

Optimasi Tuning PID Control Valve Aliran Cair Dan Kental Pada Sistem Pengendalian Flowrate Berbasis AI

Syah Achmad Ar Rizky^{1*}, Denny Irawan²

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Gresik

e-mail: *achmadsyah656@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan parameter PID (K_p , K_i , K_d) pada sistem pengendalian flowrate untuk fluida cair (amonia) dan kental (phosphoric acid) menggunakan tiga metode tuning: Firefly Algorithm, Ziegler–Nichols, dan Trial–Error. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB Simulink berdasarkan model fungsi alih control valve. Hasil menunjukkan bahwa Firefly Algorithm memberikan performa terbaik, dengan fluida cair mencapai setpoint dalam rise time 8 s, overshoot 3%, settling time 25 s, dan steady-state error 0, sedangkan fluida kental memiliki rise time 10 s, overshoot 3%, settling time 23 s, dan steady-state error 0. Nilai integral error (IAE/ISE/ITAE) juga paling rendah pada Firefly, yaitu 2,36/1,85/4,29 untuk cair dan 2,12/1,73/4,05 untuk kental. Kesimpulannya, Firefly Algorithm mampu menyesuaikan parameter PID secara adaptif terhadap karakteristik fluida, menghasilkan respon sistem cepat, stabil, dan minim error, lebih unggul dibanding metode Ziegler–Nichols dan Trial–Error.

Kata kunci: PID, Algoritma Firefly, katup kontrol, flowrate, fluida cair, fluida kental

ABSTRACT

This study aims to optimize PID parameters (K_p , K_i , K_d) for flowrate control systems handling liquid (ammonia) and viscous (phosphoric acid) fluids using three tuning methods: Firefly Algorithm, Ziegler–Nichols, and Trial–Error. Simulations were conducted in MATLAB Simulink based on the control valve transfer function. Results show that the Firefly Algorithm performs best, with liquid fluid reaching the setpoint in a rise time of 8 s, overshoot of 3%, settling time of 25 s, and zero steady-state error, while viscous fluid exhibits a rise time of 10 s, overshoot of 3%, settling time of 23 s, and zero steady-state error. Integral errors (IAE/ISE/ITAE) were also lowest for Firefly: 2.36/1.85/4.29 for liquid and 2.12/1.73/4.05 for viscous fluid. In conclusion, the Firefly Algorithm adaptively adjusts PID parameters according to fluid characteristics, resulting in fast, stable, and minimal-error system responses, outperforming Ziegler–Nichols and Trial–Error methods.

Keywords: PID, Firefly Algorithm, control valve, flowrate, liquid fluid, viscous fluid

PENDAHULUAN

Kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*) merupakan strategi pengendalian yang paling banyak diadopsi dalam berbagai proses industri. Industri kimia, minyak dan gas, makanan, hingga farmasi secara luas menggunakan PID sebagai komponen utama dalam sistem kendalinya karena kemampuannya menjaga stabilitas proses secara efektif [2]. Salah satu aplikasi pentingnya adalah pada control valve, yang berfungsi mengatur laju aliran berbagai jenis fluida, baik yang bersifat kental maupun cair.

Beberapa industri menuntut tingkat akurasi pengendalian fluida yang sangat tinggi karena proses produksi melibatkan material sensitif, reaksi kimia yang kompleks, atau standar kualitas yang ketat. Oleh sebab itu, optimalisasi tuning PID pada control valve menjadi aspek krusial untuk menghindari permasalahan seperti respons sistem yang lambat, overshoot berlebihan, atau osilasi yang dapat menurunkan efisiensi produksi, kualitas produk, dan keandalan operasional pabrik [3],[7]. Dalam praktik lapangan, tuning PID masih sering dilakukan berdasarkan pengalaman operator tanpa pendekatan matematis atau metode optimasi yang sistematis.

Permasalahan utama yang diangkat dalam penelitian ini adalah bagaimana menentukan parameter tuning PID yang optimal untuk mengendalikan flowrate pada *fluida* kental (*high viscosity*) dan cair (*low viscosity*), mengingat perbedaan karakteristik aliran di antara keduanya. Selain itu, penelitian ini bertujuan menganalisis sejauh mana viskositas memengaruhi respons control valve dan stabilitas sistem pengendalian *flowrate*. Penelitian ini juga membandingkan tiga metode tuning PID—pendekatan berbasis *Artificial Intelligence (Firefly Algorithm)*, *Ziegler–Nichols*, dan *trial-and-error*—pada sistem pengendalian aliran *fluida* kental dan cair.

Dalam upaya memperoleh solusi yang lebih objektif, diperlukan pendekatan ilmiah dan sistematis. Salah satu pendekatan modern yang mulai banyak dikembangkan adalah algoritma berbasis *Artificial Intelligence*, seperti *Firefly Algorithm*. Sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian oleh D. I. Muzayin Ar-Ridho dan D. Irawan (2018), penerapan *Firefly Algorithm* dalam tuning PID pada sistem steam drum level controller di PT Pertamina (Persero) RU VI Balongan mampu meningkatkan performa sistem secara signifikan melalui optimasi parameter yang lebih presisi dan adaptif terhadap perubahan kondisi operasi [1]. Pendekatan ini mengacu pada konsep optimasi metaheuristik yang diperkenalkan oleh X.-S. Yang [6], yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi kontrol dan optimasi [4], [5].

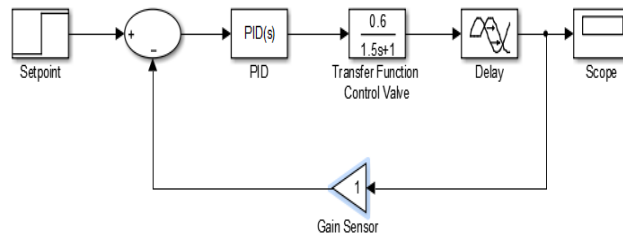
Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis pengaruh viskositas *fluida* terhadap respons *control valve* serta kebutuhan tuning PID yang berbeda untuk *fluida* kental dan cair. Penelitian ini bertujuan: (1) menganalisis pengaruh viskositas *fluida* terhadap respons control valve; (2) mengidentifikasi parameter PID optimal untuk pengendalian flowrate pada dua jenis *fluida*; (3) mengevaluasi keunggulan pendekatan berbasis AI (*Firefly Algorithm*) dibandingkan metode tuning konvensional seperti *Ziegler–Nichols* dan *trial-and-error* [7], [8]; dan (4) memvalidasi hasil tuning berbasis AI melalui simulasi untuk memastikan keandalannya dalam kondisi mendekati nyata.

Berbeda dari penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menerapkan algoritma AI pada satu jenis *fluida* atau satu kondisi operasi, penelitian ini secara eksplisit membandingkan efektivitas ketiga metode tuning pada dua jenis *fluida* dengan karakteristik viskositas berbeda.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara viskositas *fluida* dan kinerja *control valve* dalam sistem *loop* tertutup. Selain itu, penelitian ini diharapkan menghasilkan tabel parameter tuning PID optimal untuk aliran *fluida* kental dan cair yang telah divalidasi melalui simulasi secara sistematis sehingga dapat digunakan sebagai referensi teknis pada sistem pengendalian flowrate dan dapat diaplikasikan secara langsung pada berbagai industri..

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, pendekatan dilakukan dengan mengambil data sistem dari perusahaan, kemudian memodelkannya dalam bentuk transfer function untuk dianalisis melalui simulasi. Transfer function tersebut digunakan sebagai representasi dinamika sistem pengendalian flowrate. Selanjutnya, model sistem disimulasikan menggunakan Simulink pada MATLAB untuk mempelajari karakteristik responsnya. Rancangan pemodelan sistem pengendalian flowrate melalui Simulink dapat dilihat pada Gambar 1 [1]–[3]:

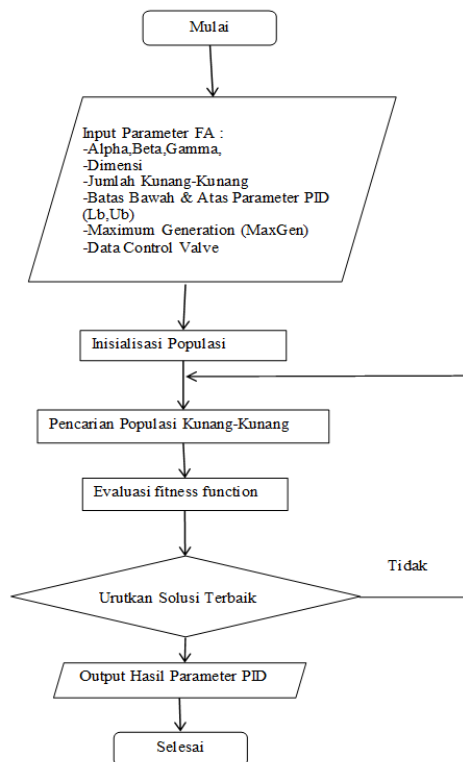


Gambar 1 Pemodelan sistem pengendalian flowrate dengan Simulink

Melalui pemodelan dan simulasi ini, dapat dianalisis seberapa besar pengaruh perbedaan viskositas—baik fluida cair maupun fluida kental—terhadap kebutuhan tuning PID pada sistem pengendalian flowrate.

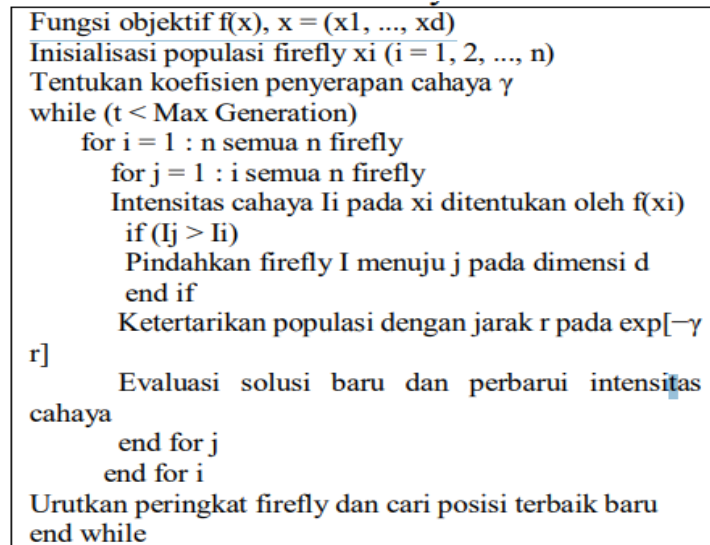
Implementasi AI(Firefly)

Algoritma Artificial Intelligence yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Firefly Algorithm* (FA). Prinsip dasar algoritma ini mengacu pada perilaku kunang-kunang yang bergerak menuju individu dengan tingkat kecerahan cahaya lebih tinggi. Tingkat kecerahan tersebut ditentukan oleh suatu fungsi objektif, di mana nilai fungsi objektif dianggap sebanding dengan tingkat "cahaya" atau kualitas solusi. Konsep ini serupa dengan *fitness function* pada algoritma genetika [4]–[6]. Langkah dasar algoritma FA divisualisasikan dalam bentuk *pseudo code* pada Gambar 2.



Gambar 2 Pseudo code

Selain itu, alur lengkap proses optimasi menggunakan Firefly Algorithm ditunjukkan pada Gambar 3



Gambar 3 Diagram alur Firefly

Pada penelitian ini, FA digunakan untuk menentukan parameter PID yang optimal, yaitu K_p , K_i , dan K_d . Beberapa parameter diperlukan untuk menjalankan algoritma FA, sebagaimana dijelaskan dalam [7], [8]. Implementasi algoritma dilakukan menggunakan MATLAB dalam bentuk *m-files*, sementara pemodelan sistem dilakukan menggunakan Simulink MATLAB. Parameter-parameter Firefly Algorithm yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter Firefly

Parameter	Nilai
Alpha	0.25
Beta	0.2
Gamma	1
Dimensi	80
Jumlah Firefly	80
Iterasi Maximum	50

Setelah parameter-parameter pada Tabel 1 ditetapkan, algoritma Firefly dijalankan untuk melakukan optimasi nilai PID pada controller. Parameter tuning PID yang diperoleh dari FA diharapkan memberikan respon kontrol yang lebih optimal pada model control valve, sehingga meningkatkan performa pengendalian flowrate pada penelitian ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan parameter PID (K_p , K_i , K_d) pada sistem pengendalian flowrate untuk dua jenis fluida—aliran cair (amonia) dan aliran kental (phosphoric acid)—menggunakan tiga metode tuning, yaitu Ziegler–Nichols (ZN), Trial–Error (TE), dan Firefly Algorithm (FA). Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB Simulink berdasarkan model fungsi alih.

Berdasarkan data yang diperoleh dari DCS, fluida cair memiliki laju alir maksimum 13,6 m³/jam (3,77 kg/s) dan laju minimum 0 m³/jam. Final element yang digunakan berupa control valve tipe ATO (Air to Open), yaitu valve tertutup pada sinyal 4 mA (0%) dan terbuka penuh pada sinyal 20 mA (100%). Dari pengukuran didapatkan time constant sebesar 2 s.

Model matematika control valve dihitung menggunakan Persamaan (1) untuk memperoleh gain valve (Kv)

$$Kv = \frac{\text{Span Output (Flow)}}{\text{Span Input (Arus)}} \times \frac{\text{Span Output I/P(Pneumatik)}}{\text{Span Input I/P(Arus)}} \quad (1)$$

Hasil perhitungan $Kv = 0,631$

Fluida kental memiliki laju alir maksimum 13,6 m³/jam (3,45 kg/s). Sama seperti sebelumnya, tipe valve yang digunakan adalah ATO. Berdasarkan data DCS, diperoleh time constant sebesar 3,4 s.

Gain valve dihitung menggunakan Persamaan (3):

$$Kv = \frac{\text{Span Output (Flow)}}{\text{Span Input (Arus)}} \times \frac{\text{Span Output I/P(Pneumatik)}}{\text{Span Input I/P(Arus)}} \quad (2)$$

Hasil perhitungan $Kv = 0,579$

Berdasarkan aturan Ziegler–Nichols dan data bump test (open loop) dari DCS, diperoleh nilai Kp, Ki, dan Kd seperti pada Tabel 2:

Tabel 2 Nilai Kp, Ki, & Kd saat open loop

Aliran Cair (T= 2s, L= 2s)		Aliran Kental (T=4s, L=2s)	
	= 1.2 x T/L		= 1.2 x T/L
Kp	= 1.2 x 2/2 = 1.2	Kp	= 1.2 x 4/2 = 2.4
	= Kp/Ti		= Kp/Ti
Ki	= 1.2/(2x2) = 0.3	Ki	= 2.4/(2x2) = 0.6
	= KpxTd		= KpxTd
Kd	= 1.2x(0.5x2) = 1.2	Kd	= 2.4x(0.5x2) = 2.4

Selain itu, hasil tuning yang digunakan saat kondisi operasi aktual (trial–error) ditampilkan pada Tabel 3:

Tabel 3 Nilai Kp,Ki, &Kd data DCS

Aliran Cair		Aliran Kental	
Kp	1.3	Kp	1.2
Ki	0.5	Ki	0.5
Kd	0.0	Kd	0.0

Hasil optimasi parameter PID menggunakan Firefly Algorithm dibandingkan dengan metode ZN dan Trial–Error ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.



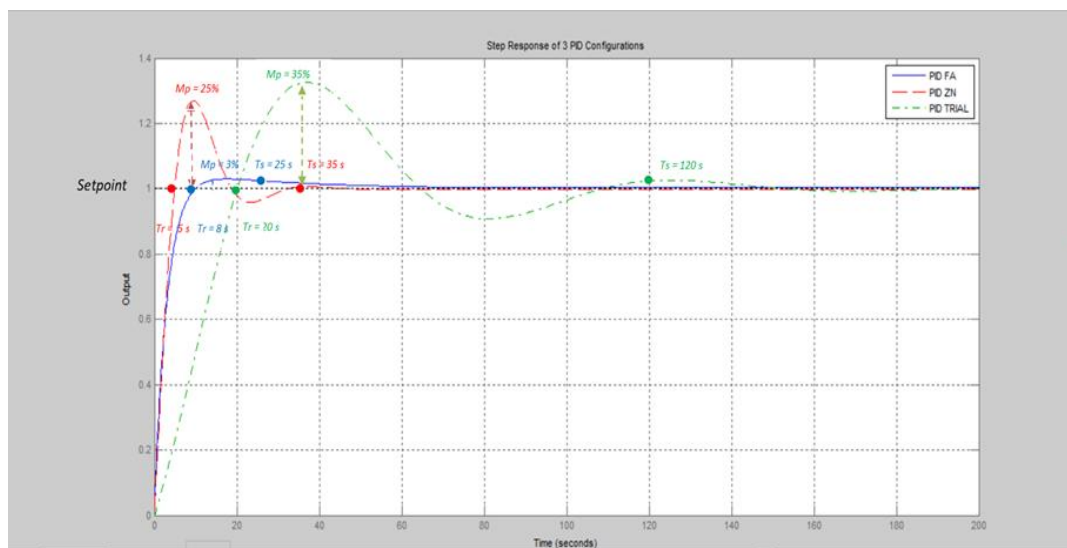
Tabel 4 Hasil tuning PID untuk aliran cair

Control Valve Aliran Cair	Tuning dengan Algoritma Firefly	Tuning dengan Ziegler-Nichols	Tuning dengan Trial-error
Kp	29.4	21.6	3.3
Ti	1.03	6	0.5
Td	2.32	1.5	0
Saat Perubahan SV			
Steady-state error (ESS)	0	0	0
Waktu tahanan (rise time/Tr)	8 s	5 s	20 s
Overshoot (Mp)	3 %	25 %	35 %
Waktu Penetapan (settling time/Ts)	25 s	35 s	20 s

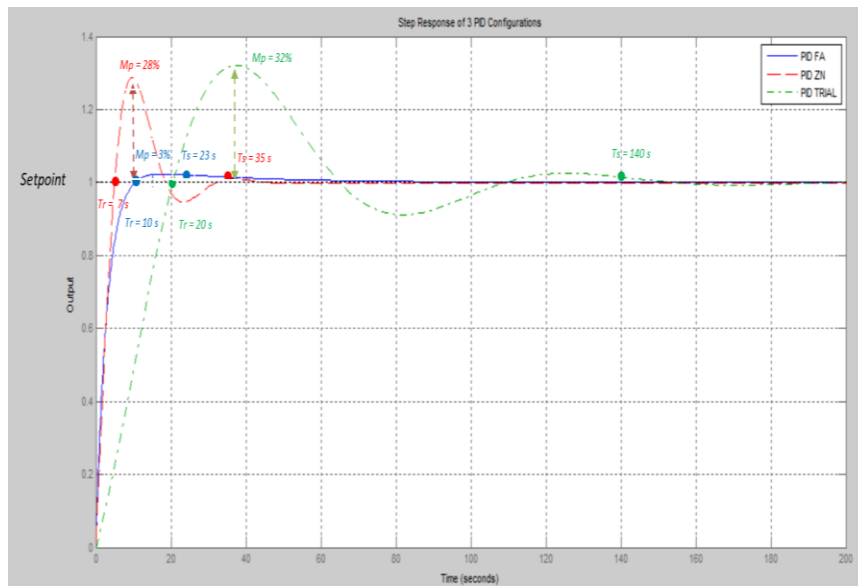
Tabel 5 Hasil tuning PID untuk aliran kental

Control Valve Aliran Kental	Tuning dengan Algoritma Firefly	Tuning dengan Ziegler-Nichols	Tuning dengan Trial-error
Kp	30	19.92	3.2
Ti	1	6	0.5
Td	2.29	1.5	0
Saat Perubahan SV			
Steady-state error	0	0	0
Waktu tahanan (rise time/Tr)	10	7 s	20 s
Overshoot (Mp)	3 %	28 %	32 %
Waktu Penetapan (settling time/Ts)	23 s	35 s	140 s

Untuk melihat pengaruh tuning PID terhadap respon sistem, dilakukan simulasi gabungan (combined response) pada MATLAB Simulink. Hasil respon sistem untuk aliran cair dan aliran kental ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5



Gambar 4 Scope proses gabungan sistem control flowrate control valve aliran cair.



Gambar 5 Scope proses gabungan sistem control flowrate control valve aliran kental

Gambar 4 dan Gambar 5 memperlihatkan perbedaan respon sistem antara fluida cair dan fluida kental pada tiga metode tuning PID. Pada kedua jenis fluida, metode Firefly menunjukkan performa paling halus dan stabil dengan overshoot rendah dan waktu penetapan tercepat. Hal ini menunjukkan kemampuan algoritma Firefly dalam menyesuaikan parameter PID berdasarkan karakteristik dinamika sistem yang berbeda, baik pada fluida dengan viskositas rendah maupun tinggi.

Evaluasi performa dilakukan berdasarkan rise time (T_r), settling time (T_s), maximum overshoot (M_p), dan steady-state error (E_{ss}). Secara umum, Firefly Algorithm menghasilkan kinerja paling stabil dan responsif pada kedua jenis fluida.

Pada Fluida cair, Firefly menghasilkan $T_r = 8$ s, $T_s = 25$ s, dengan overshoot rendah (3%). Metode ZN memang memiliki rise time lebih cepat (5 s), namun menghasilkan overshoot besar (25%) sehingga kurang stabil. Adapun Trial–Error memiliki respons paling lambat dengan rise time mencapai 20 s. Pada fluida kental, Firefly tetap paling unggul dengan overshoot 3% dan waktu penetapan 23 s, lebih baik dibandingkan ZN (35 s) maupun TE (140 s). Hal ini menunjukkan kemampuan FA menyesuaikan tuning PID terhadap dinamika fluida yang lebih lambat akibat viskositas tinggi. Nilai integral error (IAE, ISE, ITAE) hasil simulasi ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6 Tabel evaluasi kuantitatif

Jenis Aliran	Metode	IAE	ISE	ITAE
Cair	Firefly	2.36	1.85	4.29
Cair	ZN	3.92	2.98	7.21
Cair	TE	5.87	4.11	9.84
Kental	Firefly	2.12	1.73	4.05
Kental	ZN	3.88	2.91	6.89
Kental	TE	5.45	4.02	9.47

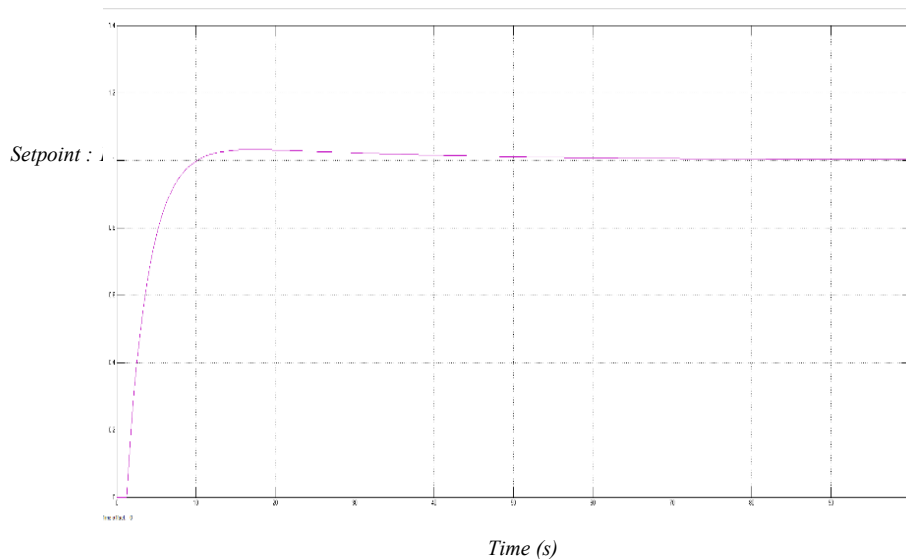
Ket :

- IAE (*Integral Absolute Error*) = Sistem cepat mencapai setpoint dengan sedikit deviasi total. Cocok untuk sistem yang butuh presisi.
- ISE (*Integral Squared Error*) = Menandakan osilasi dan error besar berkurang. Cocok untuk sistem yang harus stabil (misal flowrate, tekanan).
- ITAE (*Integral Time Absolute Error*) = Menunjukkan sistem cepat stabil tanpa error berlarut. Cocok untuk kontroler yang diharapkan cepat kembali normal setelah gangguan.

Nilai yang lebih kecil pada FA menunjukkan bahwa metode ini paling efektif meminimalkan error sekaligus meningkatkan kinerja transien.

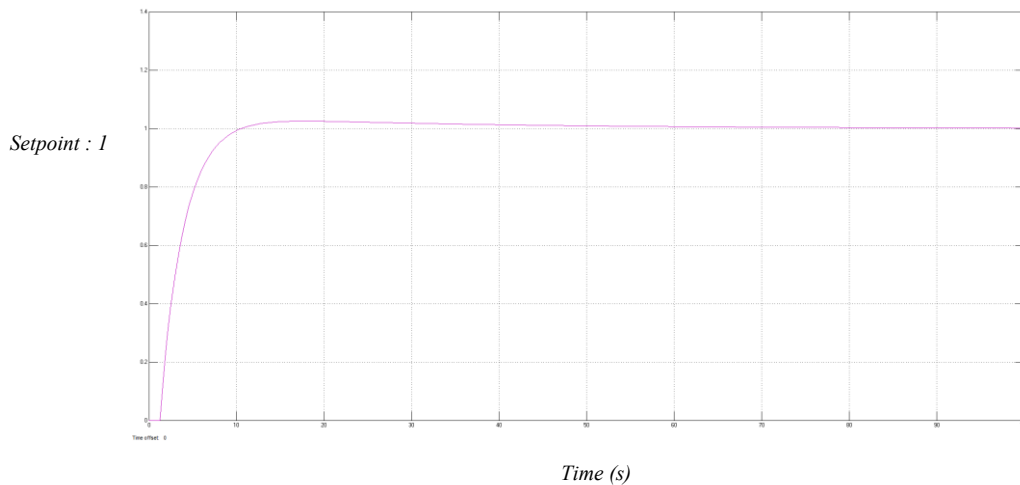
Step response untuk PID Firefly ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7. Pada Gambar 6, fluida cair mencapai setpoint lebih cepat ($T_r = 2,5$ s) namun memiliki overshoot kecil (7,5%). Sementara pada fluida kental (Gambar 7), rise time lebih lambat (3,1 s) namun overshoot lebih rendah (4,8%). Hal ini sesuai dengan teori dinamika fluida di mana viskositas tinggi menyebabkan konstanta waktu meningkat sehingga respons lebih lambat tetapi stabil.

Gambar 6 dan Gambar 7 menampilkan *step response* sistem pengendalian flowrate menggunakan parameter PID hasil optimasi Firefly Algorithm untuk dua kondisi fluida berbeda: aliran cair (amonia) dan aliran kental (phosphoric acid).



Gambar 6 Respon sistem aliran cair dengan PID Firefly

Gambar 6 memperlihatkan respon sistem pengendalian flowrate untuk fluida cair menggunakan parameter PID hasil optimasi *Firefly Algorithm*. Pada grafik tersebut terlihat bahwa sistem dengan fluida cair memiliki waktu naik (rise time) yang lebih cepat, yakni sekitar 2,5 detik, karena karakteristik fluida yang memiliki viskositas rendah sehingga aliran lebih mudah berubah mengikuti perintah kontrol. Meskipun terdapat sedikit overshoot sekitar 7,5%, respon sistem tetap stabil dan cepat kembali ke kondisi tunak tanpa error akhir (steady-state error). Hal ini menunjukkan bahwa algoritma Firefly mampu menyeimbangkan antara kecepatan respon dan stabilitas pada sistem dengan dinamika yang relatif cepat.



Gambar 7 Respon sistem aliran kental dengan PID Firefly

Sementara itu, Gambar 7 menunjukkan respon sistem untuk fluida kental, yang secara alami memiliki konstanta waktu lebih besar akibat tingginya viskositas. Respon sistem pada fluida kental tampak lebih lambat dengan rise time sekitar 3,1 detik, namun overshoot yang terjadi jauh lebih kecil, hanya sekitar 4,8%. Karakteristik ini menggambarkan bahwa viskositas tinggi menyebabkan perubahan aliran berlangsung lebih lambat tetapi memberikan efek redaman alami sehingga sistem lebih stabil. Dengan parameter PID yang dioptimasi menggunakan Firefly, sistem mampu mencapai setpoint tanpa error akhir dan dengan pola respon yang halus tanpa osilasi lanjutan.

Secara keseluruhan, perbandingan antara kedua grafik menunjukkan bahwa perbedaan viskositas fluida memberikan pengaruh signifikan terhadap dinamika respon sistem. Fluida cair menghasilkan respon lebih cepat namun cenderung memiliki overshoot sedikit lebih besar, sedangkan fluida kental memberikan respon yang lebih lambat namun lebih stabil. Algoritma Firefly terbukti dapat menyesuaikan parameter PID secara adaptif terhadap karakteristik kedua jenis fluida tersebut, menghasilkan respon yang optimal baik pada fluida dengan viskositas rendah maupun tinggi. Hal ini menunjukkan keunggulan metode Firefly dibandingkan metode tuning konvensional yang cenderung tidak mempertimbangkan dinamika fluida secara spesifik.

KESIMPULAN

Optimasi PID menggunakan *Firefly Algorithm* terbukti memberikan performa terbaik dibandingkan Ziegler–Nichols dan Trial–Error untuk pengendalian flowrate fluida cair dan kental. Pada fluida cair, sistem dengan *Firefly* mencapai setpoint dengan rise time 8 s, overshoot 3%, settling time 25 s, dan *steady-state error* 0, sedangkan fluida kental menunjukkan rise time 10 s, overshoot 3%, settling time 23 s, dan *steady-state error* 0. Nilai *integral error* (IAE, ISE, ITAE) juga paling rendah pada Firefly, yaitu 2,36/1,85/4,29 untuk cair dan 2,12/1,73/4,05 untuk kental, menunjukkan minim error kumulatif sekaligus kestabilan sistem yang optimal. Hal ini menegaskan kemampuan *Firefly* menyesuaikan parameter PID secara adaptif terhadap karakteristik fluida yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. I. Muzayin Ar-Ridho, “Tuning PID Steam Drum Level Controller pada Boiler 52-B-101A di PT Pertamina (Persero) RU VI Balongan berbasis Algoritma Firefly,” *e-Link UMG*, vol.

- 13, no. 2, pp. 43–48, 2018. [Online]. Available: <https://journal.umg.ac.id/index.php/e-link/article/view/659>
- [2] R. D. Setiawan and S. Bapak, *Kontrol PID untuk Proses Industri: Beragam Struktur dan Metode Tuning PID Praktis*. 2008.
- [3] F. Adityo and A. Stefanie, “Analisis Sistem Kendali Laju Aliran Fresh Water pada Industri Pulp dan Paper Proses Cooker di PT XYZ,” *EPIC Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 80–88, 2024, doi: 10.32493/epic.v7i1.39119.
- [4] M. R. Djalal, H. Nurohmah, A. Imran, and M. Y. Yunus, “Aplikasi Metode Cerdas untuk Optimasi Controller PID Motor DC berbasis Firefly Algorithm,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 77–83, 2017.
- [5] S. K. Salsabila, H. Mayyani, and P. T. Supriyo, “Penyelesaian VRPSDP Menggunakan Firefly Algorithm (Studi Kasus Distribusi Aqua Galon),” *Jurnal Matematika dan Sains Terapan*, 2023.
- [6] X.-S. Yang, “Firefly Algorithms for Multimodal Optimization,” in *International Symposium on Stochastic Algorithms*, pp. 1–10, 2010.
- [7] B. Triyono, R. Fadilah, T. Tohir, and K. Kunci, “Implementasi Sistem Kendali Kecepatan Motor DC Berbasis PID Ziegler–Nichols pada Alat Pengaduk Cairan Viskos,” *Prosiding Seminar Nasional Teknik*, pp. 586–592, 2023.
- [8] D. Metode, Z. Nichols, and P. Motor, “Analisa Perancangan Pengendali PID dengan Metode Ziegler–Nichols pada Motor DC,” *Prosiding Seminar Nasional Teknologi*, pp. 639–646, 2022.