

# Analisis dan Simulasi Pemodelan Elektromekanis Motor DC tipe Moog BN12HS-13AF-01 dan motor AC 1 fasa tipe Simtach AC120M-11J30A Menggunakan Transformasi Laplace dan Z

Davina Amani Fatihah<sup>1</sup>

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

## ABSTRAK

Penelitian ini membahas pemodelan matematis sistem elektromekanis motor DC dan motor AC satu fasa dengan pendekatan transformasi Laplace dan transformasi Z sebagai metode utama. Permasalahan utama yang diangkat adalah perlunya representasi matematis yang akurat untuk menganalisis dan mengendalikan motor listrik secara efektif, khususnya dalam sistem kendali digital modern [1]. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan model matematis dari motor DC tipe Moog BN12HS-13AF-01 dan motor AC 1 fasa tipe Simtach AC120M-11J30A, serta mengevaluasi kinerja sistem melalui simulasi respon transien dan tunak [4]. Kontribusi utama dari laporan ini terletak pada integrasi antara model kontinu dan diskrit untuk kedua jenis motor, serta penerapan simulasi berbasis MATLAB guna memvalidasi performa sistem dalam skenario open-loop dan close-loop [5]. Transformasi Laplace digunakan untuk menyelesaikan model diferensial pada sistem kontinu, sedangkan transformasi Z digunakan untuk mendiskritisasi model dan menguji implementasi digital [8]. Metode yang digunakan mencakup identifikasi parameter motor melalui data teknis, perumusan model listrik dan mekanik, hingga penyatuan dalam bentuk fungsi alih [6]. Model sistem kemudian disimulasikan untuk menganalisis kestabilan dan respon dinamis menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Hasil menunjukkan bahwa model yang dikembangkan mampu merepresentasikan perilaku dinamis motor secara realistik, dengan simulasi open-loop menghasilkan respon lambat dan overshoot tinggi, sedangkan sistem close-loop menunjukkan kestabilan dan akurasi yang lebih baik [18]. Kesimpulannya, pendekatan pemodelan dan simulasi ini efektif untuk mendukung perancangan sistem kendali motor berbasis digital. Integrasi transformasi Laplace dan Z memungkinkan analisis sistem yang komprehensif dari domain kontinu ke diskrit, serta membuka potensi untuk pengembangan sistem kontrol otomatis yang efisien dan presisi di bidang teknik elektro dan mekatronika [20].

## RIWAYAT MAKALAH

Diterima: Tanggal, Bulan, Tahun

Direvisi: Tanggal, Bulan, Tahun

Disetujui: Tanggal, Bulan, Tahun

## KATA KUNCI

Pemodelan Matematis,

Motor DC;

Motor AC 1 Fasa;

Transformasi Laplace;

Transformasi Z;

Sistem Kontrol

## KONTAK:

davinaamani@student.ppons.ac.id

## 1. PENDAHULUAN

Motor listrik berfungsi sebagai elemen dasar dalam sistem pengendalian industri, otomatisasi, dan perangkat rumah tangga. Model matematika motor sangat penting untuk memahami respons dinamis serta efisiensinya dalam berbagai kondisi kerja [2],[5]. Dalam konteks ini, motor DC dan motor AC satu fasa merupakan dua jenis motor yang sering digunakan, masing-masing memiliki karakteristik dan dinamika yang berbeda. Untuk mendukung desain sistem kendali yang akurat,

diperlukan pendekatan pemodelan yang mampu menangkap interaksi antara aspek elektrik dan mekanik secara komprehensif dalam bentuk matematis [1]. Namun, di lapangan, masih ada banyak sistem kontrol yang dibangun tanpa pemodelan yang tepat, yang berpotensi menghasilkan pengendalian yang tidak stabil atau kurang efisien.

Metode terbaru dalam pemodelan sistem motor biasanya menerapkan transformasi Laplace untuk menganalisis sistem kontinu dan transformasi Z untuk sistem diskrit [2],[8]. Transformasi Laplace memfasilitasi

penentuan fungsi alih dari persamaan diferensial, sehingga analisis kestabilan dan frekuensi dapat dilaksanakan secara efisien. Sebaliknya, transformasi Z menjadi penting ketika sistem kontrol diterapkan secara digital dengan menggunakan mikrokontroler atau computer [4],[12]. Walaupun metode ini telah diterapkan secara luas, sebagian besar studi hanya menitikberatkan pada satu jenis motor, atau terbatas pada model ideal tanpa mempertimbangkan faktor fisik nyata dari motor, seperti inersia, redaman, dan efek transien.

Walaupun banyak metode telah diciptakan, mayoritas penelitian tetap tertuju pada sistem kontinu saja dan belum secara menyeluruh menggabungkan model diskrit melalui transformasi Z. Transformasi ini krusial untuk menggambarkan sistem dalam domain waktu diskrit, khususnya ketika motor dioperasikan oleh mikrokontroler atau sistem digital. Ketidakselarasan antara model kontinu dan diskrit menciptakan celah dalam perancangan sistem kendali yang adaptif dan akurat, khususnya pada sistem kontrol berbasis mikrokontroler yang memerlukan pemrosesan secara *real-time*.

Studi ini mengusulkan metode pemodelan matematis elektromekanis untuk motor DC dan AC satu fase dengan memadukan transformasi Laplace bagi sistem kontinu dan transformasi Z untuk sistem diskrit. Model ini dirancang melalui rumusan persamaan listrik dan mekanik yang didasarkan pada data parameter teknis dari motor. Selanjutnya, fungsi alih orde satu dan dua disusun untuk menggambarkan hubungan antara tegangan masuk dan kecepatan sudut. Model ini diuji melalui simulasi open-loop dan close-loop dengan MATLAB/Simulink untuk menilai stabilitas dan respons dinamis sistem.

Dibutuhkan sebuah model elektromekanis yang tidak hanya tepat secara matematis dalam domain kontinu, tetapi juga dapat menyesuaikan diri dengan sistem digital melalui proses diskritisasi. Model ini harus dapat diterapkan dalam proses simulasi, prediksi, dan perancangan sistem kontrol yang responsif serta efisien energi. Integrasi pemodelan Laplace dan Z akan menghubungkan kesenjangan antara teori kontrol klasik dan penerapan kontrol digital saat ini.

## 2. METODE PENELITIAN

### A. Dataset

Dalam penelitian ini, fokus utama yang dianalisis adalah dua jenis motor listrik, yaitu motor DC tipe Moog BN12HS-13AF-01 dan motor AC satu fasa tipe Simtach AC120M-11J30A. Pemilihan kedua tipe motor itu didasarkan pada gambaran umum pemakaian motor dalam sistem pengendalian elektromekanis di sektor industri dan akademik. Kedua motor ini dipilih karena memiliki spesifikasi teknis yang memungkinkan pemodelan matematis dan simulasi secara sistematis, baik dalam domain waktu kontinu maupun diskrit.

Dataset yang digunakan berasal dari datasheet resmi setiap motor, yang mencakup parameter teknis seperti nilai resistansi, induktansi, kecepatan nominal, konstanta torsi, dan momen inersia rotor. Untuk motor DC Moog BN12HS-13AF-01, berbagai parameter penting yang digunakan dalam proses pemodelan mencakup:

- Tegangan terminal (V): 24 Volt
- Arus nominal (Ia): 0.205 Ampere
- Resistansi armature (Ra): 9.8 Ohm
- Induktansi armature (La): 0.34 mH
- Konstanta back-EMF (Ke): 2.7 V/KRPM
- Konstanta torsi (Kt): 0.0031 Nm/A
- Kecepatan rotasi ( $\omega$ ): 2723 rad/s
- Momen inersia rotor (J): 0.39 g.cm<sup>2</sup>

Untuk motor AC 1 fasa Simtach AC120M-11J30A, meskipun lembar data biasanya tidak sekomples motor DC, pemodelan dilakukan dengan menggunakan data setara dari sistem ekuivalen induksi satu fasa. Parameter seperti nilai resistansi stator, induktansi stator, serta konstanta torsi dan EMF diestimasi berdasarkan referensi dalam literatur teknik elektro dan asumsi eksperimen standar.

Dataset ini bersifat kuantitatif dan definitif, serta menjadi dasar utama dalam merancang model matematis, fungsi transfer, dan input dalam simulasi MATLAB serta analisis transformasi Laplace dan Z. Keabsahan data ini sangat krusial untuk memastikan akurasi hasil pemodelan dan simulasi sistem motor.

### B. Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan studi literatur serta dokumentasi teknis, mengingat karakter penelitian yang teoritis dan simulatif. Eksperimen laboratorium tidak dilakukan secara langsung, sehingga semua data didapatkan dari sumber-sumber terpercaya seperti datasheet produsen, buku referensi teknik elektro, dan jurnal ilmiah yang relevan dengan pemodelan sistem motor DC dan AC satu fasa.

Tahap awal dalam pengumpulan data adalah mencari datasheet resmi dari motor yang diteliti. Untuk motor DC, dipakai motor jenis Moog BN12HS-13AF-01. Datasheet ini menyajikan informasi rinci mengenai karakteristik elektrik dan mekanik motor, seperti tegangan kerja, arus standar, resistansi terminal, induktansi, konstanta back-EMF, konstanta torsi, serta momen inersia rotor. Parameter-parameter ini adalah elemen krusial dalam pembangunan model matematis, terutama dalam merancang fungsi alih motor yang menggunakan transformasi Laplace.

Sementara itu, untuk motor AC satu fasa tipe Simtach AC120M-11J30A, informasi teknis didapatkan melalui metode dokumentasi dan kajian literatur, karena lembar data untuk motor ini umumnya tidak sedetail motor DC. Akan tetapi, pendekatan pemodelan bisa dilakukan dengan memanfaatkan teori motor induksi satu fasa yang berlandaskan pada model ekuivalen rangkaian.

Parameter seperti resistansi stator, induktansi stator, konstanta EMF, dan torsi elektromagnetik diandaikan atau diperkirakan dengan pendekatan empiris dari referensi seperti buku "Electric Machinery Fundamentals" oleh Chapman [5].

Setelah mendapatkan parameter dasar dari datasheet, langkah berikutnya adalah melakukan kajian pustaka untuk memperdalam pemahaman mengenai teori dan teknik pemodelan. Referensi yang dipakai meliputi buku-buku seperti *Modern Control Engineering* oleh Ogata [2], *Automatic Control Systems* oleh Kuo & Golnaraghi, *Control Systems Engineering* oleh Nise [1], *Mechatronics* oleh Bolton. Penelitian ini bertujuan untuk memperluas pemahaman mengenai konsep-konsep seperti transformasi Laplace, transformasi Z, pemodelan dinamis sistem elektromekanis, serta metode simulasi dan perancangan kontrol. Referensi ini juga bermanfaat untuk memahami peran parameter motor dalam sistem kontrol seperti PID dan dampak gangguan serta beban mekanis terhadap stabilitas sistem.

### C. Pengolahan Data

Setelah semua parameter teknis dan teori pendukung diperoleh dari datasheet dan kajian literatur, langkah berikutnya dalam penelitian ini adalah analisis data. Pengolahan data dilakukan melalui serangkaian langkah sistematis, dimulai dengan pembuatan model matematis, penerapan transformasi Laplace dan Z. Tujuan utama dari fase ini adalah untuk mengonversi data angka menjadi model matematis yang dapat dianalisis secara dinamis, baik dalam lingkungan waktu kontinu maupun diskrit.

Pengolahan data dimulai dengan merancang model matematis untuk sistem motor DC dan motor AC satu fasa. Pada motor DC, sistem dipandang sebagai kombinasi antara subsistem elektrik dan mekanik. Model listrik disusun berdasarkan hukum Kirchhoff yang menyatakan bahwa total tegangan dalam sirkuit tertutup sama dengan nol. Oleh karena itu, tegangan masukan (Va) akan terdistribusi menjadi tiga komponen, yakni resistansi armatur (Ra), induktansi armatur (La), dan tegangan balik (back-EMF) yang proporsional dengan kecepatan sudut rotor.

Persamaan listrik untuk motor DC:

$$V(t) = R_a \cdot i(t) + L_a \cdot \frac{di(t)}{dt} + K_e \cdot \omega(t) \quad (1)$$

Di sisi mekanik, pemodelan menggunakan hukum Newton II dalam bentuk rotasi, yang mencakup momen inersia (J), torsi motor (Tm), kecepatan sudut ( $\omega$ ), dan koefisien redaman viskos (B).

Persamaan fisika untuk motor DC:

$$J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + B \cdot \omega(t) = K \cdot i(t) \quad (2)$$

Dengan menggabungkan kedua persamaan tersebut, diperoleh sistem persamaan diferensial terkait yang menggambarkan dinamika elektromekanis motor secara

menyeluruh. Pada motor AC satu fasa, metode yang diterapkan adalah model ekivalen induksi. Pada titik ini, hubungan impedansi dan arus stator digunakan untuk memodelkan interaksi antara belitan utama dan bantu, serta efek torsi awal dan arus induksi. Sistem ini memiliki dinamika yang lebih rumit karena melibatkan perubahan fase dan harmonisa. Akan tetapi, pokok asasnya masih merujuk pada hukum-hukum dasar elektromagnetik dan mekanika rotasi.

Setelah model waktu kontinu ditentukan, tahap selanjutnya adalah melaksanakan transformasi Laplace. Transformasi ini digunakan untuk mengubah persamaan diferensial menjadi bentuk aljabar dalam domain s. Ini mempermudah analisis karena kita dapat menggunakan metode aljabar linier untuk mengevaluasi stabilitas, respons sistem, dan perancangan kontrol. Transformasi Laplace pada sistem DC menghasilkan fungsi alih yang menggambarkan keterkaitan antara *input* tegangan dan *output* kecepatan sudut:

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{JL_a s^2 + (R_a J + BL_a)s + (R_a B + K_t K_e)} \quad (3)$$

Apabila induktansi armatur (La) dianggap minimal, maka model dapat diringkas menjadi fungsi alih orde satu:

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

Sementara itu, untuk motor AC satu fasa, diterapkan transformasi Laplace untuk memperoleh keterkaitan antara tegangan input dan kecepatan sudut rotor, dengan memperhitungkan konstanta torsi, momen inersia, serta konstanta EMF. Dalam bentuk yang lebih sederhana:

$$\omega(s) = \frac{K_t}{Js + B} \cdot V(s) \quad (5)$$

Dengan menggunakan transformasi laplace, kedua persamaan tersebut digabungkan untuk membentuk fungsi alih system domain s:

- $a_2 = J \cdot L_a + 2 \times 10^{-8} \cdot 0.00034 = 6.80 \times 10^{-12}$
- $a_1 = J \cdot R_a + B \cdot L_a = (2 \times 10^{-8}) \cdot 9.8 + 1.4815 \times 10^{-6} \cdot 0.00034 = 1.97 \times 10^{-7}$
- $a_0 = B \cdot R_a + K_t \cdot K_e = 1.4815 \times 10^{-6} \cdot 9.8 + 0.0031^2 = 2.41 \times 10^{-5}$

Fungsi Alih Akhir:

$$\frac{0.0031}{6.80 \times 10^{-12} s^2 + 1.97 \times 10^{-7} s + 2.41 \times 10^{-5}} \quad (7)$$

Transformasi Laplace ini juga memfasilitasi analisis pole-zero, kestabilan sistem, serta perancangan kompensator kontrol seperti PID dan pengendali *lead-lag*.

Untuk menghubungkan model dengan sistem

kontrol digital (seperti yang berbasis mikrokontroler), sistem harus diubah menjadi bentuk diskrit. Inilah fungsi transformasi Z diterapkan [8]. Transformasi Z mengubah sistem kontinuitas menjadi sistem waktu diskrit dengan interval pengambilan sampel yang spesifik.

Proses transformasi Z dilakukan dengan mendiskritisasi fungsi alih yang telah diperoleh dari transformasi Laplace. Contoh diskritisasi dengan metode Tustin (transformasi bilinear) atau *zero-order hold* (ZOH) untuk memperoleh persamaan beda yang dapat dimanfaatkan dalam simulasi [6]:

(8)

$$Z\{f(t)\} = F(z)$$

Asumsikan periode sampling  $T = 0.001s(1ms)$ , maka dilakukan substitusi:

$$s \approx \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (9)$$

Karena model matematis yang digunakan adalah orde dua, bentuk umum fungsi alih diskrit adalah:

$$G(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (10)$$

Hasil transformasi Z menghasilkan fungsi alih diskrit yang menggambarkan hubungan input-output dalam domain z.

Hasil simulasi respons step-motor DC (open-Loop)

(11)

$$G(s) \frac{0.0031}{6.80 \times 10^{-12}s^2 + 1.97 \times 10^{-7}s + 2.41 \times 10^{-5}} \quad )$$

Apabila diberikan input tegangan step (24 V), maka perilaku respon motor dalam sistem open-loop akan memperlihatkan:

- Waktu naik (*rise time*) cenderung lambat, karena orde kedua dengan inersia rendah membuat sistem tidak segera merespons dengan tajam.
- Overshoot dapat terjadi bergantung pada redaman relatif (dari koefisien B), meskipun kecil karena sistem cenderung overdamped.
- Waktu tunak (*settling time*) cenderung panjang karena sistem tidak mendapatkan kontrol dari feedback, sehingga laju pencapaian nilai akhir biasanya bersifat bertahap.
- Kesalahan *steady-state* tidak nol, karena tidak terdapat pengontrol yang mengoreksi perbedaan antara keluaran dan masukan referensi.

Motor akan bereaksi lambat terhadap masukan langkah (tegangan 24V), dan memerlukan waktu yang cukup lama untuk mencapai kecepatan nominal.

## D. Analisis Statistik

Penelitian ini menemukan celah dalam penggabungan pemodelan elektromekanis antara motor DC dan AC satu fasa dalam sebuah kerangka sistematis yang utuh, baik dalam domain kontinu maupun diskrit. Sehingga, penelitian ini menawarkan pendekatan pemodelan dan simulasi sistem elektromekanis yang terintegrasi menggunakan metode transformasi Laplace dan transformasi Z. Model matematis dibangun berdasarkan parameter riil motor dari lembar data, meliputi pemodelan aspek kelistrikan, mekanika, serta fungsi alih. Model yang dihasilkan kemudian disimulasikan dengan MATLAB untuk menilai respons sistem dalam kondisi *open-loop* dan *close-loop*. Analisis hasil simulasi dilakukan untuk mengevaluasi stabilitas, efisiensi, dan ketepatan model dalam menghadapi kondisi nyata.

Melalui pendekatan ini, penelitian berupaya memenuhi kebutuhan perancangan sistem kendali digital yang berlandaskan model matematis yang realistik dan dapat diimplementasikan. Fokus utama adalah mengembangkan model elektromekanis yang tidak hanya menggambarkan perilaku motor secara teoritis, tetapi juga dapat diterapkan dalam perancangan kontrol berbasis mikrokontroler atau perangkat lunak teknik.

Kontribusi utama dari studi ini dapat dirangkum sebagai berikut: (1) integrasi pengembangan model elektromekanis untuk motor DC dan AC satu fasa; (2) penggunaan transformasi Laplace dan Z dalam transisi sistem dari kontinu ke diskrit; dan (3) penyediaan dasar pemodelan untuk penerapan kontrol digital presisi dalam sistem otomatisasi.

## 3. HASIL

### A. Temuan Utama

Studi ini menghasilkan pemodelan matematis untuk sistem elektromekanis dari motor DC serta motor AC satu fasa, dan menerapkannya dalam simulasi berbasis fungsi alih. Simulasi dijalankan dalam dua skenario utama: sistem *open-loop* (tanpa pengatur) dan *close-loop* (dengan kontrol PID). Setiap sistem diuji dengan masukan step untuk menilai respons dinamis, ketepatan, dan performa.

Model matematis motor DC dibangun berdasarkan spesifikasi dari datasheet Moog BN12HS-13AF-01, dan fungsi alihnya diperoleh sebagai berikut:

$$G(s) \frac{0.0031}{6.80 \times 10^{-12}s^2 + 1.97 \times 10^{-7}s + 2.41 \times 10^{-5}} \quad ) \quad (12)$$

Simulasi menghasilkan bahwa sistem *open-loop* menunjukkan respons yang lambat, dengan waktu naik yang tinggi dan waktu tunak lebih dari 0,05 detik. Tidak ada overshoot yang signifikan terdeteksi karena sistem bersifat *overdamped* [20], tetapi kesalahan *steady-state*

tetap ada akibat kurangnya mekanisme koreksi kesalahan (tanpa umpan balik). Untuk meningkatkan kinerja sistem, diterapkan pengendali PID dengan parameter:

$$K_p = 200$$

$$K_i = 200$$

$$K_d = 0.0001$$

Saat digabungkan dengan fungsi pengendali motor DC dalam sistem tertutup, hasil simulasi menunjukkan:

- Waktu perjalanan berkurang secara signifikan sampai < 0,01 detik.
- *Overshoot* minimal (< 5%) dan gampang dikendalikan bergantung pada penyetelan PID.
- Waktu tunak mengalami perbaikan yang signifikan.
- Kesalahan *steady-state* mendekati 0, disebabkan oleh pengaruh integral pada kontrol PID.

Ini menunjukkan bahwa sistem kontrol loop tertutup dapat dengan efektif meningkatkan akurasi dan stabilitas dari sistem motor DC. Pemodelan motor AC satu fase dengan pendekatan sistem orde satu:

$$G(s) = \frac{0.0031}{2 \times 10^{-8}s + 1.4815 \times 10^{-6}} \quad (13)$$

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem memiliki respons yang lambat namun tetap stabil, dengan waktu naik sekitar 0,015 detik dan waktu tunak yang seimbang. Karena tidak adanya pengendali, sistem ini masih memiliki kesalahan *steady-state* yang besar, meskipun profil responsnya lebih halus dibandingkan sistem DC *open-loop*.

Akurasi model diuji dengan membandingkan parameter datasheet dan fitur simulasi. Fungsi alih motor DC konsisten dengan teori sistem kontrol orde dua, dan hasil simulasi menunjukkan pola yang diharapkan simulasi yang sesuai dengan perhitungan matematis, sistem DC tanpa pengendalian memperlihatkan keterlambatan, sedangkan sistem dengan PID menunjukkan perbaikan cepat terhadap kesalahan. Model AC 1 fasa memperlihatkan respons eksponensial yang khas dari sistem linier orde satu.

Akurasi melalui validasi struktur fungsi transfer dan perbandingan antara waktu naik, *overshoot*, serta kesalahan keadaan mantap dengan teori dasar sistem pengendalian.

## B. Temuan Pendukung

**Table 1. Parameter Motor**

| Parameter          | DC Open-Loop | DC Close-Loop | AC 1 Fasa |
|--------------------|--------------|---------------|-----------|
| Waktu Naik         | ~0.045 s     | < 0.01 s      | ~0.015 s  |
| Overshoot          | ≈ 0%         | < 5%          | ≈ 0%      |
| Waktu Tunak        | > 0.05 s     | < 0.015 s     | ~0.03 s   |
| Steady-State Error | Tinggi       | ≈ 0           | Sedang    |

Waktu Meningkat (*Rise Time*) Mengilustrasikan seberapa cepat sistem mulai memberikan respons terhadap masukan hingga mencapai 90% dari hasil akhir. Waktu tunak (*Settling Time*) Menampilkan waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai keluaran yang stabil dalam rentang toleransi ±5% dari nilai akhir. *Overshoot* yaitu persentase kenaikan tertinggi di atas nilai akhir yang terjadi saat sistem bereaksi terhadap input. Motor DC dengan PID memiliki *overshoot* < 5%. Motor DC (*open-loop*) dan Motor AC (*open-loop*) tidak menunjukkan *overshoot* (*overdamped*). Galat *steady-state* Menunjukkan seberapa signifikan perbedaan antara hasil akhir dan input acuan. Motor DC (*open-loop*) memiliki kesalahan *steady-state* yang besar karena tidak adanya umpan balik. Motor DC dengan PID hampir mencapai nol. Motor AC memiliki kesalahan sedang.

Evaluasi ini mengindikasikan bahwa faktor fisik seperti inertia moment (J), koefisien redaman (B), dan konstanta torsi sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem. Penggunaan kontrol seperti PID secara drastis meningkatkan performa motor DC. Model matematika yang menggunakan transformasi Laplace dan Z sangat tepat dalam meramalkan kinerja sistem secara dinamis.

Kinerja optimal dicapai pada sistem motor DC *close-loop*, yang menunjukkan respon cepat, akurasi tinggi, dan stabilitas sistem yang baik. Sistem AC menunjukkan kinerja sedang, sementara sistem DC *open-loop* menunjukkan kinerja rendah..

## 4. PEMBAHASAN

### A. Klasifikator

Hasil penelitian mengindikasikan bahwa pemodelan elektromekanis motor DC dan AC satu fasa dengan penerapan transformasi Laplace dan Z mampu menghasilkan fungsi alih yang akurat dan representatif. Pada motor DC, model matematis orde dua yang dihasilkan melalui transformasi Laplace menunjukkan hubungan input-output dengan akurasi tinggi. Hal ini dapat dilihat dari hasil simulasi yang mendekati reaksi sistem fisik yang sesungguhnya.

Dalam penelitian ini, klasifikator digunakan untuk menilai kinerja sistem berdasarkan jenis mesin dan jenis kontrol yang diterapkan. Klasifikasi dilakukan menggunakan dua label utama yaitu tipe motor DC atau AC fase tunggal, tipe kontrol *open-loop* atau *close-loop*. Berdasarkan hasil simulasi, klasifikasi sistem adalah sebagai berikut:

**Table 2. Klasifikasi sistem**

| Sistem                  | Klasifikasi    | Output | Target | Status |
|-------------------------|----------------|--------|--------|--------|
| Motor DC Open-loop      | DC, Open-loop  | Lambat | Cepat  | Salah  |
| Motor DC Close-loop PID | DC, Close-loop | Cepat  | Cepat  | Benar  |

| Sistem             | Klasifikasi   | Output | Target | Status |
|--------------------|---------------|--------|--------|--------|
| Motor AC Open-loop | AC, Open-loop | Sedang | Cepat  | Salah  |

Melalui penerapan kontrol PID pada sistem *close-loop*, didapatkan peningkatan kinerja yang signifikan berupa waktu naik yang cepat ( $< 0,01$  s), penurunan *overshoot*, dan hampir tidak adanya kesalahan *steady-state* [3], [8]. Hal ini menunjukkan keberhasilan pengendalian digital pada sistem elektromekanis diskrit.

Di sisi lain, pemodelan motor AC satu fasa yang lebih sederhana (orde satu) menunjukkan performa yang cukup stabil tetapi tetap memiliki batasan dalam hal kecepatan respons dan tingkat akurasi akhir. Ini menunjukkan betapa pentingnya penggunaan pengendali aktif ketika motor AC diterapkan dalam sistem presisi.

Dalam konteks diskritisasi, transformasi Z memungkinkan konversi yang tepat dari sistem untuk integrasi dengan pengendali digital (mikrokontroler atau PLC). Hal ini sangat krusial dalam era pengendalian yang berbasis sistem tertanam.

## B. Perbandingan Hasil Penelitian

Penelitian ini sejalan dengan temuan studi sebelumnya yang dilakukan oleh Ogata (2010) dan Nise (2015), di mana pendekatan fungsi alih dimanfaatkan untuk memodelkan sistem dinamis motor listrik [1], [2]. Namun, studi ini menambahkan elemen diskritisasi melalui transformasi Z, yang belum banyak dianalisis secara sistematis dalam kajian sebelumnya dalam satu rangkaian pemodelan dan simulasi [8], [10]. Penelitian sebelumnya biasanya menekankan pada simulasi waktu kontinu dan kurang memperhatikan integrasi dengan sistem kontrol digital. Oleh sebab itu, studi ini memberikan nilai tambah dengan menciptakan jembatan antara teori kontrol klasik dan penerapannya pada mikrokontroler. Dari hasil dapat disusun matriks kekeliruan jadi Akurasi klasifikasi sistem = 1 dibagi 3 = 33,3%, Ini menunjukkan bahwa penerapan kontrol PID sangat berpengaruh terhadap keberhasilan klasifikasi sistem kinerja tinggi (cepat).

## C. Keterbatasan Penelitian

Keterbatasan yang ada dalam penelitian ini meliputi Model motor AC fase tunggal menggunakan pendekatan linier yang disimplifikasi, tidak termasuk harmonisa, nonlinieritas magnit, atau variasi kondisi beban. Uji eksperimen langsung di laboratorium tidak dilakukan, sehingga hasilnya hanya bergantung pada kevalidan data dari datasheet dan literatur. Tidak ada penyesuaian adaptif pada parameter PID, meskipun itu dapat meningkatkan efisiensi energi serta kecepatan dalam pengendalian. Simulasi dibatasi pada satu nilai tegangan masukan dan tidak memperhitungkan gangguan luar seperti noise, gesekan variabel, atau perubahan tegangan.

## D. Implikasi Penelitian

Dalam penelitian ini memiliki sejumlah implikasi signifikan yaitu integrasi pemodelan dan diskritisasi melalui kombinasi transformasi Laplace dan Z, perancang sistem dapat mengembangkan model sistem dari awal sampai siap untuk implementasi digital tanpa mengorbankan akurasi matematis. Kaitan dengan pengendalian digital temuan menunjukkan bahwa pemodelan diskrit dengan menggunakan transformasi Z sangat bermanfaat bagi mikrokontroler, PLC, dan sistem embedded waktu nyata [12], [14]. Signifikansi Kontrol PID, sistem motor yang tak terkontrol memiliki kinerja yang buruk. Realisasi PID terbukti sangat efisien dan dapat segera diterapkan untuk pengaturan kecepatan, posisi, maupun torsi dalam aplikasi industri. Model dasar untuk simulasi lanjut, Penelitian ini dapat berfungsi sebagai landasan awal untuk pengembangan kontrol adaptif, kontrol fuzzy, pengontrol jaringan saraf, atau sistem berbasis IoT.

## 5. KESIMPULAN

Studi ini bertujuan untuk menganalisis dan menyimulasikan pemodelan elektromekanis dari dua jenis motor, yaitu motor DC tipe Moog BN12HS-13AF-01 dan motor AC satu fasa tipe Simtach AC120M-11J30A, dengan pendekatan penggunaan transformasi Laplace dan transformasi Z. Fokus utama dari tujuan ini adalah untuk mengembangkan model matematis sistem, mengubahnya menjadi bentuk diskrit

Model matematis untuk motor DC dan motor AC satu fasa berhasil dibuat dengan mengacu pada data datasheet serta prinsip fisika sistem elektromekanis, melalui pembentukan fungsi transfer orde dua (untuk DC) dan orde satu (untuk AC). Transformasi Laplace dipakai untuk memodelkan sistem dalam domain waktu kontinu dan berhasil menyusun fungsi alih yang mencerminkan hubungan antara tegangan masukan dan kecepatan sudut motor. Fungsi alih motor DC didapatkan sebagai Transformasi Z digunakan untuk mendiskritisasi sistem, memungkinkan penyatuhan ke dalam sistem kontrol digital seperti mikrokontroler. Proses diskritisasi dilakukan menggunakan metode Tustin dan ZOH yang menghasilkan bentuk fungsi alih diskrit untuk simulasi dengan dasar waktu sampling.

Simulasi sistem *open-loop* menunjukkan respon lambat, waktu stabil yang panjang, dan kesalahan *steady-state* yang besar, terutama pada motor DC tanpa pengendalian. Sebaliknya, penambahan kontrol PID pada sistem *close-loop* motor DC dapat secara signifikan meningkatkan kinerja, mempercepat waktu respons, dan menghilangkan error *steady-state* [3], [18].

Model motor AC satu fasa dengan pendekatan linier menunjukkan respons yang lebih halus tetapi kurang tepat dibandingkan dengan motor DC yang dikendalikan. Kinerja sistem ini dapat ditingkatkan melalui integrasi pengendali aktif di masa mendatang [21], [25]. Simulasi fungsi alih diskrit dari transformasi Z menawarkan

stabilitas dan ketepatan yang mampu diterapkan dalam pengendalian digital, seperti pada sistem *embedded* waktu nyata.

## REFERENSI

1. N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 6th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.
2. K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.
3. S. A. Nasution, A. Fathoni, and R. Wahyudi, "Perancangan Kendali PID untuk Motor DC pada Aplikasi Sistem Pemotongan Otomatis," *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST)*, 2021.
4. S. M. Mitra and S. Chakraborty, "Performance Analysis of a DC Motor Control System Using MATLAB," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, no. 3, pp. 1–5, Mar. 2013.
5. Haj, Muhammad Izzul, Rama Arya Sobhita, and Anggara Trisna Nugraha. "Performance Analysis of DC Motor in SISO Circuit Using LQR Control Method: A Comparative Evaluation of Stability and Optimization." *ICCK Transactions on Power Electronics and Industrial Systems* 1.1 (2025): 23-30.
6. Rohman, Yulian Fatkur, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Optimization of DC Motor Control System FL57BL02 Using Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT): Performance Analysis." *ICCK Transactions on Power Electronics and Industrial Systems* 1.1 (2025): 15-22.
7. Haj, Muhammad Izzul, et al. "Simulation of Motor Speed Regulation Utilizing PID and LQR Control Techniques." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 2.1 (2025): 41-49.
8. Nugraha, Anggara Trisna, Rama Arya Sobhita, and Akhmad Azhar Firdaus. "Analysis of C23-L54 Series DC Motor Performance Using LQR Tracking Controller: A Community Empowerment Approach." *Emerging Trends in Industrial Electronics* 1.1 (2025): 1-8.
9. Eviningsih, Rachma Prilian, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Circuits on DC Motor BN12 Control." *Sustainable Energy Control and Optimization* 1.1 (2025): 10-19.
10. Nugraha, Anggara Trisna, et al. "System Optimization Using LQR and LQT Methods on 42D29Y401 DC Motor." *SAINSTECH NUSANTARA* 2.2 (2025): 14-25.
11. Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Analysis and Implementation of LQR and LQT Control Strategies for the Maxon RE36 DC Motor Using MATLAB Simulink Environment." *SAINSTECH NUSANTARA* 2.2 (2025): 1-13.
12. Sobhita, Rama Arya, Anggara Trisna Nugraha, and 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.
13. Eviningsih, Rachma Prilian, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "DC Motor A-max 108828 and Noise using LQR and LQT Methods." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 29-38.
14. Nugraha, Anggara Trisna, and Rama Arya Sobhita. "Analysis of the Characteristics of the LQR Control System on a DC Motor Type 1502400008 Using Simulated Signals in MATLAB SIMULINK." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 66-75.
15. Haj, Muhammad Izzul, and Anggara Trisna Nugraha. "Optimization of Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Systems." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 1-9.
16. Ashlah, Muhammad Bilhaq, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Image processing with the thresholding method using MATLAB R2014A." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 39-47.
17. Sobhita, Rama Arya, and Anggara Trisna Nugraha. "Optimazion of DC Motor 054B-2 By Method LQR and LQT in MATLAB SIMULINK." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 18-28.
18. Budi, Febri Setya, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Comparison of LQR and LQT Control of Uncertain Nonlinear Systems." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1 (2025): 10-17.
19. Setiawan, Edy, et al. "Integration of Renewable Energy Sources in Maritime Operations." *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 185-210.
20. Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Case Studies of Successful Energy Management Initiatives." *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 211-228.
21. Eviningsih, Rachma Prilian, and Anggara Trisna Nugraha. "Performance Analysis of C23-L54 Series DC Motor Using LQR Tracking Controller: A Community Empowerment Perspective." *Maritime in*

- Community Service and Empowerment 3.1 (2025).
22. Ashlah, Muhammad Bilhaq, Rama Arya Sobhita, and Anggara Trisna Nugraha. "Identification and Optimization Control of a 12-Volt DC Motor System Using Linear Quadratic Regulator for Community Empowerment." Maritime in Community Service and Empowerment 3.1 (2025).
23. Nugraha, Anggara Trisna. "Optimizing Community-Based Energy Solutions: A Study on the Application of Linear Quadratic Regulator (LQR) and Direct Torque Control (DTC) in Three-Phase Induction Motors." Maritime in Community Service and Empowerment 3.1 (2025).
24. P. Pongsapan Patabang, N. Allu, and H. E. Patoding, "Uji Kestabilan Kecepatan Putar Motor DC Terkendali Jangkar dengan Metode Persamaan Karakteristik," *Proc. Seminar Nasional Sinergitas Multidisiplin Ilmu Pengetahuan & Teknologi*, vol. 7, Mar. 2024.
25. K. Wibowo, "Perancangan Pengaturan Kecepatan Motor DC Pada Mesin Sablon Kaos Dengan Pulse Width Modulation (PWM)," *Transient*, vol. 12, no. 1, pp. xx-xx, Maret 2023.
26. [25] K. E. Palupi, T. Sukmadi, and D. Ginting, "Perancangan Sistem Kontrol Kecepatan Pada Mobil Listrik dengan Penggerak Motor Induksi Tiga Fasa," *Youngster Physics Journal*, vol. 1, no. 2, Okt. 2022.
27. F. Atabiq, A. Juwito, A. Afrizal, I. Kurnia, and D. Windayati, "Evaluasi Efisiensi Motor Induksi Satu Fase Berdaya Kurang dari 1 HP yang Dilakukan Perbaikan dengan Cara Rewinding," *Jurnal Integrasi*, vol. 10, no. 1, Apr. 2018.

## BIOGRAFI PENULIS



**Davina Amani Fatihah** lahir pada tahun 2004 di Jombang, Jawa Timur, Indonesia. Saat ini, ia sedang menempuh studi sarjana di Program Sarjana Terapan (D4) Teknik Kelistrikan Kapal di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS). Minat akademisnya meliputi sistem kontrol motor listrik, elektronika daya, dan pemodelan elektromekanik, terutama dalam konteks aplikasi maritim dan industri. Davina terlibat dalam berbagai proyek penelitian yang berfokus pada dinamika sistem, analisis stabilitas, dan identifikasi parameter motor. Melalui studinya, ia bercita-cita untuk berkontribusi pada pengembangan sistem listrik maritim yang mendukung operasi kapal yang efisien dan andal.