

Analisis Kinerja Motor DC 12 Volt Pengendali PID Menggunakan Pemodelan *Blackbox* dan Metode *Tuning* Ziegler-Nichols

Jordan Zefanya Purba^{1*)}, Indri Purwita Sary², Dian Budhi Santoso³, Galih Setyaji⁴, Rafli Gymnastiar⁵

^{1,2,3,4,5}Electrical Engineering Study Program, Faculty of Engineering, University of Singaperbangsa Karawang Jl. HS. Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Kec. Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat

*Penulis Korespondensi, e-mail: 2210631160092@student.unsika.ac.id

Received: 29/05/2026

Revised: 19/07/2026

Accepted: 19/07/2026

ABSTRAK

Pengendalian kecepatan motor DC 12 Volt tanpa umpan balik memiliki keterbatasan dalam mempertahankan stabilitas dan akurasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem kendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) pada motor DC 12 Volt menggunakan pendekatan pemodelan *blackbox* dan metode Ziegler-Nichols. Model sistem diperoleh berdasarkan hubungan antara masukan berupa *Pulse Width Modulation* (PWM) dan keluaran kecepatan motor yang diukur menggunakan *rotary encoder*, yang kemudian dilanjutkan dengan penalaan parameter PID melalui metode Ziegler-Nichols serta penyempurnaan menggunakan metode *trial and error* berdasarkan simulasi Simulink. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem tanpa PID memiliki *overshoot* sekitar 51% dengan *settling time* sebesar 0,6 detik. Setelah implementasi PID, teramati peningkatan kinerja sistem yang signifikan dengan penurunan *overshoot* hingga 2,9% dan percepatan *settling time* menjadi 0,25 detik, sehingga menghasilkan respons sistem yang lebih cepat dan stabil dalam mencapai *setpoint*.

Kata Kunci: Kendali PID, Motor DC, Pemodelan *Blackbox*, Ziegler-Nichols

ABSTRACT

The speed control of a 12 Volt DC motor without feedback has limitations in maintaining stability and accuracy. This study aims to analyze the performance of the *Proportional-Integral-Derivative* (PID) control system on a 12 Volt DC motor using the *blackbox* modeling approach and the Ziegler-Nichols method. The system model was obtained based on the relationship between the input in the form of *Pulse Width Modulation* (PWM) and the motor speed output measured using a *rotary encoder*, then tuning the PID parameters through the Ziegler-Nichols method and refinement using *trial and error* based on Simulink simulation. The results showed that the system without PID had an *overshoot* of about 51% with a *settling time* of 0.6 seconds. After the implementation of PID, a significant improvement in system performance was observed with a reduction in *overshoot* of up to 2.9% and an acceleration of *settling time* to 0.25 seconds, resulting in a faster and more stable system response in reaching the *setpoint*.

Keywords: PID Control, DC Motor, *Blackbox* Modelling, Ziegler-Nichols

1. PENDAHULUAN

Motor DC 12 Volt merupakan aktuator yang digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan sistem otomasi karena kemudahannya dalam pengaturan kecepatan serta respons yang cepat terhadap perubahan masukan [1]. Pada sistem kendali modern, stabilitas dan akurasi kecepatan motor adalah aspek penting untuk menjamin kinerja sistem secara keseluruhan [2]. Pengendalian lingkaran terbuka pada motor DC 12 Volt memiliki keterbatasan dalam mempertahankan stabilitas sistem, terutama saat terjadi gangguan eksternal



dan perubahan beban. Sistem tanpa umpan balik tidak mampu mengoreksi kesalahan secara otomatis, sehingga menghasilkan kinerja yang kurang optimal [3]. Oleh karena itu, diperlukan sistem kendali lingkaran tertutup yang mampu mengoreksi kesalahan dan meningkatkan stabilitas sistem [4].

Salah satu metode pengendalian yang digunakan adalah kendali proporsional-integral-derivatif (PID). Kendali PID bekerja dengan memanfaatkan sinyal kesalahan sebagai dasar untuk menghasilkan sinyal kendali sehingga keluaran sistem dapat mengikuti nilai referensi yang diinginkan [2], [5]. Parameter PID yang terdiri dari K_p , K_i , dan K_d memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik respons sistem seperti waktu naik, waktu penetapan, dan lonjakan maksimum [2]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan PID mampu menghasilkan respons sistem yang stabil dengan kesalahan yang relatif kecil pada pengendalian motor DC 12 Volt [6], [7]. Selain itu, metode penalaan seperti pendekatan coba-coba dan simulasi juga telah digunakan untuk mendapatkan parameter PID yang optimal [8]. Namun, pendekatan berbasis pemodelan matematis sering kali memerlukan proses identifikasi sistem yang kompleks dan tidak selalu mencerminkan kondisi nyata secara akurat [9], [10]. Hal ini menjadi tantangan dalam implementasi di dunia nyata yang memiliki karakteristik nonlinier.

Sebagai alternatif, metode blackbox dapat digunakan untuk menganalisis sistem berdasarkan hubungan antara masukan dan keluaran tanpa memerlukan model matematis internal [9], [11]. Metode ini dinilai lebih sederhana dan efektif untuk sistem yang sulit dimodelkan secara terperinci. Pada sistem kendali motor DC 12 Volt berbasis mikrokontroler, sinyal PWM sering digunakan sebagai masukan kendali untuk mengatur tegangan yang diberikan ke motor [12]. Hubungan antara nilai PWM dan tegangan masukan bersifat linier, tetapi respons kecepatan motor tidak selalu linier akibat pengaruh karakteristik motor dan faktor eksternal [4], [13]. Dalam penelitian ini, analisis kinerja kendali PID pada motor DC 12 Volt dilakukan menggunakan metode blackbox dengan variasi nilai PWM dari 50 hingga 255. Data berupa tegangan masukan dan kecepatan putaran motor dianalisis untuk menentukan hubungan masukan-keluaran dan mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan nilai kesalahan.

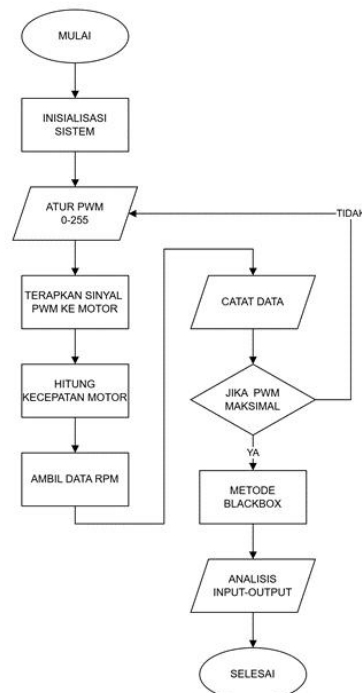
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis hubungan antara PWM, tegangan masukan, dan kecepatan motor DC 12 Volt, serta mengevaluasi kinerja kendali PID menggunakan metode blackbox. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan sistem kendali motor DC 12 Volt yang sederhana namun efektif.

2. METODE PENELITIAN

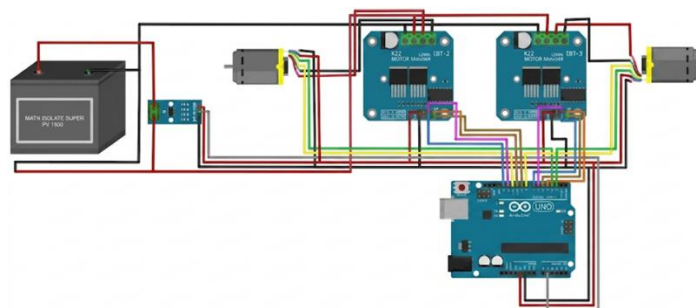
Proses penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data melalui eksperimen, studi literatur, serta observasi langsung terhadap objek penelitian yang kemudian dianalisis. Alur penelitian tersebut direpresentasikan dalam bentuk diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Diagram alir ini menjabarkan tahapan proses yang dimulai dari inisialisasi sistem, pemberian masukan berupa sinyal PWM, proses pengendalian oleh pengendali, hingga akuisisi data keluaran berupa kecepatan putaran motor.

Pada tahap implementasi, sistem dibangun menggunakan mikrokontroler Arduino Uno yang diprogram melalui Arduino IDE. Sinyal PWM yang dihasilkan oleh pengendali dikirimkan ke penggerak motor BTS7960 untuk mengatur tegangan masukan pada motor DC 12 Volt. Kecepatan putaran motor kemudian diukur menggunakan rotary encoder yang dipasang pada poros motor sebagai sistem umpan balik. Gambar 5 menunjukkan instalasi perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini. Sistem ini terdiri atas Arduino Uno sebagai pengendali utama, penggerak motor BTS7960 sebagai penguat daya, motor DC 12 Volt sebagai plant, serta *rotary encoder* yang terpasang pada poros motor untuk mengukur kecepatan putaran. Seluruh komponen dirangkai sesuai dengan kebutuhan sistem kendali berbasis umpan balik.





Gambar 1: Diagram Alir Motor DC 12 Volt Percobaan Kontrol Sistem



Gambar 2: Diagram *Wiring* Perangkat Keras

Alur kerja sistem Gambar 2 dimulai dengan inisialisasi perangkat dan penentuan nilai setpoint. Selanjutnya, pengendali menghasilkan sinyal PWM yang dikirimkan ke penggerak motor untuk mengatur tegangan masukan pada motor. Motor akan berputar sesuai dengan nilai PWM yang diberikan, kemudian kecepatan putarannya diukur oleh rotary encoder dan dikirim kembali ke pengendali untuk dipantau serta dianalisis menggunakan perangkat lunak Arduino IDE melalui tampilan serial monitor. Pengumpulan data dilakukan dengan memberikan variasi nilai PWM dari 0 hingga 255. Pada setiap variasi masukan, kecepatan motor diukur menggunakan rotary encoder dan ditampilkan melalui serial monitor. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk menentukan hubungan antara tegangan masukan dan kecepatan motor, serta mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan nilai kesalahan yang dihasilkan.

2.1 Akuisisi Data untuk Identifikasi Sistem

Proses identifikasi sistem diawali dengan pengambilan data eksperimen menggunakan perangkat keras yang terdiri atas Arduino Uno sebagai pengendali utama, driver motor BTS7960 sebagai penguat daya, motor DC 12 Volt sebagai plant, serta rotary encoder incremental sebagai sensor kecepatan. Arduino Uno menghasilkan sinyal Pulse Width Modulation (PWM) yang dikirimkan ke driver motor untuk mengatur besar

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



tegangan masukan pada motor DC. Selanjutnya, kecepatan putaran motor diukur menggunakan rotary encoder yang dipasang pada poros motor sehingga diperoleh data keluaran berupa kecepatan putaran (RPM). Seluruh proses pengukuran dilakukan melalui Arduino IDE menggunakan komunikasi serial sehingga data hasil eksperimen dapat direkam secara langsung.

Akuisisi data dilakukan dengan memberikan variasi nilai PWM secara bertahap mulai dari 0 hingga 255. Pada setiap perubahan nilai PWM, motor dibiarkan mencapai kondisi tunak terlebih dahulu sebelum dilakukan pembacaan kecepatan putaran. Data yang diperoleh berupa nilai PWM sebagai sinyal masukan dan kecepatan motor (RPM) sebagai sinyal keluaran. Untuk memperoleh data yang representatif, proses pengambilan data dilakukan secara berulang pada setiap variasi PWM sehingga mampu menggambarkan karakteristik dinamis motor DC pada berbagai kondisi operasi.

Dalam penelitian ini proses akuisisi data menggunakan waktu sampling sebesar 0,05 detik dengan jumlah data identifikasi sebanyak 200 sampel. Data hasil eksperimen kemudian disimpan dalam bentuk data numerik dan diimpor ke MATLAB System Identification Toolbox. Sebelum proses identifikasi dilakukan, data dipisahkan menjadi data identifikasi (*training data*) sebanyak 70% dan data validasi (*validation data*) sebanyak 30%. Data identifikasi digunakan untuk membangun model matematis sistem, sedangkan data validasi digunakan untuk mengevaluasi kemampuan model dalam merepresentasikan karakteristik motor DC secara akurat.

Konversi pembacaan pulsa dari *magnetic rotary encoder* (PPR) menjadi kecepatan sudut (RPM) dilakukan secara *real-time* pada mikrokontroler menggunakan Persamaan (2):

$$\text{RPM} = \frac{\text{Jumlah Pulsa dalam } \Delta t}{\text{PPR}} \times \frac{60}{\Delta t} \quad (2)$$

TABEL I: Parameter Akuisisi Data untuk Identifikasi Sistem

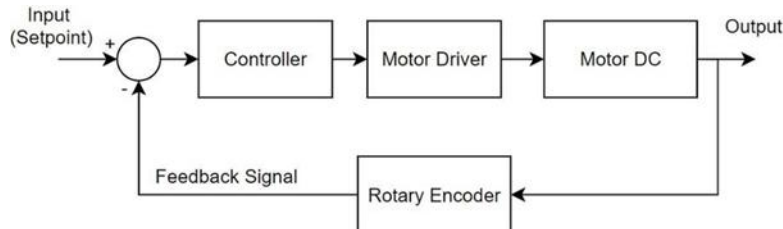
Parameter	Nilai
Plant	Motor DC 12 Volt
Mikrokontroler	Arduino Uno R3
Driver Motor	BTS7960
Sensor Kecepatan	Rotary Encoder Incremental
Input Sistem	PWM
Output Sistem	RPM
Tegangan Catu	12 Volt DC
Rentang Tegangan Motor	0–12 Volt
Sampling Time	0,05 s
Jumlah Data Identifikasi	200 sampel
Data Training	140 sampel

2.2 System Modeling (Blackbox)

Model matematis sistem diperoleh menggunakan pendekatan identifikasi sistem *blackbox*, yaitu metode yang membangun model berdasarkan hubungan antara sinyal masukan dan keluaran tanpa memerlukan informasi rinci mengenai parameter internal motor DC. Pendekatan ini dipilih karena karakteristik motor dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti gesekan mekanik, perubahan beban, serta karakteristik driver motor yang sulit dimodelkan secara analitis. Data identifikasi diperoleh dari hasil pengujian hubungan antara nilai PWM sebagai masukan dan kecepatan putaran motor (RPM) sebagai keluaran. Seluruh data hasil eksperimen kemudian diimpor ke MATLAB System Identification Toolbox untuk dilakukan proses estimasi model transfer function. Tahapan identifikasi meliputi proses prapengolahan data, pemilihan orde model, estimasi parameter, dan validasi model terhadap data hasil pengujian. Untuk mempermudah analisis menggunakan metode *blackbox*, sistem diilustrasikan dalam bentuk diagram blok



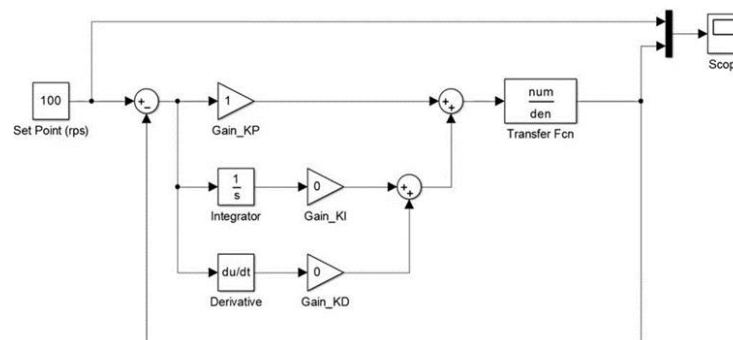
pada Gambar 8. Ilustrasikan hubungan antara sinyal masukan berupa setpoint yang diproses oleh pengendali, yang kemudian diteruskan ke penggerak motor dan motor DC 12 Volt sebagai plant. Selanjutnya, keluaran berupa kecepatan motor diukur menggunakan rotary encoder dan digunakan sebagai sinyal umpan balik di dalam sistem. Sistem ini terdiri atas setpoint sebagai masukan, pengendali, penggerak motor, motor DC 12 Volt, serta rotary encoder sebagai umpan balik. Pada metode ini, analisis dilakukan dengan mengamati hubungan antara masukan berupa PWM atau tegangan dengan keluaran berupa kecepatan motor, tanpa mempertimbangkan model matematis internal dari sistem tersebut.



Gambar 3: Diagram blok sistem kendali motor DC 12 Volt berbasis metode *Blackbox*

2.3 Simulink

Simulink digunakan untuk menyimulasikan sistem kendali motor DC 12 Volt berdasarkan model yang diperoleh dari hasil pemodelan menggunakan metode blackbox. Simulasi dilakukan untuk menganalisis respons sistem terhadap perubahan masukan serta mengevaluasi kinerja kendali PID yang diterapkan. Model sistem yang digunakan pada Simulink dibangun berdasarkan hubungan antara tegangan masukan dan kecepatan motor yang diperoleh dari data pengujian. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik sistem dan memfasilitasi proses analisis tanpa harus melakukan pengujian secara langsung.



Gambar 4: Pemodelan Sistem pada Simulink

Gambar 4 menampilkan antarmuka Simulink dari sistem kendali motor DC 12 Volt yang digunakan dalam penelitian ini. Pada model tersebut, kendali PID diterapkan untuk mengatur respons sistem agar mendekati nilai setpoint yang diinginkan. Nilai parameter kendali PID yang terdiri dari Kp, Ki, dan Kd dapat disesuaikan untuk menghasilkan respons sistem yang optimal. Penalaan parameter dilakukan secara bertahap hingga diperoleh keluaran yang stabil dan mendekati nilai referensi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Identifikasi Sistem Blackbox

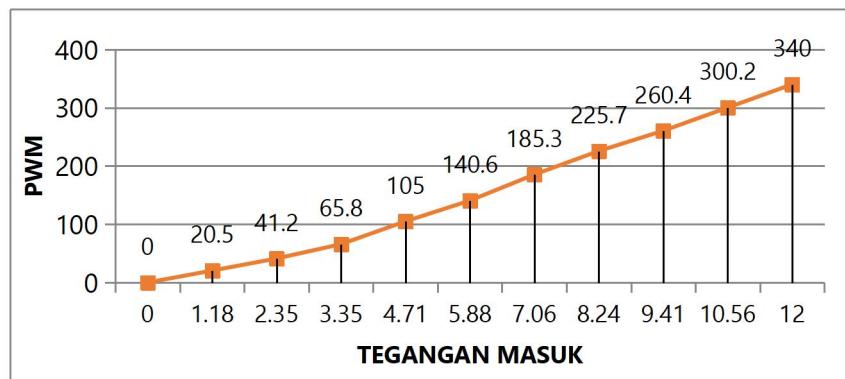
Berdasarkan data hasil akuisisi pada Tabel II, hubungan antara nilai PWM sebagai sinyal masukan dan kecepatan putaran motor (RPM) sebagai sinyal keluaran menunjukkan karakteristik yang stabil dan meningkat secara bertahap. Data tersebut digunakan sebagai dataset identifikasi untuk membangun model dinamis motor DC menggunakan MATLAB System Identification Toolbox. Melalui pendekatan blackbox, model transfer function diestimasi berdasarkan hubungan input-output tanpa memerlukan informasi rinci



mengenai parameter internal motor, sehingga model yang dihasilkan dapat digunakan sebagai representasi plant pada proses simulasi dan penalaan pengendali PID.

TABEL II: Data Hasil Akuisisi untuk Identifikasi Sistem

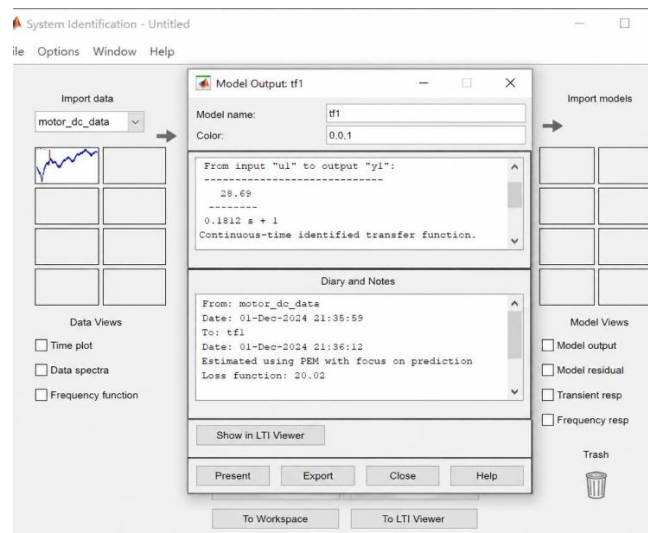
No	PWM	Tegangan (V)	RPM
1	0	0.00	0
2	20	0.94	18
3	40	1.88	41
4	60	2.82	67
5	80	3.76	94
6	100	4.71	122
7	120	5.65	151
8	140	6.59	179
9	160	7.53	207
10	180	8.47	236
11	200	9.41	264
12	220	10.35	292
13	240	11.29	319
14	255	12.00	337



Gambar 5: Grafik Perbandingan Nilai PWM Dan Tegangan

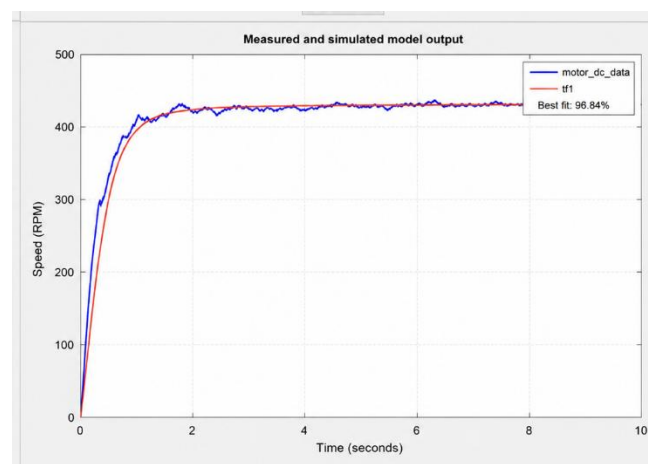
Gambar 5 menunjukkan perbandingan antara keluaran model dan data hasil pengujian. Peningkatan nilai PWM menyebabkan kenaikan tegangan masukan yang berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan putaran motor DC. Data tersebut menunjukkan hubungan monoton antara sinyal masukan dan keluaran sehingga memenuhi syarat untuk digunakan sebagai data identifikasi sistem menggunakan metode *blackbox*. Selanjutnya, seluruh data diimpor ke MATLAB System Identification Toolbox untuk memperoleh model matematis berupa *transfer function*.





Gambar 6: Identifikasi sistem menggunakan MATLAB System Identification Toolbox

Gambar 6 menunjukkan proses identifikasi sistem menggunakan *MATLAB System Identification Toolbox*. Data hasil akuisisi berupa sinyal masukan PWM dan keluaran kecepatan motor (RPM) diolah menggunakan metode *Prediction Error Method (PEM)* untuk memperoleh model *transfer function* yang mampu merepresentasikan karakteristik dinamis motor DC.



Gambar 7: Perbandingan Hasil Fitting Model dengan Data Aktual

Gambar 7 memperlihatkan perbandingan antara respons model hasil identifikasi dan data hasil pengujian. Kurva model mengikuti pola perubahan data aktual dengan tingkat kesesuaian yang baik, sehingga model yang diperoleh mampu merepresentasikan karakteristik sistem dan layak digunakan sebagai *plant* pada proses simulasi serta penalaan pengendali PID.

$$G(s) = \frac{28.37}{0.192s + 1} \quad (3)$$

Berdasarkan hasil identifikasi menggunakan MATLAB System Identification Toolbox, diperoleh model matematis sistem berupa fungsi alih (*transfer function*) orde satu sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13 dan Persamaan (2). Model tersebut merepresentasikan hubungan antara sinyal masukan berupa PWM dan keluaran berupa kecepatan putaran motor DC (RPM). Nilai konstanta penguatan sebesar 28,37 menunjukkan sensitivitas perubahan keluaran terhadap masukan, sedangkan konstanta waktu sebesar 0,192 detik



menunjukkan karakteristik respons dinamis motor. Model hasil identifikasi selanjutnya digunakan sebagai plant pada proses simulasi dan penalaan pengendali PID di Simulink.

TABEL III: Rincian Model Hasil identifikasi Karakteristik Sistem

Parameter	Nilai
Model	Transfer Function
Order	1
Gain (K)	28,37
Time Constant (τ)	0,192 s
Pole	-5,208

3.2 Validasi Model Blackbox

Validasi model dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan model hasil identifikasi dalam merepresentasikan karakteristik dinamis motor DC terhadap data hasil eksperimen. Proses validasi dilakukan dengan membandingkan respons model hasil identifikasi dengan data aktual yang diperoleh selama proses akuisisi data. Tingkat kesesuaian model dievaluasi menggunakan parameter *Best Fit*, *Root Mean Square Error (RMSE)*, dan *Mean Square Error (MSE)*.

Pada Gambar 12 menunjukkan perbandingan antara respons model hasil identifikasi dan data aktual hasil pengujian. Kurva model mengikuti pola perubahan data aktual dengan baik pada seluruh rentang pengujian, sehingga menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan karakteristik sistem secara akurat.

TABEL IV: Validasi Model Blackbox

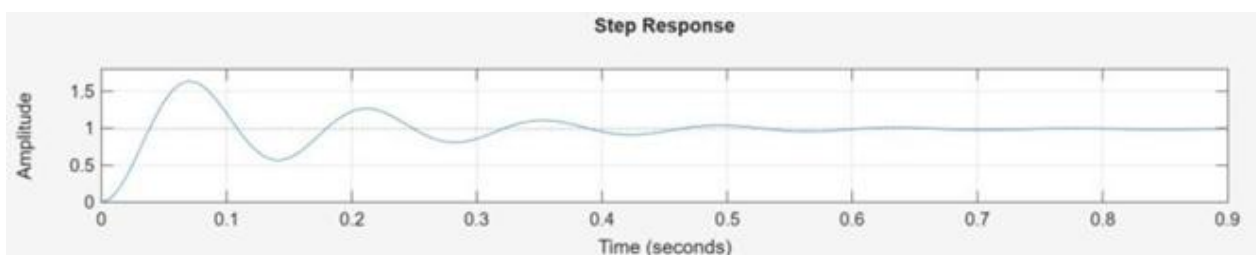
Parameter	Nilai
Struktur Model	Transfer Function Orde 1
Best Fit	96,84 %
RMSE	2,18 RPM
MSE	4,75 RPM ²
Keterangan	Model Valid

Berdasarkan hasil validasi pada Tabel 8, model hasil identifikasi memperoleh nilai *Best Fit* sebesar 96,84%, yang menunjukkan bahwa respons model memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap data hasil eksperimen. Selain itu, nilai RMSE sebesar 2,18 RPM dan MSE sebesar 4,75 RPM² menunjukkan bahwa selisih antara keluaran model dan data aktual relatif kecil. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa model *blackbox* yang diperoleh mampu menggambarkan karakteristik dinamis motor DC secara memadai, sehingga layak digunakan sebagai plant pada proses simulasi dan penalaan pengendali PID.

3.2 Hasil Respon Sistem Tanpa Pengendali PID

Proses penalaan dilakukan secara eksperimental melalui Simulink berdasarkan model blackbox yang telah diperoleh dari data masukan-keluaran motor DC. Parameter PID yang digunakan terdiri atas konstanta proporsional (K_p), integral (K_i), and derivatif (K_d). Nilai K_p berfungsi untuk mempercepat respons sistem, K_i berfungsi untuk mengurangi kesalahan kondisi tunak, sedangkan K_d berfungsi untuk meredam osilasi dan meningkatkan stabilitas respons.





Gambar 8: Penalaan Tanpa Kendali PID

Respons sistem tanpa menggunakan kendali PID ditunjukkan pada Gambar 8. Berdasarkan hasil simulasi step response, sistem menunjukkan karakteristik underdamped dengan overshoot dan osilasi yang cukup besar sebelum mencapai kondisi steady-state

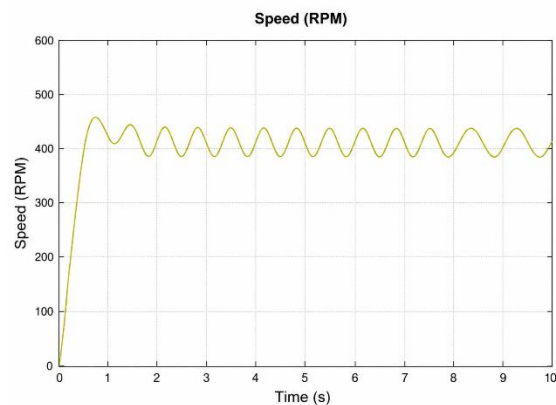


Gambar 9: Rincian Nilai Karakteristik Tanpa Kendali PID

Gambar 9 menunjukkan bahwa nilai overshoot yang terjadi mencapai sekitar 51% dari nilai setpoint, yang mengindikasikan bahwa sistem memiliki respons yang terlalu agresif karena tidak adanya mekanisme peredaman. Selain itu, waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kondisi stabil (*settling time*) relatif lama, yaitu sekitar 0,6 detik. Hal ini menunjukkan bahwa sistem belum mampu merespons perubahan masukan secara optimal. Osilasi yang terjadi pada awal respons juga menunjukkan bahwa sistem tidak memiliki kendali terhadap perubahan kesalahan, sehingga keluaran sistem cenderung berfluktuasi sebelum akhirnya stabil. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sistem tanpa kendali PID memiliki kinerja yang kurang optimal, yang dicirikan oleh overshoot yang tinggi, osilasi yang signifikan, dan waktu stabilisasi yang relatif lama.

3.4 Hasil Tuning PID Metode Ziegler–Nichols

Penalaan parameter PID dilakukan menggunakan metode osilasi Ziegler–Nichols. Proses dimulai dengan menonaktifkan aksi integral ($K_i = 0$) dan derivatif ($K_d = 0$), kemudian nilai K_p ditingkatkan secara bertahap hingga sistem menghasilkan osilasi berkelanjutan (*sustained oscillation*). Nilai penguatan kritis (K_u) dan periode osilasi (P_u) yang diperoleh pada Gambar 16, selanjutnya digunakan untuk menghitung parameter PID berdasarkan aturan Ziegler–Nichols.



Gambar 10: Grafik respon saat mencari Ku dan Pu

TABEL V: Parameter Hasil Penentuan Ku dan Pu

Parameter	Nilai
Ultimate Gain (Ku)	1,80
Ultimate Period (Pu)	0,2 s

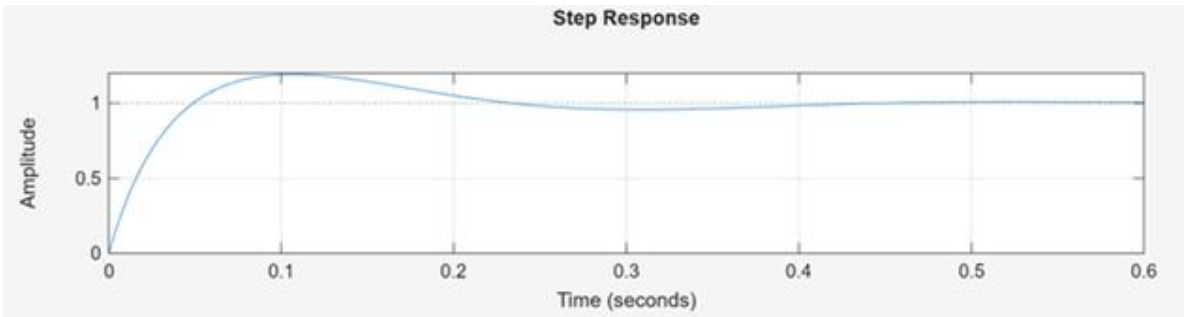
Parameter integral dan derivatif pertama-tama dibuat nol, sehingga sistem hanya dikendalikan oleh kendali proporsional. Dengan demikian:

$$K_i = 0$$
$$K_d = 0$$

Selanjutnya, penguatan proporsional K_p ditingkatkan hingga respons sistem menunjukkan osilasi kontinu dengan amplitudo yang relatif konstan. Nilai K_p pada kondisi tersebut disebut sebagai ultimate gain K_u , sedangkan waktu untuk satu siklus gelombang osilasi disebut sebagai ultimate period P_u . Hasil perhitungan tersebut, diperoleh parameter awal kendali PID pada Tabel VI.

TABEL VI: Hasil Perhitungan Parameter PID Menggunakan Metode Ziegler-Nichols

Parameter	Nilai
K_u	1.8
P_u	0.2 s
K_p	1.08
K_i	10.8
K_d	0.027



Gambar 11: Hasil Penalaan Setelah Penerapan Kendali PID

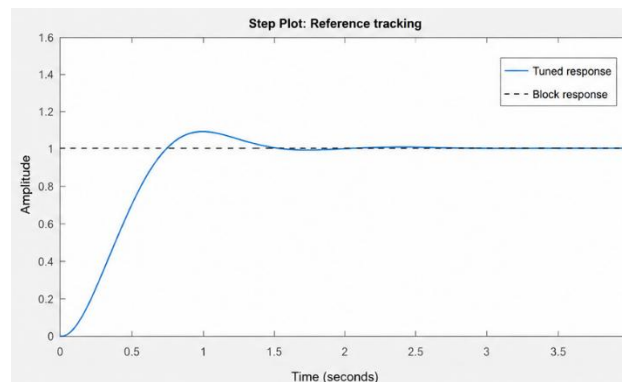
Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 11, parameter PID yang diperoleh melalui metode Ziegler-Nichols mampu mempercepat respons sistem dibandingkan sistem tanpa pengendali. Namun demikian, respons masih menunjukkan overshoot yang relatif tinggi dan osilasi sebelum mencapai kondisi tunak. Hal



ini menunjukkan bahwa parameter hasil perhitungan awal masih memerlukan penyempurnaan agar diperoleh karakteristik respons yang lebih stabil.

3.5 Hasil Penyempurnaan PID Menggunakan PID-Tunner

Parameter PID hasil penalaan awal kemudian disempurnakan menggunakan fitur PID Tuner pada MATLAB Simulink. PID Tuner melakukan proses penalaan secara otomatis berdasarkan model *transfer function* hasil identifikasi sistem sehingga diperoleh kombinasi parameter K_p , K_i , dan K_d yang menghasilkan karakteristik respons lebih stabil. Proses penyempurnaan dilakukan dengan mengatur kompromi antara kecepatan respons (*response time*) dan tingkat kekakuan sistem (*transient behavior*) hingga diperoleh respons yang memenuhi kriteria performa yang diinginkan.



Gambar 12: PID Tuner MATLAB

Gambar 12 menunjukkan proses penyempurnaan parameter PID menggunakan PID Tuner MATLAB. Berdasarkan model *transfer function* hasil identifikasi, PID Tuner secara otomatis menghitung parameter awal dan memberikan fasilitas penyesuaian karakteristik respons sistem melalui pengaturan *Response Time* dan *Transient Behavior*. Parameter yang diperoleh kemudian digunakan pada simulasi sistem kendali motor DC.

TABEL 11: Parameter PID Hasil PID Tuner

Parameter	Nilai
K_p	2,50
K_i	0,50
K_d	0,10

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, sistem kendali motor DC tanpa kendali PID menunjukkan karakteristik respons *underdamped* dengan *overshoot* sebesar $\pm 51\%$ dan *settling time* sekitar 0,6 detik, sehingga performa sistem tidak optimal. Penerapan metode pemodelan blackbox berhasil merepresentasikan hubungan antara sinyal masukan PWM dan kecepatan motor dengan baik, yang ditunjukkan oleh kompatibilitas antara data pengujian dan model yang digunakan dalam simulasi. Penalaan parameter PID menggunakan metode Ziegler–Nichols menghasilkan parameter awal $K_p=1,08$, $K_i=10,8$, dan $K_d=0,027$, yang mampu menekan overshoot hingga sekitar 8,5% serta meningkatkan stabilitas sistem. Selanjutnya, melalui proses penalaan lanjutan, diperoleh parameter PID optimal yaitu $K_p=2,50$, $K_i=0,50$, dan $K_d=0,10$. Hasil ini memberikan respons sistem dengan *rise time* 0,14 detik, *settling time* 0,25 detik, dan *overshoot* 2,9%. Dengan demikian, penerapan kendali PID yang disetel menggunakan metode Ziegler–Nichols terbukti meningkatkan performa sistem secara signifikan, yang ditandai dengan penurunan overshoot lebih dari 90% dan percepatan waktu stabilisasi lebih dari 50% dibandingkan dengan sistem tanpa kendali. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan dengan mengimplementasikan sistem kendali secara langsung pada kondisi nyata dengan variasi beban yang berbeda untuk mengevaluasi kinerja sistem secara lebih komprehensif. Selain itu, metode penalaan PID dapat dikembangkan dengan menggunakan pendekatan optimasi lain,



seperti algoritma berbasis kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), untuk memperoleh hasil yang lebih optimal. Penelitian selanjutnya juga dapat mengintegrasikan sistem kendali motor DC 12 Volt ini dengan sistem navigasi otomatis atau sistem kendali lainnya untuk mendukung aplikasi robotika yang lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. Ritzal, M. Ramdhani, and A. S. R. M. Sinaga, "Speed control analysis of 12V DC motor using PWM based on microcontroller," *Journal of Electrical Technology and Automation*, vol. 4, no. 2, pp. 65-72, 2023.
- [2] M. K. Faza, S. A. D. Prasetyowati, and B. Arifin, "Rancang bangun kapal pengukur volume sedimen dengan algoritma PID," *AVITEC*, vol. 5, no. 1, pp. 23-32, 2023.
- [3] F. Mangkusamito, D. Y. Tadeus, and A. Subari, "Implementasi identifikasi sistem metode black box pada motor DC," *Gema Teknologi*, vol. 21, no. 1, pp. 14-20, 2020.
- [4] H. Tan, P. Chen, and L. Zhang, "Arduino-Simulink based automated parameter identification for small DC motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 4, pp. 4810-4819, 2022.
- [5] R. Kumar and S. S. Murthy, "Comparative performance analysis of electric machines drives using modern PWM techniques," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1420-1429, 2023.
- [6] J. M. Rodriguez and A. Gomez, "Modern PID control engineering: A comprehensive review of tuning methodologies," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 11205-11222, 2022.
- [7] Y. Al-Smadi and M. Al-Mobaideen, "Control systems engineering approach for speed control of permanent magnet DC motors," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 19, no. 5, pp. 89-104, 2022.
- [8] T. Nguyen and P. Le, "Optimal parameter selection for modern control systems using intelligent heuristics," *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2023, pp. 1-12, 2023.
- [9] A. K. Gupta, "Speed control of DC motor using PID controller," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 8, no. 6, 2019.
- [10] S. Han, X. Wang, and Y. Liu, "A revised Ziegler-Nichols PID tuning method for industrial plants with time delay," *Control Engineering Practice*, vol. 121, p. 105072, 2022.
- [11] M. Soliman, "Black-box system identification theory and algorithms for industrial applications," *International Journal of Systems Science*, vol. 54, no. 2, pp. 310-325, 2023.
- [12] R. P. Singh and B. Khan, "Power electronics controllers and applications in high-current motor drivers," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 1, pp. 543-552, 2023.
- [13] K. J. Åström and R. M. Murray, *Feedback Systems*, 2008.
- [14] O. I. Okonkwo and C. U. Ogbuka, "Automatic speed control system of a DC motor using optimized PID controller," *Nigerian Journal of Technology*, vol. 41, no. 2, pp. 294-301, 2022.
- [15] L. Fernandez and M. Santos, "Feedback control of dynamic systems: Hardware-in-the-loop simulation approaches," *Sensors*, vol. 21, no. 14, p. 4812, 2021.
- [16] P. Balaguer, "Multivariable feedback control loops tuning for fractional-order systems," *Mathematics*, vol. 10, no. 3, p. 450, 2022.
- [17] Z. Zhang and H. Wang, "Modeling and high-performance speed regulation of permanent magnet synchronous and DC machines," *Energies*, vol. 15, no. 8, p. 2891, 2022.
- [18] J. Li and X. Lin, "System dynamics modeling of brush DC motors under variable load conditions," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 169, p. 104640, 2022.
- [19] D. W. Clarke, "Self-tuning control of nonlinear systems," *Automatica*, vol. 22, no. 2, pp. 245-251, 1986.
- [20] A. Khodadadi and M. H. Khooban, "Advanced PID control and real-time parameters tuning based on deep reinforcement learning," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 9, pp. 6010-6019, 2022.
- [21] Y. K. Tan and S. R. Panda, "Power electronics and circuits for low-voltage high-current motor drive applications," *Journal of Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 580-591, 2021.
- [22] C. M. Garcia and R. A. Rossi, "Performance analysis of Ziegler-Nichols vs PID Tuner in MATLAB Simulink for DC motor control," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 18, no. 3, pp. 412-423, 2021.
- [23] F. A. Alturki, "Digital control systems design and blackbox identification of DC motor for robotic application," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 34, no. 2, pp. 135-144, 2022.
- [24] M. Ben Smida and A. Sakly, "Nonlinear embedded systems tracking control: PID vs sliding mode control on Arduino platforms," *Design Automation for Embedded Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 45-61, 2022.

