

## KENDALI POSISI MOTOR DC DENGAN MENGGUNAKAN KENDALI PID

Imroatul Hudati<sup>1</sup>, Alief Purnomo Aji<sup>2</sup>, Salima Nurrahma<sup>3</sup>,  
<sup>1 2 3</sup>Universitas Gadjah Mada

[imroatul.hudati@ugm.ac.id](mailto:imroatul.hudati@ugm.ac.id), [alief.purnomo.aji@mail.ugm.ac.id](mailto:alief.purnomo.aji@mail.ugm.ac.id), [salima.nurrahma@mail.ugm.ac.id](mailto:salima.nurrahma@mail.ugm.ac.id),

**Abstract** – One type of motor that is often used in electronics, industry and other general fields is a direct current (DC) motor. The Proportional Integral Derivative (PID) control is a widely used method in various topic of researches. This controller is developed using a mathematical method and has characteristic values that are close to some real systems. Then, the research continued with mathematical analysis and simulation on a software. PID control systems are widely used in the industrial world due to their toughness in overcoming problems. However, there are some shortcomings in the PID control system such as the tuning method which is done by trial and error. In this experiment, the P, I and D gain selection procedure is carried out by analyzing the system model with the target is to produce a Settling Time. The system is made to obtain a settling time of (ts) 5% and a steady state error of 0.

**Keywords** : DC Motor, PID controller, mathematics model, second order system, settling time, error steady state, Matlab.

**Intisari** – Salah satu jenis motor yang sering digunakan pada bidang elektronika, industry dan bidang umum lainnya yaitu Motor arus searah (DC). Pengembangan pengendalian *Proportional Integral Derivative* (PID) merupakan bidang yang banyak dijadikan penelitian. Pengendali ini dikembangkan menggunakan metode matematis dan memiliki nilai karakteristik yang mendekati beberapa system nyata. Kemudian penelitian dilanjutkan dengan analisis secara matematis dan simulasi pada sebuah perangkat lunak. Sistem kendali PID banyak digunakan pada dunia industry disebabkan kketangguhannya dalam mengatasi permasalahan. Akan tetapi, terdapat beberapa kekurangan pada system kendali PID seperti metode penalaan yang dilakukan dengan cara *trial and error*. Pada percobaan dan penelitian kali ini menggunakan prosedur pemilihan gain P,I dan D yang dilakukan dengan menganalisa model system. Sistem kendali ini diolah untuk menghasilkan Setting Time Sistem dibuat agar memperoleh *settling time* sebesar (ts) 5% dan *error steady state* adalah 0.

**Kata kunci** : Motor arus searah (DC), Kendali PID, Model Matematika, Sistem orde 2, *Settling time*, *error steady state*, Matlab.

## I. PENDAHULUAN

Pada perkembangan teknologi yang sangat pesat terjadi saat ini terdapat salah satu hal yang mendukung hal ini yaitu Motor arus searah (DC) hal ini dikarenakan Motor DC merupakan jenis motor yang mudah dikendalikan sehingga motor ini menjadi pilihan para pengguna untuk diterapkan di beberapa aplikasi yang memerlukan pengaturan kecepatan motor. Motor jenis ini merupakan motor yang memiliki kecepatan, arah putar, dan laju yang dapat diatur dengan mudah sesuai dengan kebutuhan [1]. Contoh penerapan motor DC yaitu perlintasan palang pintu kereta api. Pada peratalan ini motor DC berperan penting untuk membuka dan menutup perlintasan palang pintu kereta api dan mengendalikannya. Maka dari itu pengendalian motor DC menjadi hal penting dalam sistem perlintasan kereta api ataupun pada penerapan lainnya. Pada penelitian ini juga dipelajari cara pengendalian posisi dan pengaturan motor DC.

Penelitian pengaturan kecepatan motor DC telah banyak dilakukan. Pengaturan kecepatan pada motor DC menjadi tahapan langkah penting dalam penggunaan motor DC, akan tetapi hasil kecepatan putar motor DC mengalami penurunan dan tidak konstan diakibatkan dari pengaruh

pembebanan. Permasalahan ini dapat diatasi dengan perancangan sistem kontrol kecepatan agar system dapat berjalan sesuai dengan kecepatan yang diinginkan. Suatu system control sangat dibutuhkan untuk otomasi dan akurasi dalam sebuah proses[1]. Sistem kontrol juga bermanfaat untuk mempermudah suatu pekerjaan dalam segi efektivitas dan segi efisiensi. System control kecepatan motor DC yang baik yaitu sebuah kontroler yang bisa mengendalikan sebuah system dengan baik.

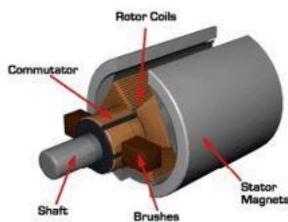
## II. DASAR TEORI

### A. Motor DC

Motor arus searah (DC) merupakan salah satu jenis motor listrik yang banyak digunakan dalam lingkungan industri, kehidupan sehari – hari hingga banyak juga digunakan pada piranti pendukung sistem instrumen elektronika. Dimana motor listrik merupakan suatu perangkat elektomagnetis yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik atau gerak. Motor DC juga diaplikasikan pada peralatan portabel seperti mesin cetak, tempat sampah otomatis dan lain – lain. Sumber masukan pada motor DC menggunakan daya listrik yaitu tegangan dan arus listrik dimana keluaran

dari motor DC berbentuk daya mekanik yaitu berupa torsi dan kecepatan rotor [2].

Karakteristik dari variabel – variabel yang berperan sebagai fungsi waktu pada kondisi transien dan kondisi tunaknya merupakan hal yang perlu diperhatikan selama pengendalian motor DC. Selain menggunakan daya listrik sebagai sumber motor DC juga menggunakan sumber jala – jala AC melalui sistem penyearah. Terdapat beberapa penyearah pada rangkaian elektronika, akan tetapi penyearah yang sering dan umum digunakan yaitu penyearah dioda sistem jembatan gelombang penuh. Suatu penyearah pasti memiliki karakteristik yang berbeda – beda dan karakteristik ini mempengaruhi tegangan masukan pada motor DC sehingga juga akan mempengaruhi bentuk gelombang arus yang dihasilkan dan hal ini juga mempengaruhi torsi dan kecepatan rotor [3]. Agar mengetahui hubungan antara variabel – variabel ini harus dianalisis terlebih dahulu hubungan antar variabel dengan cara membuat model parameter – parameter motor listrik seperti resistansi, induktansi, inersia serta gesekan dimana nilai ini semua bergantung pada dimensi beban dan motor.



Gambar 2.1 motor DC

Secara umum konstruksi pada motor DC meliputi:

#### 1. Stator

Bagian stator adalah bagian yang didalamnya terdapat magnet permanen dan dapat menghasilkan medan magnet untuk memutar rotor yang berada diantara kutub magnet. Jika berdasarkan gerak atau tidaknya, stator merupakan bagian motor yang diam pada motor DC. Jika stator diberi catu daya DC pada kumparan medan (*field windings*) maka akan menghasilkan medan magnet yang konstan. Oleh sebab itu stator pada sebuah motor DC dapat dikatakan penghasil medan magnet utama [4].

#### 2. Rotor

Bagian selanjutnya yaitu Rotor yang merupakan kebalikan dari stator. Dimana rotor merupakan bagian motor DC yang bergerak dan rotor terbentuk dari inti besi yang dililitkan kumparan [4]. Kumparan yang dimaksud yaitu kumparan jangkar saat GGL induksi pada motor dihasilkan. Pada bidang robotika, rotor digunakan untuk

menggerakkan roda yang terdapat pada sebuah robot dan membuat perputaran dan pergerakan robot pada lintasan berjalan dengan baik. Kecepatan putaran dari rotor tergantung dari sumber tegangan yang digunakan serta medan magnet yang dihasilkan. Jika sumber tegangan yang digunakan besar maka akan menghasilkan perputaran rotor yang semakin cepat karena hubungan antara keduanya berbanding lurus.

#### 3. Air gap/celah udara

*Air gap* atau celah udara adalah suatu celah yang memisahkan antara bagian rotor dan bagian stator pada motor DC. Fungsi celah udara pada motor DC sangatlah penting agar motor dapat berputar. Jika tidak terdapat celah udara maka bagian rotor dan bagian stator akan bergesekan atau bersinggungan dan mengakibatkan perputaran tidak dapat dihasilkan [4].

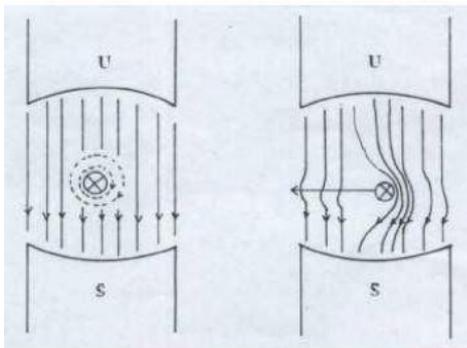
#### 4. Brushes

Selanjutnya bagian *Brushes* dimana bagian ini terlatak pada sisi komutator yang berfungsi untuk menyalurkan listrik ke motor [4]. Bahan pembuat *brushes* biasanya yaitu terbuat dari karbon, logam graphite yang merupakan campuran karbon dan grafit serta dilengkapi dengan pegas penekan dan kotak sikarnya. Bahan karbon yang digunakan untuk membuat *brushes* ini diharuskan memiliki nilai konduktivitas tinggi agar dapat mengurangi rugi – rugi listrik serta menghasilkan nilai koefisien gesekan yang rendah untuk mengurangi keausan.

### B. Prinsip Kerja Motor DC

Motor DC merupakan jenis transduser dimana motor ini dapat mengkonversi sebuah energi dari energi listrik menjadi energi mekanik. Pada medan magnet proses konversi ini terjadi. Prinsip kerja sederhana dari motor DC dimulai dari saat arus ( $I$ ) masuk melalui sebuah konduktor maka menghasilkan garis – garis gaya magnet yang disebut fluks [5]. Sebuah fluks memiliki arah yang mana arah ini bergantung pada arah arus yang mengalir atau bergantung pada letak terjadinya perbedaan nilai potensial tegangan yang dimiliki. Sehingga muncul hubungan arah arus dan arah medan magnet pada motor DC. Terdapat beberapa metode untuk mengetahui arah arus listrik dan medan magnet salah satunya dapat menggunakan kaidah tangan kanan maka arah dari variabel – variabel tersebut dapat diketahui.

Proses berputarnya motor DC diakibatkan karena terdapat dua medan magnet yang saling berinteraksi satu sama lain. Medan magnet yang utama yaitu medan magnet yang berada pada bagian stator dan medan magnet yang kedua merupakan medan magnet yang dihasilkan pada jangkar.



Gambar 2.2 Back/Counter Electromotive Force (GGL Lawan)

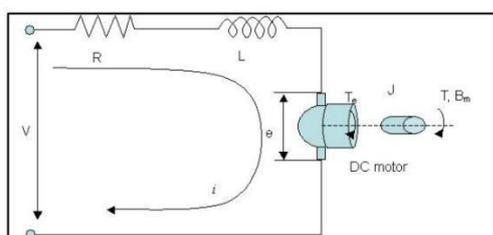
Gerakan motor DC sesuai dengan prinsip Faraday dimana saat motor telah bergerak atau berputar maka jangkar juga akan berputar di dalam medan magnet stator sehingga pada jangkar akan menghasilkan tegangan induksi. Hasil tegangan dari jangkar ini disebut sebagai GGL lawan dimana nilai ini akan mengurangi besar tegangan pada jangkar [1].

### III. PERSAMAAN

#### A. Model Matematika Motor DC[6]

Melalui pendekatan rangkaian secara ekuivalen dapat dibuat model matematika dari sebuah Motor DC. Model matematika motor DC dapat dihasilkan dari sebuah rangkaian ekuivalen yang menggunakan prinsip – prinsip hubungan elektromekanik serta hukum dasar dari rangkaian listrik [7]. Hasil persamaan atau model matematika yang telah dihasilkan dapat digunakan untuk menganalisa gerakan motor dan mempertimbangkan cara dalam perancangan teknik pengaturan yang akan digunakan.

Sebuah rangkaian ekuivalen motor DC sangat bergantung dari nilai – nilai variabel yang mempengaruhinya seperti nilai resistansi *armature* ( $R_a$ ), tegangan induktansi ( $E_a$ ) serta nilai induktansi dalam ( $L_a$ )[8]. Input yang digunakan pada motor DC berupa energi listrik karena motor DC merupakan jenis transduser sehingga terjadinya pengkonversian energi dari energi listrik akan terkonversi hingga menjadi energi gerak (mekanik) dalam bentuk nilai torsi ( $T$ ) serta nilai kecepatan putar ( $\omega_m$ ) yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.1 Rangkaian Ekuivalen Motor DC

Apabila terdapat motor DC yang memiliki nilai hambatan serta induktansi kumparan masing – masing R dan L yang berputar tanpa beban dengan kelembaman  $J = 0$  dan gesekan  $B_m = 0$  maka akan menghasilkan hubungan tegangan serta arus listrik pada rangkaian tertutup dapat dituliskan pada persamaan berikut:

$$V = e_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \tag{1}$$

Dimana:

- $V$  = Tegangan sumber (V)
- $e_a$  = Tegangan induksi (V)
- $R_a$  = Resistansi *armature* ( $\Omega$ )
- $i_a$  = Arus *armature* (A)
- $L_a$  = Induktansi *armature* (H)

$$e_a = k_1 \phi \frac{60}{2\pi} \omega(t) \tag{2}$$

Dengan

- $k_1$  = Konstanta dimensi motor
- $\phi$  = Fluks magnetis kutup motor (Wb)
- $\frac{60}{2\pi}$  = Putaran rotor (rpm)
- $\omega(t)$  = Kecepatan sudut rotor (rad/s)

Apabila nilai kutup motor adalah magnet permanen maka nilai  $\phi$  akan bernilai konstan maka menghasilkan persamaan 2 menjadi:

$$e_a = K \omega(t) \tag{3}$$

Konstanta *armature* dapat dicari menggunakan persamaan 4 dibawah ini:

$$K = k_1 \phi \frac{60}{2\pi} \omega(t) \tag{4}$$

Apabila nilai persamaan 3 disubstitusi dengan persamaan 1 maka akan menghasilkan sebuah persamaan seperti berikut:

$$V = R i_a + L \frac{di_a}{dt} + K \omega(t) \tag{5}$$

Hukum Newton merupakan salah satu hukum yang digunakan sebagai patokan pada struktur mekanik sebuah motor DC yang diperoleh dengan persamaan torsi dibawah ini:

$$\tau(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B \omega(t) = K i_a(t) \tag{6}$$

Keterangan:

- $J$  = Momen Inersia motor DC
- $B$  = Konstanta terdaman system mekanis (Nms)

Hasil persamaan 5 dan persamaan 6 dapat ditransformasikan dalam bentuk persamaan Laplace yang menggunakan asumsi kondisi awal yang digunakan sama dengan nol maka akan menghasilkan sebuah persamaan:

$$V = (R + sL)I_a(t) + K\omega(t) \quad (7)$$

Maka dari itu diperoleh nilai  $I_a$  sebagai berikut,

$$I_a(s) = \frac{V + K\omega(s)}{R + sL} \quad (8)$$

Dan

$$T(s) = (B + sJ)\omega(s) = KI_a(s) \quad (9)$$

Berdasarkan persamaan 8 maka diperoleh nilai kecepatan sudut  $\omega(s)$  sebagai berikut

$$\omega(s) = \frac{KI_a(s)}{B + sJ} \quad (10)$$

Persamaan 7 dan persamaan 8 maka akan dihasilkan fungsi alih antara masukan tenggangan (V) dan keluaran arus *armature* ( $I_a$ ) sebagai berikut:

$$\frac{I_a(s)}{V_s(s)} = \frac{Js + B}{(Js + B)(Ls + R) + K^2} \quad (11)$$

Jika pada kumparan medan terdapat arus medan konstan yang mengalir maka torsi motor akan memiliki nilai yang diperoleh dengan persamaan berikut:

$$T_m(s) = (K_1 K_f I_f) I_a(s) = K_m I_a(s) \quad (12)$$

Terdapat hubungan antara arus jangkar dengan tegangan input pada rangkaian jangkar yang sesuai dengan persamaan berikut:

$$V_a(s) = (R_a + L_a s) I_a(s) + V_b(s) \quad (13)$$

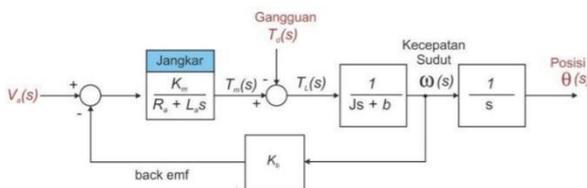
Nilai dari  $V_b(s)$  yang terdapat pada persamaan diatas merupakan nilai tegangan *back electromotive forse* (emf) yang mana nilainya sebanding dengan kecepatan motor sehingga persamaan dapat ditulis seperti berikut:

$$V_b(s) = K_b \omega(s) \quad (14)$$

Dengan arus jangkar

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_b \omega(s)}{R_a + L_a s} \quad (15)$$

Hubungan antara motor DC dengan pengendali jangkar dapat dituliskan secara skematis melalui diagram blok dibawah ini



Gambar 3.2 Blok Diagram Motor DC

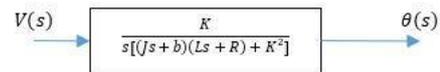
Berdasarkan diagram blok diatas maka akan dihasilkan fungsi alih motor DC sebagai berikut:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s[(Js + B)(Ls + R) + K^2]} \quad (16)$$

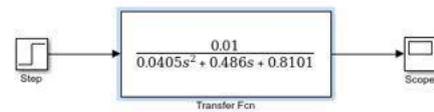
Parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah

- $J = 0.01 \text{ kg.m}^2$
- $B = 0.1 \text{ N.m.s}$
- $L = 4.05 \text{ H}$
- $R = 8.1 \Omega$
- $K = 0.01$

Terdapat diagram *blok loop* terbuka desain motor DC yang dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.4 Diagram *blok loop* terbuka TF

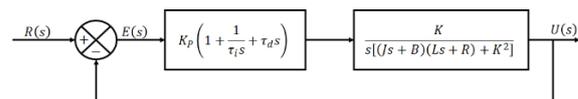


Gambar 3.5 Desain loop terbuka motor DC *Matlab*

Kedua diagram blok diatas merupakan salah satu contoh dari penggunaan rangkaian dengan persamaan *open loop*.

#### IV. PERANCANGAN KENDALI PID

Kendali PID merupakan kendali yang memiliki sifat proporsional, integral, dan *derivative* terhadap sinyal kesalahan. Blok diagram sistem dengan kendali PID ditampilkan pada Gambar 3, dimana input dari kendali PID merupakan besar kesalahan antara output terhadap *input* sistem.



Dengan menentukan nilai penguatan  $K_p$ , waktu integral  $\tau_i$ , dan waktu differensial  $\tau_d$  yang tepat diharapkan respon sistem orde 2 dapat sesuai dengan yang diharapkan. Persamaan kendali PID adalah sesuai dengan Persamaan 17

$$\frac{E(s)}{U(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (18)$$

Perancangan kendali PID pada penelitian ini menggunakan analisa model matematika sistem. Pada persamaan 16, didapatkan model matematika sistem merupakan orde 2, dimana persamaan orde 2 dapat ditulis menjadi seperti Persamaan 18

$$G(s) = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + 2\xi \omega_n s + 1} \quad (18)$$

Apabila persamaan 16 dimasukkan ke dalam persamaan 18, maka akan didapatkan

$$\begin{aligned} K &= 0.0123 \\ \omega_n &= 4.5 \\ \xi &= 0.0667 \end{aligned} \tag{19}$$

Sehingga untuk mendapatkan nilai  $\tau_i$  dan  $\tau_d$ , dilakukan dengan memasukkan nilai *settling time* yang diharapkan. Pada penelitian ini, dibuat agar nilai  $t_s = 5\%$ , sehingga

$$\begin{aligned} t_s(5\%) &= 3\tau^* \approx 5 \text{ detik} \\ \tau^* &= \frac{5}{3} \text{ detik} = 1.67 \text{ detik} \end{aligned} \tag{19}$$

Waktu integral didapatkan dengan menggunakan persamaan 20

$$\tau_i = \frac{2\xi}{\omega_n} = \frac{2(0.0667)}{4.5} = 0.029 \tag{20}$$

Waktu *derivative* didapatkan dari persamaan 21

$$\tau_d = \frac{1}{2\xi\omega_n} = \frac{1}{2(0.0667)(4.5)} = 1.665 \tag{21}$$

Konstanta proporsional atau  $K_p$  dapat diketahui dari persamaan 22

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{2\xi}{\tau^*\omega_n K} \\ &= \frac{2(0.0667)}{\left(\frac{5}{3}\right)(4.5)(0.0123)} = 1.449 \end{aligned} \tag{22}$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Respon suatu sistem kontrol selalu menunjukkan osilasi teredam sebelum mencapai *steady-state*. Dalam perancangan sistem kendali PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter P, I atau D agar tanggapan sinyal keluaran sistem terhadap masukan tertentu sebagaimana yang diinginkan.

Diagram blok loop tertutup dengan adanya sistem kontroler PID dapat dibuat menggunakan aplikasi software matlab seperti pada gambar dibawah ini.



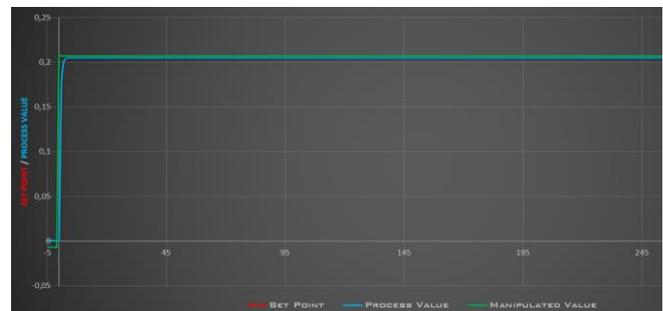
Gambar 4.1 Diagram blok loop tertutup pengontrol PID dengan *Matlab*

Parameter PID

Sistem motor DC yang baik mampu menunjukkan perpindahan poros motor yang sangat tepat. Permintaan performansi yang lain yaitu motor mampu mencapai keadaan putaran akhir yang sangat cepat. Dalam hal ini, waktu penetapan (*settling time*) kurang dari 2 detik dan

overshoot kurang dari 5% dan pada keadaan *steady state* eror kurang dari 1%.

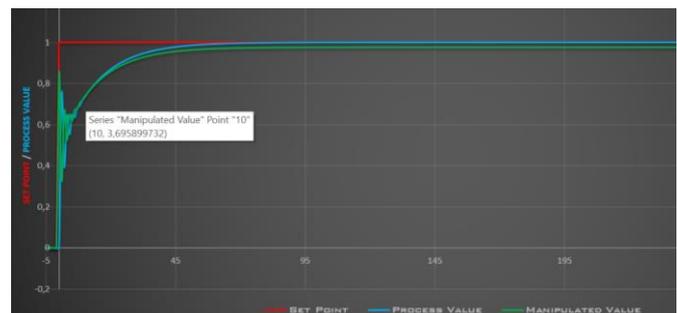
Fungsi alih yang dimasukkan dalam matlab dengan mendefinisikan numerator dan denumerator sebagai vektor dan parameter step final value 1, maka diperoleh respon step loop terbuka sebagaimana gambar dibawah ini.



Gambar 4.2 Respon Transien Loop terbuka motor DC

Nilai set point yang diberikan adalah 1. Didapatkan bahwa, respon motor DC tidak dapat mencapai nilai set point. Pada Gambar 4.2 terlihat jika respon sistem hanya mencapai nilai 0.2, sehingga diperlukan sebuah pengendali agar respon sistem dapat mencapai *set point* yang diharapkan.

Simulasi PID



Gambar 4.3 Hasil simulasi PID

Berdasarkan perhitungan dari Persamaan 19 – 22, maka didapatkan hasil *closed loop* pengendalian motor DC seperti pada Gambar 4.3. Terdapat osilasi sebelum respon mencapai *set point*. Osilasi terjadi selama 3.5 detik. Respon sistem mencapai set point pada 4.5 detik.

V. KESIMPULAN

Agar dapat memahami proses kerja suatu sistem pengendalian listrik dapat dilakukan metode simulasi pada sebuah perangkat lunak. Pada penelitian ini simulasi Pengendalian motor DC dilakukan menggunakan software *Matlab Simulink*. Dengan mengembangkan persamaan - persamaan matematis dasar serta hubungan elektromekanis yang dapat mengatur pengendalian motor maka model sistem pengendalian motor DC dapat dihasilkan dan digunakan pada software simulasi.

Beberapa persamaan dasar yang ada itu dapat diturunkan dari sebuah rangkaian ekuivalen mesin menggunakan

hukum – hukum dasar rangkaian listrik yang sudah ada. Dari persamaan – persamaan yang telah disubstitusikan satu sama lain hingga menjadi persamaan yang baku maka dapat dilanjutkan dengan membuat diagram blok dari persamaan tersebut. Diagram blok ini dibuat menggunakan Simulink sebagai representasi dari sebuah komponen sistem pengendalian motor DC.

Terdapat banyak metode dan model pengendalian atau pengaturan yang dapat dikembangkan dan digunakan untuk mempelajari penggunaan teknik – teknik pengaturan lain pada sistem kemudi motor DC. Dengan mensimulasikan ini pada blok diagram PID yang digunakan dalam sistem di atas dapat diganti dengan menggunakan blok teknik pengaturan lainnya sehingga akan menghasilkan pengaturan motor DC dengan teknik berbeda.

Desain diagram PID yang dibuat menggunakan aplikasi software matlab. Memiliki momen inersia, konstanta gesekan, resistensi kumparan, dan induktansi kumparan sebesar 0.01 kgm<sup>2</sup>, 0.1 Nms, 8.1 ohm, dan 4.05 H menghasilkan nilai *rise time* fungsi alih, *overshoot*, dan amplitudo sebesar 1.094 s, 0.502%, dan 0.01193. Dengan dilakukan desain pengendali motor DC dengan *block loop* tertutup pengontrol PID dapat mengurangi nilai *rise time* pada fungsi alih rancangan. Penggunaan kecepatan 13 rad/s pada kontroler PID dengan nilai *settling time* 0.68 s dan *overshoot* 3.02% memiliki nilai *rise time* terendah sebesar 136.893 ms.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. N. Yuski, W. Hadi, and A. Saleh, “Rancang Bangun Jangkar Motor DC (The Rotor of DC Motor Design),” *Berk. Sainstek*, vol. 5, no. 2, pp. 98–103, 2017.
- [2] M. A. Habibi and H. Purnomo, “Kajian Penggunaan Motor Listrik DC Sebagai Penggerak Speedboat,” *J. Mhs. Tek. Elektro Univ. Brawijaya*, no. 167, pp. 1–7, 2014.
- [3] R. Harahap and S. Nofriadi, “Analisa Perbandingan Efisiensi Dan Torsi Dengan Menggunakan Metode Penyadapan Sejajar Terhadap Metode Pergeseran Sikat Pada Motor Arus Searah Kompon Pendek Dengan Kutub Bantu,” *J. Electr. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 105–111, 2019.
- [4] A. Wahid Ibrahim, T. Wahyu Widodo, and T. Wahyu Supardi, “Sistem Kontrol Torsi pada Motor DC,” *IJEIS (Indonesian J. Electron. Instrum. Syst.)*, vol. 6, no. 1, p. 93, 2016, doi: 10.22146/ijeis.10775.
- [5] E. F. Schmidt, P. H. O. Martins, M. L. C. De Oliveira, and A. Trofino, “Control Engineering Practice Radio-frequency positioning for airborne wind energy systems,” *Control Eng. Pract.*, vol. 111, no. March, p. 104803, 2021, doi: 10.1016/j.conengprac.2021.104803.
- [6] Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering 5th Edition*. New York: Prentice Hall.
- [7] Rosalina, I. Qosim, and M. Mujirudin, “Analisis Pengaturan Kecepatan Motor DC Menggunakan Kontrol PID ( Proportional Integral Derivative ),” *Semin. Nas. TEKNOKA*, vol. 2, no. 2502–8782, pp. 89–94, 2017.
- [8] M. Pengaturan, K. Motor, and D. C. Dengan, “Modeling Pengaturan Kecepatan Motor Dc Dengan Simulink,” *Maj. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 25–29, 2012, doi: 10.24843/10.24843/MITE.
- [9] D. Sugiono, “Model Matematik Motor DC,” 2014.
- [10] I. Husnaini, “Sistem Kontrol Optimal Pada Kontrol Posisi Motor Dc,” no. March, 2019, doi: 10.31227/osf.io/8c3ts.