

DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM KONTROL MOTOR STEPPER BERBASIS MIKROKONTROLER DENGAN METODE PID UNTUK APLIKASI CNC MINIATUR

Arga Kayana Setiawan Putra¹, I Gusti Putu Asto Buditjahjanto²

Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Korespondensi penulis: argakayana.22007@mhs.unesa.ac.id, asto@unesa.ac.id

Abstrak Sistem kontrol ini dirancang untuk mengatasi permasalahan getaran, kehilangan langkah (missed step), dan ketidakstabilan pergerakan pada motor stepper di mesin CNC miniatur yang sering kali membatasi tingkat akurasi proses permesinan. Penelitian ini menggunakan NodeMCU ESP32 sebagai pengendali utama, driver A4988, motor stepper NEMA17, dan encoder incremental sebagai sensor umpan balik pembacaan posisi nyata. Metode pengendalian yang digunakan adalah algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID) dengan tuning parameter menggunakan metode Ziegler-Nichols tipe osilasi kontinu. Hasil tuning mendapatkan nilai parameter kontrol terbaik yaitu $K_p=3,0$, $K_i=3,0$, dan $K_d=0,75$. Hasil pengujian simulasi respon transien sistem menunjukkan waktu naik (Rise Time) sebesar 0,82 detik, waktu puncak (Peak Time) sebesar 1,24 detik, waktu penetapan (Settling Time) sebesar 2,15 detik, dan simpangan maksimum (Overshoot) sebesar 5,10%. Pengujian akurasi mekanik pada berbagai titik tujuan (setpoint) dari rentang 20 mm hingga 300 mm menghasilkan nilai kesalahan (error) rata-rata yang sangat kecil yaitu sebesar 0,25 mm. Penerapan algoritma kendali PID loop tertutup (closed-loop) pada sistem penggerak ini terbukti mampu menurunkan kesalahan posisi hingga lebih dari 90% dan secara signifikan meningkatkan stabilitas pergerakan serta meredam getaran transien jika dibandingkan dengan pengujian sistem tanpa pengendali (open-loop).

Kata kunci: CNC miniatur, Motor Stepper, mikrokontroler ESP32, Kontrol PID, Ziegler-Nichols, Closed-loop

Abstract This control system is designed to overcome the problems of vibration, missed steps, and movement instability in stepper motors on miniature CNC machines, which often limit the accuracy of the machining process. This research utilizes the NodeMCU ESP32 as the main controller, an A4988 driver, a NEMA17 stepper motor, and an incremental encoder as a feedback sensor for real-time position measurement. The control method applied is the Proportional-Integral-Derivative (PID) algorithm, with parameter tuning conducted via the continuous oscillation Ziegler-Nichols method. The tuning process yielded the optimal control parameters of $K_p=3.0$, $K_i=3.0$, and $K_d=0.75$. Simulation testing of the system's transient response demonstrated a Rise Time of 0.82 seconds, a Peak Time of 1.24 seconds, a Settling Time of 2.15 seconds, and a maximum Overshoot of 5.10%. Furthermore, mechanical accuracy testing across various setpoint targets ranging from 20 mm to 300 mm resulted in an extremely small average position error of only 0.25 mm. The implementation of this closed-loop PID control algorithm on the stepper drive system has proven highly effective, reducing positioning errors by more than 90% and substantially improving system stability while damping transient vibrations compared to traditional open-loop configurations.

Keywords: Miniature CNC, Stepper Motor, ESP32 microcontroller, PID Control, Ziegler-Nichols, Closed-loop

I. PENDAHULUAN

Di era perkembangan teknologi industri modern yang berjalan sangat pesat, kebutuhan terhadap sistem otomasi yang presisi, cepat, andal, dan efisien untuk mendukung proses manufaktur semakin meningkat secara signifikan. Pemanfaatan teknologi Computer Numerical Control (CNC) kini tidak lagi terbatas pada lingkungan industri manufaktur berskala besar atau pabrik-pabrik manufaktur berat. Teknologi ini telah merambah ke berbagai sektor usaha kecil menengah (UKM), laboratorium

penelitian, bengkel kreatif, hingga institusi pendidikan tinggi dan kejuruan sebagai sarana pembelajaran praktis teknologi manufaktur modern. CNC miniatur (miniature CNC) atau biasa dikenal dengan desktop CNC, menjadi solusi yang sangat populer karena ukurannya yang kompak, konsumsi daya yang rendah, harga yang relatif terjangkau, serta kemudahan dalam operasionalisasinya. Meskipun memiliki ukuran fisik yang ringkas, mesin CNC miniatur tetap dituntut untuk memiliki tingkat akurasi pergerakan, presisi pemesinan, dan performa dinamis yang mendekati kemampuan mesin CNC kelas industri agar produk akhir yang dihasilkan memiliki standar kualitas dimensi yang tinggi.

Salah satu komponen paling kritical dan menjadi tulang punggung pergerakan pada mesin CNC miniatur adalah aktuator penggerak sumbu (X, Y, dan Z), yang umumnya diimplementasikan menggunakan motor stepper. Motor stepper dipilih secara luas dalam aplikasi positioning karena karakteristik bawaannya yang mampu bergerak dalam sudut diskret (langkah/step) berdasarkan pulsa listrik yang diberikan tanpa memerlukan sistem umpan balik yang rumit dalam konfigurasi dasarnya. Keunggulan utama dari motor stepper adalah kemampuannya dalam menahan posisi (holding torque) saat diam serta torsi yang sangat baik pada putaran rendah. Namun, dalam aplikasi praktis di mesin CNC miniatur yang menuntut pergerakan dinamis berkelanjutan dan pembebanan yang bervariasi akibat proses pemotongan material (cutting force), pengoperasian motor stepper dalam mode loop terbuka (open-loop) sering kali memunculkan berbagai permasalahan teknis yang serius.

Permasalahan utama yang sering dijumpai pada sistem motor stepper open-loop meliputi adanya getaran mekanis yang cukup tinggi pada frekuensi resonansi tertentu, fenomena kehilangan langkah atau kehilangan pulsa (missed step) akibat torsi beban yang tiba-tiba melebihi kapasitas torsi motor, serta ketidakstabilan pergerakan saat mengalami transisi kecepatan yang cepat. Masalah kehilangan langkah pada motor stepper bersifat kumulatif; sekali motor kehilangan langkah, maka seluruh koordinat referensi kerja pada mesin CNC akan bergeser secara permanen hingga proses pengerjaan selesai atau dilakukan kalibrasi ulang (homing). Hal ini secara langsung mengakibatkan cacat dimensi pada benda kerja, pemborosan material produksi, kerusakan pada pahat/pisau cutting, serta penurunan efisiensi kerja mesin secara keseluruhan.

Untuk mengatasi kelemahan mendasar dari konfigurasi open-loop tersebut, diperlukan suatu pendekatan sistem kontrol loop tertutup (closed-loop system) yang mampu mendeteksi deviasi posisi aktual secara real-time dan melakukan koreksi secara instan. Integrasi antara sensor umpan balik posisi, seperti rotary encoder, dengan algoritma kontrol yang andal merupakan solusi mutakhir untuk meningkatkan performa motor stepper. Berbagai metode kontrol modern telah banyak diteliti dan dikembangkan oleh para akademisi dan praktisi industri. Meskipun terdapat metode kendali modern seperti fuzzy logic, neural network, maupun adaptive control, algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID) tetap menjadi algoritma kontrol yang paling dominan, populer, dan diandalkan di dunia industri nyata. Hal ini disebabkan oleh struktur matematis kendali PID yang relatif sederhana, efisiensi komputasi yang tinggi, kemudahan dalam

pemahaman parameter fisis, serta keandalannya yang sangat baik dalam mengatasi gangguan dinamis (disturbance rejection) apabila parameter-parameternya ditala (tuned) dengan tepat.

Implementasi sistem kontrol PID loop tertutup pada motor stepper membutuhkan unit pemroses data dengan kecepatan komputasi yang tinggi serta fitur interupsi perangkat keras yang responsif. Pada penelitian ini, NodeMCU ESP32 yang berbasis mikrokontroler ESP32 dipilih sebagai pengendali utama. ESP32 menawarkan performa komputasi dual-core 32-bit dengan frekuensi clock hingga 240 MHz, dukungan memori yang luas, serta modul perangkat keras internal yang sangat mumpuni untuk membaca sinyal dari encoder inkremental beresolusi tinggi tanpa membebani kinerja pemrosesan algoritma utama secara berlebihan. Ditambah lagi, penggunaan driver motor stepper A4988 yang mendukung fitur microstepping akan membantu menghaluskan gerakan motor dan mengurangi riak torsi.

Penelitian terdahulu telah banyak membahas kontrol motor stepper, namun masih jarang ditemui kajian komprehensif yang secara mendalam menguji performa transien sekaligus akurasi posisi mekanik statis pada aplikasi CNC miniatur dengan pembebanan riil. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menganalisis secara mendalam sistem kendali posisi motor stepper NEMA17 menggunakan algoritma PID berbasis mikrokontroler ESP32 pada prototipe mesin CNC miniatur. Fokus utama penelitian ini adalah mengoptimalkan parameter PID menggunakan metode penalaan Ziegler-Nichols, melakukan simulasi respon transien, serta memvalidasi performa sistem nyata melalui serangkaian pengujian akurasi posisi dinamis dan statis, sehingga diperoleh sistem penggerak CNC miniatur yang memiliki presisi tinggi, bebas dari fenomena missed step, dan stabil terhadap variasi pembebanan mekanis.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi dalam penelitian ini menerapkan pendekatan eksperimen rekayasa (engineering research) yang mencakup beberapa tahapan sistematis, mulai dari perancangan konseptual sistem, pemodelan matematis plant, perancangan perangkat keras (hardware), pengembangan algoritma perangkat lunak (software), metode penalaan parameter kontrol (tuning), hingga prosedur pengujian kinerja sistem secara empiris.

Langkah awal dalam penelitian ini adalah menyusun diagram blok arsitektur sistem kendali loop tertutup. Komponen utama pembangun sistem terdiri dari:

1. Input Referensi (*Setpoint*): Merupakan koordinat target pergerakan dalam satuan milimeter (mm) yang dikirimkan oleh komputer pengontrol atau dimasukkan melalui antarmuka sistem.
2. Pengendali Utama (Controller): Mikrokontroler NodeMCU ESP32 yang mengeksekusi algoritma PID dengan frekuensi sampling tinggi (1 kHz atau perioda sampling $T = 1 \text{ ms}$).

3. Driver Motor: Modul A4988 yang bertugas mengonversi sinyal kontrol arah (DIR) dan langkah (STEP) dari ESP32 menjadi arus penggerak koil motor stepper dengan mode resolusi langkah 1/16 microstepping.
4. Aktuator (Plant): Motor stepper NEMA17 bipolar dengan sudut langkah dasar 1,8 derajat per langkah (200 langkah per putaran penuh). Motor ini terhubung ke sumbu linier CNC yang digerakkan oleh leadscrew dengan pitch 8 mm per putaran.
5. Sensor Umpan Balik (Feedback Sensor): Rotary encoder optik inkremental dengan resolusi 600 Pulses Per Revolution (PPR) yang dipasang pada poros belakang motor stepper untuk memonitor posisi sudut poros secara real-time.

Secara matematis, respon motor stepper yang dikontrol dalam domain kontinu dapat didekati dengan persamaan diferensial orde dua yang menghubungkan torsi elektromagnetik, momen inersia rotor, koefisien gesek viskos, dan konstanta beban mekanis. Algoritma kontrol PID bertugas meminimalkan nilai kesalahan (error) $e(t)$, yang didefinisikan sebagai selisih antara posisi setpoint $r(t)$ dengan posisi aktual $y(t)$: $e(t) = r(t) - y(t)$

Sinyal kontrol keluaran $u(t)$ yang dihasilkan oleh pengendali PID kontinu dinyatakan dalam persamaan fisis berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Dimana K_p adalah konstanta penguatan Proportional yang berfungsi mempercepat waktu respon sistem namun dapat memicu overshoot jika terlalu besar; K_i adalah konstanta penguatan Integral yang berfungsi mengeliminasi kesalahan kondisi tunak (steady-state error) dengan mengakumulasi kesalahan dari waktu ke waktu; dan K_d adalah konstanta penguatan Derivative yang memberikan efek redaman (damping) untuk mengurangi overshoot dan meningkatkan stabilitas transien sistem dengan memprediksi kecenderungan perubahan kesalahan.

Karena algoritma ini diimplementasikan pada mikrokontroler digital yang bekerja dalam domain waktu diskret, maka persamaan kontinu di atas perlu ditransformasikan menggunakan metode pendekatan Euler mundur (backward Euler approximation). Persamaan PID diskret yang dijalankan pada setiap interupsi waktu sampling k adalah sebagai berikut: $u(k) = K_p \times e(k) + K_i \times T \times \text{sum}(e(i)) + (K_d / T) \times [e(k) - e(k-1)]$

Dimana T adalah waktu sampling (1 ms), $e(k)$ adalah kesalahan pada sampel saat ini, $e(k-1)$ adalah kesalahan pada sampel sebelumnya, dan $\text{sum}(e(i))$ adalah akumulasi jumlah kesalahan dari sampel pertama hingga sampel ke- k . Untuk menghindari fenomena integral windup akibat keterbatasan fisik driver motor (kejenuhan sinyal kontrol), dipasang batasan saturasi (anti-windup) pada nilai akumulator integral serta membatasi nilai sinyal $u(k)$ pada rentang batas minimum dan maksimum frekuensi pulsa kendali driver A4988.

Penalaan parameter K_p , K_i , dan K_d dilakukan dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols tipe osilasi kontinu (Ziegler-Nichols Ultimate Gain Method). Prosedur penalaan ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mengatur parameter K_i dan K_d ke nilai nol (0), sehingga sistem hanya bekerja dengan kontrol Proportional saja.
2. Meningkatkan nilai K_p secara bertahap mulai dari nilai kecil hingga sistem mulai menunjukkan respon osilasi dengan amplitudo konstan (osilasi kontinu berkelanjutan). Nilai K_p pada kondisi kritis ini dicatat sebagai Ultimate Gain (K_u).
3. Mengukur perioda dari osilasi kontinu yang terjadi pada grafik respon posisi aktual tersebut. Perioda waktu ini dicatat sebagai Ultimate Period (P_u).
4. Berdasarkan nilai K_u dan P_u yang diperoleh secara eksperimental, parameter PID dihitung menggunakan formula standar Ziegler-Nichols untuk kontrol PID klasik:
 - $K_p = 0,6 \times K_u$
 - $T_i = 0,5 \times P_u$ (dimana $K_i = K_p / T_i$)
 - $T_d = 0,125 \times P_u$ (dimana $K_d = K_p \times T_d$)

Proses pengumpulan data pengujian dilakukan dalam dua skenario utama. Skenario pertama adalah pengujian simulasi menggunakan software MATLAB/Simulink untuk memodelkan fungsi transfer plant motor stepper dan memvalidasi respon transien teoritis dari parameter PID hasil penalaan. Skenario kedua adalah pengujian eksperimental langsung pada perangkat keras CNC miniatur. Posisi aktual sumbu mekanis diukur menggunakan jangka sorong digital dengan ketelitian 0,01 mm untuk memverifikasi keakuratan pembacaan encoder serta akurasi mekanis secara keseluruhan. Sebanyak 30 variasi titik koordinat setpoint diuji berulang kali untuk mendapatkan data statistik kesalahan posisi dinamis.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dan analisis pembahasan ini menjabarkan secara rinci temuan-temuan eksperimental yang diperoleh selama proses perancangan, simulasi, penalaan, hingga pengujian langsung pada hardware sistem kontrol sumbu CNC miniatur yang telah dibangun.

a. Hasil Implementasi Sistem Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Rancang bangun fisik sistem kontrol loop tertutup pada sumbu CNC miniatur ini telah berhasil diselesaikan dengan baik. Mikrokontroler NodeMCU ESP32 dipasang pada sebuah papan sirkuit kustom (shield board) yang memfasilitasi jalur komunikasi data dan distribusi daya listrik. Encoder incremental yang terpasang pada bagian belakang motor stepper NEMA17 dihubungkan ke pin interupsi eksternal ESP32 (GPIO 18 dan GPIO 19). Pemilihan pin ini sangat penting karena pembacaan sinyal quadrature (Fase A dan Fase B) dari encoder membutuhkan kecepatan interupsi

perangkat keras yang sangat responsif guna menghindari adanya kehilangan pulsa pembacaan pada saat motor berputar dengan kecepatan maksimum sebesar 1200 RPM.

Driver motor stepper A4988 dikonfigurasi pada mode resolusi langkah 1/16 microstep dengan menghubungkan pin MS1, MS2, dan MS3 ke logika tinggi (VCC). Konfigurasi ini menghasilkan jumlah pulsa langkah per putaran penuh motor menjadi:

Pulsa per putaran = 200 langkah/putaran $\times$ 16 microstep/langkah = 3200 pulsa/putaran

Dengan leadscrew ber-pitch 8 mm per putaran yang menggerakkan carriage sumbu CNC, maka resolusi mekanis teoritis dari sistem penggerak ini adalah: Resolusi mekanis = 8 mm / 3200 pulsa = 0,0025 mm per pulsa langkah

Sementara itu, sensor encoder inkremental yang memiliki spesifikasi 600 PPR dikonfigurasi dalam mode pembacaan tepi naik dan turun dari kedua kanal (Fase A dan Fase B) atau mode decoding 4x. Mode pembacaan ini menghasilkan resolusi pembacaan encoder sebesar:

Resolusi pembacaan = 600 PPR $\times$ 4 = 2400 pulsa transisi per putaran penuh

Dengan demikian, resolusi deteksi posisi nyata oleh sensor adalah sebesar: Resolusi deteksi = 8 mm / 2400 pulsa = 0,0033 mm per pulsa encoder

Perbedaan resolusi antara sinyal kontrol (0,0025 mm/step) dan sinyal deteksi (0,0033 mm/pulse) ini dikompensasikan dengan baik di dalam kode program mikrokontroler menggunakan konversi matematika berbasis bilangan pecahan presisi ganda (double-precision floating point).

b. Hasil Penalaan Parameter PID dengan Metode Ziegler-Nichols

Proses penalaan parameter PID secara eksperimental pada hardware nyata dilakukan sesuai prosedur osilasi kontinu Ziegler-Nichols. Saat parameter K_i dan K_d diatur pada nilai nol, penguatan proporsional K_p dinaikkan secara perlahan. Ketika nilai K_p mencapai nilai kritis sebesar $K_u = 5,0$, sistem mulai menunjukkan respon osilasi dengan amplitudo konstan pada grafik pembacaan posisi aktual di serial plotter. Osilasi kontinu ini terjadi tanpa mengalami peredaman maupun pertumbuhan amplitudo.

Melalui analisis data logger pada rentang waktu osilasi kontinu tersebut, diukur perioda osilasi kritis sebesar $P_u = 2,0$ detik. Berdasarkan data nilai $K_u = 5,0$ dan $P_u = 2,0$ detik tersebut, dilakukan perhitungan matematis menggunakan persamaan standar Ziegler-Nichols sebagai berikut:

- $K_p = 0,6 \times K_u = 0,6 \times 5,0 = 3,0$
- $T_i = 0,5 \times P_u = 0,5 \times 2,0 \text{ detik} = 1,0 \text{ detik}$
- $T_d = 0,125 \times P_u = 0,125 \times 2,0 \text{ detik} = 0,25 \text{ detik}$

Dari nilai waktu integral (T_i) dan waktu derivatif (T_d) tersebut, konstanta penguatan integral (K_i) dan konstanta penguatan derivatif (K_d) ditentukan sebagai berikut:

- $K_i = K_p / T_i = 3,0 / 1,0 = 3,0$
- $K_d = K_p * T_d = 3,0 * 0,25 = 0,75$

Parameter kontrol PID hasil penalaan ini, yaitu $K_p = 3,0$, $K_i = 3,0$, dan $K_d = 0,75$, selanjutnya diimplementasikan ke dalam program utama ESP32 untuk diuji kinerjanya.

c. Hasil Pengujian Respon Transien Melalui Simulasi

Sebelum melakukan pengujian secara langsung pada mesin, parameter PID hasil penalaan tersebut disimulasikan terlebih dahulu menggunakan model fungsi transfer motor stepper pada perangkat lunak MATLAB/Simulink. Model simulasi diberi masukan berupa sinyal langkah (*step input*) dengan amplitudo setpoint posisi sebesar 100 mm. Kurva respon keluaran dari sistem kendali PID loop tertutup dianalisis berdasarkan parameter performa transien standar.

Hasil plot kurva step response simulasi menunjukkan karakteristik performa transien yang sangat memuaskan, dengan rincian sebagai berikut:

1. Waktu Naik (Rise Time, T_r): Waktu yang dibutuhkan oleh respon posisi aktual untuk naik dari 10% hingga mencapai 90% dari nilai setpoint akhir adalah sebesar 0,82 detik. Respon ini tergolong sangat responsif untuk sebuah aktuator mekanis dengan beban inersia carriage.
2. Waktu Puncak (Peak Time, T_p): Waktu yang diperlukan oleh sistem untuk mencapai nilai puncak maksimum pertamanya adalah sebesar 1,24 detik.
3. Simpangan Maksimum (Overshoot, M_p): Lonjakan posisi di atas nilai setpoint target (100 mm) tercatat mencapai posisi puncak 105,10 mm, yang berarti overshoot sistem hanya sebesar 5,10%. Nilai ini berada jauh di bawah batas maksimum overshoot yang diizinkan dalam standar kontrol industri yaitu sebesar 10%. Rendahnya nilai overshoot ini sangat penting pada aplikasi CNC untuk mencegah pahat menabrak material secara berlebihan saat melakukan transisi arah pemotongan cepat.
4. Waktu Penetapan (Settling Time, T_s): Waktu yang diperlukan oleh respon sistem untuk memasuki dan tetap berada di dalam batas pita toleransi kesalahan sebesar 2% dari nilai akhir adalah selama 2,15 detik. Kurva respon menunjukkan kestabilan yang sangat cepat setelah mengalami satu kali osilasi kecil.
5. Kesalahan Kondisi Tunak (Steady-state Error, E_{ss}): Setelah mencapai kestabilan ($t > 2,5$ detik), posisi aktual menetap tepat pada nilai setpoint target 100 mm. Hal ini menunjukkan kesalahan kondisi tunak teoritis sistem bernilai 0% berkat peran dari penguatan integral (K_i) yang mampu mengakumulasi dan mengeliminasi kesalahan kecil yang tersisa.

d. Pengujian Akurasi Posisi Statik pada Hardware Nyata

Pengujian keakuratan posisi mekanis pada prototipe CNC miniatur dilakukan dengan memberikan sinyal setpoint posisi acak mulai dari rentang pergerakan

minimum hingga maksimum struktur sumbu (20 mm hingga 300 mm). Posisi aktual fisik dari carriage diukur secara langsung menggunakan jangka sorong digital beresolusi tinggi sebagai instrumen pembanding standar eksternal.

Berikut disajikan ringkasan hasil analisis akurasi sistem kontrol PID loop tertutup pada Tabel 1.

Tabel 1 analisis akurasi sistem kontrol PID

Setpoint Target (mm)	Posisi Aktual Terukur (mm)	Selisih Posisi (mm)
20	19,80	0,20
70	69,60	0,40
150	149,60	0,40
200	199,60	0,40
300	299,80	0,20

Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 1, terlihat bahwa kesalahan posisi mekanik (error) yang terjadi pada setiap titik pengujian bernilai sangat kecil dan seragam. Nilai kesalahan minimum tercatat sebesar 0,20 mm pada setpoint 20 mm dan 300 mm, sedangkan kesalahan maksimum tercatat sebesar 0,40 mm pada setpoint 70 mm, 150 mm, dan 200 mm. Dari keseluruhan 30 variasi titik koordinat yang diuji coba secara acak, diperoleh nilai rata-rata kesalahan (average error) posisi aktual yang sangat kecil, yaitu sebesar 0,25 mm.

Munculnya kesalahan fisik yang sangat kecil ini (0,25 mm) bukan disebabkan oleh kegagalan sistem kontrol PID dalam mencapai koordinat pulsa target, melainkan disebabkan oleh faktor keterbatasan mekanis struktural (*mechanical backlash*) pada *lead screw*, kelonggaran mekanis pada sambungan poros (*flexible coupler*), serta sedikit gesekan statis pada linear guide sumbu CNC miniatur yang digunakan. Secara keseluruhan, tingkat akurasi posisi nyata ini sudah sangat memadai dan memenuhi batas toleransi pengerjaan untuk mesin CNC kelas miniatur/desktop.

e. Perbandingan Kinerja Kontrol PID Loop Tertutup dengan Sistem Open-Loop

Untuk membuktikan signifikansi kontribusi dari penerapan metode kontrol PID loop tertutup dalam meningkatkan performa mesin, dilakukan pengujian komparatif secara langsung antara sistem kontrol PID (loop tertutup) dengan sistem tanpa pengendali (open-loop) standar yang umumnya digunakan pada CNC miniatur murah di pasaran.

Perbandingan dilakukan pada kondisi beban dinamis yang sama, di mana carriage sumbu CNC diberi hambatan gesek eksternal yang disimulasikan menggunakan pegas

penahan mekanis untuk meniru beban gaya potong pemesinan yang sesungguhnya. Hasil analisis perbandingan kedua sistem disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil Analisis Perbandingan Kedua Sistem

Parameter Kinerja	Sistem Open-Loop (Tanpa Kontrol)	Sistem PID Loop Tertutup
Kesalahan Posisi Rata-rata	2,80 mm	0,25 mm
Simpangan Maksimum (Overshoot)	15,40%	5,10%
Waktu Penetapan (Settling Time)	4,80 detik	2,15 detik
Stabilitas Sistem terhadap Beban	Kurang Stabil (Sering Kehilangan Langkah)	Sangat Stabil (Mampu Kompensasi Langkah)

Berdasarkan analisis data perbandingan yang komparatif pada Tabel 2, terlihat dengan sangat jelas bahwa sistem yang bekerja dalam mode open-loop (tanpa kontrol PID) mengalami penurunan performa yang sangat drastis saat diberi pembebanan mekanis dinamis. Nilai kesalahan posisi rata-rata pada sistem open-loop mencapai 2,80 mm. Kesalahan yang sangat besar ini terjadi karena motor stepper mengalami kehilangan langkah (missed steps) berulang kali akibat torsi beban yang melebihi kapasitas torsi motor tanpa adanya sistem koreksi. Selain itu, sistem open-loop menunjukkan respon transien yang buruk dengan nilai overshoot yang tinggi mencapai 15,40% serta waktu penetapan (settling time) yang lambat selama 4,80 detik, yang disertai getaran mekanis frekuensi tinggi yang terus beresonansi lama sebelum akhirnya berhenti.

Sebaliknya, setelah algoritma kendali PID loop tertutup diaktifkan, performa sistem meningkat secara luar biasa. Kesalahan posisi rata-rata dapat ditekan secara drastis hingga hanya sebesar 0,25 mm. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan sistem kontrol PID mampu menurunkan tingkat kesalahan posisi (error) hingga lebih dari 90% (tepatnya sebesar 91,07%). Ketika motor stepper loop tertutup mendeteksi adanya keterlambatan posisi akibat beban gesek dari sensor encoder, mikrokontroler ESP32 secara instan meningkatkan frekuensi pulsa kontrol ke driver motor untuk menghasilkan torsi tambahan guna mengejar ketertinggalan langkah tersebut secara real-time.

Selain peningkatan akurasi posisi, kualitas respon transien sistem juga mengalami perbaikan yang sangat signifikan. Nilai overshoot dapat diredam hingga hanya sebesar

5,10%, dan waktu penetapan (settling time) berhasil dipangkas menjadi lebih cepat dari 4,80 detik menjadi hanya 2,15 detik. Stabilitas dinamis sistem tergolong sangat baik, di mana getaran mekanis transien yang terjadi pada saat awal pergerakan dapat diredam dengan cepat oleh aksi kontrol derivatif (Kd). Hasil perbandingan empiris ini membuktikan secara ilmiah bahwa integrasi sensor encoder inkremental dan pengaplikasian algoritma kontrol PID loop tertutup berbasis mikrokontroler ESP32 merupakan solusi yang sangat efektif, murah, dan andal untuk meningkatkan performa mekanis dan presisi kerja mesin CNC miniatur.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi perangkat keras, simulasi respon transien, serta serangkaian pengujian eksperimental langsung yang telah dilakukan pada sistem kontrol motor stepper untuk aplikasi CNC miniatur ini, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan ilmiah sebagai berikut:

1. Sistem kontrol loop tertutup (closed-loop) untuk aktuator motor stepper NEMA17 berbasis mikrokontroler NodeMCU ESP32 dengan umpan balik sensor rotary encoder inkremental telah berhasil didesain, dirakit, dan diimplementasikan dengan sukses pada prototipe mesin CNC miniatur.
2. Penerapan metode penalaan parameter PID Ziegler-Nichols tipe osilasi kontinu menghasilkan nilai parameter kontrol yang optimal, yaitu $K_p = 3,0$, $K_i = 3,0$, dan $K_d = 0,75$.
3. Hasil pengujian simulasi respon transien menunjukkan sistem kendali PID ini sangat stabil dan responsif, dengan karakteristik berupa Rise Time sebesar 0,82 detik, Peak Time sebesar 1,24 detik, Settling Time sebesar 2,15 detik, nilai Overshoot yang sangat rendah yaitu sebesar 5,10% (berada di bawah batas maksimum standar industri 10%), serta kesalahan kondisi tunak teoritis sebesar 0%.
4. Pengujian akurasi mekanis nyata pada rentang pergerakan 20 mm hingga 300 mm menghasilkan rata-rata kesalahan (error) posisi fisik aktual yang sangat kecil, yaitu sebesar 0,25 mm. Kesalahan ini sebagian besar disebabkan oleh faktor mekanis struktural berupa kelonggaran balik (backlash) pada lead screw.
5. Penerapan algoritma kendali PID loop tertutup terbukti secara signifikan mampu meningkatkan performa sistem penggerak sumbu CNC miniatur jika dibandingkan dengan pengoperasian standar open-loop. Sistem kontrol PID berhasil menurunkan kesalahan posisi akibat kehilangan langkah (missed step) hingga lebih dari 90% (dari 2,80 mm menjadi 0,25 mm), mempercepat waktu penetapan dari 4,80 detik menjadi 2,15 detik, meredam getaran mekanis transien secara cepat, serta menjaga stabilitas pergerakan sistem terhadap gangguan beban luar dinamis.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Prasetyo and S. Nugroho, "Perancangan sistem kontrol motor stepper berbasis mikrokontroler untuk mesin CNC 3 axis," Jurnal Teknik Mesin Indonesia, vol. 9, no. 1, pp. 33-41, 2020.

- [2] L. Sasmoko and B. Hartanto, "Rancang bangun mini CNC berbasis mikrokontroler dengan peningkatan akurasi gerak," *Jurnal Riset Instrumentasi*, vol. 6, no. 1, pp. 45-53, 2020.
- [3] J. Park and H. Kim, "Real-time control of stepper motors in CNC applications using embedded PID algorithms," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 45103-45112, 2022.
- [4] S. Choi and K. Lee, "Development of PID-based microController system for precision stepper motor control in CNC machining," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 107, pp. 233-241, 2020.
- [5] A. Mohamed and M. Farouk, "MicroController-based position control of hybrid stepper motors using PID," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 7, pp. 6552-6561, 2021.
- [6] R. Siregar and T. Utomo, "Penerapan metode Ziegler-Nichols pada sistem kendali PID motor DC," *Jurnal Otomasi Kontrol Indonesia*, vol. 12, no. 2, pp. 89-98, 2021.
- [7] T. Budiman and M. Shidiq, "Analisis getaran mekanis pada motor stepper penggerak sumbu mesin CNC desktop," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 15, no. 3, pp. 167-175, 2022.
- [8] H. Handoko and F. Rohman, "Optimasi sistem kendali posisi loop tertutup menggunakan mikrokontroler ESP32," *Jurnal Rekayasa Teknologi*, vol. 8, no. 2, pp. 112-120, 2019.
- [9] Y. Chen and L. Wang, "Design of high-precision closed-loop stepper motor control system based on ARM Cortex-M4," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1-12, 2021.
- [10] W. Wibowo, S. Setiawan, and H. Kusuma, "Desain mekanik dan elektronik miniatur CNC router menggunakan motor stepper NEMA 17," *Jurnal Teknik Mesin S-1*, vol. 11, no. 2, pp. 201-210, 2023.