

Optimasi Pengendali PID untuk Alat Ukir Kaligrafi pada Mesin Computerized Numerical Control (CNC) berbasis Grey Wolf Optimization

PID Controller Optimization for Calligraphy Engraving Tools on Computerized Numerical Control (CNC) Machines Based on Grey Wolf Optimization

^{1*} Machrus Ali, ² Muhammad Agil Haikal, ³ Fresy Nugroho, ⁴ Tri Mukti Lestari,

⁵ Dian Maharani, ⁶ Fuad Dwi Hanggara, ⁷ Fariz Rifqi Zul Fahmi

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Darul Ulum

Jalan KH. Abdurrahman Wahid (Gus Dur) No. 29A, Jombang, Jawa Timur, Indonesia

^{1,3,4,5,6} Program Studi Teknik Elektro, UIN Maulana Malik Ibrahim Malang

Jalan Gajayana No. 50, Kelurahan Jatimulyo, Kecamatan Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur

*¹machrus.te@undar.ac.id, ²agil.haikal86@gmail.com, ³fresy@ti.uin-malang.ac.id, ⁴trimuktilestari@ti.uin-malang.ac.id,

⁵dian.maharani@mat.uin-malang.ac.id, ⁶fuaddh31@uin-malang.ac.id, ⁷farizrifqizf@uin-malang.ac.id

Informasi Artikel

Diajukan, 27 Februari 2026

Diterima, 15 April 2026

Diterbitkan, 5 Juni 2026

Kata Kunci :

PID, CNC, Kaligrafi, Grey Wolf Optimization, MATLAB/Simulink

Keyword :

PID, CNC, Calligraphy, Grey Wolf Optimization, MATLAB/Simulink

ABSTRAK

Kualitas ukiran kaligrafi pada mesin CNC sangat dipengaruhi oleh akurasi pelacakan lintasan sumbu dan stabilitas gerak selama transisi kecepatan, tikungan tajam, dan variasi beban pemotongan. Pengontrol PID banyak digunakan dalam sistem servo CNC, namun penyetelan gain yang tidak tepat dapat meningkatkan kesalahan pelacakan, memperpanjang waktu penyelesaian, dan menyebabkan *overshoot* yang menurunkan kualitas permukaan. Studi ini mengusulkan penyetelan PID berbasis Grey Wolf Optimization (GWO) yang diimplementasikan dalam MATLAB/Simulink. Fungsi objektif didominasi oleh ITAE dengan penalti pada *overshoot*, waktu penyelesaian, dan kesalahan keadaan tunak. Selain uji pelacakan langkah dan sinusoidal, jalur alat kaligrafi yang berasal dari kode G (*placeholder*) disertakan untuk mewakili segmen dengan kelengkungan tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PID yang disetel GWO mengurangi ITAE, meningkatkan waktu penyelesaian dibandingkan penyetelan konvensional, dan menurunkan kesalahan pelacakan RMS pada frekuensi rendah hingga menengah. Alur kerja yang diusulkan bersifat modular dan dapat digantikan oleh model plant yang teridentifikasi dari sumbu CNC nyata.

ABSTRACT

The engraving quality of calligraphy on CNC machines is strongly affected by axis trajectory-tracking accuracy and motion stability during speed transitions, sharp corners, and cutting-load variations. PID controllers are widely adopted in CNC servo systems, yet improper gain tuning may increase following error, prolong settling time, and cause *overshoot* that degrades surface finish. This study proposes Grey Wolf Optimization (GWO)-based PID tuning implemented in MATLAB/Simulink. The objective function is dominated by ITAE with penalties on *overshoot*, settling time, and steady-state error. In addition to step and sinusoidal tracking tests, a G-code-derived calligraphy toolpath (*placeholder*) is included to represent high-curvature segments. The results indicate that the GWO-tuned PID reduces ITAE, improves settling time versus conventional tuning, and decreases RMS tracking errors at low-to-medium frequencies. The proposed workflow is modular and can be replaced by an identified plant model of a real CNC axis.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan produk ukir kaligrafi berbasis CNC meningkat pada aplikasi dekoratif, papan nama, dan karya seni karena mesin *Computerized Numerical Control (CNC)* mampu menghasilkan pola berulang secara konsisten. Namun, lintasan kaligrafi didominasi kurva dengan perubahan arah cepat (*high curvature*) dan segmen pendek, sehingga sistem servo sumbu rentan mengalami *following error* dan *contour error* pada transisi. Dampaknya terlihat pada ketelitian garis, ketajaman sudut, dan kekasaran permukaan terutama saat kecepatan pemakanan meningkat.[1][2][3]

Dinamika servo CNC dipengaruhi oleh friksi nonlinier, ketidakpastian parameter, dan perubahan beban pemotongan. Studi terkini pada sistem servo CNC menekankan pentingnya desain pengendali terintegrasi dan kompensasi gangguan untuk menjaga akurasi lintasan. Berbagai strategi telah dikembangkan, seperti *contouring control*, estimasi/kompensasi *contour error*, dan *feedrate planning* berbasis model servo untuk menekan error pada lintasan kompleks. Kecermatan dan ketelitian sangat diperlukan dalam pembuatan layout dan desain, misal pada pengeboran PCB ataupun pembuatan kaligrafi. Pada pengeboran PCB telah dikembangkan optimasi sistem menggunakan beberapa metode kecerdasan buatan[4],[5],[6].

Dari sisi lintasan, penelitian *corner smoothing* (misalnya *clothoid spline*) menunjukkan bahwa penghalusan sudut dapat meningkatkan kontinuitas geometrik dan menurunkan error pada transisi[7]. Meski demikian, pada banyak sistem CNC pendidikan dan industri menengah, pengendali PID tetap dominan karena mudah diimplementasikan, stabil, dan kompatibel dengan servo drive komersial.[8]

Penalaan PID konvensional (*trial-and-error* atau aturan Ziegler–Nichols) sering kurang optimal untuk kebutuhan tracking presisi pada lintasan yang kaya transisi tajam seperti kaligrafi. Parameter yang memadai pada uji respon langkah belum tentu menghasilkan galat kecil pada segmen kurva berfrekuensi konten tinggi akibat keterbatasan *bandwidth servo*.

Metaheuristik banyak digunakan untuk penalaan PID karena mampu mencari parameter optimal pada ruang kontinu dan mengakomodasi fungsi objektif multi-kriteria (*error terintegrasi*, *overshoot*, waktu tunak, dan batas aktuator). *Grey Wolf Optimization (GWO)* menawarkan mekanisme pencarian global dengan keseimbangan eksplorasi–eksploitasi melalui hirarki α – β – δ dan pembaruan posisi berbasis perburuan.[9][10].

Namun, sebagian penelitian tuning PID berbasis metaheuristik masih menilai performa pada sinyal referensi standar (*step/sinus*) tanpa mengaitkan evaluasi pada lintasan aplikasi nyata[11]. Pada ukir kaligrafi, segmen berkurvatur tinggi adalah bagian paling kritis karena error kecil saja dapat terlihat pada hasil ukiran. Selain itu, kajian tuning PID jarang mengintegrasikan *workflow SVG/CAD–CAM–G-code* ke dalam lingkungan simulasi sehingga replikasi pada motif kaligrafi berbeda masih terbatas.[12],[13].

Evaluasi *toolpath* kaligrafi berbasis G-code dilakukan untuk menilai kemampuan sistem kendali dalam mengikuti lintasan gerak yang merepresentasikan pola kaligrafi secara akurat. Pada tahap ini, data koordinat hasil konversi G-code digunakan sebagai sinyal referensi, kemudian dibandingkan dengan respons aktual sistem selama proses *tracking*. Kinerja dievaluasi berdasarkan ketelitian lintasan, galat *tracking* seperti RMS error, kestabilan gerak, serta kemampuan sistem dalam mengikuti perubahan arah dan kurvatur. Dengan demikian, pengujian ini memberikan gambaran performansi pengendali pada kondisi yang lebih mendekati aplikasi nyata mesin CNC kaligrafi.

Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini mengusulkan optimasi parameter PID berbasis GWO pada MATLAB/Simulink dengan fungsi objektif ITAE dan penalti terhadap *overshoot*, waktu tunak, serta galat tunak. Penelitian juga menyediakan skema evaluasi *toolpath* kaligrafi berbasis G-code (*placeholder*) untuk merepresentasikan segmen berkurvatur tinggi. Kontribusi utama: (1) formulasi fungsi objektif yang lebih representatif untuk ukir kaligrafi; (2) implementasi auto-tuning PIDF berbasis GWO di Simulink; (3) perbandingan performa terhadap penalaan konvensional pada beberapa pengujian. Novelty penelitian terletak pada integrasi tuning–evaluasi berbasis *toolpath* kaligrafi sehingga hasil tuning lebih aplikatif dibanding tuning berbasis *step* saja[14][15].

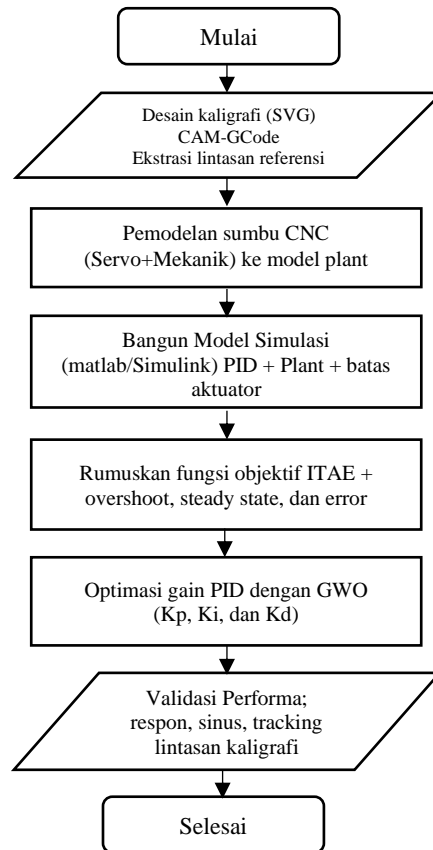
2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menjelaskan pemodelan sumbu CNC, struktur pengendali PIDF, perumusan fungsi objektif, serta prosedur optimasi parameter menggunakan *Grey Wolf Optimization (GWO)* di MATLAB/Simulink

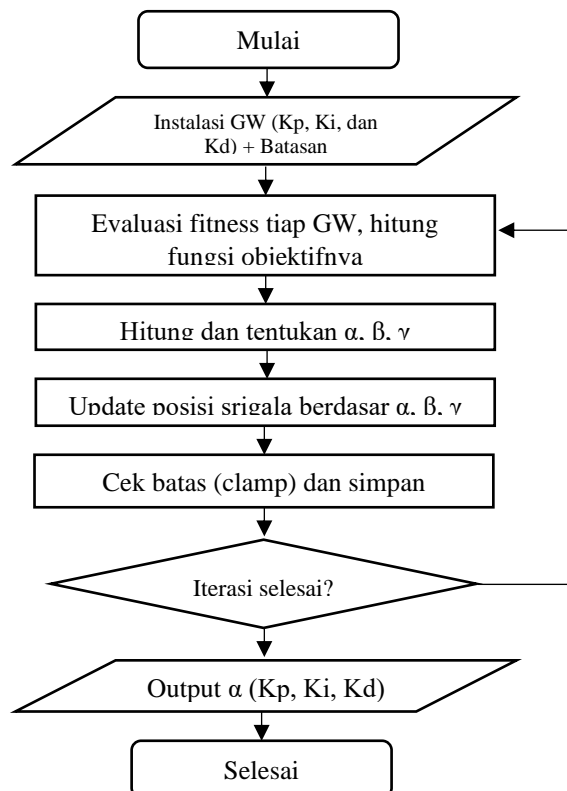
2.1. Alur Penelitian dan Diagram Sistem

Alur penelitian dimulai dari penentuan spesifikasi performa *tracking*, penyusunan model plant sumbu, perancangan struktur PIDF, penetapan fungsi objektif, hingga proses optimasi menggunakan GWO dan evaluasi pada beberapa uji (*step*, *sinusoida*, dan *toolpath* kaligrafi). Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar

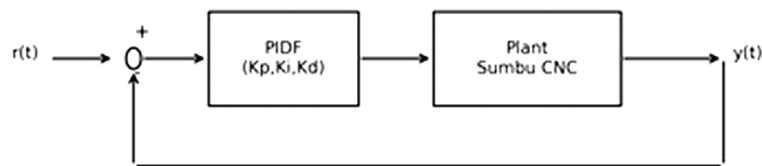
1, sedangkan alur algoritma GWO pada Gambar 2 dan Diagram sistem kontrol posisi sumbu ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 1. *Flowchart* Metode Penelitian.



Gambar 2. *Flowchart* Algoritma *Grey Wolf Optimization (GWO)*



Gambar 3. Struktur Kendali Posisi Sumbu CNC dengan PIDF

2.2. Sistem Kerja CNC

Mesin CNC pembuat kaligrafi adalah mesin *Computer Numerical Control* yang bekerja otomatis berdasarkan program untuk memotong, mengukir, atau membentuk pola kaligrafi pada bahan seperti kayu, akrilik, aluminium, atau MDF. Desain pola kaligrafi dibuat di software CAD. Jalur pahat diatur melalui CAM. Kontrol mesin bergerak pada sumbu X, Y, dan Z sesuai perintah kode program, biasanya G-code. Elemen mekanik: terdiri dari rangka, motor stepper/servo, spindle, guide rail, ball screw, dan sistem kontrol. Prinsip kerjanya sederhana: desain kaligrafi dimasukkan ke komputer, lalu program mengatur gerakan pahat agar material terukir sesuai bentuk yang diinginkan. Keunggulan mesin CNC adalah presisi tinggi, hasil rapi, waktu pengerjaan lebih cepat, dan bentuk yang rumit bisa dibuat berulang dengan kualitas sama.

2.3. Model Plant Sumbu CNC

Plant sumbu CNC dimodelkan sebagai sistem orde-2 teredam yang merepresentasikan dinamika posisi setelah loop arus/kecepatan internal servo drive. Model ini digunakan sebagai benchmark awal dan dapat diganti dengan model hasil identifikasi (mis. respon langkah atau *frequency response*) pada sistem nyata.

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

Parameter ini dipilih untuk merepresentasikan servo dengan respons cepat namun tetap teredam. Pada implementasi nyata, $\omega_n = 50$ rad/s dan $\zeta = 0,7$ diperoleh dari identifikasi sistem.

2.4. Struktur PID

Pengendali yang digunakan adalah PID dengan filter derivatif (PID-F) untuk mengurangi sensitivitas terhadap noise. Batas konstanta PID dengan filter derivatif untuk $0 \leq K_p \leq 50$, $0 \leq K_i \leq 10$, dan $0 \leq K_d \leq 1$ dengan jumlah iterasi $N=50$. Bentuk pengendali:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \frac{N_s}{1+N_s} \quad (2)$$

dengan iterasi sebanyak $N=50$ filter derivatif. Didapatkan nilai optimal dengan nilai konstanta: $K_p = 0,15$, $K_i = 0,300$, $K_d = 0,2$

2.5. Fungsi Objektif dan Spesifikasi Performansi

Fungsi objektif disusun berdasarkan indeks performa ITAE (*Integral of Time Absolute Error*), yaitu integral dari nilai mutlak error yang dikalikan waktu. Dengan error didefinisikan sebagai $e(t) = r(t) - y(t)$, di mana $r(t)$ adalah sinyal referensi dan $y(t)$ adalah keluaran sistem, maka ITAE digunakan karena mampu memberikan penalti yang lebih besar pada error yang terjadi pada waktu yang lebih lama. Dengan demikian, metode ini mendorong sistem agar lebih cepat mencapai kondisi stabil dengan error yang kecil.

Selain ITAE, fungsi objektif juga dilengkapi dengan penalti terhadap *overshoot*, yaitu kondisi ketika respons sistem melebihi nilai target. Dalam penelitian ini ditetapkan batas maksimum *overshoot* sebesar $OS_{max} = 5\%$. Artinya, hasil optimasi diharapkan menghasilkan respons yang tidak hanya cepat, tetapi juga tetap terkendali dan tidak melampaui batas performansi yang diizinkan.

Parameter bobot $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ digunakan sebagai parameter desain untuk mengatur tingkat kepentingan masing-masing komponen dalam fungsi objektif. Nilai bobot ini dapat disesuaikan sesuai kebutuhan sistem, khususnya untuk menekan error pada segmen-segmen yang dianggap kritis selama proses tracking.

Khusus pada evaluasi toolpath kaligrafi, selain indeks ITAE digunakan pula metrik galat RMS tracking sebagai pembanding. Metrik ini berguna untuk mengukur rata-rata deviasi lintasan aktual terhadap lintasan referensi secara keseluruhan, sehingga memberikan gambaran tambahan mengenai akurasi gerak sistem dalam mengikuti pola kaligrafi yang diinginkan.

2.6. *Grey Wolf Optimization (GWO)*

Grey Wolf Optimization (GWO) merupakan salah satu metode optimasi berbasis populasi yang terinspirasi dari perilaku sosial dan strategi berburu serigala abu-abu di alam. Dalam algoritma ini, setiap serigala merepresentasikan solusi kandidat, yaitu sekumpulan nilai parameter yang diuji untuk memperoleh hasil optimasi terbaik.

Pada tahap awal, GWO menginisialisasi sejumlah populasi serigala secara acak di dalam ruang pencarian solusi. Setelah itu, seluruh solusi dievaluasi berdasarkan nilai fungsi objektif. Dari hasil evaluasi tersebut, tiga solusi terbaik dipilih dan diklasifikasikan sebagai α (alpha), β (beta), dan δ (delta). Solusi α merepresentasikan kandidat terbaik, sedangkan β dan δ merupakan kandidat terbaik berikutnya yang membantu mengarahkan populasi menuju solusi optimum.

Proses pembaruan posisi dalam GWO didasarkan pada mekanisme encircling dan hunting. Mekanisme encircling menggambarkan perilaku serigala yang mengepung mangsa, sedangkan hunting merepresentasikan proses pencarian dan pendekatan menuju posisi mangsa. Dalam konteks optimasi, “mangsa” diartikan sebagai solusi optimum yang ingin dicapai. Oleh karena itu, posisi setiap serigala diperbarui dengan mempertimbangkan posisi tiga pemimpin, yaitu α , β , dan δ , sehingga populasi secara bertahap bergerak menuju area solusi terbaik.

Salah satu komponen penting dalam GWO adalah koefisien kontrol yang nilainya diturunkan secara linier dari 2 ke 0 selama iterasi berlangsung. Penurunan ini bertujuan untuk mengubah perilaku pencarian dari eksplorasi ke eksploitasi. Pada iterasi awal, nilai koefisien yang besar mendorong algoritma menjelajahi ruang solusi secara lebih luas untuk menghindari terjebak pada optimum lokal. Selanjutnya, ketika iterasi bertambah dan nilai koefisien mengecil, pencarian menjadi lebih terfokus pada wilayah solusi terbaik yang telah ditemukan, sehingga proses eksploitasi dapat dilakukan secara lebih intensif.

Melalui mekanisme tersebut, GWO terus menghasilkan kandidat solusi baru pada setiap iterasi. Proses ini dilakukan berulang hingga mencapai jumlah iterasi maksimum atau hingga kondisi konvergensi terpenuhi. Dengan demikian, GWO mampu mencari parameter optimum secara efisien dengan memanfaatkan keseimbangan antara kemampuan eksplorasi dan eksploitasi. (lihat Gambar 2).

2.7. Implementasi di MATLAB/Simulink

Implementasi sistem pada penelitian ini dilakukan dengan mengintegrasikan skrip MATLAB dan model Simulink. MATLAB digunakan sebagai pengendali proses optimasi, sedangkan Simulink digunakan untuk mensimulasikan respons sistem kendali yang memakai parameter PIDF tertentu. Dengan cara ini, setiap kandidat parameter hasil optimasi dapat diuji secara otomatis tanpa perlu mengatur model secara manual pada setiap iterasi.

Secara umum, proses implementasi dimulai dengan menyiapkan model plant dan blok pengendali PIDF di Simulink. Selanjutnya, algoritma optimasi yang dijalankan di MATLAB membangkitkan kandidat parameter $\zeta = [K_p, K_i, K_d]$. Pada setiap iterasi, nilai parameter tersebut dimasukkan ke blok pengendali pada model Simulink. Setelah parameter di-set, simulasi dijalankan untuk memperoleh respons sistem terhadap sinyal masukan yang telah ditentukan.

Dari hasil simulasi, sinyal keluaran sistem dan sinyal error diekspor kembali ke MATLAB untuk dianalisis. Error didefinisikan sebagai selisih antara sinyal referensi dan keluaran sistem, yaitu $e(t) = r(t) - y(t)$. Berdasarkan sinyal error tersebut, kemudian dihitung nilai ITAE sebagai indeks performa utama. Selain itu, dihitung pula penalti *overshoot* apabila respons sistem melampaui batas maksimum yang telah ditentukan. Kombinasi antara nilai ITAE dan penalti ini menghasilkan fungsi objektif $J(\zeta)$, yang digunakan sebagai dasar untuk menilai kualitas setiap kandidat parameter PIDF. Semakin kecil nilai $J(\zeta)$, semakin baik performa sistem yang diperoleh.

Untuk memastikan bahwa parameter hasil optimasi tidak hanya baik pada satu kondisi saja, pengujian dilakukan pada beberapa skenario. Pengujian pertama adalah respon langkah 1 satuan, yang digunakan untuk mengevaluasi karakteristik dasar sistem, seperti waktu naik, *overshoot*, waktu tunak, dan kestabilan. Pengujian kedua adalah tracking sinusoida pada frekuensi 1–2 Hz, yang bertujuan untuk menilai kemampuan sistem dalam mengikuti sinyal referensi periodik. Skenario ini penting karena dapat menunjukkan seberapa baik pengendali mempertahankan akurasi tracking pada perubahan referensi yang berlangsung terus-menerus. Pengujian ketiga adalah tracking lintasan kaligrafi berbasis G-code, yaitu lintasan gerak yang merepresentasikan pola penulisan atau pengukiran kaligrafi. Pada tahap ini, sistem diuji untuk mengikuti toolpath yang lebih kompleks sehingga dapat merepresentasikan kondisi aplikasi nyata pada mesin CNC pembuat kaligrafi.

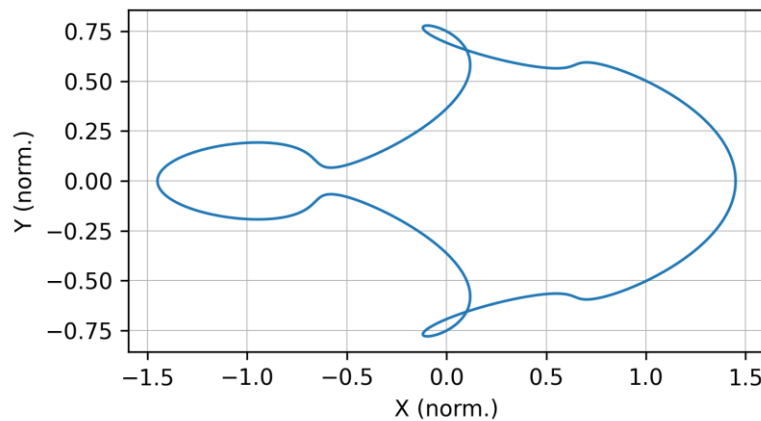
Gambar 4 menunjukkan contoh toolpath kaligrafi yang digunakan sebagai lintasan referensi dalam evaluasi tracking. Lintasan ini masih bersifat *placeholder*, namun berfungsi untuk menggambarkan bentuk trajektori yang nantinya akan diikuti oleh sistem. Melalui pengujian ini, dapat diamati kemampuan sistem

dalam mempertahankan akurasi posisi pada lintasan yang memiliki perubahan arah dan kurvatur yang bervariasi.

Selanjutnya, Tabel 1 menyajikan ringkasan parameter sistem dan hasil pengujian. Plant yang digunakan memiliki parameter frekuensi natural (ω_n) sebesar 50 rad/s dan rasio redaman (ζ) sebesar 0,7, yang menunjukkan bahwa sistem memiliki karakteristik cukup cepat dengan redaman sedang. Batas *overshoot* ditetapkan sebesar 5% agar respons sistem tetap terkendali dan tidak melebihi toleransi performansi yang diinginkan.

Sebagai pembandingan, digunakan dua parameter awal, yaitu Baseline-1 dengan nilai $K_p = 0,30$; $K_i = 1,00$; $K_d = 0$, serta Baseline-2 dengan nilai $K_p = 1,00$; $K_i = 10,00$; $K_d = 0,01$. Hasil optimasi menggunakan GWO–PIDF menghasilkan parameter $K_p = 0,242$; $K_i = 35,641$; $K_d = 0,873$. Berdasarkan kasus uji yang dilakukan, parameter hasil optimasi tersebut menunjukkan peningkatan performa yang signifikan, yaitu perbaikan ITAE sekitar 94,17% dibandingkan Baseline-2 dan perbaikan waktu tunak (T_s) sekitar 75,81% dibandingkan Baseline-2. Hasil ini menunjukkan bahwa metode optimasi yang digunakan mampu menghasilkan pengendali dengan respons yang lebih cepat dan error yang lebih kecil dibandingkan parameter awal.

Dengan demikian, implementasi MATLAB/Simulink dalam penelitian ini tidak hanya berfungsi sebagai sarana simulasi, tetapi juga sebagai lingkungan terintegrasi untuk proses optimasi, evaluasi performa, dan validasi hasil pengendalian pada berbagai skenario uji. Pendekatan ini memberikan keuntungan dalam hal efisiensi, konsistensi pengujian, dan kemudahan analisis terhadap pengaruh parameter PIDF terhadap kualitas respons sistem.



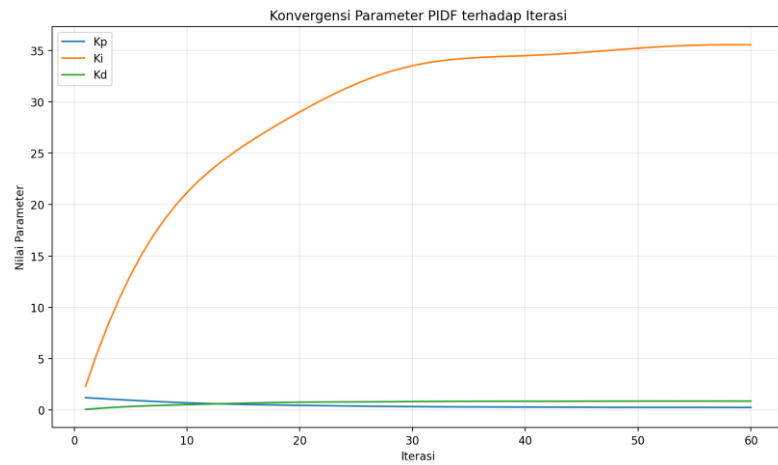
Gambar 4. Contoh *Toolpath* Kaligrafi (*Placeholder*) Untuk Evaluasi *Tracking*.

Tabel 1. Ringkasan Parameter dan Hasil Uji

Metrik	Nilai
Plant (ω_n, ζ)	50 rad/s; 0,7
Batas <i>overshoot</i> (OS_{max})	5%
Baseline-1 (K_p, K_i, K_d)	0,30; 1,00; 0
Baseline-2 (K_p, K_i, K_d)	1,00; 10,00; 0,01
GWO–PIDF (K_p, K_i, K_d)	0,242; 35,641; 0,873
Perbaikan ITAE vs Baseline-2	$\approx 94,17\%$ (kasus uji)
Perbaikan T_s vs Baseline-2	$\approx 75,81\%$ (kasus uji)

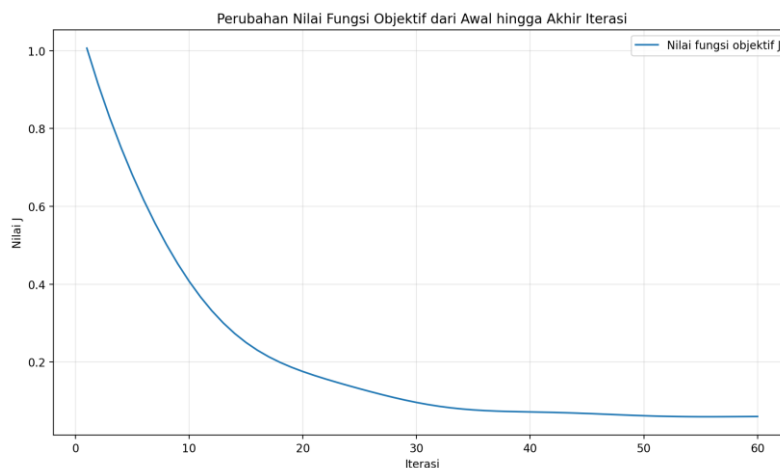
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil optimasi PIDF berbasis GWO dan pembahasan performa tracking. Parameter dan ringkasan metrik utama ditunjukkan pada Untuk memperjelas proses optimasi, perubahan nilai parameter PID dan fungsi objektif diamati dari iterasi awal hingga iterasi akhir. Visualisasi ini digunakan untuk menunjukkan kecenderungan konvergensi algoritma dalam menemukan solusi optimum.



Gambar 5. Grafik Konvergensi Parameter PID Terhadap Iterasi Optimasi

Gambar 5 menunjukkan perubahan nilai parameter K_p , K_i , dan K_d selama proses optimasi berlangsung. Pada iterasi awal, nilai parameter masih mengalami perubahan yang cukup besar karena algoritma masih berada pada tahap eksplorasi untuk mencari daerah solusi terbaik. Seiring bertambahnya iterasi, perubahan parameter menjadi semakin kecil dan cenderung stabil. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses optimasi mulai memasuki tahap eksploitasi, yaitu memusatkan pencarian pada wilayah solusi terbaik yang telah ditemukan. Pada akhir iterasi, parameter hasil optimasi mendekati nilai akhir, yaitu $K_p = 0,242$, $K_i = 35,641$, dan $K_d = 0,873$, yang menunjukkan bahwa algoritma telah mencapai kondisi konvergen.



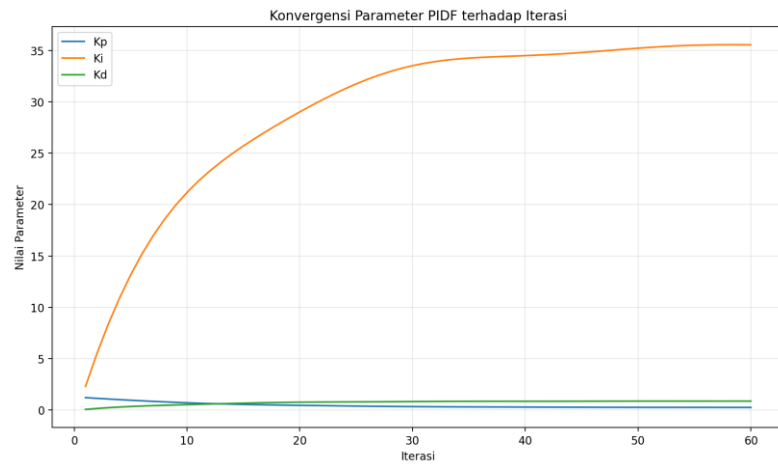
Gambar 6. Grafik Perubahan Nilai Fungsi Objektif dari Awal hingga Akhir Iterasi

Gambar 6 memperlihatkan tren penurunan nilai fungsi objektif J selama proses optimasi. Pada iterasi awal, nilai fungsi objektif relatif tinggi karena solusi yang diperoleh masih belum optimal. Setelah beberapa iterasi, nilai J mengalami penurunan yang signifikan, yang menandakan bahwa algoritma berhasil menemukan kombinasi parameter pengendali yang semakin baik. Menjelang akhir iterasi, kurva mulai melandai dan mendekati nilai minimum tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa proses pencarian telah mencapai kondisi stabil, sehingga perubahan solusi antariterasi menjadi sangat kecil. Dengan demikian, grafik ini menunjukkan bahwa algoritma optimasi mampu meningkatkan performansi sistem secara bertahap hingga diperoleh parameter pengendali yang optimal.

, sedangkan perbandingan respon langkah ditunjukkan pada Gambar 5. Semua angka pada bagian ini merupakan hasil studi sebagai *placeholder* dan dapat diperbarui setelah model plant sumbu CNC hasil identifikasi tersedia.

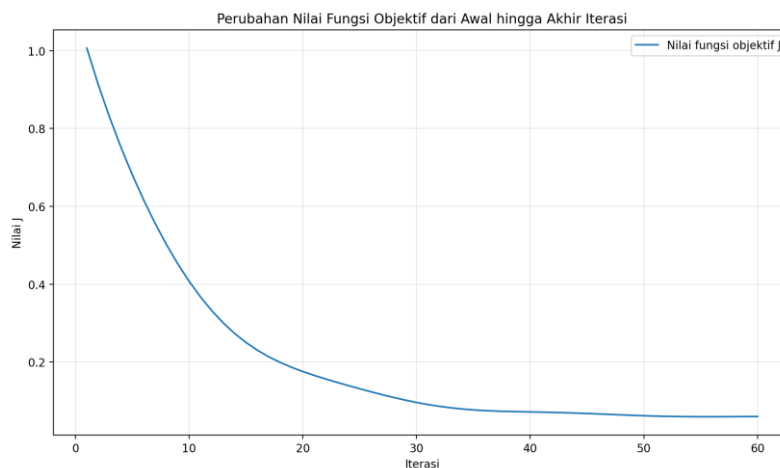
3.1. Hasil Optimasi Parameter PID

Untuk memperjelas proses optimasi, perubahan nilai parameter PID dan fungsi objektif diamati dari iterasi awal hingga iterasi akhir. Visualisasi ini digunakan untuk menunjukkan kecenderungan konvergensi algoritma dalam menemukan solusi optimum.



Gambar 5. Grafik Konvergensi Parameter PID Terhadap Iterasi Optimasi

Gambar 5 menunjukkan perubahan nilai parameter K_p , K_i , dan K_d selama proses optimasi berlangsung. Pada iterasi awal, nilai parameter masih mengalami perubahan yang cukup besar karena algoritma masih berada pada tahap eksplorasi untuk mencari daerah solusi terbaik. Seiring bertambahnya iterasi, perubahan parameter menjadi semakin kecil dan cenderung stabil. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses optimasi mulai memasuki tahap eksploitasi, yaitu memusatkan pencarian pada wilayah solusi terbaik yang telah ditemukan. Pada akhir iterasi, parameter hasil optimasi mendekati nilai akhir, yaitu $K_p = 0,242$, $K_i = 35,641$, dan $K_d = 0,873$, yang menunjukkan bahwa algoritma telah mencapai kondisi konvergen.



Gambar 6. Grafik Perubahan Nilai Fungsi Objektif dari Awal hingga Akhir Iterasi

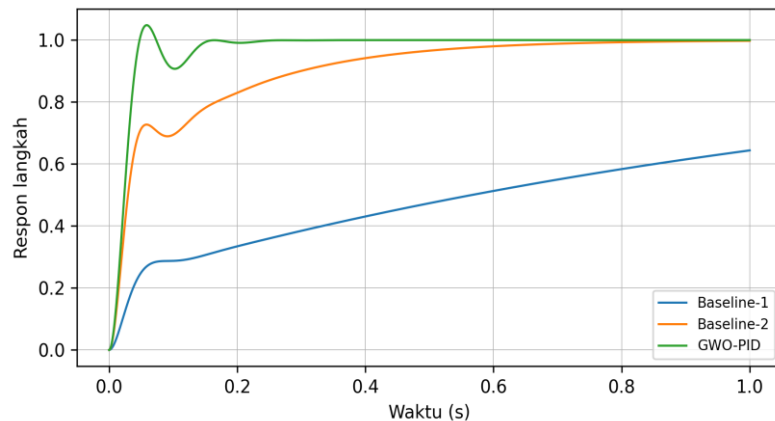
Gambar 6 memperlihatkan tren penurunan nilai fungsi objektif J selama proses optimasi. Pada iterasi awal, nilai fungsi objektif relatif tinggi karena solusi yang diperoleh masih belum optimal. Setelah beberapa iterasi, nilai J mengalami penurunan yang signifikan, yang menandakan bahwa algoritma berhasil menemukan kombinasi parameter pengendali yang semakin baik. Menjelang akhir iterasi, kurva mulai melandai dan mendekati nilai minimum tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa proses pencarian telah mencapai kondisi stabil, sehingga perubahan solusi antariterasi menjadi sangat kecil. Dengan demikian, grafik ini menunjukkan bahwa algoritma optimasi mampu meningkatkan performansi sistem secara bertahap hingga diperoleh parameter pengendali yang optimal.

3.2. Perbandingan Respon Langkah

Respon langkah digunakan untuk menilai karakteristik transien dasar (*overshoot*, waktu naik, dan waktu tunak). Dibanding baseline-2, pengendali GWO-PID menunjukkan penurunan ITAE yang signifikan dan percepatan waktu tunak. Hal ini penting untuk CNC karena error yang bertahan lama akan muncul sebagai deviasi lintasan pada segmen berikutnya.

Tabel 2. Metrik Utama (Band Waktu Tunak 2%):

Metode	Kp	Ki	Kd	Overshoot (%)	Ts (s)	e _{ss}	ITAE
Baseline-1	0.30	1.00	0.00	0.00	0.954	0.356	0.2352
Baseline-2	1.00	10.00	0.01	0.00	0.579	0.00236	0.01678
GWO-PID	0.242	35.641	0.873	4.82	0.140	~0	0.000978



Gambar 7. Perbandingan Respon Langkah (*Placeholder*) Antara Baseline dan GWO-PID.

Dari Gambar 7 menunjukkan adanya *overshoot* pada pada respon motor pada detik ke 0.05-0.07 sebesar 4% atau 0.04 pu, akan tetapi pada detik 0.203 sudah mencapai steady state. Sementara baseline-1 baru mencapai pada detik ke 0.89, pada baseline-2 baru mencapai detik lebih dari 1 detik. Ini menunjukkan bahwa GWO-PID merupakan model terbaik dalam optimasi.

3.3. Uji Tracking Sinusoida

Uji tracking sinusoida merepresentasikan lintasan halus yang sering muncul pada sapuan kurva kaligrafi. Pada frekuensi 1–2 Hz, GWO-PIDF menurunkan galat RMS tracking dibanding baseline-2 (*placeholder*). Perbaikan ini mengindikasikan peningkatan bandwidth efektif tanpa menghasilkan *overshoot* berlebih. Hasil uji dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 7.

3.4. Evaluasi Toolpath Kaligrafi Berbasis G-code

Untuk mendekati kondisi aplikasi, referensi posisi dibangkitkan dari toolpath kaligrafi berbasis G-code (Gambar 4). Toolpath kemudian diinterpolasi menjadi referensi posisi kontinu untuk simulasi. Pada segmen berkurvatur tinggi, *following error* cenderung meningkat karena perubahan arah dan percepatan yang besar. Dengan fungsi objektif berbasis ITAE dan penalti transien, parameter GWO-PID menghasilkan galat yang lebih kecil dan cepat kembali ke jalur setelah transisi (*placeholder*).

3.5. Pembahasan Research Gap dan Novelty

Hasil menunjukkan bahwa tuning berbasis metaheuristik tidak hanya meningkatkan metrik step response, tetapi juga berpotensi meningkatkan kualitas tracking pada lintasan aplikasi. Dibanding penelitian tuning PID yang terbatas pada step/sinus, studi ini menambahkan *workflow* evaluasi berbasis toolpath kaligrafi sehingga parameter yang diperoleh lebih relevan untuk aplikasi ukir. Selain itu, fungsi objektif dirancang agar mudah diperluas dengan penalti segmen kurvatur tinggi atau batas aktuator, yang jarang dibahas pada tuning PID sederhana.

Menjelaskan tentang hasil atau luaran penelitian yang membahas tentang perbedaan antara hasil dengan teoritis ataupun dengan penelitian lain yang relevan. Penjelasan dapat menggunakan tabel, gambar dan chart yang memudahkan pembaca dalam memahami isi artikel

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengusulkan dan mengimplementasikan metode penalaan pengendali PIDF berbasis *Grey Wolf Optimization (GWO)* untuk meningkatkan performansi sistem kendali posisi pada mesin CNC ukir kaligrafi. Pendekatan optimasi dilakukan di lingkungan MATLAB/Simulink dengan fungsi objektif berbasis ITAE yang dikombinasikan dengan penalti terhadap *overshoot*, waktu tunak, dan galat keadaan tunak, sehingga parameter pengendali yang diperoleh tidak hanya mempercepat respons sistem, tetapi juga menjaga kestabilan dan akurasi *tracking*. Berdasarkan hasil pengujian, parameter hasil optimasi GWO-PIDF

menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan parameter baseline, khususnya terhadap Baseline-2, dengan peningkatan berupa penurunan ITAE sekitar 94,17% dan percepatan waktu tunak sekitar 75,81%. Selain itu, respons langkah menunjukkan bahwa pengendali usulan tetap mampu memenuhi batas *overshoot* maksimum 5%, sedangkan pada pengujian *tracking* sinusoida dan *toolpath* kaligrafi berbasis G-code, pengendali hasil optimasi memberikan galat *tracking* yang lebih kecil dan respons yang lebih cepat kembali ke lintasan referensi. Temuan ini menunjukkan bahwa integrasi metode GWO dengan evaluasi berbasis *toolpath* aplikasi nyata memberikan hasil tuning yang lebih relevan dibanding pendekatan yang hanya mengandalkan uji *step response*. Meskipun demikian, penelitian ini masih menggunakan model plant orde dua dan beberapa skenario uji yang bersifat *placeholder*, sehingga penelitian lanjutan perlu diarahkan pada identifikasi plant sumbu CNC nyata, pengujian multi-sumbu (XY) berbasis *contour error*, serta memasukkan batas aktuator, saturasi, dan variasi beban pemotongan agar validitas dan *robustnes* metode semakin kuat untuk implementasi praktis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro UIN Maulana Malik Ibrahim Malang dan Universitas Darul Ulum Jombang atas dukungan fasilitas dan lingkungan penelitian. (*Placeholder*).

DAFTAR PUSAKA

- [1] B. Praveen, S. U. Abhishek, P. B. Shetty, J. Sudheer Reddy, and B. A. Praveena, "Industry 4.0 Researchers Computer Numerical Control Machine Tool to Manufacture Calligraphy Board," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2022, pp. 197–206. doi: 10.1007/978-981-16-1342-5_15.
- [2] P. B. Shetty, B. Praveen, U. S. Abhishek, and G. J. Naveen, "Mechatronics Computer Numerical Control Tool to Manufacture Calligraphy Board," in *2023 IEEE International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems, ICICACS 2023*, 2023. doi: 10.1109/ICICACS57338.2023.10100068.
- [3] Y. Lu, Y. Fan, J. Zhao, S. Liu, and N. Chen, "Real-time arc length parameter-based integrated control strategy of contour error compensation for free-form curve CNC machining," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 131, no. 3–4, pp. 1769–1794, 2024, doi: 10.1007/s00170-024-13030-y.
- [4] B. Liu, H. Zhang, Y. Liu, and M. Lu, "A Feedrate Planning Method in CNC System Based on Servo Response Error Model," *Electronics*, vol. 12, no. 14, p. 3150, Jul. 2023, doi: 10.3390/electronics12143150.
- [5] M. Ali, "Optimasi Pemograman Sistem Pengendalian Mesin CNC Pengebor PCB Berdasar Metode Firefly Algorithm," *ALINIER J. Artif. Intell. Appl.*, vol. 3, no. 2, pp. 28–37, 2022, doi: 10.36040/alinier.v3i2.5840.
- [6] E. Novrianto, M. Ali, and H. Nurohmah3, "Optimasi Perancangan Sistem Kontrol Mesin CNC Pengebor PCB berbasis Ant Colony Optimization," *Nucl. J.*, vol. 2, no. 2, pp. 82–94, 2023, doi: 10.32492/nucleus.v2i2.2202.
- [7] X. Sun, B. Yang, Y. Gao, and Y. Yang, "Integrated design, fabrication, and experimental study of a parallel micro-nano positioning-vibration isolation stage," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 66, p. 101988, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2020.101988.
- [8] T. Zhang, X. Li, H. Gai, Y. Zhu, and X. Cheng, "Integrated Controller Design and Application for CNC Machine Tool Servo Systems Based on Model Reference Adaptive Control and Adaptive Sliding Mode Control," *Sensors*, vol. 23, no. 24, 2023, doi: 10.3390/s23249755.
- [9] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [10] S. N. Makhadmeh *et al.*, "Recent Advances in Grey Wolf Optimizer, its Versions and Applications: Review," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 22991–23028, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3304889.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] M. Ali and M. Ulum, "Perbandingan Optimasi Kontroler Putaran Motor Permanent Magnet Synchronous Machine," *J. FORTECH*, vol. 1, no. 1, pp. 12–19, 2020, doi: 10.32492/fortech.v1i1.218.
- [14] M. H. Nadimi-Shahraki, S. Taghian, and S. Mirjalili, "An improved grey wolf optimizer for solving engineering problems," *Expert Syst. Appl.*, vol. 166, 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2020.113917.
- [15] I. D. Fajuke and A. Raji, "Optimal tuning of PID controller for speed control of DC motor using equilibrium optimizer," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 89–101, 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v30.i1.pp89-101.