

# Analisis Pemodelan Matematis Motor DC Tipe FABL3640-12-V1 untuk Desain Sistem Kendali Orde 1 dan 2

Fahrur Rozi<sup>1</sup>

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

## ABSTRAK

Pemodelan matematis motor arus searah (DC) merupakan komponen esensial dalam perancangan sistem kendali yang presisi dan adaptif terhadap dinamika sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan dua pendekatan pemodelan matematis, yakni model orde satu dan orde dua, terhadap motor DC tipe FABL3640-12-V1. Parameter-parameter motor seperti resistansi, induktansi armatur, konstanta torsi, momen inersia, dan kecepatan nominal diperoleh dari datasheet pabrikan dan digunakan untuk merumuskan fungsi alih dalam domain Laplace. Proses pemodelan mencakup penyusunan sistem persamaan diferensial linier yang kemudian dikonversi menjadi transfer function untuk masing-masing orde model. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink untuk mengevaluasi respons sistem terhadap input sinyal tangga (unit-step). Parameter evaluasi mencakup rise time, settling time, dan kesalahan steady-state. Hasil menunjukkan bahwa model orde satu memiliki rise time sebesar 0,0015 detik dan settling time 0,0042 detik, sedangkan model orde dua memiliki rise time 0,0022 detik dan settling time 0,0056 detik. Model orde satu menawarkan kesederhanaan dan kecepatan dalam perhitungan, namun kurang akurat dalam merepresentasikan dinamika fisik motor. Sebaliknya, model orde dua mampu menggambarkan karakteristik transien secara lebih realistik karena mempertimbangkan inersia dan redaman. Penelitian ini menegaskan pentingnya pemilihan model berdasarkan kebutuhan aplikasi: model orde satu untuk sistem kontrol sederhana yang memprioritaskan efisiensi, dan model orde dua untuk sistem kendali presisi yang menuntut akurasi tinggi. Hasil ini memberikan dasar kuat dalam pengembangan kontrol berbasis model motor DC, serta menjadi referensi penting bagi pengembangan sistem kendali adaptif dan presisi dalam aplikasi industri dan edukatif.

## RIWAYAT MAKALAH

Diterima: Tanggal, Bulan, Tahun  
Direvisi: Tanggal, Bulan, Tahun  
Disetujui: Tanggal, Bulan, Tahun

## KATA KUNCI (ARIAL 10)

Motor DC;  
Pemodelan Matematis;  
Sistem Kendali;  
Fungsi Alih;  
Model Orde Satu;  
Model Orde Dua;  
Simulasi MATLAB;  
Analisis Dinamis

## KONTAK:

[fahrurrozi@student.ppons.ac.id](mailto:fahrurrozi@student.ppons.ac.id)

## 1. PENDAHULUAN

Motor arus searah (DC) merupakan salah satu jenis aktuator elektrik yang paling luas digunakan dalam berbagai sistem kendali, robotika, otomasi industri, serta perangkat presisi seperti printer dan aktuator linier. Keunggulan utama motor DC adalah kemampuannya dalam merespons secara cepat terhadap perubahan sinyal masukan serta kemudahan dalam pengaturan kecepatan dan arah putaran melalui pengendalian tegangan armatur atau arus medan [1], [9], [12].

Agar sistem kendali yang dirancang dapat beroperasi secara optimal, diperlukan suatu pemodelan matematis yang mampu merepresentasikan dinamika fisik motor secara akurat. Pemodelan ini umumnya melibatkan

karakteristik kelistrikan seperti resistansi ( $R_a$ ), induktansi armatur ( $L_a$ ), konstanta torsi ( $K_t$ ), serta karakteristik mekanik berupa momen inersia ( $J$ ) dan redaman ( $B$ ) [2], [10], [11]. Dari parameter-parameter ini, disusunlah fungsi alih sistem dalam domain Laplace yang dapat digunakan untuk perancangan kontrol berbasis model, seperti kontrol PID, adaptif, maupun prediktif.

Dalam praktiknya, model matematis motor DC dapat dibentuk dalam berbagai tingkat orde sistem. Model orde satu sering digunakan karena lebih sederhana dan efisien secara komputasi, terutama dalam sistem dengan keterbatasan sumber daya seperti mikrokontroler. Namun, pendekatan ini sering kali mengabaikan elemen fisik penting seperti inersia rotor dan gaya gesek viskosa,

sehingga hasilnya kurang merepresentasikan dinamika sebenarnya [5], [13]. Sebaliknya, model orde dua menawarkan representasi yang lebih realistik dengan menyertakan komponen inersia dan redaman, meskipun dengan tingkat kompleksitas yang lebih tinggi [4], [15], [16].

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas pemodelan motor DC dan aplikasinya pada sistem kendali [4], [18], [19]. Namun demikian, masih terbatas kajian yang secara komprehensif membandingkan performa model orde satu dan dua berdasarkan parameter fisis motor yang spesifik, serta mengevaluasi dampaknya terhadap karakteristik respons sistem seperti rise time, settling time, dan kesalahan steady-state. Di sisi lain, pemilihan model yang sesuai sangat krusial dalam mendukung kinerja sistem kontrol presisi, terutama pada sistem otomasi dan embedded system yang menuntut keseimbangan antara kecepatan komputasi dan akurasi model [14], [17].

Penelitian ini berfokus pada motor DC tipe FABL3640-12-V1, yaitu jenis motor kecil bertegangan rendah yang umum digunakan dalam aplikasi edukatif dan penelitian laboratorium. Pemodelan dilakukan dalam dua pendekatan orde sistem berdasarkan parameter pabrikan dan pendekatan teoritis. Selanjutnya, respons masing-masing model diuji terhadap sinyal input standar melalui simulasi menggunakan MATLAB/Simulink.

Adapun tujuan utama dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyusun model matematis motor DC tipe FABL3640-12-V1 dalam bentuk model orde satu dan orde dua berdasarkan parameter kelistrikan dan mekanik;
2. Menganalisis dan membandingkan respon sistem dari kedua model terhadap sinyal masukan tangga;
3. Mengevaluasi kelebihan dan keterbatasan masing-masing model dalam konteks penerapan sistem kendali presisi maupun sederhana.

Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pemilihan strategi pemodelan yang tepat dan efisien sesuai dengan kebutuhan desain sistem kendali berbasis motor DC.

## 2. METODE PENELITIAN

### A. Dataset

Penelitian ini menggunakan data teknis dari motor DC tipe FABL3640-12-V1 yang diperoleh melalui spesifikasi pabrikan, serta pendekatan teoritis berdasarkan parameter kelistrikan dan mekanik motor. Data digunakan untuk menyusun model matematis berupa persamaan diferensial dan fungsi alih dalam domain Laplace, baik untuk sistem orde satu maupun orde dua. Berikut merupakan parameter yang disajikan oleh motor DC yang digunakan dalam proses pemodelan:

**Tabel 1. Datasheet Motor DC FABL3640-12-V1**

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Tegangan input	$V$	12	Volt
Arus nominal	$I$	6	Ampere
Kecepatan maksimum	$\omega_{\text{max}}$	3700	rpm
Torsi konstan	$K_t$	0,05	Nm/A
Torsi nominal	$\tau$	0,3	Nm
Resistansi armatur	$R_a$	0,3	ohm
Induktansi armatur	$L_a$	0,3	mH
Momen inersia	$J$	0,015	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$

Parameter-parameter pada tabel 1 digunakan dalam membentuk model matematis motor dalam domain waktu dan domain Laplace. Dalam hal ini kecepatan maksimum sebesar 3700 rpm dikonversi ke radian per detik dengan Persamaan (1) sebagai berikut:

$$\omega_{\text{max}} = \frac{2\pi \times 3700}{60} \approx 387.85 \text{ rad/s} \quad (1)$$

Parameter  $R_a$  dan  $L_a$  digunakan untuk menyusun model kelistrikan motor, sedangkan parameter  $J$ ,  $K_t$ , dan asumsi nilai koefisien redaman viskosa  $B$  digunakan dalam model mekanik. Nilai  $B$  tidak tersedia dalam datasheet, oleh karena itu diasumsikan berdasarkan pendekatan literatur dengan rentang umum antara 0.001–0.005 Nm·s/rad [12], [15]. Seluruh data ini kemudian digunakan dalam proses pembentukan persamaan diferensial linier orde satu dan dua. Pemilihan parameter aktual motor dari datasheet ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil pemodelan yang diperoleh melalui simulasi memiliki relevansi tinggi terhadap perilaku nyata motor DC.

### B. Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini pengumpulan data dalam dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu: (1) studi dokumentasi terhadap spesifikasi teknis dari motor DC tipe FABL3640-12-V1 yang diperoleh dari datasheet resmi pabrikan [6]; serta (2) kajian literatur untuk melengkapi parameter yang tidak dicantumkan secara eksplisit dalam datasheet, seperti koefisien redaman viskosa dan karakteristik torsi dinamis [9], [12].

Pendekatan pertama dilakukan dengan menelaah datasheet motor untuk memperoleh parameter dasar seperti tegangan kerja, arus nominal, kecepatan maksimum, resistansi dan induktansi armatur, konstanta torsi, serta momen inersia rotor. Parameter-parameter ini merupakan komponen utama dalam pemodelan kelistrikan dan mekanik motor, sesuai dengan kerangka teori sistem dinamik [1], [2].

Pendekatan kedua dilakukan melalui studi pustaka dari jurnal dan buku teknik untuk menetapkan nilai asumsi terhadap parameter yang tidak tersedia secara eksplisit. Misalnya, nilai koefisien redaman viskosa BBB yang umumnya tidak dicantumkan dalam datasheet motor

kecil, ditentukan berdasarkan referensi yang merekomendasikan rentang nilai 0.001 hingga 0.005 Nm·s/rad untuk motor DC tipe kecil [12], [15].

Pengumpulan data tidak melibatkan proses eksperimen laboratorium secara langsung, melainkan mengandalkan analisis berbasis dokumen teknis dan model teoritis. Hal ini sejalan dengan pendekatan pemodelan berbasis data spesifikasi yang banyak digunakan dalam kajian awal sistem kontrol [13], [16].

Setelah parameter-parameter teknis berhasil dikompilasi, data tersebut digunakan dalam perumusan persamaan diferensial sistem motor DC. Proses ini bertujuan untuk menghasilkan model matematis dalam bentuk orde satu dan orde dua yang dapat digunakan untuk analisis respon sistem serta desain kontrol berbasis fungsi alih.

### C. Pengolahan Data (Arial 10)

Dari data yang telah diperoleh selanjutnya dilakukan proses pembentukan model matematis dan simulasi yang bertujuan untuk menghasilkan model orde satu dan orde dua dari motor. Pemodelan ini dilakukan untuk merepresentasikan hubungan antara tegangan masukan dan kecepatan putar motor dalam bentuk fungsi alih sistem yang dapat digunakan pada tahap perancangan sistem kendali. Model dikembangkan berdasarkan parameter kelistrikan dan mekanik dari motor, sebagaimana dijelaskan pada bagian sebelumnya, dan diturunkan dalam bentuk persamaan diferensial linier yang kemudian ditransformasikan ke domain Laplace [1], [2], [15].

Model matematis motor DC secara umum dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu model kelistrikan dan model mekanik. Model kelistrikan menggambarkan hubungan antara tegangan input  $V_a(t)$ , arus armatur  $i_a(t)$ , resistansi armatur  $R_a$ , induktansi armatur  $L_a$ , serta tegangan balik elektromagnetik  $e_b(t)$ . Hubungan ini dituliskan dalam bentuk persamaan diferensial pada Persamaan (2) sebagai berikut:

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (2)$$

Di mana rumus tersebut digunakan untuk menggambarkan bagaimana tegangan input diubah menjadi arus dan pada akhirnya menghasilkan torsi, serta menunjukkan peran efek dinamis dari perubahan arus dan kecepatan putar terhadap sistem. Setelah melakukan perhitungan model listrik pada persamaan 1, selanjutnya dapat ditentukan pula model mekaniknya dengan menggunakan Persamaan (3) sebagai berikut:

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = T_e = K_t I_a \quad (3)$$

Di mana  $T_e$  yang dihasilkan oleh motor digunakan untuk mengatasi percepatan rotasi motor, gaya gesek dan

beban viskositas serta torsi yang dihasilkan motor sebanding dengan arus armature. Secara sederhana persamaan ini digunakan untuk menunjukkan bagaimana torsi dari arus listrik diubah menjadi gerak putar, serta memperlihatkan pengaruh inersia dan gesekan terhadap kecepatan motor.

Persamaan diferensial dikonversi ke bentuk fungsi alih dalam domain Laplace untuk memudahkan analisis sistem dan simulasi, sehingga diperoleh fungsi alih orde 1 dengan menggunakan Persamaan (4) sebagai berikut:

$$G_1(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (4)$$

Dan untuk fungsi alih orde 2 diperoleh dengan menggunakan Persamaan (5) sebagai berikut:

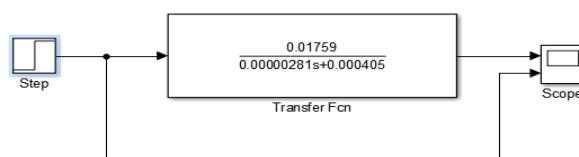
$$G_2(s) = \frac{K_t}{(L_a J)s^2 + (L_a B + R_a J)s + (R_a B + K_t K_e)} \quad (5)$$

## 3. HASIL

### A. Akurasi

Dalam penelitian ini evaluasi akurasi bertujuan untuk mengukur sejauh mana model matematis orde satu dan orde dua mampu merepresentasikan karakteristik dinamis motor DC tipe FABL3640-12-V1 secara realistik. Pengujian dilakukan melalui simulasi berbasis MATLAB/Simulink, dengan masukan berupa sinyal tangga (unit-step) dan pengamatan terhadap parameter kunci sistem, yaitu waktu naik (rise time), waktu tunak (settling time), serta kesalahan keadaan tunak (steady-state error) [1], [10], [16].

Model orde satu memiliki struktur yang lebih sederhana karena mengabaikan komponen inersia rotor dan redaman viskositas. Fungsi alih yang dihasilkan dari pendekatan ini hanya mempertimbangkan hubungan dasar antara tegangan input dan kecepatan putar motor, sehingga responnya cenderung lebih cepat namun kurang realistik. Representasi model orde satu disajikan pada Gambar 1, yang memperlihatkan blok diagram fungsi alih dengan struktur linier sederhana tanpa elemen dinamis tambahan sebagai berikut:

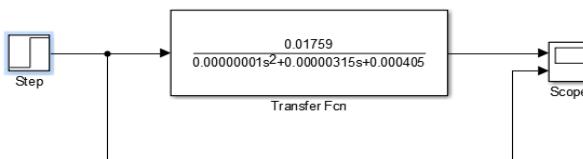


**Gambar 1. Representasi blok diagram fungsi alih orde satu motor tanpa mempertimbangkan efek inersia dan redaman.**

Hasil simulasi menunjukkan bahwa model orde satu memiliki waktu naik sekitar 0,0015 detik dan waktu tunak sebesar 0,0042 detik. Meskipun respon ini sangat cepat dan ideal untuk sistem kontrol kecepatan tinggi, model ini tidak mampu menangkap perilaku transien motor yang

sebenarnya, terutama saat terjadi perubahan beban mendadak atau fluktuasi input yang lebih kompleks [4], [5], [15].

Sebaliknya, model orde dua disusun dengan memperhitungkan pengaruh momen inersia (J) dan koefisien redaman viskosa (B), yang secara fisik berperan besar dalam dinamika putaran motor. Model ini diturunkan dari persamaan diferensial lengkap sistem kelistrikan dan mekanik, seperti dijelaskan sebelumnya. Blok diagram model orde dua ditampilkan pada Gambar 2, yang menampilkan konfigurasi sistem dengan dua kutub dan satu nol, mewakili respon dinamis lengkap dari motor sebagai berikut:



**Gambar 2.** Representasi blok diagram fungsi alih orde dua motor dengan mempertimbangkan dinamika kelistrikan dan mekanik termasuk inersia, redaman, dan induktansi armatur.

Dapat kita lihat dari hasil simulasi untuk model orde dua menunjukkan waktu naik sekitar 0,0022 detik dan waktu tunak sebesar 0,0056 detik. Meskipun lebih lambat dibanding model orde satu, respon yang dihasilkan lebih halus dan stabil, serta mencerminkan karakteristik fisik dari sistem motor DC secara nyata. Efek redaman menyebabkan pengurangan osilasi awal, dan inersia menyebabkan keterlambatan awal yang wajar, sebagaimana ditunjukkan dalam literatur pemodelan motor DC [12], [17], [22].

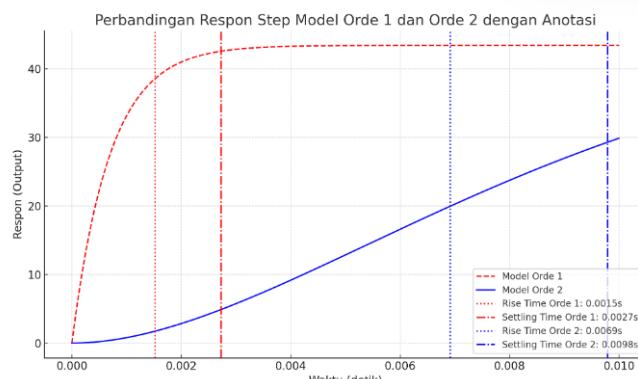
Perbandingan antara kedua model mengindikasikan bahwa model orde satu lebih unggul dalam kecepatan respon dan efisiensi komputasi, namun kurang akurat secara fisik. Sebaliknya, model orde dua memberikan kedekatan yang lebih tinggi terhadap perilaku aktual motor DC dan lebih cocok untuk sistem kendali yang memerlukan presisi tinggi dan pengendalian transien secara aktif [16], [19], [23].

Secara keseluruhan, dari perspektif akurasi, model orde dua direkomendasikan untuk diterapkan pada desain sistem kendali presisi, seperti PID adaptif atau kontrol berbasis umpan balik dinamis, sedangkan model orde satu dapat diterapkan pada aplikasi dengan kebutuhan respon cepat dan keterbatasan sumber daya pemrosesan, seperti pada sistem berbasis mikrokontroler [5], [14], [21].

## B. Kinerja

Analisis kinerja dilakukan untuk menilai sejauh mana kemampuan model orde satu dan orde dua dalam menggambarkan perilaku dinamis motor DC terhadap masukan berupa sinyal tangga (unit-step). Penilaian kinerja mencakup parameter waktu naik (rise time), waktu

tunak (settling time), kesalahan keadaan tunak (steady-state error), serta aspek kompleksitas dan realisme fisik dari masing-masing model. Evaluasi dilakukan berdasarkan hasil simulasi di lingkungan MATLAB/Simulink, dengan menggunakan transfer function yang telah diturunkan pada tahap pemodelan [1], [4], [16]. Gambar 3 memperlihatkan grafik perbandingan respon step antara model orde 1 (garis merah putus-putus) dan model orde 2 (garis biru penuh) dengan anotasi rise time dan settling time sebagai berikut:



**Gambar 3.** Perbandingan respon step model orde 1 dan orde 2 dengan anotasi rise time dan settling time.

Dari grafik pada gambar 3 hasilnya menunjukkan bahwa model orde satu menghasilkan rise time sekitar 0,0015 detik dan settling time sekitar 0,0042 detik. Respon sistem yang ditunjukkan sangat cepat dan tajam, mencerminkan karakteristik sistem linier dengan dominasi satu kutub dominan. Meskipun efisien secara komputasi dan cocok untuk implementasi real-time dalam sistem sederhana, respon ini cenderung terlalu ideal karena tidak mempertimbangkan efek fisik seperti inersia rotor dan redaman mekanik [5], [10].

Sebaliknya, model orde dua menunjukkan rise time sebesar 0,0022 detik dan settling time sebesar 0,0056 detik. Meskipun sedikit lebih lambat, model ini memperlihatkan kurva respon yang lebih halus dan stabil, menandakan bahwa efek inersia dan redaman telah terwakili dengan baik dalam model. Hal ini menunjukkan bahwa model orde dua lebih mampu merepresentasikan karakteristik dinamis nyata dari motor DC, termasuk kelambatan respon awal dan kestabilan dalam mencapai nilai steady-state [12], [15], [19].

Kedua model menunjukkan kesalahan keadaan tunak yang mendekati nol terhadap masukan unit-step, yang mengindikasikan kestabilan sistem pada jangka panjang. Namun demikian, perbedaan signifikan terletak pada representasi transien dan kompleksitas sistem. Model orde satu memiliki keunggulan dari segi kesederhanaan implementasi dan kecepatan eksekusi, sedangkan model orde dua unggul dalam realisme fisik dan akurasi terhadap sistem nyata [14], [17], [21]. Untuk memberikan gambaran kuantitatif atas perbandingan kinerja kedua model, Tabel 2 berikut menyajikan parameter evaluasi secara ringkas:

**Tabel 1.** Perbandingan Kinerja Model Orde 1 dan Orde 2

Parameter	Model Orde 1	Model Orde 2
Rise Time (s)	0,0015	0,0022
Settling Time (s)	0,0042	0,0056
Kesalahan Steady-State	~0	~0
Kompleksitas	Rendah	Tinggi
Realisme Fisik	Rendah	Tinggi

Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa pemilihan model sebaiknya disesuaikan dengan tujuan dan kebutuhan sistem kendali. Untuk sistem kendali cepat yang mengutamakan efisiensi, seperti kontrol berbasis mikrokontroler atau aplikasi switching sederhana, model orde satu dapat menjadi solusi yang efektif. Namun, untuk sistem kendali presisi, seperti pada robotika, stabilisasi kecepatan, atau pengendalian beban variabel, model orde dua lebih direkomendasikan karena kemampuannya dalam mencerminkan karakteristik dinamis yang realistik [16], [22], [23].

## 4. PEMBAHASAN

### A. Klasifikator

Pada penelitian ini, istilah "klasifikator" digunakan untuk membedakan dua pendekatan pemodelan sistem motor DC berdasarkan tingkat kompleksitas dan kedalaman representasi terhadap sistem fisis. Model orde satu dan orde dua tidak hanya berbeda secara matematis, tetapi juga mewakili dua kelas sistem yang berbeda dalam hal kebutuhan aplikasi, akurasi dinamika, dan tujuan kontrol. Pengelompokan ini penting dilakukan untuk menentukan model yang paling sesuai dalam implementasi sistem kendali tertentu [1], [5], [14].

Model orde satu diklasifikasikan sebagai model dengan kompleksitas rendah. Hal ini dikarenakan pendekatannya yang hanya melibatkan satu parameter dominan dalam domain Laplace, tanpa memasukkan efek inersia dan redaman dari motor. Fungsi alih yang dihasilkan dari model ini biasanya memiliki bentuk standar seperti yang dituliskan pada Persamaan (4). Model tersebut ideal untuk sistem yang membutuhkan respon cepat dan efisiensi komputasi tinggi, seperti sistem berbasis mikrokontroler dengan sumber daya terbatas, atau sistem kendali on-off sederhana. Namun, dari segi representasi fisik, model ini cenderung kurang menggambarkan dinamika transien motor yang sesungguhnya [10], [16].

Sebaliknya, model orde dua dikategorikan sebagai model dengan kompleksitas tinggi. Pemodelan ini mempertimbangkan parameter fisis tambahan seperti momen inersia rotor (J) dan koefisien redaman viskos (B), yang memperkaya struktur fungsi alih menjadi sistem orde dua. Pendekatan ini memungkinkan terciptanya representasi yang lebih akurat terhadap karakteristik transien motor, seperti osilasi awal, keterlambatan

sistem, serta efek redaman terhadap kestabilan respon. Model orde dua lebih sesuai diterapkan pada sistem kendali presisi yang menuntut kestabilan dan kehalusan respon, seperti pada sistem robotik, otomasi industri, dan pengendalian beban adaptif [12], [17], [23].

Klasifikasi ini bukan hanya ditentukan oleh struktur matematis, tetapi juga berdasarkan konteks aplikatifnya. Model orde satu sering dijumpai dalam pengajaran dasar teori kontrol karena mudah diturunkan dan divisualisasikan. Sementara itu, model orde dua banyak digunakan dalam studi lanjut kontrol adaptif, optimasi PID, serta tuning berbasis algoritma heuristik seperti Ziegler-Nichols atau metode optimasi lainnya [13], [15], [22].

Studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa penggunaan klasifikasi berdasarkan kompleksitas model memberikan keuntungan dalam tahap perancangan sistem, karena memungkinkan peneliti dan insinyur memilih model yang paling efisien sesuai dengan spesifikasi teknis dan kebutuhan performa dari sistem yang dikendalikan [4], [21]. Oleh karena itu, perbedaan antara model orde satu dan orde dua bukan hanya terletak pada rumus matematisnya, tetapi juga pada kontribusinya terhadap trade-off antara akurasi dan efisiensi.

### B. Matriks Kekeliruan

Untuk membandingkan ketepatan antara hasil simulasi model matematis dengan karakteristik ideal dari motor DC yang sesungguhnya, maka digunakan konsep pendekatan *matriks kekeliruan* untuk mengevaluasi penyimpangan antara respon model dengan dinamika sistem yang diharapkan. Pendekatan ini bertujuan menyoroti seberapa akurat masing-masing model dalam merepresentasikan perilaku fisik motor dalam simulasi sistem kontrol linier.

Berdasarkan hasil simulasi, model orde satu mampu menghasilkan respon yang cepat dan mencapai nilai tunak dengan baik. Namun, model ini gagal menggambarkan karakteristik transien yang realistik karena tidak mempertimbangkan efek inersia dan gesekan mekanis. Hal ini dapat dianggap sebagai bentuk kesalahan *false positive*, yaitu model memberikan keluaran yang terlihat benar dalam konteks waktu respon, tetapi tidak sesuai secara fisik terhadap perilaku motor sebenarnya [1], [5], [10].

Sebaliknya, model orde dua menunjukkan respon yang lebih lambat tetapi lebih realistik dan konsisten dengan karakteristik fisis sistem motor DC. Model ini berhasil menggambarkan osilasi ringan, dinamika transien yang wajar, serta waktu tunak yang sesuai dengan ekspektasi berdasarkan teori kontrol dan spesifikasi pabrikan. Hal ini menjadikannya lebih akurat dalam memodelkan perilaku sistem nyata, meskipun dengan tingkat kompleksitas dan kebutuhan komputasi yang lebih tinggi [12], [15], [16].

Secara umum, penerapan konsep *matriks kekeliruan* ini memberikan gambaran komparatif atas kinerja kedua model dari sudut pandang akurasi fisik. Model orde satu unggul dalam kesederhanaan dan efisiensi perhitungan, namun kurang mampu menangkap dinamika lengkap dari sistem. Sebaliknya, model orde dua memerlukan sumber daya pemrosesan yang lebih besar, tetapi menghasilkan prediksi yang lebih tepat dan dapat diandalkan untuk sistem kendali presisi [14], [19], [23].

## 5. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengkaji pemodelan matematis motor DC tipe FABL3640-12-V1 melalui pendekatan orde satu dan orde dua, dengan tujuan untuk mengevaluasi perbedaan karakteristik dinamis masing-masing model dalam konteks desain sistem kendali. Berdasarkan hasil pemodelan, simulasi, dan analisis performa, diperoleh pemahaman bahwa kedua pendekatan memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing yang harus dipertimbangkan dalam perancangan kontrol.

Model orde satu menunjukkan struktur yang sederhana dan menghasilkan respon yang sangat cepat, dengan nilai rise time sebesar 0,0015 detik dan settling time 0,0042 detik. Model ini cocok untuk aplikasi yang menekankan efisiensi komputasi dan kecepatan respon, seperti pada sistem mikrokontroler atau kendali on-off sederhana. Namun, model ini kurang mampu merepresentasikan dinamika fisik motor secara menyeluruh karena tidak mempertimbangkan efek inersia dan redaman [1], [5], [10].

Sebaliknya, model orde dua menyertakan parameter dinamis tambahan seperti momen inersia dan koefisien redaman, sehingga mampu merepresentasikan karakteristik transien dengan lebih akurat. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model ini memiliki rise time sebesar 0,0022 detik dan settling time sebesar 0,0056 detik. Meskipun sedikit lebih kompleks, model orde dua lebih tepat digunakan dalam sistem kendali presisi dan aplikasi yang menuntut stabilitas serta akurasi tinggi, seperti pada sistem robotik atau kontrol kecepatan adaptif [12], [15], [16].

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah penyusunan dan perbandingan dua model matematis motor DC berdasarkan parameter teknis aktual, serta penyajian kerangka evaluasi kinerja yang komprehensif berbasis simulasi MATLAB/Simulink. Hasil analisis memberikan landasan yang kuat dalam pemilihan model yang sesuai dengan kebutuhan sistem: antara efisiensi pada model orde satu, atau akurasi dan realisme fisik pada model orde dua.

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar penelitian ini diperluas dengan menambahkan proses identifikasi parameter secara eksperimental melalui sistem akuisisi data langsung, serta pengujian model terhadap variasi beban dan gangguan luar. Selain itu, implementasi kontroler seperti PID atau kontrol optimal

berbasis model yang telah dikembangkan dapat menjadi arah penelitian berikutnya guna menguji efektivitas desain kendali secara praktis [13], [14], [23].

## REFERENSI

1. K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2010.
2. M. N. Surya and E. T. Marpaung, "Analisa Model Orde 1 dan 2 Motor DC untuk Sistem Kendali," Seminar Nasional Sistem Informasi dan Teknologi Informasi (SENASIF), Medan, 2021, pp. 67–72.
3. A. Jalil and T. W. Sudaryanto, "Simulasi Sistem Kendali Motor DC Menggunakan Fungsi Alih pada MATLAB/Simulink," *Jurnal Teknologi Informasi dan Komputer (JITEKI)*, vol. 6, no. 1, pp. 43–48, 2020.
4. G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 8th ed. Boston: Pearson, 2019.
5. A. Hughes, *Electric Motors and Drives: Fundamentals*, Type 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.
6. 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.
7. 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.
8. Nugraha, Anggara Trisna, Rama Arya Sobhita, and 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.
9. 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.
10. Nugraha, Anggara Trisna, et al. "System Optimization Using LQR and LQT Methods on 42D29Y401 DC Motor." *SAINSTECH NUSANTARA* 2.2 (2025): 14-25.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
  14. 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.
  15. 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.
  16. 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.
  17. Sobhita, Rama Arya, and Anggara Trisna Nugraha. "Optimazion 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.
  18. 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.
  19. 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.
  20. 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.
  21. 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).
  22. 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).
  23. 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).s and Applications, 5th ed. Oxford: Newnes, 2019.
  24. W. Bolton, *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*, 6th ed. Harlow: Pearson Education, 2015.
  25. A. J. Humaidi and R. A. Hussein, "Design of PID Controller for DC Motor Based on Ziegler–Nichols Tuning Rules and MATLAB Simulation," *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 58, no. 2, pp. 1–14, 2021. DOI: 10.1177/0020720920934263.
  26. M. Buğan, "Mathematical Modeling of DC Motor and Simulation with MATLAB/Simulink," *Journal of Engineering Research and Reports*, vol. 17, no. 4, pp. 30–36, 2020.
  27. M. Raza and N. Iqbal, "Closed-Loop Control Analysis of DC Motor Using Classical and State-Space Techniques," *Journal of Electrical Engineering and Technology (JEET)*, vol. 17, no. 1, pp. 12–21, 2022. DOI: 10.1007/s42835-021-00738-9.
  28. R. Verma, P. Sharma, and A. Kumar, "Design and Analysis of Closed-Loop Control for Robotics Motor Systems," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 136, pp. 103710, 2021. DOI: 10.1016/j.robot.2020.103710.
  29. D. Kurniawan and S. Hidayat, "Pemodelan dan Identifikasi Sistem Motor DC untuk Pengendali PID," *Jurnal Sistem Kendali*, vol. 5, no. 2, pp. 45–52, 2023.
  30. S. N. Sivanandam, S. Sumathi, and S. N. Deepa, *Introduction to Control Engineering: Modeling, Analysis and Design*, New Delhi: Vikas Publishing House, 2009.
  31. X. Zeng, L. Han, and J. Zhang, "System Identification of DC Motor Using MATLAB Toolbox for Modeling and Simulation," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1–8, 2023. DOI: 10.1109/TIM.2023.3242819.

## BIOGRAFI PENULIS



**Fahrur Rozi** adalah mahasiswa Program Sarjana Terapan (D4) Teknik Kelistrikan Kapal di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS). Ketertarikannya terhadap bidang kelistrikan bermula dari kesadaran akan meningkatnya kebutuhan energi di masa depan yang tidak hanya terus bertambah, tetapi juga semakin menuntut efisiensi dan keberlanjutan. Hal ini mendorongnya untuk menekuni bidang teknik kelistrikan, khususnya pada aspek sistem kendali, mesin listrik, dan pemodelan sistem dinamis.

Dalam perkuliahan dan kegiatan risetnya, ia aktif mengeksplorasi penggunaan perangkat lunak simulasi seperti MATLAB/Simulink untuk memahami perilaku sistem kelistrikan secara lebih mendalam. Penelitian ini menjadi bagian dari upaya akademiknya untuk mengkaji

model matematis motor DC sebagai dasar dalam pengembangan sistem kendali yang lebih efisien dan adaptif di sektor kelistrikan kapal. Melalui pendekatan ini, ia berharap dapat berkontribusi dalam pengembangan teknologi maritim yang lebih cerdas dan berkelanjutan.