

# Analisis dan Simulasi Respon Sistem Motor Brushless DC-Servomotors tipe 1226 012 B Orde 1 Menggunakan MATLAB

Ananda Ismul Azam<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

## ABSTRAK

Penelitian ini membahas tentang analisis dan simulasi respon sistem orde satu *open loop* dan *close loop* pada Brushless DC-Servomotors tipe 1226 012 B menggunakan software MATLAB. Pengendalian motor Brushless DC (BLDC) menghadapi tantangan dalam memastikan respon sistem yang cepat, stabil, dan presisi, khususnya pada aplikasi yang menuntut akurasi tinggi seperti sistem servomotor. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mensimulasikan respon sistem orde satu dari motor BLDC tipe 1226 012 B dalam konfigurasi *open loop* dan *close loop*, sebagai dasar evaluasi kinerja dinamisnya. Tentunya untuk mencapai tujuan tersebut dibutuhkan pengembangan model matematis sederhana berbasis fungsi transfer orde satu serta implementasinya dalam simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB. Model ini disusun berdasarkan parameter motor yang diperoleh dari datasheet dan divalidasi melalui pendekatan simulatif. Metodologi yang diterapkan mencakup identifikasi parameter utama motor, perhitungan model matematis untuk mencari fungsi transfer, pemodelan sistem dalam MATLAB/Simulink, serta simulasi respon sistem terhadap masukan unit step. Analisis dilakukan terhadap dua skenario sistem, yaitu tanpa kendali umpan balik (*open loop*) dan dengan kendali umpan balik proporsional (*close loop*) sehingga nantinya akan menunjukkan bahwa sistem *close loop* menghasilkan respon yang lebih baik dibandingkan *open loop*, dengan waktu tunak lebih singkat, overshoot lebih kecil, serta kestabilan sistem yang meningkat seiring penyesuaian nilai penguatan. Digunakan model orde satu dikarenakan bahwa model orde satu cukup representatif untuk menggambarkan karakteristik dinamis awal dari motor BLDC. Selain itu, penerapan sistem *open loop* dan *close loop* sederhana terbukti efektif dalam meningkatkan performa sistem sehingga dapat digunakan sebagai pijakan dalam pengembangan sistem kontrol lanjutan pada motor BLDC, seperti kontrol PID.

## RIWAYAT MAKALAH

Diterima: Tanggal, Bulan, Tahun

Direvisi: Tanggal, Bulan, Tahun

Disetujui: Tanggal, Bulan, Tahun

## KATA KUNCI

Brushless DC;

Fungsi transfer;

Simulasi MATLAB;

*Open loop*;

*Close loop*.

## KONTAK:

[anandaismul@student.pps.ac.id](mailto:anandaismul@student.pps.ac.id)

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri yang semakin maju tidak terlepas dari penggunaan motor direct current tanpa sikat (*brush*) untuk menghasilkan putaran pada rotor atau biasa disebut sebagai Motor BLDC. Meskipun demikian, sebagai gantinya motor BLDC menggunakan kontrol elektronik untuk mengatur arus listrik yang masuk ke kumparan stator, sehingga menghasilkan perputaran rotor yang dikontrol secara presisi. Dilihat dari segi medan putarnya dan kecepatan tetap motor BLDC ini, mesin yang digunakan umumnya jauh lebih sesuai untuk keperluan yang kecepatannya dapat diatur dibandingkan dengan mesin-mesin ac. Alasannya dikarenakan kecepatan kerja motor BLDC mudah diatur dalam suatu

rentang kecepatan yang lebar meskipun menggunakan banyak metode yang digunakan.

Brushless DC (BLDC) servomotor merupakan jenis motor listrik yang banyak digunakan pada aplikasi industri untuk mengontrol kecepatan dan posisi secara presisi. Namun, dalam pengoperasiannya sering ditemukan masalah terkait ketidakstabilan respon sistem serta kesulitan dalam mengoptimalkan performa motor, terutama pada sistem kendali *open loop* yang kurang mampu mengatasi perubahan beban dan gangguan secara efektif [1][2]. Oleh karena itu, studi untuk memahami karakteristik dan respon dinamis dari BLDC servomotor pada konfigurasi *open loop* dan *close loop*

sangat penting dilakukan guna meningkatkan kinerja kendali motor tersebut.

Berbagai metode terkini yang digunakan dalam kendali motor DC, seperti kendali PID, LQR, dan sistem servo tipe 1, telah terbukti mampu memperbaiki performa sistem kendali motor DC secara signifikan melalui penyesuaian parameter dan identifikasi model sistem yang akurat [3]. Namun, pemilihan metode kontrol yang tepat masih menjadi tantangan, terutama dalam hal tuning parameter dan penerapan pada motor BLDC dengan tipe dan karakteristik tertentu, seperti tipe 1226 012 B.

Kesenjangan dalam penelitian saat ini terletak pada minimnya kajian yang secara spesifik membandingkan performa dan respon sistem orde satu BLDC servomotor tipe 1226 012 B antara konfigurasi *open loop* dan *close loop* secara komprehensif menggunakan simulasi Matlab. Penelitian terdahulu cenderung fokus pada motor DC secara umum atau pada motor BLDC tipe lain dengan pendekatan kontrol yang berbeda tanpa mengeksplorasi secara mendalam karakteristik transfer fungsi orde satu dan dampaknya terhadap respons sistem pengendalian [2].

Untuk mengatasi kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan metode analisis dan simulasi transfer fungsi orde satu baik pada *open loop* maupun *close loop* BLDC servomotor tipe 1226 012 B menggunakan Matlab sebagai platform simulasi. Dengan pendekatan ini, respons sistem terhadap input kontrol akan dianalisis secara kuantitatif termasuk parameter *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *steady state error*, sehingga dapat disimpulkan efektivitas kendali dan karakteristik dinamis motor.

Kontribusi utama dalam penelitian ini berdasar pada beberapa aspek penting yaitu yang pertama, pengembangan model transfer fungsi orde satu yang spesifik untuk motor BLDC tipe 1226 012 B memberikan manfaat signifikan dalam memahami karakteristik dinamis motor dengan lebih tepat. Model ini memfasilitasi analisis sistem kendali yang lebih akurat karena merefleksikan respons nyata motor pada kondisi operasi yang berbeda. Studi serupa menunjukkan bahwa model yang tepat sangat menentukan keberhasilan simulasi dan pengendalian motor BLDC secara optimal, seperti pada penelitian yang memanfaatkan Simulink MATLAB untuk merancang dan memvalidasi sistem BLDC [4].

Kedua, simulasi yang komprehensif menggunakan Matlab memungkinkan visualisasi respons sistem terhadap berbagai variasi input, yang meliputi kecepatan, torsi, dan parameter kendali. Dengan simulasi ini, pengujian dan evaluasi performa motor dapat dilakukan secara efektif sebelum implementasi riil. Penelitian sebelumnya juga menekankan pentingnya simulasi berbasis Matlab dalam mendesain kontroler PID untuk BLDC guna meminimalkan error dan meningkatkan stabilitas sistem [5]. Simulasi ini dapat mencakup pengujian performa sistem *open loop* dan *close loop* sehingga mempermudah analisis perbandingan.

Ketiga, perbandingan langsung antara sistem *open loop* dan *close loop* menjadi kontribusi krusial dalam penelitian ini. Sistem kendali *close loop*, dengan *feedback* yang akurat, biasanya menunjukkan keunggulan dari segi stabilitas, presisi, dan kemampuan adaptasi terhadap beban variatif dibandingkan *open loop*. Penelitian yang menguji berbagai teknik kendali BLDC menegaskan bahwa *close loop control* mampu menjaga kestabilan kecepatan motor bahkan saat terjadi gangguan beban atau perubahan parameter sistem [6].

Keempat, hasil simulasi dan analisis yang diperoleh diharapkan memberikan rekomendasi teknis yang aplikatif untuk pengembangan strategi kontrol motor BLDC dalam industri. Rekomendasi ini didasarkan pada data kuantitatif yang valid dari simulasi Matlab, sehingga dapat mengoptimalkan kinerja sistem kendali motor secara nyata. Dalam konteks aplikasi industri, pengembangan kontrol berkelanjutan berbasis simulasi telah terbukti membantu meningkatkan efisiensi dan daya tahan motor BLDC, seperti yang disampaikan dalam sejumlah studi terkait kontrol adaptif dan fuzzy logic pada BLDC.

Struktur artikel ini mencakup beberapa bagian yang Bagian II membahas dataset yang digunakan, metode yang diusulkan, serta pengumpulan dan pengolahan data. Bagian III menyajikan hasil simulasi respon step orde pertama dan pada saat digunakan *system open loop* dan *close loop*. Bagian IV mendiskusikan interpretasi dan perbandingan hasil dengan penelitian-penelitian sebelumnya serta keterbatasan. Bagian V berisi kesimpulan yang merangkum tujuan, temuan utama, dan penelitian lanjutan.

Dengan demikian, inti penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai perilaku dinamis BLDC servomotor tipe 1226 012 B pada sistem kendali *open loop* dan *close loop*, sekaligus memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan strategi kontrol optimal dalam aplikasi industri. Melalui simulasi yang terperinci menggunakan Matlab, diharapkan permasalahan kendali motor dapat teratasi dengan solusi yang tepat dan efisien.

## 2. METODE PENELITIAN

Pada bab ini, membahas tentang beberapa tahap perencanaan dalam mensimulasikan respon sistem orde pertama *open loop* dan *close loop* Brushless DC-Servomotors type 1226 012 B.

### A. Dataset

Melibatkan identifikasi parameter-parameter motor yang diperlukan untuk menjadi dasar dalam menyusun model matematis yang akurat sehingga dapat digunakan untuk mendapatkan fungsi transfer orde pertama. Untuk memperoleh fungsi transfer, terlebih dahulu menentukan parameter dari lembar datasheet motor yang selanjutnya akan digunakan untuk model matematika motor.

Series 1226 ... 8		1226.5	012.8	012.8	012.8
1	Nominal voltage	12	12	12	V
2	Terminal resistance, phase-phase	2.2	5.45	18.1	$\Omega$
3	Efficiency, max.	71	72	72	%
4	No-load speed	21 000	27 400	29 700	min <sup>-1</sup>
5	No-load current, typ. (with shaft ø 1.2 mm)	0.07	0.054	0.031	A
6	Stall torque	0.073	0.073	0.073	mNm
7	Friction torque, static	0.073	0.073	0.073	mNm
8	Friction torque, dynamic	5.3 × 10 <sup>-4</sup>	5.3 × 10 <sup>-4</sup>	5.3 × 10 <sup>-4</sup>	mNm/min <sup>-1</sup>
9	Speed constant	3 563	2 318	1 237	min <sup>-1</sup> /V
10	Back-EMF constant	0.281	0.431	0.808	mV/min <sup>-1</sup>
11	Torque constant	2.68	4.12	7.72	mNm/A
12	Current constant	0.373	0.243	0.13	A/mNm
13	Slope of n-t curve	2 925	3 066	2 902	min <sup>-1</sup> /Nm
14	Terminal inductance, phase-phase	36	85	307	$\mu$ H
15	Mechanical time constant	4.4	4.7	4.6	ms
16	Rotor inertia	0.15	0.15	0.15	gm <sup>2</sup>
17	Angular acceleration	499	621	677	10 <sup>3</sup> rad/s <sup>2</sup>
18	Thermal resistance	R <sub>th</sub> /R <sub>ec</sub>	3.3 / 36.6		K/W
19	Thermal time constant	T <sub>th</sub> /T <sub>ec</sub>	3.2 / 207		s
20	Operating temperature range:				
	– winding, max. permissible		-20 ... +100		°C
21	Shaft bearings		ball bearings, preloaded		
22	Shaft load max.:				
	– with shaft diameter		1.2		mm
	– radial at 10 000 min <sup>-1</sup> (4 mm from mounting flange)		5		N
	– axial at 10 000 min <sup>-1</sup> (push only)		2.5		N
	– axial at standstill (push only)		11		N
23	Shaft play:				
	– radial		0.012		mm
	– axial		0		mm
24	Housing material		aluminium, black anodized		
25	Mass		13		g
26	Direction of rotation		electronically reversible		
27	Speed up to		79 000		min <sup>-1</sup>
28	Number of pole pairs		1		
29	Hall sensors		digital		
30	Magnet material		NdFeB		
Rated values for continuous operation					
31	Rated torque	M <sub>N</sub>	2.13	1.97	1.99
32	Rated current (thermal limit)	I <sub>N</sub>	0.932	0.573	0.311
33	Rated speed	n <sub>N</sub>	12 480	19 670	22 140

**Gambar 1. Datasheet Brushless DC-Servomotors type 1226 012 B**

Setelah mengkaji datasheet motor tersebut pada Gambar 1., didapatkan beberapa parameter yang digunakan dalam mendapatkan model matematis motor untuk simulasi respon sistem orde pertama.

**Tabel 1. Parameter motor**

Variabel	Unit	Nilai
Tegangan nominal	V	12
Resistansi	$\Omega$	5,45
Arus	A	0,054
Induktansi	mH	85
Inersia	Kg.m <sup>2</sup>	1,5 × 10 <sup>-8</sup>
Rated torque	Nm	0,0197
Torque constant	mNm/A	4,12
Back emf	mV sec/rad	0,431
Kecepatan	rpm	2318
Gesekan viskus	Nms/rad	9,17 × 10 <sup>-7</sup>

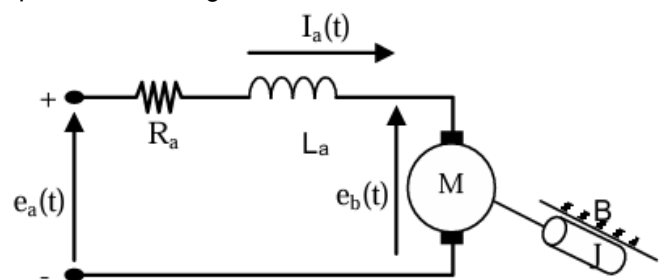
## B. Pengumpulan Data

Dalam menganalisis dan mensimulasikan respon sistem orde satu dari Brushless DC (BLDC) Servomotor tipe 1226 012 B, berbagai parameter fisik dan elektrik dari motor berdasarkan Tabel 1. menjadi komponen penting dalam perumusan model matematis. Tegangan nominal (12 V) merupakan batas kerja tegangan optimal motor, dan digunakan sebagai dasar untuk memberi masukan (*input*) dalam simulasi. Tegangan ini menentukan kondisi nominal di mana motor dioperasikan untuk memperoleh

performa sesuai spesifikasi. Resistansi (5,45  $\Omega$ ) dan induktansi (85 mH) adalah parameter kelistrikan dari lilitan motor yang mempengaruhi karakteristik dinamis arus dan tegangan pada motor. Resistansi berperan dalam menentukan rugi-rugi daya dan torsi awal, sementara induktansi berperan dalam menentukan laju perubahan arus terhadap waktu, khususnya penting dalam transien. Arus nominal (0,054 A) digunakan sebagai acuan dalam menentukan besar torsi keluaran motor, serta sebagai batas operasi arus dalam simulasi. Inersia (1,5 × 10<sup>-8</sup> Kg.m<sup>2</sup>) menggambarkan besarnya momen kelembaman rotor terhadap percepatan sudut. Nilai ini sangat penting dalam menentukan dinamika akselerasi motor, dan berperan dalam konstanta waktu mekanis sistem. *Rated torque* (0,0197 Nm) adalah nilai torsi maksimum yang dapat dihasilkan motor pada kondisi nominal dan digunakan untuk menghitung batas keluaran sistem. Selanjutnya, *Torque constant* (4,12 mNm/A) dan *Back emf constant* (0,431 mV.s/rad) merupakan parameter elektromekanis yang penting untuk membentuk hubungan antara arus, torsi, dan kecepatan putar. *Torque constant* digunakan untuk mengkonversi arus menjadi torsi, sedangkan *back emf constant* menghubungkan kecepatan putar motor dengan tegangan balik yang timbul, yang sangat krusial dalam pemodelan matematis fungsi transfer [7]. Terakhir, kecepatan nominal (2318 rpm) memberikan informasi tentang performa *steady state* motor dan menjadi referensi dalam menentukan waktu tunak serta respons sistem terhadap masukan. Keseluruhan parameter ini digunakan dalam membentuk fungsi transfer orde satu yang merepresentasikan dinamika sistem motor, yang kemudian dianalisis baik dalam kondisi *open loop* maupun *close loop* menggunakan MATLAB/Simulink.

## C. Pengolahan Data

Setelah mendapatkan beberapa parameter yang diperlukan pada sub bab sebelumnya, selanjutnya memodelkannya secara matematis dalam domain waktu dengan melalui dua bagian yaitu pada bagian elektrik dan mekaniknya. Model matematis kedua bagian tersebut, diperoleh dari rangkaian ekuivalen motor DC.



**Gambar 2. Rangkaian ekuivalen motor DC [8]**

Dimana :

$e_a(t)$  = Tegangan Input

$R_a$  = Resistansi

$I_a(t)$  = Arus

$L_a$  = Induktansi

$e_b(t)$  = Back emf

$J$  = Momen inersia

Dari model fisik pada Gambar 2. diatas, dapat diimplementasikan menjadi model matematisnya dalam domain waktu [9].

Bagian Elektrik :

$$e_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (1)$$

atau

$$V(t) = R \cdot I(t) + L_a \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (2)$$

Dalam konteks model matematis motor DC, Persamaan (1) menyatakan bahwa tegangan masukan  $e_a(t)$  pada armatur motor terdiri dari tiga komponen utama yaitu: penurunan tegangan akibat resistansi  $R_a \cdot I_a(t)$  (3), penurunan tegangan akibat induktansi  $L_a \frac{di_a(t)}{dt}$  (4), dan tegangan balik  $e_b(t)$  yang dihasilkan oleh pergerakan rotor. Persamaan ini bisa ditulis ulang dalam bentuk yang lebih umum seperti pada Persamaan (2), di mana  $V(t)$  mewakili tegangan total,  $R \cdot I(t)$  adalah penurunan tegangan resistif,  $L_a \frac{di(t)}{dt}$  (5) adalah komponen induktif, dan  $e(t)$  adalah tegangan balik.

Bagian Mekanik :

$$J \left( \frac{d\omega(t)}{dt} \right) + B\omega(t) = T(t) \quad (6)$$

$$T(t) = K_m I_a \quad (7)$$

Bagian mekanik motor dijelaskan melalui Persamaan (6) dan Persamaan (7). Persamaan (6) menunjukkan dinamika rotasi dari motor berdasarkan hukum Newton kedua, yaitu bahwa torsi total  $T(t)$  yang bekerja pada rotor digunakan untuk mengatasi inersia rotasi  $J \left( \frac{d\omega(t)}{dt} \right)$  (8) serta gaya gesekan viskosa  $B\omega(t)$ , dengan  $\omega(t)$  sebagai kecepatan sudut rotor. Selanjutnya, pada Persamaan (7), ditunjukkan bahwa torsi  $T(t)$  yang dihasilkan motor berbanding lurus dengan arus armature  $I_a$ , dengan konstanta proporsionalitas berupa  $K_m$ , yaitu konstanta torsi motor.

Transfer function orde 1 pada motor DC untuk kecepatan sudut terhadap tegangan input adalah :

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{ts+1} \quad (9)$$

Dimana,  $K$  merupakan Konstanta penguat sistem atau gain, menyatakan respon maksimum atau skala keluaran terhadap masukan setelah sistem mencapai kondisi tunak (*steady state*) [10]. Semakin besar  $K$ , semakin besar kecepatan akhir rotor untuk tegangan input tertentu. Sedangkan,  $t$  Merupakan konstanta waktu (*time constant*) dari sistem, menyatakan seberapa cepat sistem mencapai 63.2% dari respons akhirnya. Semakin kecil nilai  $t$ , semakin cepat motor merespons perubahan tegangan input. Dalam sistem fisik,  $t$  biasanya dipengaruhi oleh momen inersia dan friksi sistem.

### 3. HASIL

#### A. Akurasi

Untuk mencari fungsi transfer orde pertama, parameter nilai yang sudah diperoleh sebelumnya dimasukkan ke dalam rumus fungsi transfer pada Persamaan (9).

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{ts+1}$$

Sebelum itu, akan dicari terlebih dahulu konstanta penguat sistem ( $K$ ) dan konstanta waktunya ( $t$ ) yaitu sebagai berikut :

Menghitung gain atau penguatan sistem :

$$K = \frac{e_b}{K_m^2 + R_a B} \quad (10)$$

$$= \frac{0,000431}{(0,00412)^2 + 5,45 \cdot (9,17065 \times 10^{-7})}$$

$$= \frac{0,000431}{2,19724 \times 10^{-5}}$$

$$= 19,61$$

$$t = \frac{J R_a}{K_m^2 + R_a B} \quad (11)$$

$$= \frac{(1,5 \times 10^{-8})(5,45)}{(0,00412)^2 + 5,45 \cdot (9,17065 \times 10^{-7})}$$

$$= \frac{8,175 \times 10^{-8}}{2,19724 \times 10^{-5}}$$

$$= 0,0037s$$

Selanjutnya hasil dari kedua parameter tersebut dimasukkan pada Persamaan (9) sehingga didapat fungsi transfer orde pertama:

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{19,61}{0,0037s+1} \quad (12)$$

Setelah diketahui transfer fungsinya, untuk mendapatkan respon step orde 1 pada saat *open loop* dan *close loop* dapat menggunakan coding pada matlab seperti Gambar 3. dan Gambar 4.

7/18/25 2:17 PM MATLAB Command Window

```
>> % Parameter sistem
K = 19.61;           % Gain sistem (rad/s per volt)
tau = 0.0037;        % Konstanta waktu (detik)
V_in = 12;           % Tegangan input step (volt)

% Definisikan fungsi transfer sistem orde satu
s = tf('s');
G_open_loop = K / (tau*s + 1);

% Tampilkan fungsi transfer
disp('Fungsi Transfer Sistem Orde 1 (Open Loop):');
G_open_loop

% Plot respon sistem terhadap input step sebesar 12V
figure;
step(V_in * G_open_loop); % Step input dikalikan 12V
title('Respon Step Open-Loop Sistem Orde 1 dengan Input 12V');
xlabel('Waktu (detik)');
ylabel('Kecepatan \omega(t) [rad/s]');
grid on;

% Hitung parameter performa respon
info = stepinfo(G_open_loop);
disp('Parameter Respon Step (Input 12V):');
disp(info);
```

#### Gambar 3. Coding step response open loop

Coding pada Gambar 3. digunakan untuk mensimulasikan respon sistem orde satu *open loop* dari motor BLDC terhadap input step 12V. Fungsi transfer pada Persamaan (12) sistem dibentuk sebagai  $\frac{\Omega(s)}{V(s)}$



$\frac{19.61}{0.0037s+1}$ , lalu dikalikan dengan input 12V untuk menampilkan respon kecepatan rotor  $\omega(t)$  terhadap perubahan tegangan. Grafik respon ditampilkan dengan `step()`, dan performa sistem seperti waktu naik, waktu tunak, dan nilai akhir dihitung menggunakan `stepinfo()`. Tujuan utamanya adalah mengevaluasi karakteristik dinamis sistem tanpa kontrol umpan balik.

MATLAB Command Window

```
>> % Parameter sistem
K = 19.61;           % Gain sistem motor
tau = 0.0037;        % Konstanta waktu motor (detik)
Kp = 1;              % Penguatan kontroler proporsional
V_in = 12;           % Tegangan input (volt)

% Buat fungsi transfer motor (plant)
s = tf('s');
G_motor = K / (tau*s + 1);

% Fungsi transfer loop tertutup: T(s) = (Kp * G_motor) / (1 + Kp * G_motor)
G_closed_loop = feedback(Kp * G_motor, 1);

% Tampilkan fungsi transfer tertutup
disp('Fungsi Transfer Sistem Closed-Loop:');
G_closed_loop

% Simulasi respon step dengan input 12V
figure;
step(V_in * G_closed_loop);
title(['Respon Step Closed-Loop (Kp = ' num2str(Kp) ', Input = 12V)']);
xlabel('Waktu (detik)');
ylabel('Kecepatan \omega(t) [rad/s]');
grid on;

% Tampilkan parameter performa respon
info = stepinfo(V_in * G_closed_loop);
disp('Parameter Respon Step (Closed-Loop, Input 12V):');
disp(info);
```

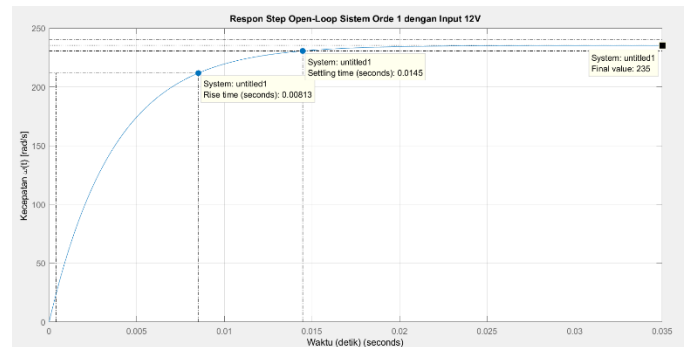
#### Gambar 4. Coding step response close loop

Sedangkan untuk yang *close loop*, fungsi transfer motor dibentuk, lalu dikendalikan menggunakan kontroler proporsional dengan gain  $K_p=1$ . Fungsi transfer tertutup dihitung dengan `feedback()`, dan respon sistem divisualisasikan menggunakan `step()`. Akhirnya, performa sistem seperti waktu naik dan waktu tunak dianalisis menggunakan `stepinfo()`. Tujuan utamanya adalah melihat bagaimana kontrol loop tertutup meningkatkan stabilitas dan kecepatan respon dibandingkan sistem *open loop*. Dari kedua coding tersebut akan menghasilkan respon step dengan *rise time*, *settling time* dan *steady state* yang berbeda.

#### B. Kinerja

Simulasi yang dihasilkan dari coding *open loop* bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana respon motor terhadap *input step* tanpa adanya sistem umpan balik (`feedback`) [11]. Pendekatan ini digunakan untuk mengamati karakteristik dasar sistem motor Brushless DC secara murni, seperti waktu naik (*rise time*), waktu tunak (*settling time*), dan kecepatan maksimum yang dicapai oleh motor ketika diberi masukan tegangan secara langsung. Dengan kondisi tanpa pengaruh kendali ini dapat diketahui sejauh mana sistem dapat merespon sinyal masukan berdasarkan parameter internal motor seperti konstanta waktu dan gain sistem. Selain itu, hasil dari simulasi ini memberikan dasar penting dalam membandingkan performa sistem saat dilakukan penambahan kendali umpan balik pada simulasi *close*

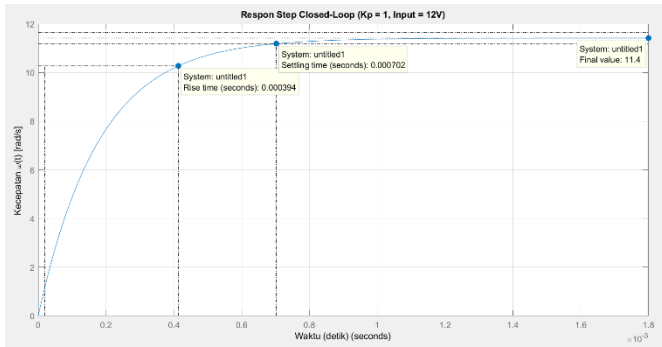
loop.



Gambar 5. Respon step open loop

Berdasarkan Gambar 5., Respon sistem *open loop* ketika menggunakan *input step* dengan nilai amplitud 12 menghasilkan *rise time* 0,0081 second, *Settling time* 0,0145 dan *steady state* sebesar 235. Nilai *steady state* pada sistem *open loop* dapat melebihi *setpoint* yang diinginkan karena tidak adanya mekanisme umpan balik untuk koreksi kesalahan, ketidakakuratan dalam kalibrasi atau model sistem, pengaruh gangguan eksternal dan variasi parameter, serta penguatan (*gain*) yang tidak tepat, tanpa umpan balik yang memungkinkan penyesuaian dan koreksi otomatis, sistem *open loop* tidak dapat memastikan bahwa output akan sesuai dengan *setpoint* yang diinginkan, sehingga menghasilkan nilai *steady state* yang melebihi *setpoint*.

Sedangkan simulasi *close loop* bertujuan meningkatkan performa sistem dengan menambahkan kontroler dan jalur umpan balik [11], sehingga sistem dapat merespon lebih stabil dan akurat terhadap gangguan atau perubahan *input*. Melalui mekanisme umpan balik, setiap deviasi antara *output* aktual dan nilai referensi dapat dideteksi secara *real-time* dan segera dikoreksi oleh sistem kendali [12]. Hal ini memungkinkan sistem untuk mempertahankan kestabilan bahkan saat terjadi perubahan beban atau gangguan eksternal, yang sering kali tidak dapat diantisipasi oleh sistem *open loop*. Selain itu, penggunaan kontroler seperti PID dalam skema *close loop* memperkuat kemampuan sistem mencapai tujuan dengan error yang minimal [13]. Parameter *rise time* dan *settling time* dapat dipersingkat secara signifikan, sedangkan *steady state error* dapat ditekan hingga mendekati nol. Studi yang membandingkan implementasi *open loop* dan *close loop* pada BLDC motor menunjukkan peningkatan performa signifikan kontroler *close loop* terbukti mampu meningkatkan efisiensi, mempercepat waktu respon, dan menjaga presisi posisi karena adanya penyesuaian otomatis terhadap kondisi dinamis sistem [14].



Gambar 6. Respon step close loop

Berdasarkan Gambar 6., Respon sistem *close loop* ketika menggunakan *input* step dengan amplitude 12, maka didapatkan nilai *rise time* 0,000394 *second*, *Settling time* 0,000702 *second*, dan *steady state* sebesar 11,4. Nilai *steady state* pada sistem *close loop* memiliki nilai *output* yang lebih kecil dibandingkan dengan set point, sistem *close loop* cenderung melakukan koreksi untuk membawa *output* kembali mendekati *setpoint* yang diinginkan. Hal ini bisa mengakibatkan nilai *output* pada *steady state* lebih rendah dari *setpoint* awal yang diinginkan.

Tabel 2. Perbandingan parameter pada sistem

Sistem	Parameter		
	Rise time	Settling time	Steady state
Open loop	0,0081	0,0145	235
Close loop	0,000394	0,000702	11,4

Berdasarkan Tabel 2., terlihat bahwa sistem *close loop* menunjukkan performa yang jauh lebih baik daripada sistem *open loop* dalam hal *rise time*, *settling time*, dan *steady state error*. *Rise time* pada sistem *close loop* adalah 0,000394 detik, jauh lebih cepat dibandingkan 0,0081 detik pada *open loop*. Ini menandakan respon awal motor pada *close loop* jauh lebih cepat sehingga pengendalian lebih responsif terhadap perubahan input. *Settling time* pada *close loop* juga lebih singkat, 0,000702 detik dibandingkan 0,0145 detik pada *open loop*, menunjukkan motor cepat mencapai kondisi stabil tanpa banyak osilasi atau ketidakstabilan.

Selain itu, *steady state error*, yang mencerminkan perbedaan antara nilai target dan *output* akhir motor, pada sistem *close loop* jauh lebih kecil, yaitu 11,4 dibandingkan 235 pada *open loop*. Hal ini berarti sistem *close loop* mampu mempertahankan *output* motor lebih akurat sesuai dengan referensi yang diinginkan, karena adanya umpan balik yang secara terus menerus mengoreksi kesalahan. Sebaliknya, *open loop* yang tanpa umpan balik tidak dapat menyesuaikan jika terjadi gangguan atau perubahan beban, sehingga *error* menjadi sangat besar.

#### 4. PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas lebih dalam perbandingan performa simulasi respon sistem *open loop* dan *close loop* berdasarkan hasil yang telah diperoleh sebelumnya. Analisis dilakukan terhadap tiga parameter utama sistem yaitu *rise time*, *settling time*, dan *steady state*, yang merepresentasikan respon dinamis dari motor BLDC terhadap sinyal masukan step.

Simulasi sistem *open loop* menunjukkan bahwa respon motor bersifat lebih lambat dan tidak stabil dalam mencapai nilai tunak [15]. Hal ini dibuktikan dengan nilai *rise time* sebesar 0,0081 detik dan *settling time* sebesar 0,0145 detik. Selain itu, sistem mengalami overshoot signifikan, dengan nilai *steady state* mencapai 235 rad/s, yang jauh melebihi *setpoint* teoritis untuk input 12V. Ketidaksesuaian ini menunjukkan bahwa sistem *open loop* tidak mampu melakukan koreksi kesalahan karena tidak adanya umpan balik.

Sebaliknya, sistem *close loop* dengan kontroler proporsional ( $K_p = 1$ ) menghasilkan respon yang jauh lebih cepat dan stabil. *Rise time* turun drastis menjadi 0,000394 detik dan *settling time* menjadi hanya 0,000702 detik. Walaupun *steady state* pada *close loop* hanya mencapai 11,4 rad/s lebih rendah dari nilai teoritis namun kesalahan ini jauh lebih kecil dibanding sistem *open loop*. Sistem *close loop* menunjukkan kestabilan yang jauh lebih baik terhadap gangguan masukan.

##### A. Klasifikator

Dalam konteks penelitian ini, pendekatan klasifikator digunakan untuk menilai performa sistem kontrol berdasarkan keberhasilannya mencapai target *output* yang diinginkan [16]. Sistem diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu stabil dan tidak stabil, berdasarkan nilai *error steady state* (ESS) terhadap referensi. Suatu sistem dikatakan stabil apabila *error steady state* nya berada dalam ambang toleransi  $\pm 10\%$  dari nilai *setpoint*, sedangkan sistem yang memiliki *error* lebih dari 10% dikategorikan sebagai tidak stabil [17] [18]. Ambang batas ini dipilih untuk memberikan ukuran objektif terhadap kualitas pengendalian sistem, khususnya dalam merespons *input* step sebesar 12V dengan ekspektasi nilai tunak 235,32 rad/s. Berdasarkan kriteria tersebut, sistem *open loop* menghasilkan nilai *steady state* sebesar 235 rad/s, yang secara nominal mendekati *setpoint*. Namun, karena tidak memiliki mekanisme koreksi, sistem ini rentan terhadap variasi beban atau gangguan dan tidak dapat menjamin kestabilan dalam skenario nyata. Oleh karena itu, meskipun secara nilai *steady state* tampak mendekati target, sistem *open loop* dikategorikan sebagai tidak stabil karena kurangnya kontrol adaptif. Sebaliknya, sistem *close loop* dengan kontroler proporsional ( $K_p = 1$ ) menghasilkan *output steady state* sebesar 11,4 rad/s, yang berada jauh di bawah target. Meskipun demikian, sistem ini mampu menstabilkan respon dengan cepat dan minim osilasi, serta memiliki waktu tunak dan waktu naik yang jauh lebih singkat. Karena adanya umpan balik yang menjaga kestabilan sistem, *close loop* tetap dikategorikan sebagai stabil.

## B. Matriks Kekeliruan

Untuk memperkuat analisis klasifikasi ini berdasarkan subbab sebelumnya, digunakan pendekatan konseptual matriks kekeliruan (*confusion matrix*) yang dapat disusun untuk menunjukkan akurasi sistem terhadap target setpoint dan untuk membandingkan prediksi sistem terhadap realisasi *output*. Diasumsikan sistem response pada Brushless DC-Servomotors type 1226 012 B diberikan target untuk mencapai *output* sesuai *input* misalnya  $12V = 235,32 \text{ rad/s}$ . Maka klasifikasi hasil simulasi terhadap target dapat dinilai sebagai berikut :

**Tabel 3. Klasifikasi hasil simulasi terhadap target**

Kategori	Target tercapai (positif)	Target tidak tercapai (negatif)
<i>Open loop</i>	<i>False positive</i>	<i>True negative</i>
<i>Close loop</i>	<i>True positive</i>	<i>False negative</i>

Dalam hal ini, sistem *close loop* yang berhasil mempertahankan stabilitas meskipun dengan *output* lebih rendah dikategorikan sebagai *true positive*, sedangkan sistem *open loop* yang tampak menghasilkan nilai *output* tinggi tetapi tidak dikendalikan dan tidak stabil dianggap sebagai *false positive*.

## 5. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil melakukan analisis dan simulasi respon sistem orde satu pada motor Brushless DC tipe 1226 012 B dalam konfigurasi *open loop* dan *close loop* menggunakan perangkat lunak matlab. Berdasarkan hasil simulasi, disimpulkan bahwa sistem *close loop* memberikan kinerja yang jauh lebih baik dibandingkan *open loop* dalam hal kecepatan respon, kestabilan, dan akurasi *output*. Hal ini melalui respon sistem *open loop* menunjukkan karakteristik yang lambat dan tidak stabil dengan nilai steady state yang melampaui setpoint akibat tidak adanya mekanisme umpan balik. Sebaliknya, sistem *close loop* dengan pengontrol proporsional mampu mempercepat waktu respon dan mengurangi *error steady state* secara signifikan, meskipun belum sepenuhnya menghilangkan kesalahan.

Dengan pendekatan klasifikasi sistem, *close loop* terbukti memberikan hasil yang lebih akurat dan stabil sesuai kriteria target *output*, seperti yang dibuktikan melalui evaluasi matriks kekeliruan sederhana yaitu sistem ini layak dijadikan dasar untuk pengembangan kontrol lanjutan seperti PI atau PID untuk menghilangkan *steady state error* sepenuhnya. Secara keseluruhan, model orde satu telah terbukti cukup representatif untuk menggambarkan dinamika awal motor DC. Simulasi respon sistem orde satu memberikan platform yang efektif dalam menguji dan mengevaluasi performa sistem kontrol sebelum diimplementasikan pada perangkat fisik.

## REFERENSI

1. A. Mulyadi, M. Z. Rois, B. S. Kaloko, R. F. Lestari, R. B. M. Gozali, and S. Prasetyono, "Analisis Efisiensi

Kinerja Motor BLDC Menggunakan Metode Kontrol Sliding Mode Observer PI," *J. Arus Elektro Indones.*, vol. 8, no. 3, p. 86, 2022, doi: 10.19184/jaei.v8i3.34998.

2. M. R. Firdaus, T. A. Berbudi, S. Nurrahma, G. Izzaulhaq, and I. Hudati, "Identifikasi Sistem Motor DC dan Penerapan Kendali PID, LQR, dan Servo Tipe 1 Berbasis Arduino-MATLAB," *J. List. Instrumentasi, dan Elektron. Terap.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–9, 2023, doi: 10.22146/juliet.v4i1.81918.
3. I. Hudati, A. P. Aji, and S. Nurrahma, "Kendali Posisi Motor DC dengan Menggunakan Kendali PID," *J. List. Instrumentasi dan Elektron. Terap.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–6, 2021, doi: 10.22146/juliet.v2i2.71148.
4. Satrio Wahyubramanto, S. Tobing, and Y. Adeatma Antonio, "Simulasi Kinerja Motor BLDC untuk Merancang Sistem Kelistrikan Mobil Hemat Energi Menggunakan Simulink," *J. Ilmu Komput. dan Agri-Informatika*, vol. 8, no. 1, pp. 31–41, 2021, doi: 10.29244/jika.8.1.31-41.
5. Nurizka Fitra Maula, Sofian Yahya, and Sofyan Muhammad Ilman, "Perancangan dan Simulasi Kendali Kecepatan Motor BLDC dengan Metode PID Menggunakan Teknik Tanpa Sensor Berbasis Simulink MatLab," *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 15, no. 1, pp. 461–465, 2024, doi: 10.35313/irwns.v15i1.6205.
6. R. Pradhana, A. A. Rahman, O. A. Qudsi, and I. Ferdiansyah, "Desain dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Dengan Metode FOC Menggunakan Fuzzy," *JTT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 11, no. 1, pp. 33–39, 2023, doi: 10.32487/jtt.v11i1.1524.
7. D. Kurasov, "Mathematical modeling system MatLab," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1691, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1691/1/012123.
8. Y. Arifin and A. Amir, "PEMODELAN DAN PENGENDALIAN MOTOR LISTRIK U.S ELECTRIC MOTORS TYPE DRIPPROOF 1750 RPM/40 HP/240 Volt," pp. 274–282, 2020.
9. Haj, Muhammad Izzul, Rama Arya Sobhita, and Anggara Trisna Nugraha. "Performance Analysis of DC Motor in SISO Circuit Using LQR Control Method: A Comparative Evaluation of Stability and Optimization." *ICCK Transactions on Power Electronics and Industrial Systems 1.1* (2025): 23-30.
10. Rohman, Yulian Fatkur, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Optimization of DC Motor Control System FL57BL02 Using Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT): Performance Analysis." *ICCK Transactions on Power Electronics and Industrial Systems 1.1* (2025): 15-22.
11. Haj, Muhammad Izzul, et al. "Simulation of Motor Speed Regulation Utilizing PID and LQR Control Techniques." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology 2.1* (2025): 41-49.
12. Nugraha, Anggara Trisna, Rama Arya Sobhita, and

**Penulis utama:** Ananda Ismul Azam, [anandaismul@student.ppn.ac.id](mailto:anandaismul@student.ppn.ac.id), Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia.

**DOI:** XXXX

**Hak Cipta** © 2025 oleh penulis. Diterbitkan oleh Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Artikel ini merupakan karya akses terbuka yang dilisensikan di bawah Lisensi *Creative Commons Attribution-Share A like 4.0 International License* (CC BY-SA 4.0).



- Akhmad Azhar Firdaus. "Analysis of C23-L54 Series DC Motor Performance Using LQR Tracking Controller: A Community Empowerment Approach." *Emerging Trends in Industrial Electronics* 1.1 (2025): 1-8.
13. Eviningsih, Rachma Prilian, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Circuits on DC Motor BN12 Control." *Sustainable Energy Control and Optimization* 1.1 (2025): 10-19.
  14. Nugraha, Anggara Trisna, et al. "System Optimization Using LQR and LQT Methods on 42D29Y401 DC Motor." *SAINSTECH NUSANTARA* 2.2 (2025): 14-25.
  15. Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Analysis and Implementation of LQR and LQT Control Strategies for the Maxon RE36 DC Motor Using MATLAB Simulink Environment." *SAINSTECH NUSANTARA* 2.2 (2025): 1-13.
  16. Sobhita, Rama Arya, Anggara Trisna Nugraha, and Mukhammad Jamaludin. "Analysis of Capacitor Implementation and Rectifier Circuit Impact on the Reciprocating Load of A Single-Phase AC Generator." *Sustainable Energy Control and Optimization* 1.1 (2025): 1-9.
  17. Eviningsih, Rachma Prilian, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "DC Motor A-max 108828 and Noise using LQR and LQT Methods." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 29-38.
  18. Nugraha, Anggara Trisna, and Rama Arya Sobhita. "Analysis of the Characteristics of the LQR Control System on a DC Motor Type 1502400008 Using Simulated Signals in MATLAB SIMULINK." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 66-75.
  19. Haj, Muhammad Izzul, and Anggara Trisna Nugraha. "Optimization of Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Systems." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 1-9.
  20. Ashlah, Muhammad Bilhaq, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Image processing with the thresholding method using MATLAB R2014A." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 39-47.
  21. Sobhita, Rama Arya, and Anggara Trisna Nugraha. "Optimization of DC Motor 054B-2 By Method LQR and LQT in MATLAB SIMULINK." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 18-28.
  22. Budi, Febri Setya, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Comparison of LQR and LQT Control of Uncertain Nonlinear Systems." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 10-17.
  23. Setiawan, Edy, et al. "Integration of Renewable Energy Sources in Maritime Operations." *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 185-210.
  24. Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Case Studies of Successful Energy Management Initiatives." *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 211-228.
  25. Eviningsih, Rachma Prilian, and Anggara Trisna Nugraha. "Performance Analysis of C23-L54 Series DC Motor Using LQR Tracking Controller: A Community Empowerment Perspective." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1 (2025).
  26. Ashlah, Muhammad Bilhaq, Rama Arya Sobhita, and Anggara Trisna Nugraha. "Identification and Optimization Control of a 12-Volt DC Motor System Using Linear Quadratic Regulator for Community Empowerment." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1 (2025).
  27. Nugraha, Anggara Trisna. "Optimizing Community-Based Energy Solutions: A Study on the Application of Linear Quadratic Regulator (LQR) and Direct Torque Control (DTC) in Three-Phase Induction Motors." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1 (2025).
  28. A. P. Y. Waroh, "Analisa Dan Simulasi Sistem Pengendalian Motor Dc," *J. Ilm. Sains*, vol. 14, no. 2, p. 80, 2014, doi: 10.35799/jis.14.2.2014.5935.
  29. Z. B. Abdullah, S. W. Shneen, and H. S. Dakheel, "Simulation Model of PID Controller for DC Servo Motor at Variable and Constant Speed by Using MATLAB," *J. Robot. Control*, vol. 4, no. 1, pp. 54–59, 2023, doi: 10.18196/jrc.v4i1.15866.
  30. S. Sharma and A. J. Obaid, "Mathematical modelling, analysis and design of fuzzy logic controller for the control of ventilation systems using MATLAB fuzzy logic toolbox," *J. Interdiscip. Math.*, vol. 23, no. 4, pp. 843–849, 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/09720502.2020.1727611>.
  31. M. Azab, "Comparative Study of BLDC Motor Drives with Different Approaches: FCS-Model Predictive Control and Hysteresis Current Control," *World Electr. Veh. J.*, vol. 13, no. 7, 2022, doi: 10.3390/wevj13070112.

#### BIOGRAFI PENULIS



**Ananda Ismul Azam** Lahir pada tanggal 27 Oktober 2003. Memahami bidang kelistrikan sejak menempuh pendidikan di SMK Negeri 1 Cerme. Saat ini ia melanjutkan pendidikannya di Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS). Minat dan fokus studinya meliputi instalasi rangkaian kontrol dan daya motor listrik, *Programmable Logic Controller*, serta simulasi maupun desain menggunakan perangkat lunak teknik seperti autocad, fluidsim, proteus dll. Selama menempuh pendidikan di kampus, ia lebih fokus dalam

**Penulis utama:** Ananda Ismul Azam, [anandaismul@student.ppsns.ac.id](mailto:anandaismul@student.ppsns.ac.id), Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia.

**DOI:** XXXX

**Hak Cipta** © 2025 oleh penulis. Diterbitkan oleh Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Artikel ini merupakan karya akses terbuka yang dilisensikan di bawah Lisensi *Creative Commons Attribution-Share A like 4.0 International License* (CC BY-SA 4.0).



pengembangan dirinya tentang kelistrikan pada kapal. Penelitian kali ini merupakan bagian dari kontribusinya dalam memahami perilaku dinamis motor Brushless DC (BLDC) dan pengembangan sistem kontrol berbasis orde

satu. Ia berkomitmen untuk terus mengembangkan keahlian di bidang sistem kelistrikan kapal, sistem kontrol motor listrik dan teknologi otomasi sebagai bagian dari kontribusinya dalam dunia teknik dan energi masa depan.