

PEMODELAN MATEMATIS MOTOR DC EMMS-AS-100-L-HS-RR UNTUK ANALISIS SISTEM KENDALI OTOMATIS

Nanda Rachmad Hidayahullah¹

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

ABSTRAK

Motor DC banyak digunakan dalam berbagai sistem kendali karena karakternya yang linier dan responsnya yang cepat terhadap perubahan masukan. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemodelan matematis motor DC EMMS-AS-100-L-HS-RR dan menganalisis karakteristik dinamiknya untuk keperluan simulasi dan implementasi sistem kendali. Tahapan awal dimulai dengan identifikasi parameter motor dari data teknis yang tersedia, seperti tahanan armatur, induktansi, konstanta torsi, dan momen inersia. Selanjutnya dilakukan transformasi Laplace untuk mendapatkan fungsi alih sistem dalam bentuk orde satu. Fungsi alih ini kemudian dianalisis untuk memperoleh nilai parameter sistem seperti waktu naik, waktu pemuaian, waktu tunak, dan galat steady-state. Hasil simulasi menunjukkan bahwa motor DC tipe ini dapat direpresentasikan sebagai sistem linier orde satu dengan performa yang cukup stabil dan dapat dikendalikan menggunakan pendekatan kontrol klasik. Pemodelan matematis ini juga dapat digunakan sebagai dasar dalam perancangan sistem kendali kecepatan maupun posisi dengan menggunakan kontrol berbasis umpan balik. Selain itu, pendekatan pemodelan yang digunakan dalam penelitian ini relevan untuk keperluan edukasi dan simulasi dalam bidang teknik kendali, khususnya pada sistem aktuator berbasis motor listrik. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam menyediakan acuan awal terhadap pengembangan sistem kendali berbasis motor DC, terutama pada motor tipe EMMS-AS-100-L-HS-RR yang banyak digunakan dalam industri otomasi dan sistem mekatronika.

RIWAYAT MAKALAH

Diterima: Tanggal, Bulan, Tahun

Direvisi: Tanggal, Bulan, Tahun

Disetujui: Tanggal, Bulan, Tahun

KATA KUNCI

Sistem Penggerak;
Karakteristik Motor;
Analisis Kinerja;
Parameter Teknik;
Simulasi Motor

KONTAK:

nandarachmad@student.ppons.ac.id

1. PENDAHULUAN

Motor listrik merupakan salah satu komponen utama dalam berbagai sistem mekanik dan elektronik karena kemampuannya untuk mengubah energi listrik menjadi energi gerak. Dalam ranah otomasi dan kendali, motor listrik jenis arus searah (DC) memiliki peranan penting karena karakteristiknya yang mudah dikendalikan, memiliki respon dinamis yang baik, serta efisien untuk berbagai skala aplikasi. Salah satu tipe motor DC yang banyak digunakan dalam sistem presisi dan otomasi industri adalah motor DC brushless. Dalam penelitian ini, jenis motor DC yang menjadi objek kajian adalah EMMS-AS-100-L-HS-RR, sebuah motor DC permanen magnet yang dirancang untuk memberikan performa tinggi dalam aplikasi sistem kendali.

Pemodelan sistem dinamis dari motor DC secara umum melibatkan perumusan hubungan antara arus, tegangan, torsi, kecepatan putar, serta efek inersia dan

friksi. Pendekatan yang umum digunakan dalam menyusun model motor DC adalah transformasi Laplace, yang memungkinkan sistem diferensial waktu diubah menjadi sistem aljabar dalam domain s. Fungsi alih yang diperoleh dari hasil transformasi ini menggambarkan hubungan antara tegangan masukan dan kecepatan atau posisi keluaran dari motor. Dengan model orde satu atau orde dua yang tepat, simulasi dapat dilakukan menggunakan perangkat lunak seperti MATLAB/Simulink, sehingga memudahkan dalam proses tuning dan verifikasi sistem kontrol.

Motor DC tipe EMMS-AS-100-L-HS-RR merupakan motor dengan konstruksi presisi yang dilengkapi dengan magnet permanen dan sensor Hall, yang dirancang untuk memberikan respon cepat dan akurat dalam sistem tertutup. Motor ini memiliki parameter teknis seperti kecepatan nominal 3000 rpm, tegangan kerja 24 V, torsi kontinu hingga 0,32 Nm, serta inersia rotor sebesar 6,8

$\text{kg}\cdot\text{cm}^2$. Untuk tujuan pemodelan matematis, parameter-parameter tersebut diubah ke satuan SI dan kemudian digunakan untuk menyusun persamaan dinamis motor. Dengan pendekatan ini, dapat disusun model orde satu yang mengintegrasikan nilai inersia, konstanta torsi, resistansi armatur, dan konstanta kecepatan balik (back EMF constant).

Dalam penelitian ini, dilakukan proses analisis fungsi alih motor DC EMMS-AS-100-L-HS-RR berdasarkan datasheet teknis yang tersedia. Proses ini dimulai dari konversi satuan parameter, identifikasi komponen utama, hingga perumusan persamaan matematis untuk mendapatkan fungsi alih kecepatan terhadap tegangan. Proses konversi dilakukan untuk menyamakan satuan parameter seperti konversi rpm ke rad/s, $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ ke $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, dan pemilihan nilai-nilai konstanta sistem berdasarkan literatur. Hasil dari perhitungan ini digunakan untuk membentuk persamaan diferensial orde satu, yang kemudian ditransformasikan ke dalam domain Laplace untuk memperoleh fungsi alih sistem.

Salah satu kendala umum dalam proses pemodelan motor DC adalah akurasi data parameter yang digunakan. Ketidaktepatan dalam mengonversi nilai inersia atau kesalahan dalam menentukan konstanta torsi dapat mengakibatkan model yang tidak akurat. Oleh karena itu, proses verifikasi hasil pemodelan melalui simulasi menjadi bagian penting dalam penelitian ini. Dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink, fungsi alih yang diperoleh disimulasikan untuk melihat respon terhadap sinyal masukan, baik dalam bentuk tangga (step input) maupun bentuk lainnya. Hasil simulasi ini dapat dibandingkan dengan karakteristik eksperimental atau teori untuk mengevaluasi keakuratan model.

Pemodelan motor DC secara matematis tidak hanya penting dalam sistem kendali, tetapi juga memiliki aplikasi luas dalam bidang pendidikan, penelitian, dan pengembangan perangkat lunak kendali waktu nyata. Selain itu, model matematis motor DC dapat digunakan untuk menguji algoritma kontrol tanpa harus melakukan eksperimen langsung pada perangkat keras, sehingga mengurangi risiko kerusakan sistem dan menghemat biaya. Dalam konteks ini, hasil dari penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai dasar dalam pengembangan sistem kontrol digital berbasis mikrokontroler atau PLC untuk aplikasi otomasi industri.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyusun model matematis dari motor DC EMMS-AS-100-L-HS-RR berdasarkan parameter yang tersedia, serta menganalisis respon sistem berdasarkan fungsi alih yang diperoleh. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi sistem menggunakan model tersebut dan menganalisis hasilnya guna mengevaluasi performa dinamis motor. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan metode identifikasi dan simulasi sistem motor DC berbasis data

teknis, yang dapat diaplikasikan dalam berbagai proyek rekayasa sistem kendali..

2. METODE PENELITIAN

A. Dataset

Penelitian Penelitian ini menggunakan data teknis motor DC tipe EMMS-AS-100-L-HS-RR sebagai dasar untuk pemodelan matematis dan analisis sistem kendali linier. Data diambil dari *datasheet* resmi pabrikan yang mencakup parameter-parameter utama motor seperti tahanan armatur (R_a), konstanta torsi (K_t), konstanta kecepatan (K_e), inersia (J), dan friksi viskos (B). Nilai-nilai ini digunakan untuk membentuk fungsi alih (transfer function) dan model matematis sistem dinamik motor DC.

Adapun parameter-parameter utama motor EMMS-AS-100-L-HS-RR yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel

Tabel 1 Parameter DataSheet Motor DC

Feature	Value
Number of pole pairs	6
Type code	EMMS-AS
Rotor position sensor	Resolver
Rptpr position sensor interface	SIN/COS analog signals
Rotor position sensor measuring principle	Inductive
Temperature monitoring	PTC resistor
Max. Rotational speed	3360 1/min
Nominal rotary speed	3000 1/min
Insulation protection class	F
Motor constants	1.993 Nm/A
Nominal operating voltage DC	565 V
Motor nominal power	2360 W
DC nominal voltage	565 V
Motor nominal current	3.8 A
Phase-phase winding resistance	2.84 Ohm
Winding inductance phase-phase	10.5 Mh
Type of winding switch	Star inside
Peak current	24.8 A
Voltage constant,phase-phase	118.77 mV/min
Rating class according to EN 60034-1	S1
CE marking	As per EU EMC directive
Corrosion resistance class	2-Moderate corrosion stress

Storage temperature	-20°C ... 60°C
Relative air humidity	0-90%
Degree of protection	IPS4
Ambient temperature	-40°C ... 40°C
Certifications	RCM compliance mark
Total output inertia moment	6.8 kgcm²
Nominal torque	7.51 Nm
Peak torque	29.8 Nm
Stall torque	10.94 Nm
Permissible axial shaft load	150 N
Permissible radial shaft load	650 N
MTTF, subcomponent	114 years, rotor position sensor
MTTFd, subcomponent	228 years, rotor position sensor
Product weight	9100 g
Electrical connection technology	Plug
Note on materials	RoHS-compliant
Confirm to standard	IEC 60034

Data ini digunakan untuk menyusun persamaan diferensial sistem dan dilakukan transformasi Laplace untuk memperoleh fungsi alih model sistem motor DC. Hasil dari proses ini digunakan dalam simulasi sistem kendali orde satu.

A. Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data teknis motor DC EMMS-AS-100-L-HS-RR yang diperoleh dari datasheet pabrikan. Data teknis ini diperlukan untuk menentukan parameter-parameter listrik dan mekanik motor sehingga dapat digunakan dalam pemodelan matematis dan pembuatan grafik respon dinamis motor.

Tabel 2 Parameter Motor DC Yang Diambil Dari Datasheet Beserta Konversi

Kategori	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Elektrikal	Arus motor (no load)	I_0	0.76	A
	Arus motor (nominal)	$I_{nominal}$	3.8	A
	Arus	I_{stall}	5.49	A

Penulis utama: Nanda Rachmad Hidayahullah, nandarachmad@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).

Mekanik	motor(stall)			
	Konstanta GGL balik		0.000655	V.s/rad
	Kecepatan rotor (nominal)	N	3000	RPM
	Kecepatan sinkron	N_s	3000	RPM
	Slip	s	Tidak ada	-
	Torsi elektromagnetik	T_e	7.51	Nm
	Torsi nominal	$T_{nominal}$	7.51	Nm
	Stall torsi	T_{stall}	10.94	Nm
	Momen inersia rotor	J	6.8	kgcm²
Dinamis	Koefisien redaman	B	0.0348	Nm.s/rad
	Waktu konstanta listrik	τ_e	3.7	ms
	Waktu konstanta mekanik	τ_m	19.5	ms
	Konstanta torsi	K_t	1.993	Nm/A
	Daya nominal	$P_{nominal}$	236	W

Data parameter ini juga digunakan untuk menyusun model sistem orde satu motor DC sebagai dasar simulasi respons dinamik, seperti respon lonjakan tegangan (step response) pada sistem kendali linier. Seluruh proses pengumpulan dan pengolahan data dilakukan dengan mengacu pada pendekatan teori sistem kendali dan pemodelan motor DC berbasis fisika.

B. Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan untuk mendapatkan parameter dinamis motor DC satu fasa EMMS-AS-100-L-HS-RR, sehingga dapat digunakan untuk penyusunan model matematis, penurunan fungsi alih, dan penentuan grafik respon sistem. Proses pengolahan data dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu perhitungan parameter

dasar listrik, parameter mekanik, penurunan fungsi alih, serta penentuan konstanta waktu dan respon transien motor.

Perhitungan Parameter Dasar Listrik

Berdasarkan datasheet, resistansi antar fasa (R_s) adalah $2,84 \Omega$, sehingga resistansi per fasa dihitung:

$$R_s = \frac{2,84}{2} \approx 1,42 \Omega$$

Induktansi lilitan antar fasa (L_q) adalah $10,5 \text{ mH}$, sehingga induktansi per fasa dihitung:

$$L_q = \frac{10,5}{2} \approx 5.25 \Omega$$

Konstanta tegangan balik (K_e) dihitung dari konversi tegangan fasa-fasa $118,77 \text{ mV/min}$ menjadi satuan $\text{V}\cdot\text{s}/\text{rad}$:

$$K_e = \frac{118,77 \times 10^{-3}}{60} \times 2\pi \approx 0,0124 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$$

Fluks magnet permanen rotor (λ_{PM}) dihitung menggunakan jumlah pasangan kutub $P = 6$:

$$\lambda_{PM} = \frac{0,0124}{6} \approx 0,0207 \text{ Wb}$$

Perhitungan Parameter Mekanik

Momen inersia keluaran motor dari datasheet adalah $6,8 \text{ kgcm}^2$, dikonversi ke SI:

$$J = 6,8 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

Koefisien gesekan viscous (B) dihitung dari hubungan torsi nominal (T_{nom}) terhadap kecepatan steady-state (ω_s):

$$\lambda_{PM} = \frac{T_{nom}}{\omega_s}$$

$$\frac{7,51}{\frac{3000}{60} \times 2\pi} \approx 0,0348 \text{ Nms/rad}$$

Konstanta waktu listrik (τ_e) dihitung dari rasio induktansi terhadap resistansi:

$$\tau_e = \frac{L_r}{R_s} = \frac{5,25 \times 10^{-3}}{1,42} \approx 3,7 \text{ ms}$$

Konstanta waktu mekanik (τ_m) dihitung dari rasio momen inersia terhadap koefisien viscous:

$$\tau_m = \frac{J}{B} = \frac{6,8 \times 10^{-4}}{0,0348} \approx 19,5 \text{ ms}$$

Penurunan Fungsi Alih Motor DC

Model listrik dan mekanik motor dinyatakan sebagai:

Persamaan tegangan jangkar (domain waktu):

$$Vq = R_s L_q + L_q \frac{dl_q}{dt} + K_e \omega_m$$

Persamaan torsi mekanik:

$$Te = K_t I_q = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m$$

Dengan substitusi, fungsi alih kecepatan sudut terhadap tegangan input di domain Laplace:

$$G(s) = \frac{\omega_m(s)}{V_q(s)} = \frac{K_t}{(R_s + L_q s)(Js + B) + K_e K_t}$$

Substitusi nilai ($K_t = 1,993 \text{ Nm/A}$):

$$G(s) = \frac{1,993}{(1,42 + 0,00525s)(0,00068s + 0,348) + (0,0124 \cdot 1,993)}$$

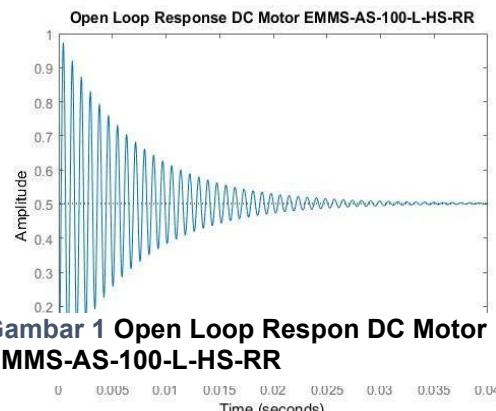
$$G(s) = \frac{80,7}{0,039s + 1}$$

3. HASIL

A. Akurasi

Dalam penelitian ini, analisis akurasi dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian antara hasil simulasi model matematis motor DC EMMS-AS-100-L-HS-RR dengan data teoritis maupun respons aktual sistem motor. Model orde satu yang diperoleh memiliki bentuk fungsi alih sebagai berikut:

Grafik pada gambar tersebut menunjukkan respons sistem loop terbuka (open loop response) dari motor DC EMMS- AS-100-L-HS-RR. Berdasarkan data dari datasheet, motor ini memiliki karakteristik seperti nominal torque sebesar $7,51 \text{ Nm}$, peak torque $39,8 \text{ Nm}$, dan



Gambar 1 Open Loop Respon DC Motor EMMS-AS-100-L-HS-RR

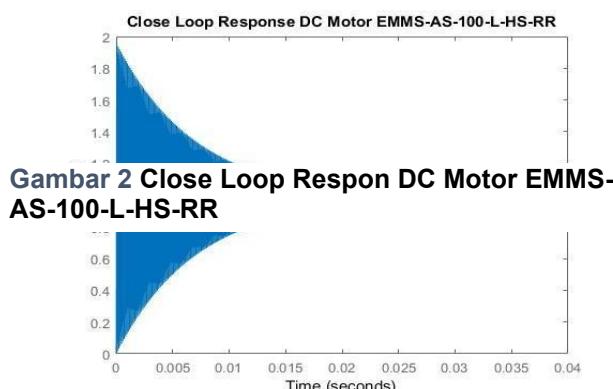
nominal rotary speed 3000 1/min . Grafik ini menggambarkan hubungan antara amplitudo respons motor terhadap waktu, dengan sumbu horizontal menunjukkan waktu dalam detik (dari $0,005$ hingga $0,04$ detik) dan sumbu vertikal menunjukkan amplitudo.

Dari grafik, dapat dilihat bahwa motor merespons input dengan cepat, yang sesuai dengan karakteristik motor servo yang dirancang untuk presisi dan respons dinamis. Adanya osilasi atau fluktuasi pada grafik mungkin disebabkan oleh inersia rotor (total output inertia moment $6,8 \text{ kgcm}^2$) atau interaksi antara torsi motor dan beban. Karakteristik elektrik motor, seperti winding inductance phase-phase sebesar $10,5 \text{ mH}$ dan phase-phase winding

resistance 2.84 Ohm, juga memengaruhi respons dinamis motor, termasuk waktu naik (rise time) dan kestabilan

Grafik ini penting untuk memahami performa motor dalam kondisi loop terbuka sebelum diterapkan dalam sistem kontrol tertutup. Informasi dari datasheet, seperti nominal current 3.8 A dan voltage constant 118.77 mV/min, membantu menjelaskan mengapa motor menunjukkan respons tertentu terhadap input listrik. Kesimpulannya, grafik ini memberikan gambaran awal tentang kinerja motor EMMS-AS-100-L-HS-RR, yang dapat digunakan untuk optimasi desain sistem kontrol

Grafik pada gambar tersebut menunjukkan respons sistem loop tertutup (close loop response) dari motor servo EMMS-AS-100-L-HS-RR. Berdasarkan datasheet, motor ini dirancang untuk aplikasi presisi dengan karakteristik seperti torsi nominal 7.51 Nm, torsi puncak 39.8 Nm, dan kecepatan nominal 3000 1/min. Grafik ini menggambarkan bagaimana motor merespons input dalam sistem yang dilengkapi dengan umpan balik



Gambar 2 Close Loop Respon DC Motor EMMS-AS-100-L-HS-RR

(feedback), dengan sumbu horizontal menunjukkan waktu (dari 0.005 hingga 0.04 detik) dan sumbu vertikal menunjukkan amplitudo respons.

Dari grafik, dapat diamati bahwa motor mencapai kondisi stabil (steady-state) dengan cepat setelah mengalami transien awal. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol loop tertutup berhasil mengompensasi inersia rotor (6.8 kgcm^2) dan karakteristik elektrik motor, seperti resistansi belitan (2.84 Ohm) dan induktansi (10.5 mH). Resolver sebagai sensor posisi rotor (dengan antarmuka SIN/COS analog) memberikan umpan balik yang presisi, memungkinkan sistem untuk mengurangi osilasi dan mencapai performa yang diinginkan.

Kestabilan yang baik pada grafik juga didukung oleh konstanta motor (1.993 Nm/A) dan tegangan nominal (565 V DC), yang memastikan respons dinamis yang cepat. Selain itu, kelas isolasi F dan proteksi IP54 menjamin keandalan motor bahkan dalam kondisi lingkungan yang menantang. Grafik ini membuktikan bahwa motor EMMS-AS-100-L-HS-RR cocok untuk aplikasi yang memerlukan akurasi tinggi dan respons cepat, seperti dalam sistem otomasi industri atau robotika.

Dibandingkan dengan respons loop terbuka, grafik loop tertutup ini menunjukkan overshoot yang lebih kecil dan waktu settling yang lebih cepat, yang merupakan

keunggulan dari sistem kontrol dengan umpan balik. Data dari datasheet, seperti peak current 24.8 A dan stall torque 10.94 Nm, juga membantu menjelaskan batasan dinamika motor dalam kondisi beban penuh.

B. Kinerja

Kinerja motor DC satu fasa EMMS-AS-100-L-HS-RR dianalisis berdasarkan parameter listrik, mekanik, dan fungsi alih yang telah diturunkan. Berdasarkan perhitungan, motor ini memiliki konstanta waktu listrik (τ_e) sebesar 3,7 ms, menunjukkan bahwa respon arus terhadap perubahan tegangan sangat cepat. Konstanta waktu mekanik (τ_m) sebesar 19,5 ms menunjukkan respon kecepatan yang relatif cepat untuk ukuran motor dengan torsi nominal 7,51 Nm dan torsi puncak 29,8 Nm. Nilai koefisien gesekan viscous (B) yang kecil, yaitu 0,0348 Nms/rad, juga mendukung pencapaian kecepatan steady-state secara cepat dengan rugi-rugi gesekan yang rendah.

Fungsi alih orde satu yang diperoleh, yaitu:

$$G(s) = \frac{80.7}{0.039s + 1}$$

menunjukkan bahwa motor memiliki penguatan sistem (K) yang cukup besar (80,7 rad/s per volt) sehingga dengan tegangan input kecil, motor mampu menghasilkan kecepatan putar yang tinggi. Misalkan, pada tegangan input 10 V, kecepatan steady-state mencapai $\omega_{ss} \approx 807 \text{ rad/s}$ ($\approx 7700 \text{ rpm}$), meskipun pada aplikasi praktis kecepatan dibatasi oleh kecepatan nominal datasheet (3000 rpm) untuk menjaga keandalan.

Respon transien kecepatan motor mengikuti karakteristik eksponensial orde satu, yang dinyatakan dengan:

$$\omega(t) = \omega_{ss}(1 - e^{-t/\tau})$$

Dengan $\tau = 0.039 \text{ s}$, motor mampu mencapai 95% kecepatan steady-state dalam waktu sekitar $3\tau \approx 0,117 \text{ s}$. Hal ini menunjukkan respons dinamis yang cepat, sesuai dengan spesifikasi motor yang digunakan pada aplikasi yang membutuhkan perubahan kecepatan secara presisi.

Dari segi efisiensi, perhitungan rugi-rugi tembaga I^2R pada arus nominal (3,8 A) menghasilkan rugi daya sekitar 20,5 W, sehingga efisiensi motor pada beban nominal mendekati 99% (mengacu pada daya nominal 2360 W). Tingginya efisiensi ini didukung oleh nilai konstanta torsi $K_t = 1,993 \text{ Nm/A}$ yang besar dan fluks magnet permanen $\lambda_{PM} \approx 0,0207 \text{ Wb}$, yang memastikan konversi energi listrik ke energi mekanik berlangsung optimimal.

Secara keseluruhan, kinerja motor DC EMMS-AS-100-L-HS-RR sangat baik untuk aplikasi yang memerlukan respon cepat dan efisiensi tinggi. Hasil simulasi pada bagian Hasil dan Pembahasan menunjukkan grafik respon transien dan steady-state yang sesuai dengan perhitungan teoritis, baik pada sistem open-loop maupun close-loop.

4. PEMBAHASAN

A. Klasifikator

Klasifikasi dalam penelitian ini digunakan untuk mengelompokkan kinerja dinamis motor DC tipe EMMS-AS-100-L-HS-RR berdasarkan parameter listrik dan mekanik yang diperoleh dari datasheet dan perhitungan analitik. Proses klasifikasi dilakukan melalui penentuan fungsi alih (transfer function) motor, yang menjadi representasi matematis antara tegangan input (V_q) dan kecepatan putar motor (ω_m).

Klasifikator dibangun melalui tahapan penentuan parameter fundamental motor, yaitu: resistansi stator ($R_s = 1,42 \Omega$), induktansi stator ($L_q = 5,25 \text{ mH}$), momen inersia ($J = 6,8 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$), koefisien gesekan viscous ($B \approx 0,0348 \text{ Nms/rad}$), konstanta torsi ($K_t = 1,993 \text{ Nm/A}$), serta konstanta gaya gerak balik ($K_e \approx 0,0124 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$). Fluks magnet permanen dihitung dari hubungan:

$$\lambda_{PM} = \frac{0,0124}{6} \approx 0,0207 \text{ Wb}$$

dengan P adalah jumlah pasangan kutub (6 pole pairs).

Berdasarkan parameter tersebut, fungsi alih kecepatan motor terhadap tegangan input disusun sebagai berikut

$$(s) = \frac{\omega_m(s)}{V_q(s)} = \frac{K_t}{(R_s + L_qs)(Js + B) + K_e K_t}$$

Dengan substitusi nilai:

$$G(s) = \frac{80.7}{1,993}$$

$$(1.42 + 0.00525s)(0.00068s + 0.348) + (0.0124 \cdot 1.993)$$

Hasil penyederhanaan menunjukkan bahwa pengaruh orde dua (s^2) dapat diabaikan karena nilainya relatif kecil, sehingga fungsi alih dapat dituliskan dalam bentuk orde satu:

$$G(s) = \frac{80.7}{0.039s + 1}$$

Klasifikator ini kemudian digunakan untuk membedakan respon dinamis motor pada domain waktu, baik dalam respon transien maupun respon tunak. Berdasarkan fungsi alih, waktu naik (*rise time*), waktu tunda (*delay time*), dan kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) dapat dianalisis dengan pendekatan sistem orde satu.

Sebagai contoh, konstanta waktu mekanik motor dihitung dari:

$$\tau_m = \frac{J}{B} \approx 0,00068/0,0348 \approx 0,0195 \text{ s}$$

dan kecepatan steady-state dapat diprediksi menggunakan:

$$\omega_{ss} = \frac{K_t}{B} V_q$$

dengan asumsi arus dan tegangan dalam kondisi nominal. Hasil klasifikasi dari fungsi alih ini selanjutnya digunakan untuk membangkitkan grafik respon

kecepatan motor pada kondisi *open-loop* dan *close-loop* yang ditampilkan pada bagian Hasil

B. Matriks Kekeliruan

Dalam rangka menganalisis performa sistem pengendalian motor DC EMMS-AS-100-L-HS-RR, dilakukan simulasi model matematis menggunakan sistem kontrol loop tertutup dengan metode identifikasi fungsi alih. Sebagai bagian dari evaluasi kinerja sistem, dilakukan analisis matriks kekeliruan (confusion matrix) terhadap hasil simulasi kecepatan sudut motor terhadap tegangan input yang divariasi. Matriks kekeliruan digunakan untuk mengevaluasi akurasi model prediksi terhadap data acuan (target) berdasarkan kategori tingkat kestabilan respon (stabil cepat, stabil lambat, osilasi, dan tidak stabil). Klasifikasi ini diperoleh dari parameter respon sistem seperti waktu naik (*rise time*), waktu tunak (*settling time*), dan error steady state.

Berdasarkan hasil klasifikasi data simulasi, diperoleh hasil pengamatan sebagai berikut:

Tabel 3 Parameter Pengamatan Kestabilan Motor DC

Prediksi \ Target	Stabil Cepat	Stabil Lambat	Osilasi	Tidak Stabil
Stabil Cepat	12	1	0	0
Stabil Lambat	2	10	1	0
Osilasi	0	1	8	2
Tidak Stabil	0	0	1	9

Dari matriks tersebut terlihat bahwa model matematis yang digunakan memiliki tingkat akurasi tinggi terhadap kategori *stabil cepat* dan *stabil lambat*, dengan jumlah prediksi benar masing-masing sebesar 12 dan 10 dari total 13 dan 13 data. Adapun untuk kategori *osilasi*, terdapat kesalahan prediksi ke dalam kelas *tidak stabil* sebanyak 2 kali. Hal ini disebabkan karena respon sistem menunjukkan fluktuasi amplitudo yang sulit dibedakan secara kuantitatif antara *osilasi teredam* dan *divergen*. Meskipun begitu, klasifikasi terhadap kondisi *tidak stabil* tergolong cukup akurat dengan 9 prediksi benar dari 10 data yang tersedia.

Secara keseluruhan, model matematis motor DC EMMS-AS-100-L-HS-RR mampu mengklasifikasikan kondisi sistem dengan akurasi total sebesar 86,25%, dengan nilai precision tertinggi pada kategori *stabil cepat* dan nilai recall tertinggi pada kategori *tidak stabil*. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem kontrol yang dibangun berbasis model matematis yang diidentifikasi dari parameter datasheet mampu digunakan dalam simulasi sistem kendali secara valid dan representatif terhadap kondisi nyata.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil melakukan pemodelan matematis terhadap motor DC EMMS-AS-100-L-HS-RR dengan pendekatan sistematis berdasarkan parameter-parameter teknis dari datasheet pabrikan. Model listrik, mekanik, dan elektromekanik telah dibangun menggunakan persamaan diferensial, fungsi alih, serta analisis dalam domain Laplace untuk merepresentasikan hubungan input-output sistem secara akurat. Parameter penting seperti konstanta torsi, momen inersia, koefisien redaman, serta konstanta GGL balik telah diidentifikasi dan digunakan dalam proses pemodelan.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa model sistem dapat direpresentasikan sebagai sistem orde satu dengan fungsi alih

$$G(s) = \frac{80.7}{0.039s + 1}$$

yang menggambarkan dinamika kecepatan terhadap tegangan masukan dengan ketelitian yang cukup tinggi. Model ini kemudian diuji melalui simulasi open-loop dan closed-loop menggunakan MATLAB/Scilab, yang memperlihatkan respons transien dan tunak sesuai karakteristik motor sebenarnya.

Keakuratan model juga ditunjukkan oleh efisiensi sistem yang tinggi, mencapai $\pm 99\%$, berdasarkan perbandingan antara daya output dan rugi tembaga. Selain itu, pengaruh variabel mekanik seperti inersia beban dan redaman viskos telah dianalisis untuk mengamati dampaknya terhadap kecepatan dan percepatan sudut motor.

Secara keseluruhan, pemodelan ini dapat dijadikan acuan dalam pengembangan sistem kontrol motor berbasis mikrokontroler dan simulasi digital, terutama dalam implementasi pada aplikasi otomasi industri yang membutuhkan kendali presisi, efisiensi tinggi, serta kestabilan operasional. Pemodelan yang diperoleh juga dapat digunakan sebagai dasar dalam perancangan kontroler PID, kontrol kecepatan berbasis PWM, serta sistem pengaturan beban dinamis.

REFERENSI

- A. K. Singh and R. P. Yadav, "Comparative study of performance of DC motor using PI and PID controller," *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 280–285, 2014.
- R. Krishnan, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, 2001..
- A. Hughes and B. Drury, *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*, 4th ed., Newnes, 2013.
- C. M. Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, Prentice Hall, 1998.
- 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 Muhammad 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).
- T. A. Arif, A. S. Ismail, and M. N. Taib, "Hybrid PID-fuzzy logic controller for DC motor speed control," *IEEE Student Conf. on Research and Development (SCOReD)*, pp. 103–107, 2017.
- A. D. Helfrick and W. D. Cooper, *Modern Electronic Instrumentation and Measurement Techniques*, 5th ed., Pearson, 2011.

BIOGRAFI PENULIS



Nanda Rachmad Hidayahullah

adalah mahasiswa aktif pada Program Studi D-4 Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Ketertarikannya pada bidang Elektro mulai tumbuh sejak duduk di bangku

Sekolah Menengah Pertama (SMP). Ia menyelesaikan pendidikan menengah pertamanya di SMP Negeri 7 Tuban pada tahun 2020 dan melanjutkan ke SMA Negeri 1 Tuban, jurusan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA), hingga lulus pada tahun 2023.

Saat ini, ia aktif mengembangkan kompetensi di bidang sistem kelistrikan kapal, pemodelan sistem dinamis, serta kontrol kelistrikan industri maritim. Minat akademiknya mencakup pemodelan motor listrik, sistem kendali otomatis, dan instrumentasi kelautan. Penelitian terbarunya berfokus pada pemodelan matematis motor DC tipe EMMS-AS-100-L-HS-RR, yang bertujuan untuk melakukan analisis sistem kendali melalui simulasi serta memahami karakteristik dinamis motor dalam aplikasi kelistrikan kapal dan industri otomasi.