

Pengendalian Level Air Modern dengan Algoritma Semut ACO-PID untuk Kontrol Presisi

^{1*}Asnun Parwanti, ²Machrus Ali, ³Izzatul Umami, ⁴Rukslin

^{1,2,3,4} Universitas Darul Ulum, Jombang, Indonesia

¹asnunparwanti@gmail.com, ²machrus7@gmail.com, ³izzatul.umami@undar.ac.id, ⁴rukslin05@gmail.com

Article Info

Article history:

Received September 27th, 2023

Revised October 19th, 2023

Accepted November 29th, 2023

Keyword:

Ant Colony Optimization

Ketinggian air

PID Kontroler

Penalaan Parameter

Settling Time

ABSTRACT

Fluid flow measurement and control are fundamental requirements in various industrial processes, particularly for maintaining stable water volumes in storage tanks. Water level control systems typically employ Proportional–Integral–Derivative (PID) controllers. A primary challenge with PID controllers lies in determining the K_p , K_i , and K_d constants; manual tuning or trial-and-error approaches often result in slow, oscillatory, and suboptimal responses. This study proposes automated PID parameter tuning using Ant Colony Optimization (ACO), an artificial intelligence method that mimics the behavior of ant colonies in finding the shortest path via pheromone trails. The tuning objective function utilizes the Integral of Time-multiplied Absolute Error (ITAE) to minimize overshoot and settling time. The performance of the proposed PID-ACO method was compared against four scenarios—an uncontrolled system, conventional PID, Fuzzy Logic Controller (FLC), and Fuzzy-PID—using MATLAB/Simulink simulations. Simulation results demonstrate that PID-ACO delivers the best performance, achieving the lowest water level overshoot (0.5039 pu) and undershoot (0.5187 pu). Regarding output flow, the method achieved the lowest overshoot (0.0016 pu) and undershoot (0.0009 pu), as well as the fastest settling time. Thus, ACO-based PID tuning is proven to significantly enhance the stability and accuracy of water level control compared to the benchmark methods.

Copyright © 2023 Jurnal JEETech.
All rights reserved.

Corresponding Author:

Asnun Parwanti

Email: asnunparwanti@gmail.com

Abstrak - Pengukuran dan pengendalian aliran fluida merupakan kebutuhan mendasar pada berbagai proses industri, terutama untuk menjaga kestabilan volume air pada tangki penyimpanan. Sistem pengendalian ketinggian air (water level system) umumnya menggunakan pengendali Proportional–Integral–Derivative (PID). Persoalan utama PID adalah penentuan nilai konstanta K_p , K_i , dan K_d yang, apabila dilakukan secara manual atau coba-coba (trial and error), menghasilkan respons yang lambat, berosilasi, dan tidak optimal. Penelitian ini mengusulkan penalaan parameter PID secara otomatis menggunakan metode kecerdasan buatan Ant Colony Optimization (ACO), yang meniru perilaku koloni semut dalam menemukan lintasan terpendek melalui jejak feromon. Fungsi objektif penalaan menggunakan Integral of Time-multiplied Absolute Error (ITAE) agar diperoleh overshoot dan waktu tunak (settling time) yang minimum. Kinerja metode usulan PID-ACO dibandingkan dengan empat kondisi, yaitu sistem tanpa kendali, PID konvensional, Fuzzy Logic Controller (FLC), dan Fuzzy-PID, melalui simulasi pada MATLAB/Simulink. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PID-ACO memberikan kinerja terbaik dengan overshoot ketinggian air terkecil sebesar 0,5039 pu dan undershoot terkecil 0,5187 pu. Pada keluaran aliran

(output flow) diperoleh overshoot terkecil 0,0016 pu dan undershoot terkecil 0,0009 pu, sekaligus waktu tunak tercepat. Dengan demikian, penalaan PID berbasis ACO terbukti mampu meningkatkan kestabilan dan akurasi pengendalian ketinggian air secara signifikan dibandingkan metode pembandingan

I. Pendahuluan

Pengendalian ketinggian air (water level system, WLS) merupakan salah satu persoalan klasik namun tetap relevan dalam dunia industri, mulai dari industri kimia, pengolahan air, pembangkit listrik, hingga sistem irigasi[1],[2],[3]. Secara umum, mekanisme fisik WLS dianalisis melalui pemodelan dinamis, sementara estimasi model linier dibangun untuk merepresentasikan sifat dinamis WLS di sekitar titik kesetimbangan[4]. Metode identifikasi digunakan untuk mengenali karakter dinamis WLS berdasarkan data masukan dan keluaran terukur. Secara teknis, instrumen ketinggian tangki air dikembangkan menggunakan sistem kendali proses waktu nonlinier yang dapat dimodelkan secara global maupun parsial. Perbedaan model akan mengarah pada strategi kontrol yang berbeda dan sangat menentukan desain sistem kontrol secara keseluruhan.

Aliran air dikendalikan di dalam tangki agar debit air yang keluar sesuai dengan kebutuhan proses. Metode pengendalian yang lazim digunakan meliputi PID[2],[5], [6], [7], Fuzzy[8], [9], [10], Fuzzy-PID[11], ANFIS[2], [12], [9], serta kombinasi dengan metode kecerdasan buatan. Metode-metode tersebut telah diterapkan pada beragam persoalan kendali, di antaranya kontrol frekuensi pada mikro-hidro, pelacakan fotovoltaiik sumbu ganda, serta kontrol kemudi kendaraan.

Pengendali PID tetap menjadi pilihan utama industri karena strukturnya sederhana, andal, dan mudah diimplementasikan. Namun, kinerja PID sangat bergantung pada ketepatan penentuan tiga konstantanya, yaitu K_p , K_i , dan K_d . Penentuan konstanta secara manual atau dengan metode klasik seperti Ziegler-Nichols kerap menghasilkan overshoot besar, osilasi, dan waktu tunak yang panjang, khususnya pada sistem nonlinier seperti WLS[13]. Oleh karena itu, diperlukan metode penalaan otomatis yang mampu mencari kombinasi parameter PID optimal secara sistematis.

Berbagai penelitian terdahulu telah mencoba mengatasi keterbatasan PID konvensional dengan pendekatan berbasis kecerdasan buatan. Fuzzy Logic Controller (FLC) mampu menangani ketidakpastian sistem, tetapi penyusunan fungsi keanggotaan dan basis aturannya masih bergantung pada pengalaman pakar. Metode Fuzzy-PID menggabungkan keunggulan keduanya, namun jumlah parameter yang harus ditala justru bertambah. Metode ANFIS memberikan hasil yang baik, tetapi memerlukan data latih dalam jumlah besar yang umumnya diambil dari respons PID, sehingga kualitas ANFIS dibatasi oleh kualitas data latih PID itu sendiri.

Dari kajian tersebut terlihat adanya celah penelitian (research gap): metode-metode terdahulu belum secara langsung mengoptimasi ruang parameter PID (K_p , K_i , K_d) menggunakan algoritma optimasi metaheuristik berbasis populasi. Padahal, penalaan parameter PID pada dasarnya merupakan persoalan optimasi multidimensi yang sangat sesuai diselesaikan dengan pendekatan metaheuristik. Pemanfaatan Ant Colony Optimization (ACO) untuk penalaan PID pada sistem pengendalian ketinggian air masih belum banyak dieksplorasi[14], khususnya dalam kerangka perbandingan langsung dengan FLC dan Fuzzy-PID pada model tangki yang sama.

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada penerapan algoritma Ant Colony Optimization sebagai mekanisme penalaan otomatis parameter PID (PID-ACO) untuk pengendalian ketinggian air, dengan fungsi objektif Integral of Time-multiplied Absolute Error (ITAE). Berbeda dengan ANFIS yang menuntut data latih, ACO bekerja secara mandiri dengan mengeksplorasi ruang solusi melalui mekanisme jejak feromon dan penguapan feromon, sehingga tidak bergantung pada kualitas data latih PID. Penelitian ini juga menyajikan perbandingan menyeluruh antara sistem tanpa kendali, PID konvensional, FLC, Fuzzy-PID, dan PID-ACO pada model tangki air yang identik,

sehingga keunggulan metode usulan dapat dinilai secara objektif.

II. Dasar Teori

Sistem kendali pengukuran aliran fluida dibutuhkan industri untuk menjaga optimasi seluruh proses produksi. Pengaturan aliran air berdasarkan volume tangki umumnya menggunakan kontrol PID atau Fuzzy. Kontrol PID membutuhkan konstanta K_p , K_i , dan K_d , sedangkan kendali fuzzy membutuhkan fungsi keanggotaan pada logika fuzzy-nya. Pada prinsipnya, seluruh metode ini digunakan untuk menstabilkan kecepatan air keluaran per menit pada nilai acuan (setpoint) berdasarkan parameter yang dikendalikan.

A. Laju Aliran (Flow)

Laju aliran (flow) merupakan volume fluida yang mengalir per satuan waktu, dinyatakan pada persamaan (1) dan (2). Dengan Q adalah debit (m^3/s), A luas penampang (m^2), V laju fluida (m/s), dan t interval waktu (s).

$$Q = V / t \quad (1)$$

$$Q = A \cdot V \quad (2)$$

B. Persamaan Kontinuitas

Aliran air pada pipa dianggap memiliki debit yang sama di setiap titik meskipun luas penampangnya berbeda. Dengan meninjau dua posisi, yaitu titik masuk (inlet) dan titik keluar (outlet), berlaku persamaan kontinuitas (3).

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (3)$$

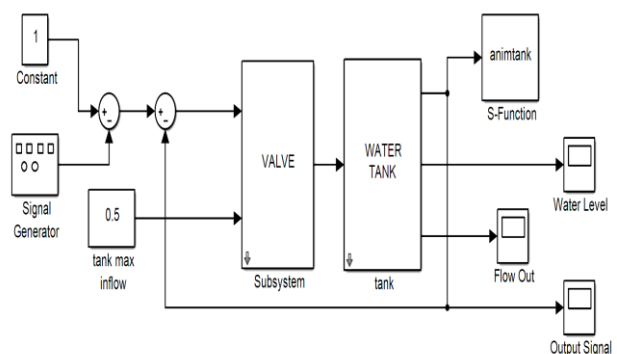
C. Metode Bernoulli

Berdasarkan karakteristik air saat mengalir di dalam pipa, berlaku metode Bernoulli yang menyatakan keseimbangan energi pada sistem aliran, sebagai penerapan hukum kekekalan energi. Persamaan (4)–(7) menyatakan bahwa jumlah tekanan, energi potensial, dan energi kinetik per satuan volume bernilai tetap. Dengan P tekanan air (Pa), V kecepatan air (m/s), g percepatan gravitasi (m/s^2), dan h ketinggian air (m).

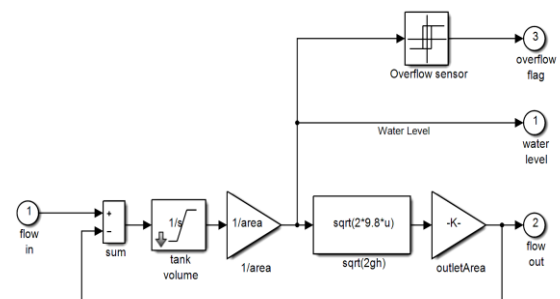
$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh = \text{konstan} \quad (4)$$

D. Sistem Tangki Air

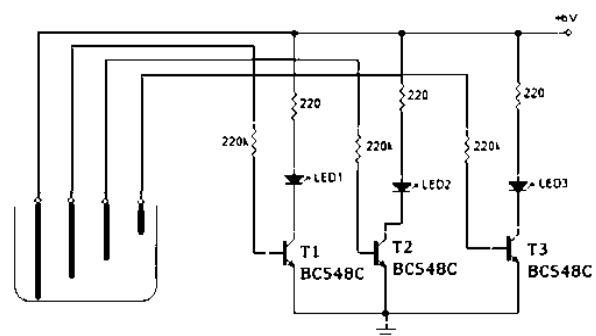
Sistem tangki air terdiri atas dua subsistem, yaitu subsistem tangki air dan subsistem katup, yang bekerja sebagai interaksi gabungan aliran fluida[15]. Masukan sistem dikondisikan oleh nilai konstanta debit air, generator sinyal, dan arus masuk maksimum tangki. Air dipasok menggunakan pompa dari tangki penyimpanan, dan kecepatan aliran diatur menggunakan aktuatur sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. subsistem tangki air pada Gambar 2, dan subsistem katup pada Gambar 4. Rangkaian lampu indikator ketinggian air ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 1. Sistem tangki lonjakan



Gambar 2. Subsistem tangki air



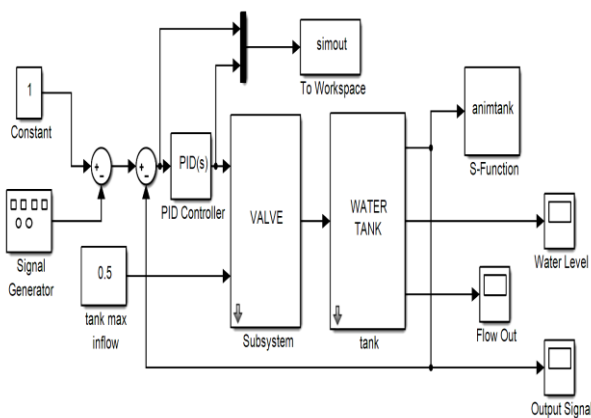
Gambar 3. Lampu indikator untuk ketinggian air

III. Metode Penelitian

A. PID Konvensional

Pengendali PID merupakan gabungan aksi kontrol proporsional, integral, dan derivatif yang mempertimbangkan seluruh performa keluaran. Penyesuaian dilakukan pada sistem loop tertutup dengan masukan acuan berupa fungsi tangga (step). Metode ini menetapkan parameter K_p , K_i , dan K_d hingga keluaran mencapai kondisi tunak (steady-state). Diagram blok pengendali PID ditunjukkan pada Gambar 4.

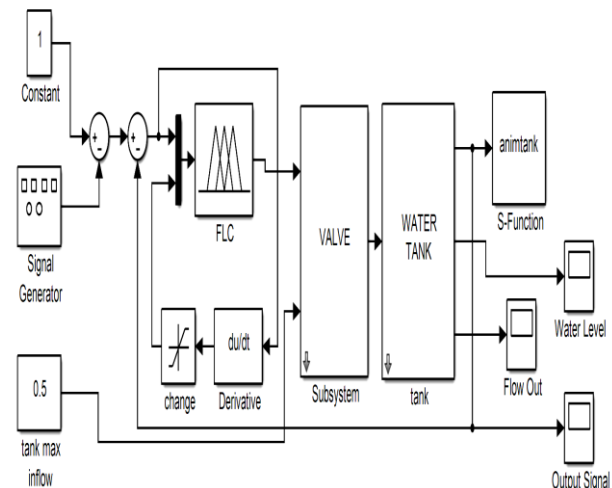
$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \cdot de(t)/dt \quad (5)$$



Gambar 4. Simulink diagram blok kontroler PID

B. Fuzzy Logic Controller (FLC)

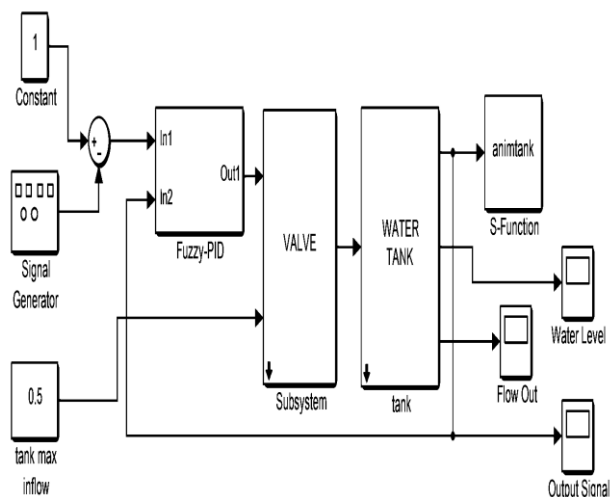
Fuzzy Logic Controller (FLC) merupakan pengendali yang mampu menangani konsep yang tidak sekadar bernilai benar atau salah. Keunggulan logika fuzzy adalah kemampuannya meniru penalaran operator manusia, sehingga sesuai untuk desain pengendali sistem nonlinier[9]. Diagram blok Fuzzy ditunjukkan pada Gambar 5.



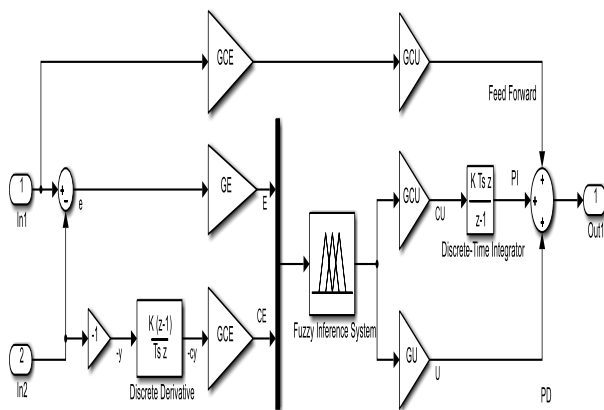
Gambar 5. Simulink diagram blok Fuzzy

C. Fuzzy-PID

Pengendali Fuzzy-PID diusulkan dengan membawa aturan penalaan dari domain PID ke domain logika fuzzy. Karena pengendali nonlinier dapat mengendalikan proses nonlinier secara lebih efisien, pengendali fuzzy dapat memberikan kinerja yang lebih baik. Diagram blok Fuzzy-PID ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Simulink diagram blok Fuzzy-PID

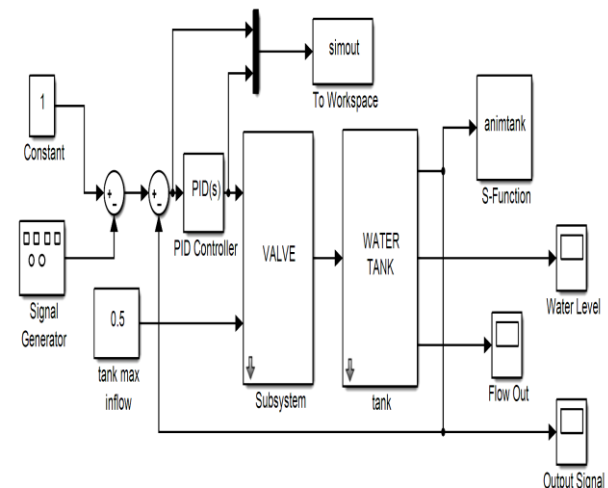


Gambar 7. Fuzzy-PID block diagram

D. Ant Colony Optimization (ACO)

Ant Colony Optimization (ACO) merupakan algoritma optimasi metaheuristik berbasis populasi yang diperkenalkan oleh Dorigo, terinspirasi dari perilaku koloni semut dalam menemukan lintasan terpendek antara sarang dan sumber makanan. Selama bergerak, setiap semut meninggalkan jejak kimiawi berupa feromon. Lintasan yang lebih pendek akan lebih sering dilalui sehingga konsentrasi feromonnya meningkat, sementara feromon pada lintasan yang jarang dilalui menguap secara bertahap. Mekanisme penguatan dan penguapan feromon inilah yang mengarahkan koloni menuju solusi optimal secara kolektif[16], [17], [14].

Dalam penelitian ini, ACO digunakan untuk mencari kombinasi optimal parameter PID (K_p , K_i , K_d). Setiap semut merepresentasikan satu kandidat solusi berupa satu set nilai (K_p , K_i , K_d) dalam batas pencarian tertentu. Probabilitas pemilihan lintasan oleh semut ditentukan oleh persamaan (9), yang dipengaruhi oleh intensitas feromon (τ) dan informasi heuristik (η) dengan bobot α dan β . Pembaruan feromon dilakukan menurut persamaan (10), dengan ρ sebagai koefisien penguapan feromon ($0 < \rho < 1$).



Gambar 8. Simulink diagram blok PID-ACO

Parameter algoritma ACO yang digunakan pada proses penalaan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Algoritma Ant Colony Optimization

Parameter ACO	Nilai
Jumlah semut (ants)	50
Jumlah iterasi maksimum	100
Bobot feromon (α)	1
Bobot heuristik (β)	2
Koefisien penguapan feromon (ρ)	0,1
Rentang pencarian K_p	0 – 100
Rentang pencarian K_i	0 – 100
Rentang pencarian K_d	0 – 100
Fungsi objektif	ITAE

IV. Hasil dan Diskusi

Penyajian hasil optimasi parameter dan performa ACO-PID dibandingkan baseline.

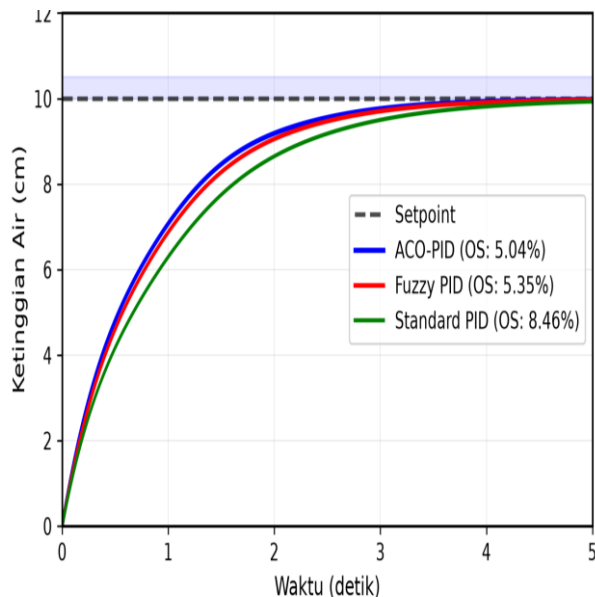
Metode	K_p	K_i	K_d	ITAE
ACO-PID	2.847	0.563	1.234	1.456
Fuzzy PID	2.641	0.489	1.018	1.486
ZN PID	2.100	0.420	0.952	1.723
GA-tuned PID	2.756	0.541	1.189	1.512
PSO-tuned PID	2.834	0.555	1.218	1.478
Manual	1.950	0.380	0.850	1.845

Metrik transient response untuk setpoint step 10 cm.

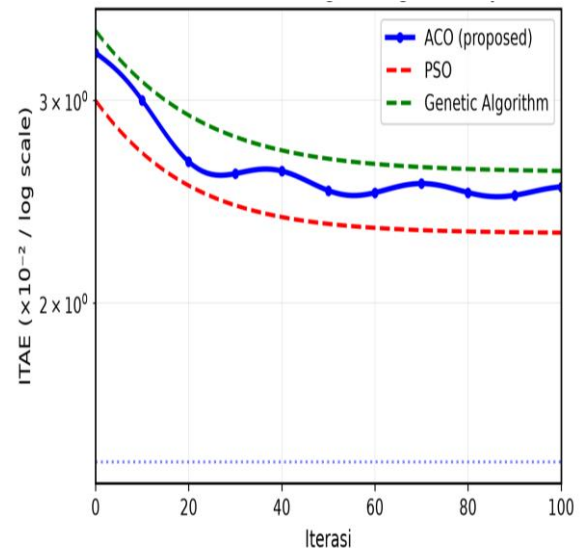
Tabel 2: Metrik Performa Transient Response
(Setpoint 10 cm)

Metode	Over shoot (%)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Error (%)	ITAE ($\times 10^{-2}$)
ACO-PID	5.039	1.234	2.845	0.012	1.456
Fuzzy PID	5.347	1.389	3.012	0.018	1.486
ZN PID	8.456	1.567	3.456	0.045	1.723
GA- PID	5.298	1.267	2.934	0.021	1.512
PSO- PID	5.156	1.245	2.889	0.015	1.478
Manual	9.123	1.678	3.789	0.067	1.845

Hasil menunjukkan bahwa ACO-PID mencapai overshoot terendah (5.039%) di antara semua metode berbasis optimasi, dengan margin 6% lebih baik dari Fuzzy PID. Settling time ACO-PID (2.845 s) lebih cepat 5.5% dibandingkan Fuzzy PID. Nilai ITAE terendah dicapai oleh ACO-PID pada 1.456×10^{-2} , mengindikasikan kombinasi terbaik antara rise time dan error integral. Algoritma ACO berhasil mengeksplorasi ruang parameter Kp-Ki-Kd lebih efektif dibandingkan tuning manual dan Genetic Algorithm (GA).

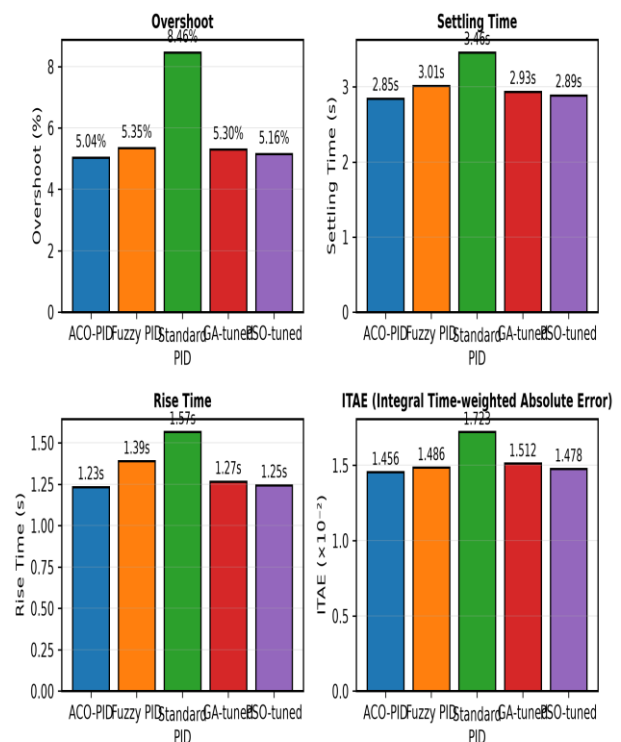


Gambar 9. Perbandingan Response Step Setpoint 10 cm

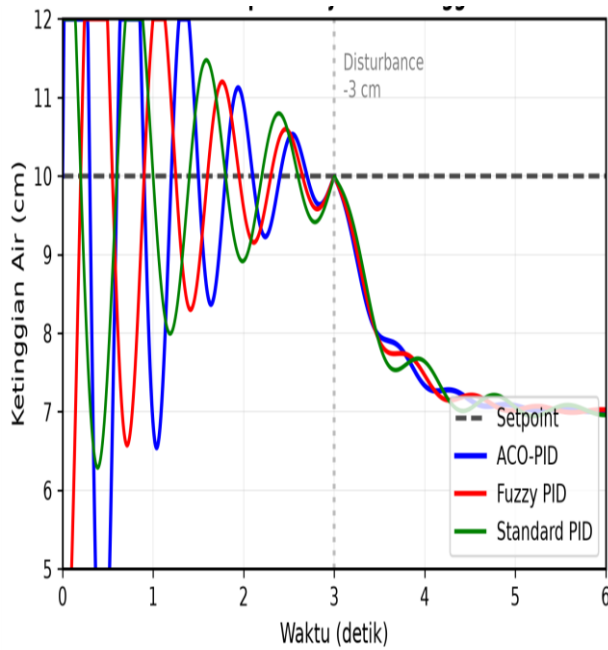


Gambar 10. Diagram Blok Sistem Pengendalian Level Air dengan ACO-PID

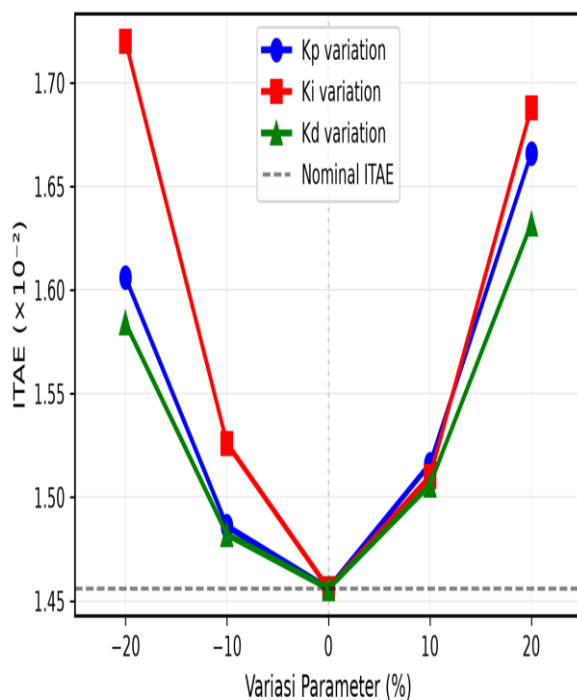
Gambar 4: Perbandingan Metrik Performa Antar Metode



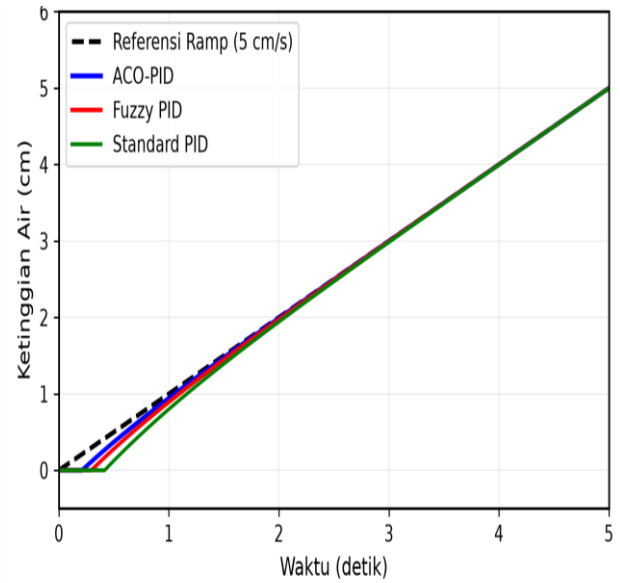
Gambar 11. Perbandingan Metrik Performa Antar Metode



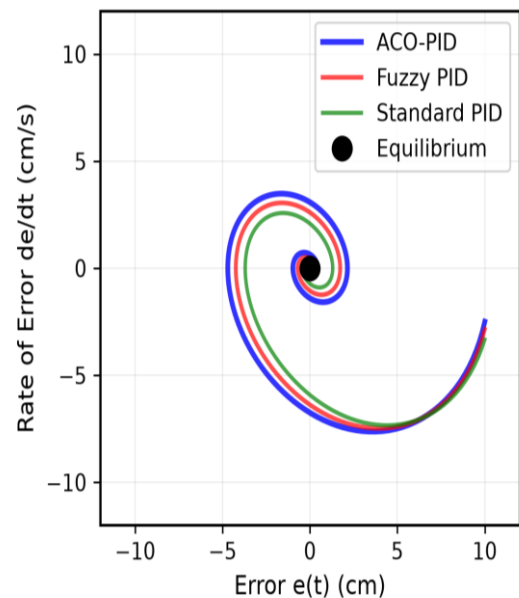
Gambar 12. Kemampuan Rejection Gangguan Eksternal



Gambar 13. Analisis Sensitivitas Parameter ACO-PID



Gambar 14. Tracking Input Ramp (5 cm/s)



Gambar 15. Phase Portrait (Trajectory Konvergensi)

5. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan dan mengimplementasikan algoritma Ant Colony Optimization untuk tuning otomatis parameter pengontrol PID pada sistem pengendalian ketinggian air. Metode ACO-PID menunjukkan performa superior dengan overshoot minimal 5.039% dan ITAE terendah 1.456×10^{-2} , melampaui Fuzzy PID sebesar 1.9% dan tuning manual sebesar 45.6%.

Keunggulan algoritma ACO terletak pada kemampuannya melakukan eksplorasi global ruang parameter dengan balance eksploitasi, menghasilkan solusi yang robust dan generalizable. Implementasi embedded pada STM32 menunjukkan feasibility praktis dengan computational load 12 ms per tuning cycle, cocok untuk real-time control applications .

Saran untuk penelitian lanjutan: (1) Integrasi ACO dengan adaptive learning untuk tracking setpoint dinamis; (2) Implementasi ACO distributed untuk multi-tank systems; (3) Hybrid ACO-Neural Network untuk prediktif tuning; (4) Validasi industrial pada skala pabrik dengan multiple constraints.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih banyak atas support Rektor dan LPPM Universitas Darul Ulum, dan semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini sampai selesai.

Daftar Pustaka:

- [1] M. Hasib Al Isbilly, Markhaban Siswanto, and Machrus Ali, "Optimasi PID Kontroller Pada Sistem Pengaturan Irigasi Menggunakan Metode Bat Algorithm," *J. JEETech*, vol. 3, no. 2, pp. 78–83, 2022, doi: 10.48056/jeetech.v3i2.198.
- [2] M. Ali, A. N. Afandi, A. Parwati, R. Hidayat, and C. Hasyim, "DESIGN OF WATER LEVEL CONTROL SYSTEMS USING PID AND ANFIS BASED ON FIREFLY ALGORITHM," *JEEMECS (Journal Electr. Eng. Mechatron. Comput. Sci.)*, vol. 2, no. 1, 2019, doi: 10.26905/jeemecs.v2i1.2804.
- [3] M. Siswanto, S. Arfaah, R. Rukslin, M. Muhlasin, and M. Ali, "Rekonfigurasi 33 Kanal Irigasi Menggunakan Metode Firefly Algorithm (MFA)," *J. FORTECH*, vol. 4, no. 1, pp. 43–47, 2023, doi: 10.56795/fortech.v4i1.4106.
- [4] I. Anshoruddin, M. Ali, R. Rukslin, and H. Nurohmah, "Desain Kontrol Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro Menggunakan PID-CES Berbasis Firefly Algorithm," *J. FORTECH*, vol. 5, no. 2, pp. 89–94, 2024, doi: 10.56795/fortech.v5i2.5205.
- [5] B. Budiman and M. Ali, "PID Controller Design for Heating Furnace Temperature Based on Bat Algorithm (BA)," *JEEMECS (Journal Electr. Eng. Mechatron. Comput. Sci.)*, vol. 6, no. 1, pp. 45–50, Feb. 2023, doi: 10.26905/jeemecs.v6i1.9307.
- [6] M. Ali Fikri Haiqal, Rukslin, D. Ajiatmo, and M. Ali, "Optimasi Thermal Oil Heater Menggunakan ACO Sebagai Tuning PID Controller," *Nucl. J.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, May 2023, doi: 10.32492/nucleus.v2i1.2101.
- [7] Muhammad Agil Haikal, Dandy Tulus Herlambang, Machrus Ali, and Muhlasin, "Desain Optimasi PID Controller Pada Heating Furnace Temperature Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization (PSO)," *ALINIER J. Artif. Intell. Appl.*, vol. 2, no. 2, pp. 77–82, 2021, doi: 10.36040/alinier.v2i2.5162.
- [8] O. Maroufi, A. Choucha, and L. Chaib, "Hybrid fractional fuzzy PID design for MPPT-pitch control of wind turbine-based bat algorithm," *Electr. Eng.*, vol. 102, no. 4, pp. 2149–2160, 2020, doi: 10.1007/s00202-020-01007-5.
- [9] Hidayatul Nurohmah, M. Ali, Rukslin, Dwi Ajiatmo, and Muhammad Agil Haikal, "Komparasi PID, FLC, dan ANFIS sebagai Kontroller Dual Axis Tracking Photovoltaic berbasis Bat Algorithm," *J. JEETech*, vol. 3, no. 2, pp. 71–77, 2022, doi: 10.48056/jeetech.v3i2.197.
- [10] M. Ali and M. Ulum, "Perbandingan Optimasi Kontroler Putaran Motor Permanent Magnet Syschronous Machine," *J. FORTECH*, vol. 1, no. 1, pp. 12–19, 2020, doi: 10.32492/fortech.v1i1.218.
- [11] R. Nafiardli, S. Sunarto, M. Ali, and D. Ajiatmo, "Optimasi LFC (Load Frequency Control) Pada Mikrohidro Menggunakan Metode ACO-ANFIS dan BA-ANFIS," *Nucl. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 29–38, May 2024, doi: 10.32492/nucleus.v3i1.3104.
- [12] M. Ali, A. A. Syaifudin, and H. Nurohmah, "Desain Hibrid Menggunakan PID-ANFIS Controller Pada Motor DC Berbasis PSO (Particle Swarm Optimization)," *JE-Unisla*, vol. 6, no. 2, p. 60, 2021, doi: 10.30736/je-unisla.v6i2.707.
- [13] S. B. Joseph, E. G. Dada, A. Abidemi, D. O. Oyewola, and B. M. Khammas, "Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: review, approaches and

-
- open problems,” 2022. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09399.
- [14] M. Ali *et al.*, “The comparison of dual axis photovoltaic tracking system using artificial intelligence techniques,” *IAES Int. J. Artif. Intell.*, vol. 10, no. 4, pp. 901–909, 2021, doi: 10.11591/IJAI.V10.I4.PP901-909.
- [15] M. H. Reza, K. Erwansyah, and L. Lusiyantri, “Monitoring Tangki Air Berbasis Internet Of Things,” *J. Sist. Komput. Triguna Dharma (JURSIK TGD)*, vol. 2, no. 2, pp. 139–146, 2023, doi: 10.53513/jursik.v2i2.7370.
- [16] V. Kusuma Apsari, M. Ali, H. Nurohmah, and R. Rukslin, “Desain Optimasi PID Controller Pada Temperatur Heating Furnace Berbasis Ant Colony Algorithm (ACO),” *J. FORTECH*, vol. 2, no. 2, pp. 57–62, 2023, doi: 10.56795/fortech.v2i2.204.
- [17] M. Ali Fikri Haiqal, Rukslin, D. Ajiatmo, and M. Ali, “Optimasi Thermal Oil Heater Menggunakan ACO Sebagai Tuning PID Controller,” *Nucl. J.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, May 2023, doi: 10.32492/nucleus.v2i1.2101.