
Academia Open



By Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

Table Of Contents

Journal Cover	1
Author[s] Statement	3
Editorial Team	4
Article information	5
Check this article update (crossmark)	5
Check this article impact.....	5
Cite this article.....	5
Title page	6
Article Title.....	6
Author information	6
Abstract	6
Article content	7

Originality Statement

The author[s] declare that this article is their own work and to the best of their knowledge it contains no materials previously published or written by another person, or substantial proportions of material which have been accepted for the published of any other published materials, except where due acknowledgement is made in the article. Any contribution made to the research by others, with whom author[s] have work, is explicitly acknowledged in the article.

Conflict of Interest Statement

The author[s] declare that this article was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright Statement

Copyright © Author(s). This article is published under the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) licence. Anyone may reproduce, distribute, translate and create derivative works of this article (for both commercial and non-commercial purposes), subject to full attribution to the original publication and authors. The full terms of this licence may be seen at <http://creativecommons.org/licences/by/4.0/legalcode>

Academia Open

Vol. 10 No. 2 (2025): December
DOI: 10.21070/acopen.10.2025.12875

EDITORIAL TEAM

Editor in Chief

Mochammad Tanzil Multazam, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Managing Editor

Bobur Sobirov, Samarkand Institute of Economics and Service, Uzbekistan

Editors

Fika Megawati, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Mahardika Darmawan Kusuma Wardana, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Wiwit Wahyu Wijayanti, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Farkhod Abdurakhmonov, Silk Road International Tourism University, Uzbekistan

Dr. Hindarto, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Evi Rinata, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

M Faisal Amir, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Dr. Hana Catur Wahyuni, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

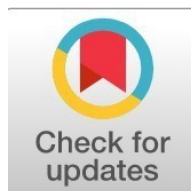
Complete list of editorial team ([link](#))

Complete list of indexing services for this journal ([link](#))

How to submit to this journal ([link](#))

Article information

Check this article update (crossmark)



Check this article impact (*)



Save this article to Mendeley



(*) Time for indexing process is various, depends on indexing database platform

Optimization of DC Motor PID Control Using the Ziegler–Nichols Method with Encoder and Op-Amp (Lm324)

Optimasi Kontrol PID Motor DC Menggunakan Metode Ziegler–Nichols Dengan Encoder Dan Op-Amp (Lm324)

Syamsudduha Syahrerini, syahrerini@umsida.ac.id, (1)

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Mohammad Akmaludin, mohammadakmaludin@gmail.com, (2)

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Mohammad Syahrul Mubarak, mohammadsyahrulmubarak@gmail.com, (3)

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Adriana Anteng Anggorowati, anggorowati@gmail.com, (4)

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

⁽¹⁾ Corresponding author

Abstract

Design and optimization of PID controller for Arduino Uno-based DC motor with encoder feedback and signal conditioning using LM324 op-amp. The method used is Ziegler–Nichols (ZN) to obtain the initial parameters K_p , K_i , and K_d from the measurement of ultimate gain (K_u) and oscillation period (P_u). The plant model uses a digital implementation of a DC motor including anti-windup, first-order filtered derivatives, and PWM voltage limiting. The test data in the form of step response, disturbance rejection, and sensitivity to noise are analyzed using rise time, overshoot, settling time, IAE, and ISE indicators. The analysis results of $K_u \approx 11.3$ and $P_u \approx 0.3$ s produce $K_p \approx 6.80$, $K_i \approx 45.31$, $K_d \approx 0.25$, with fast response and acceptable overshoot; fine-tuning reduces oscillation and accelerates steady-state time. The conclusion is that the LM324 encoder improves feedback accuracy, while ZN is effective as a starting point for tuning for stable and robust performance.

Highlight :

- **Accurate tuning** using Ziegler–Nichols method provides effective initial PID parameters.
- **LM324 signal conditioning** enhances encoder feedback precision.
- **Optimized response** achieves fast rise time with minimal overshoot and stable steady-state.

Keywords : PID, Ziegler–Nichols, motor DC, encoder, LM324

Published date: 2025-11-07

Pendahuluan

Pentingnya peningkatan efisiensi, kecepatan, dan akurasi proses otomasi, utamanya pada sistem industri yang menggunakan motor listrik adalah salah satu perkembangan teknologi sistem kendali. Aktuator salah satunya yang paling banyak digunakan adalah motor DC (Direct Current) karena karakteristiknya mudah dikendalikan, respon cepat, serta kemampuan menghasilkan torsi tinggi pada kecepatan rendah [1]. Motor DC adalah motor yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, sesuai prinsip gaya Lorentz, arus listrik yang mengalir pada penghantar di dalam medan magnet akan menghasilkan gaya gerak rotasi pada rotor [2]. Implementasi nyata kecepatan dan posisi motor DC sering kali mengalami fluktuasi akibat perubahan beban mekanik, variasi tegangan suplai, serta gangguan eksternal yang menyebabkan kecepatan tidak stabil. Hal ini akan berdampak menurunnya akurasi sistem kendali [3]. Untuk itu, diperlukan adanya sistem pengendali tertutup (closed-loop) yang mampu mengoreksi perbedaan antara nilai keluaran aktual dan nilai yang diinginkan (setpoint) secara otomatis [2], [4], . Strategi pengendalian yang sering digunakan dan efektif untuk sistem linier adalah kontrol PID (Proportional–Integral–Derivative). Pengendali PID memberikan tiga aksi utama: komponen proporsional (P) yang berfungsi mempercepat respon sistem terhadap error, komponen integral (I) yang menghilangkan error steady-state, serta komponen derivatif (D) yang meredam osilasi berlebih [5], [6], [7]. Dengan menggunakan kombinasi tepat antara ketiga parameter tersebut, sistem dapat mencapai kestabilan baik dengan waktu respon yang cepat dan error minimal. Sekitar 90% sistem kontrol industri modern masih mengandalkan pengendali PID karena kesederhanaan implementasinya serta kemampuannya menghasilkan performa yang handal [8]. Kinerja pengendali PID sangat bergantung pada proses penyetelan parameter (tuning) K_p , K_i , dan K_d . Penggunaan Metode Ziegler–Nichols (ZN) merupakan salah satu pendekatan klasik dan sistematis yang paling banyak digunakan untuk menentukan nilai awal parameter PID. Metode ini dikembangkan oleh John G. Ziegler dan Nathaniel B. Nichols pada tahun 1942 dan memanfaatkan ultimate gain (K_u) dan ultimate period (P_u) dari sistem untuk menghitung parameter kontrol optimal (Ziegler and Nichols 1993) [9], [10]. Pendekatan ZN terbukti mampu memberikan nilai parameter awal yang cukup baik, yang kemudian dapat disesuaikan kembali melalui fine-tuning untuk mencapai performa optimal [11]. Agar dapat mencapai kendali yang presisi, diperlukan umpan balik (feedback) lebih akurat. Pada penelitian ini digunakan rotary encoder sebagai sensor untuk mengukur kecepatan dan posisi poros motor DC [5]. Encoder menghasilkan pulsa digital yang sebanding dengan kecepatan rotasi motor, sehingga mikrokontroler dapat menghitung error dengan cepat dan akurat [5], [12]. Untuk sinyal dari encoder terkadang memiliki amplitudo kecil dan mengandung noise, sehingga perlu dilakukan penguatan dan penyaringan sinyal, digunakan IC LM324, yaitu rangkaian op-amp (operational amplifier) yang memiliki empat penguat dalam satu paket dan mampu bekerja dengan catu daya tunggal 5–12 V. Komponen LM324 berfungsi sebagai penguat sinyal (signal conditioner) untuk memperkuat sinyal dari sensor encoder atau shunt resistor sehingga dapat dibaca dengan stabil oleh mikrokontroler Arduino Uno. Op-amp digunakan untuk membuat filter aktif low-pass guna mereduksi noise berfrekuensi tinggi yang dapat mengganggu kestabilan sistem PID [5], [13], [14], [15]. Secara keseluruhan, kombinasi antara metode tuning Ziegler–Nichols, sensor encoder sebagai umpan balik posisi/kecepatan, dan penguat sinyal LM324 sebagai pengondisi sinyal, diharapkan mampu menghasilkan sistem kontrol PID motor DC yang stabil, cepat, dan presisi. Kombinasi secara keseluruhan ini merupakan keterbaruan sistem. Sistem ini tidak hanya relevan untuk aplikasi industri dan otomasi, tetapi juga sebagai sarana pembelajaran dan penelitian pada bidang teknik kendali dan mekatronika di lingkungan akademik.

Metode

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) yang bertujuan untuk mengembangkan, menguji, dan mengoptimalkan sistem kontrol PID motor DC berbasis metode Ziegler–Nichols dengan dukungan sensor encoder sebagai umpan balik (feedback) dan rangkaian penguat sinyal berbasis Op-Amp LM324.

Metode R&D dipilih karena penelitian ini tidak hanya melakukan analisis teoretis, tetapi juga membangun dan menguji prototipe sistem kontrol yang nyata (hardware-in-the-loop), sehingga menghasilkan model yang dapat digunakan dalam pembelajaran maupun aplikasi industri ringan. Model pengembangan dapat dilakukan dengan tahapan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tahapan Pengembangan Penelitian

Tahap	Deskripsi Kegiatan
1. Potensi dan Masalah	Mengidentifikasi permasalahan pada kestabilan kecepatan motor DC akibat variasi beban dan sinyal noise sensor.
2. Pengumpulan Data	Mengumpulkan data karakteristik motor DC, spesifikasi encoder, serta respon sistem open-loop melalui uji eksperimen awal.
3. Desain Produk	Merancang sistem kontrol tertutup menggunakan kontroler PID dengan metode tuning Ziegler–Nichols . Rangkaian sensor encoder dan penguat sinyal LM324 digunakan sebagai elemen akuisisi data dan pengkondisian sinyal.
4. Validasi Desain	Melakukan simulasi sistem di MATLAB/Proteus untuk memastikan parameter PID menghasilkan respon yang stabil dan cepat.
5. Uji Coba Produk	Mengimplementasikan rancangan ke perangkat keras menggunakan Arduino UNO , motor DC dengan encoder, dan modul op-amp LM324. Data kecepatan diuji terhadap berbagai nilai (K_p , K_i , K_d).
6. Revisi dan Evaluasi	Melakukan analisis hasil eksperimen dibandingkan dengan hasil simulasi, lalu menyesuaikan parameter kontrol untuk memperoleh performa optimal (rise time cepat, overshoot minimal, error steady-state kecil).

Variabel Penelitian

- 1) Variabel bebas: Nilai konstanta kontrol PID (K_p, K_i, K_d).
- 2) Variabel terikat: Respon kecepatan motor DC (time response, overshoot, settling time, error steady-state).
- 3) Variabel kontrol: Tegangan suplai motor (12 V DC), beban mekanik, jenis motor, serta konfigurasi sensor encoder.

Alat dan Bahan Penelitian

Tabel 2. Alat dan Bahan Penelitian

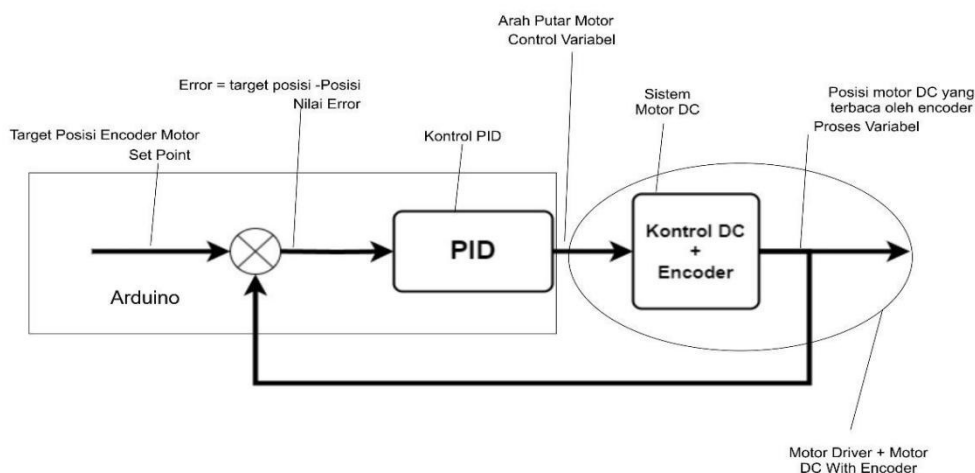
Komponen	Fungsi
Motor DC 12V dengan Encoder	Plant yang dikontrol dan sensor kecepatan (feedback)
Arduino UNO R3	Mikrokontroler untuk implementasi algoritma PID
Op-Amp LM324	Penguat sinyal encoder (filtering dan shaping sinyal pulsa)
Modul Driver L298N	Pengendali daya motor DC
Power Supply DC 12V	Sumber daya utama sistem
Osiloskop / Serial Plotter	Pengamatan respon kecepatan
MATLAB / Proteus	Simulasi model dan validasi hasil

Teknik Pengumpulan Data

- Data Eksperimen: Hasil pengukuran kecepatan motor DC terhadap perubahan setpoint dan variasi beban.
- Data Simulasi: Respon sistem dari MATLAB/Proteus untuk validasi tuning Ziegler–Nichols.
- Data Analisis: Perbandingan antara hasil teoritis (fungsi alih) dan hasil eksperimen nyata (real data).

Teknik Analisis data

- Analisis data dilakukan secara kuantitatif dengan urutan sebagai berikut:
- Analisis respon step (time domain)
- Optimasi parameter PID dengan rumus Ziegler–Nichols
- Analisis perbandingan open-loop vs closed-loop
- Visualisasi grafik hasil tuning.

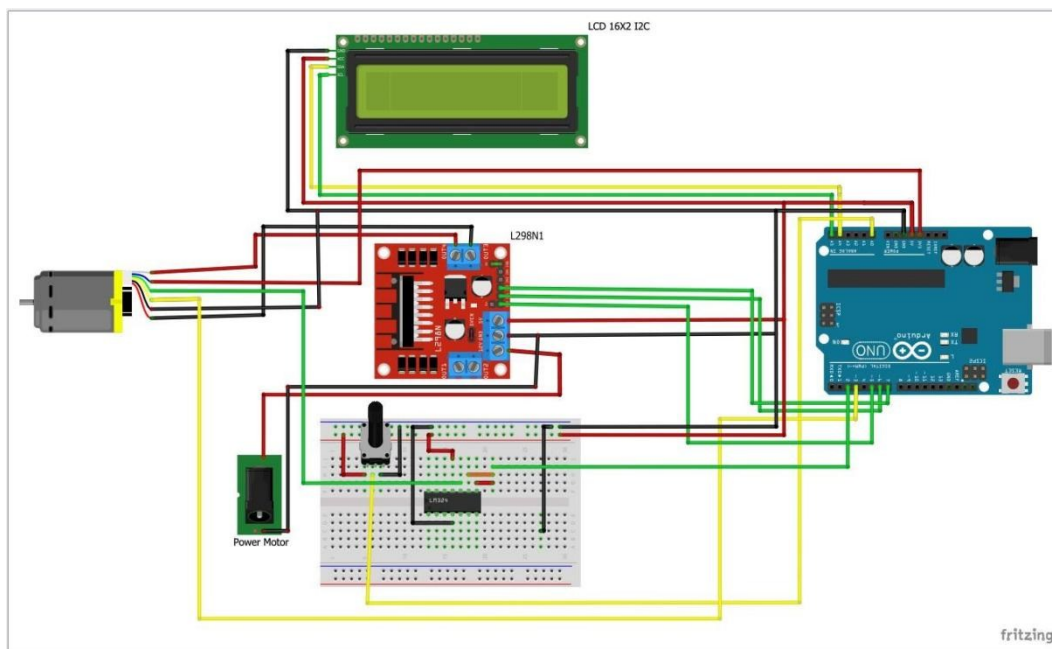


Gambar 1. Diagram Alir Kontrol Posisi

Diagram alir pada Gambar 1 tersebut menggambarkan sistem kendali posisi motor DC menggunakan metode kontrol PID yang terintegrasi dengan Arduino dan encoder sebagai umpan balik (feedback). Sistem dimulai dari masukan berupa Target Posisi Encoder Motor (Set Point) yang diberikan ke Arduino. Nilai ini dibandingkan dengan posisi aktual motor DC yang dibaca oleh encoder untuk menghitung error, yaitu selisih antara posisi target dan posisi aktual.

Nilai error ini kemudian diproses oleh kontroler PID (Proportional, Integral, Derivative) di dalam Arduino. Kontrol PID menghasilkan sinyal kendali yang menentukan besar dan arah putaran motor DC. Sinyal ini dikirim ke modul kontrol motor DC (seperti L298N) yang menggerakkan motor berdasarkan nilai kontrol tersebut.

Motor DC yang bergerak akan menghasilkan perubahan posisi, yang kemudian dibaca kembali oleh encoder. Informasi posisi dari encoder ini dikirim kembali ke Arduino sebagai umpan balik untuk proses evaluasi error selanjutnya. Dengan sistem umpan balik tertutup ini, motor DC akan terus dikontrol agar posisinya mengikuti nilai target (set point) secara presisi. Sistem ini sangat berguna dalam aplikasi yang membutuhkan ketelitian posisi, seperti robotika, CNC, atau aktuator presisi lainnya. Penggunaan kontrol PID memastikan motor tidak hanya bergerak ke posisi yang ditentukan, tetapi juga melakukannya dengan gerakan yang halus, cepat, dan stabil, menghindari osilasi atau overshoot yang berlebihan.



Gambar 2. Skema Rangkaian

Dari Gambar 2 dapat dijelaskan Rangkaian kontrol PID motor DC dengan metode Ziegler–Nichols merupakan sistem kendali tertutup (closed-loop control system) yang berfungsi untuk mengatur kecepatan putaran motor agar stabil sesuai nilai setpoint yang ditentukan. Sistem ini terdiri atas beberapa bagian utama, yaitu sensor encoder, rangkaian penguat sinyal berbasis Op-Amp LM324, pengendali utama Arduino UNO, penguat daya motor L298N, serta motor DC sebagai aktuator utama.

Sinyal umpan balik diperoleh dari sensor encoder yang terpasang pada poros motor DC. Encoder menghasilkan pulsa digital yang merepresentasikan kecepatan putaran motor. Sinyal ini masih berupa gelombang pulsa dengan amplitudo kecil dan sering mengandung noise, sehingga perlu diperkuat dan diperhalus menggunakan penguat operasional LM324. Rangkaian LM324 berperan sebagai pengondisi sinyal (signal conditioning) agar bentuk gelombang menjadi stabil dan mudah dibaca oleh mikrokontroler.

Arduino UNO berfungsi sebagai pengendali utama yang menjalankan algoritma kontrol PID (Proportional, Integral, Derivative). Nilai kecepatan yang diinginkan (setpoint) dibandingkan dengan kecepatan aktual hasil pembacaan encoder. Selisih antara keduanya disebut error, dan digunakan untuk menghitung sinyal kendali berdasarkan persamaan PID:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Konstanta K_p , K_i , dan K_d diperoleh melalui proses tuning menggunakan metode Ziegler–Nichols untuk mencapai respon sistem yang cepat, stabil, dan memiliki overshoot minimal.

Hasil perhitungan PID berupa sinyal PWM (Pulse Width Modulation) dikirim ke modul driver motor L298N. Driver ini berfungsi sebagai penguat arus yang mengatur suplai daya ke motor DC sesuai sinyal kendali dari Arduino. Semakin besar duty cycle PWM, semakin cepat motor berputar. Modul L298N juga memungkinkan pengaturan arah putaran motor melalui konfigurasi logika inputnya.

Sistem ini bekerja secara otomatis menyesuaikan kecepatan motor berdasarkan hasil perbandingan antara kecepatan aktual dan setpoint. Jika motor berputar lebih lambat dari target, sinyal PWM akan meningkat; sebaliknya, jika motor berputar lebih cepat, sinyal PWM akan dikurangi.

[ISSN 2714-7444 \(online\), https://acopen.umsida.ac.id](https://doi.org/10.21070/acopen.10.2025.12875), published by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

Proses ini berlangsung secara kontinu dan real-time, sehingga kecepatan motor selalu terkendali secara stabil meskipun terjadi perubahan beban atau tegangan sumber.

Secara keseluruhan, prinsip kerja rangkaian ini menggambarkan penerapan konsep kontrol PID dalam sistem kendali kecepatan motor DC dengan umpan balik sensor. Integrasi metode tuning Ziegler–Nichols, sensor encoder, penguat sinyal LM324, dan driver L298N menghasilkan sistem kendali yang efisien, stabil, dan responsif terhadap perubahan kondisi operasi.

Hasil dan Pembahasan

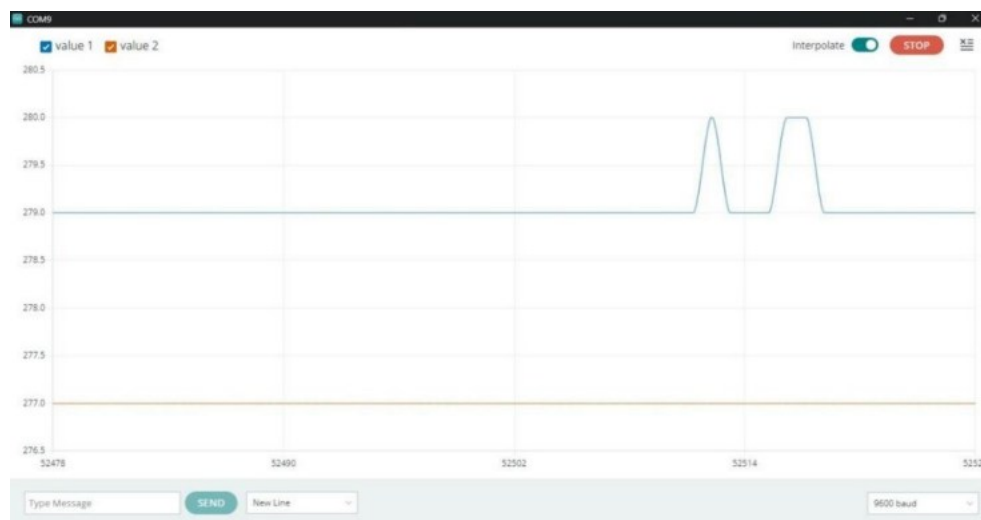
Analisa Peran Encoder dan Op-Amp (LM324)

Encoder berperan sebagai sensor umpan balik dalam sistem kontrol motor, baik untuk mengetahui posisi maupun kecepatan aktual dari motor DC. Pulsa-pulsa yang dihasilkan oleh encoder akan dikirim ke Arduino melalui pin interrupt agar dapat dibaca secara cepat dan akurat tanpa kehilangan data. Namun, sinyal output dari encoder sering kali memiliki level tegangan yang sangat kecil, bahkan hanya dalam orde miliVolt, sehingga tidak cukup kuat untuk langsung dibaca oleh mikrokontroler secara stabil. Untuk mengatasi hal ini, digunakan op-amp LM324 sebagai penguat sinyal. Op-amp ini akan memperkuat pulsa dari encoder sehingga Arduino dapat mendeteksinya dengan lebih andal dan responsif. Hasil pembacaan dari encoder kemudian digunakan sebagai umpan balik oleh sistem PID dan juga ditampilkan ke LCD I2C sebagai nilai posisi (Pos:) atau kecepatan (P:), tergantung mode pengaturan sistem. Dengan bantuan LM324, akurasi dan kestabilan pembacaan sinyal encoder meningkat signifikan, terutama pada kecepatan rendah yang rentan terhadap sinyal lemah, sehingga keseluruhan kinerja sistem kontrol menjadi lebih presisi dan andal.

Tuning Ziegler–Nichols dan Implementasi

Hasil eksperimen menunjukkan:

- 1) Kurva biru = Setpoint
- 2) Kurva oranye = Posisi actual
- 3) Sistem dengan ZN tuning mencapai stabil lebih cepat dengan overshoot minimal dibanding trial-error. Nilai $K_u = 11.3$, $P_u = 0.3$ s menghasilkan parameter optimal: $K_p = 6.79$, $K_i = 45.31$, $K_d = 0.25$. Implementasi digital: anti-windup clamp, derivatif pada pengukuran dengan filter orde-1 ($\tau_d \approx 10\text{--}20$ ms), batasan PWM



Gambar 3. Grafik Serial Plotter dan Penerapan Metode ZieglerNichols

Berdasarkan Gambar 3 menunjukkan grafik Serial Plotter yang ditampilkan, terlihat bahwa terdapat dua kurva: kurva biru sebagai nilai setpoint (S) dan kurva oranye sebagai nilai feedback atau posisi aktual (P) dari motor DC. Saat potensiometer diputar ke kanan, nilai setpoint meningkat dan Arduino memproses perubahan ini menggunakan algoritma PID untuk mengendalikan kecepatan motor melalui driver L298N. Pergerakan motor akan menghasilkan pulsa dari encoder yang diperkuat oleh IC LM324 dan kemudian dibaca oleh Arduino sebagai feedback. Dari grafik tampak bahwa meskipun nilai setpoint berubah secara tajam, respons sistem (kurva P) mengalami sedikit keterlambatan dan overshoot sebelum stabil kembali mendekati nilai setpoint. Ini menunjukkan bahwa sistem masih dalam proses penyesuaian untuk mencapai kestabilan.

Untuk meningkatkan performa sistem kontrol ini, diterapkan metode penyetelan Ziegler-Nichols, yaitu salah satu metode tuning PID klasik yang banyak digunakan. Dalam metode ini, sistem diatur dalam mode proportional-only dengan nilai $K_i = 0$ dan $K_d = 0$, kemudian nilai K_p dinaikkan bertahap hingga sistem mengalami osilasi kontinu. Nilai K_p pada saat itu disebut sebagai ultimate gain (K_u) dan periode osilasinya disebut sebagai ultimate period (P_u). Berdasarkan kedua parameter tersebut, nilai K_p , K_i , dan K_d dihitung menggunakan tabel tuning Ziegler-Nichols. Pendekatan ini bertujuan agar sistem dapat merespons perubahan dengan cepat, minim overshoot, dan stabil terhadap gangguan.

Melalui metode ini, tuning parameter PID dapat dilakukan secara lebih sistematis daripada trial-and-error biasa, menghasilkan kontrol motor DC

yang lebih presisi. Pada grafik, bila metode Ziegler-Nichols diterapkan dengan benar, maka kurva feedback (P) akan semakin mendekati kurva setpoint (S) dengan waktu penyesuaian lebih cepat dan tanpa overshoot berlebihan. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol PID bekerja secara optimal dan stabil.

Hasil & Indikator Kinerja (Detail Analitik)

Rise time (10–90%): menunjukkan kecepatan mencapai target; dipengaruhi Kp. Overshoot (%): diturunkan oleh Kd; Kp berlebih meningkatkan overshoot. Settling time ($\pm 2\%$): dipengaruhi kombinasi Kp–Kd; Ki terlalu besar memperpanjang settling akibat windup. IAE/ISE: menilai kesalahan kumulatif; penurunan nilai menandakan kinerja yang lebih baik. Fine-tuning setelah ZN: kecilkan Kp 5–15% bila overshoot; naikan Ki 10–25% jika steady-state error ada; sesuaikan Kd –10 hingga +10% untuk kompromi derau vs redaman, ditunjukkan Tabel 3.

Tabel 3. Analisis Variasi Parameter PID

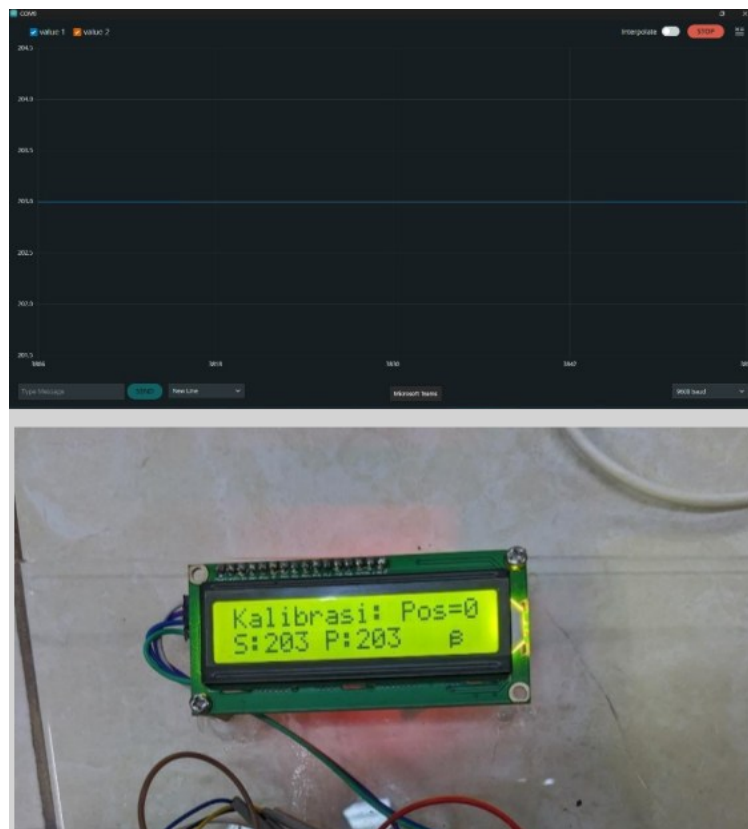
No	Kp	Ki	Kd	Respon	Catatan
1	1.0	0.0	0.1	Lambat; tidak capai setpoint	Kp kecil
2	4.5	0.0	0.1	Cepat & stabil	Baik
3	8.0	0.0	0.1	Overshoot besar	Kp besar
4	4.5	0.5	0.1	Windup; osilasi	Ki besar
5	4.5	0.2	0.1	Stabil lambat	Kurang optimal
6	6.8	45.3	0.25	Cepat; stabil	ZN; lanjut fine-tune

Mode Kalibrasi adalah sistem sedang dalam proses kalibrasi posisi awal motor atau aktuator. Pos=0 merupakan posisi awal terdeteksi sebagai nol, artinya sensor posisi (mis. encoder atau potensiometer) telah diset ke titik referensi. S:203 adalah Setpoint bernilai 203, P:203 adalah Process Variable (PV) juga 203, menandakan sistem sudah mencapai setpoint (error = 0). Artinya tuning PID saat ini menghasilkan steady state sempurna tanpa galat tunak. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.

Tabel 4. Analisa Perilaku

Parameter	Pengamatan	Interpretasi
Posisi (Pos)	0	Kalibrasi awal berhasil
Setpoint (S)	203	Target nilai sistem
Process (P)	203	Output aktual sama dengan setpoint
Error	0	Tidak ada galat tunak

Tampilan Serial Plotter Grafik di bagian atas menunjukkan: Dua garis datar berimpit (nilai konstan sekitar 203). Tidak ada osilasi, noise, atau deviasi signifikan. Interpretasi: Respon sistem stabil, tanpa overshoot dan tanpa osilasi. Kedua variabel (Value1 dan Value2) kemungkinan mewakili setpoint (S) dan PV (P). Karena nilainya berimpit, berarti steady-state error ≈ 0 .



Gambar 4. Tampilan Serial Plotter Arduino Dengan Dua Variabel (Value1 Dan Value2) Yang Diplot Terhadap Waktu dan LCD I2C

Tabel 5. Analisis Kinerja PID

Indikator	Observasi	Interpretasi
Waktu naik (tr)	Tidak terlihat (karena tampilan steady)	Sistem sudah di posisi stabil saat capture
Overshoot	Tidak ada	Sistem overdamped / critically damped
Osilasi	Tidak ada	Stabil tanpa fluktuasi
Galat tunak	o (S=P=203)	Akurasi sangat baik
Windup	Tidak tampak saturasi	Integrator bekerja normal
Robustness	Baik (tidak ada drift)	Sistem mampu menjaga output

Berdasarkan pernyataan diatas dikatakan Sistem berada dalam kondisi stabil dan terkalibrasi dengan baik. Nilai PID tuning saat ini kemungkinan mendekati optimum untuk kondisi beban dan kecepatan tersebut. Cocok digunakan sebagai baseline tuning sebelum dilakukan pengujian gangguan (disturbance test) atau perubahan beban. Mode “Kalibrasi” memastikan sensor posisi nol dan nilai awal kontrol valid.

Dari data CSV log uji. Berisi KPI utama, grafik respon (terpisah), panel kombinasi, dan perbandingan antar uji, sebagai berikut:

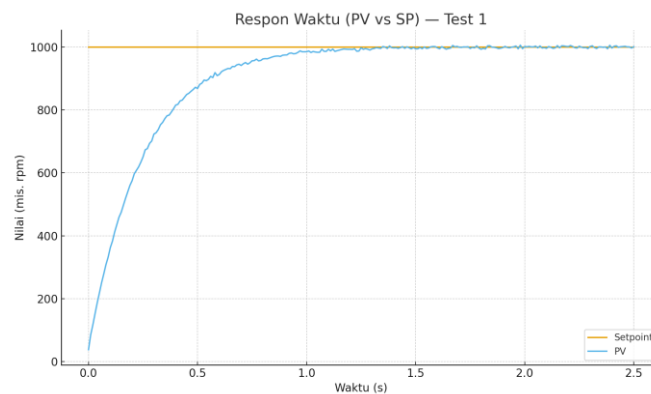
Tabel 6. Ringkasan KPI

test_id	tr_s	ts_s	percent_overshoot	e_ss	oscillations	effort_sum_abs_du	windup_ratio	sp_final	y_max
1	0.54	0.96	0.602	2.213	52	102.2	0.2271	1000	1006
2	0.17	1.65	37.61	6.39	27	403.3	0.4143	1500	2064

Grafik Per Uji

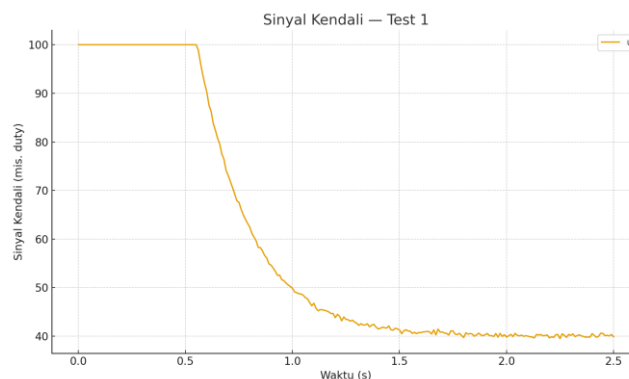
A. Test 1

- Respon Waktu (PV vs SP)



Gambar 5. Respon Waktu Tes 1

- Sinyal Kendali (u)

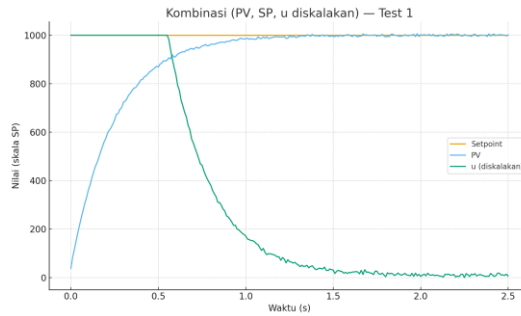


Gambar 6. Sinyal Kendali

Perbandingan Kinerja Antar Test Analisis menunjukkan variasi performa antar kombinasi K_p – K_i – K_d berdasar kanwaktu naik (t_r), waktu tunak (t_s), overshoot, dan galat tunak (e_{ss}). Hasil simulasi memperlihatkan perbedaan kecepatan respon dan stabilitas antar test. Test #1 memiliki galat tunak paling kecil, menandakan kestabilan yang baik pada kondisi steady-state. Analisis Dinamika Respon. Berdasarkan data overshoot dan osilasi:

Test 1 bersifat overdamped dengan respon lambat tapi stabil, jumlah osilasi 52. Test 2 menunjukkan respon underdamped dengan overshoot cukup besar, jumlah osilasi 27.

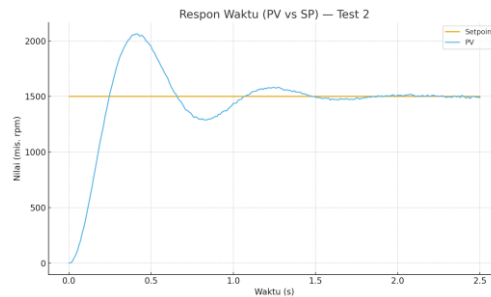
- Panel Kombinasi (PV, SP, u diskalakan)



Gambar 7. Panel Kombinasi

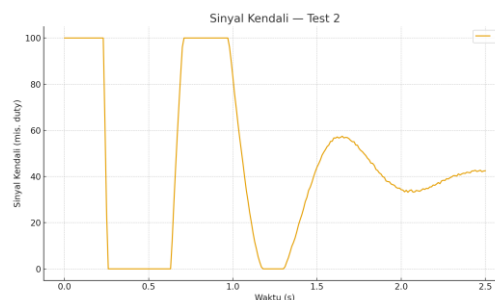
B. Test 2

- Respon Waktu (PV vs SP)



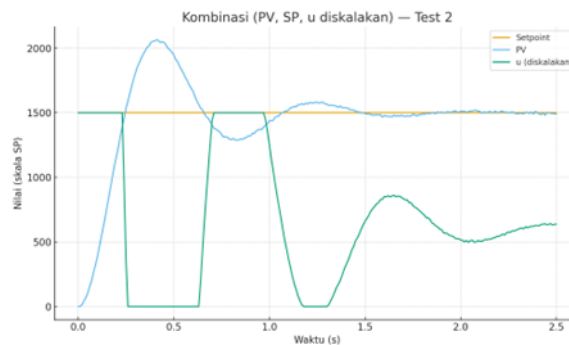
Gambar 7. Respon Waktu Tes 2

- 2) Sinyal Kendali (u)



Gambar 9. Sinyal Kendali Tes 2

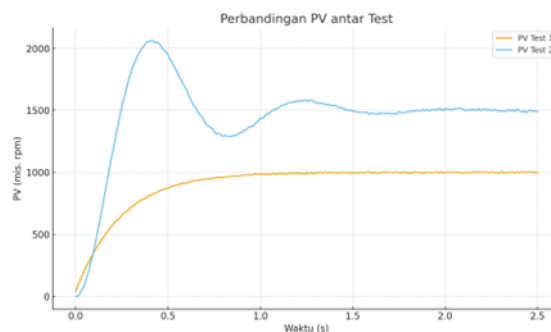
- Panel Kombinasi (PV, SP, u diskalakan)



Gambar 10. Kombinasi

- Perbandingan Antar Uji

PV antar semua test (overlay).



Gambar 11. Overlay

Kesimpulan

Sistem PID berbasis Arduino & L298N mampu mengendalikan motor DC secara presisi. Encoder meningkatkan akurasi umpan balik, LM324 memperkuat sinyal sensor. Ziegler–Nichols menghasilkan parameter awal yang efektif untuk tuning PID. ZN memberikan parameter awal efektif (mis. $K_p \approx 6.8$, $K_i \approx 45.3$, $K_d \approx 0.25$). Sistem mampu mencapai stabilitas dan waktu respon cepat sesuai teori kontrol klasik. PID dengan feedback encoder dan pengondisian LM324 meningkatkan presisi tracking motor DC. Fine-tuning meningkatkan stabilitas dan menurunkan overshoot. Sistem tangguh terhadap gangguan beban dengan dukungan anti-windup dan D-filter.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah mensupport untuk kuliah profesi. Terimakasih kepada Kepala Laboratorium Terpadu FST Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah memberikan tempat untuk penelitian, terimakasih kepada Aslab Teknik Elktro Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini

Referensi

1. M. M. Maung, M. M. Latt, and C. M. Nwe, "DC Motor Angular Position Control using PID Controller with Friction Compensation," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 8, no. 11, 2018, doi: 10.29322/ijsrp.8.11.2018.p8321.
2. M. Putera and R. Hidayat, "Kendali Kecepatan Motor Dc Menggunakan," vol. 7, no. 1, pp. 50–56, 2022.
3. S. Chen, "Study on load disturbance rejection of PID control in DC motor speed regulation systems," *Adv. Eng. Innov.*, vol. 16, no. 5, pp. 118–122, 2025, doi: 10.54254/2977-3903/2025.23523.
4. R. Bitriá and J. Palacín, "Optimal PID Control of a Brushed DC Motor with an Embedded Low-Cost Magnetic Quadrature Encoder for Improved Step Overshoot and Undershoot Responses in a Mobile Robot Application," *Sensors*, vol. 22, no. 20, 2022, doi: 10.3390/s22207817.
5. R. Rikwan and A. Ma'arif, "DC Motor Rotary Speed Control with Arduino UNO Based PID Control," *Control Syst. Optim. Lett.*, vol. 1, no. 1, pp. 17–31, 2023, doi: 10.59247/csol.viii.6.
6. B. D. Ushofa, L. Anifah, I. G. P. A. Buditjahjanto, and Endryansyah, "Sistem Kendali Kecepatan Putaran Motor DC pada Conveyor," *J. Tek. Elektro*, vol. 11, no. 2, pp. 332–342, 2022.
7. X. Han, "Comparative study on PID for DC motor speed regulation," *MATEC Web Conf.*, vol. 404, p. 02003, 2024, doi: 10.1051/mateconf/202440402003.
8. A. Maarif and N. R. Setiawan, "Control of dc motor using integral state feedback and comparison with pid: Simulation and arduino implementation," *J. Robot. Control*, vol. 2, no. 5, pp. 456–461, 2021, doi: 10.18196/jrc.25122.
9. G. Saravanan, C. Pazhanimuthu, and P. Naveen, "Performance improvement of DC motor control system using PID controller with Kookaburra and Red Panda optimization algorithm," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–23, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-87607-2.
10. S. Md Rozali, E. Ruslan, R. Ramli, M. N. Kamarudin, and M. F. Rahmat, "Development of Pid Controller for Conveyor Belt System with Different Tuning Method," *Int. J. Acad. Res. Bus. Soc. Sci.*, vol. 14, no. 12, pp. 4139–4153, 2024, doi: 10.6007/ijarbss/v14-i12/24399.
11. Seborg, *Process Dynamics and Control* fourth edition, vol. 53, no. 9, 2019.
12. P. Peerzada, W. H. Larik, and A. A. Mahar, "DC Motor Speed Control Through Arduino and L298N Motor Driver Using PID Controller," *Int. J. Electr. Eng. Emerg. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 21–24, 2021, [Online]. Available: <https://www.ijeeet.com/index.php/ijeeet/article/view/94>
13. H. Supriyono, F. F. Alanro, and A. Supardi, "Development of DC Motor Speed Control Using PID Based on Arduino and Matlab For Laboratory Trainer," 2024. doi: 10.25077/jnte.v13n1.1155.2024.
14. G. A. K, M. D. D, G. A. B, and V. K. D, "DC Motor Controller Using Arduino," vol. 11, no. 5, pp. 462–466, 2023.
15. A. Uno, "MOTOR SPEED CONTROL USING ARDUINO PWM motor speed control using Arduino," pp. 3–7.