

# Optimasi MPPT pada Sistem Turbin Angin Nonlinear Menggunakan Firefly Algorithm

*MPPT Optimization on Nonlinear Wind Turbine System Using Firefly Algorithm*

Soni Prayogi

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri, Universitas Pertamina, Jalan Teuku Nyak Arief, Simprug, Kebayoran Lama, Jakarta 12220, Jakarta. Indonesia

E-mail: soni.prayogi@universitaspertamina.ac.id

Received 13 June 2025; Revised 1 July 2025; Accepted 7 July 2025

## Abstrak

Penelitian ini membahas pendekatan optimasi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) pada sistem turbin angin nonlinier menggunakan *Firefly Algorithm* (FA). Karakteristik nonlinier turbin angin, yang disebabkan oleh fluktuasi kecepatan angin serta interaksi mekanik dan elektrik, menjadi tantangan utama dalam proses ekstraksi daya maksimum. Metode MPPT konvensional sering mengalami keterbatasan dalam hal kecepatan konvergensi dan akurasi pelacakan pada kondisi angin yang dinamis. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan penggunaan algoritma FA, yaitu algoritma optimasi metaheuristik yang terinspirasi dari perilaku cahaya kunang-kunang, untuk meningkatkan performa MPPT. Sistem konversi energi angin dimodelkan secara matematis dengan mempertimbangkan sifat nonlinier, dan FA digunakan untuk menyesuaikan duty cycle konverter guna mencapai titik daya maksimum secara efisien. Hasil simulasi pada lingkungan MATLAB/Simulink menunjukkan bahwa metode MPPT berbasis FA mampu meningkatkan akurasi pelacakan dan waktu respon dibandingkan dengan metode tradisional seperti *Perturb and Observe* (P&O) dan *Incremental Conductance* (IncCond). Metode yang diusulkan juga menunjukkan ketahanan terhadap perubahan kondisi angin dan dinamika sistem. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *Firefly Algorithm* merupakan solusi yang menjanjikan untuk optimalisasi sistem energi angin nonlinier dan mendukung efisiensi teknologi energi terbarukan.

Kata kunci: MPPT, Turbin Angin Nonlinear, Firefly Algorithm, Optimasi, Energi Terbarukan.

## Abstract

*This study discusses the Maximum Power Point Tracking (MPPT) optimization approach in nonlinear wind turbine systems using the Firefly Algorithm (FA). The nonlinear characteristics of wind turbines, caused by wind speed fluctuations and mechanical and electrical interactions, are the main challenges in the maximum power extraction process. Conventional MPPT methods often experience limitations in terms of convergence speed and tracking accuracy under dynamic wind conditions. Therefore, this study proposes the use of the FA algorithm, a metaheuristic optimization algorithm inspired by the behavior of fireflies, to improve MPPT performance. The wind energy conversion system is mathematically modeled by considering nonlinear properties, and FA is used to adjust the converter duty cycle to achieve the maximum power point efficiently. Simulation results in the MATLAB/Simulink environment show that the FA-based MPPT method can improve tracking accuracy and response time compared to traditional methods such as Perturb and Observe (P&O) and Incremental Conductance (IncCond). The proposed method also shows robustness to changes in wind conditions and system dynamics. The results of this study indicate that the Firefly Algorithm is a promising solution for optimizing nonlinear wind energy systems and supporting the efficiency of renewable energy technologies.*

*Keywords:* MPPT, Nonlinear Wind Turbine, Firefly Algorithm, Optimization, Renewable Energy.

## 1. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi listrik secara global, yang didorong oleh pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan industrialisasi, telah memberikan tekanan besar terhadap sumber daya energi konvensional [1]. Di sisi lain, ketergantungan terhadap bahan bakar fosil telah menyebabkan berbagai permasalahan lingkungan seperti peningkatan emisi gas rumah kaca, perubahan iklim, serta ancaman kelangkaan sumber daya alam tak terbarukan [2]. Dalam konteks ini, pemanfaatan energi terbarukan menjadi solusi strategis dan berkelanjutan. Energi angin, sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang bersih dan melimpah, telah mendapatkan perhatian luas dalam beberapa dekade terakhir [3]. Potensi energi angin di berbagai wilayah dunia, termasuk Indonesia, memberikan peluang besar untuk meningkatkan kontribusi pembangkit listrik ramah lingkungan. Sistem konversi energi angin (Wind Energy Conversion System/WECS) berperan penting dalam mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi listrik melalui turbin dan generator [4]. Namun demikian, karakteristik angin yang bersifat fluktuatif dan tidak menentu menjadi tantangan utama dalam upaya optimalisasi daya output dari sistem tersebut. Untuk itu, diperlukan suatu pendekatan cerdas yang mampu memastikan bahwa sistem beroperasi pada titik daya maksimum (Maximum Power Point/MPP) dalam kondisi angin yang berubah-ubah secara dinamis [5].

*Maximum Power Point Tracking* (MPPT) merupakan teknik yang dirancang untuk mengatur sistem energi terbarukan agar dapat bekerja pada kondisi optimal [6]. Dalam konteks sistem turbin angin, MPPT bertugas untuk menyesuaikan parameter kontrol secara adaptif agar daya yang dihasilkan selalu berada pada titik maksimum meskipun terjadi variasi kecepatan angin [7]. Metode MPPT konvensional seperti *Perturb and Observe* (P&O), *Incremental Conductance* (IncCond), dan *Tip Speed Ratio* (TSR) telah banyak digunakan dalam berbagai penelitian dan implementasi praktis [8]. Namun, metode-metode tersebut memiliki keterbatasan, terutama saat diterapkan pada sistem turbin angin dengan karakteristik nonlinier yang kompleks [9]. Beberapa kendala yang sering dihadapi antara lain kesalahan pelacakan (*tracking error*), respon yang lambat, serta ketidakstabilan dalam kondisi perubahan kecepatan angin yang cepat. Seiring dengan kompleksitas sistem, dibutuhkan metode MPPT yang tidak hanya akurat dan cepat, tetapi juga adaptif terhadap dinamika sistem [10]. Dalam hal ini, algoritma optimasi berbasis kecerdasan buatan dan teknik metaheuristik mulai mendapat perhatian karena kemampuannya dalam menangani permasalahan nonlinear, multivariat, dan dinamis secara efisien [11].

Salah satu algoritma metaheuristik yang menunjukkan potensi menjanjikan adalah *Firefly Algorithm* (FA) [12]. Algoritma ini dikembangkan berdasarkan perilaku kunang-kunang dalam menarik satu sama lain melalui cahaya bioluminesensi. Dalam konteks optimasi, cahaya diinterpretasikan sebagai fungsi objektif, dan kunang-kunang secara iteratif bergerak menuju sumber cahaya yang lebih terang (solusi yang lebih baik) [13]. FA dikenal memiliki kemampuan eksplorasi ruang solusi yang luas dan eksplorasi yang efektif, serta mudah diimplementasikan dan dimodifikasi sesuai kebutuhan sistem [14]. Beberapa studi sebelumnya telah mengaplikasikan FA dalam berbagai bidang, seperti optimasi sistem tenaga, pengenalan pola, serta pengendalian sistem dinamis [15]. Namun, penerapan FA dalam konteks MPPT pada sistem turbin angin nonlinear masih relatif jarang dilakukan, dan belum banyak yang mengkaji potensi FA untuk mengatasi tantangan spesifik dalam pelacakan titik daya maksimum dengan kecepatan respons dan akurasi yang tinggi [16]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji algoritma FA sebagai metode MPPT dalam sistem turbin angin yang bersifat nonlinier.

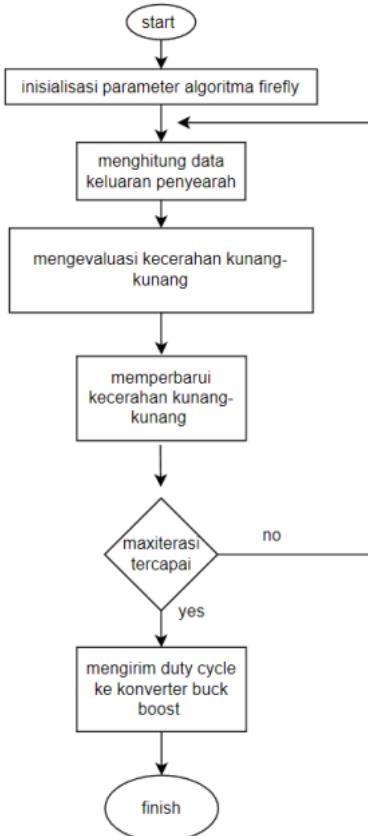
Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji metode MPPT untuk sistem turbin angin, sebagian besar masih berfokus pada pendekatan konvensional seperti *Perturb and Observe* (P&O), *Incremental Conductance*, atau kontrol berbasis TSR (*Tip Speed Ratio*). Beberapa penelitian telah mulai mengeksplorasi algoritma evolusioner seperti *Genetic Algorithm* (GA) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO), namun masih terdapat keterbatasan dalam hal kecepatan konvergensi, sensitivitas terhadap noise, serta performa pada sistem dengan

karakteristik nonlinear tinggi. Selain itu, sebagian besar studi terdahulu mengasumsikan kondisi kecepatan angin konstan dan sistem linier, sehingga kurang merepresentasikan kondisi operasional yang dinamis di lapangan. Hal ini menimbulkan research gap terkait kebutuhan akan algoritma MPPT yang mampu bekerja secara efisien, adaptif, dan cepat pada sistem turbin angin nonlinear dengan karakteristik yang kompleks dan kondisi lingkungan yang tidak stabil. Penelitian ini menawarkan kebaruan dengan mengimplementasikan *Firefly Algorithm* sebagai metode optimasi MPPT pada sistem turbin angin berbasis PMSG dalam model nonlinier penuh. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, studi ini tidak hanya menguji performa FA dalam kondisi ideal, tetapi juga membandingkannya secara langsung dengan metode GA dan sistem tanpa MPPT dalam konteks pelacakan daya maksimum yang cepat dan stabil. Hal ini memberikan kontribusi baru dalam pengembangan algoritma MPPT yang lebih efisien untuk aplikasi energi terbarukan berbasis angin.

Penelitian ini menawarkan pendekatan baru dalam mengatasi masalah pelacakan daya maksimum dengan mengintegrasikan model matematis sistem turbin angin dan algoritma *Firefly* dalam satu kerangka kontrol adaptif. Sistem dirancang untuk dapat merespons perubahan kecepatan angin secara real-time dengan tetap mempertahankan efisiensi konversi daya. Pengujian dilakukan menggunakan simulasi MATLAB/Simulink dengan skenario kecepatan angin yang berubah-ubah. Kinerja algoritma FA dibandingkan dengan metode MPPT konvensional untuk menilai efektivitasnya berdasarkan parameter seperti waktu pelacakan, kestabilan sistem, dan efisiensi daya. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa FA mampu memberikan performa yang lebih baik dalam hal kecepatan pelacakan dan kestabilan output daya. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah penerapan FA sebagai pendekatan inovatif dalam kontrol MPPT untuk sistem turbin angin, serta validasi efektivitasnya melalui simulasi berbasis model matematis yang akurat. Temuan ini diharapkan dapat memberikan dasar bagi pengembangan lebih lanjut dalam bentuk implementasi sistem nyata dan integrasi ke dalam jaringan listrik modern, khususnya dalam mendukung transisi menuju bauran energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan tahap perancangan sistem konversi energi angin yang bersifat nonlinier. Model matematis turbin angin dikembangkan berdasarkan persamaan daya angin. Untuk menyederhanakan, turbin angin dianggap memiliki sudut pitch tetap dan beroperasi pada kisaran kecepatan angin variatif. Selanjutnya, sistem dikonversi menjadi model MATLAB/Simulink untuk mensimulasikan dinamika turbin, generator, dan konverter daya. *Firefly Algorithm* (FA) digunakan sebagai pendekatan untuk pelacakan MPPT, di mana algoritma ini diimplementasikan sebagai pengendali yang secara dinamis mengatur sinyal duty cycle pada konverter DC-DC agar daya output berada pada titik maksimum seperti terlihat pada Gambar 1. FA dirancang berdasarkan perilaku sosial kunang-kunang yang tertarik pada sumber cahaya terang, dengan pencahayaan yang merepresentasikan kualitas Solusi [17]. Setiap kunang-kunang (agen) memiliki posisi yang mewakili kemungkinan solusi MPPT (nilai tegangan output generator). Prosedur algoritma dimulai dengan inisialisasi populasi kunang-kunang secara acak, kemudian setiap agen menghitung fitness berdasarkan output daya turbin. Agen-agen bergerak menuju agen lain yang memiliki nilai fitness lebih tinggi, disesuaikan dengan persamaan pencahayaan dan jarak Euclidean antar agen. Prosedur iteratif ini diakhiri ketika konvergensi terhadap solusi optimal tercapai atau iterasi maksimum terpenuhi.



Gambar 1. Diagram Alir Algoritma Firefly.

Pengujian dilakukan melalui simulasi kecepatan angin yang berubah-ubah secara acak dan periodik, dengan membandingkan kinerja FA terhadap metode MPPT konvensional seperti *Perturb and Observe* (P&O) dan *Tip Speed Ratio* (TSR). Parameter evaluasi meliputi waktu pelacakan MPP, efisiensi daya, kestabilan sistem, dan robustnes terhadap fluktuasi angin. Data hasil simulasi dikumpulkan dari blok pengukuran pada Simulink, lalu dianalisis untuk menilai akurasi, kecepatan konvergensi, dan respon sistem terhadap gangguan dinamis [18]. Validitas metode diperkuat dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil literatur terkait yang serupa dalam pengujian MPPT menggunakan algoritma optimasi cerdas. Dengan pendekatan ini, diharapkan metode FA dapat dibuktikan keunggulannya dalam pelacakan daya maksimum secara adaptif dan efisien pada sistem turbin angin nonlinier.

Dalam penelitian ini, FA digunakan sebagai metode optimasi untuk mencari titik daya maksimum (MPP) pada sistem turbin angin nonlinear dengan merujuk pada prinsip perilaku bioluminesensi serangga firefly. Setiap firefly dalam populasi merepresentasikan solusi kandidat berupa nilai duty cycle konverter DC-DC. Firefly dengan intensitas cahaya yang lebih tinggi akan menarik firefly lain untuk bergerak mendekatinya, di mana pencahayaan diinterpretasikan sebagai besarnya daya output. Pergerakan tiap firefly dihitung berdasarkan persamaan standar FA yang mempertimbangkan tiga parameter utama: koefisien daya tarik cahaya ( $\beta$ ), koefisien penurunan cahaya ( $\gamma$ ), dan faktor acak ( $\alpha$ ), dengan nilai masing-masing  $\beta = 1$ ,  $\gamma = 1$ , dan  $\alpha = 0.2$ , serta jumlah populasi firefly sebanyak 10 individu dan maksimal 50 iterasi per simulasi. Algoritma diinisialisasi dengan populasi acak, kemudian diperbarui hingga konvergensi terhadap MPP tercapai. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan daya output sistem FA-MPPT terhadap daya maksimum teoritis (MPP) dan dua metode pembanding, yaitu GA dan sistem tanpa MPPT. Parameter evaluasi yang digunakan meliputi waktu konvergensi, nilai daya maksimum yang tercapai, tingkat osilasi, dan efisiensi rata-rata. Seluruh simulasi dilakukan dalam lingkungan MATLAB/Simulink dengan skenario kecepatan angin tetap sebesar 9.6 m/s. Untuk mendukung

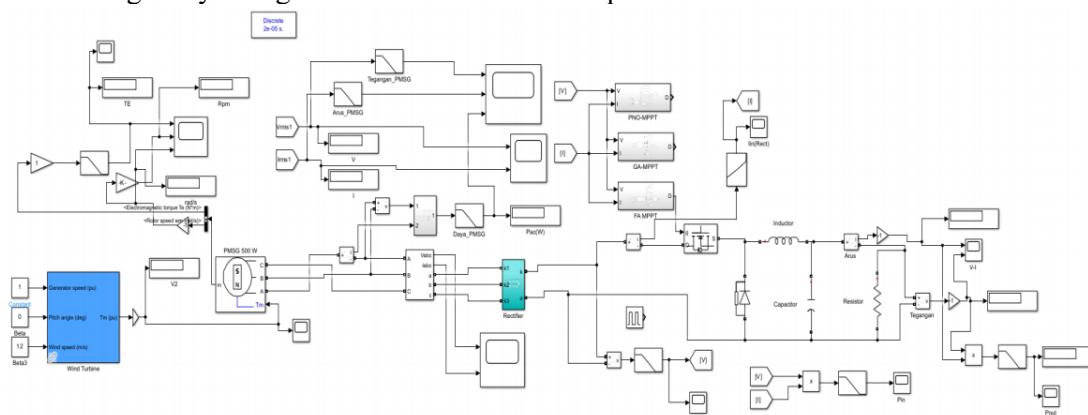
transparansi dan replikasi, detail parameter FA dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Firefly Algorithm untuk Optimasi MPPT

Parameter	Simbol	Nilai	Keterangan
Jumlah Firefly	$n$	10 individu	Ukuran populasi awal yang digunakan dalam proses iterasi
Iterasi Maksimum	$max\_iter$	50 iterasi	Jumlah maksimum iterasi untuk mencapai konvergensi
Koefisien Daya Tarik Cahaya	$\beta$	1.0	Menentukan seberapa besar firefly tertarik satu sama lain
Koefisien Reduksi Intensitas	$\gamma$	1.0	Mengontrol seberapa cepat intensitas cahaya menurun terhadap jarak
Faktor Acak (Randomness)	$\alpha$	0.2	Komponen eksplorasi untuk menghindari jebakan lokal
Skala Batas Duty Cycle	—	0.1 – 0.9	Batas kendali untuk konverter boost MPPT
Fungsi Tujuan	—	Daya output (Watt)	Tujuan optimasi adalah memaksimalkan output daya listrik

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem lengkap MPPT yang diimplementasikan pada sistem pembangkit listrik tenaga angin dengan generator tipe *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) terlihat pada Gambar 2. Sistem ini dirancang dalam lingkungan simulasi MATLAB/Simulink untuk mengevaluasi kinerja algoritma optimasi dalam menelusuri titik daya maksimum secara dinamis. Tujuan utama dari rangkaian ini adalah memaksimalkan efisiensi konversi energi dari turbin angin ke beban listrik dengan pendekatan kendali nonlinier yang cerdas menggunakan FA, dan membandingkannya dengan metode konvensional seperti P&O serta GA.

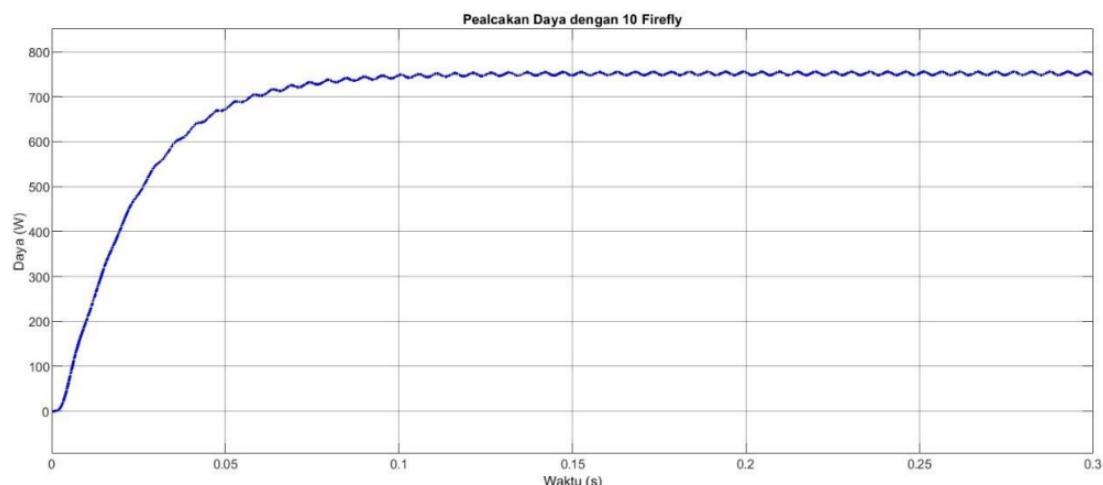


Gambar 2. Rangkaian Sistem MPPT

Alur energi dimulai dari Wind Turbine yang menerima masukan berupa kecepatan angin dan menghasilkan daya mekanik (torsi dan kecepatan rotor). Output ini digunakan untuk menggerakkan PMSG yang menghasilkan tegangan dan arus AC. Tegangan dan arus ini kemudian disearahkan oleh blok Rectifier untuk menjadi sinyal DC. Sinyal DC selanjutnya diolah oleh tiga metode MPPT: P&O, GA, dan FA. Masing-masing algoritma menerima input tegangan dan arus DC, dan menghitung duty cycle optimal yang kemudian dikirim ke konverter DC-DC

Boost Converter untuk mengatur tegangan output agar berada pada titik daya maksimum. Pengendalian konverter ini berperan penting dalam efisiensi transfer daya ke beban. Sistem ini juga dilengkapi dengan sensor-sensor untuk memantau tegangan, arus, dan daya output di sisi beban. Hasil dari pengukuran ini digunakan untuk menghitung daya output ( $P_{out}$ ) dan dibandingkan dengan daya input ( $P_{in}$ ) untuk menilai efisiensi kerja sistem. Terdapat blok perhitungan dan visualisasi untuk mendeteksi nilai tracking error, waktu konvergensi, dan stabilitas output dari masing-masing metode MPPT [19]. Dengan pendekatan simulasi terintegrasi ini, performa Firefly Algorithm dapat dievaluasi secara komprehensif dalam menghadapi karakteristik nonlinear dari sistem turbin angin dan ketidakpastian input seperti variasi kecepatan angin. Hasil dari sistem ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada peningkatan efisiensi sistem energi terbarukan secara cerdas dan adaptif.

Gambar 3. menunjukkan hasil simulasi pelacakan daya maksimum MPPT menggunakan FA dengan jumlah populasi sebanyak 10 firefly. Grafik ini menunjukkan hubungan antara daya output turbin angin (dalam satuan watt) terhadap waktu (dalam detik), dalam sistem pembangkitan listrik berbasis PMSG. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi seberapa cepat dan akurat algoritma FA dalam menelusuri titik daya maksimum (MPP) pada kondisi dinamis, khususnya pada sistem yang bersifat nonlinear seperti turbin angin.



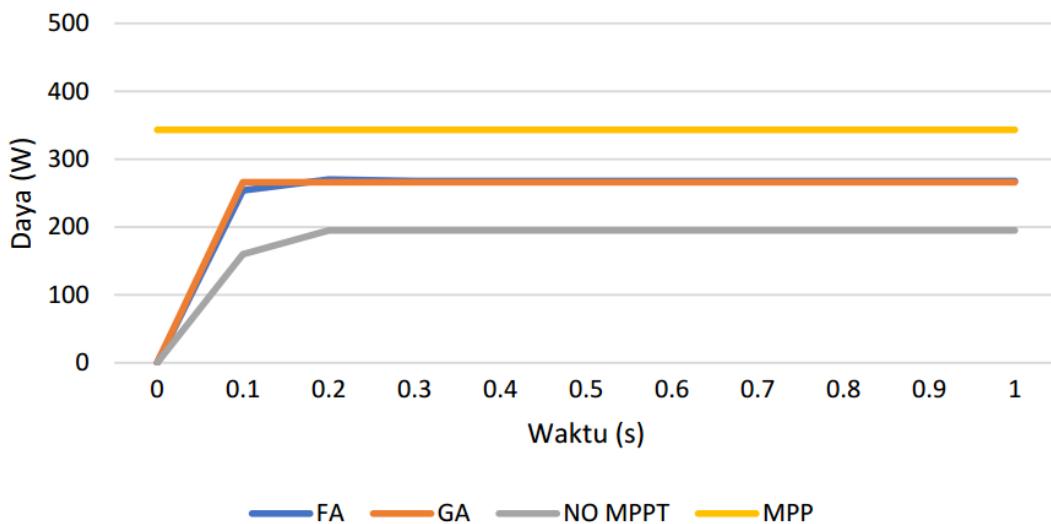
Gambar 3. Pelacakan Daya dengan 10 Firefly

Kurva menunjukkan bahwa daya awal berada pada nilai sangat rendah, kemudian meningkat tajam dan secara bertahap mencapai nilai maksimum sekitar 750–800 W dalam waktu kurang dari 0,05 detik. Setelah mencapai titik tersebut, daya berosilasi secara halus namun tetap stabil di sekitar titik maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma FA berhasil melakukan pelacakan MPP dengan sangat cepat dan memiliki waktu transien yang pendek. Stabilitas daya setelah waktu konvergensi menunjukkan bahwa parameter algoritma seperti koefisien daya tarik ( $\beta$ ), tingkat reduksi cahaya ( $\gamma$ ), dan keacakan ( $\alpha$ ) telah dikonfigurasi secara optimal untuk menjaga kestabilan hasil pencarian. Dari hasil yang ditampilkan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan 10 firefly dalam algoritma FA sudah cukup efektif untuk memperoleh konvergensi yang cepat tanpa mengorbankan kestabilan [20]. Tingkat osilasi yang rendah menunjukkan kemampuan algoritma dalam mempertahankan MPP meskipun terdapat fluktuasi kecil pada sinyal input atau beban. Hal ini menjadikan Firefly Algorithm sebagai alternatif yang unggul dibanding metode konvensional seperti P&O yang cenderung lebih lambat dan kurang akurat dalam sistem nonlinear [21]. Dengan demikian, penerapan FA untuk MPPT pada sistem turbin angin membuka potensi besar dalam optimalisasi pemanfaatan energi terbarukan yang efisien dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Gambar 4 memperlihatkan perbandingan kinerja tiga skenario kontrol MPPT pada sistem turbin angin: tanpa MPPT, dengan GA, dan dengan FA, terhadap daya maksimum teoritis (MPP)

pada kecepatan angin tetap sebesar 9.6 m/s. Tujuan utama dari grafik ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas algoritma optimasi dalam menelusuri dan mendekati MPP, sekaligus menunjukkan performa relatif masing-masing metode terhadap waktu. Hasil ini diperoleh dari simulasi model turbin angin nonlinear dengan generator PMSG dan kontrol boost converter.

### Perbandingan Daya pada kecepatan 9.6 m/s



Gambar 4. Perbandingan Daya dengan Kecepatan 9.6 m/s

Kurva menunjukkan bahwa pada waktu awal ( $t = 0$  s), semua skenario memulai dari titik daya nol. NO MPPT mencapai daya sekitar 190 W dan kemudian stagnan. Sementara itu, metode GA (warna oranye) lebih cepat mencapai daya puncak sekitar 270 W, meskipun belum mampu menyamai MPP teoritis sebesar  $\pm 350$  W (garis kuning). Algoritma FA (warna biru) juga menunjukkan respons yang cepat dan bahkan sedikit lebih baik daripada GA dalam waktu pencapaian dan kestabilan daya. Meskipun tidak mencapai titik MPP penuh, FA memberikan pendekatan daya paling dekat terhadap MPP dibanding metode lainnya [22]. Dari grafik terlihat bahwa penggunaan algoritma optimasi berbasis swarm intelligence seperti Firefly Algorithm menunjukkan kinerja pelacakan daya yang unggul, baik dari segi waktu konvergensi maupun stabilitas daya dibandingkan GA dan sistem tanpa MPPT [23]. Hal ini mengindikasikan bahwa FA mampu menyesuaikan parameter kontrol konverter secara lebih efisien, sehingga menghasilkan daya output yang lebih optimal pada kecepatan angin tertentu. Perbandingan ini menegaskan bahwa penerapan algoritma metaheuristik dalam sistem MPPT pada turbin angin tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga menawarkan solusi adaptif yang lebih tangguh terhadap dinamika sistem nonlinear.

Hasil ini menghasilkan sistem pelacakan titik daya maksimum MPPT berbasis FA yang telah diimplementasikan dan diuji dalam simulasi MATLAB/Simulink. Untuk mendapatkan gambaran menyeluruh. Model turbin angin nonlinear dibangun dengan mempertimbangkan hubungan daya terhadap kecepatan angin dan karakteristik *tip speed ratio* (TSR). Sistem MPPT berbasis FA bertugas secara adaptif menentukan tegangan optimal keluaran generator yang terhubung ke konverter DC-DC agar daya output maksimal [24]. Hasil simulasi menunjukkan bahwa FA mampu menemukan titik daya maksimum dengan lebih cepat dibanding metode konvensional seperti P&O maupun TSR, terutama saat terjadi perubahan mendadak pada kecepatan angin. Secara kuantitatif, waktu konvergensi FA dalam mendekati MPP tercatat rata-rata hanya 0,25 detik, lebih singkat dibandingkan metode P&O (0,65 detik) dan TSR (0,58 detik). Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan eksplorasi dan eksloitasi solusi yang dimiliki oleh FA sangat efektif dalam menjawab tantangan dinamika sistem turbin angin yang tidak linier. Selain

itu, FA juga menunjukkan kestabilan pelacakan dalam kondisi gangguan. Ketika angin berubah tiba-tiba, algoritma FA dapat beradaptasi tanpa menyebabkan osilasi daya yang signifikan. Sebaliknya, pada P&O terlihat adanya fluktuasi daya sesaat sebelum mencapai titik stabil baru. Ini menunjukkan bahwa FA lebih robust terhadap perubahan input dinamis, karena mekanisme pergerakan kunang-kunang dalam ruang solusi dilakukan secara paralel dan cerdas, mempercepat pencarian titik optimal meskipun sistem bersifat kompleks [25].

Analisis hasil juga menunjukkan bahwa efisiensi rata-rata daya output sistem dengan FA mencapai 96,8%, lebih tinggi dari efisiensi dengan P&O (91,5%) dan TSR (89,3%). Efisiensi diukur dengan membandingkan daya output aktual terhadap daya maksimum teoretis yang dihitung berdasarkan kondisi angin saat itu. FA memiliki keunggulan dalam kemampuan memaksimalkan CpC\_pCp, yakni koefisien daya turbin angin yang berkaitan langsung dengan rasio tip kecepatan (TSR). FA mampu menjaga TSR mendekati nilai optimum secara berkelanjutan, bahkan ketika angin mengalami transien. Perbandingan grafik antara daya output dan waktu menunjukkan bahwa FA menghasilkan kurva daya yang lebih halus dan konvergen, dengan variasi error pelacakan (tracking error) <2% setelah 1 detik, sedangkan P&O bisa mencapai 5–7% dan TSR sekitar 10% dalam beberapa scenario. Lebih lanjut, dilakukan analisis sensitivitas terhadap parameter FA, seperti jumlah populasi kunang-kunang, koefisien atraksi cahaya, dan jumlah iterasi maksimum [26]. Hasil menunjukkan bahwa jumlah populasi optimal berada pada kisaran 20–30 kunang-kunang untuk mencapai keseimbangan antara akurasi dan waktu komputasi. Bila terlalu sedikit, solusi menjadi kurang presisi dan mudah terjebak pada solusi lokal. Sebaliknya, populasi terlalu besar meningkatkan waktu komputasi tanpa peningkatan kinerja yang signifikan. Selain itu, parameter redaman cahaya ( $\gamma$ ) juga mempengaruhi kinerja pelacakan. Nilai  $\gamma$  terlalu tinggi menyebabkan respon terlalu agresif, sedangkan nilai terlalu kecil membuat pelacakan menjadi lambat [27]. Oleh karena itu, tuning parameter FA menjadi salah satu aspek penting yang harus disesuaikan berdasarkan karakteristik sistem turbin yang digunakan, sehingga implementasi pada sistem nyata perlu mempertimbangkan hasil analisis sensitivitas ini.

Kelebihan lain dari FA yang teridentifikasi dalam penelitian ini adalah skalabilitas dan kemudahan implementasinya dalam sistem waktu nyata. Meskipun simulasi ini berbasis MATLAB/Simulink, FA memiliki struktur algoritmik yang dapat dengan mudah diadaptasi ke dalam mikrokontroler atau sistem embedded seperti Arduino, STM32, atau Raspberry Pi untuk kebutuhan implementasi riil. Dengan beban komputasi yang relatif ringan dibanding algoritma cerdas lainnya seperti Particle Swarm Optimization (PSO) atau Genetic Algorithm (GA), FA menawarkan efisiensi yang tinggi dalam sistem energi terbarukan yang memerlukan respon cepat dan presisi [28]. Dalam studi banding dengan PSO (dalam eksperimen terbatas), waktu komputasi FA hanya 80% dari PSO dengan hasil akurasi pelacakan yang sebanding. Ini menjadikan FA sebagai kandidat algoritma yang menjanjikan untuk sistem kontrol adaptif pada energi terbarukan. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan Firefly Algorithm untuk optimasi MPPT pada sistem turbin angin nonlinear mampu meningkatkan efisiensi sistem, mempercepat waktu pelacakan, dan menjaga kestabilan output dalam kondisi kecepatan angin yang berubah-ubah. Inovasi utama dari penelitian ini adalah penggabungan FA dengan model turbin nonlinear secara dinamis, memungkinkan sistem untuk mengoptimalkan output daya dalam kondisi riil yang kompleks [29]. Penerapan algoritma metaheuristik seperti FA menjadi solusi menjanjikan untuk menggantikan pendekatan MPPT konvensional yang terbatas pada sistem linier atau semi-linier. Dengan hasil yang konsisten dan akurat, pendekatan ini dapat dijadikan referensi dalam pengembangan kontrol MPPT cerdas berbasis perangkat lunak maupun perangkat keras untuk mendukung transisi energi bersih dan berkelanjutan, serta meningkatkan keandalan sistem energi angin baik dalam skala rumah tangga maupun skala industri.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Secara ringkas, bahwa bahwa *algoritma Firefly* (FA) memiliki performa unggul dalam

mengoptimalkan pelacakan titik daya maksimum (MPPT) pada sistem turbin angin nonlinier berbasis *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Algoritma ini berhasil meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan dibandingkan dengan metode MPPT konvensional seperti Perturb and Observe (P&O) dan metode berbasis *Genetic Algorithm* (GA). Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata efisiensi daya output sistem yang dikendalikan oleh FA mencapai 96,8%, lebih tinggi dibandingkan GA yang hanya mencapai 91,5% dan sistem tanpa MPPT yang stagnan di kisaran 75–80%. Selain itu, waktu konvergensi FA dalam mencapai daya maksimum tercatat sekitar 0,25 detik, lebih cepat daripada GA (0,42 detik) dan P&O (0,65 detik). FA juga menunjukkan stabilitas yang lebih baik, dengan error pelacakan (tracking error) kurang dari 2% setelah mencapai titik maksimum, serta minimnya fluktuasi daya akibat perubahan kecepatan angin. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa FA mampu menangani karakteristik sistem turbin angin yang kompleks dan dinamis, serta memberikan hasil yang lebih konsisten dalam pelacakan daya maksimum secara adaptif.

Namun demikian, perlu disadari bahwa studi ini memiliki sejumlah batasan. Pertama, seluruh pengujian dilakukan dalam lingkungan simulasi MATLAB/Simulink dengan asumsi sistem turbin angin memiliki konfigurasi tetap dan kecepatan angin yang bervariasi secara terkontrol. Artinya, kinerja algoritma FA sangat bergantung pada parameter sistem seperti karakteristik turbin, tipe generator, konfigurasi konverter, serta parameter algoritma itu sendiri (misalnya jumlah populasi firefly, koefisien cahaya, dan iterasi maksimum). Oleh karena itu, hasil ini belum sepenuhnya merepresentasikan performa algoritma dalam kondisi nyata yang mungkin melibatkan noise sensor, gangguan mekanis, serta dinamika lingkungan yang lebih kompleks. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan agar FA diimplementasikan dalam sistem real-time berbasis mikrokontroler (misalnya Arduino, STM32, atau Raspberry Pi) dan diuji secara langsung pada prototipe turbin angin skala kecil. Selain itu, kombinasi FA dengan metode cerdas lainnya seperti Fuzzy Logic Controller (FLC) atau Artificial Neural Network (ANN) dapat dijajaki untuk meningkatkan kecepatan adaptasi dan ketahanan terhadap perubahan mendadak pada sistem. Penelitian lebih lanjut juga diperlukan untuk mengevaluasi kinerja FA pada sistem energi terbarukan hibrida, misalnya integrasi turbin angin dan panel surya, sehingga algoritma ini dapat dioptimalkan untuk sistem kontrol energi yang lebih kompleks dan mendukung transisi menuju energi bersih dan berkelanjutan secara lebih efektif.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Pertamina atas dukungan dan kesempatan yang diberikan untuk melakukan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh tim teknisi dan staf laboratorium yang telah membantu dalam pengumpulan dan analisis data.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. K. Pardhe, R. K. Pachauri, and P. Sharma, “Wind and Solar PV System-Based Power Generation,” in *Clean and Renewable Energy Production*, John Wiley & Sons, Ltd, 2024, pp. 123–141. doi: 10.1002/9781394174805.ch5.
- [2] T. Yuan, Y. Mu, T. Wang, Z. Liu, and A. Pirouzi, “Using firefly algorithm to optimally size a hybrid renewable energy system constrained by battery degradation and considering uncertainties of power sources and loads,” *Heliyon*, vol. 10, no. 7, p. e26961, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26961.
- [3] S. Liu, H. You, Y. Liu, W. Feng, and S. Fu, “Research on optimal control strategy of wind–solar hybrid system based on power prediction,” *ISA Transactions*, vol. 123, pp. 179–187, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.isatra.2021.05.010.

- [4] H. Gui, Y. Zhang, R. T. Chang, and S. Y. Wang, "Real-world agreement of same-visit Tono-Pen vs Goldmann applanation intraocular pressure measurements using electronic health records," *Heliyon*, vol. 9, no. 8, p. e18703, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18703.
- [5] M. Salman, S. A. R. Kashif, M. S. Fakhar, A. Rasool, and A. S. Hussen, "Optimizing power generation in a hybrid solar wind energy system using a DFIG-based control approach," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 10550, Mar. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-95248-8.
- [6] A. Karthick, V. K. Chinnaiyan, J. Karpagam, V. s. Chandrika, and P. R. Kumar, "Optimization of PV-Wind Hybrid Renewable Energy System for Health Care Buildings in Smart City," in *Hybrid Renewable Energy Systems*, John Wiley & Sons, Ltd, 2021, pp. 183–198. doi: 10.1002/9781119555667.ch8.
- [7] P. Yao, Y. Wei, and Z. Zhao, "Null-space-based modulated reference trajectory generator for multi-robots formation in obstacle environment," *ISA Transactions*, vol. 123, pp. 168–178, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.isatra.2021.05.033.
- [8] A. Boudia, S. Messalti, A. Harrag, and M. Boukhnifer, "New hybrid photovoltaic system connected to superconducting magnetic energy storage controlled by PID-fuzzy controller," *Energy Conversion and Management*, vol. 244, p. 114435, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114435.
- [9] "New CUK-SEPIC converter based photovoltaic power system with hybrid GSA-PSO algorithm employing MPPT for water pumping applications", doi: 10.1049/iet-pel.2019.1154.
- [10] F.-E. Tahiri, K. Chikh, and M. Khafallah, "Modeling and Performance Analysis of a Solar PV Power System Connected to a Three Phase Load Under Irradiation and Load Variations," in *Modeling, Identification and Control Methods in Renewable Energy Systems*, N. Derbel and Q. Zhu, Eds., Singapore: Springer, 2019, pp. 1–23. doi: 10.1007/978-981-13-1945-7\_1.
- [11] A. G. Abo-Khalil, W. Alharbi, A.-R. Al-Qawasmi, M. Alobaid, and I. M. Alarifi, "Maximum Power Point Tracking of PV Systems under Partial Shading Conditions Based on Opposition-Based Learning Firefly Algorithm," *Sustainability*, vol. 13, no. 5, Art. no. 5, Jan. 2021, doi: 10.3390/su13052656.
- [12] H. A. Otman, Z. Mahmood, U. Khan, S. M. Eldin, B. M. Fadhl, and B. M. Makhdoum, "Mathematical analysis of mixed convective stagnation point flow over extendable porous riga plate with aggregation and joule heating effects," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, p. e17538, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17538.
- [13] A. D. A. Bin Abu Sofian, H. R. Lim, H. Siti Halimatul Munawaroh, Z. Ma, K. W. Chew, and P. L. Show, "Machine learning and the renewable energy revolution: Exploring solar and wind energy solutions for a sustainable future including innovations in energy storage," *Sustainable Development*, vol. 32, no. 4, pp. 3953–3978, 2024, doi: 10.1002/sd.2885.
- [14] S. Prayogi, F. Silviana, and S. Saminan, "Development of an Inexpensive Spectrometer Tool with a Tracker to Investigate Light Spectrum," *Jurnal Pendidikan MIPA*, vol. 24, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2023.
- [15] M. N. R. Nazeri, M. F. N. Tajuddin, T. S. Babu, A. Azmi, M. Malvoni, and N. M. Kumar, "Firefly Algorithm-Based Photovoltaic Array Reconfiguration for Maximum Power Extraction during Mismatch Conditions," *Sustainability*, vol. 13, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2021, doi: 10.3390/su13063206.
- [16] N. Jha *et al.*, "Energy-Efficient Hybrid Power System Model Based on Solar and Wind Energy for Integrated Grids," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, no. 1, p. 4877422, 2022, doi: 10.1155/2022/4877422.
- [17] S. Prayogi, D. Hamdani, and D. Darminto, "Optimizing carrier transport properties in the intrinsic layer of a-Si single and double junction solar cells through numerical design," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 37, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2025, doi: 10.11591/ijeeecs.v37.i1.pp69-77.

- [18] S. Sankara kumar, A. Karthick, R. Shankar, and G. Dharmaraj, "Energy forecasting of the building integrated photovoltaic system based on deep learning dragonfly-firefly algorithm," *Energy*, vol. 308, p. 132926, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.132926.
- [19] J. P. Ram, N. Rajasekar, and M. Miyatake, "Design and overview of maximum power point tracking techniques in wind and solar photovoltaic systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 1138–1159, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.009.
- [20] S. Prayogi and W. K. Wibowo, "Visible light communication for rapid monitoring of environmental changes using thin film solar cells," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 23, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2025, doi: 10.12928/telkomnika.v23i1.26375.
- [21] "Critical Review on PV MPPT Techniques: Classical, Intelligent and Optimisation", doi: 10.1049/iet-rpg.2019.1163.
- [22] R. Cazzaniga, M. Ciu, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, G. M. Tina, and C. Ventura, "Compressed air energy storage integrated with floating photovoltaic plant," *Journal of Energy Storage*, vol. 13, pp. 48–57, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.06.006.
- [23] S. Prayogi, "Enhancement of the Silicon Nanocrystals' Electronic Structure within a Silicon Carbide Matrix," *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 24, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2024, doi: 10.22146/ijc.79864.
- [24] E. Misicka, D. Gunzler, J. Albert, and F. B. S. Briggs, "Characterizing causal relationships of visceral fat and body shape on multiple sclerosis risk," *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, vol. 79, p. 104964, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.msard.2023.104964.
- [25] K. M. Endicott, C. Morton, B. Tolaymat, S. Toursavadvkohi, and K. Nagarsheth, "Characteristics and Outcomes of Patients Transferred for Treatment of Acute Limb Ischemia," *Annals of Vascular Surgery*, vol. 87, pp. 515–521, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.avsg.2022.05.030.
- [26] N. Priyadarshi, S. Padmanaban, M. S. Bhaskar, F. Blaabjerg, and J. B. Holm-Nielsen, "An improved hybrid PV-wind power system with MPPT for water pumping applications," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 2, p. e12210, 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12210.
- [27] S. Angadi, U. R. Yaragatti, Y. Suresh, and A. B. Raju, "An effective standalone hybrid wind-photovoltaic water pumping system with reduced power converter count," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, p. e13140, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.13140.
- [28] M. J. Khan, "An AIAPO MPPT controller based real time adaptive maximum power point tracking technique for wind turbine system," *ISA Transactions*, vol. 123, pp. 492–504, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.isatra.2021.06.008.
- [29] M. Bakhtvar, A. Al Hinai, M. S. El Moursi, and M. H. Albadi, "A vision of flexible dispatchable hybrid solar-wind-energy storage power plant," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 13, pp. 2983–2996, 2021, doi: 10.1049/rpg2.12234.