

Simulasi Hybrid Differential Evolution dan Particle Swarm Optimization untuk Tuning Pid pada Pengaturan Suhu Inkubator

Priskalia Grasiana Nur ^{1, a} Ali Warsito ^{1, b} Laura Anastasi Sesaragi Laponi ^{1, c}

¹ Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana

Jl. Adi Sucipto Penfui, Kota Kupang, 85001, Indonesia

e-mail: ^{a*} nurgrasiana@gmail.com, ^b ali.warsito@staf.undana.ac.id, dan ^c laura_laponi@staf.undana.ac.id

Diajukan: 2 Juli 2026; Diterima: 7 Agustus 2026; Diterbitkan: 7 September 2026

Abstrak

Pengaturan suhu inkubator yang stabil dan presisi sangat penting untuk menjaga kondisi bayi prematur yang sensitif terhadap perubahan suhu. Namun, ketidakstabilan suhu akibat pengaruh lingkungan serta keterbatasan tuning PID konvensional dapat menyebabkan respons sistem kurang optimal. Penelitian ini bertujuan mengembangkan simulasi tuning parameter PID menggunakan metode Hybrid Particle Swarm Optimization–Differential Evolution (PSO-DE). Sistem inkubator dimodelkan sebagai sistem termal orde satu dan disimulasikan menggunakan MATLAB. Optimasi parameter PID dilakukan menggunakan metode PSO, DE, dan Hybrid PSO-DE dengan 10 kali percobaan untuk setiap metode. Kinerja sistem dievaluasi menggunakan indeks Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE). Hasil menunjukkan bahwa Hybrid PSO-DE menghasilkan nilai ITAE terbaik sebesar 0.4167, diikuti DE sebesar 0.4193 dan PSO sebesar 2.2599. Selain itu, Hybrid PSO-DE memiliki tingkat konsistensi tertinggi dengan keberhasilan menemukan solusi optimal pada 80% percobaan, dibandingkan DE 40% dan PSO 20%. Hasil ini menunjukkan bahwa Hybrid PSO-DE lebih andal untuk tuning PID pada sistem pengendalian suhu inkubator.

Kata kunci: Inkubator; PID; Evolusi diferensial; Optimasi swarm partikel; ITAE

Abstract

Stable and precise incubator temperature control is crucial for maintaining the condition of premature infants, who are sensitive to temperature changes. However, temperature instability caused by environmental factors and the limitations of conventional PID tuning can result in suboptimal system response. This study aims to develop a simulation for PID parameter tuning using the Hybrid Particle Swarm Optimization–Differential Evolution (PSO-DE) method. The incubator system was modeled as a first-order thermal system and simulated using MATLAB. PID parameter optimization was performed using the PSO, DE, and Hybrid PSO-DE methods, with 10 trials for each method. System performance was evaluated using the Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) index. The results show that the Hybrid PSO-DE method produced the best ITAE value of 0.4167, followed by DE at 0.4193 and PSO at 2.2599. Additionally, the Hybrid PSO-DE method exhibited the highest consistency, successfully finding the optimal solution in 80% of the trials, compared to 40% for DE and 20% for PSO. These results indicate that the Hybrid PSO-DE is more reliable for PID tuning in an incubator temperature control system.

Keywords: Incubator; PID; Differential evolution; Particle swarm optimization; ITAE

PENDAHULUAN

Pengaturan suhu yang stabil sangat penting dalam berbagai aplikasi seperti pada inkubator. Pengaturan suhu inkubator merupakan aspek krusial dalam berbagai aplikasi, mulai dari inkubator bayi hingga proses industri, di mana kestabilan dan akurasi suhu sangat vital untuk keberlangsungan atau kualitas produk [1]. Salah satu kekurangan inkubator saat ini adalah tidak dapat mempertahankan suhu dan kelembapan secara stabil dan presisi. Hal ini disebabkan karena panas yang berada di dalam inkubator mengalir keluar, sehingga suhu di dalamnya cenderung lebih dingin dengan kelembapan yang lebih tinggi [2]. Gangguan pada kestabilan suhu sangat berpengaruh terhadap fungsi inkubator untuk menjaga suhu tubuh bayi. Pada bayi prematur, suhu tubuh bayi harus dipertahankan pada zona termoneutral yaitu antara 36°C-37°C atau ideal sekitar 36,5°C, dengan suhu inkubator dipertahankan pada kisaran 33°C-35°C dan kelembapan relatif 40%-60% atau sekitar 50% [3]. Hal ini dilakukan karena bayi prematur memiliki keterbatasan dalam mengatur suhu tubuhnya. Jika aturan ini tidak diikuti, maka bayi dapat terkena *hypothermia* atau *hyperthermia* [4].

Oleh karena bayi memiliki sensitivitas terhadap perubahan suhu, diperlukan sistem kendali suhu yang mampu mengontrol suhu secara konsisten. Salah satu metode yang umum digunakan adalah kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*) yaitu metode pengendalian suhu yang sangat sederhana [5]. Dalam beberapa tahun terakhir, terdapat metode yang lebih cerdas dan presisi seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Differential Evolution* (DE) yang telah umum digunakan untuk tuning PID. Kedua metode ini memiliki kelebihan masing-masing dalam fungsi tuning PID. PSO memiliki kelebihan dalam konvergensi yang cepat, sementara DE lebih stabil dalam mencari solusi global optimum [6].

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan potensi penggunaan hibrida DE dan PSO dalam meningkatkan performa sistem kendali pada berbagai domain. Seperti pada penelitian Boks [7] menemukan bahwa metode Hybrid PSO-DE merupakan metode yang menggabungkan kelebihan dari algoritma DE dan PSO. Pendekatan hybridisasi algoritma metaheuristik ini membuktikan bahwa performa dari kombinasi algoritma dapat meningkatkan pencarian solusi yang optimal karena memanfaatkan stabilitas dan kemampuan eksplorasi DE serta kecepatan konvergensi PSO. Pada penelitian Sofiah [8] menunjukkan bahwa aplikasi hybrid DE-PSO dalam pengendalian sistem tenaga listrik mampu mengontrol sistem lebih adaptif terhadap gangguan dinamis dan fluktuasi beban dibandingkan metode lain. Pada penelitian yang dilakukan Indrawan [9] menunjukkan bahwa gabungan DE-PSO pada sistem kontrol frekuensi beban tenaga angin menghasilkan waktu overshoot dan settling time yang lebih rendah dibandingkan metode DE dan PSO secara tunggal. Hasil ini menegaskan bahwa hybridisasi algoritma memberikan keunggulan dalam meningkatkan kualitas respon sistem. Namun, penelitian-penelitian tersebut dilakukan pada sistem non-termal seperti tenaga listrik dan turbin angin, sehingga penerapan hybrid PSO-DE pada sistem kontrol suhu, khususnya inkubator bayi, belum banyak dikaji. Selain itu, sebagian besar penelitian tuning PID berbasis metaheuristik menyajikan hasil dari satu kali proses optimasi, sehingga konsistensi solusi antar pengulangan (*run-to-run*) belum banyak dievaluasi. Padahal, sifat stokastik pada PSO dan DE berpotensi menghasilkan variasi parameter PID pada tiap eksekusi, sehingga klaim keunggulan suatu algoritma perlu didukung oleh evaluasi konsistensi, bukan hanya nilai performa terbaik dari satu kali run.

Dalam penelitian ini evaluasi kinerja sistem tidak hanya menggunakan parameter PID. Untuk mengevaluasi kinerja sistem yang dihasilkan, diperlukan suatu indeks performa yang dapat menunjukkan kualitas respon sistem terhadap *error* yang terjadi selama proses pengendalian. Salah satu indeks performa yang banyak digunakan dalam sistem kontrol adalah *Integral of Time-weighted Absolute Error* (ITAE), yaitu metode evaluasi yang menghitung integral dari nilai absolut *error* yang dikalikan dengan waktu sehingga memberikan penalti yang lebih besar terhadap *error* yang berlangsung dalam waktu yang lebih lama [10].

Penelitian ini bertujuan menerapkan algoritma hybrid PSO-DE untuk tuning parameter PID pada sistem kendali suhu inkubator, serta mengevaluasi performa dan konsistensi hasilnya melalui pengulangan optimasi dibandingkan dengan algoritma PSO dan DE secara tunggal berdasarkan nilai ITAE.

METODE

Penelitian ini dilakukan berdasarkan simulasi Matlab. Metode yang digunakan adalah perancangan dan pengujian pengendali PID yang parameter-parameternya dioptimasi menggunakan algoritma *Differential Evolution* (DE), *Particle Swarm Optimization* (PSO), dan Hybrid DE-PSO pada sistem pengaturan suhu inkubator. Adapun prosedur penelitian sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Melakukan studi literatur dari berbagai sumber yang relevan dengan prinsip pengendalian suhu inkubator, metode kontrol PID, algoritma optimasi DE dan PSO, serta penelitian terdahulu yang relevan.

2. Pemodelan Sistem Inkubator

Dalam pemodelan ini, sistem inkubator dimodelkan sebagai *plant* orde satu yang merepresentasikan dinamika termal inkubator.

a) Persamaan energi

Persamaan energi diperoleh dari prinsip keseimbangan energi pada sistem inkubator, yaitu energi yang tersimpan di dalam ruang inkubator sama dengan energi panas diterima dari pemanas dikurangi energi panas yang hilang ke lingkungan. Persamaan ini diperoleh bentuk persamaan energi berikut.

$$m_{room\ air} c_{air} \frac{dT_r}{dt} = h(T_h - T_r) - K(T_r - T_{out}) \quad (1)$$

Pada penelitian ini, koefisien kehilangan panas K pada Persamaan (1) menggunakan pendekatan yang lebih komprehensif dan koefisien kehilangan panas K diimplementasikan sebagai $K = U \cdot A$. Koefisien U mencakup efek gabungan konduksi dinding dan konveksi permukaan. Formulasi koefisien perpindahan panas menyeluruh (*overall heat transfer coefficient*) ini umum digunakan dalam analisis termal sistem tertutup.

b) Penurunan Fungsi Alih Model Orde Satu

Persamaan energi pada Persamaan (3.1) disederhanakan dengan pendekatan sistem termal *lumped* dan asumsi bahwa sinyal kendali $u(t)$ merepresentasikan daya panas yang langsung diberikan ke ruang inkubator (Watt). Pada penelitian ini diasumsikan suhu lingkungan bersifat konstan sepanjang waktu simulasi, sehingga $T_{out} = T_{amb} = 28^\circ\text{C}$ ditetapkan sebagai asumsi tetap dalam simulasi ini.

Dengan mendefinisikan selisih suhu $\Delta T = T_r - T_{amb}$, maka Persamaan (1) menjadi:

$$m_{room\ air} c_{air} \frac{dT_r}{dt} = u(t) - (U \cdot A) \cdot \Delta T \quad (2)$$

Dengan menerapkan Transformasi Laplace pada Persamaan (2) dengan kondisi awal nol, diperoleh:

$$m_{room\ air} c_{air} \cdot s \cdot \Delta T(s) = U(s) - (U \cdot A) \cdot \Delta T(s) \quad (3)$$

$$(m_{room\ air} c_{air} \cdot s + (U \cdot A)) \cdot \Delta T(s) = U(s) \quad (4)$$

Dengan memfaktorkan $(U \cdot A)$ dari penyebut, fungsi alih sistem dapat ditulis sebagai:

$$G(s) = \frac{\Delta T(s)}{U(s)} = \frac{\left[\frac{1}{(U \cdot A)} \right]}{\left[\frac{m_{room\ air} c_{air}}{(U \cdot A)} \cdot s + 1 \right]} \quad (5)$$

Sehingga diperoleh bentuk standar model orde satu, yaitu

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (6)$$

Dengan paramter:

$$K = \frac{1}{(U \cdot A)} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{m_{room\ air} c_{air}}{(U \cdot A)} \quad (8)$$

Nilai K menyatakan gain sistem, yaitu kenaikan suhu ($^\circ\text{C}$) per satuan daya panas input (W) pada kondisi tunak. Nilai τ menyatakan konstanta waktu termal, yaitu kecepatan respons sistem terhadap perubahan masukan. Dalam penelitian ini digunakan dimensi inkubator yang disimulasikan ini memiliki panjang 60 cm, lebar 40 cm dan tinggi 30 cm. Koefisien perpindahan panas menyeluruh U ditetapkan sebesar $6\text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$.

3. Perancangan Kontroler PID

Perancangan Kontroler PID ini ditentukan melalui proses optimasi dengan parameter K_p , K_i , dan K_d . Dengan definisi matematis PID sebagai berikut [11]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

Dengan, $e(t) = T_{set}(t) - T(t)$ adalah sinyal error antara setpoint dan suhu aktual inkubator. Ruang pencarian parameter PID dibatasi dalam batas tertentu guna memastikan kesesuaian dengan kondisi fisik sistem inkubator. Rentang yang ditetapkan dalam penelitian ini sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut

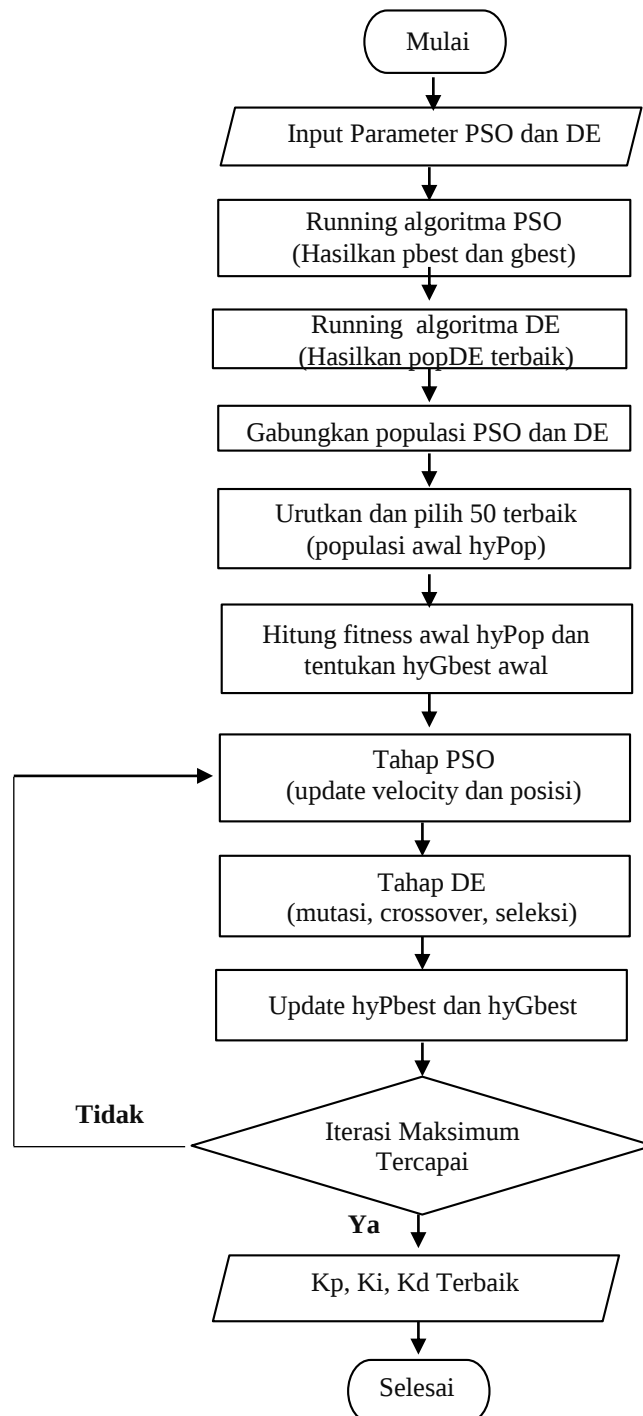
Tabel 1. Batas Ruang Pencarian Parameter PID

Parameter	Batas Bawah	Batas Atas
K_p	0	400
K_i	0	500
K_d	0	100

4. Implementasi Algoritma Optimasi

a) Mekanisme Algoritma

Algoritma Hybrid PSO-DE pada penelitian ini menggunakan skema *sequential-plus-elitism*. Pada tahap awal, algoritma PSO dan DE dijalankan secara independen terhadap populasi awal yang sama, masing-masing dengan mekanisme pembaruan posisi sesuai karakteristik algoritmanya. PSO memperbarui posisi partikel berdasarkan kecepatan yang dipengaruhi oleh *personal best* dan *global best*, sedangkan DE memperbarui posisi individu melalui operasi mutasi dan *crossover* antar anggota populasi. Setelah kedua algoritma menyelesaikan proses pencariannya, individu-individu terbaik dari populasi PSO dan populasi DE dikumpulkan ke dalam satu populasi gabungan (*pooling*). Dari populasi gabungan tersebut, sejumlah kandidat dengan nilai fungsi objektif terbaik dipilih sebagai populasi awal (*seed*) untuk fase optimasi hybrid, yang selanjutnya menjalani iterasi lanjutan hingga diperoleh solusi akhir. Dengan skema ini, algoritma hybrid memanfaatkan kecepatan konvergensi PSO dan kemampuan eksplorasi DE tanpa saling mengganggu proses pencarian pada tahap awal masing-masing algoritma. Diagram alir proses optimasi ketiga algoritma ditunjukkan sebagai berikut.

**Gambar 1.** Diagram Alir Algoritma Hybrid**b) Prosedur Perlakuan**

Dalam penelitian ini, setiap algoritma dijalankan sebanyak 10 kali percobaan untuk ketiga metode dengan seed acak yang identik mulai seed 1 hingga 10. Penggunaan seed yang sama pada setiap percobaan bertujuan memastikan kondisi awal populasi yang identik antar metode, sehingga perbandingan performa antar algoritma bersifat adil dan tidak dipengaruhi oleh keacakan inisialisasi populasi. Dari 10 kali percobaan, dipilih satu dengan nilai ITAE terkecil dari algoritma Hybrid PSO-DE. Percobaan terbaik ini dijadikan acuan untuk menampilkan kurva konvergensi dan mengevaluasi parameter PID optimal ketiga

metode secara bersamaan, sehingga analisis perbandingan konsisten pada kondisi inisialisasi yang sama. Parameter masing-masing algoritma ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Algoritma Optimasi

Parameter	DE	PSO	Hybrid DE-PSO
Ukuran populasi	50	50	50
Jumlah iterasi	100	100	100
Faktor mutasi DE (F)	0.7	-	0.7
Crossover rate DE (CR)	0.9	-	0.9
Inertia weight PSO (w)	-	0.6	0.6
Koefisien kognitif (c1)	-	1.5	1.5
Koefisien sosial (c2)	-	1.5	1.5

5. Penentuan Fungsi Objektif

Fungsi objektif yang digunakan adalah *Integral Time-weighted Absolute Error* (ITAE) yang menekankan pada minimasi kesalahan dalam jangka panjang dan respons sistem yang halus [12]. Secara teoritis, ITAE didefinisikan sebagai integral error berbobot waktu atau dalam bentuk kontinu

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (10)$$

Dalam simulasi numerik, perhitungan ITAE dilakukan menggunakan pendekatan integrasi numerik berdasarkan data respon sistem.

$$ITAE \approx \sum_{k=1}^{N-1} t_k |e_k| \Delta t \quad (11)$$

Untuk menjamin kestabilan dan kualitas respons sistem secara menyeluruh, fungsi objektif yang digunakan dalam implementasi simulasi tidak hanya berupa ITAE murni, melainkan ditambahkan suku penalti sebagai berikut:

$$J = ITAE + P^1 + P^2 + P^3 \quad (12)$$

dengan suku penalti yang didefinisikan sebagai:

$P_1 = 10^6$, jika *settling time* tidak terdefinisi (sistem tidak stabil)

$P_2 = 5 \times 10^4 \cdot (y_{\max} - \Delta T)$, jika $y_{\max} > 1.10 \cdot \Delta T$ (*overshoot* > 10%)

$P_3 = 2 \times 10^4 \cdot |e(t_{\text{akhir}})|$, jika $|e(t_{\text{akhir}})| > 0.05$ (*steady-state error* besar)

Penalti P_1 bertujuan menghindari solusi dengan sistem yang tidak stabil. Penalti P_2 membatasi *overshoot* yang berlebihan agar suhu inkubator tidak melampaui 10% di atas setpoint yang dapat membahayakan kondisi inkubasi. Penalti P_3 memastikan bahwa parameter PID yang dipilih mampu mengeliminasi *steady-state error* secara efektif. Fungsi objektif J yang diminimalkan bukan semata-mata nilai ITAE numerik, tetapi merupakan ITAE yang sekaligus mempertimbangkan stabilitas, batas *overshoot*, dan ketelitian *steady-state error*.

6. Simulasi dan Uji Data

Simulasi dilakukan pada kondisi nominal sistem dengan skenario:

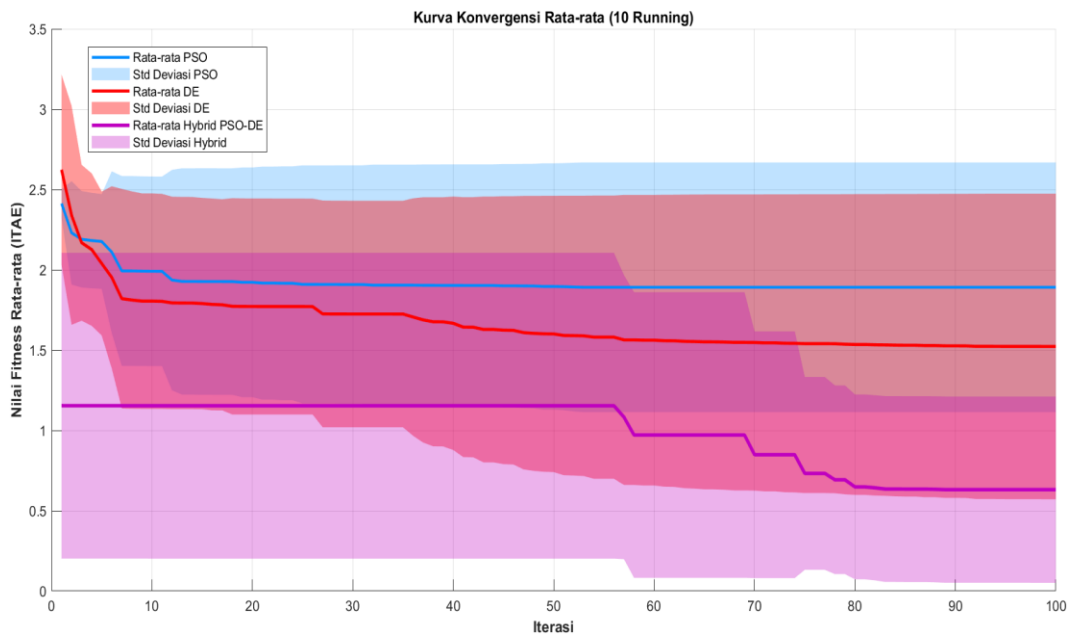
- Tracking setpoint* suhu inkubator dari suhu lingkungan $T_{\text{amb}} = 28^\circ\text{C}$ menuju setpoint $T_{\text{set}} = 37^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 9^\circ\text{C}$).
- Evaluasi respon transien dan *steady-state* berdasarkan parameter *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *steady-state error*.

7. Analisis Data

Hasil simulasi dianalisis berdasarkan indikator performa sistem, yaitu *rise time*, *settling time*, *overshoot*, *steady-state error*, dan nilai ITAE. Kinerja Hybrid DE-PSO dibandingkan dengan DE, PSO, dan PID konvensional untuk menentukan metode yang memberikan performa terbaik dalam pengaturan suhu inkubator.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari 10 kali percobaan untuk masing-masing optimasi ditampilkan pada Gambar 2. Garis tebal menunjukkan rata-rata ITAE pada setiap iterasi, sedangkan area transparan di sekitar garis menunjukkan rentang standar deviasi yang mencerminkan tingkat konsistensi masing-masing metode.



Gambar 2. Kurva Konvergensi Rata-rata DE, PSO, dan DE-PSO

Berdasarkan kurva konvergensi rata-rata DE, PSO, dan DE-PSO, ditampilkan bahwa ketiga algoritma optimasi memiliki karakteristik dalam pencarian solusi yang optimal. Fenomena ini diperkuat dengan nilai statistik hasil optimasi sebagaimana ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 3. Perbandingan Statistik Hasil Optimasi PID

Metode	ITAE Terbaik	ITAE Terburuk	Rata-rata ITAE	Standar Deviasi
PSO	0.4167	2.2600	1.8913	0.7772
DE	0.4167	2.2599	1.5229	0.9515
Hybrid PSO-DE	0.4167	2.2599	0.6313	0.5798

Berdasarkan Gambar 2, garis warna biru merupakan garis yang menunjukkan kurva rata-rata algoritma PSO. Terlihat jelas bahwa PSO memulai optimasi dengan nilai rata-rata ITAE sekitar 2.4000 dan mengalami penurunan hingga iterasi ke-10, kemudian konvergen dan mendatar pada nilai sekitar 1.8900 hingga akhir iterasi ke-100. Nilai standar deviasi sebesar 0.7772 memperlihatkan rentang standar deviasi PSO yang melebar. Fenomena ini sesuai dengan mekanisme PSO yang memanfaatkan informasi *personal best* (pbest) dan *global best* (gbest) sehingga setiap partikel bergerak menuju solusi optimal yang telah ditemukan. Prosedur ini dapat meningkatkan kemampuan eksploitasi, sehingga PSO mampu mempercepat proses konvergensi. Namun, dampak dari eksploitasi yang mendominasi ini keragaman populasi berkurang pada iterasi berikutnya sehingga algoritma lebih mudah mengalami stagnan dini, yaitu terjebak pada solusi lokal sebelum seluruh ruang pencarian dieksplorasi. Hal ini menjelaskan mengapa nilai rata-rata ITAE PSO masih relatif tinggi meskipun proses konvergensi berlangsung cepat.

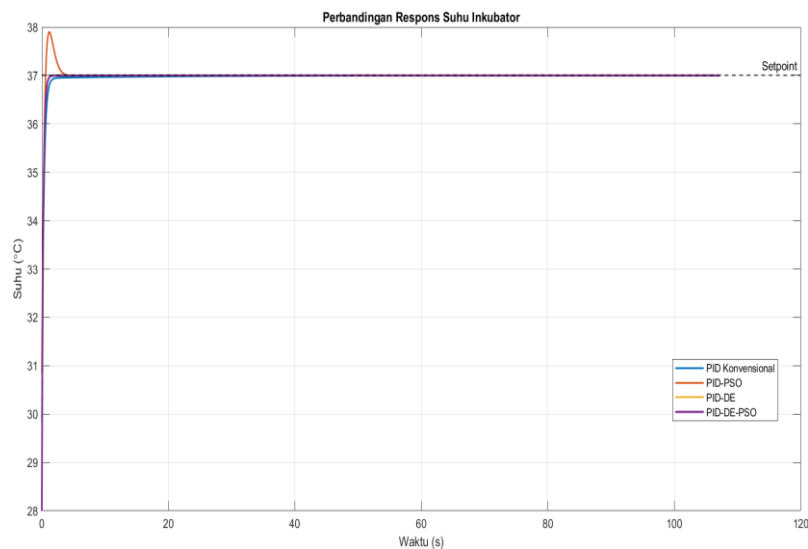
Garis berwarna merah merupakan garis yang memperlihatkan kurva konvergensi rata-rata algoritma DE. Pada algoritma ini, kurva algoritma DE menurun secara bertahap, dimulai dari sekitar 2.6002 pada iterasi awal dan terus menurun hingga konvergen di sekitar 1.5200 pada iterasi akhir. Karakteristik ini dipengaruhi oleh mekanisme *mutation* dan *crossover* pada DE yang secara terus-menerus menghasilkan kandidat solusi baru dari kombinasi beberapa individu dalam populasi. Mekanisme ini meningkatkan kemampuan eksplorasi sehingga ruang pencarian dapat dijelajahi lebih luas dan peluang menemukan solusi global menjadi lebih besar dibandingkan PSO. Namun, proses eksplorasi yang tinggi juga menyebabkan variasi hasil antarpercobaan meningkat, yang tercermin dari nilai standar deviasi terbesar sebesar 0.9515.

Garis berwarna magenta merupakan garis yang menggambarkan kurva konvergensi rata-rata dari algoritma Hybrid PSO-DE. Algoritma ini memperlihatkan performa lebih baik dibandingkan dengan dua metode tunggal sejak awal iterasi dengan nilai ITAE dimulai pada kisaran nilai 1.1505, yang mana nilai ini sudah jauh lebih rendah dari PSO dan DE. Nilai rata-rata terus menurun secara bertahap hingga mencapai sekitar 0.6209 pada iterasi akhir. Keunggulan Hybrid sejak awal iterasi ini disebabkan oleh kemampuan eksploitasi cepat dari PSO dan kemampuan eksplorasi luas dari DE. Pada tahap awal, hasil terbaik dari PSO digunakan sebagai dasar pembentukan populasi

sehingga proses pencarian dimulai dari kandidat solusi yang sudah memiliki kualitas baik. Selanjutnya, proses *mutation* dan *crossover* pada DE menjaga keberagaman populasi sehingga pencarian tidak hanya berpusat di sekitar solusi terbaik sementara, tetapi tetap mampu mengeksplorasi wilayah pencarian lain yang berpotensi menghasilkan solusi lebih baik. Kombinasi kedua mekanisme tersebut menciptakan keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi sehingga proses optimasi menjadi lebih stabil, lebih konsisten, dan memiliki peluang lebih besar untuk menemukan solusi global dibandingkan penggunaan PSO atau DE secara terpisah. Meskipun rentang standar deviasi Hybrid cukup lebar, tetapi nilai rata-rata yang dicapai secara konsisten lebih rendah dibandingkan kedua metode lainnya.

Berdasarkan tabel yang ditampilkan bahwa ketiga algoritma memiliki nilai ITAE terbaik yang sama besar 0.4167, namun terdapat perbedaan yang nyata pada nilai rata-rata. Metode Hybrid PSO-DE mendapatkan nilai rata-rata ITAE sebesar 0.6313, jauh lebih rendah dibandingkan DE yang memperoleh nilai sebesar 1.5229 dan PSO sebesar 1.8913. Fenomena ini memperlihatkan bahwa metode Hybrid lebih baik dalam menemukan solusi mendekati optimal pada setiap percobaan.

Hasil simulasi respons sistem terhadap tracking setpoint juga diamati dalam mengevaluasi kinerja sistem dengan melihat nilai parameter PID. Garis setpoint ditetapkan pada suhu 37 °C dan digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi kemampuan sistem dalam mencapai kondisi yang diinginkan.



Gambar 3. Grafik Respons Sistem terhadap Tracking Setpoint

Berdasarkan grafik respons sistem terhadap tracking setpoint, terlihat perbedaan performa yang cukup signifikan antara metode PID konvensional, PID-PSO, PID-DE, dan PID Hybrid DE-PSO. Berikut adalah detail grafik dari masing-masing metode.

Pada grafik respons sistem, dapat dilihat bahwa respons metode terhadap suhu mendapatkan hasil respons yang berbeda-beda. Metode PID konvensional menunjukkan respons yang relatif serupa dengan PID-DE dan PID hybrid DE-PSO, di mana ketiga metode ini mampu mencapai setpoint dengan cepat dan stabil tanpa overshoot yang signifikan. Namun, secara detail dari grafik, respons suhu PID konvensional memiliki rise time yang lebih lambat dari metode DE dan Hybrid. Hal ini menunjukkan PID konvensional responsnya cenderung sedikit kurang optimal dalam hal kehalusan transisi menuju kondisi tunak apabila dibandingkan metode optimasi DE dan Hybrid DE-PSO.

Sementara pada metode PID-PSO mengalami overshoot yang lumayan besar hingga melebihi setpoint sebelum akhirnya turun dan stabil pada nilai setpoint yaitu 37°C. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter PID hasil optimasi PSO cenderung menghasilkan aksi kontrol yang agresif pada fase awal, sehingga sistem melampaui nilai yang diinginkan atau mencapai setpoint. Meskipun sistem tetap stabil pada akhirnya, tetapi karakteristik ini kurang ideal untuk sistem sensitif seperti inkubator.

Grafik respons metode PID-DE dan Hybrid PID-DE-PSO memiliki hasil yang serupa, di mana peningkatan suhu yang monoton tanpa overshoot dari suhu 28°C menuju setpoint 37 °C. Kemiripan bentuk grafik respons antara PID-DE dan PID Hybrid DE-PSO ini mengkonfirmasi bahwa penggabungan kedua algoritma menghasilkan parameter PID yang konvergen pada solusi optimal yang hampir identik.

Penilaian kinerja sistem yang lebih komprehensif tidak hanya dievaluasi secara visual melalui grafik respons sistem, tetapi juga dievaluasi menggunakan parameter kuantitatif yang meliputi rise time, settling time, overshoot, steady-state error, serta nilai fungsi objektif Integral Time Absolute Error (ITAE).

Tabel 4. Perbandingan Kinerja Respons Sistem

Metode	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	SSE (°C)	ITAE
PID Konvensional	0.6638	1.2447	0	0	20.211
PID-PSO	0.4346	2.6659	10	0	2.2599
PID-DE	0.4728	0.8550	0	0	0.4193
PID-DE-PSO	0.4728	0.8550	0	0	0.4167

Berdasarkan tabel perbandingan kinerja di atas, dapat dilihat bahwa metode PID konvensional memiliki performa terendah dengan nilai ITAE sebesar 20.211. Nilai ini menunjukkan akumulasi error yang paling besar selama proses transien. Selain itu, rise time sebesar 0.6638 detik merupakan yang paling lambat dibandingkan metode lainnya. Meskipun tidak menghasilkan overshoot maupun steady-state error, respons sistem masih kurang cepat dalam mencapai setpoint.

Metode PID-PSO menghasilkan rise time tercepat sebesar 0.4346 detik, namun disertai overshoot sebesar 10% dan settling time terlama, yaitu 2.6659 detik. Kondisi ini menunjukkan bahwa respons yang lebih cepat tidak selalu menghasilkan kinerja keseluruhan yang lebih baik. Nilai ITAE sebesar 2.2599 juga masih jauh lebih tinggi dibandingkan metode DE dan Hybrid DE-PSO.

Metode PID-DE memberikan performa yang lebih seimbang dengan rise time 0.4728 detik, settling time 0.8550 detik, tanpa overshoot maupun steady-state error. Nilai ITAE sebesar 0.4193 menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan PID konvensional dan PID-PSO.

Sementara itu, metode Hybrid DE-PSO menghasilkan performa terbaik dengan nilai ITAE terkecil sebesar 0.4167, atau sekitar 0.63% lebih rendah dibandingkan PID-DE. Meskipun perbedaan ITAE relatif kecil, keunggulan utama metode hybrid terletak pada konsistensinya, yaitu mampu menemukan solusi optimal pada 80% percobaan, dibandingkan DE sebesar 40% dan PSO sebesar 20%. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi kemampuan eksplorasi dan eksploitasi pada Hybrid DE-PSO menghasilkan tuning PID yang lebih andal dan konsisten.

KESIMPULAN

Evaluasi respons sistem pengendalian suhu inkubator dengan metode tuning PID menggunakan algoritma Hybrid PSO-DE menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan metode tunggal PSO maupun DE. Hal ini ditunjukkan oleh nilai ITAE terkecil sebesar 0.4167, lebih rendah dibandingkan dengan PID-DE dengan besar nilai ITAE 0.4193 dan PID-PSO sebesar 2.2599. Metode hybrid DE-PSO menunjukkan keunggulan yang signifikan dibandingkan PSO, sedangkan perbedaannya terhadap DE relatif kecil, namun keunggulan Hybrid PSO-DE tidak hanya terletak pada nilai ITAE yang lebih kecil, melainkan juga pada tingkat konsistensi yang jauh lebih baik dalam menemukan solusi yang baik secara berulang sebagaimana ditunjukkan pada hasil tuning bahwa Hybrid PSO-DE berhasil menemukan solusi optimal pada 8 dari 10 percobaan (80%), dibandingkan DE yang hanya berhasil pada 4 dari 10 percobaan (40%) dan PSO pada 2 dari 10 percobaan (20%), sehingga algoritma Hybrid PSO-DE terbukti lebih andal untuk diimplementasikan pada sistem pengendalian suhu inkubator.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Taufik, "Development and Performance Study of Temperature and Humidity Regulator in Baby Incubator Using Fuzzy-PID Hybrid Controller," *Energies*, vol. 14, pp. 1–21, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14206505>.
- [2] Y. Alif, K. Utama, E. Dhaniswara, and L. S. Budi, "Perbandingan Metode Tuning PID pada Pengaturan Suhu pada Inkubator," in *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan XI*, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, 2023, pp. 1–8.
- [3] K. J. Marcadante and R. M. Kliegman, *Nelson Essentials of Pediatrics*, 8th ed. Philadelphia: Elsevier Ltd, 2019.
- [4] A. F. Syamsu, *Konservasi Energi Pada Bayi Baru Lahir Termoregulasi*. Penerbit Eureka Media Aksara, 2023.
- [5] R. S. Patil, S. P. Jadhav, and M. D. Patil, "Review of Intelligent and Nature-Inspired Algorithms-Based Methods for Tuning PID Controllers in Industrial Applications," *J. Robot. Control*, vol. 5, no. 2, pp. 336–358, 2024, doi: 10.18196/jrc.v5i2.20850.
- [6] A. Latif, H. A. Widodo, R. A. Atmoko, T. N. Phong, and E. T. Helmy, "Temperature and Humidity Controlling System for Baby Incubator," vol. 2, no. 3, pp. 190–193, 2021, doi: 10.18196/jrc.2376.
- [7] R. Boks and H. Wang, "A Modular Hybridization of Particle Swarm Optimization and Differential Evolution,"

- 2020, doi: 10.1145/3377929.3398123.
- [8] A. Sofiah, H. Setiadi, and R. W. W. Atmaja, "Intelligent Coordinated Control of PID-SMES and AVR based on Hybrid PSO-DE for Small Signal Stability Enhancement," *J. Adv. Technol. Multidiscip.*, vol. 1, no. 1, pp. 18–23, 2022, doi: 10.20473/jatm.v1i1.39627.
- [9] R. W. Indrawan, H. Setiadi, M. A. Setiawan, and R. P. Prastio, "Comparison of PSO , DE and Hybrid DE-PSO for LFC of Wind Power Systems," vol. 01, no. 02, pp. 59–63, 2022, doi: <https://doi.org/10.20473/jatm.v1i2.40451>.
- [10] Eldin, "New PID Tuning Rule Using ITAE Criteria," *Int. J. Eng.*, pp. 597–608, 2023.
- [11] A. Senen, ; Titi Ratnasari, ; Yoakim Simamora, J. T. Elektro, and I. T. Pln, "Perancangan Simulasi PID Controller Menggunakan Graphic User Interface dan Simulink," *J. Kilat*, vol. 9, no. 2, pp. 181–191, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.33322/kilat.v9i2.1015>
- [12] K. P. Sanoj and V. Dhanya Ram, "Optimal PID Controller Tuning for Multivariable Unstable Systems by Minimizing ITAE Criteria," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 57, pp. 391–396, 2024, doi: 10.1016/j.ifacol.2024.05.067.