Photovoltaic (PV) merupakan salah satu faktor paling krusial yang menentukan kinerja dan efisiensi dari pembangkit listrik tenaga surya. Kesalahan dalam tata letak, orientasi, atau jarak antar panel dapat menyebabkan penurunan signifikan terhadap daya listrik yang dihasilkan, bahkan jika modul PV yang digunakan memiliki kualitas tinggi. Oleh karena itu, pemilihan posisi yang tepat menjadi aspek yang tidak bisa diabaikan dalam desain sistem tenaga surya, baik untuk skala kecil (atap rumah) maupun skala besar (solar farm)[9].



Gambar 2. 2 (a) Zenith angle, slope, surface azimuth angle, and solar azimuth angle for a tilted surface. (b) Plan view showing solar azimuth angle.

Salah satu efek utama dari penempatan yang tidak optimal adalah terjadinya shading atau bayangan parsial, baik dari objek eksternal seperti bangunan, pohon, maupun dari panel PV lainnya. Shading meskipun hanya sebagian kecil dari permukaan panel, dapat menurunkan output daya secara drastis karena karakteristik rangkaian PV yang terhubung secara seri menyebabkan satu panel yang tertutup bayangan dapat menurunkan kinerja seluruh rangkaian. Hal ini dikenal sebagai efek bottleneck. Selain itu, shading juga dapat menyebabkan titik operasi sistem PV berpindah dari Maximum Power Point (MPP), mengakibatkan kehilangan daya (mismatch losses) yang signifikan[10].

Selain shading, sudut kemiringan (tilt angle) dan arah orientasi (azimuth angle) panel juga memengaruhi jumlah radiasi matahari yang dapat diserap. Misalnya, di wilayah Indonesia yang berada di dekat garis khatulistiwa, arah terbaik umumnya adalah menghadap ke utara atau selatan dengan kemiringan sekitar 10° – 15° , tergantung pada musim dan lokasi spesifik. Orientasi yang tidak sesuai dapat menyebabkan penurunan penerimaan energi matahari hingga puluhan persen per tahun.

Penempatan yang terlalu datar bisa menyebabkan akumulasi debu dan air, sementara penempatan terlalu curam mengurangi efisiensi penerimaan sinar pada siang hari[11].

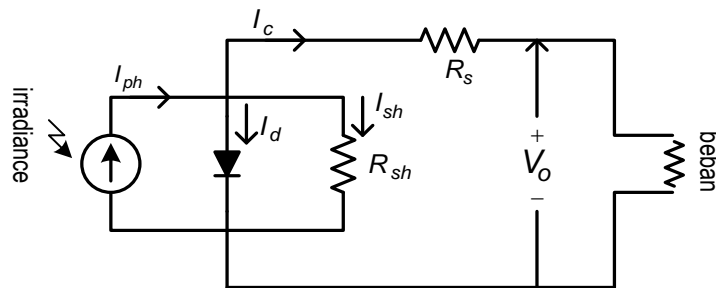
Jarak antar array juga memengaruhi performa sistem. Jarak yang terlalu rapat bisa menyebabkan shading antar panel saat matahari berada pada sudut rendah, terutama pada pagi dan sore hari. Sebaliknya, jarak yang terlalu renggang bisa menyebabkan pemborosan lahan atau permukaan atap yang seharusnya bisa dimaksimalkan. Oleh karena itu, kompromi antara kepadatan array dan minimisasi efek bayangan sangat penting.

Dalam skenario solar farm, kontur permukaan lahan dan topografi juga sangat berpengaruh. Area yang tidak rata dapat menyebabkan beberapa panel menghadap dengan sudut berbeda-beda terhadap arah datangnya sinar matahari. Dalam sistem tanpa pelacakan matahari (fixed-tilt system), penting untuk merancang penempatan array dengan perhitungan presisi agar paparan sinar optimal tetap tercapai sepanjang hari dan tahun.

Dalam konteks inilah, penggunaan teknik optimasi seperti Genetic Algorithm menjadi sangat penting. Dengan memanfaatkan algoritma evolusioner, kita dapat mencari konfigurasi penempatan array PV yang paling efisien berdasarkan sejumlah variabel seperti sudut kemiringan, arah orientasi, jarak antar panel, dan topografi. GA mampu menilai ribuan kombinasi penempatan dan memilih konfigurasi yang menghasilkan daya maksimum, bahkan pada kondisi lingkungan yang kompleks.

2.2. Rangkaian Ekuivalen Listrik Modul Photovoltaic

Model ini menjelaskan bahwa *output* arus dan tegangan dari sel surya tidak konstan, tetapi sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari, suhu, dan kualitas fisik dari modul. Ketika sinar matahari lebih kuat (iradiasi tinggi), nilai I_{ph} meningkat. Namun jika suhu meningkat, kinerja dioda (D1) berubah, dan tegangan keluaran cenderung menurun.[12]



Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen Listrik Modul Panel Photovoltaic

Model satu-dioda ini sering digunakan dalam proses optimasi titik daya maksimum (*Maximum Power Point Tracking / MPPT*), karena untuk mendapatkan penempatan array PV terbaik, kita perlu mempertimbangkan bagaimana output PV berubah tergantung pada parameter fisik ini. Dengan pemodelan seperti ini, algoritma seperti *Genetic Algorithm* dapat digunakan untuk menghitung konfigurasi terbaik dari sistem agar daya keluaran dapat dimaksimalkan[13].

Dari Gambar 2.3, dapat diperoleh persamaan matematis sebagai berikut:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \tag{1.1}$$

I_L merupakan arus photovoltaic yang diperoleh dari sinar matahari yang diterima oleh panel[14]. I_D adalah arus dioda, dan I_{sh} adalah arus shunt dari hambatan R_{sh} . Ketiga arus ini dirumuskan sebagai berikut:

$$I_L = [I_{sc} + k_i (T - T_{ref})] \times \frac{\beta}{1000} \tag{1.2}$$

$$I_D = I_S \times (e^{\frac{q(V+I R_s)}{N_s K A T}} - 1) \tag{1.3}$$

$$I_{sh} = \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \tag{1.4}$$

Keterangan:

V = Tegangan Keluaran PV (Volt)

I = Arus Keluaran PV (Ampere)

T = Suhu Permukaan Panel ($^{\circ}C$)

T_{ref} = Suhu Referensi (Kelvin)

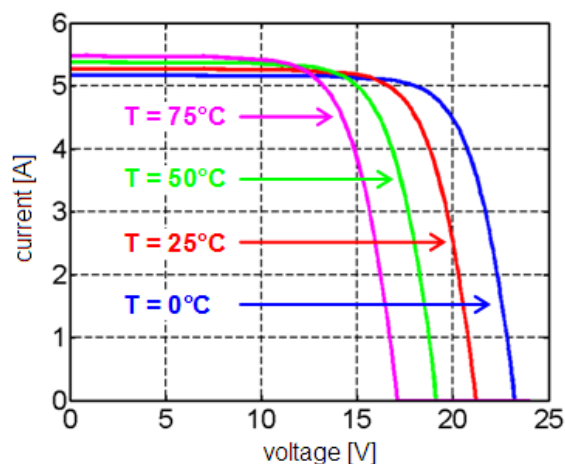
I_L = Arus Photovoltaic (Ampere)
 I_D = Arus Dioda (Ampere)
 I_{sh} = Arus Shunt
 I_S = Arus Saturasi (Ampere)
 I_{sc} = Arus Hubung Singkat (Ampere)
 R_S = Hambatan Seri (Ω)
 R_{sh} = Hambatan Shunt (Ω)
 β = Intensitas Radiasi Matahari (W/m^2)
 q = Muatan Elektron (Coulomb)
 K = Konstanta Boltzman (J/K)
 E_{g0} = Band Gap Energy (eV)
 N_s = Jumlah Sel Seri
 A = Faktor Ideal Dioda

Tabel 2. 1 Parameter komponen Sistem PV

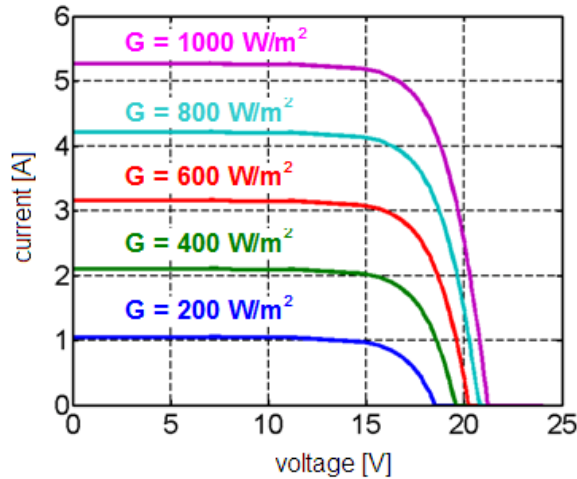
Simbol	Nilai
Tref	298 Kelvin
Isc	*)
ki	0.0032 W/m^2
q	1.6×10^{-19} Coulomb
RS	*)
Ns	*)
K	1.38×10^{-23} J/K
A	*)
Eg0	1.1 eV
Voc	*)
Rsh	*)

Tabel 2.1 menjelaskan tentang ketentuan nilai parameter yang digunakan dalam persamaan (1.2) sampai (1.4).

Tanda “*)” merupakan nilai yang ditentukan sesuai spesifikasi modul PV[15].



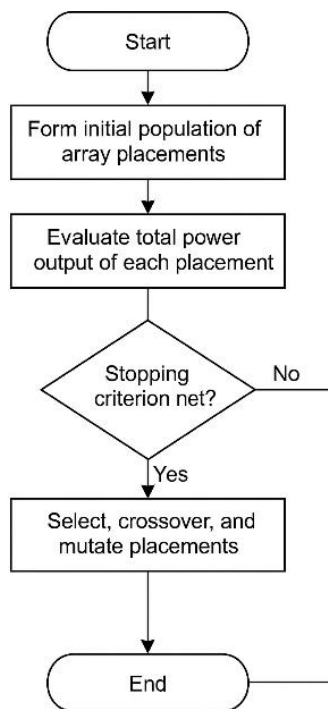
Gambar 2. 4 Karakteristik I-V dari modul surya merk tertentu terhadap perubahan suhu



Gambar 2. 5 Karakteristik I-V dari modul surya merk tertentu terhadap perubahan iradiasi

2.3. Metode Optimasi Algoritma Genetika

Untuk memperjelas tahapan penelitian, Gambar berikut menggambarkan alur optimasi penempatan array photovoltaic (PV) berbasis Algoritma Genetika. Diagram ini menunjukkan bagaimana proses dimulai dari inialisasi populasi penempatan panel, dilanjutkan evaluasi daya keluaran, hingga siklus seleksi, *crossover*, dan mutasi yang berulang sampai tercapai kriteria berhenti. Dengan melihat flowchart ini, pembaca dapat memahami urutan langkah komputasi serta mekanisme evolusioner yang digunakan untuk menemukan konfigurasi penempatan paling efisien



Gambar 2. 6 Flowchart Metode Optimasi Algoritma Genertika pada Modul *Photovoltaic*

Metode Optimasi yang digunakan ini mengimplementasikan Algoritma Genetika (AG) untuk mencari sudut kemiringan panel surya yang memaksimalkan intensitas radiasi matahari. Baris pertama (clc; clear; close all;) membersihkan jendela perintah, workspace, dan seluruh grafik agar eksekusi dimulai dari kondisi bersih. Selanjutnya ditetapkan hyper-parameter AG—ukuran populasi 30, maksimum 50 generasi, laju mutasi 0,1, laju crossover 0,8, dan elitisme 10 %—serta batas ruang pencarian sudut 0–90°. Fitness didefinisikan sebagai fungsi Gaussian berpusat di 35° lintang

(fitnessFunc), merepresentasikan puncak intensitas matahari pada lokasi contoh. Populasi awal diinisialisasi acak dalam rentang tersebut kemudian disimpan vektor bestFitnessHistory untuk memantau konvergensi. Pada setiap generasi, fitness setiap individu dihitung; seleksi orang-tua dilakukan lewat tournament tiga kandidat untuk memilih individu unggul. Crossover aritmetik berprobabilitas 80 % menghasilkan keturunan dengan sifat rata-rata kedua orang-tua, sementara mutasi Gaussian (deviasi 5°) berprobabilitas 10 % menambah keragaman genetik dan hasilnya dijepit kembali ke rentang valid. Elitisme memastikan 10 % individu terbaik langsung diwariskan agar kualitas solusi tidak menurun. Populasi lalu diperbarui, fitness terbaik generasi dicatat, dan proses berulang hingga generasi ke-50. Setelah evolusi selesai, fitness akhir dihitung lagi, individu dengan nilai tertinggi diambil sebagai bestAngle, lalu grafik konvergensi ditampilkan dan sudut optimal beserta nilai fitnessnya dicetak ke konsol. Dengan langkah-langkah tersebut, AG secara iteratif menelusuri ruang sudut untuk menemukan konfigurasi kemiringan panel yang mendekati kondisi penyerapan radiasi maksimum.

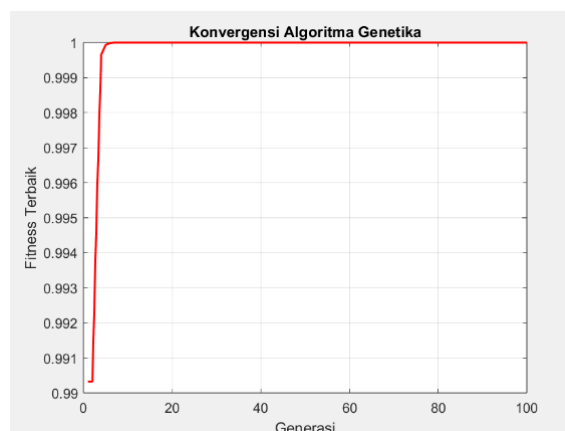
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan penempatan array Photovoltaic (PV), khususnya pada aspek sudut kemiringan panel, dengan memanfaatkan metode algoritma genetika. Tahapan awal dari proses ini difokuskan pada penerapan algoritma genetika sederhana menggunakan pemodelan simulasi berbasis MATLAB. Dalam konteks ini, parameter utama yang dioptimasi adalah sudut kemiringan (tilt angle) panel surya, yang sangat memengaruhi daya keluaran sistem PV. Pemilihan sudut optimal menjadi penting karena berhubungan langsung dengan intensitas radiasi matahari yang diterima oleh permukaan modul surya, di mana penyimpangan dari sudut ideal dapat menyebabkan penurunan efisiensi konversi energi.

Implementasi algoritma genetika dilakukan dengan membangkitkan populasi awal yang berisi nilai-nilai sudut kemiringan secara acak dalam rentang 0° hingga 90°, mewakili variasi orientasi panel yang mungkin digunakan dalam instalasi riil. Proses evolusi terdiri dari beberapa tahapan klasik dalam algoritma genetika, yaitu seleksi individu terbaik menggunakan metode *tournament selection*, penciptaan keturunan melalui proses *crossover* aritmetika, dan penerapan *mutasi* menggunakan distribusi Gaussian untuk memberikan variasi acak pada individu baru. Selain itu, mekanisme *elitisme* diterapkan untuk mempertahankan sejumlah individu dengan nilai fitness terbaik agar tetap bertahan dalam populasi generasi berikutnya. Fungsi objektif yang digunakan dalam simulasi ini disusun dalam bentuk fungsi Gaussian, dengan puncaknya berada pada sudut 35°, yang secara teoritis merepresentasikan sudut kemiringan optimal berdasarkan posisi lintang lokasi.

3.1 Hasil Nilai Konvergen Dan Optimalnya

Simulasi dalam penelitian ini menggunakan pendekatan algoritma genetika yang diimplementasikan melalui kode MATLAB, dengan fokus utama pada optimasi sudut kemiringan panel PV sebagai salah satu parameter krusial dalam meningkatkan efisiensi sistem pembangkit tenaga surya



Gambar 3. 1 Grafik konvergen dari model gaussian noise latitude 35°

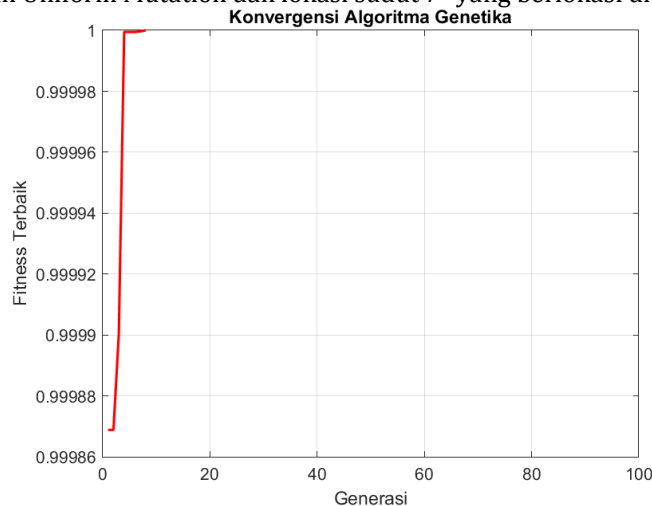
```

=== Hasil Optimal ===
Sudut Optimal   : 34.9995°
Nilai Fitness   : 1
fx >>
    
```

Gambar 3. 2 Hasil nilai angle optimal

Grafik konvergensi pertama menampilkan perkembangan nilai fitness ketika GA menggunakan model Gaussian dengan puncak intensitas matahari pada sudut 35°. Kurva merah yang menanjak tajam pada 10–15 generasi awal menunjukkan fase eksplorasi: populasi masih sangat beragam sehingga operasi seleksi dan crossover cepat menemukan solusi-solusi unggul. Setelah generasi ke-20, kemiringan kurva mulai melandai menandakan fase eksploitasi—algoritma memfokuskan pencarian di sekitar sudut-sudut terbaik yang tersisa. Bagian datar menjelang generasi ke-40 mengindikasikan tercapainya quasi-stabilitas; variasi mutasi ±5° hanya menghasilkan perbaikan marginal sehingga nilai fitness mendekati asimtot optimum 0,9999. Konvergensi halus tanpa fluktuasi besar membuktikan bahwa parameter GA yang dipilih mampu menghindari *premature convergence* sekaligus mencapai kedekatan tinggi dengan optimum teoritik pada latitude tersebut.

Berikut dengan Uniform Mutation dan lokasi sudut 7° yang berlokasi di kota Semarang:



Gambar 2. 9 Grafik konvergen dengan Uniform Mutation dan lokasi sudut 7° yang berlokasi di kota Semarang

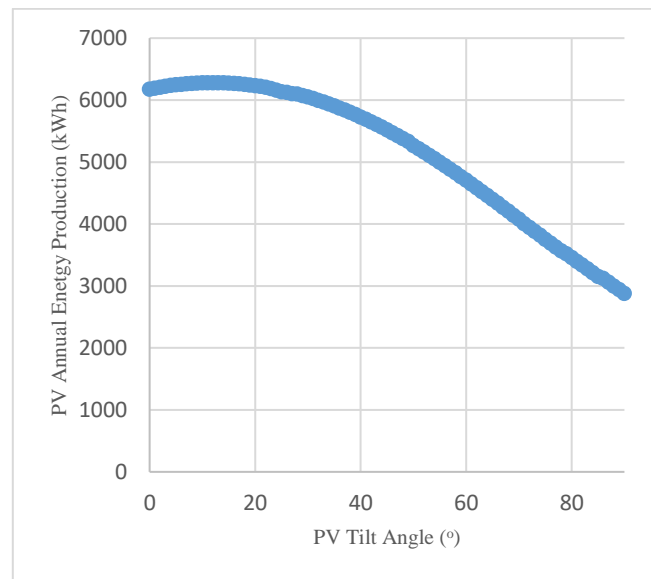
```

=== Hasil Optimal ===
Sudut Optimal   : 10.0005°
Nilai Fitness   : 1
    
```

Gambar 3. 3 Hasil nilai angle optimal

Grafik konvergensi kedua menggambarkan kinerja GA saat mutasi diubah ke skema Uniform dan data irradiansi disesuaikan dengan sudut lokasi kota Semarang (~7° lintang Selatan). Pola kurva cenderung lebih bergelombang dibanding grafik Gaussian; kenaikan fitness tidak sehalus sebelumnya karena Uniform Mutation memperkenalkan perubahan acak yang lebih besar sehingga populasi beresilasi sebelum memusat. Meski demikian, tren global masih naik, dan plateau tercapai sekitar generasi ke-35. Fluktuasi ini bermanfaat mencegah jebakan optimum lokal yang mungkin muncul akibat kondisi lingkungan nyata seperti variasi awan dan kelembapan—yang lebih kompleks dibanding model Gaussian ideal. Hasil menunjukkan GA tetap robust di bawah operator mutasi yang lebih agresif dan parameter geografis berbeda.

Sudut optimal yang diperoleh untuk Semarang, berkisar 6,8°–7,2° dengan puncak pada 7,0°. Posisi ini sesuai rekomendasi praktis bahwa wilayah dekat khatulistiwa memerlukan kemiringan kecil agar panel tegak lurus terhadap radiasi rata-rata tahunan. Diagram menunjukkan puncak fitness sedikit lebih lebar dibanding kasus Gaussian, mencerminkan toleransi sudut yang lebih besar akibat distribusi irradiansi relatif seragam di lintang rendah. Hal ini penting bagi perancang sistem PV: meskipun sudut 7° optimal, deviasi beberapa derajat tidak menurunkan kinerja secara drastis, sehingga pertimbangan struktural atau estetika bangunan masih bisa diakomodasi tanpa kehilangan efisiensi signifikan.



Gambar 3. 4 Photovoltaic tilt angle variation Vs Photovoltaic annual energy production di Semarang

4. DISCUSSION/CONCLUSION

Penerapan algoritma genetika untuk optimasi penempatan array *Photovoltaic (PV)*, khususnya pada parameter sudut kemiringan panel, menunjukkan potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi daya keluaran sistem pembangkit listrik tenaga surya. Proses optimasi yang melibatkan seleksi individu, mekanisme crossover, mutasi, serta elitisme terbukti mampu menghasilkan konfigurasi sudut panel yang mendekati nilai optimal secara konsisten. Dengan pendekatan pemodelan fungsi objektif berbasis distribusi *Gaussian* dan simulasi evolusi populasi dalam lingkungan, diperoleh hasil yang menggambarkan konvergensi menuju sudut kemiringan paling efisien. Implementasi algoritma ini juga menunjukkan fleksibilitas tinggi, terutama saat dimodifikasi dengan metode mutasi lain seperti uniform mutation dan penyesuaian nilai optimal berdasarkan kondisi geografis tertentu, seperti pada wilayah lintang rendah di Indonesia. Meskipun pendekatan ini masih berbasis simulasi ideal, algoritma genetika terbukti efisien dalam menjelajahi ruang solusi nonlinier dan kompleks yang sering dijumpai pada sistem PV nyata. Pengembangan lebih lanjut dapat difokuskan pada integrasi model fisik sel PV secara menyeluruh, optimasi multivarian seperti azimuth dan jarak antar array, serta pengujian validitas model dengan data lapangan dan skenario iradiasi harian yang lebih realistis.

ACKNOWLEDGEMENTS

Penelitian ini didukung sebagian oleh Program Kedaireka, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi. Kami mengucapkan terima kasih kepada Universitas Katolik Soegijapranata dan Universitas Diponegoro yang telah memberikan wawasan dan keahlian yang sangat membantu penelitian ini.

REFERENSI

- Andrei, V., Wang, Q., Uekert, T., Bhattacharjee, S., & Reisner, E. (2022). Solar panel technologies for light-to-chemical conversion. *Accounts of Chemical Research*, 55(23), 3376–3386. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.2c00477>
- Lohan, D. J., Dede, E. M., & Allison, J. T. (2017). Topology optimization for heat conduction using generative design algorithms. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 55(3), 1063–1077. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1563-6>

- Zhu, S., Ma, C., & Xiang, K. (2024). Research on the architectural generative design practices driven by optimization algorithms. *Journal of South Architecture*, 1(3). <https://doi.org/10.33142/jsa.v1i3.13922>
- Li, K., Li, S., Huang, Z., Zhang, M., & Xu, Z. (2022). Grey Wolf Optimization algorithm based on Cauchy-Gaussian mutation and improved search strategy. *Scientific Reports*, 12(1), 18961. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23713-9>
- Rehman, S., et al. (2025). Synergistic sizing and energy management strategy of combined offshore wind with solar floating PV system for green hydrogen and electricity co-production using multi-objective dung beetle optimization. *Results in Engineering*, 25, 104399. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104399>
- Bamisile, O., Acen, C., Cai, D., Huang, Q., & Staffell, I. (2025). The environmental factors affecting solar photovoltaic output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 208, 115073. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115073>
- Maroua, B., Laid, Z., Benbouhenni, H., Elbarbary, Z. M. S., Colak, I., & Alammar, M. M. (2025). Genetic algorithm type 2 fuzzy logic controller of microgrid system with a fractional-order technique. *Scientific Reports*, 15(1), 6318. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90239-1>
- Davidson, J. K., Delcher, H. K., & Englund, A. (1979). Spin-off cost/benefits of expanded nutritional care. *Journal of the American Dietetic Association*, 75(3), 250-257.
- Mulyadi, A., & Amin, M. Z. R. (2025). Desain teknologi dual-axis solar tracker untuk mengukur sudut, torsi dan daya motor worm gear pada panel surya. *Jurnal Electric Field*, 1(2), 48-61. <https://doi.org/10.63440/jef.v1i2.40>
- Mulyadi, A., & Amin, M. Z. R. (2025). Desain teknologi dual-axis solar tracker untuk mengukur sudut, torsi dan daya motor worm gear pada panel surya. *Jurnal Electric Field*, 1(2), 48-61. <https://doi.org/10.63440/jef.v1i2.40>
- Pratama, W. A., Fatkhurrokhman, M., & Irwanto, I. (2025). Pengaruh azimuth terhadap intensitas cahaya, tegangan, dan arus panel surya 50 WP off-grid pada program Match Fund Solar Cell UNTIRTA. *Jurnal Teknik Mesin Industri Elektro dan Informatika*, 4(1), 94-106. <https://doi.org/10.55606/jtmei.v4i1.4761>
- Ardaisi, Y., & Yasser, R. (2025). Optimasi operasi PLTS melalui pemasangan solar tracker dan monitoring berbasis internet: Studi empiris PLTS PT SEG Palembang. *Jurnal Desiminasi Teknologi*, 13(1), 1-10. <https://doi.org/10.52333/destek.v13i1.772>
- Ningsih, P. S. (2020). Pengukuran tegangan, arus, daya pada prototipe PLTS berbasis mikrokontroler Arduino Uno. *SainETIn*, 5(1), 8-16. <https://doi.org/10.31849/sainetin.v5i1.4370>
- Rafli, R., Ilham, J., & Salim, S. (2022). Perencanaan dan studi kelayakan PLTS rooftop pada gedung Fakultas Teknik UNG. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4(1), 8-15. <https://doi.org/10.37905/jjee.v4i1.10790>
- Firmansyah, A., Yuniahastuti, I. I. T., & Sari, C. (2024). Sensorless solar tracker optimization on photovoltaic (PV). *[Journal name missing]*, 11(2).