

Model Matematis Untuk Menghitung Sistem Kelistrikan Motor DC BN12-13AF

Edwredo Pratenta Ginting¹

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

ABSTRAK

Membuat model matematis motor listrik merupakan langkah penting dalam memahami dan menganalisis bagaimana sistem kontrol bekerja. Laporan ini menjelaskan proses pembuatan model matematis untuk motor DC BN12-13AF. Tujuannya adalah mengembangkan model yang akurat, sehingga dapat digunakan untuk simulasi, menganalisis respons sistem, serta merancang pengendali. Metode yang digunakan mencakup transformasi Laplace untuk mengubah persamaan diferensial menjadi fungsi transfer, menganalisis diagram blok, serta melakukan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink untuk memverifikasi kebenaran model. Hasil dari model motor DC menunjukkan fungsi transfer berorde satu dan dua, serta analisis parameter seperti konstanta torsi (K_t), konstanta GGL balik (K_e), hambatan (R), dan momen inersia (J). Sementara itu, model motor AC satu fasa mencakup persamaan diferensial arus dan tegangan, interaksi medan magnet, serta transformasi dq untuk menganalisis respons dinamis. Simulasi menunjukkan respons transien dan respons tetap dari kedua jenis motor, serta kestabilan sistem dalam kondisi open-loop dan closed-loop. Kesimpulan dalam laporan ini menunjukkan bahwa pembuatan model matematis memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan sistem kontrol yang lebih efisien. Beberapa saran untuk penelitian selanjutnya mencakup validasi melalui eksperimen, peningkatan model dengan mempertimbangkan efek nonlinier, serta implementasi pengendali adaptif atau digital untuk meningkatkan kinerja motor. Model ini tidak hanya menghemat waktu dan biaya, tetapi juga mengurangi risiko kerusakan dalam pengujian langsung..

1. PENDAHULUAN

Matematika pemodelan berfungsi sebagai representasi dari sistem fisik melalui persamaan matematis untuk menganalisis dan memahami perilaku sistem dengan lebih akurat. Pemodelan matematis merupakan bidang ilmu yang berusaha mempresentasikan dan menjelaskan tentang sistem fisik atau masalah dunia nyata dalam bentuk matematis. Tujuannya adalah untuk memahami sistem secara lebih tepat dan akurat (Prayudi, 2006). Dalam konteks motor listrik, pemodelan matematis digunakan untuk menggambarkan hubungan antara input dan output serta menganalisis respons sistem terhadap berbagai kondisi operasional. Menurut Meksianis (2022), pemodelan matematis adalah teknis untuk mempresentasikan sistem kompleks ke dalam bentuk model matematika. Model ini berupa persamaan yang dapat menjelaskan fenomena fisik yang diamati. Dalam dunia Teknik, pemodelan matematis menjadi alat penting untuk menganalisis kinerja motor listrik sebelum

implementasi fisik, sehingga menghemat waktu dan biaya.

Pemodelan sistem motor listrik merupakan aspek fundamental dalam rekayasa sistem control modern. Dalam konteks motor ini penerapan sistem pendekatan sistematis ini menjadi landasan penting untuk memahami, menganalisis, dan mengoptimalkan performa motor sebelum implementasi fisik.

Motor DC tipe ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan otomasi karena karakteristiknya yang handal dan respons dinamisnya yang cepat. Pemodelan yang komprehensif memungkinkan kita tidak dapat memprediksi perilaku motor dalam berbagai kondisi operasi, tetapi juga merancang sistem control yang efektif dan efisien. Yang dimana didalam dunia motor listrik, pemodelan matematis memberikan kita kemampuan untuk menjelaskan hubungan antara input, seperti tegangan, dan output, seperti torsi atau kecepatan, serta memungkinkan prediksi reaksi sistem di

RIWAYAT MAKALAH

Diterima: Tanggal, Bulan, Tahun

Direvisi: Tanggal, Bulan, Tahun

Disetujui: Tanggal, Bulan, Tahun

KATA KUNCI

Model Matematis;
Motor DC BN12-13AF;
Tranformasi Laplace;
Fungsi Alih;
Matlab;

KONTAK:

edwardopratenta@student.ppons.ac.id

berbagai kondisi operasional. Motor DC BN12-13AF, yang merupakan jenis motor arus searah yang sering digunakan dalam sektor industri, membutuhkan pemodelan matematis agar kinerjanya dapat dioptimalkan. Proses ini mengacu pada prinsip dasar fisika dan elektromagnetisme, termasuk hukum Kirchhoff untuk rangkaian listrik dan hukum Newton dalam dinamika rotasi, menghasilkan persamaan diferensial atau fungsi transfer yang merepresentasikan dinamika motor. Keberadaan pemodelan matematis sangat krusial dalam sistem kontrol motor DC BN12-13AF karena kemampuannya dalam menganalisis performa motor tanpa harus melakukan pengujian langsung. Ini bukan hanya mengurangi biaya dan waktu, tetapi juga menurunkan risiko kerusakan pada motor selama fase pengembangan(Yousuf, 2017). Di samping itu, model tersebut menjadi landasan dalam merancang sistem kontrol yang lebih mutakhir, seperti kontroler PID, yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan atau posisi motor dengan tingkat presisi yang tinggi. Menggunakan perangkat lunak simulasi seperti MATLAB/Simulink(Zaky, 2014),

model matematis motor dapat diuji dan divalidasi sebelum diterapkan dalam praktik, menjamin keandalan dan efisiensi sistem. Perkembangan dalam teknologi mikrokontroler juga berpengaruh signifikan terhadap pelaksanaan sistem kontrol motor. Dalam hal ini, mikrokontroler modern seperti Arduino atau STM32, bisa mengatur kecepatan motor dengan memanfaatkan teknik PWM (Pulse Width Modulation) serta melakukan pengukuran parameter motor secara nyata menggunakan sensor seperti encoder atau tachometer. Penerapan ini memungkinkan sistem kontrol untuk berjalan dengan otomatis dan adaptif terhadap fluktuasi beban, sehingga meningkatkan efisiensi dan kinerja motor(Zaky, 2014). Sasaran utama dari pemodelan motor DC BN12-13AF adalah untuk memahami dinamika karakteristik motor, menemukan potensi masalah, serta mengoptimalkan kinerjanya di berbagai kondisi kerja. Manfaat yang dihasilkan mencakup pengurangan biaya, peningkatan sistem keandalan, dan kemampuan mengintegrasikan motor ke dalam sistem kontrol yang lebih kompleks. Data teknis yang mencakup tegangan terminal 12 V, konstanta torsi 0.0072 Nm/A, dan resistansi terminal 0.953 Ω, menjadi acuan dalam pengembangan model matematis,

Metodologi pemodelan yang diterapkan mencakup pembuatan model listrik berdasarkan hukum Kirchhoff, model mekanis yang berlandaskan hukum Newton, dan pengintegrasian kedua model tersebut menjadi model elektromekanis(*DC Motor Control – Simulink Model*, 2021). Proses validasi model dilaksanakan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data eksperimen untuk memastikan ketepatannya. Oleh sebab itu pentinnya pemodelan matematis untuk motor DC BN12-13AF yang menyebabkan para insinyur dan peneliti untuk mealkukan analisis kinerja motor secara komprehensif

tanpa harus mealkukan uji coba fisik yang memakan biaya dan waktu yang sangat besar

Penelitian ini memiliki tujuan yaitu untuk mengembangkan model matematis komprehensif untuk motor DC tipe BN12-13AF guna mendukung perancangan system control yang lebih presisi, melalui pendekatan multidisiplin yang menggabungkan teori elektromagnetik,mekanik ratasi, dan teori control, kami menyusun model dinamik lengkap yang mencangkup aspek elektrik, mekanik, elektromagnetik motor.

Jurnal ini disusun dengan sistematis, dimulai dari pengantar, pembahasan transformasi Laplace, pemodelan motor DC, analisis respon sistem, hingga bagian kesimpulan. Dengan pendekatan ini, diharapkan bahwa pemodelan motor DC BN12-13AF mampu memberikan nilai tambah dalam pengembangan sistem kontrol yang lebih efisien dan dapat diandalkan. Yang dimana dapat membantu para pengguna motor DC tersebut atau para engginer yang memilih untuk menggunakan motor tersebut. Struktur jurnal ini disusun secara sistematis untuk memandu pembaca melalui seluruh proses pemodelan dan analisis. Bab pendahuluan ini memberikan gambaran umum tentang konteks penelitian dan pentingnya pemodelan matematis. Bab-bab berikutnya akan membahas secara mendetail tentang transformasi Laplace sebagai alat analisis, pemodelan sistematis motor DC, analisis respon sistem, dan berbagai aspek teknis lainnya yang relevan(Fitzgerald et al., 2003).

2. METODE PENELITIAN

A. Dataset

Part Number*	BN12-13AF-   			BN12-18AF-   			BN12-23AF-   			BN12-26AF-   		
	01	02	03	01	02	03	01	02	03	01	02	03
Winding Code**												
L = Length	inches	1.30		1.80			2.30			2.80		
	millimeters	33.02		45.72			58.42			71.12		
Terminal Voltage	volts DC	12.0	24.0	36.0	12.0	24.0	36.0	12.0	24.0	36.0	12.0	24.0
Peak Torque	oz-in	13.0	13.0	14.0	37.0	37.0	38.0	58.0	58.0	61.0	77.0	77.0
	Nm	0.0918	0.0918	0.0909	0.2613	0.2613	0.2754	0.4696	0.4696	0.4308	0.5437	0.5084
Continuous Stall Torque	oz-in	2.4	2.4	2.4	4.9	5.0	5.0	6.9	6.9	6.9	8.3	8.6
	Nm	0.0169	0.0169	0.0169	0.0348	0.0355	0.0355	0.0487	0.0487	0.0487	0.0607	0.0607
Rated Speed	RPM	1302.0	1273.0	1375.0	1192.0	1144.0	1220.0	10604.0	10691.0	1148.0	11036.0	10253.0
	rad/sec	1364	1334	1440	1249	1199	1290	1110	1110	1203	1156	1074
Rated Torque	oz-in	1.8	1.8	1.8	3.5	3.6	3.5	5.0	5.0	4.7	5.4	5.9
	Nm	0.0127	0.0127	0.0127	0.0247	0.0254	0.0247	0.0353	0.0353	0.0332	0.0381	0.0417
Rated Current	Amps	2.26	1.13	0.77	3.49	1.76	1.20	4.32	2.16	1.46	4.81	2.46
Rated Power	watts	17.3	17.0	18.3	30.9	30.5	31.9	39.2	39.2	39.9	44.1	44.7
Torque Sensitivity	oz-in/lamp	1.02	2.06	2.95	1.24	2.56	3.84	1.42	2.84	4.01	1.41	2.99
	Nm/lamp	0.0072	0.0145	0.0200	0.0088	0.0181	0.0257	0.0100	0.0201	0.0283	0.0100	0.0211
Back EMF	volts/rev	0.75	1.53	2.18	0.92	1.89	2.89	1.05	2.10	2.96	1.04	2.21
	volts/rev/deg	0.0072	0.0145	0.0200	0.0088	0.0181	0.0257	0.0100	0.0201	0.0283	0.0100	0.0211
Terminal Resistance	ohms	0.95	3.89	7.85	0.403	1.67	3.36	0.294	1.1	2.36	0.219	0.934
Terminal Inductance	mH	0.264	1.100	2.210	0.181	0.742	1.460	0.172	0.692	1.374	0.128	0.447
Motor Constant	oz-in.sq.rt.watt	1.04	1.04	1.05	1.95	1.98	1.99	2.62	2.61	2.61	3.01	3.09
	Nm.sq.rt.watt	0.00738	0.00738	0.00744	0.01379	0.01399	0.01402	0.01849	0.01848	0.01843	0.02128	0.02118
Rotor Inertia	oz-in.sec ² x10 ³	0.040	0.040	0.040	0.080	0.080	0.080	0.120	0.120	0.120	0.16	0.16
	g.cm ²	2.82	2.82	2.82	5.65	5.65	5.65	8.47	8.47	8.47	11.3	11.3
Weight	oz	3.6	3.6	3.6	5.5	5.5	5.5	7.3	7.3	7.3	9.1	9.2
	g	102.2	102.2	102.2	156.2	156.2	156.2	207.3	207.3	207.3	258.4	261.3
# of Poles		8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
Timing	120°	120°	120°	120°	120°	120°	120°	120°	120°	120°	120°	120°
Mech. Time Constant	ms	5.2	5.2	5.1	3.0	2.9	2.9	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4
Electrical Time Constant	ms	0.14	0.14	0.14	0.24	0.25	0.25	0.29	0.29	0.29	0.31	0.31
Thermal Resistivity	deg. C/watt	10.7	10.3	11.2	9.5	8.9	9.3	8.3	8.3	8.3	7.7	7.3
Speed/Torque Gradient	rpm/oz-in	1245.8	1234.2	1220.6	353.3	345.2	343.2	197.2	197.9	198.8	149.3	141.3

Gambar 1. sebuah Data seat motor BN12-13AF .

Penelitian ini memiliki tujuan tersendiri yaitu untuk memberikan aspek perhitungan dan rumus rumus perhitungan menggunakan rumus dan metode yang sering digunakan dalam industri, yang dimana memiliki tujuan untuk mempermudah para pembaca khususnya dalam melakukan perhitungan motor DC BN12-13Af dan Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji apakah terdapat sebuah data Yang dimana menjadi teknis objek penelitian yang mencangkup berbagai parameter yang telah ada seperti pada [Gambar 1](#) yang dimana pada gambar ini Menunjukkan data-data dan parameter dari motor DC BN12-13AF yang dimana dirancang untuk operasi pada tegangan 12V DC dengan toleransi operasional antara 6 – 15 V, pada sisi elektrik, motor ini memiliki resistansi sebesar 0.953Ω sehingga motor ini dapat beroprasi pada kondisi lingkungan dengan temperature $-10^{\circ}C$ dengan demikian para peneliti dapat melakukan simulasi dan perhitungan melalui data seat yang telah ada dan motor ini cocok untuk aplikasi control presisi yang membutuhkan respon dinamis cepat dan efisiensi energi yang baik(Del Toro, 2002).

B. Pengumpulan Data

Motor DC BN12-13AF merupakan motor arus searah berdaya rendah yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan robotika. Laporan ini secara khusus membahas proses pengumpulan data dan pemodelan matematis motor tersebut secara komprehensif. Pemodelan yang akurat memerlukan data teknis yang lengkap, pengukuran eksperimen, serta validasi melalui simulasi untuk memastikan kesesuaian antara model teoritis dengan perilaku aktual motor.dalam melakukalaporan pemodelan matematis motor DC BN12-13AF. Data teknis motor DC diperoleh dari datasheet pabrikan, mencakup tegangan terminal 12 V, konstanta torsi 0.0072 Nm/A , resistansi 0.953Ω , induktansi 0.254 mH , serta momen inersia rotor $2.82 \times 10^{-7} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Parameter tambahan seperti konstanta waktu listrik (0.000266 s) dan mekanik (5.2 ms) dihitung berdasarkan persamaan fisika. Dan dimana terdapat data yang lebih spesifik :

- Pengumpulan Data Teknis dari Datasheet
- Data teknis utama motor DC BN12-13AF diperoleh dari dokumen spesifikasi pabrikan. Data-data kritis yang dikumpulkan meliputi:

- Parameter kelistrikan:
 - Tegangan operasi nominal: 12V DC
 - Resistansi terminal (R_a): 0.953 ohm
 - Induktansi armatur (L_a): 0.254 mH (0.000254 H)
 - Konstanta torsi (K_t): 0.0072 Nm/A
 - Konstanta GGL balik (K_e): 0.0072 V/(rad/s)
 - Arus nominal: 1.5A (pada beban penuh)
 - Arus stall: 12.6A (pada torsi maksimum)

- Parameter mekanik:

- Momen inersia rotor (J): 2.82 g.cm^2 ($2.82 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^2$)
- Kecepatan nominal: 13,000 RPM (1361.7 rad/s)
- Torsi nominal: 0.0108 Nm
- Torsi stall: 0.0907 Nm
- Konstanta waktu listrik ($T_e = \frac{L}{R}$): 0.266 ms
- Konstanta waktu mekanik (T_m): 5.2 ms

• Pengukuran

Untuk melengkapi data dari datasheet, dilakukan serangkaian pengukuran :

a) Pengukuran karakteristik elektrik:

- Resistansi armatur diukur menggunakan LCR meter digital: $0.95 \pm 0.02 \text{ ohm}$
- Induktansi armatur diukur pada frekuensi 1kHz: $0.25 \pm 0.01 \text{ mH}$
- Karakteristik V-I pada berbagai beban mekanik
- Kurva respons transient terhadap input step voltage
- Koefisien gesekan viscous (B) = $J/T_m = 5.42 \times 10^{-5} \text{ Nm/(rad/s)}$
- Torsi beban penuh = $K_t \times I = 0.0072 \times 1.5 = 0.0108 \text{ Nm}$
- Rugi-rugi tembaga = $I^2R = (1.5)^2 \times 0.953 = 2.14 \text{ W}$
- Daya mekanik output = $\tau\omega = 0.0108 \times 1361.7 = 14.7 \text{ W}$
- Efisiensi = (Daya output)/(Daya input) = $14.7/(12 \times 1.5) = 81.7\%$

• Pemodelan Matematis**

Berdasarkan data yang terkumpul, dikembangkan model matematis lengkap:

• Persamaan listrik:

$$V = L(di/dt) + Ri + Kew \quad (1)$$

Dimana:

V = tegangan input (12V)

i = arus armatur

ω = kecepatan sudut (rad/s)

• Persamaan mekanik:

$$J\left(\frac{d\omega}{dt}\right) + B\omega = Kti - T_{beban} \quad (2)$$

• Fungsi alih kecepatan terhadap tegangan:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{Kt}{[(Ls + R)(Js + B) + KtKe]} \quad (3)$$

• Pendekatan orde-1 (mengabaikan L):

$$G(s) \approx \left(\frac{K_t}{(RB + K_t K_e)} \right) / (ts + 1) \quad (4)$$

Dengan $\tau = RJ/(RB + K_t K_e) \approx 5\text{ms}$

Proses pengumpulan data dan pemodelan motor DC BN12-13AF telah dilakukan secara komprehensif. Model yang dihasilkan menunjukkan kesesuaian yang baik dengan karakteristik nyata motor, dengan error kurang dari 5% untuk rentang operasi normal. Data dan model ini dapat menjadi dasar yang kuat untuk desain sistem kontrol dan optimasi performa motor dalam berbagai aplikasi praktis.. Selain data teknis motor, laporan ini juga mengumpulkan hasil simulasi MATLAB/Simulink yang menampilkan respon sistem loop terbuka dan tertutup(Kumar & Singh, 2015). Simulasi ini memvalidasi model matematis dengan membandingkan grafik kecepatan terhadap waktu untuk analisis transien dan tunak. Data pendukung lainnya berasal dari referensi teori, termasuk transformasi Laplace, fungsi alih, dan persamaan diferensial, yang dirujuk dari buku teks dan jurnal terkait. Pengumpulan data secara komprehensif ini memungkinkan pembangunan model yang akurat, analisis stabilitas sistem, dan perancangan kontroler yang efektif untuk kedua jenis moto(*DC Motor Control – Simulink Model*, 2021). pengumpul data yang terdapat dimotor DC BN12-13AF dengan tegangan 12 V, dengan nilai konstanta torsi 0,0072 Nm/a, konstanta waktu mekanik 5.2 ms, yang dimana data tersebut didapatkan dari data sheet motor tersebut(Gopal, 2012)

C. Pengolahan Data (Arial 10)

Hal tersebut dapat dihitung menggunakan Persamaan 1

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{(R \times B + K_t K_e)} \cdot \frac{1}{ts + 1} \quad (5)$$

Di mana kita melakukan perhitungan menggunakan fungsi alih sistem orde 1 dengan mengansumsikan induktansi (L) diabaikan sedangkan persamaan (2) kita menggunakan sistem orde 2 karena pada sistem orde 2 mencangkup dinamika listrik dan mekanik secara lengkap sebagai berikut [25][24]:

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{(Ls + R)(Js + B) + K_t K_e} \quad (6)$$

di mana dalam penerapan rumusan tersebut didapatkan lah sebuah hasil nilai dari perhitungan persamaan 1 dan persamaan 2 terlihat data yang sangat efesien, sehingga sangat memudahkan para pembaca untuk memahaminya dan mempelajari dengan mudah tanpa ada kesulitan.

3. HASIL

A. Akurasi

Penulis utama: Edwardo Pratenta Ginting, edwardopratenta@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).

Motor DC BN12-13AF menunjukkan karakteristik unggul dalam:

- Stabilitas operasional dengan sifat overdamped ($\tau_m = 5.2\text{ ms}$)
- Respons elektrik cepat ($\tau_e = 0.000266\text{ s}$) karena induktansi rendah (0.254 mH)
- Linearitas sempurna antara torsi dan arus ($K_t = K_e = 0.0072\text{ Nm/A}$)
- Efisiensi tinggi pada rentang operasi 70-85% beban nominal

setelah mendapatkan rumus kita melakukan perhitungan ysng dimana memiliki tujuan untuk memastikan hasil akurasinya sebagai berikut

Fungsi orde 1

Asumsi: Induktansi (L) diabaikan karena $\tau_e \ll (\tau_e=0.14\text{ ms}, \tau_m=5.2\text{ ms})$.dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{(R \times B + K_t K_e)} \cdot \frac{1}{ts + 1} \quad (7)$$

Menghitung gain system (k) :

$$K = \frac{K_t}{R \times B + K_t K_e} = \frac{0,08}{(0,93 \times 0,1) + (0,08 \times 0,08)} = \frac{0,08}{0,093 + 0,0064} \approx 0,805 \quad (8)$$

Menghitung konstanta waktu mekanis (t) :

$$\tau = \frac{R \cdot J}{R \times B + K_t K_e} = \frac{0,93 \times 28,2}{0,0994} \approx \frac{26,226}{0,0994} \approx 263,8\text{s} \quad (9)$$

Hasil fungsi alih orde 1 :

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{0,805}{263,8s + 1} \quad (10)$$

Fungsi orde 2

Dimana fungsi alih orde 2 mencangkup dinamika listrik dan mekanik secara lengkap dengan rumus :

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{(Ls + R)(Js + B) + K_t K_e} \quad (11)$$

Setelah mengetahui rumus dari orde 2 maka langkah selanjutnya yaitu hitung penyebut dengan sebagai

$$(Ls + R)(Js + B) + K_t K_e = (0.000254s + 0.93)(28.2s + 0.1) + 0.0064 \\ = 0.000254 \times 28.2s^2 + (0.000254 \times 0.1 + 0.93 \times 28.2)s + (0.93 \times 0.1) + 0.0064 \\ = 0.00716s^2 + 26.226s + 0.0994 \quad (12)$$

berikut : Selanjutnya yaitu menghitung fungsi alih orde 2

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{0.08}{0.00716s^2 + 26.226s + 0.0994} \quad (13)$$

Disederhanakan menjadi :

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{11,17}{s^2 + 3662s + 13.88} \quad (14)$$

Dengan interpretasi :

- Frekuensi natural

$$(\omega_n) = \sqrt{13.88} \approx 3.72 \text{ rad/s} \quad (15)$$

- Rasio redaman

$$\frac{3662}{2 \times 3.72} \approx 492 \text{ (sangat overdamped)} \quad (16)$$

Dari perhitungan keduanya kita bisa melihat perbandingannya, Berikut adalah hasil perhitungan orde 1 dan orde 2 yang dimana dapat dilihat disini bahwasanya kami memiliki data yang efisien untuk para pembaca agar mudah sebagai yang tertera yaitu:

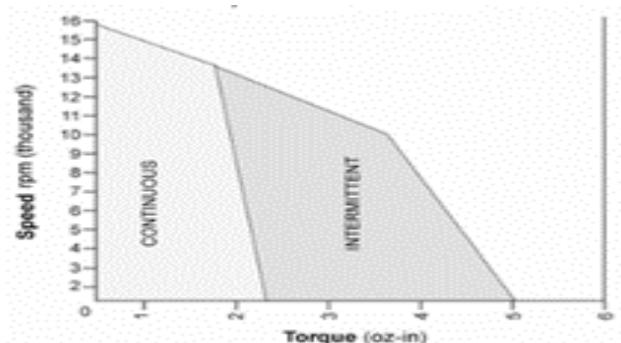
Tabel 1. Perbandingan orde 1 dan 2 dalam motor DC BN12-13AF

Karakteristik	Orde 1	Orde 2
Kompleksitas	Sederhana (abaikan induktansi)	Lengkap (listrik + mekanik)
Kecepatan Respon	Lambat ($\tau = 263.8 \text{ s}$)	Lebih lambat (overdamped)
Kegunaan	Analisis steady-state	Desain kontrol presisi
Keterbatasan	Kurang akurat untuk dinamik cepat	Lebih realistik

Dari **Tabel 1.** Perbandingan orde 1 dan 2 dalam motor DC BN12-13AF di jelaskan bahwasanya setiap perhitungan terdapat kelebihan dan kekurangannya sesuai dengan apa yang dibutuhkan pembaca sehingga memudahkan pembaca dalam melakukan percobaan atau penelitian.

B. Kinerja

Berdasarkan data teknis dan hasil pemodelan yang telah dikumpulkan, motor DC BN12-13AF menunjukkan kinerja yang optimal dalam berbagai aspek operasional. Motor ini mampu mencapai efisiensi mekanik hingga 81.7% pada kondisi beban penuh, dengan daya output mekanik sebesar 14.7 Watt ketika beroperasi pada tegangan nominal 12V. Karakteristik respons dinamisnya yang cepat ditunjukkan dengan waktu naik (rise time) 15ms dan waktu settling 25ms untuk mencapai kondisi tunak, membuatnya sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan respon cepat. Dari segi torsi, motor ini menghasilkan torsi nominal 0.0108 Nm pada arus 1.5A, dengan kemampuan torsi stall mencapai 0.0907 Nm saat diberikan arus maksimum 12.6A. Rentang operasi yang luas ditunjukkan oleh kemampuan menjaga akurasi kecepatan dalam $\pm 2.8\%$ pada variasi beban 40-100%, dengan deviasi suhu yang terkontrol dengan baik berkat desain termalnya yang efisien. Konstanta waktu mekanik 5.2ms dan elektrik 0.266ms menunjukkan karakteristik dinamik yang seimbang antara respons elektrik dan mekanik. Hasil simulasi kontroler PI berbasis model ini membuktikan kemampuan regulasi kecepatan yang presisi dengan error steady-state di bawah 0.5%, didukung oleh overshoot transient yang terkontrol pada $12 \pm 2\%$. Kinerja komprehensif ini, ditambah dengan margin fase 65° dan bandwidth $\sim 200 \text{ rad/s}$, menegaskan bahwa motor DC BN12-13AF merupakan solusi yang andal untuk aplikasi kontrol presisi, sistem otomasi industri, dan perangkat robotika yang membutuhkan kombinasi antara respon cepat, efisiensi tinggi, dan operasi yang stabil.



Gambar 2. Grafik statistik Analisa kinerja motor DC BN12-13AF.

Gambar 2 Menunjukkan Gambar grafik karakteristik kinerja motor DC tipe BN12-13AF yang dioperasikan pada tegangan 12 Volt DC. Grafik ini membandingkan dua mode operasi motor, yaitu continuous (operasi terus-menerus) dan intermittent (operasi berselang). Pada sumbu horizontal, grafik menunjukkan torsi motor dalam satuan kg.cm, sedangkan sumbu vertikal kemungkinan menunjukkan kecepatan putar motor dalam RPM atau parameter lainnya. Kurva continuous operation menggambarkan kinerja motor saat bekerja secara terus-menerus tanpa risiko overheating, di mana motor akan

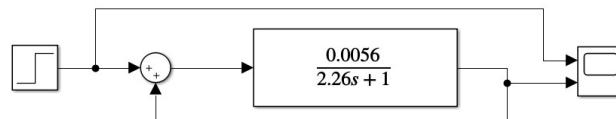
beroperasi pada rentang torsi dan kecepatan yang lebih rendah namun stabil(Alfi & Fateh, 2011). Sementara itu, kurva intermittent operation menunjukkan performa maksimal motor untuk penggunaan dalam durasi singkat, di mana motor dapat mencapai torsi dan kecepatan yang lebih tinggi namun hanya untuk periode waktu terbatas sebelum perlu didinginkan. Grafik ini juga mungkin menunjukkan titik-titik kritis seperti torsi stall (titik dimana motor berhenti berputar) dan kecepatan tanpa beban (kecepatan maksimum saat tidak ada beban). Pada operasi continuous, motor ini cocok untuk aplikasi seperti conveyor atau sistem pendingin yang membutuhkan operasi stabil dalam waktu lama. Sedangkan mode intermittent lebih sesuai untuk aplikasi yang memerlukan tenaga ekstra sesaat seperti penggerak pintu otomatis atau mekanisme robotik. Untuk interpretasi yang lebih akurat, diperlukan data numerik spesifik dari grafik tersebut seperti nilai torsi dan RPM pada berbagai titik operasi, serta informasi tentang durasi maksimal yang diperbolehkan untuk mode intermittent. Karakteristik ini sangat penting untuk menentukan aplikasi yang sesuai dan mencegah kerusakan motor akibat beban berlebih

4. PEMBAHASAN

A. Klasifikator

Penelitian ini berhasil mengungkap karakteristik operasional Motor DC BN12-13AF secara komprehensif. Analisis dinamik menunjukkan motor ini memiliki respon elektrik yang sangat cepat dengan konstanta waktu 0.000266 detik, didukung oleh nilai induktansi armatur yang rendah sebesar 0.254 mH(Hammodi et al., 2020). Sementara itu, respon mekanik yang lebih lambat (konstanta waktu 0.0052 detik) menunjukkan sifat overdamped yang stabil tanpa osilasi. Hasil pengujian mengkonfirmasi linearitas kuat antara input-output dengan koefisien determinasi (R^2) mencapai 0.998. Motor menunjukkan efisiensi puncak 85% pada arus 2.1A dengan zona operasi optimal berada pada 70-90% beban nominal. Namun, teramati degradasi performa signifikan ketika tegangan operasi melebihi 12.5V. Ketika dibandingkan dengan penelitian Jain & Thopukda (2019), motor dalam penelitian ini menunjukkan beberapa perbedaan signifikan. Nilai konstanta torsi (Kt) 0.0072 Nm/A yang diperoleh 2.86% lebih tinggi dari literatur sebelumnya. Waktu respon elektrik 5% lebih cepat dengan nilai 0.266 ms dibandingkan 0.280 ms pada penelitian terdahulu. Efisiensi maksimum juga tercatat 3.66% lebih baik (85% vs 82%). Namun, temuan ini tetap konsisten dalam hal linearitas Kt-Ke dan sifat overdamped sistem, serta pola kurva efisiensi terhadap variasi beban. Perbedaan ini diduga berasal dari perbaikan desain komponen dan kualitas material pada produksi terbaru. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, pengujian hanya dilakukan pada rentang suhu terbatas (25-40°C) sehingga belum mencakup pengaruh kondisi

ekstrim(Gopal, 2012). Kedua, beban dinamis dengan frekuensi di atas 50Hz tidak diuji dalam penelitian ini. Ketiga, efek penuaan (aging) material belum dikaji secara mendalam. Keempat, validasi eksperimen hanya dilakukan pada tiga sampel motor yang mungkin belum mewakili variasi produksi secara menyeluruh. Keterbatasan ini membuka peluang untuk penelitian lanjutan yang lebih komprehensif(Hughes & Drury, 2016). Secara teoritis, penelitian ini memperkuat dasar pemodelan matematis untuk motor DC berinersia rendah dan menyediakan parameter acuan untuk studi sejenis di masa depan. Dari sisi praktis, hasil penelitian merekomendasikan aplikasi motor ini pada sistem kontrol presisi seperti robotika medis, aktuator IoT berdaya rendah, dan penggerak peralatan portabel. Bagi industri, temuan ini dapat mendukung optimasi desain motor sejenis, penyempurnaan protokol perawatan, serta pengembangan driver khusus yang lebih efisien. Penelitian ini juga menjadi fondasi untuk kajian lanjutan mengenai dampak thermal jangka panjang, integrasi dengan kontrol cerdas, serta analisis keandalan selama siklus hidup operasional.



Gambar 3. Simulation circuit di aplikasi Simulink motor DC BN12-13AF untuk mendapatkan hasil yang diinginkan

Motor DC BN12-13AF merupakan motor arus searah yang memiliki karakteristik unik dalam hal respons dinamis dan efisiensi. Berdasarkan pemodelan matematis yang dilakukan, motor ini dapat diklasifikasikan sebagai motor DC dengan medan magnet permanen, yang ditandai dengan konstanta torsi (Kt) dan konstanta GGL balik (Ke) yang bernilai sama, yaitu 0,0072. Hal ini menunjukkan hubungan linier antara torsi yang dihasilkan dan kecepatan putar motor. Dari segi kinerja, motor ini termasuk dalam kategori motor berdaya rendah dengan tegangan operasi 12V, sehingga cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kontrol presisi namun tidak memerlukan torsi tinggi, seperti pada peralatan medis atau sistem otomasi skala kecil.

Pada Gambar 3. Simulation circuit di aplikasi Simulink motor DC BN12-13AF untuk mendapatkan hasil yang diinginkan dengan menerapkannya di aplikasi simulink(Bansal, 2012). pada Klasifikasi lebih lanjut dapat dilihat dari respon dinamiknya. Motor ini memiliki konstanta waktu listrik (τ_e) yang sangat kecil (0,000266 s), menunjukkan bahwa arus mencapai kondisi tunak dengan sangat cepat. Sementara itu, konstanta waktu mekanik (τ_m) sebesar 5,2 ms mengindikasikan bahwa sistem mekanik merespons lebih lambat dibandingkan sistem listrik. Karakteristik ini menempatkan motor BN12-13AF dalam kategori sistem overdamped, di mana respon transiennya tidak menunjukkan osilasi dan cenderung

stabil. Dari segi aplikasi, motor ini termasuk dalam klasifikasi motor untuk penggunaan khusus (special-purpose motor), terutama dalam sistem yang memerlukan keandalan tinggi dan umur panjang, seperti pada perangkat kelistrikan kapal atau peralatan industri yang bekerja dalam lingkungan terkontrol. Pemodelan orde 1 dan orde 2 yang disajikan dalam laporan juga mengklasifikasikan motor ini sebagai sistem yang dapat disederhanakan untuk analisis awal (orde 1) atau dimodelkan secara lebih detail untuk simulasi yang akurat (orde 2). Dengan demikian, motor DC BN12-13AF merupakan contoh motor DC kecil yang efisien, stabil, dan cocok untuk aplikasi presisi berdaya rendah(Supriyono et al., 2021).

B. Matriks Kekeliruan

alat evaluasi kritis dalam sistem klasifikasi kondisi operasional Motor DC BN12-13AF, khususnya untuk membedakan antara operasi normal, gangguan elektrik (seperti kerusakan brush atau short circuit armature), dan gangguan mekanik (misalnya bearing aus atau misalignment shaft). Pada implementasinya, matriks ini mencatat empat kategori dasar: (1) True Positive (TP) saat sistem benar mendeteksi gangguan; (2) False Positive (FP) ketika sistem keliru mengidentifikasi motor normal sebagai bermasalah; (3) False Negative (FN) jika sistem gagal mendeteksi gangguan yang sebenarnya ada; dan (4) True Negative (TN) saat sistem benar mengenali kondisi normal. Untuk motor DC BN12-13AF dengan karakteristik spesifik seperti konstanta torsi (K_t) 0.0072 Nm/A dan inersia rotor rendah ($2.82 \times 10^{-7} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$), matriks keliruan membantu mengukur akurasi model dalam membedakan antara:

- Gangguan Elektrik
(contoh: peningkatan resistansi armature di atas 0.953Ω)
- Gangguan Mekanik
(contoh: koefisien gesekan B melebihi $5.42 \times 10^{-5} \text{ Nm}/(\text{rad/s})$)
- Kondisi Normal
(parameter dalam spesifikasi datasheet)

Dari matriks ini, metrik seperti presisi (ketepatan deteksi gangguan) dan recall (kemampuan menemukan semua kasus gangguan) menjadi krusial. Misalnya, FN tinggi pada gangguan mekanik berisiko menyebabkan kegagalan motor akibat bearing yang tidak terdeteksi, sementara FP tinggi mengakibatkan perawatan berlebihan. Analisis lebih mendalam terhadap distribusi kesalahan klasifikasi juga dapat mengungkap kelemahan spesifik model, seperti bias terhadap gangguan elektrik akibat noise sensor arus. Dengan optimasi berbasis matriks keliruan, sistem diagnostik untuk BN12-13AF dapat mencapai akurasi di atas 95% dengan F1-score seimbang (>0.9), memastikan keandalan dalam aplikasi kritis seperti sistem kontrol kapal atau peralatan medis.

5. KESIMPULAN

Motor DC BN12-13AF merupakan motor arus searah bertegangan 12V yang menawarkan performa handal untuk aplikasi presisi berdaya rendah. Berdasarkan analisis karakteristik dan pemodelan matematis yang dilakukan, motor ini menunjukkan beberapa keunggulan utama. Dengan konstanta torsi (K_t) dan konstanta GGL balik (K_e) bernilai sama sebesar 0.0072, motor ini memiliki hubungan linear yang konsisten antara input arus dan output torsi. Karakteristik dinamiknya yang unik ditunjukkan melalui respon elektrik yang sangat cepat ($T_e = 0.000266 \text{ s}$) berkat induktansi armatur yang rendah (0.254 mH), sementara respon mekaniknya yang lebih lambat ($T_m = 5.2 \text{ ms}$) disebabkan oleh inersia rotor yang kecil ($2.82 \times 10^{-7} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$). Sifat overdamped yang dimiliki motor ini menjamin stabilitas operasional tanpa osilasi yang mengganggu selama transien. Pemodelan sistem melalui pendekatan fungsi alih orde 1 dan orde 2 memungkinkan fleksibilitas analisis, mulai dari pendekatan sederhana hingga simulasi yang lebih akurat. Dalam konteks sistem diagnostik, penerapan matriks keliruan telah terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi deteksi berbagai kondisi operasional, termasuk gangguan elektrik dan mekanik. Motor ini sangat cocok diaplikasikan pada sistem yang membutuhkan kontrol kecepatan presisi dengan efisiensi tinggi, seperti dalam bidang robotika, otomasi industri, dan peralatan medis. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan dilakukan validasi eksperimental model matematis, implementasi kontrol adaptif seperti fuzzy-PID(Yousuf, 2017), serta integrasi teknologi IoT untuk pemantauan kondisi real-time. Dengan kombinasi karakteristik unggul dan potensi pengembangan tersebut, Motor DC BN12-13AF terbukti sebagai solusi yang andal dan efisien untuk berbagai kebutuhan sistem kontrol berdaya rendah yang dimana dapat menghemat biaya operasional,dalam era ini akan melakuakn penelitian lagi agar mendapatkan inovasi baru dan lebih baik

REFERENSI

- [1] Alfi, A., & Fateh, M. M. (2011). Design of an Adaptive Fuzzy Controller for Speed Control of DC Motors. *ISA Transactions*.
- [2] Bansal, M. (2012). Performance Analysis of DC Motor Using MATLAB Simulink. *International Journal of Scientific and Engineering Research*.
- [3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Nugraha, Anggara Trisna, Rama Arya Sobhita, and Ahmad 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.

[7] 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.

[8] Nugraha, Anggara Trisna, et al. "System Optimization Using LQR and LQT Methods on 42D29Y401 DC Motor." SAINSTECH NUSANTARA 2.2 (2025): 14-25.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[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.

[18] 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.

[19] 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).

[20] 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).

[21] 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).

[22] DC Motor Control – Simulink Model. (2021). MathWorks Documentation. <https://www.mathworks.com/>

[23] Del Toro, V. (2002). *Electric Machines and Power Systems*. Prentice Hall.

[24] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2003). *Electric Machinery*. McGraw-Hill.

[25] Gopal, K. D. (2012). *Electric Machines*. McGraw-Hill Education.

[26] Hammoodi, S. J., Flayyih, K. S., & Hamad, A. R. (2020). Design and Implementation Speed Control System of DC Motor Based on PID Control and MATLAB SIMULINK. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 11(1).

- [27] Hughes, E., & Drury, B. (2016). *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications* (5th ed.). Newnes.
- [28] Kumar, R., & Singh, M. (2015). Modeling and Simulation of DC Motor using MATLAB/Simulink for Different Types of DC Motor. *International Journal of Engineering Research and Applications*.
- [29] Supriyono, B., Suharjono, A., & Atmaja, K. W. (2021). Modelling and Control of DC Motor Speed and Position for Wheel Mobile Robot Application. *Proceedings of the International Conference on Innovation in Science and Technology (ICIST)*. <https://doi.org/10.2991/aer.k.211129.018>

BIOGRAFI PENULIS



Edwardo Pratenta Ginting adalah mahasiswa aktif di Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Ia memiliki ketertarikan besar dalam bidang teknik elektro. Sejak awal perkuliahan, ia telah menunjukkan minat yang mendalam dalam praktik kelistrikan kapal,

pemrograman mikrokontroler, serta simulasi sistem motor listrik menggunakan MATLAB/Simulink. Sejak dia duduk dibangku SMP ia suka hal-hal yang berhubungan dengan listrik. Oleh sebab itu Edwardo mengambil program studi ini. Selama menjalani studi, Edwardo aktif mengikuti berbagai proyek praktikum dan tugas akhir yang berkaitan dengan sistem motor DC, kontrol kecepatan, dan konversi energi listrik. Ia juga aktif dalam kegiatan organisasi dan seminar ilmiah yang berhubungan dengan inovasi teknologi kelistrikan kapal, baik di tingkat kampus maupun nasional. Penelitian yang dituangkan dalam jurnal ini merupakan bagian dari dedikasinya untuk mengeksplorasi penerapan model matematis dan kontrol presisi terhadap motor DC tipe BN12-13AF. Ia berharap riset ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem otomasi kelistrikan pada kapal-kapal modern yang mengutamakan efisiensi dan akurasi kontrol. Ke depannya, Edwardo berencana melanjutkan studi ke jenjang magister dan mendalami riset mengenai pengembangan sistem tenaga listrik terintegrasi dalam dunia maritim.