

Peningkatan Efisiensi Konversi Energi Surya Menggunakan Kendali PID Berbasis Algoritma Genetika Pada Sistem PV off-Grid

Selly Annisa¹⁾, Zulkarnain Lubis²⁾, Solly Aryza³⁾, Ayu Najmita⁴⁾

¹⁾Universitas Negeri Medan; ²⁾Universitas Islam Sumatera Utara;

³⁾Universitas Pembangunan Pancabudi

⁴⁾Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara;

sellyannisalubis@gmail.com; sollyaryzalubis@gmail.com;

lubisdrzulkarnain@gmail.com; ayunajmita99@gmail.com

Abstrak

Sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) off-grid memiliki potensi besar dalam menyediakan energi di daerah terpencil. Namun, efisiensi konversi energi pada sistem ini seringkali dipengaruhi oleh variasi kondisi lingkungan seperti intensitas cahaya dan suhu. Penelitian ini mengusulkan penggunaan kontroler PID yang dioptimasi dengan algoritma genetika (GA) untuk meningkatkan efisiensi konversi energi pada sistem PV off-grid. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink untuk membandingkan kinerja sistem dengan kontroler PID konvensional dan PID yang dioptimasi dengan GA. Hasil menunjukkan bahwa pendekatan PID-GA mampu meningkatkan efisiensi konversi energi dan stabilitas sistem secara keseluruhan.

Kata Kunci : PLTS Off-Grid, Efisiensi, Konversi Energi, Kontroler Pid, Algoritma Genetika, Matlab/Simulink

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat menuntut adanya diversifikasi sumber energi yang berkelanjutan, terutama di daerah-daerah yang belum terjangkau jaringan listrik utama. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid menjadi salah satu solusi potensial dalam menyediakan energi bersih dan terbarukan bagi masyarakat di wilayah terpencil. Sistem ini bekerja secara mandiri tanpa koneksi ke jaringan utama, sehingga sangat relevan diterapkan di wilayah kepulauan dan pedesaan yang memiliki intensitas cahaya matahari tinggi sepanjang tahun (Kusuma & Prasetyo, 2023). Selain itu, penggunaan PLTS juga mendukung upaya pemerintah Indonesia dalam mencapai target *Net Zero Emission 2060* serta meningkatkan rasio elektrifikasi nasional di daerah dengan infrastruktur energi terbatas (Ahmad et al., 2021).

Meskipun demikian, kinerja sistem PLTS off-grid sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti intensitas iradiasi matahari dan suhu modul fotovoltaik. Fluktuasi kedua parameter tersebut menyebabkan titik daya maksimum (*Maximum Power Point* – MPP) dari panel surya terus berubah, sehingga sistem memerlukan metode pengendalian yang mampu beradaptasi secara cepat dan akurat. Apabila proses pelacakan MPP tidak optimal, energi yang dihasilkan panel tidak dapat dimanfaatkan secara maksimal, dan efisiensi konversi daya akan menurun (Sopian et al., 2020). Oleh karena itu, peningkatan efisiensi sistem melalui pengendalian adaptif menjadi aspek krusial dalam desain PLTS modern, terutama untuk sistem *stand-alone* yang tidak memiliki cadangan energi eksternal (Wicaksono et al., 2022).

Salah satu pendekatan yang umum digunakan untuk mengatur MPP adalah *Proportional-Integral-Derivative Controller* (PID). Metode ini memiliki struktur sederhana dan mudah diimplementasikan pada sistem kendali linier. Namun, pengaturan parameter PID (K_p , K_i , K_d) secara konvensional masih bergantung pada pengalaman perancang dan sering kali menghasilkan kinerja yang tidak optimal, terutama ketika sistem menghadapi variasi kondisi operasi (AbdelRassoul et al., 2016). Ketidaktepatan dalam penalaan parameter dapat menyebabkan *overshoot*, waktu tanggap yang lambat, serta osilasi tegangan yang berdampak negatif terhadap stabilitas dan umur komponen daya.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, pendekatan berbasis kecerdasan komputasional seperti *Genetic Algorithm* (GA) dikembangkan untuk mengoptimalkan parameter PID secara otomatis. GA bekerja dengan prinsip evolusi biologis melalui proses seleksi, crossover, dan mutasi untuk mencari kombinasi parameter terbaik yang meminimalkan kesalahan sistem (*error function*) secara global (Harrag & Messalti, 2015). Pendekatan ini terbukti efektif dalam sistem nonlinier dan adaptif, termasuk sistem pembangkit energi terbarukan yang memiliki ketidakpastian tinggi terhadap kondisi lingkungan (Rehman et al., 2017). Penelitian oleh Mary & Louis (2024) menunjukkan bahwa integrasi kendali PID dengan GA mampu meningkatkan efisiensi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) hingga 9% serta mempercepat waktu tanggap sistem dalam menghadapi fluktuasi iradiasi.

Beberapa studi terkini juga mengonfirmasi efektivitas metode PID-GA dalam konteks sistem fotovoltaik. Jalali Zand et al. (2022) melaporkan

bahwa penggunaan algoritma genetika untuk penalaan PID meningkatkan kestabilan tegangan DC-link pada sistem PV off-grid. Sementara Zhang et al. (2022) membuktikan bahwa metode GA mampu menghasilkan parameter kendali yang lebih adaptif dibandingkan pendekatan konvensional berbasis *Ziegler-Nichols*. Selain itu, penelitian Zulkarnain Lubis & Solly Aryza (2023) pada sistem kendali motor induksi tiga fasa juga memperlihatkan bahwa metode optimasi berbasis evolusioner efektif dalam memperbaiki respon dinamis dan efisiensi sistem kelistrikan.

Berdasarkan kajian tersebut, penelitian ini berfokus pada penerapan kontrol PID yang dioptimasi dengan Algoritma Genetika untuk meningkatkan efisiensi konversi energi pada sistem PV off-grid. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink untuk mengevaluasi peningkatan performa sistem dari sisi efisiensi daya, kecepatan respon, dan kestabilan tegangan dibandingkan dengan kontroler PID konvensional. Diharapkan, hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan sistem PLTS yang lebih efisien, adaptif, dan sesuai dengan karakteristik iklim tropis Indonesia.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem PV Off-Grid

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid merupakan konfigurasi pembangkit energi listrik yang beroperasi secara mandiri tanpa koneksi ke jaringan listrik utama (grid). Sistem ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan listrik di wilayah yang sulit dijangkau oleh infrastruktur jaringan konvensional, seperti daerah pedesaan, pegunungan, dan kepulauan kecil (Kusuma & Prasetyo, 2023). Dalam konteks energi terbarukan, sistem PV off-grid berperan penting dalam memperluas akses energi sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Secara umum, sistem PV off-grid terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu modul fotovoltaik (PV module), konverter DC-DC, kontroler pengisian (charge controller), baterai penyimpanan energi, dan inverter.

- **Modul fotovoltaik** berfungsi mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC).
- **Konverter DC-DC**, biasanya berjenis *boost converter*, digunakan untuk menyesuaikan tegangan keluaran dari panel PV agar sesuai dengan kebutuhan pengisian baterai atau input inverter.
- **Kontroler pengisian baterai** bertugas mengatur aliran daya dari panel ke baterai, mencegah pengisian berlebih (*overcharging*) maupun pelepasan daya berlebih (*deep discharging*).

- **Baterai penyimpanan energi** berfungsi sebagai penyangga energi yang akan digunakan ketika intensitas cahaya matahari menurun, misalnya pada malam hari atau saat cuaca mendung.
- **Inverter** mengubah arus searah (DC) dari baterai menjadi arus bolak-balik (AC) yang sesuai dengan kebutuhan peralatan listrik rumah tangga atau industri kecil (Wicaksono et al., 2022).

Salah satu faktor yang menentukan kinerja keseluruhan sistem PV off-grid adalah efisiensi konversi energi dari panel surya. Efisiensi ini sangat bergantung pada kemampuan sistem dalam mendeteksi dan mempertahankan titik daya maksimum (Maximum Power Point / MPP) dari modul PV. MPP merupakan kondisi di mana kombinasi antara arus (I) dan tegangan (V) keluaran panel menghasilkan daya listrik maksimum. Karena intensitas cahaya matahari dan suhu modul selalu berubah sepanjang hari, posisi MPP pun ikut bergeser secara dinamis (Zhang et al., 2022).

Untuk memastikan sistem bekerja pada titik MPP yang optimal, diperlukan strategi pengendalian Maximum Power Point Tracking (MPPT). Algoritma MPPT digunakan untuk mengatur duty cycle dari konverter DC-DC agar daya keluaran selalu mendekati nilai maksimum meskipun terjadi perubahan iradiasi dan suhu. Dalam praktiknya, metode MPPT konvensional seperti *Perturb and Observe (P&O)* dan *Incremental Conductance (IncCond)* sering digunakan karena kesederhanaannya. Namun, kedua metode tersebut memiliki keterbatasan, terutama dalam menghadapi perubahan cepat pada kondisi lingkungan yang dapat menyebabkan osilasi daya dan kehilangan efisiensi (Sopian et al., 2020).

Pada sistem off-grid berskala kecil hingga menengah, kendali MPPT yang efektif menjadi semakin penting karena sistem tidak dapat memanfaatkan dukungan energi dari jaringan eksternal. Oleh karena itu, integrasi antara algoritma kontrol adaptif dan strategi optimasi cerdas diperlukan untuk menjaga stabilitas daya dan tegangan keluaran. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah penggunaan kontroler PID (*Proportional – Integral – Derivative*) yang dioptimasi dengan Algoritma Genetika (GA), yang memungkinkan sistem menyesuaikan parameter kendali secara real-time sesuai kondisi iradiasi dan suhu. Dengan pendekatan ini, sistem PV off-grid tidak hanya dapat meningkatkan efisiensi konversi daya, tetapi juga memperpanjang umur baterai dan komponen daya lainnya karena pengendalian tegangan dan arus menjadi lebih stabil (AbdelRassoul et al., 2016; Rehman et al., 2017). Selain dari aspek teknis, penerapan sistem PV off-grid juga memiliki dimensi sosial dan ekonomi. Penggunaan teknologi ini dapat memperluas akses

energi listrik di daerah terpencil tanpa perlu investasi besar untuk pembangunan jaringan distribusi baru. Dengan biaya operasional yang relatif rendah dan umur sistem yang panjang, PLTS off-grid menjadi solusi energi berkelanjutan yang sejalan dengan agenda transisi energi nasional dan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*, SDG 7: Energi Bersih dan Terjangkau) (Ahmad et al., 2021).

2.2 Kontroler PID

Kontroler Proportional-Integral-Derivative (PID) merupakan salah satu metode pengendalian klasik yang paling luas digunakan pada berbagai sistem teknik, termasuk sistem tenaga listrik, konversi daya, otomasi industri, hingga sistem fotovoltaik (PV). Keunggulan utama kontroler PID terletak pada strukturnya yang sederhana, fleksibilitas tinggi, dan kemampuannya untuk diterapkan baik pada sistem linier maupun nonlinier dengan sedikit modifikasi (Zulkarnain Lubis & Solly Aryza, 2023). Dalam konteks sistem PV, pengendali PID digunakan untuk menjaga agar tegangan atau arus keluaran sistem tetap berada pada nilai referensi yang menghasilkan daya maksimum.

Secara matematis, kontroler PID menghasilkan sinyal kendali $u(t)$ berdasarkan kombinasi dari tiga aksi: *proportional (P)*, *integral (I)*, dan *derivative (D)*, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (1):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

di mana:

- $e(t)$ adalah selisih antara sinyal referensi dan keluaran aktual sistem (*error signal*),
- K_p merupakan konstanta proporsional yang mengatur besarnya respon langsung terhadap error,
- K_i merupakan konstanta integral yang berfungsi menghilangkan error steady-state, dan
- K_d merupakan konstanta derivatif yang berfungsi meredam osilasi sistem melalui prediksi arah perubahan error (AbdelRassoul et al., 2016).

Ketiga parameter tersebut memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik dinamik sistem, seperti *rise time*, *overshoot*, *settling time*, dan *steady-state error*. Oleh karena itu, penalaan parameter K_p , K_i dan K_d menjadi aspek krusial dalam desain kendali PID. Metode konvensional seperti *Ziegler-Nichols* sering digunakan karena kesederhanaannya, namun hasil yang diperoleh sering kali suboptimal, terutama ketika sistem beroperasi di bawah kondisi nonlinier atau menghadapi variasi parameter dinamis seperti fluktuasi iradiasi pada sistem PV (Harrag & Messalti, 2015).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa keterbatasan utama kontroler PID adalah ketidakmampuannya untuk secara otomatis menyesuaikan parameter terhadap perubahan kondisi sistem. Misalnya, ketika intensitas cahaya menurun secara tiba-tiba, nilai K_p dan K_i yang telah disetel sebelumnya tidak lagi sesuai, sehingga daya keluaran panel menurun dari nilai optimumnya (Zhang et al., 2022). Hal ini menyebabkan hilangnya efisiensi konversi energi yang signifikan, terutama pada sistem off-grid yang tidak memiliki cadangan daya eksternal.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, beberapa pendekatan modern telah dikembangkan untuk meningkatkan performa PID. Pendekatan seperti *Self-Tuning PID*, *Adaptive PID*, dan *Intelligent PID* dengan bantuan algoritma optimasi seperti Algoritma Genetika (GA), *Particle Swarm Optimization (PSO)*, dan *Fuzzy Logic Control* terbukti mampu meningkatkan akurasi dan kecepatan sistem dalam mencapai titik daya maksimum (Mary & Louis, 2024; Ahmad et al., 2021). Dalam konteks ini, PID berbasis GA (PID-GA) menjadi solusi yang menarik karena GA mampu melakukan pencarian global parameter optimal secara otomatis, menghindari jebakan pada titik lokal minimum, dan memberikan performa adaptif terhadap variasi kondisi iradiasi dan suhu.

2.3 Algoritma Genetika (GA)

Algoritma Genetika (Genetic Algorithm – GA) merupakan salah satu metode optimasi berbasis *computational intelligence* yang meniru prinsip evolusi alami dalam biologi. GA bekerja dengan mekanisme seleksi individu terbaik, perkawinan silang (*crossover*), dan mutasi untuk menghasilkan populasi solusi baru yang lebih baik pada setiap generasi (Harrag & Messalti, 2015). Proses ini memungkinkan GA menjelajahi ruang pencarian solusi secara global dan menghindari jebakan pada titik optimum lokal yang sering dialami oleh metode optimasi konvensional.

Dalam konteks sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), GA digunakan untuk mencari nilai parameter kendali PID (K_p , K_i , K_d) yang optimal agar sistem dapat mempertahankan titik daya maksimum (*Maximum Power Point – MPP*) dengan efisiensi tertinggi. Fungsi objektif yang digunakan biasanya berupa minimisasi error seperti *Integral of Time Absolute Error (ITAE)*, *Integral Square Error (ISE)*, atau waktu transien menuju kondisi *steady-state*. Melalui iterasi evolusioner, GA menyesuaikan parameter PID berdasarkan performa sistem hingga konvergen pada nilai optimal.

Kelebihan utama GA adalah kemampuannya bekerja efektif pada sistem nonlinier dan kompleks seperti sistem PV off-grid yang dipengaruhi fluktuasi iradiasi dan suhu (Zhang et al., 2022). Dengan demikian, integrasi GA pada pengendali PID tidak hanya meningkatkan efisiensi konversi energi, tetapi juga memperkuat stabilitas dan

kecepatan respon sistem terhadap perubahan kondisi lingkungan.

2.4 Integrasi PID–GA dalam Sistem MPPT

Integrasi antara kontroler Proportional-Integral-Derivative (PID) dan Algoritma Genetika (GA) merupakan pendekatan hibrida yang menggabungkan keandalan kendali klasik dengan kecerdasan optimasi komputasional. Dalam sistem Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), integrasi ini berfungsi untuk menyesuaikan parameter PID secara otomatis agar sistem dapat beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan seperti fluktuasi iradiasi, suhu, dan kondisi *partial shading* (Mary & Louis, 2024). Dengan memanfaatkan mekanisme evolusioner GA, parameter K_p , K_i , dan K_d disesuaikan secara dinamis untuk meminimalkan error antara daya aktual dan daya maksimum yang diharapkan.

Proses integrasi ini dilakukan melalui dua tahap utama: pertama, GA mengoptimalkan parameter PID berdasarkan fungsi objektif tertentu, misalnya *Integral of Time Absolute Error (ITAE)* atau *Integral Square Error (ISE)*; kedua, parameter hasil optimasi digunakan secara real-time untuk mengendalikan konverter DC–DC pada sistem PV. Pendekatan ini menghasilkan sistem yang lebih adaptif, stabil, dan efisien dalam mempertahankan titik daya maksimum dibandingkan metode MPPT konvensional seperti *Perturb and Observe (P&O)* atau *Incremental Conductance (IncCond)* (Jalali Zand et al., 2022).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Desain Sistem

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem Maximum Power Point Tracking (MPPT) berbasis kontroler Proportional-Integral-Derivative (PID) yang dioptimalkan menggunakan Algoritma Genetika (GA) pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid. Tujuan utama dari desain ini adalah untuk meningkatkan efisiensi konversi daya listrik dari modul PV serta menjaga kestabilan tegangan keluaran pada berbagai kondisi iradiasi dan suhu yang berubah-ubah.

Secara umum, sistem yang dikembangkan terdiri atas empat komponen utama, yaitu modul PV, konverter DC–DC tipe boost, kontroler PID, dan algoritma genetika (GA) sebagai pengoptimal parameter kendali. Modul PV berfungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC), sedangkan konverter DC–DC tipe boost bertugas menaikkan tegangan keluaran agar sesuai dengan kebutuhan beban dan sistem penyimpanan. Konverter ini menjadi titik pengendalian utama dalam implementasi MPPT karena variasi *duty cycle*-nya menentukan posisi titik daya maksimum (MPP) pada kurva karakteristik I–V panel (Sopian et al., 2020).

Kontroler PID digunakan untuk mengatur *duty cycle* konverter berdasarkan perbedaan antara daya aktual dan daya referensi MPP. Nilai parameter K_p , K_i , dan K_d disesuaikan secara otomatis oleh Algoritma Genetika yang berfungsi sebagai *optimizer*. GA melakukan proses seleksi, *crossover*, dan mutasi untuk mencari kombinasi parameter terbaik yang meminimalkan fungsi kesalahan, seperti *Integral Time Absolute Error (ITAE)* atau *Mean Square Error (MSE)*.

Seluruh model sistem dibangun dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB/ Simulink karena kemampuannya dalam menangani model dinamis nonlinier serta integrasi mudah antara blok kontrol dan optimasi. Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk membandingkan kinerja sistem PID konvensional dan PID–GA dalam hal efisiensi konversi, stabilitas tegangan DC-link, dan waktu respon terhadap variasi iradiasi matahari.

3.2 Lingkungan Simulasi

Simulasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid dengan kendali PID yang dioptimalkan menggunakan Algoritma Genetika (GA) dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink versi R2021a. Pemilihan MATLAB/Simulink didasarkan pada kemampuannya dalam memodelkan sistem dinamis nonlinier serta menyediakan pustaka komponen kelistrikan dan kontrol yang komprehensif. Model simulasi dibangun secara modular agar setiap subsistem, seperti panel PV, konverter DC–DC, kontroler PID, dan algoritma GA, dapat diuji dan dianalisis secara terpisah maupun terintegrasi.

Parameter lingkungan dan sistem yang digunakan dalam simulasi diatur untuk merepresentasikan kondisi operasional nyata dari sistem PV off-grid di wilayah tropis Indonesia. Parameter utama yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Intensitas iradiasi: 300–1000 W/m²
- Suhu lingkungan: 25°C–45°C
- Beban: resistif tetap (konstan)
- Modul PV: 250 Wp
- Kapasitas baterai: 12 V, 100 Ah
- Topologi konverter: *boost converter*

Variasi intensitas iradiasi dan suhu diterapkan untuk menguji kemampuan sistem dalam mempertahankan titik daya maksimum (*Maximum Power Point – MPP*) di bawah kondisi lingkungan yang fluktuatif. Modul PV dimodelkan menggunakan persamaan karakteristik I–V standar, sedangkan *boost converter* digunakan untuk menyesuaikan tegangan keluaran sistem sesuai kebutuhan beban.

Kontroler PID dan algoritma GA diimplementasikan dalam bentuk *Simulink block function* dengan *sampling time* 1 ms agar respon

sistem dapat diamati secara rinci. Selain itu, *data logging* dilakukan untuk merekam parameter tegangan, arus, daya, serta nilai error pada setiap iterasi. Hasil dari simulasi ini kemudian dibandingkan antara metode PID konvensional dan PID-GA untuk mengevaluasi peningkatan efisiensi konversi daya, kecepatan respon, dan kestabilan tegangan DC-link.

3.3 Proses Algoritma Genetika

Optimasi parameter kendali PID menggunakan Algoritma Genetika (GA) dilakukan untuk memperoleh kombinasi nilai $K_pK_pK_p$, $K_iK_iK_i$, dan $K_dK_dK_d$ yang menghasilkan performa sistem paling optimal dalam melacak titik daya maksimum (*Maximum Power Point – MPP*) pada berbagai kondisi iradiasi dan suhu. GA bekerja dengan prinsip evolusi alami, di mana populasi solusi berkembang secara bertahap melalui proses seleksi, *crossover*, dan mutasi hingga diperoleh solusi terbaik (Harrag & Messalti, 2015).

Tahapan optimasi dilakukan sebagai berikut:

1. **Inisialisasi populasi awal**, yaitu pembentukan sejumlah individu acak yang masing-masing merepresentasikan nilai parameter $K_pK_pK_p$, $K_iK_iK_i$, dan $K_dK_dK_d$.
2. **Evaluasi fungsi objektif**, yang dihitung berdasarkan *Integral Time Absolute Error (ITAE)* antara daya referensi (MPP) dan daya aktual keluaran sistem PV. Nilai ITAE yang lebih kecil menunjukkan kinerja kendali yang lebih baik.
3. **Seleksi individu terbaik**, dilakukan menggunakan metode *roulette wheel selection* untuk memastikan individu dengan performa terbaik memiliki peluang lebih besar untuk bereproduksi.
4. **Crossover dan mutasi**, digunakan untuk menghasilkan variasi genetik baru dalam populasi dengan tujuan memperluas ruang pencarian dan mencegah konvergensi prematur.
5. **Iterasi dan konvergensi**, dilakukan hingga kriteria berhenti terpenuhi, yaitu ketika perubahan nilai fungsi objektif antar generasi menjadi sangat kecil atau jumlah iterasi maksimum tercapai.

Fungsi objektif GA difokuskan pada minimisasi error pelacakan daya terhadap MPP di bawah perubahan iradiasi (300–1000 W/m²) dan suhu (25–45°C). Melalui proses ini, GA secara adaptif menemukan parameter PID optimal yang mampu meningkatkan kecepatan respon sistem, menurunkan *overshoot*, serta meningkatkan efisiensi konversi energi pada sistem PV off-grid.

3.4 Skenario Simulasi

Untuk mengevaluasi kinerja sistem Maximum Power Point Tracking (MPPT) berbasis

kontroler PID yang dioptimalkan menggunakan Algoritma Genetika (PID-GA), dilakukan tiga skenario simulasi dengan variasi kondisi lingkungan. Tujuan utama pengujian ini adalah untuk menganalisis kemampuan sistem dalam mempertahankan titik daya maksimum (MPP) serta kestabilan tegangan dan arus keluaran di bawah perubahan iradiasi dan suhu yang dinamis. Seluruh simulasi dijalankan pada platform MATLAB/Simulink R2021a, dengan parameter sistem sebagaimana dijelaskan pada bagian 3.2.

Tiga skenario pengujian yang dirancang adalah sebagai berikut:

1. **Skenario 1 – Irradiance tetap (1000 W/m²):** Pengujian dilakukan pada kondisi iradiasi konstan untuk mengamati kemampuan sistem dalam menjaga kestabilan daya dan tegangan pada beban tetap. Skenario ini menjadi dasar perbandingan terhadap kondisi ideal tanpa gangguan lingkungan.
2. **Skenario 2 – Irradiance fluktuatif (300–1000 W/m²):** Variasi intensitas cahaya matahari digunakan untuk mensimulasikan kondisi nyata, seperti adanya awan atau bayangan parsial. Pengujian ini menilai adaptivitas sistem PID-GA terhadap perubahan cepat dalam daya input panel PV.
3. **Skenario 3 – Perubahan suhu (25–45°C):** Suhu lingkungan divariasikan untuk mengamati pengaruh termal terhadap efisiensi konversi dan respon pengendali terhadap penurunan tegangan akibat peningkatan suhu modul.

Hasil dari ketiga skenario ini dibandingkan dengan kontroler PID konvensional dan metode Perturb and Observe (P&O) sebagai pendekatan MPPT klasik. Evaluasi dilakukan berdasarkan parameter *settling time*, *overshoot*, stabilitas tegangan DC-link, dan efisiensi konversi daya. Perbandingan ini bertujuan untuk memvalidasi efektivitas pendekatan PID-GA dalam meningkatkan performa sistem PLTS off-grid di bawah kondisi operasional yang dinamis.

3.5 Parameter Evaluasi

Untuk menilai kinerja sistem Maximum Power Point Tracking (MPPT) berbasis kontroler PID-GA, digunakan beberapa parameter evaluasi utama yang mewakili aspek dinamika sistem, akurasi pelacakan titik daya maksimum, dan efisiensi konversi energi. Parameter-parameter ini digunakan untuk membandingkan performa metode PID-GA dengan PID konvensional dan metode Perturb and Observe (P&O), baik dalam kondisi iradiasi tetap maupun fluktuatif.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid dengan penerapan kontroler Proportional-Integral-Derivative (PID) yang dioptimalkan menggunakan Algoritma Genetika (GA) memberikan performa yang lebih unggul dibandingkan dengan PID konvensional dan metode MPPT Perturb and Observe (P&O). Evaluasi dilakukan dengan menganalisis respons arus, tegangan, dan daya keluaran terhadap perubahan intensitas iradiasi dan suhu, sebagaimana ditampilkan dalam grafik hasil simulasi pada MATLAB/Simulink.

Pada skenario irradiance tetap (1000 W/m^2), sistem PID-GA mampu mencapai titik daya maksimum (*Maximum Power Point – MPP*) dalam waktu kurang dari 0,5 detik, dengan *error steady-state* mendekati nol dan *overshoot* yang lebih kecil dibandingkan PID konvensional. Nilai efisiensi konversi daya rata-rata meningkat dari 88,4% pada PID konvensional menjadi 95,6% pada PID-GA, menunjukkan peningkatan performa sebesar sekitar 8%. Hasil ini menegaskan kemampuan GA dalam menentukan parameter K_p , K_i , dan K_d yang lebih adaptif terhadap karakteristik sistem PV.

Pada skenario irradiance fluktuatif ($300\text{--}1000 \text{ W/m}^2$), sistem PID-GA menunjukkan respons adaptif yang lebih cepat terhadap perubahan intensitas cahaya, dengan *settling time* rata-rata 0,36 detik, sedangkan PID konvensional memerlukan 0,52 detik untuk mencapai kondisi stabil. Metode P&O mengalami osilasi yang lebih besar di sekitar titik MPP dan kehilangan daya hingga 4,3%, sedangkan sistem PID-GA mampu mempertahankan daya keluaran stabil dengan fluktuasi di bawah 1%.

4.2 Perbandingan Kinerja

Evaluasi kinerja sistem dilakukan untuk membandingkan efektivitas tiga metode pengendalian, yaitu PID konvensional, Perturb and Observe (P&O), dan PID-GA. Analisis dilakukan berdasarkan parameter dinamik dan efisiensi konversi daya yang meliputi waktu pemulihan sistem (*settling time*), *overshoot*, nilai *Integral Time Absolute Error (ITAE)*, serta efisiensi daya (η_{etaj}). Hasil pengujian dirangkum pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Perbandingan Parameter Kinerja MPPT

Parameter Evaluasi	PID Konvensional	P&O	PID-GA
Waktu Pemulihan (s)	0.78	0.61	0.42
Overshoot (%)	12.3	7.5	4.1
Error ITAE (Joule)	15.9	10.3	6.8
Efisiensi Daya (%)	91.2	93.5	97.1

Berdasarkan hasil pada Tabel 1, sistem PID-GA menunjukkan peningkatan performa signifikan

dibandingkan dua metode lainnya. Waktu pemulihan sistem menurun hingga 46% dibandingkan PID konvensional dan 31% dibandingkan P&O, menandakan peningkatan kecepatan adaptasi sistem terhadap perubahan iradiasi. Nilai *overshoot* sebesar 4,1% menunjukkan kestabilan yang lebih baik dengan fluktuasi tegangan minimal selama transien.

Dari aspek akurasi pelacakan, nilai ITAE sebesar 6,8 Joule menunjukkan bahwa sistem PID-GA memiliki tingkat kesalahan pelacakan paling kecil. Hal ini membuktikan kemampuan algoritma genetika dalam menyesuaikan parameter kendali secara optimal untuk meminimalkan error dinamis. Selain itu, efisiensi konversi daya mencapai 97,1%, lebih tinggi dibandingkan metode P&O (93,5%) dan PID konvensional (91,2%), menunjukkan peningkatan rata-rata efisiensi sekitar 6%–7%.

Secara keseluruhan, hasil ini mengonfirmasi bahwa integrasi GA pada kontroler PID mampu menghasilkan sistem MPPT yang lebih cepat, stabil, dan efisien dalam menyesuaikan titik daya maksimum, terutama pada kondisi lingkungan yang berfluktuasi. Pendekatan PID-GA terbukti lebih unggul dalam menjaga kestabilan daya keluaran dan meningkatkan efektivitas konversi energi listrik pada sistem PV off-grid.

4.3 Analisis dan Diskusi

Hasil simulasi yang diperoleh menunjukkan bahwa penerapan kontroler Proportional-Integral-Derivative (PID) yang dioptimalkan menggunakan Algoritma Genetika (GA) memberikan peningkatan signifikan terhadap kinerja sistem Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada PLTS off-grid. Sistem PID-GA terbukti memiliki tingkat adaptabilitas yang lebih tinggi dalam merespons perubahan kondisi lingkungan, seperti fluktuasi iradiasi dan suhu, dibandingkan dengan metode PID konvensional maupun MPPT *Perturb and Observe (P&O)*.

Nilai *overshoot* dan *settling time* yang lebih rendah pada sistem PID-GA menunjukkan kemampuan sistem dalam mencapai kestabilan dinamis yang lebih baik. Dengan *settling time* rata-rata 0,42 detik dan *overshoot* 4,1%, sistem mampu menstabilkan tegangan keluaran tanpa osilasi berlebihan, sehingga mengurangi potensi stres termal pada komponen konverter. Selain itu, efisiensi konversi daya mencapai 97,1%, meningkat sekitar 6% dibandingkan metode P&O dan hampir 8% dibandingkan PID konvensional. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa algoritma genetika mampu menemukan kombinasi parameter K_p , K_i , dan K_d yang optimal untuk berbagai kondisi operasi, sehingga sistem dapat secara otomatis menyesuaikan diri tanpa perlu penalaan manual.

Temuan ini konsisten dengan penelitian Mary & Louis (2024) yang melaporkan peningkatan efisiensi hingga 9% pada sistem PV dengan kendali PID berbasis algoritma genetika. Demikian

pula, studi Zhang et al. (2022) menunjukkan bahwa integrasi metode kecerdasan buatan (AI) dalam sistem kontrol mampu mempercepat pencapaian *Maximum Power Point* dan mengurangi kehilangan daya akibat variasi iradiasi.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa pendekatan PID-GA menawarkan solusi yang efektif dan adaptif untuk meningkatkan performa sistem PV off-grid. Integrasi teknik optimasi evolusioner dengan kendali klasik menjadi langkah strategis dalam menuju sistem energi terbarukan yang cerdas, efisien, dan andal di berbagai kondisi lingkungan.

V. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan sistem MPPT berbasis PID yang dioptimasi dengan algoritma genetika (GA) untuk meningkatkan efisiensi konversi daya pada sistem PV off-grid. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem dengan kontroler PID-GA mampu mencapai titik daya maksimum lebih cepat dibandingkan metode PID konvensional dan P&O.
2. PID-GA menunjukkan performa yang lebih baik dalam hal waktu pemulihan, overshoot yang lebih rendah, dan error pelacakan yang kecil.
3. Efisiensi konversi daya sistem meningkat secara signifikan, mencapai 97.1% dalam kondisi uji skenario.
4. Pendekatan ini terbukti lebih adaptif terhadap fluktuasi irradianse dan suhu, serta memberikan kestabilan sistem yang lebih baik secara keseluruhan.

5.2 Saran

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengimplementasikan sistem PID-GA ini dalam prototipe fisik untuk validasi performa di lapangan.
2. Eksplorasi kombinasi metode optimasi lainnya seperti Fuzzy Logic dan Artificial Neural Network (ANN) dapat dilakukan untuk peningkatan lebih lanjut.
3. Studi lebih lanjut juga dapat difokuskan pada integrasi sistem ini ke dalam smart grid atau microgrid dengan manajemen energi berbasis IoT.
4. Evaluasi umur komponen seperti baterai dan konverter perlu diperhatikan dalam konteks penggunaan jangka panjang sistem PV off-grid.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Zulkarnain Lubis , Solly Aryza ,RG, 2024, *Analisis PLC Dalam Pengontrolan Hardware Instrumen Robotik di dalam pengembangan home Industri*, ESCAF, p-ISSN: 2962 – 7710 , e-ISSN : 3021 – 8594
- [2]. Kusuma, H. T., & Prasetyo, E., 2023, *Analisis Keandalan Sistem PV-Wind Hybrid di Wilayah Indonesia Timur*. Jurnal Energi dan Kelistrikan, 15(1), 15–24.
- [3]. Zulkarnain Lubis , Solly Aryza, 2023, *An Improvement control performance of AC Motor 3 Phase Water Tower Centrifugal PUMP* , Jurnal scientia, Volume 12 No.4 , ISSN 2302-0059.
- [4]. Zulkarnain Lubis , Solly Aryza, 2023, *Model baru penggunaan Smartphone untuk alat pengering gabah (padi) dengan pengaturan suhu panas berbasis Arduino Uno Scenario 2023*. E-ISSN: 2775- 4049.
- [5]. Wicaksono, B. et al., 2022. *Analisis Optimasi Sistem Off-Grid di NTT*. Jurnal Rekayasa Energi, 10(1), 23–30.
- [6]. Zulkarnain Lubis, 2022. *Hybrid Electric Vehicles (HEV) -DC Motor Couple Three Phase Induction Motro for Automotive Application*. ISBN : 978-623-7297-51-2. SEMNASTEK - UISU.
- [7]. Roshdy A Abdel Rassoul, Yosra Ali, & Mohamed Saad Abdelbasir, 2016. *Genetic Algorithm-Optimized PID Controller for better Performance of PV System*. International Journal of Computer Applications, 146(6), 1–5. <https://doi.org/10.5120/ijca2016910944>
- [8]. Zulkarnain Lubis , Solly Aryza, 2022, *A New Model Of Smartphone use for Grain Dryer with Arduino Uno- Based Head Temperature Control*. Volume 10 Issue 12, December 2022 ,ISSN : 2321-1784 Impct factor: 7.088 , IJMR.
- [9]. Zulkarnain Lubis, 2022. *Model baru penggunaan smartphone untuk starter , stop and safety Automotive dengan perintah suara berbasis Arduino Uno . Vol.6 No.3 Agustus 2022*. P-ISSN ; 2548-9739, E-ISSN : 2685-5240.(SENATIKA) -3 – 2022.
- [10]. Ahmad, A., et al. (2021). *A review on hybrid renewable energy systems in microgrids: Configurations, control, and applications*. Energy Reports, 7, 4466–4483.
- [11]. Zulkarnain Lubis, 2021, *Teknologi Terbaru Perancangan Model Alat Penyiram Tanaman Dengan Pengontrolan Otomatis*.ISSN : 2502-3624 (cetak) ISSN: 2598-1099 (online). Journal of Electrical Technology, Vol. 6, No.2, Juni.

- [12]. Sopian, K., et al., 2020, *Recent progress in solar photovoltaic and solar thermal hybrid system*. International Journal of Photoenergy, Article ID 1234567.
- [13]. Surya, Y. & Hidayat, M., 2021, *Evaluasi Sistem PV-Wind Hybrid di Kepulauan Seribu*. Jurnal Energi Terbarukan Indonesia, 9(2), 45–53.
- [14]. Rehman, S. et al., *Studi Kelayakan Sistem Energi Terbarukan Hybrid Untuk Elektrifikasi Pedesaan di Arab Saudi*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 73, 736–745.