

Analisis Kinerja Rangkaian PID Analog Menggunakan Op-Amp LM741 untuk Kendali Kecepatan Motor DC Berbasis Simulasi Proteus

Sulthon Muakhor Arifin^{1*)}, Lela Nurpulaela², Edmun Ucok Armind³, Farda Mariam Al Jamilah⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Singaperbangsa Karawang, Jalan HS.Ronggo Waluyo
Karawang, Indonesia

*Penulis Korespondensi, e-mail: 2210631160070@student.unsika.ac.id

Received: 22/04/2026

Revised: 25/07/2026

Accepted: 25/07/2026

ABSTRAK

Penerapan rangkaian aritmatika (Op-Amp) sebagai pengontrol PID dalam pengendalian kecepatan motor listrik merupakan solusi klasik yang masih relevan. Kontrol PID menggunakan tiga komponen utama yaitu proporsional (P), integral (I), dan diferensial (D). Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan komponen-komponen PID tersebut ke dalam rangkaian analog menggunakan penguat operasional (Op-Amp) LM741 untuk menggerakkan aktuator motor DC. Metode yang digunakan adalah simulasi sirkuit menggunakan perangkat lunak Proteus. Parameter komponen diatur meliputi resistansi 10 k Ω , kapasitansi 10 μ F, dan tegangan suplai 12V. Pengujian dilakukan melalui analisis respons transien untuk mengevaluasi kinerja dinamis sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem kontrol memiliki karakteristik overdamped dengan persentase overshoot sebesar 0%. Sistem membutuhkan waktu menetap (settling time) sekitar 10.5 detik untuk mencapai kondisi stabil, dengan kesalahan keadaan tunak (steady-state error) sebesar 24.72% dari target set-point 9.83 V. Analisis menunjukkan bahwa parameter derivatif sangat efektif meredam lonjakan, namun penguatan proporsional dan integral masih memerlukan penyesuaian lebih lanjut.

Kata Kunci: Rangkaian RC, Op-Amp, PID Controller, Analisis Transien

ABSTRACT

The application of an arithmetic circuit (Op-Amp) as a PID controller in controlling the speed of an electric motor is a classic solution that remains relevant. PID control utilizes three main components, namely proportional (P), integral (I), and differential (D). This study aims to implement these PID components into an analog circuit using the LM741 operational amplifier (Op-Amp) to drive a DC motor actuator. The method used is circuit simulation using Proteus software. Component parameters are set including 10 k Ω resistance, 10 μ F capacitance, and 12V supply voltage. Testing was conducted through transient response analysis to evaluate the dynamic performance of the system. The simulation results show that the control system has an overdamped characteristic with an overshoot percentage of 0%. The system requires a settling time of approximately 10.5 seconds to reach a stable condition, with a steady-state error of 24.72% from the 9.83 V set-point target. The analysis indicates that the derivative parameter is highly effective in dampening surges, but proportional and integral gains still require further tuning.

Keywords: RC Circuit, Op-Amp, PID Controller, Transient Analysis



1. PENDAHULUAN

PID Controller adalah salah satu jenis pengendalian sistem yang menggabungkan tiga cara pengaturan utama, yaitu Proportional (P), Integral (I), dan Derivative (D). Kontroler PID sangat populer di industri karena kesederhanaan struktur dan kemudahan dalam melakukan tuning parameter [1]. Pada awalnya, strategi kontrol PID diimplementasikan dengan menggunakan rangkaian elektronika bahkan banyak diantaranya direalisasikan dengan menggunakan komponen mekanis dan pneumatis murni. Namun, seiring dengan perkembangan teknologi digital dan solid state, saat ini produk PID komersil muncul di pasaran dalam beragam model dan bentuk, mulai dari modul jenis special purpose process controller hingga modul kontrol jenis general purpose process controller [1].

PID Controller juga umum dijumpai dalam bentuk modul independen pada sistem PLC (Programmable Logic Controller). Meskipun peranannya sangat besar dalam menentukan keberhasilan operasi proses industri, pengaturan parameter-parameter PID masih menjadi tantangan bagi perancang sistem kendali. Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan terus dilakukan untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi pengendalian sistem menggunakan PID Controller [2].

Operational Amplifier (Op-Amp) dapat digunakan sebagai pengatur PID untuk mengendalikan sistem kendali. Op-amp dapat digunakan sebagai pengatur proporsional dengan menggunakan konsistensi op-amp untuk menyesuaikan keluaran berdasarkan perubahan input. Untuk mengimplementasikan pengatur integral dan derivatif, op-amp dapat disebut dengan menambahkan resistor dan kapasitor ke dalam keluaran. Dengan menggabungkan op-amp sebagai pengatur PID, sistem kendali dapat mencukupi berbagai kebutuhan proses dan menciptakan sistem pengendalian yang efisien dan stabil. Namun, penggunaan op-amp sebagai pengatur PID memiliki beberapa keterbatasan, seperti kesulitan dalam mengatur parameter PID dan kesulitan dalam menyesuaikan konstanta pada sistem yang dinamik [3].

Rangkaian arus bolak-balik (AC) memiliki sumber tegangan yang berubah secara periodik dalam bentuk gelombang sinus, dinyatakan dengan persamaan

$$v(t) = V_0 \sin \omega t \quad (1)$$

Dengan kata lain, ia melewati periode atau siklus $1/T$ dalam 1 detik. Frekuensi f , dimana $f = 1/T$ r e, adalah jumlah siklus per detik, atau hertz (Hz) [4]. Karena $\omega t = 2\pi$ sekarang, kita temukan itu

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f \quad (2)$$

Dalam rangkaian ini terdapat tiga elemen utama, yaitu resistor, kapasitor, dan induktor, yang masing-masing memiliki karakteristik berbeda terhadap hubungan arus dan tegangan. Resistor memiliki arus dan tegangan yang sefasa sesuai hukum Ohm [5], kapasitor menyebabkan arus mendahului tegangan sebesar 90° , sedangkan induktor menyebabkan arus tertinggal 90° [6]. Perbedaan karakteristik ini menjadi dasar penting dalam perancangan rangkaian kendali berbasis op-amp [7].

Selain itu, sistem grounding digunakan untuk menjaga keamanan rangkaian dengan menyalurkan kelebihan muatan listrik ke tanah. Dalam analisis daya, digunakan konsep Root Mean Square (RMS) untuk menentukan nilai efektif tegangan atau arus AC dengan hubungan [8],

$$V_{\text{RMS}} = \frac{V}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Untuk menganalisis rangkaian secara lebih kompleks, digunakan metode analisis nodal dan mesh yang masing-masing memanfaatkan Hukum Arus Kirchhoff (KCL) dan Hukum Tegangan Kirchhoff (KVL) untuk menentukan parameter rangkaian yang tidak diketahui [9].

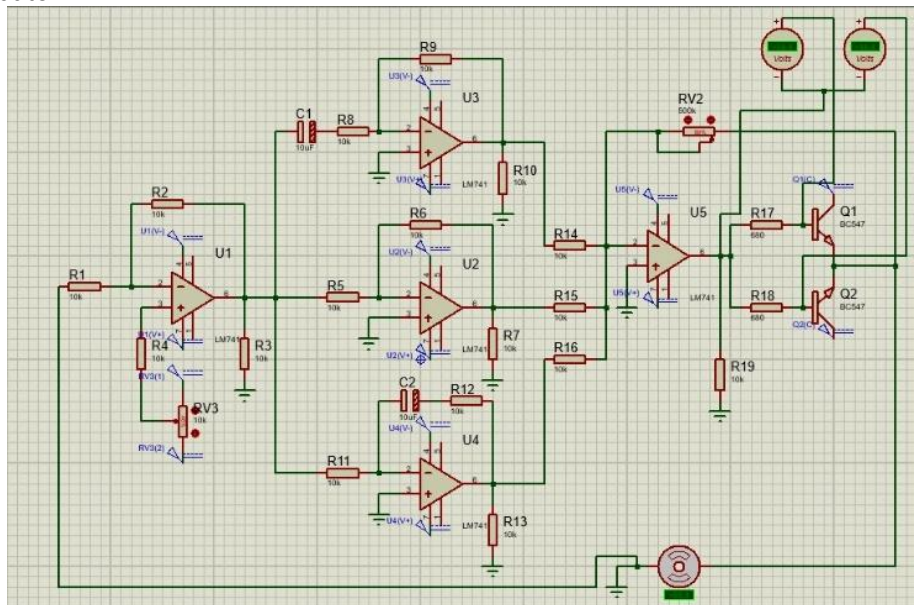
Pada percobaan dalam artikel ini akan menganalisis hasil dan penerapan dari Rangkaian Op-Amp sebagai PID Controller serta merinci cara kerja rangkaian tersebut. Percobaan ini bertujuan untuk mempelajari fungsi, cara kerja, dan penerapan rangkaian op-amp sebagai PID controller DC motor. Percobaan ini akan menggunakan metode simulasi dengan perangkat lunak Proteus sebagai aplikasi untuk mensimulasikan rangkaian PID Controller.



2. METODE PENELITIAN

Rangkaian yang digunakan terdiri dari tiga bagian utama, yaitu:

- Pengukur kesalahan (error sensor)
- Pengontrol PID
- Aktuator



Gambar 1: Rangkaian Op-Amp sebagai Penggerak DC Motor

Simulasi ini menggunakan komponen elektronika dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 1 untuk membangun blok sensor kesalahan, kontroler PID, dan aktuator.

TABEL I: Daftar Komponen Rangkaian Simulasi Pengendali Kecepatan Motor DC

Komponen	Kode	Spesifikasi/Nilai	Jumlah
Op-Amp	U1, U2, U3, U4, U5	LM741	5
Transistor NPN	Q1, Q2	BC547 ($\beta=100$)	2
Resistor Tetap	R1 – R16, R19	10k Ω	17
Resistor Tetap	R17, R18	680 Ω	2
Kapasitor	C1, C2	10 μ F	2
Potensiometer	RV2, RV3	Sesuai kalibrasi (<i>set-point</i>)	2
Motor DC (Aktuator)	-	12 VDC	1
Sumber Tegangan (Vcc)	-	12 VDC	1 Sistem

2.1 Pengukur Kesalahan

Pengukur kesalahan berfungsi untuk mengukur perbedaan antara nilai referensi (set point) dan nilai aktual (actual value) dari variabel yang dikendalikan. Nilai kesalahan ini kemudian digunakan oleh pengontrol PID untuk menentukan aksi yang harus dilakukan. Pada rangkaian ini, pengukur kesalahan menggunakan dua buah op-amp, yaitu LM741. Op-amp LM741 digunakan dalam konfigurasi pengganda tegangan. Nilai referensi diberikan pada input inverting dari op-amp pertama, sedangkan nilai aktual diberikan pada input non-inverting. Output dari op-amp pertama kemudian diberikan pada input inverting dari op-amp kedua. Output dari op-amp kedua inilah yang merupakan nilai kesalahan.



2.3 Pengontrol PID

Pengontrol PID berfungsi untuk menghitung aksi yang harus dilakukan berdasarkan nilai kesalahan. Aksi ini terdiri dari tiga komponen, yaitu:

- Komponen proporsional (P)
- Komponen integral (I)
- Komponen derivatif (D)

Komponen proporsional (P) memberikan aksi yang sebanding dengan besarnya kesalahan. Komponen integral (I) memberikan aksi yang sebanding dengan integral dari kesalahan. Komponen derivatif (D) memberikan aksi yang sebanding dengan turunan dari kesalahan. Pada rangkaian ini, pengontrol PID menggunakan tiga buah resistor dan tiga buah kapasitor untuk menghitung ketiga komponen PID. Nilai-nilai resistor dan kapasitor ini dapat disesuaikan untuk mendapatkan karakteristik kontrol yang diinginkan.

Penentuan nilai resistor dan kapasitor mengacu pada hubungan standar antara komponen RC dan parameter PID pada rangkaian Op-Amp analog [11], [2], yaitu penguatan proporsional K_p yang ditentukan oleh rasio resistor umpan balik terhadap resistor masukan ($K_p = R_f/R_{in}$), waktu integral T_i yang ditentukan oleh hasil kali resistor dan kapasitor pada tahap integrator ($T_i = R_i \times C_i$), serta waktu turunan T_d yang ditentukan oleh hasil kali resistor dan kapasitor pada tahap diferensiator ($T_d = R_d \times C_d$). Seluruh resistor tetap pada rangkaian ini menggunakan nilai 10 k Ω dan kapasitor 10 μ F sebagaimana ditunjukkan pada TABEL 1, sehingga penguatan proporsional bernilai satuan ($K_p = 1$) dan waktu integral/turunan bernilai tetap sebesar 0,1 detik. Pemilihan ini dilakukan sebagai konfigurasi awal (baseline) dan belum melalui proses variasi nilai komponen secara sistematis (tuning bertahap) dengan demikian, hasil pada penelitian ini merepresentasikan satu titik operasi dari ruang parameter PID yang mungkin, sebagaimana disarankan dalam metode tuning PID pada umumnya [12], [11].

2.4 Akuator

Aktuator berfungsi untuk mengubah aksi yang diberikan oleh pengontrol PID menjadi gerakan fisik yang memengaruhi variabel yang dikendalikan. Pada rangkaian ini, aktuator berupa transistor BC547 yang digunakan untuk mengontrol arus dan menggerakkan beban berupa motor DC. Sinyal keluaran dari tahap pengontrol PID dihubungkan ke basis transistor BC547 (Q1, Q2) sehingga tegangan koreksi tersebut mengatur besar arus basis dan, melalui penguatan arus transistor ($\beta = 100$), mengatur arus kolektor yang mengalir menuju motor DC. Motor DC dimodelkan pada Proteus sebagai beban dengan tegangan nominal 12 V, resistansi kumparan 12 Ohm, induktansi kumparan 100 mH, kecepatan tanpa beban 1000 RPM, rasio beban/torsi maksimal 50%, dan massa efektif 0,01, mengikuti pendekatan pemodelan motor DC yang umum digunakan pada simulasi kendali kecepatan motor [13]. Dengan model ini, setiap perubahan tegangan keluaran Op-Amp secara proporsional mengubah arus basis transistor, yang pada gilirannya mengubah kecepatan putar motor sesuai karakteristik beban tersebut. Adapun spesifikasi elektrik dan mekanik dari motor DC yang digunakan pada simulasi ini ditunjukkan pada Tabel II.

TABEL II: Spesifikasi Parameter Motor DC

Parameter	Nilai
Tegangan Nominal (Nominal Voltage)	12 V
Resistansi Kumparan (Coil Resistance)	12 Ohm
Induktansi Kumparan (Coil Inductance)	100 mH
Kecepatan Tanpa Beban (Zero Load RPM)	1000 RPM
Rasio Beban / Torsi Maksimal (Load/Max Torque)	50%
Massa Efektif (Effective Mass)	0.01



2.5 Parameter Simulasi dan Skenario Pengujian

Pengujian rangkaian pengendali kecepatan motor DC ini dilakukan menggunakan pendekatan simulasi pada perangkat lunak Proteus. Analisis yang digunakan adalah analisis respons transien terhadap waktu dengan memanfaatkan fitur Analogue Graph. Parameter waktu henti simulasi (stop time) diatur selama 50 detik untuk memastikan pergerakan motor dapat terekam utuh dari kondisi awal hingga mencapai kestabilan. Kondisi awal (initial condition) sistem ditetapkan pada keadaan diam (kecepatan 0 RPM).

Skenario pengujian dirancang untuk mengevaluasi kinerja dinamis dari kontroler PID berbasis Op-Amp, dengan tahapan sebagai berikut:

- Penetapan Set-Point: Memberikan sinyal masukan berupa tegangan referensi (set-point) melalui penyesuaian nilai potensiometer (RV2) untuk menetapkan target kecepatan motor.
- Perekaman Respons: Menjalankan Analogue Graph dengan menggunakan Voltage Probe pada jalur keluaran motor untuk mengamati grafik perubahan kecepatan motor terhadap waktu secara real-time.
- Analisis Kinerja: Mengekstrak data dari grafik simulasi untuk mendapatkan metrik performa sistem kendali, yang meliputi:
- Overshoot: Persentase lonjakan kecepatan tertinggi yang melewati target set-point pada awal respons.
- Settling Time: Waktu yang dibutuhkan respons kecepatan motor untuk masuk dan bertahan dalam toleransi batas kestabilan akhir.
- Steady-State Error: Nilai selisih atau kesalahan antara target kecepatan yang diinginkan dengan kecepatan aktual saat motor sudah berputar stabil.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Perhitungan

- Impedansi Input Transistor

Berdasarkan model π , impedansi input transistor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Z_{in} = \frac{1}{g_m \times C_{be}} \quad (4)$$

Dimana:

- Z_{in} adalah impedansi input transistor
- g_m adalah transkonduktansi transistor
- C_{be} adalah kapasitansi basis-emiter transistor

Berdasarkan informasi yang diberikan, nilai g_m untuk transistor BC547 adalah 300 mS/V. Nilai C_{be} untuk transistor BC547 adalah 20 pF.

Dengan demikian, impedansi input transistor adalah:

$$\begin{aligned} Z_{in} &= \frac{1}{300 \text{ mS/V} \times 20 \text{ pF}} \\ &= 15000 \text{ ohm} \end{aligned} \quad (5)$$

- Arus Basis AC

Arus basis AC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$i_b = \frac{V_{in}}{Z_{in}} \quad (6)$$

Dimana:



- i_b adalah arus basis AC

- V_{in} adalah tegangan input AC

Berdasarkan informasi yang diberikan, tegangan input AC adalah 10 V. Dengan demikian, arus basis AC adalah:

$$\begin{aligned} i_b &= \frac{10\text{ V}}{15000\text{ Ohm}} \\ &= 6.67\text{ }\mu\text{A} \end{aligned} \quad (7)$$

- Arus Colector AC

Arus kolektor AC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$i_c = \beta \times i_b \quad (8)$$

Dimana:

- i_c adalah arus kolektor AC
- β adalah penguatan arus transistor

Berdasarkan informasi yang diberikan, nilai β untuk transistor BC547 adalah 100.

Dengan demikian, arus kolektor AC adalah:

$$\begin{aligned} i_c &= 100 \times 6.67\text{ }\mu\text{A} \\ &= 6.67\text{ mA} \end{aligned} \quad (9)$$

- Tegangan Kolektor AC

Tegangan kolektor AC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$v_{ce} = V_{cc} - i_c \times R_c \quad (10)$$

Dimana:

- v_{ce} adalah tegangan kolektor-emiter AC
- V_{cc} adalah tegangan suplai DC
- R_c adalah resistansi kolektor

Berdasarkan informasi yang diberikan, tegangan suplai DC adalah 12 V dan resistansi kolektor adalah 100 ohm.

Dengan demikian, tegangan kolektor AC adalah:

$$\begin{aligned} v_{ce} &= 12\text{ V} - (6.67\text{ mA} \times 100\text{ ohm}) \\ &= 5.33\text{ V} \end{aligned} \quad (11)$$

- Daya Rangkaian

Daya pada rangkaian AC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P = V \times I \times \cos \theta \quad (12)$$

Dimana:

- P adalah daya AC
- V adalah tegangan AC
- I adalah arus AC
- θ adalah sudut fase antara tegangan dan arus

Berdasarkan data yang diberikan, tegangan AC adalah 10 V dan arus AC adalah 6.67 mA. Sudut fase antara tegangan dan arus adalah 0° , karena transistor bekerja dalam mode aktif-linear.



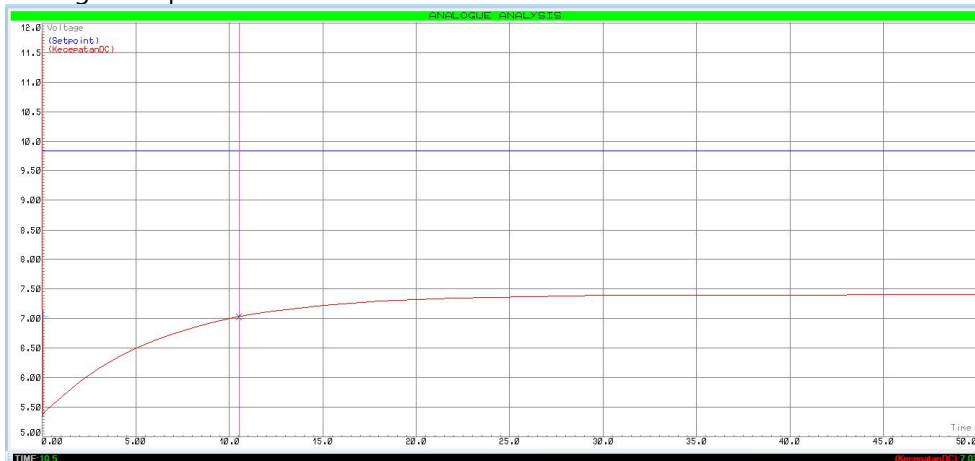
Dengan demikian, daya pada rangkaian adalah:

$$\begin{aligned} P &= 10 \text{ V} \times 6.67 \text{ mA} \times \cos 0^\circ \\ &= 66.7 \text{ mW} \end{aligned} \quad (13)$$

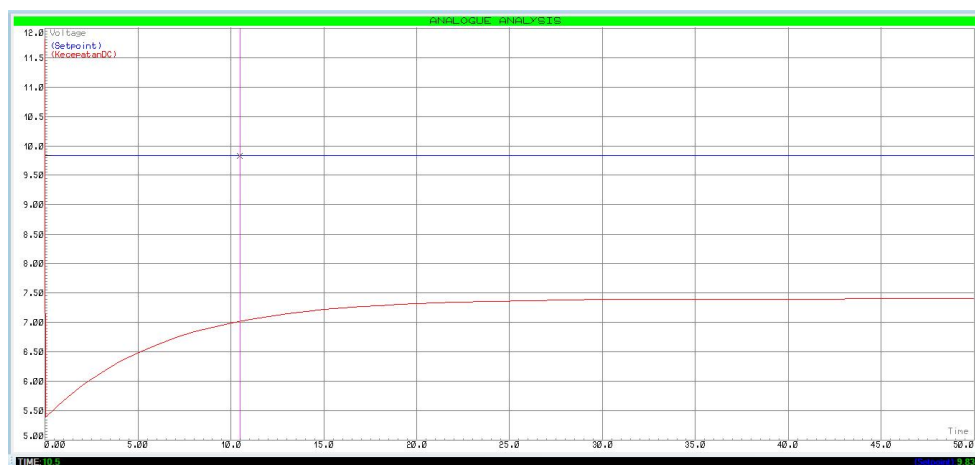
Jadi, daya pada rangkaian AC tersebut adalah 66.7 mW.

3.2 Hasil Simulasi Respons Sistem

Evaluasi kinerja kontroler PID berbasis Op-Amp dilakukan dengan menganalisis respons transien sistem. Tegangan suplai utama ditetapkan sebesar 12 V DC, dan nilai *set-point* tegangan diatur melalui potensiometer. Gambar 2 menunjukkan grafik respons kecepatan motor DC terhadap waktu yang didapatkan dari simulasi Analogue Graph.



Gambar 2: Grafik respons kecepatan motor DC terhadap waktu (step response)



Gambar 3: Grafik Setpoint terhadap waktu (step response)

Berdasarkan grafik pada Gambar 2 dan Gambar 3, sistem menunjukkan kemampuan merespons tegangan referensi. Pada awal simulasi, motor berakselerasi mengejar nilai kecepatan yang ditetapkan sebelum akhirnya mencapai kondisi stabil. Sinyal kesalahan dari sensor akan terus diproses oleh penguat operasional (LM741) dan diubah menjadi sinyal koreksi yang mengatur arus basis transistor BC547.

3.3 Analisis Kinerja Kontroler PID

Kinerja dinamis dari kontroler kecepatan ini dievaluasi berdasarkan metrik sistem kendali standar yang diekstrak dari kurva respons waktu (time-response). Pada pengujian ini, tegangan referensi (set-point)

Sulthon Muakhor Arifin: Implementasi Rangkaian Op-Amp sebagai... p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



ditetapkan sebesar 9.83 V melalui potensiometer masukan, dan respons aktual motor direkam hingga mencapai kondisi tunak (steady-state). Data kuantitatif hasil pengujian dirangkum pada Tabel III.

TABEL III: Parameter Kinerja Respons Motor DC

Parameter Kinerja	Nilai Terukur
<i>Set-Point</i>	9.83 V
<i>Steady-State</i>	7.40 V
<i>Overshoot</i>	0 %
<i>Settling Time</i>	± 10.5 s
<i>Steady-State Error</i>	24.72 %

Berdasarkan data pada Tabel 3, sistem kendali yang diusulkan menunjukkan karakteristik respons overdamped (terlampau redam). Nilai overshoot yang menyentuh angka 0% mengindikasikan bahwa kombinasi komponen resistor dan kapasitor pada bagian kontrol derivatif (D) berhasil meredam lonjakan tegangan awal secara optimal. Hal ini merupakan karakteristik yang sangat baik pada pengendalian motor DC, karena motor berakselerasi dengan halus tanpa mengalami sentakan mekanis yang dapat merusak komponen fisik akibat fluktuasi arus.

Selain itu, kurva respons menunjukkan bahwa waktu menetap (settling time) yang dibutuhkan motor untuk stabil tergolong relatif cepat, yakni di kisaran waktu 10,5 detik dari total waktu simulasi 50 detik yang disediakan. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun sistem bersifat overdamped, redaman yang diberikan tidak berlebihan sehingga motor tetap dapat mencapai kondisi stabil dalam waktu yang wajar. Meskipun demikian, terdapat kesalahan keadaan tunak (steady-state error) yang mempresentasikan selisih antara nilai referensi dan nilai keluaran aktual. Perhitungan kesalahan keadaan tunak pada sistem ini dijabarkan melalui persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \left| \frac{\text{Setpoint} - \text{Steady State}}{\text{Setpoint}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{9.83 - 7.40}{9.83} \right| \times 100\% = 24.72\% \end{aligned} \quad (14)$$

Tingginya nilai kesalahan residual sebesar 24.72% (selisih 2.43 V dari target 9.83 V) ini menunjukkan bahwa redaman pada sistem terlampau kuat. Penguatan dari komponen proporsional (P) dan aksi koreksi dari komponen integral (I) masih belum cukup agresif untuk mendorong tegangan keluaran agar benar-benar menyamai nilai referensinya. Hal ini konsisten dengan pemilihan nilai R dan C yang masih berupa konfigurasi awal (baseline) sebagaimana dijelaskan pada bagian 2.2, dan belum melalui proses variasi nilai secara sistematis untuk memperbesar Kp maupun memperkecil Ti. Secara keseluruhan, rangkaian Op-Amp LM741 berhasil mengontrol kestabilan motor, namun masih memerlukan optimasi nilai komponen (tuning) pada parameter P dan I untuk meminimalkan steady-state error.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan simulasi menggunakan Proteus, dapat disimpulkan bahwa rancangan rangkaian elektronika analog berbasis Op-Amp LM741 telah berhasil diimplementasikan sebagai pengontrol PID untuk mengatur kecepatan motor DC. Rangkaian ini mampu mengelola sinyal kesalahan (error) dan mengubahnya menjadi sinyal kendali yang mengatur arus basis pada aktuatur transistor BC547. Dari analisis grafik respons dinamis, sistem kendali yang diusulkan menghasilkan karakteristik respons overdamped. Kinerja kontrol derivatif terbukti sangat efektif dengan menekan nilai lonjakan maksimum (overshoot) hingga 0%. Ketidadaan overshoot ini merupakan parameter performa yang krusial bagi keselamatan mekanis, karena motor dapat berakselerasi dengan halus tanpa mengalami sentakan atau tekanan berlebih pada komponen mekaniknya. Di sisi lain, pengujian juga mengungkap satu aspek yang



masih perlu dievaluasi. Sistem tercatat memiliki waktu menetap (settling time) yang relatif cepat, yaitu pada kisaran 10,5 detik, namun perhitungan performa menunjukkan adanya kesalahan keadaan tunak (steady-state error) sebesar 24.72% terhadap tegangan set-point. Nilai kesalahan ini mengindikasikan bahwa meskipun peredaman sistem sudah cukup baik, penguatan aksi dari komponen proporsional (P) dan integral (I) masih belum cukup kuat. Ke depannya, penelitian ini dapat dikembangkan dengan melakukan optimasi nilai konstanta komponen (tuning) resistor dan kapasitor, khususnya untuk memperbesar penguatan proporsional dan mempercepat aksi integral, guna meminimalkan celah kesalahan pada kondisi tunak.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. H. Ang, G. Chong and Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 559-576, 2005.
- [2] K. J. Åström and T. Hägglund, *Advanced PID Control*. Research Triangle Park, NC, USA: ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.
- [3] S. Franco, *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.
- [4] S. H. Khader and A. K. K. Daud, *Single-phase AC supply*, Academic Press New York, NY, USA, 2015.
- [5] H. D. Surjono, *Elektronika Analog*, Cerdas Ulet Kreatif Publisher, 2011.
- [6] S. J. Ling, J. Sanny, W. Moebs, G. Friedman, S. D. Druger, A. Kolakowska, D. Anderson, D. Bowman, D. Demaree, E. Ginsberg and others, "University Physics Volume 2," 2016.
- [7] D. H. Horrocks, *Feedback circuits and op. amps*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [8] C. J. Fraser, "Electrical and electronics principles," 1993.
- [9] M. A. Salam, Q. M. Rahman, M. A. Salam and Q. M. Rahman, *AC Circuit Analysis*, Springer, 2018.
- [10] Texas Instruments, *LM741 Operational Amplifier*, datasheet, 2015.
- [11] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.
- [12] R. Hartono and A. K. Jaenudin, "Implementasi Sistem Navigasi Wall Following Masukan Sensor Ultrasonik Menggunakan Metode Tuning Kendali PID," *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, vol. 5, no. 2, pp. 119-130, 2017.
- [13] S. Syamsuddin, R. Nazir and S. Saputra, "Pengontrolan (posisi) motor servo Ac dengan metode pengaturan Volt/Hertz," *Universitas Andalas: Medan*, vol. 2, no. 27, pp. 52-61, 2007.

