ANALISIS KOMPARASI *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO) DAN *SIMULATED ANNEALING* (SA) UNTUK OPTIMASI KONTROL PID PADA MOTOR INDUKSI SATU FASA

Suci Indaryani[1,*)], Faris Ardiansyah Putra[1)], Ditya Nurma Paulina[1)], Aninda Intan Luvi Wulandari[1)], Moh. Bintang Saputra[1)], Ahmad Alvian Ma'ruf[1)], Dwi Aji Nugroho[1)], Wahyu Setyo Pambudi[1)]

[1]Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Surabaya

E-mail: suci.indaryani@gmail.com

Abstract

Single-phase induction motors require stable control, yet conventional PID tuning is often suboptimal. This study compares Particle Swarm Optimization (PSO) and Simulated Annealing (SA) for PID parameter tuning on a 1 HP Motovario single-phase induction motor. The optimization uses Integral of Time-Weighted Absolute Error (ITAE) as the objective function, heavily constrained by overshoot $\leq 10\%$ *and phase margin* $\geq 25^{\circ}$ *via MATLAB/Simulink. To ensure statistical reliability and handle algorithmic stochasticity, the optimization is evaluated through 20 independent runs. Results indicate PSO achieves a lower ITAE mean (0.002088) and a faster rise time (0.0101 seconds), but operates near stability limits with 10.00% overshoot and 25.45° phase margin. Conversely, SA provides superior average computational efficiency (11.65 seconds) and higher stability margins (3.90% overshoot; 34.70° phase margin) despite a slightly higher ITAE (0.002998). PSO suits high-speed precision, whereas SA ensures efficient and stable execution.*

Keywords: *Induction Motor, PID Control, Particle Swarm Optimization, Simulated Annealing, Control System Optimization.*

PENDAHULUAN

Motor induksi satu fasa banyak digunakan di sektor rumah tangga hingga industri kecil karena konstruksinya yang kuat, perawatan mudah, dan biaya yang relatif rendah (Sanjaya et al., 2017). Salah satu aplikasi krusialnya adalah sebagai penggerak utama pada perangkat *rotary forcespinning* (Sanjaya et al., 2017). Namun, kontrol *closed-loop* pada motor induksi satu fasa seperti seri Motovario cukup menantang karena sifatnya yang rumit, non-linear, dan sensitivitas tinggi terhadap gangguan beban (Sanjaya et al., 2017), (Motovario S.p.A, 2017).

Kontroler PID menjadi solusi standar di industri karena strukturnya yang sederhana, andal, mudah diimplementasikan, serta mampu meningkatkan respon dinamis sistem penggerak secara signifikan (Ogata, 2010), (Prasetia & Ramadani, 2024). Meski

demikian, performa PID sangat bergantung pada akurasi penalaan konstanta K_p, K_i, dan K_d (Ogata, 2010). Metode konvensional seperti *trial-error* atau Ziegler-Nichols sering gagal memberikan parameter optimal, mengakibatkan lonjakan amplitudo dan waktu pemulihan yang lama (Motovario S.p.A, 2017), (Ogata, 2010), (Prasetia & Ramadani, 2024).

Penelitian modern beralih ke algoritma metaheuristik global untuk mencari gain PID secara otomatis dan akurat (Sanjaya et al., 2017). *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Simulated Annealing* (SA) adalah dua pendekatan yang mencerminkan mekanisme pencarian berbeda namun sangat efektif dalam rekayasa kontrol (Nimisha K K & R.Senthilkumar, 2018), (Alqudah et al., 2014). Keunggulan PSO dalam mengoptimalkan PID telah terbukti pada *Switched Reluctance Motor* (SRM), sistem pembakaran mesin *dual-fuel*, pengaturan motor DC, serta motor induksi satu fasa untuk efisiensi energi dan reduksi osilasi (Nimisha K K & R.Senthilkumar, 2018), (Hu et al., 2024), (Rahayu et al., 2022), (Redianto Archi Pangalinan et al., 2024). PSO bekerja berdasarkan kecerdasan kelompok dengan memperbarui arah pencarian berdasarkan pengalaman terbaik diri (p_{best}) dan kelompok (g_{best}) (Nimisha K K & R.Senthilkumar, 2018), (Hu et al., 2024).

Sebaliknya, SA merupakan algoritma berbasis lintasan tunggal yang mengadopsi proses termodinamika pendinginan logam (Fernando Fraga-Gonzalez et al., 2017), (Udayakumar Durairaj et al., 2019). SA fleksibel dalam menyesuaikan parameter PID untuk aplikasi seperti konverter DC-DC, lengan robot industri, dan arsitektur *Internal Model Control* (IMC) (Zhu & Jiao, 2022), (Udayakumar Durairaj et al., 2019). Fitur unik SA adalah kriteria probabilitas Metropolis yang memungkinkan sistem keluar dari jebakan *local minima* (Fernando Fraga-Gonzalez et al., 2017), (Zhu & Jiao, 2022).

Meskipun sukses secara terpisah, studi komparatif mendalam antara PSO dan SA pada motor induksi satu fasa 1 HP dengan *hard constraints* ketat masih sangat terbatas. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mengevaluasi kinerja penalaan PID menggunakan PSO dan SA melalui *20 independent runs*, dengan fungsi objektif *Integral of Time-Weighted Absolute Error* (ITAE) melalui simulasi MATLAB/Simulink.

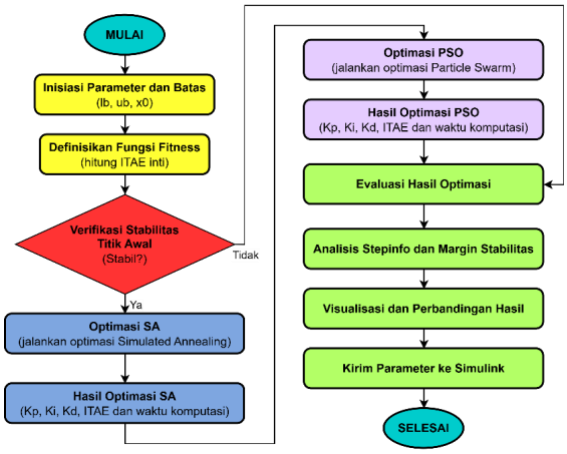
METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan mencari parameter PID yang optimal pada pengujian motor induksi satu fasa dengan spesifikasi tertera pada Tabel 1. Sedangkan metode penelitian

yang diterapkan terdiri atas beberapa tahapan dengan diagram alir seperti pada Gambar 1 (Motovario S.p.A, 2017), (Standards & Institute of Standardization, 2026).

Tabel 1
Spesifikasi parameter motor induksi satu fasa

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Daya nominal	1 HP (0,75 kW)	Induktansi rotor (L_2)	0,0095H
Tegangan/ frekuensi	220V/ 50Hz	Induktansi magnetisasi (L_m)	0,145H
Resistansi stator (R_1)	2,15Ω	Inersia rotor (J)	0,00133 kg.m^2
Resistansi rotor (R_2)	1,85Ω	K_t	1,38 N.m/A
Induktansi stator (L_1)	0,0095H	K_b	1,38 V.s/rad

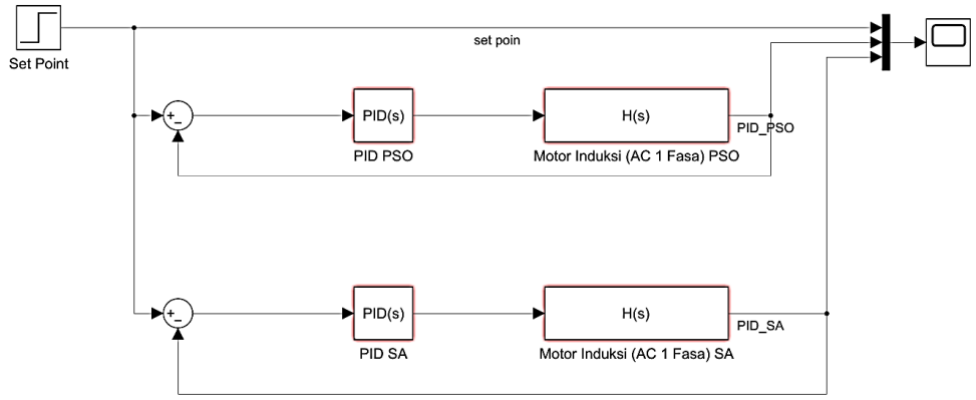


Gambar 1. Diagram alir penelitian

Berdasarkan diagram alir di atas, 2 program algoritma yang dibandingkan untuk penalaan parameter PID di motor induksi satu fasa dijalankan di aplikasi Matlab. Program akan berhenti Ketika proses iterasi maksimum tercapai dengan kesesuaian fungsi fitness *Integral of Time-Weighted Absolute Error* (ITAE) dengan persamaan sebagai berikut:

$$ITAE = \int_0^t t.|e(t)|dt \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

Skenario pengujian dilakukan pada kecepatan referensi normal 1 p.u. (100% kecepatan sinkron) dalam kondisi yang sempurna tanpa adanya gangguan mekanis. Uji ini dilakukan untuk mengetahui seberapa efisien algoritma dalam mencapai nilai yang ditentukan, dengan menggunakan parameter respon sementara yaitu *overshoot* dan *rise time* sebagai acuan utama dalam menilai kualitas kontroler. Gambar 2 merupakan diagram blok sistem uji pada Simulink.



Gambar 2. Blok diagram sistem pada MATLAB/Simulink

Berdasarkan Gambar 2 fungsi alih dari motor induksi diperlukan sebagai objek uji, fungsi alih tersebut didapatkan dengan memasukkan nilai parameter motor di Tabel 1 ke persamaan 2 sebagai berikut:

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{L_s J s^2 + (R_s J + L_s B)s + (R_s B + K_b K_t)} \quad \text{.....(2)}$$

Selanjutnya, ditentukan parameter umum optimasi seperti pada Tabel 2.

Tabel 2
Parameter umum optimasi

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Plant (Transfer Function)	Num=6715.8 Den=[1,14.52,9276.2]	Filter Derivative (N_filter)	50
Batas Parameter (lb,ub)	K_p:[0,0.5]; K_i:[0,75]; K_d:[0,0.5]	Hard Constraint Overshoot	≤10%
Durasi Simulasi (t_sim)	5 detik	Hard Constraint Phase Margin	≥25˚
Sampling Time (t_sample)	0,001 detik	Max Iterations	500

Untuk mengakomodasi sifat stokastik dari algoritma PSO dan SA, proses optimasi parameter PID pada penelitian ini tidak dilakukan secara tunggal (*single run*), melainkan dieksekusi sebanyak 20 kali pengujian independen (*20 independent runs*). Pendekatan ini diterapkan untuk menjamin konsistensi konvergensi, mengatasi bias dari titik acak awal (*random initialization*), serta memperoleh nilai rerata dan standar deviasi yang valid secara statistik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

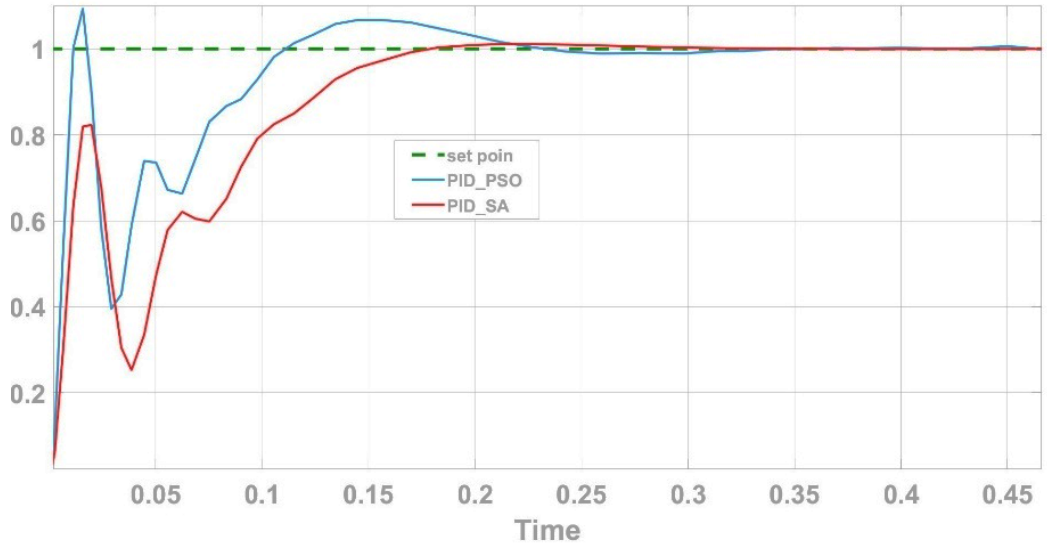
Simulasi pengoptimalan parameter PID pada motor induksi satu fasa dilakukan dengan membandingkan dua metode, yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan

Simulated Annealing (SA). Untuk mengakomodasi sifat stokastik dari kedua algoritma metaheuristik tersebut, proses optimasi dijalankan sebanyak 20 kali pengujian independen (*20 independent runs*). Nilai parameter PID optimal dari hasil *best run* serta rerata performa komputasinya disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4
Komparasi parameter hasil optimasi dan waktu iterasi

Parameter Hasil Optimasi	PSO	SA
K_p	0,0044	0,0050
K_i	56,7622	30,1263
K_d	0,0525	0,0280
ITAE Terbaik	0,002088	0,002998
Rata-rata ITAE	$0{,}002088 \pm 0{,}000000$	$0{,}005457 \pm 0{,}001813$
Rata-rata Waktu Komputasi	99,26 detik	11,65 detik

Berdasarkan Tabel 4, metode PSO menunjukkan tingkat konsistensi konvergensi yang sangat tinggi dengan nilai ITAE rata-rata sebesar $0{,}002088 \pm 0{,}000000$. Sementara itu, metode SA menghasilkan nilai ITAE rata-rata sebesar $0{,}005457 \pm 0{,}001813$, di mana variasi standar deviasi tersebut mencerminkan mekanisme pencarian probabilistik *cooling schedule* khas SA. Namun, dari segi efisiensi waktu komputasi, SA jauh lebih unggul dengan rata-rata 11,65 detik, sedangkan PSO memerlukan waktu rata-rata 99,26 detik akibat tingginya evaluasi populasi partikel.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Respon antara PSO dan SA

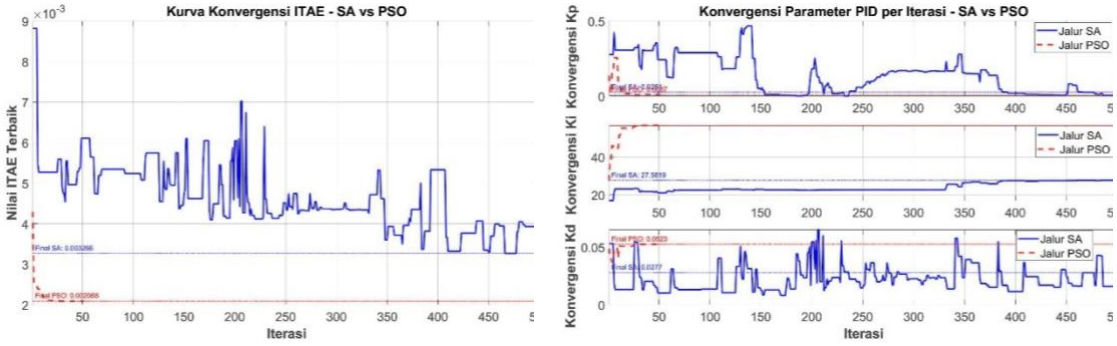
Berdasarkan hasil simulasi *best run*, grafik respons transien dari sistem yang dikontrol menggunakan parameter optimal PSO dan SA dapat dilihat pada Gambar 3. Karakteristik respons transien sistem secara lebih rinci ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5
Karakteristik respon transien sistem hasil optimasi

Parameter	PSO	SA	Parameter	PSO	SA
Rise Time (s)	0.0101	0.1064	Peak	1,1000	1,0390
Settling Time (s)	0.2238	0.2627	Peak Time (s)	0,1380	0,1660
Overshoot (%)	10,0000	3,9012	Gain Margin (dB)	Inf	Inf
Undershoot (%)	0	0	Phase Margin (˚)	25.45	34,70

2. Pembahasan

Berdasarkan data konvergensi, PSO mampu mencapai titik optimal dengan kesalahan transien lebih rendah, meskipun membutuhkan waktu komputasi yang jauh lebih lama dibandingkan SA. PSO menghasilkan K_p sangat kecil (0,0044) dan K_i tinggi (56,76), sehingga cenderung menyerupai karakteristik kontroler PI di bawah hard constraints. Sebaliknya, SA menghasilkan distribusi parameter yang lebih seimbang (K_p=0,0050, K_i=30,13 dan K_d=0,0280), dengan waktu eksekusi yang jauh lebih efisien, mencerminkankarakteristik PID yang lebih proporsional.



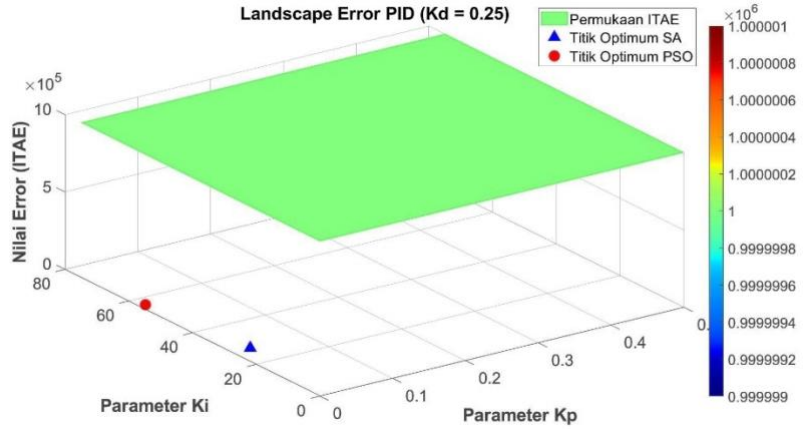
(a) (b)

Gambar 4. Kurva konvergensi nilai: (a) Konvergensi ITAE, (b) Konvergensi PID

Gambar 4 menunjukkan PSO mendorong ITAE ke bawah secara cepat hingga mencapai 0,002088, sementara fluktuasi SA mencerminkan mekanisme probabilistik untuk keluar dari *local minima* dengan ITAE akhir 0,002998. Meskipun sama-sama 500 iterasi, SA jauh lebih cepat (11,65 detik) dibanding PSO (99,26 detik) karena SA mengevaluasi satu solusi per iterasi, sedangkan PSO mengevaluasi seluruh kelompok (100 partikel).

Dalam penerapan batasan ketat (*hard constraints*) berupa *overshoot* $\leq 10\%$ dan *phase margin* $\geq 25°$, PSO menghasilkan respons yang sangat cepat (*rise time* 0,0101 detik)

namun beroperasi tepat di batas maksimal kestabilan dengan *overshoot* 10,00% dan *phase margin* 25,45°. Sebaliknya, SA memberikan margin stabilitas yang jauh lebih aman (*overshoot* 3,90% dan *phase margin* 34,70°). Hal ini menegaskan bahwa pemilihan metode optimasi harus mempertimbangkan aspek toleransi keamanan sistem, bukan sekadar meminimalkan nilai kesalahan semata.



Gambar 5. Visualisasi 3D Landscape Error (ITAE) terhadap variasi K_p dan K_i

Gambar 5 memberikan gambaran visual mengenai lingkungan pencarian solusi. Visualisasi ini menunjukkan bahwa permukaan kesalahan bersifat multimodal dengan nilai ITAE yang bervariasi terhadap kombinasi K_p dan K_i, sehingga optimasi tidak hanya tentang mencari nilai terkecil, tetapi juga harus tetap berada dalam batas-batas yang diperbolehkan.

SIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa PSO menghasilkan nilai ITAE lebih rendah (0,002088) dengan respons lebih cepat (*rise time* 0,0101 s), namun beroperasi di batas performa (*overshoot* 10,00%; *phase margin* 25,45°). Sebaliknya, SA lebih unggul pada efisiensi komputasi (rata-rata 11,65 s) dan stabilitas (*overshoot* 3,90%; *phase margin* 34,70°) dengan ITAE 0,002998. Penerapan *hard constraints* sukses menjaga keamanan sistem. PSO direkomendasikan untuk aplikasi yang mengutamakan presisi dan kecepatan, sementara SA untuk efisiensi dan stabilitas. Penelitian lanjutan disarankan menguji gangguan beban mekanis, algoritma lain seperti GWO/GA, serta kontroler PID fraksional.

DAFTAR PUSTAKA

Alqudah, A., Malkawi, A., & Alwadie, A. (2014). Adaptive Control of DC-DC Converter Using Simulated Annealing Optimization Method. *Journal of Signal and Information Processing*, *05*(04), 198–207. https://doi.org/10.4236/jsip.2014.54021

Fernando Fraga-Gonzalez, L., Fuentes-Aguilar, R. Q., Garcia-Gonzalez, A., & Sanchez-Ante, G. (2017). Adaptive Simulated Annealing for Tuning PID Controllers. *AI Communications*, *30*(5). https://doi.org/https://doi.org/10.3233/AIC-170741

Hu, Z., Guo, W., Zhou, K., Wang, L., Wang, F., & Yuan, J. (2024). Optimization of PID control parameters for marine dual-fuel engine using improved particle swarm algorithm. *Scientific Reports*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-63253-y

Motovario S.p.A. (2017). *TECHNICAL CATALOGUE: ELECTRIC MOTORS - STANDARD IEC*.

Nimisha K K, & R.Senthilkumar. (2018). *Optimal Tuning Of PID Controller For Switched Reluctance Motor Speed Control Using Particle Swarm Optimization*.

Ogata, Katsuhiko. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.

Prasetia, A. M., & Ramadani, M. N. (2024). Implementation of Induction Motor Speed Control Using a PID Controller. *Fidelity : Jurnal Teknik Elektro*, *6*(1), 12–20. https://doi.org/10.52005/fidelity.v6i1.195

Rahayu, E. S., Ma'arif, A., & Cakan, A. (2022). Particle Swarm Optimization (PSO) Tuning of PID Control on DC Motor. *International Journal of Robotics and Control Systems*, *2*(2), 435–447. https://doi.org/10.31763/ijrcs.v2i2.476

Redianto Archi Pangalinan, Yusri Ambabunga, & Lantana Dioren Rumpa. (2024). Sistem Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Induksi 1 Fasa . *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*, *5*(2).

Sanjaya, Y., Fauzi, A., Edikresnha, D., Munir, M. M., & Khairurrijal, K. (2017). Single Phase Induction Motor Speed Regulation Using a PID Controller for Rotary Forcespinning Apparatus. *Procedia Engineering*, *170*, 404–409. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.065

Standards, iTeh, & Institute of Standardization, S. (2026). *IEC 60034-1 INTERNATIONAL STANDARD Rotating electrical machines-Part 1: Rating and performance*. www.iec.ch

Udayakumar Durairaj, V. Murugananthan, Banupriya Balasubramanian, & R. Lakshmi. (2019). Optimal PID Controller Tuning using Simulated Annealing based Internal Model Control. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, *9*(2), 4536–4539. https://doi.org/10.35940/ijitee.B9021.129219

Zhu, Y., & Jiao, J. (2022). Automatic Control System Design for Industrial Robots Based on Simulated Annealing and PID Algorithms. *Advances in Multimedia*, *2022*. https://doi.org/10.1155/2022/9226576