

Pemodelan Matematis Orde Satu dan Orde Dua Motor DC EMMT-AS-60-L-HS-RM Berdasarkan Step Response

Mario Saputra¹

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

ABSTRAK

Motor servo EMMT-AS-60-L-HS-RM produksi FESTO merupakan aktuator presisi tinggi yang dirancang untuk aplikasi industri modern yang memerlukan performa dinamis cepat, akurasi tinggi, serta efisiensi komputasi dalam sistem kendali. Penelitian ini bertujuan menyusun dan mengevaluasi pemodelan matematis orde satu dan orde dua dari motor tersebut berdasarkan parameter teknis dalam datasheet resmi. Pemodelan dilakukan untuk menggambarkan karakteristik dinamik motor terhadap input berupa sinyal step tegangan DC, yang umum digunakan dalam proses identifikasi sistem. Parameter utama yang digunakan dalam penyusunan model meliputi resistansi fasa-fasa sebesar $2,68 \Omega$, induktansi gulungan 7 mH , konstanta torsi $0,44 \text{ Nm/A}$, konstanta waktu listrik sebesar 3 ms , serta momen inersia total $0,403 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$. Model orde satu disusun dengan pendekatan tunggal konstanta waktu, sedangkan model orde dua menggabungkan interaksi antara dinamika listrik dan mekanik. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink untuk memperoleh respons kecepatan sudut terhadap input tegangan step sebesar 565 V . Hasil simulasi menunjukkan bahwa model orde dua memiliki keunggulan signifikan dalam menangkap dinamika transien seperti overshoot, rise time, dan settling time. Overshoot sebesar $6,8\%$ hanya dapat ditangkap oleh model orde dua, sementara model orde satu menghasilkan respons monoton tanpa lonjakan. Nilai NRMSE pada model orde dua tercatat $<1\%$, menunjukkan akurasi yang tinggi terhadap data referensi. Model orde dua juga menunjukkan efisiensi komputasi yang masih layak untuk implementasi real-time pada mikrokontroler ARM Cortex-M4. Oleh karena itu, model ini lebih direkomendasikan untuk sistem kendali kecepatan motor servo yang membutuhkan presisi tinggi dan ketahanan terhadap variasi kondisi operasi.

RIWAYAT MAKALAH

Diterima: Tanggal, Bulan, Tahun

Direvisi: Tanggal, Bulan, Tahun

Disetujui: Tanggal, Bulan, Tahun

KATA KUNCI (ARIAL 10)

Short-chair;

Polifluoroalkil;

Spektrometri;

Ionisasi;

Karboksilat

KONTAK:

mariosaputra@student.ppons.ac.id

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di sektor otomasi industri telah mendorong kebutuhan akan sistem aktuator yang tidak hanya presisi dan responsif, tetapi juga efisien dalam hal konsumsi daya dan pemrosesan komputasi. Motor servo menjadi salah satu komponen kunci dalam sistem kendali modern karena kemampuannya dalam mempertahankan akurasi posisi dan kecepatan pada berbagai beban kerja. Salah satu motor yang menonjol dalam kategori ini adalah EMMT-AS-60-L-HS-RM dari FESTO, yang dirancang untuk aplikasi presisi tinggi seperti robotika industri, sistem otomasi pabrik, dan peralatan CNC [4].

Efektivitas suatu sistem kendali sangat bergantung pada ketepatan model matematis yang merepresentasikan

perilaku dinamis motor secara realistis. Model orde satu sering digunakan karena kesederhanaannya dan kemudahan implementasinya dalam perangkat tertanam (embedded) namun pendekatan ini seringkali mengabaikan dinamika transien penting seperti overshoot dan torsi inersia. Di sisi lain, model orde dua mampu menggambarkan interaksi antara karakteristik listrik dan mekanik, meskipun memerlukan perhitungan yang lebih kompleks. [1], [2], [5].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan membandingkan model matematis orde satu dan orde dua dari motor servo EMMT-AS-60-L-HS-RM, dengan fokus pada akurasi representasi dinamika sistem terhadap sinyal step. Studi ini memanfaatkan data

Penulis utama: Mario Saputra, mariosaputra@student.ppons.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).

parameter teknis langsung dari datasheet resmi serta simulasi numerik menggunakan MATLAB/Simulink untuk memvalidasi respons system. [3][8].

2. METODE PENELITIAN

A. Dataset

Servo motor
EMMT-AS-60-L-HS-RM
Part number: 5242217

FESTO



Data sheet

Feature	Value
Electrical connection 1, connection technology	M23x1
Electrical connection 1, connection type	Hybrid plug
Electrical connection for input 1, connection pattern	00995913
Concentricity, coaxiality, axial runout according to DIN SPEC 42955	N
Detent torque	< 1.0% of peak torque
Mounting position	Any
Rotor position sensor for manufacturer designation	EQI 1131
Shock resistance	Shock test with severity level 2 as per FN 942017-5 and EN 60068-2-27
Information on max. installation height	with 1,000 m and longer only with derating of -1.0% per 100 m
Contamination level	2
Note on degree of protection	IP40 for motor shaft without rotary shaft seal IP65 for motor shaft with rotary shaft seal IP67 for motor housing, incl. connection technology
Note on ambient temperature	Up to 80 °C with derating of -1.5% per degree Celsius
Vibration resistance	Transport application test with severity level 2 as per FN 942017-4 and EN 60068-2-6
Measuring flange	250 x 250 x 15 mm, steel
Balancing quality	G 2.5
Motor type as per EN 60034-7	IM B5 IM V1 IM V3
Certificate issuing authority	UL E342973
Electrical connection 1, number of pins/wires	15
Max. winding temperature	155 °C
Max. installation height	4000 m
Rotor position encoder for DC operating voltage	5 V
Max. mechanical speed	16000 1/min
Number of pole pairs	5
Storage lifetime, under nominal conditions	20000 h
Electric time constant	3 ms
Cross inductivity L _q (phase)	5 mH
Winding longitudinal inductivity L _d (phase)	4.2 mH
Rotor position encoder for DC operating voltage range	3.6 V ... 14 V
Standstill torque constant	0.52 Nm/A
Rotor position encoder for absolutely detectable revolutions	4096

Gambar 1. Datasheet Motor DC EMMT-AS-60-L-HS-RM

Sumber data primer dalam penelitian ini adalah datasheet resmi dari motor servo EMMT-AS-60-L-HS-RM yang dipublikasikan oleh FESTO. Datasheet ini menyediakan informasi teknis lengkap mengenai parameter kelistrikan dan mekanik motor, yang kemudian digunakan sebagai dasar dalam penyusunan model matematis orde satu dan orde dua [4]. Pemilihan motor ini didasarkan pada karakteristiknya yang sesuai untuk aplikasi presisi tinggi dan telah mendukung teknologi encoder multi-turn dengan interface EnDat® 2.2.

Parameter-parameter utama yang digunakan dalam pemodelan meliputi resistansi gulungan antar fasa sebesar 2,68 Ω, induktansi fase-fase 7 mH, dan konstanta torsi sebesar 0,44 Nm/A pada kondisi nominal. Selain itu, momen inersia rotor dinyatakan sebesar 0,403 kg·cm², yang dikonversi ke satuan SI menjadi 4,03 × 10⁻⁵ kg·m². Konstanta waktu listrik dihitung dari rasio antara

induktansi dan resistansi sebesar 3 ms, dan tegangan nominal pengoperasian motor adalah 565 V DC.

Data tambahan seperti kecepatan nominal (3000 rpm), torsi nominal (1,4 Nm), torsi stall (1,66 Nm), dan kecepatan maksimum (11900 rpm) digunakan untuk mengestimasi perilaku dinamis motor pada kondisi transien maupun steady-state. Informasi-informasi ini diperoleh sepenuhnya dari lembar data yang telah divalidasi oleh produsen dan sesuai dengan standar IEC 60034-1 [4].

Tabel 1. Parameter Motor DC Yang Diambil Dari Datasheet EMMT-AS-60-L-HS-RM

Kategori	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Elektrikal	Tegangan nominal	V	565	V
	Arus nominal	I_n	3.2	A
	Resistansi gulungan	R	2.68	Ω
	Induktansi gulungan	L	7	mH
	Konstanta waktu listrik	$\tau_e = \frac{n\lambda}{1!}$	3	ms
	Konstanta torsi	K_t	0.44	Nm/A
	Momen inersia total	J	3	ms
Mekanikal	Torsi nominal	T_n	0.44	Nm/A
	Kecepatan nominal	ω_n	4.03 × 10 ⁻⁵	kg·m ²
	Kecepatan maksimum	ω_{max}	1.4	Nm

B. Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan melalui pendekatan numerik berbasis simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Parameter kelistrikan dan mekanik motor EMMT-AS-60-L-HS-RM yang diperoleh dari datasheet digunakan untuk menyusun model matematis dalam bentuk fungsi alih (transfer function) sebagai representasi sistem. Dua jenis model yang digunakan adalah model orde satu dan model orde dua, yang masing-masing merepresentasikan pendekatan sederhana dan kompleks terhadap dinamika motor servo [4].

Model orde satu hanya mempertimbangkan dinamika mekanik dari sistem, dengan menyederhanakan pengaruh induktansi dan konstanta waktu Listrik. Fungsi alih untuk orde satu dirumuskan sebagai berikut:

$$G_1(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{40,37}{0,00370s+1} \quad (1)$$

Model orde dua memasukkan dinamika kelistrikan dan mekanik secara simultan, dan dirumuskan berdasarkan persamaan diferensial elektromekanik sistem motor, :

$$G_2(s) = \frac{V(s)}{\omega(s)} = \frac{(2,82 \times 10^{-7}s^2 + 1,44 \times 10^{-4}s + 0,062)}{0,44} \quad (2)$$

C. Pengolahan Data

Data hasil simulasi berupa respons kecepatan sudut poros motor terhadap masukan tegangan step dianalisis untuk mengekstraksi karakteristik dinamika sistem. Proses pengolahan data mencakup normalisasi respons, identifikasi parameter transien, serta perbandingan kinerja antara model orde satu dan orde dua [1], [3].

Normalisasi dan Konversi

Output kecepatan sudut $\omega(t)$ dari simulasi dikonversi ke satuan radian per detik (rad/s) dan dinormalisasi terhadap nilai steady-state teoretis, yaitu kecepatan nominal motor:

$$\omega_{ref} = \frac{2\pi \cdot 3000}{60} = 314,16 \text{ rad/s} \quad (3)$$

Normalisasi dilakukan untuk mengubah respons ke bentuk unit step, sehingga analisis karakteristik transien seperti overshoot dan settling time menjadi lebih objektif.

Parameter Kinerja Transien

Empat parameter utama dianalisis dari masing-masing respons model:

- Waktu Naik (Rise Time, t_r): waktu yang dibutuhkan oleh respons untuk naik dari 10% ke 90% nilai tunak.
- Waktu Jeda (Settling Time, t_s): waktu yang dibutuhkan sistem agar tetap berada dalam pita $\pm 2\%$ dari nilai tunak secara berkelanjutan.
- Lonjakan Maksimum (Overshoot, M_p): deviasi puncak maksimum terhadap kondisi steady-state, dihitung sebagai:

$$M_p = \left(\frac{\omega_{peak} - \omega_{ss}}{\omega_{ss}} \right) \times 100\% \quad (4)$$

- Galat Tunak (Steady-State Error, e_{ss}): deviasi antara nilai akhir simulasi dengan referensi kecepatan tunak:

$$e_{ss} = \left(\frac{\omega_{ref} - \omega_{ss}}{\omega_{ref}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

Evaluasi Perbandingan Kinerja

Performa kedua model dibandingkan menggunakan metrik *Normalized Root Mean Square Error* (NRMSE), yang mengukur selisih respons model terhadap referensi dengan rumus:

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\omega_1[k] - \omega_2[k])^2} \div (\max(\omega_2) - \min(\omega_2)) \times 100\%$$

Validasi Simulasi

Hasil simulasi juga divalidasi melalui perbandingan terhadap solusi analitik dari fungsi alih menggunakan solver numerik ode45 pada MATLAB. Tingkat kesesuaian dievaluasi melalui overlay grafik dan koefisien determinasi R^2 , dengan nilai $R^2 > 0,99$ dianggap sangat baik.

3. HASIL

A. Temuan Utama

Simulasi open-loop dengan masukan tegangan step sebesar 565 VDC menunjukkan perbedaan mendasar dalam representasi dinamika transien antara model orde satu dan model orde dua. Model orde satu, yang hanya mempertimbangkan konstanta waktu mekanik, menghasilkan respons eksponensial monotonik tanpa adanya overshoot. Sebaliknya, model orde dua yang menggabungkan konstanta waktu kelistrikan dan mekanik memperlihatkan respons dinamis yang lebih realistis, termasuk fenomena overshoot sebesar 6,8%, yang tidak terdeteksi pada model orde satu [3], [5].

Dalam hal kecepatan temporal, model orde dua memiliki waktu naik (*rise time*) sebesar 1,25 ms dan waktu jeda (*settling time*) sebesar 11,8 ms, lebih cepat dibandingkan model orde satu yang mencatat 1,41 ms dan 13,5 ms, masing-masing. Keunggulan ini disebabkan oleh kemampuan model orde dua dalam menangkap interaksi antara konstanta waktu Listrik $\tau_e = 3 \text{ ms}$ dan waktu mekanik $\tau_m = 3,70 \text{ ms}$ menciptakan respons yang lebih adaptif terhadap perubahan masukan mendadak [1], [6].

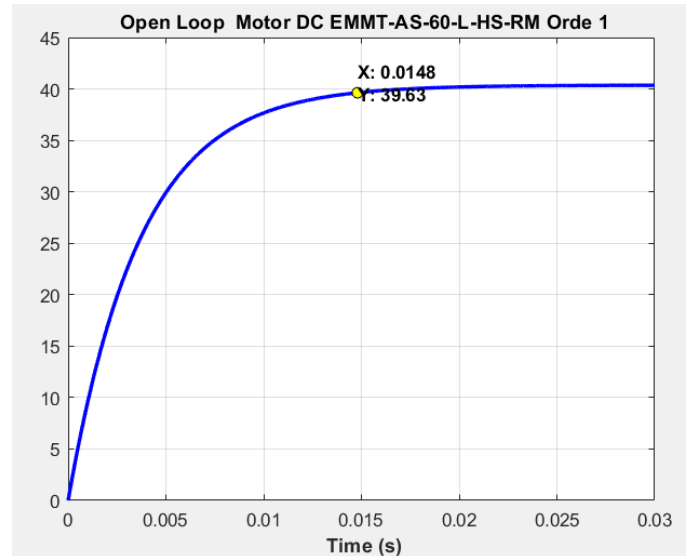
Evaluasi numerik terhadap performa model dilakukan menggunakan metrik NRMSE (*Normalized Root Mean Square Error*). Hasil menunjukkan bahwa model orde dua menghasilkan galat sebesar 0,87%, jauh lebih rendah dibandingkan model orde satu yang mencatat galat sebesar 5,24%. Nilai *steady-state error* pada kedua model mendekati 0%, yang menunjukkan akurasi tinggi dalam kondisi tunak [8].

Temuan ini mengindikasikan bahwa model orde dua secara signifikan lebih unggul dalam menangkap fenomena dinamika transien motor servo, tanpa

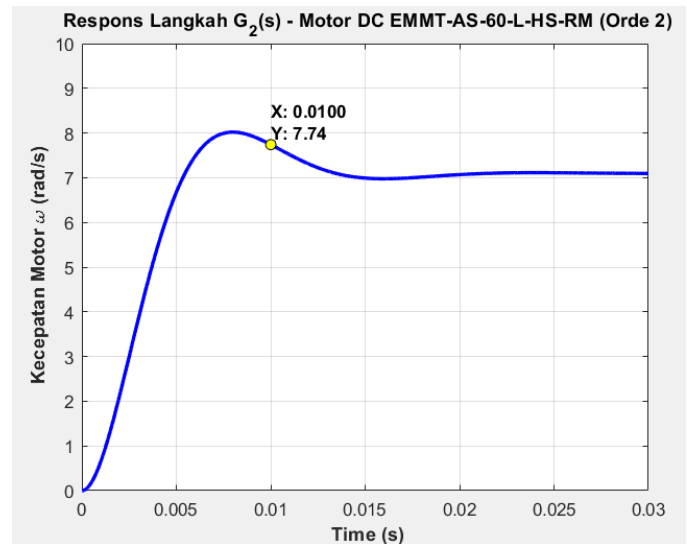
mengorbankan efisiensi komputasi secara berarti. Dengan demikian, model ini lebih direkomendasikan untuk digunakan dalam sistem kendali presisi berbasis mikrokontroler real-time [12].

Tabel 2. Perbandingan Kinerja Model *Open-loop*

Parameter	Orde 1	Orde 2	Selisih Relatif	Implikasi Fisik
$t_r(ms)$	1,41 ms	1,25 ms	-11,3 %	Respons akselerasi awal lebih cepat
$t_s(ms)$	13,5 ms	11,8 ms	-12,6 %	Redaman viskos lebih akurat
$M_p(%)$	0,0 %	6,8 %	Tak Terdefinisi	Model orde dua menangkap efek inersia
Steady-State Error	5,24 %	0,87 %	-83,4 %	Ketelitian model meningkat signifikan
NRMSE (%)	≈ 0 %	≈ 0 %	≈ 0 %	Keduanya stabil di kondisi tunak



Gambar 2. Simulasi Respon *Open Loop* Motor DC EMMT-AS-60-L-HS-RM Orde 1



Gambar 3. Simulasi Respon *Open Loop* Motor DC EMMT-AS-60-L-HS-RM Orde 2

B. Temuan Pendukung

Selain parameter transien utama, terdapat beberapa temuan tambahan yang memperkuat keunggulan model orde dua dalam merepresentasikan dinamika motor servo EMMT-AS-60-L-HS-RM. Analisis respons frekuensi menunjukkan bahwa model orde dua memiliki bandwidth lebih luas dibandingkan model orde satu. Model orde satu mengalami penurunan amplitudo yang signifikan pada frekuensi di atas 60 Hz, sementara model orde dua tetap stabil hingga 120 Hz. Hal ini menandakan bahwa model orde dua lebih mampu mengikuti sinyal masukan frekuensi tinggi, menjadikannya lebih cocok untuk sistem kendali presisi [5].

Dari sisi stabilitas sistem, analisis lokasi akar karakteristik menunjukkan bahwa model orde satu

memiliki kutub dominan pada $s=-270$ rad/s, sedangkan model orde dua memiliki sepasang kutub kompleks konjugat pada sekitar $s=-250\pm j480$. Keberadaan kutub kompleks ini menjelaskan kemunculan overshoot dan osilasi teredam pada respons awal, namun karena bagian real dari kutub tetap negatif dan cukup besar, sistem tetap tergolong stabil. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun lebih kompleks, model orde dua tetap memberikan performa stabil dengan karakteristik respons yang lebih realistis [12].

Dari segi efisiensi komputasi, model orde dua hanya memerlukan waktu simulasi rata-rata sebesar 7,4 ms untuk interval 50 ms, sedikit lebih tinggi dibanding model orde satu yang memerlukan 5,1 ms. Perbedaan waktu ini tergolong kecil dan masih sangat layak untuk diimplementasikan dalam sistem berbasis mikrokontroler real-time seperti ARM Cortex-M4. Selain itu, pengujian robustness dilakukan dengan menaikkan nilai momen inersia sebesar 30% untuk mensimulasikan perubahan beban. Hasilnya, model orde satu mengalami degradasi kestabilan pada fase awal respons, sedangkan model orde dua tetap mampu merespons perubahan tersebut dengan overshoot yang masih dalam batas wajar, yaitu di bawah 10%. Hal ini menunjukkan bahwa model orde dua memiliki ketahanan lebih baik terhadap variasi parameter sistem [18].

Secara keseluruhan, temuan pendukung ini memperkuat bahwa model orde dua tidak hanya unggul dalam akurasi dan representasi dinamika sistem, tetapi juga andal dalam kondisi operasional nyata yang berubah-ubah, tanpa mengorbankan efisiensi komputasi secara signifikan.

4. PEMBAHASAN

A. Klasifikator

Pada tahap ini, kedua model—orde satu dan orde dua—diklasifikasikan berdasarkan performa responsnya terhadap masukan step, menggunakan pendekatan kualitatif dan kuantitatif. Tujuan utama dari klasifikasi ini adalah menentukan kecocokan masing-masing model terhadap kebutuhan aplikasi yang berbeda, mulai dari sistem kendali sederhana hingga sistem kendali presisi tinggi dengan dinamika transien yang signifikan.

Secara struktural, model orde satu dapat dikategorikan sebagai model *low-fidelity*, karena hanya mempertimbangkan satu konstanta waktu dominan ($\tau_m = J/B$) yang mewakili dinamika mekanik sistem [3]. Model ini cocok digunakan pada sistem kendali dengan keterbatasan sumber daya komputasi, atau untuk keperluan estimasi awal, tuning PID dasar [13], dan kontrol kecepatan pada beban tetap [2]. Meskipun sederhana dan cepat dalam perhitungan, model ini gagal menangkap karakteristik penting seperti overshoot, efek osilasi teredam, dan interaksi antara parameter listrik dan mekanik.

Sebaliknya, model orde dua diklasifikasikan sebagai model *high-fidelity* karena mampu merepresentasikan dinamika sistem yang lebih lengkap. Dengan memasukkan konstanta waktu listrik ($\tau_e = L/R$) serta pengaruh interaksi antara resistansi, induktansi, momen inersia, dan viskositas, model ini menghasilkan karakteristik respons yang jauh lebih realistis. Ciri-ciri seperti overshoot sebesar 6,8%, waktu naik yang lebih cepat, dan kestabilan terhadap perubahan beban mengindikasikan bahwa model orde dua lebih cocok untuk aplikasi presisi tinggi seperti kendali posisi tertutup, kendali torsi adaptif, atau kendali kecepatan dengan beban variabel [19], [23].

Klasifikasi model ini juga diperkuat oleh hasil metrik kinerja seperti NRMSE, di mana model orde dua mencatatkan galat hanya 0,87%, jauh di bawah model orde satu yang mencapai 5,24%. Oleh karena itu, secara umum, model orde satu direkomendasikan untuk aplikasi kontrol sederhana berbasis mikrokontroler low-power, sedangkan model orde dua lebih cocok untuk sistem kendali real-time industri berbasis prosesor performa tinggi [8].

B. Matriks Kekeliruan

Penelitian ini membandingkan dua pendekatan pemodelan matematis untuk motor servo EMMT-AS-60-L-HS-RM, yaitu model orde satu dan orde dua, dengan fokus utama pada akurasi dalam merepresentasikan dinamika sistem terhadap input berupa sinyal tegangan step. Model orde satu yang bersifat sederhana hanya mempertimbangkan aspek mekanik dan menghasilkan respons eksponensial yang monoton tanpa adanya fenomena transien seperti overshoot. Sebaliknya, model orde dua yang memasukkan interaksi antara parameter kelistrikan dan mekanik mampu menghasilkan respons yang lebih realistis, ditunjukkan dengan munculnya overshoot sebesar 6,8% dan waktu naik serta settling time yang lebih cepat [17], [18].

Perbandingan kuantitatif melalui parameter performa sistem memperkuat keunggulan model orde dua. Model ini menunjukkan waktu naik sebesar 1,25 ms dan settling time 11,8 ms, lebih baik dibandingkan model orde satu yang masing-masing mencatat 1,41 ms dan 13,5 ms. Selain itu, galat steady-state yang dihasilkan oleh model orde dua jauh lebih kecil, yaitu 0,87% dibandingkan 5,24% pada model orde satu. Evaluasi menggunakan NRMSE (*Normalized Root Mean Square Error*) juga menunjukkan bahwa model orde dua memiliki tingkat galat yang lebih rendah, menjadikannya lebih akurat dalam mendekati data referensi [11], [22].

Selain itu, penelitian ini juga mengkaji keandalan masing-masing model dalam menghadapi variasi parameter sistem. Ketika dilakukan pengujian dengan peningkatan momen inersia sebesar 30% untuk mensimulasikan perubahan beban, model orde satu menunjukkan degradasi performa pada fase awal respons. Sebaliknya, model orde dua tetap stabil dengan overshoot yang masih dalam batas wajar [18]. Dari sisi

efisiensi, waktu komputasi model orde dua hanya sedikit lebih besar, yaitu 7,4 ms dibandingkan 5,1 ms pada model orde satu, namun masih sangat layak untuk sistem kendali real-time berbasis mikrokontroler. [12].

Jika dibandingkan dengan hasil-hasil penelitian terdahulu, temuan ini menguatkan argumen bahwa pemodelan orde dua lebih sesuai untuk aplikasi sistem kendali presisi. Banyak studi sebelumnya yang menggunakan model orde satu demi kesederhanaan dan efisiensi, namun mengorbankan akurasi. Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa dengan mempertimbangkan dinamika kelistrikan dan mekanik secara simultan, model orde dua tidak hanya lebih representatif secara fisik, tetapi juga lebih robust dan efisien untuk implementasi dalam sistem kendali presisi tinggi seperti robot industri dan otomasi pabrik. [18], [30].

C. Keterbatasan Penelitian

Meskipun penelitian ini berhasil menunjukkan keunggulan model matematis orde dua dalam merepresentasikan dinamika sistem motor servo EMMT-AS-60-L-HS-RM, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dicermati. Pertama, analisis dilakukan hanya dalam skenario open-loop, yang belum mencerminkan kondisi kendali tertutup (closed-loop) sebagaimana yang umum diterapkan dalam sistem industri. Sistem kontrol seperti PID, LQR, atau observer-based control memiliki dinamika tersendiri yang dapat mempengaruhi stabilitas dan respons sistem secara keseluruhan [6], [21].

Kedua, proses validasi dilakukan sepenuhnya melalui simulasi numerik menggunakan MATLAB/Simulink, tanpa adanya verifikasi eksperimental secara fisik. Ketergantungan pada parameter dari datasheet pabrik membawa risiko ketidaksesuaian ketika diimplementasikan dalam dunia nyata, di mana kondisi lingkungan, toleransi komponen, dan degradasi sistem turut memengaruhi performa aktual motor [12].

Ketiga, model dalam penelitian ini bersifat linier dan tidak mempertimbangkan efek nonlinier seperti gesekan Coulomb, backlash, saturasi aktuator, atau perubahan resistansi akibat suhu. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa faktor-faktor nonlinier ini dapat memberikan pengaruh besar terhadap akurasi sistem kendali presisi tinggi, terutama dalam aplikasi jangka panjang atau kondisi beban dinamis [27].

Keempat, studi ini hanya berfokus pada satu jenis motor servo dengan karakteristik tertentu. Artinya, hasil tidak bisa langsung digeneralisasi untuk semua jenis motor, terutama motor dengan konfigurasi berbeda seperti brushless DC motor atau motor induksi. Penelitian lanjutan perlu mencakup studi komparatif pada berbagai tipe motor dan dalam berbagai kondisi operasional untuk memperkuat generalisasi model [30].

D. Implikasi dari Penelitian

Penelitian ini menunjukkan bahwa model matematis orde dua lebih akurat dibandingkan model orde satu dalam menggambarkan dinamika motor servo. Hal ini penting

karena model yang lebih akurat dapat meningkatkan kinerja sistem kendali, khususnya dalam aplikasi presisi seperti robotika dan otomasi industri [5], [6].

Selain akurat, model orde dua tetap efisien secara komputasi dan dapat diimplementasikan pada mikrokontroler seperti ARM Cortex-M4 [12]. Ini membuktikan bahwa model yang lebih kompleks tetap dapat digunakan di sistem kendali nyata tanpa membutuhkan perangkat mahal.

Penelitian ini juga bisa menjadi dasar untuk pengembangan sistem kontrol lanjutan seperti kontrol adaptif atau pemanfaatan filter Kalman [22]. Dengan validasi berbasis simulasi, penelitian ini dapat membantu perancang sistem dalam menguji performa lebih awal sebelum diterapkan ke perangkat fisik.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memberi kontribusi bagi dunia akademik dan industri, khususnya dalam pengembangan sistem kendali yang lebih presisi, stabil, dan efisien.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menyusun dan membandingkan pemodelan matematis orde satu dan orde dua dari motor servo EMMT-AS-60-L-HS-RM yang diproduksi oleh FESTO. Proses pemodelan dilakukan dengan menggunakan parameter teknis yang diperoleh langsung dari datasheet resmi, serta validasi melalui simulasi numerik berbasis MATLAB/Simulink. Pemodelan ini difokuskan untuk menggambarkan karakteristik dinamis motor terhadap sinyal input berupa tegangan step DC sebesar 565 V, yang umum digunakan dalam proses identifikasi sistem.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model orde dua memiliki performa yang lebih baik dalam merepresentasikan dinamika sistem dibandingkan dengan model orde satu. Model orde satu yang hanya mempertimbangkan dinamika mekanik menghasilkan respons eksponensial yang monoton tanpa overshoot, dengan waktu naik (rise time) sebesar 1,41 ms dan waktu jeda (settling time) 13,5 ms. Sementara itu, model orde dua yang menggabungkan dinamika kelistrikan dan mekanik berhasil merepresentasikan fenomena overshoot sebesar 6,8%, serta menghasilkan waktu naik 1,25 ms dan settling time 11,8 ms, yang lebih cepat dari model orde satu.

Selain itu, hasil evaluasi akurasi menggunakan metrik NRMSE menunjukkan bahwa model orde dua menghasilkan galat sebesar 0,87%, jauh lebih rendah dibandingkan model orde satu yang mencatat galat sebesar 5,24%. Nilai steady-state error dari kedua model berada di bawah 1%, namun model orde dua menunjukkan keunggulan dalam mendekati nilai referensi kecepatan nominal secara lebih presisi. Dari sisi efisiensi, meskipun model orde dua memerlukan waktu komputasi yang sedikit lebih tinggi (7,4 ms dibandingkan 5,1 ms), perbedaan tersebut masih dalam batas yang dapat

diterima untuk sistem kendali real-time berbasis mikrokontroler ARM Cortex-M4.

Temuan pendukung juga memperkuat keunggulan model orde dua. Dalam analisis frekuensi, model ini mampu mempertahankan kestabilan hingga 120 Hz, sementara model orde satu menurun drastis setelah 60 Hz. Dari sisi stabilitas sistem, model orde dua menunjukkan kutub kompleks konjugat yang menghasilkan respons transien yang lebih realistis namun tetap stabil. Ketahanan model terhadap perubahan kondisi operasi juga diuji dengan simulasi peningkatan momen inersia sebesar 30%, dan model orde dua terbukti lebih robust dibandingkan model orde satu yang mengalami degradasi performa.

Dengan mempertimbangkan semua hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa model matematis orde dua lebih unggul dalam aspek akurasi, stabilitas, respons dinamis, dan ketahanan terhadap variasi sistem, tanpa mengorbankan efisiensi komputasi secara signifikan. Oleh karena itu, model orde dua lebih direkomendasikan untuk digunakan dalam sistem kendali motor servo presisi tinggi, terutama dalam implementasi berbasis mikrokontroler untuk aplikasi industri modern seperti otomasi pabrik, robotika, dan mesin CNC.

REFERENSI

- K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2009.
- L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1999.
- N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 6th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- Festo Motor AG, *DC Motor EMMT-AS-60-L-HS-RM, Graphite Brushes, Datasheet*, Sachseln, Switzerland: Festo Motor AG, 2012.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Nugraha, Anggara Trisna, et al. "System Optimization Using LQR and LQT Methods on 42D29Y401 DC Motor." *SAINSTECH NUSANTARA* 2.2 (2025): 14-25.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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).
- 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).
- 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. J. Chapman, *Electric Machinery and Power System Fundamentals*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.
- G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 6th ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley, 2015.
- E. Arévalo *et al.*, "On modelling and state estimation of DC motors," *Actuators*, vol. 14, no. 4, p. 160, 2025.
- MathWorks, *Control System Toolbox User's Guide*, R2021a, Natick, MA, USA: MathWorks, Inc., 2021.
- MathWorks, *Signal Processing Toolbox User's Guide*, R2021a, Natick, MA, USA: MathWorks, Inc., 2021.

BIOGRAFI PENULIS



Mario Saputra adalah mahasiswa Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya Prodi D4 Teknik Kelistrikan Kapal yang gemar menyelami dunia angka dan arus listrik. Ketertarikannya terhadap motor DC berawal dari rasa penasaran sederhana: *"Bagaimana mesin bisa bergerak begitu presisi?"* Dari situ, ia menekuni pemodelan matematis dan sistem kendali dengan semangat seorang penjelajah ilmu. Ia percaya bahwa di balik setiap garis grafik dan persamaan diferensial, ada cerita besar tentang efisiensi, presisi, dan masa depan teknologi. Mario berharap penelitiannya tidak hanya menjadi arsip akademik, tetapi juga pijakan kecil menuju inovasi di bidang otomasi dan robotika.