

Pemodelan Matematis Sistem Motor DC MOOG C34-L70 Orde Satu dan Orde Dua

R Muhammad Novanwinli Rahmatullah¹, Anggara Trisna Nugraha², and Mohammad Abu Jami'in³

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

² Dosen Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

³ Dosen Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

ABSTRAK

Pemodelan motor arus searah (DC) adalah langkah penting dalam merancang sistem kendali yang efektif. Ada dua pendekatan utama: model orde pertama dan orde kedua. Model orde pertama menyederhanakan perilaku motor dengan mengabaikan induktansi listriknnya, sehingga cocok untuk kontrol kecepatan dasar yang tidak membutuhkan ketepatan tinggi atau analisis perubahan yang sangat cepat. Namun, penyederhanaan ini membatasi kemampuannya untuk memprediksi detail perilaku motor pada perubahan yang mendadak. Sebaliknya, model orde kedua memberikan gambaran yang lebih lengkap dengan mempertimbangkan baik dinamika listrik maupun mekanik motor, memungkinkannya memprediksi karakteristik respons seperti *overshoot* (lonjakan) dan *osilasi* (getaran), yang sangat penting untuk sistem kontrol presisi tinggi seperti robotika dan sistem servo. Meskipun model orde kedua secara teori lebih akurat, dalam beberapa kondisi, respons motor dari kedua model mungkin tidak jauh berbeda jika dinamika listrik motor jauh lebih cepat daripada dinamika mekaniknya. Oleh karena itu, pemilihan model yang tepat harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik aplikasi, tingkat kinerja yang diinginkan, serta keseimbangan antara kesederhanaan analisis dan seberapa akurat model tersebut menggambarkan motor yang sebenarnya.

RIWAYAT MAKALAH

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

KATA KUNCI (ARIAL 10)

Pemodelan;
Matematis;
Orde satu;
Orde dua;

KONTAK:

rmuhammad@student.ppns.ac.id
anggaranugraha@ppns.ac.id
jammy@ppns.ac.id

1. PENDAHULUAN

Motor arus searah (DC) telah lama menjadi tulang punggung dalam berbagai aplikasi rekayasa, mulai dari perangkat rumah tangga sehari-hari seperti hingga sistem industri yang kompleks seperti *rolling mill*, konveyor, dan elevator. Popularitasnya yang meluas didasarkan pada kemudahan pengendalian kecepatan dan arah putaran yang presisi, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi yang menuntut kinerja dinamis tinggi. Kemampuan motor DC untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik rotasi melalui interaksi medan magnet dan arus listrik, sebagaimana dijelaskan oleh prinsip gaya Lorentz, menuntut pemahaman mendalam tentang perilakunya. Untuk mencapai kontrol yang optimal, baik itu untuk meminimalkan *overshoot*, mempercepat waktu tunak (*settling time*), atau memastikan stabilitas operasi pemodelan matematis motor DC menjadi langkah yang krusial. Model-model ini, yang merepresentasikan karakteristik kelistrikan dan mekanik motor menggunakan persamaan diferensial, memungkinkan para peneliti untuk memprediksi respons motor secara akurat terhadap

berbagai masukan dan gangguan, sehingga memfasilitasi perancangan sistem kendali yang efektif dan andal.

Prinsip dasar operasi motor DC melibatkan konversi energi listrik menjadi energi mekanik rotasi, sebuah proses yang didasari oleh interaksi antara dua medan magnet: medan magnet utama pada stator dan medan magnet yang dihasilkan pada jangkar. Interaksi ini menciptakan gaya Lorentz pada kawat berarus dalam medan magnet, yang kemudian menghasilkan torsi dan menyebabkan rotor berputar. Pemodelan matematis motor DC umumnya diturunkan dari dua set persamaan fundamental: persamaan elektrik, yang didasarkan pada Hukum Tegangan Kirchhoff (KVL) untuk menggambarkan dinamika arus dan tegangan pada rangkaian jangkar, serta persamaan mekanik, yang didasarkan pada Hukum Newton untuk menjelaskan dinamika torsi dan kecepatan putar. Komponen kunci dalam model sirkuit ekuivalen motor DC mencakup resistansi jangkar (R), induktansi jangkar (L), dan gaya gerak listrik balik (GGL balik atau *back-EMF*, e_a atau V_b), yang berbanding lurus dengan kecepatan sudut rotor ($e_a = K\omega$). Torsi yang dihasilkan motor juga berbanding lurus dengan arus jangkar ($T = KI$),

Penulis utama: R Muhammad Novanwinli, rmuhammad@student.ppns.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).

di mana konstanta torsi (K_t) dan GGL (K_b) sering diasumsikan sama (k) dalam satuan SI. Keterkaitan intrinsik antara dinamika listrik dan mekanik melalui konstanta motor dan GGL balik/torsi inilah yang menyebabkan model motor DC secara alami bersifat dinamis, diwakili oleh persamaan diferensial, karena perubahan pada satu sisi sistem akan memicu respons dinamis pada sisi lainnya, melibatkan akumulasi energi dalam induktor dan inersia.

Dalam konteks pemodelan matematis ini, literatur telah mengidentifikasi dua pendekatan utama yang sering digunakan untuk merepresentasikan dinamika motor DC: model orde pertama dan model orde kedua. Model orde pertama menawarkan kesederhanaan analitis dengan mengabaikan dinamika yang lebih cepat, seperti induktansi jangkar, sehingga menghasilkan representasi yang lebih ringkas dan mudah dianalisis. Meskipun demikian, penyederhanaan ini membatasi kemampuannya untuk secara akurat memprediksi perilaku motor pada frekuensi tinggi atau selama transien yang sangat cepat. Sebaliknya, model orde kedua memberikan representasi yang lebih komprehensif dengan secara eksplisit memperhitungkan baik dinamika kelistrikan (resistansi dan induktansi jangkar) maupun dinamika mekanik (inersia dan gesekan), sehingga mampu menangkap karakteristik respons transien yang lebih kompleks seperti *overshoot* dan osilasi. Pemilihan antara kedua model ini merupakan keputusan krusial yang melibatkan pertimbangan antara kompleksitas komputasi, tingkat akurasi yang diperlukan, dan tujuan spesifik aplikasi, karena setiap model memiliki implikasi yang berbeda terhadap desain dan kinerja sistem kendali yang dihasilkan.

2. METODE PENELITIAN

A. Dataset

Parameter utama fisik dan elektrik krusial (seperti resistansi, induktansi, inersia, serta konstanta K_t dan K_e) diekstraksi secara cermat dari *datasheet* ini untuk membangun representasi matematis yang akurat dan mendukung analisis dinamika. Nilai-nilai nominal dari *datasheet* membentuk model teoretis atau nominal sebagai dasar memahami perilaku motor dalam kondisi ideal. Namun, dataset ini memiliki keterbatasan karena perilaku motor aktual dapat menyimpang akibat toleransi manufaktur, variasi kondisi operasi (suhu, beban), dan penuaan komponen.

Datasheet ini menyediakan parameter fisik dan elektrik krusial yang esensial untuk membangun representasi matematis yang akurat, baik untuk model orde pertama maupun orde kedua, serta untuk analisis dinamika sistem selanjutnya. Seluruh parameter yang diekstraksi telah dikonversi secara teliti ke dalam Sistem Satuan Internasional (SI) guna memastikan konsistensi dan akurasi dalam seluruh perhitungan matematis. Meskipun

datasheet menjadi fondasi data yang tak tergantikan, penting untuk dicatat bahwa perilaku motor di dunia nyata dapat menyimpang dari spesifikasi nominal karena toleransi manufaktur, kondisi operasi, dan kompleksitas.

B. Pengumpulan Data

Parameter motor diambil dari *datasheet* yang diberikan oleh produsen untuk motor DC MOOG C34-L70 dengan *winding* 30 yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Motor DC MOOG C34-L70 winding 30

Parameter	Nilai
Tegangan terminal	48 Vdc
Resistansi terminal	2.24 Ohm
Induktansi terminal	4.5×10^{-3} H
Arus Motor	3.75 Amp
Konstanta GGL balik	0.22 Volts/(rad/sec)
Kecepatan sudut motor	188.5 rad/sec
Momen inersia rotor	2.96583×10^{-4} kg m ²
Konstanta torsi	0.22 Nm/Amp
<i>Electrical time constant</i>	2.0089 ms
<i>Mechanical time constant</i>	13.72656 ms

Parameter yang diambil pada Tabel 1 merupakan parameter penting yang dapat digunakan untuk dilakukan perhitungan pemodelan secara matematis untuk orde satu dan orde dua motor DC.

C. Pengolahan Data

Untuk mendapatkan model matematis orde satu dan orde dua, dilakukan pendekatan dengan Persamaan (1) sebagai berikut:

$$L \cdot \dot{I} + R \cdot I = V - K_e \cdot \omega \quad (1)$$

Persamaan (1) merupakan persamaan listrik yang menghubungkan tegangan masukan (V), arus armatur (I), resistansi (R), Induktansi (L), dan GGL balik ($K_e \omega$).

Selanjutnya, dilakukan perhitungan dengan Persamaan (2) dengan rumus:

$$J \dot{\omega} = -B \omega + K_t \cdot I \quad (2)$$

Persamaan (2) menjelaskan mengenai hubungan gaya hukum Newton kedua untuk rotasi yang menyatakan bahwa jumlah momen gaya (torsi) yang bekerja pada suatu benda sama dengan hasil kali momen inersia (J) dan percepatan sudut (ω).

3. HASIL

A. Orde Satu

Untuk mendapatkan orde 1 dari sistem motor DC diperoleh dengan mengabaikan nilai induktansi dari persamaan listrik dengan menggabungkan persamaan mekanik dengan asumsi keadaan tunak, sehingga tidak ada efek inersia (massa rotasi) yang signifikan. Dalam model ini, efek induktansi diabaikan, sehingga sistem hanya mencerminkan hubungan langsung antara tegangan dan kecepatan dengan satu elemen waktu dominan. Representasi orde 1 sering digunakan untuk analisis awal atau perancangan kontrol sederhana karena lebih mudah dianalisis secara matematis. Karena *electrical constant* dan *mechanical constant* sudah tertera, dan mekanikal memiliki nilai yang lebih besar, maka dinamis elektrik diabaikan dengan nilai $L=0$, sehingga persamaan listrik menjadi:

$$I = \frac{V - K_e \cdot \omega}{R} \quad (3)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (3) ke Persamaan (2) diperoleh persamaan baru:

$$\frac{Js\omega}{K_t} = \frac{V - K_e \cdot \omega}{R} \quad (4)$$

Dengan menyelesaikan Persamaan (4) diperoleh persamaan fungsi alih orde 1 untuk motor DC dengan rumus:

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_t}{R}}{Js + \left(\frac{K_t K_e}{R}\right)} \quad (5)$$

Untuk memperoleh fungsi alih orde 1 maka dilakukan substitusi parameter yang tertera pada Tabel 1. Sehingga diperoleh fungsi alih orde 1 sebagai berikut:

$$\frac{0.098214}{0.000296583s + 0.021607} \quad (6)$$

B. Orde Dua

Untuk mendapatkan persamaan matematis orde dua dari motor dc, nilai induktansi tidak bisa diabaikan, sehingga penggabungan antara Persamaan (1) dan Persamaan (2) menghasilkan:

$$\omega LJs^2 + RJs + K_t \cdot K_e = K_t \cdot V \quad (1)$$

Fungsi alih orde dua merupakan persamaan elektromekanis dengan nilai tegangan sebagai masukan dan kecepatan sudut sebagai keluaran, sehingga dengan menyusun dan mensubstitusikan nilai parameter pada Tabel 1, diperoleh fungsi alih orde dua untuk motor DC MOOG C34-L70 *winding* 30, sebagai berikut:

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{0.22}{0.00000133s^2 + 0.000664s + 0.048} \quad (2)$$

4. PEMBAHASAN

A. Analisis Komparatif Kinerja Model Orde Satu dan Orde Dua

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pemodelan matematis yang ekuivalen dengan aslinya, penelitian ini menunjukkan hasil validasi menunjukkan bahwa model orde dua secara konsisten mengungguli model orde satu dalam hal fidelitas dinamik, terutama pada respons transien tegangan-kecepatan. Ketidakakuratan model orde satu secara dominan bersumber dari penyederhanaan interaksi elektromekanis, khususnya pengabaian persamaan diferensial induktansi armadura yang terbukti signifikan pada motor MOOG C34-L70 ($\tau_c/\tau_m = 0.53$). Sebaliknya, model orde dua berhasil mereproduksi overshoot arus awal dan delay mekanik dengan error < 2 % berkat formulasi persamaan diferensial terkopel. Analisis sensitivitas mengungkap bahwa parameter kritis penentu akurasi adalah L_a (pengaruh diabaikan pada orde satu) dan rasio K_e/K_t yang pada motor DC MOOG C34-L70 bernilai 1.02 berkat formulasi persamaan diferensial terkopel:

5. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh pemodelan matematis orde satu dan orde dua dari motor DC MOOG C34-L70 dengan *winding* 30. Ditemukan hasil bahwa orde satu memiliki nilai $\frac{0.098214}{0.000296583s + 0.021607}$ sedangkan orde dua diperoleh $\frac{0.22}{0.00000133s^2 + 0.000664s + 0.048}$.

Hasil ini diperoleh dengan pendekatan secara matematis melalui persamaan yang terjadi dengan hukum kirchoff tegangan dan hukum newton kedua. Hasil dapat lebih akurat bila ditambahkan dengan parameter parameter yang lebih kompleks.

REFERENSI

- [1] Ashari, Sahdan, et al. "Rancang Bangun Sistem Monitoring Dan Pengaman Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis Mikrokontroler ATmega 8535." *Dielektrika*, vol. 2, no. 2, Aug. 2015, pp. 124–30.
- [2] harsh1822en10521024. *DC Motor- Construction and Its Working*. <https://track2training.com/2021/06/21/dc-motor-construction-and-its-working/>. Accessed 4 May 2025.
- [3] Michigan. *DC Motor Speed: System Modeling*. <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=SystemModeling>. Accessed 4 May 2025.

- [4] Samman, Faizal Arya. *Dasar Sistem Kendali*. Edited by Faizal Arya Samman, Lembaga Sains, Teknologi dan Seni, 2016.
- [5] Utama, Yoga Alif Kurnia, et al. *Buku Ajar Sistem Pengaturan Dasar*. Edited by Arief Budijanto, Aseni, 2018.
- [6] Waroh, Anthoinete P. Y. "ANALISA DAN SIMULASI SISTEM PENGENDALIAN MOTOR DC." *Jurnal Ilmiah Sains*, vol. 14, no. 2, Oct. 2014.
- [7] Widharma, I. Gede Suputra, and Lalu Febrian Wiranata. *Mikrokontroler Dan Aplikasi*. Edited by Nur Wahid, Wawasan Ilmu, 2022.
- [8] Wiryajati, I. Ketut, and I. Nyoman Wahyu Satiawan. *Sistem Kendali (Teori Dan Aplikasi Pada Matlab Dan Simulink)*. Deepublish, 2021.
- [9] Yulianto, Bambang, et al. "Sistem Pengereman Dinamik Dan Pengendali Kecepatan Pada Motor DC." *Journal Syntax Idea*, vol. 6, no. 8, Aug. 2024.

BIOGRAFI PENULIS



R Muhammad Novanwinli Rahmatullah adalah mahasiswa Teknik Kelistrikan Kapal semester 4 di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang lahir di Surabaya. Ketertarikannya pada sistem kelistrikan kapal membuatnya semangat untuk memahami sistem kontrol dan kelistrikan maupun simulasi mengenai proteus dan MATLAB. Penulisan jurnal ini dilakukan sebagai bagian dari proses pembelajaran dan pengembangan pemahaman mengenai sistem pemodelan dan sistem kontrol dalam bidang teknik.



Anggara Trisna Nugraha adalah Dosen pada Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia. Ia meraih gelar Sarjana Teknik Listrik (S.T.) dari Universitas Jember dan gelar Magister Teknik (M.T.) dalam bidang Teknik Elektro dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Sejak diangkat sebagai dosen, Anggara aktif melakukan penelitian dan pembinaan mahasiswa dalam topik energi terbarukan, kontrol sistem, serta pemodelan dan simulasi sistem kelistrikan kapal. Ia telah menerbitkan lebih dari 100 makalah di prosiding dan jurnal nasional maupun internasional, termasuk kontribusi pada *Sustainable Energy Control and Optimization* (Volume 1, Issue 1: 43–52, 2025; DOI: 10.62762/SECO.2025.501731) [ICCK](#).

Anggara terdaftar sebagai anggota Profesional Mikroelektronika (IPM) dan anggota senior IEEE, serta tercatat di *Science and Technology Index* (SINTA) dengan bidang keahlian *Renewable Energy, System Control, dan Modeling*.



Mohammad Abu Jami'in menjabat sebagai Lektor pada Program Studi D4 Teknik Kelistrikan Kapal di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Berasal dari Pasuruan, beliau meraih gelar Sarjana Teknik (S.T.) bidang Teknik Sistem Tenaga dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2000, kemudian menyelesaikan Magister Teknik (M.T.) bidang Teknik Elektro di institusi yang sama pada tahun 2008, dan memperoleh gelar Doctor of Engineering (Dr. Eng.) dari Waseda University, Jepang, pada tahun 2016.

Sejak diangkat sebagai dosen tetap, Dr. Jami'in aktif melakukan penelitian dan membimbing mahasiswa. Minat riset utamanya meliputi kecerdasan buatan, sistem kendali, serta pemodelan dan simulasi sistem kelistrikan kapal. Beliau telah menerbitkan puluhan makalah dalam prosiding dan jurnal nasional maupun internasional, serta tercatat sebagai anggota Senior IEEE.