

Pemodelan dan Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor DC Berbasis PID

Muhammad 'Athaya Akhdan¹

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

ABSTRAK

Pengaturan kecepatan motor DC secara optimal menuntut adanya pendekatan yang sistematis dan akurat dalam hal pemodelan serta identifikasi sistem. Hal ini dikarenakan kedua aspek tersebut merupakan fondasi utama dalam proses perancangan pengendali yang mampu bekerja secara efisien, andal, dan tanggap terhadap berbagai kondisi operasional. Penelitian ini secara khusus diarahkan pada pengembangan strategi yang efektif untuk membangun model matematis motor DC dan mengidentifikasi parameter-parameter sistem yang memiliki pengaruh signifikan terhadap dinamika motor. Pemodelan yang tepat memungkinkan pemahaman menyeluruh terhadap karakteristik dinamik motor DC, seperti respon terhadap sinyal masukan, inersia, serta konstanta motor. Sementara itu, identifikasi sistem berperan penting dalam memperoleh parameter aktual dari sistem fisik yang menjadi dasar dalam penyusunan model dan tuning pengendali. Dalam studi ini, kontroler yang digunakan adalah Proporsional-Integral-Derivatif (PID), yang dikenal luas karena kemampuannya dalam menghasilkan respon sistem yang cepat, minim overshoot, serta kestabilan tinggi, bahkan dalam kondisi adanya gangguan maupun perubahan beban. Penyusunan kontrol PID didasarkan pada hasil pemodelan dan identifikasi sistem sebelumnya, yang kemudian digunakan sebagai dasar dalam penyesuaian parameter-parameter kontroler agar sesuai dengan karakteristik dinamis motor DC yang dikaji. Hasil integrasi antara model, parameter aktual, dan tuning kontrol PID menunjukkan performa pengendalian yang sangat baik. Berdasarkan simulasi dan pengujian, sistem yang dikembangkan mampu mencapai waktu tunak sebesar 2,5 detik, dengan overshoot maksimal hanya 3,45%, serta kesalahan keadaan tunak (steady-state error) yang nyaris nol. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan berbasis identifikasi sistem yang terintegrasi dengan metode kontrol PID tidak hanya mampu meningkatkan efisiensi kinerja pengendalian motor DC, tetapi juga memberikan kestabilan dan presisi tinggi dalam berbagai kondisi kerja. Oleh karena itu, pendekatan ini sangat potensial untuk diterapkan dalam aplikasi industri yang menuntut sistem kendali kecepatan yang adaptif, handal, dan memiliki tingkat responsivitas tinggi terhadap dinamika sistem yang kompleks dan berubah-ubah.

RIWAYAT MAKALAH

Diterima: Tanggal, Bulan, Tahun

Direvisi: Tanggal, Bulan, Tahun

Disetujui: Tanggal, Bulan, Tahun

KATA KUNCI

Motor DC;

Waktu tunak;

Overshoot;

Sistem kontrol efisien;

Simulasi

KONTAK:

mathaya@student.ppons.ac.id

1. PENDAHULUAN

Motor arus searah (*Direct Current* atau DC) merupakan salah satu jenis aktuator yang paling luas digunakan dalam sistem teknik modern karena kemampuannya dalam menyediakan pengaturan kecepatan yang presisi dan dapat dikendalikan secara kontinu [1]. Fleksibilitasnya menjadikan motor DC sebagai pilihan utama dalam berbagai aplikasi, mulai dari sistem robotika presisi tinggi, lini produksi otomatis di bidang industri manufaktur, hingga sistem propulsi

kendaraan listrik yang menuntut efisiensi dan stabilitas performa [2]. Dalam konteks tersebut, pengendalian kecepatan motor DC menjadi aspek yang sangat penting untuk diperhatikan, mengingat akurasi kecepatan berpengaruh langsung terhadap efisiensi keseluruhan sistem, kehalusan gerakan, serta respons terhadap gangguan eksternal atau variasi beban [3].

Di antara berbagai teknik pengendalian yang telah dikembangkan, metode *Proportional-Integral-Derivative* (*PID controller*) tetap menjadi salah satu pendekatan

paling populer dan luas diterapkan [4]. Hal ini tidak terlepas dari struktur kontrol PID yang relatif sederhana namun sangat efektif, serta kemampuannya dalam memberikan keseimbangan antara respons cepat, kestabilan sistem, dan minimisasi kesalahan dalam keadaan tunak (*steady-state error*) [5]. Penggunaan PID dinilai mampu mengantisipasi perubahan dinamis dalam sistem secara efisien, baik itu akibat perubahan beban, tegangan suplai, maupun gangguan tak terduga lainnya [6].

Namun demikian, efektivitas pengendali PID sangat bergantung pada akurasi model matematis dari sistem yang dikendalikan. Oleh sebab itu, sebelum penerapan pengendali PID dapat dilakukan, langkah awal yang sangat krusial adalah melakukan analisis terhadap karakteristik dinamis motor DC tersebut. Tahap ini mencakup proses pemodelan dan identifikasi sistem, di mana parameter-parameter penting seperti momen inersia, koefisien gesekan viskus, konstanta torsi, serta konstanta medan elektromagnetik harus ditentukan secara tepat [7]. Parameter-parameter tersebut diperlukan untuk menyusun representasi matematis sistem dalam bentuk *transfer function* atau model ruang keadaan (*state-space model*) yang dapat digunakan sebagai dasar dalam perancangan pengendali [8].

Dalam berbagai studi sebelumnya, pendekatan terhadap pemodelan motor DC telah dilakukan baik secara teoritis maupun eksperimental. Beberapa di antaranya menggunakan metode identifikasi sistem berbasis data (*experimental model identification*) untuk memperoleh parameter dinamis secara empiris [9]. Penggunaan perangkat keras sederhana seperti *Arduino* atau mikrokontroler *ATmega16* juga telah banyak diteliti, menunjukkan bahwa implementasi kontrol PID dapat dilakukan secara *real-time* dengan biaya yang relatif rendah [10]. Selain itu, terdapat pula pendekatan yang memadukan pengendalian PID dengan teknik optimasi seperti algoritma *Firefly*, yang digunakan untuk melakukan *auto-tuning* terhadap parameter PID agar menghasilkan kinerja sistem yang lebih optimal [11].

Di sisi lain, kemajuan teknologi juga telah membuka ruang bagi integrasi metode kontrol konvensional dengan teknologi modern. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa efektivitas pengendali PID dapat ditingkatkan melalui sinergi dengan teknologi seperti sistem pengendalian terdistribusi berbasis *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)* [12], pemanfaatan konverter *Cuk* untuk efisiensi energi yang lebih baik [13], hingga penerapan sumber energi alternatif seperti panel

surya dalam sistem penggerak motor DC. Hal ini mencerminkan adanya arah perkembangan yang adaptif dan multifaset dalam pengendalian motor DC, di mana aspek efisiensi energi, keandalan sistem, dan keberlanjutan lingkungan turut menjadi perhatian [14].

Selain pendekatan berbasis konvensional, *tuning* parameter PID juga telah ditingkatkan dengan mengadopsi teknik kecerdasan buatan, seperti algoritma genetika [15], logika *fuzzy* [16], hingga pendekatan kontrol *Linear Quadratic Regulator (LQR)* [17]. Pendekatan-pendekatan tersebut dirancang untuk meningkatkan fleksibilitas dan adaptivitas kontrol, sehingga mampu menghadapi dinamika sistem yang kompleks serta perubahan kondisi operasi yang bersifat nonlinier atau tak terprediksi [18].

Berdasarkan rangkuman berbagai pendekatan di atas, studi ini diarahkan pada pengembangan model matematis yang akurat dari motor DC, serta merancang pengendali PID yang dapat menghasilkan pengaturan kecepatan secara efisien dan handal dalam berbagai kondisi operasional. Melalui sintesis antara metode pemodelan, teknik identifikasi sistem, serta penyetelan kontroler berbasis data dan algoritma cerdas, diharapkan sistem pengendalian yang dikembangkan mampu menunjukkan kinerja yang optimal dan dapat diandalkan untuk aplikasi dunia nyata. Pendekatan ini sekaligus menjadi jembatan antara teori dan praktik dalam pengendalian kecepatan motor DC berbasis kontrol PID yang modern, efisien, dan aplikatif [20].

2. METODE PENELITIAN

Dalam pengembangan sistem kendali kecepatan motor DC, perumusan metode penelitian menjadi fondasi yang sangat krusial dalam menjamin keberhasilan desain pengendali. Penggunaan pendekatan eksperimental yang sistematis, pengolahan data yang cermat, serta penerapan *Proportional-Integral-Derivative (PID)* yang terstruktur, akan menghasilkan sistem yang mampu beradaptasi terhadap berbagai kondisi dinamis. Oleh karena itu, bab ini menyajikan tahapan-tahapan metodologis secara teknis dan terukur guna memastikan bahwa solusi yang dihasilkan bersifat aplikatif, presisi, serta dapat direproduksi dalam skala nyata.

Penelitian ini diawali dengan studi literatur mendalam untuk memahami dinamika sistem motor DC, karakteristik kendali PID, serta implementasi model matematis dalam berbagai pendekatan. Penggunaan motor DC dalam sistem kendali terbukti memiliki

fleksibilitas yang tinggi, khususnya dalam aplikasi kendaraan listrik, otomasi industri, dan robotika [21]. Di sisi lain, pengendali PID tetap menjadi metode yang dominan digunakan karena strukturnya yang sederhana namun efektif, khususnya dalam sistem linier dan hampir linier.

Pemodelan matematis motor DC dilakukan berdasarkan prinsip-prinsip dasar kelistrikan (hukum *Kirchhoff*) dan mekanika (hukum *Newton*), yang menghasilkan model orde dua dalam bentuk persamaan diferensial. Persamaan ini kemudian dikonversi ke dalam bentuk *transfer function* atau *state-space model*. Model ini melibatkan parameter-parameter penting seperti resistansi (R), induktansi (L), konstanta torsi ($K_{t/s}$), serta momen inersia (J) [22]. Namun, dalam praktiknya, tidak semua parameter tersedia secara eksplisit dalam *datasheet* pabrikan. Oleh karena itu, dilakukan proses identifikasi sistem secara eksperimental.

Identifikasi dilakukan menggunakan pendekatan *black-box modeling*, di mana sistem diberikan masukan berupa sinyal *Pseudo-Random Binary Sequence (PRBS)*. Jenis sinyal ini dikenal karena kemampuannya mengeksitasi spektrum frekuensi sistem secara acak namun terkendali, sehingga memungkinkan diperolehnya data respons sistem yang representatif. Data masukan dan keluaran kemudian diproses menggunakan *MATLAB System Identification Toolbox*, dan diperoleh model orde dua melalui pendekatan estimasi *transfer function*. Hasil identifikasi menunjukkan tingkat kecocokan model (*Best Fit*) sebesar 85,74%.

Setelah fungsi alih diperoleh, tahap selanjutnya adalah mengonversinya ke dalam bentuk *state-space* guna memungkinkan analisis terhadap *controllability* dan *observability*. Kedua konsep fundamental ini menentukan apakah sistem dapat dikendalikan sepenuhnya dari masukan, dan apakah seluruh kondisi internal sistem dapat diamati melalui keluaran [9]. Matriks *controllability* dan *observability* kemudian disusun dan diuji menggunakan metode *rank*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki *full rank*, yang berarti dapat dikontrol dan diobservasi secara menyeluruh.

Pengendali PID kemudian dirancang untuk mengoreksi kesalahan antara kecepatan yang diinginkan (*setpoint*) dan kecepatan aktual. *Tuning* parameter dilakukan secara manual menggunakan pendekatan *step response simulation*. Nilai awal $K_{p/s}$, $K_{i/s}$, dan $K_{d/s}$ disesuaikan secara

iteratif hingga diperoleh hasil dengan *overshoot* yang minimal, waktu tunak yang cepat, serta kesalahan keadaan tunak mendekati nol. Penelitian ini menghasilkan parameter optimal yaitu $K_{p/s} = 0.1$, $K_{i/s} = 2.0$, dan $K_{d/s} = 0.01$, yang memberikan respons sistem yang halus dan stabil.

Simulasi dilakukan menggunakan *MATLAB/Simulink* sebagai media validasi model dan penyetelan pengendali. Model sistem yang telah diidentifikasi kemudian diuji dalam berbagai skenario, termasuk perubahan beban dan variasi *setpoint*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem dapat mencapai *steady-state* dalam waktu 2,5 detik, dengan *maximum overshoot* sebesar 3,45%, dan *steady-state error* sebesar 0,00%.

Validasi lebih lanjut dilakukan melalui pengujian perangkat keras (*hardware implementation*). Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler sebagai unit pengendali utama, *motor driver* sebagai aktuator sinyal *PWM*, *rotary encoder* sebagai umpan balik kecepatan, dan motor DC sebagai objek kendali. Pengujian bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem secara aktual dan membandingkannya dengan hasil simulasi guna mengukur konsistensi dan keandalan performa sistem. Prosedur ini sejalan dengan pendekatan eksperimental yang telah dilakukan pada penelitian Prakosa et al. dan Ma'arif et al.

Secara keseluruhan, pendekatan metodologis yang digunakan menggabungkan pemodelan teoritis, identifikasi sistem berbasis data, analisis kontrol modern, serta validasi melalui simulasi dan eksperimen. Strategi ini sejalan dengan kerangka kerja pengembangan sistem kendali dalam industri modern, serta mendukung prinsip *Model-Based Design* yang kini menjadi standar dalam pengembangan sistem otomatisasi dan aktuator elektronik.

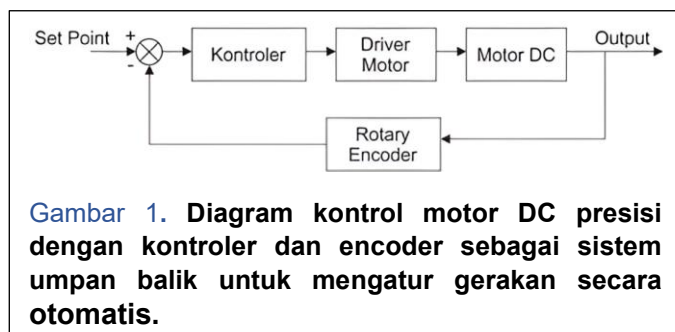
Dengan pendekatan yang menyeluruh, sistem pengaturan kecepatan motor DC yang dikembangkan diharapkan tidak hanya mampu memberikan performa yang stabil dan presisi, tetapi juga memiliki potensi untuk diterapkan pada berbagai skenario industri yang menuntut efisiensi, waktu respons yang cepat, dan keandalan tinggi.

A. Blok Diagram Sistem

Perancangan sistem ini dilakukan dengan mengacu pada blok diagram yang telah dirancang sebelumnya. Blok diagram tersebut berfungsi untuk menggambarkan alur kerja dari sistem kendali kecepatan motor DC secara menyeluruh, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1. Proses dimulai dari nilai kecepatan yang diinginkan

(*setpoint*) yang dimasukkan oleh pengguna ke dalam mikrokontroler. Nilai ini kemudian dibandingkan dengan data kecepatan aktual motor yang diperoleh melalui sensor. Selisih antara keduanya dikenal sebagai *error*, yaitu perbedaan antara kondisi ideal dan kondisi nyata. Nilai *error* ini, bersama dengan *setpoint*, diolah oleh sistem pengendali untuk menghasilkan sinyal kontrol yang akan digunakan untuk mengatur kecepatan motor secara otomatis dan presisi.

Sinyal EMG direkam selama kurang lebih 5 detik atau sekitar 20.000 data untuk setiap gerakan tangan yang dilakukan. Selain itu, setiap subjek diberikan waktu istirahat selama 10 detik setelah setiap kontraksi guna mencegah terjadinya kelelahan otot selama proses pengambilan data. Contoh dataset hasil perekaman sinyal EMG ditunjukkan pada Gambar 1, yang menggambarkan protokol eksperimen dalam pengumpulan sinyal EMG dari satu orientasi secara berurutan. Secara rinci, jumlah data EMG untuk 1 subjek dan 1 orientasi adalah sebanyak 1.260.000 data (1 orientasi \times 7 gerakan \times 3 tingkat kontraksi \times 3 kali pengulangan \times 20.000 data). Sebelum digunakan sebagai input pada klasifikator CNN, sinyal EMG tersebut disegmentasi dengan panjang jendela sebanyak 500 sampel atau setara dengan 125 milidetik (frekuensi pengambilan sampel = 4.000 Hz, waktu per sampel = 0,25 milidetik).



Sinyal kontrol yang telah dihasilkan akan diteruskan ke driver motor, yang berfungsi sebagai penguat sinyal untuk menggerakkan motor DC sesuai dengan perintah dari pengendali. Setelah sistem dirancang dan terintegrasi, dilakukan serangkaian pengujian untuk memastikan seluruh komponen berfungsi sebagaimana mestinya. Tahapan pengujian ini mencakup pengujian performa motor DC, evaluasi kinerja driver motor, pengujian akurasi rotary encoder sebagai sensor kecepatan, penentuan fungsi alih motor DC melalui proses identifikasi, serta pengujian sistem secara keseluruhan untuk menilai kesesuaian antara rancangan dan implementasi nyata.

B. Observabilitas dan Kontrolabilitas dari Sistem

Dalam penelitian ini, perhatian utama difokuskan pada pemastian bahwa sistem motor DC yang dirancang untuk dikendalikan menggunakan kontrol PID memiliki sifat observabilitas dan kontrolabilitas yang memadai.

Kedua konsep ini merupakan pilar utama dalam teori sistem kendali, karena menentukan apakah kondisi internal sistem dapat diamati dari keluaran yang tersedia, serta sejauh mana sistem dapat dikendalikan melalui sinyal input. Tanpa kedua sifat tersebut, penerapan kontrol PID tidak akan memberikan hasil yang optimal, karena sistem mungkin tidak dapat merespons secara efektif terhadap perubahan maupun koreksi yang diberikan.

C. Observabilitas Sistem

Observabilitas merupakan kemampuan suatu sistem untuk menentukan atau memperkirakan seluruh kondisi internalnya hanya berdasarkan data keluaran (output) yang tersedia. Dalam konteks ini, sistem dianggap *observable* apabila seluruh variabel keadaannya dapat diketahui dengan akurat dari pengamatan terhadap output selama rentang waktu tertentu. Untuk menguji apakah sistem motor DC yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi kriteria observabilitas, dilakukan beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Pemodelan Matematika Sistem

Tahap awal dimulai dengan menyusun model matematis dari motor DC menggunakan persamaan diferensial yang merepresentasikan dinamika sistem secara menyeluruh. Model ini mencakup berbagai parameter fisik seperti momen inersia rotor, resistansi dan induktansi kumparan, serta konstanta gaya gerak balik elektromotif (*back EMF*). Dengan model ini, diperoleh representasi yang akurat terhadap perilaku sistem dalam bentuk *state-space*.

2. Penyusunan Matriks Observabilitas

Berdasarkan model yang telah dibentuk, disusunlah matriks observabilitas sesuai dengan persamaan keadaan (*state equations*) dan persamaan keluaran (*output equations*) dari sistem. Matriks observabilitas ini menjadi alat analisis utama untuk menentukan sejauh mana kondisi internal sistem dapat diamati melalui output. Formulasi lengkapnya ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$Ob = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Di mana A adalah matriks keadaan, C adalah matriks keluaran, dan n adalah derajat sistem

3. Pengujian Rangkang Matriks

Stelah matriks observabilitas disusun, langkah berikutnya adalah melakukan pengujian terhadap

rangking matriks tersebut. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah seluruh variable keadaan dalam sistem dapat teramati secara penuh melalui output yang tersedia. Matriks observabilitas dikatakan memiliki rangking penuh apabila jumlah baris independennya sama dengan jumlah total variable keadaan (n) dalam system.

D. Kontrolabilitas Sistem

Kontrolabilitas merupakan kemampuan suatu sistem untuk memindahkan atau mengarahkan seluruh kondisi internalnya dari suatu keadaan awal ke keadaan akhir yang diinginkan dalam kurun waktu tertentu, melalui pengaruh dari sinyal input. Dalam sistem kendali modern, kontrolabilitas menjadi salah satu syarat fundamental agar sistem dapat dikendalikan secara optimal, khususnya ketika diterapkan pengendali seperti PID.

Untuk memastikan bahwa sistem motor DC dalam penelitian ini bersifat controllable, dilakukan tahapan-tahapan analisis sebagai berikut:

1. Penyusunan Matriks Kontrolabilitas

Langkah pertama dalam proses pengujian kontrolabilitas adalah menyusun matriks kontrolabilitas berdasarkan model matematis sistem pada persamaan (2) Matriks ini dibentuk dengan mengombinasikan matriks keadaan (state matrix, A) dan matriks input (input matrix, B). Susunan matriks ini secara matematis mewakili seberapa besar pengaruh sinyal input terhadap dinamika perubahan seluruh variabel keadaan dalam sistem. Matriks kontrolabilitas memberikan dasar analisis apakah sinyal kendali yang diberikan benar-benar mampu menjangkau seluruh ruang keadaan dari sistem motor DC yang dimodelkan.

$$Co = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (2)$$

2. Pengujian Rank Matriks Kontrolabilitas

Setelah matriks kontrolabilitas terbentuk, tahap berikutnya adalah mengevaluasi nilai rank dari matriks tersebut. Sistem dikatakan memiliki kontrolabilitas penuh apabila rank dari matriks kontrolabilitas sama dengan jumlah variabel keadaan (n) dalam sistem. Dengan kata lain, jika semua baris dalam matriks bersifat linier independen, maka sistem dianggap dapat dikendalikan secara menyeluruh oleh sinyal input. Proses pengujian ini dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak MATLAB, yang memungkinkan perhitungan rank dilakukan secara akurat dan efisien.

E. Simulasi dan Verifikasi

Setelah dipastikan bahwa sistem motor DC yang dimodelkan memenuhi syarat observabilitas dan kontrolabilitas, tahap selanjutnya adalah melakukan proses simulasi dan verifikasi untuk mengevaluasi performa sistem secara menyeluruh. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink, dengan memasukkan parameter-parameter sistem yang telah diperoleh dari proses identifikasi sebelumnya.

Melalui simulasi ini, sistem diuji terhadap berbagai skenario input untuk mengamati responsnya saat dikendalikan menggunakan pengendali PID. Fokus utama dari pengujian ini adalah untuk melihat apakah sistem mampu merespons dengan stabil, cepat, dan akurat, sekaligus memastikan bahwa seluruh kondisi internal tetap dapat dikendalikan dan diamati sebagaimana mestinya.

Setelah hasil simulasi dianalisis dan memenuhi kriteria performa, langkah berikutnya adalah melakukan verifikasi eksperimental menggunakan perangkat keras nyata. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa perilaku sistem dalam dunia nyata konsisten dengan model matematis dan hasil simulasi yang telah dilakukan sebelumnya. Dengan demikian, diperoleh validasi menyeluruh bahwa sistem pengaturan kecepatan motor DC yang dirancang dapat diandalkan baik secara teoritis maupun praktis.

3. HASIL

A. Pengujian Motor DC

Setelah perancangan sistem selesai dan model kendali disusun, tahap berikutnya yang sangat penting adalah melakukan pengujian langsung terhadap motor DC sebagai aktuator utama. Motor DC merupakan komponen inti dalam sistem pengendalian kecepatan, sehingga performanya perlu diuji secara menyeluruh untuk memastikan bahwa sistem dapat bekerja sesuai ekspektasi. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang lebih dalam mengenai respons motor terhadap berbagai tingkat sinyal kendali, serta mengamati karakteristik dinamisnya dalam kondisi nyata.

Proses pengujian dilakukan dengan memberikan variasi sinyal kendali dalam bentuk duty cycle PWM, lalu mencatat kecepatan putar yang dihasilkan oleh motor. Dari hasil ini dapat ditentukan bagaimana hubungan antara besar sinyal input dengan output sistem dalam bentuk kecepatan, serta sejauh mana motor merespons perubahan secara linier, stabil, dan cepat. Selain itu, pengujian ini juga memungkinkan penilaian terhadap aspek-aspek praktis seperti kestabilan putaran, ketahanan terhadap beban, serta kesesuaian antara model yang telah disimulasikan dengan kinerja aktual motor di lapangan.

Dengan melalui tahapan ini, diperoleh dasar yang kuat untuk melakukan verifikasi model matematis yang telah dikembangkan, sekaligus menjadi pijakan penting

untuk kelanjutan proses integrasi sistem kendali secara keseluruhan. Hasil dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Perubahan Kecepatan Motor Terhadap Tegangan Masukan

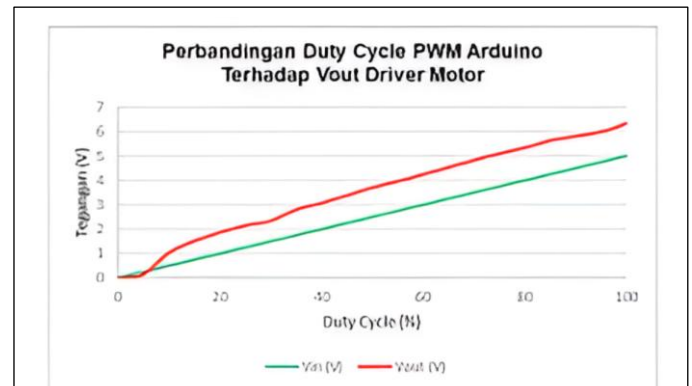
B. Pengujian Driver Motor

Pengujian *motor driver* dilakukan untuk memastikan bahwa komponen ini mampu menjalankan fungsinya secara optimal dalam mengendalikan motor DC berdasarkan sinyal kontrol yang dihasilkan oleh pengendali *PID*. Sebagai penghubung utama antara *microcontroller* dan motor, *motor driver* memiliki peran krusial dalam mengatur aliran daya listrik menuju motor. Aliran daya ini perlu dikendalikan secara presisi agar kecepatan dan torsi motor dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem secara dinamis dan efisien.

Pemilihan *motor driver* tidak dapat dilakukan secara sembarangan, melainkan harus disesuaikan dengan karakteristik teknis dari motor DC yang digunakan. Faktor-faktor seperti tegangan kerja, kapasitas arus maksimum, serta kebutuhan daya rata-rata dan puncak menjadi pertimbangan utama dalam proses seleksi. Ketidaksesuaian spesifikasi antara driver dan motor dapat menyebabkan performa sistem yang buruk, seperti respons yang lambat, kendali yang tidak akurat, hingga potensi kerusakan permanen pada komponen.

Dalam proses pengujian, dilakukan observasi terhadap hubungan antara sinyal *PWM* (Pulse Width Modulation) yang dikirimkan dari *microcontroller* dan besarnya tegangan keluaran (*output voltage*) yang dihasilkan oleh *driver*. Dengan menganalisis pola perubahan tegangan terhadap variasi *duty cycle PWM*, dapat dievaluasi sejauh mana *driver* mampu merespons sinyal kontrol secara linier, stabil, dan konsisten. Hasil pengamatan visual terhadap karakteristik tegangan

keluaran ditampilkan pada Gambar 3. sebagai bagian dari analisis performa aktual *motor driver* dalam rangkaian kendali kecepatan motor DC.



Gambar 3. Hasil Pengujian Rotary Encoder

C. Pengujian Rotary Encoder

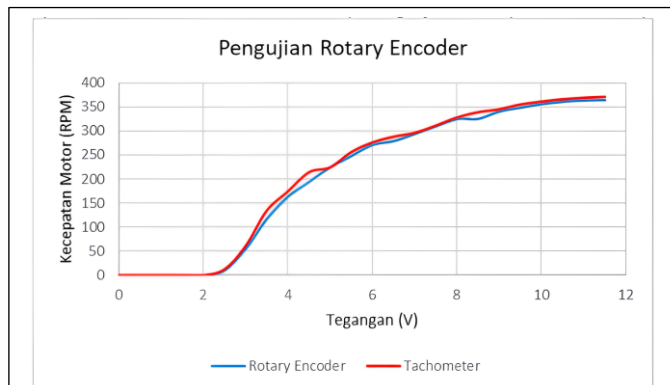
Dalam sistem kontrol modern, terutama pada penerapan pengaturan kecepatan dan posisi motor DC, keberadaan sensor umpan balik memainkan peran yang sangat esensial. Sensor ini menjadi sumber informasi utama yang memungkinkan sistem mengoreksi dirinya secara *real-time* untuk menjaga akurasi kinerja. Salah satu sensor yang umum digunakan untuk keperluan tersebut adalah rotary encoder. Rotary encoder berfungsi untuk mendeteksi parameter-parameter rotasi, seperti kecepatan sudut, arah rotasi, dan posisi poros motor, yang kemudian dikonversi menjadi sinyal digital yang dapat dibaca oleh mikrokontroler atau pengendali logika.

Dalam konteks penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap rotary encoder guna mengevaluasi tingkat kelinieran serta keakuratan hasil pembacaannya terhadap kecepatan putaran motor DC yang dikendalikan. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa data yang dihasilkan oleh encoder bersifat proporsional terhadap input kontrol yang diberikan, khususnya dalam bentuk sinyal *PWM* (*Pulse Width Modulation*) yang merepresentasikan besarnya perintah kecepatan. Akurasi data encoder menjadi sangat penting, karena sinyal tersebut digunakan sebagai umpan balik dalam sistem kontrol *PID*, yang secara langsung menentukan kualitas kestabilan dan performa sistem secara keseluruhan.

Prosedur pengujian dilakukan dengan memberikan variasi *duty cycle PWM* kepada motor, lalu merekam respons kecepatan yang dihasilkan melalui rotary encoder. Hasil pembacaan tersebut kemudian dibandingkan dengan pengukuran yang diperoleh dari alat ukur standar, yakni tachometer, untuk menilai kesesuaian antara keduanya. Selisih atau deviasi yang kecil antara pembacaan encoder dan tachometer akan

menjadi indikator bahwa sensor bekerja secara konsisten.

Selain itu, pengujian ini juga membuka peluang untuk menilai sensitivitas sensor terhadap perubahan sinyal kendali, serta stabilitas performa encoder ketika dihadapkan pada fluktuasi input maupun variasi beban. Hasil dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Analisis Komparatif Akurasi Berbasis Pengukuran Kecepatan Motor Menggunakan Rotary Encoder dan Tachometer pada Variasi Tegangan Input

D. Penentuan Fungsi Alih Motor DC

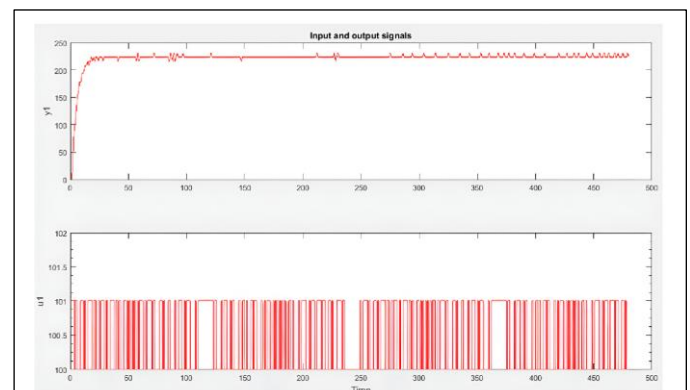
Dalam sistem kendali modern, salah satu tahap fundamental sebelum perancangan pengendali adalah memahami secara mendalam karakteristik dinamis dari sistem yang akan dikendalikan. Salah satu representasi paling umum dari karakteristik ini adalah dalam bentuk fungsi alih (*transfer function*), yang memetakan hubungan antara input dan output dari sistem dalam domain waktu atau frekuensi. Fungsi alih menjadi dasar dalam banyak metode analisis dan desain kontrol, termasuk kontrol klasik seperti PID hingga pendekatan yang lebih kompleks seperti kontrol adaptif dan optimal.

Namun, dalam banyak kasus, khususnya pada sistem fisik seperti motor DC, tidak semua parameter sistem diketahui secara pasti dari data pabrikan atau dokumentasi teknis. Faktor-faktor seperti keausan mekanis, variasi manufaktur, dan lingkungan operasional dapat menyebabkan deviasi karakteristik dari nilai-nilai teoritis. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan identifikasi sistem untuk memperoleh model matematis yang akurat dan representatif terhadap kondisi nyata sistem.

Salah satu metode identifikasi sistem yang populer dan efektif adalah dengan menggunakan sinyal *Pseudo-Random Binary Sequence* (PRBS). Sinyal PRBS merupakan urutan biner dengan karakteristik acak semu yang memiliki spektrum frekuensi luas, sehingga sangat sesuai untuk mengeksitasi berbagai dinamika dalam sistem.

Sinyal PRBS yang telah dirancang digunakan sebagai input ke sistem motor DC. Respons motor terhadap variasi sinyal PRBS dicatat secara sistematis, baik dalam bentuk kecepatan putaran maupun sinyal keluaran lainnya yang relevan. Data ini kemudian diolah dengan metode identifikasi sistem, baik secara grafis maupun numerik, untuk menyusun model fungsi alih yang menggambarkan hubungan antara input PWM dan output kecepatan motor. Model ini menjadi fondasi utama dalam proses desain dan penyetelan pengendali PID yang mampu mengatur kecepatan motor secara responsif, stabil, dan presisi.

Dengan pendekatan ini, proses identifikasi tidak hanya memberikan representasi matematis sistem yang akurat, tetapi juga mendekatkan perilaku model dengan realitas dinamis perangkat keras. Hal ini menjadi jaminan bahwa rancangan kontrol yang dibangun di atas model tersebut akan mampu berfungsi dengan baik ketika diterapkan dalam implementasi nyata dapat dilihat dari Gambar 5.



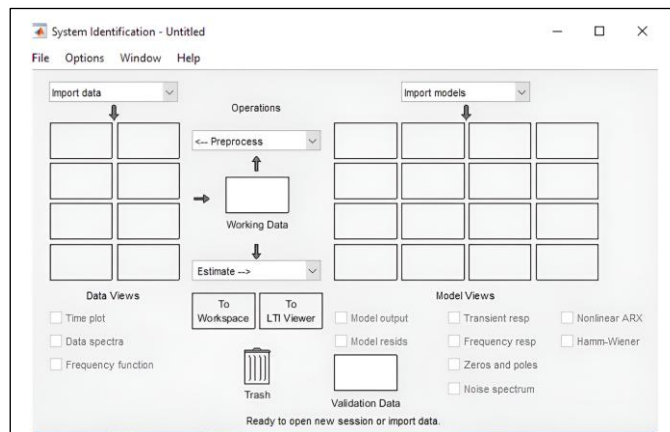
Gambar 5. Grafik respons sistem terhadap sinyal PRBS: menampilkan karakteristik dinamik input acak bernilai biner dan dampaknya terhadap output sistem dalam proses identifikasi dan analisis performa.

Langkah akhir dalam proses pemodelan sistem motor DC melibatkan tahap identifikasi sistem berdasarkan data empiris yang telah dikumpulkan dari pengujian menggunakan sinyal *Pseudo-Random Binary Sequence* (PRBS). Identifikasi ini bertujuan untuk membentuk model matematis yang merepresentasikan perilaku dinamis motor secara akurat berdasarkan hubungan antara input (sinyal PRBS) dan output (kecepatan motor). Data output yang dihasilkan sebagai respons motor terhadap input PRBS menjadi landasan penting untuk melakukan estimasi parameter sistem melalui proses komputasi.

Pengolahan data ini dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB, yang memiliki kemampuan komprehensif dalam bidang pemodelan dan analisis sistem dinamis. Salah satu fitur unggulan yang digunakan

dalam proses ini adalah *System Identification Toolbox*, yang memungkinkan pengguna untuk memuat data eksperimen dan membangun model *transfer function* atau model *state-space* dari sistem yang diuji. Data sinyal PRBS serta data kecepatan motor terlebih dahulu diimpor ke dalam *workspace* MATLAB, kemudian dikonversi dalam format yang sesuai untuk diproses dalam blok identifikasi sistem.

Pada tahapan ini, fungsi *ident* dalam MATLAB digunakan untuk melakukan *curve fitting* antara data aktual yang diperoleh dari eksperimen dan model yang dihasilkan. Proses *fitting* ini akan mengevaluasi seberapa baik model matematis yang dibentuk merepresentasikan perilaku sistem yang sebenarnya. Semakin kecil galat (*error*) yang dihasilkan antara model dan data asli, maka semakin akurat model tersebut dianggap. Dalam konteks kendali PID, model yang diperoleh dari proses identifikasi ini akan sangat berguna untuk menyusun parameter kendali yang lebih optimal dan presisi, seperti yang terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Tampilan Interaktif untuk Identifikasi Sistem: Integrasi Data, Estimasi Model, dan Validasi dalam Analisis Dinamik

Setelah tahap identifikasi sistem berbasis data dilakukan dengan memanfaatkan sinyal PRBS sebagai input dan data kecepatan motor sebagai output, langkah berikutnya adalah melakukan proses estimasi model matematis dari sistem motor DC. Estimasi model ini ditujukan untuk menyederhanakan kompleksitas dinamika motor ke dalam bentuk matematis yang dapat digunakan secara praktis untuk analisis dan perancangan pengendali. Salah satu pendekatan yang umum dan efisien dalam hal ini adalah representasi dalam bentuk fungsi alih (transfer function).

Transfer function memungkinkan pemodelan hubungan antara input sistem berupa sinyal kendali (seperti PWM) dan output sistem berupa respons kecepatan motor dalam domain waktu atau frekuensi. Dengan metode ini, dinamika motor DC yang semula terekam sebagai deretan data eksperimen dapat direduksi menjadi model matematis berupa rasio antara

polinomial di domain Laplace. Proses estimasi ini dilakukan melalui software MATLAB dengan menggunakan fitur *system identification*, yang secara otomatis memproses data dan menghasilkan model transfer function terbaik berdasarkan metode fitting terhadap data actual.

Model hasil estimasi tersebut kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. dan Gambar 8. Grafik ini menampilkan kecocokan antara respons sistem aktual dan respons model yang dihasilkan, sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi kualitas dari model identifikasi. Jika kurva model mendekati kurva hasil pengukuran, maka dapat dikatakan bahwa fungsi alih yang dihasilkan memiliki representasi yang akurat terhadap sistem fisik sebenarnya. Nilai parameter fungsi alih inilah yang selanjutnya digunakan dalam desain pengendali PID untuk mencapai respons sistem yang diinginkan secara optimal.

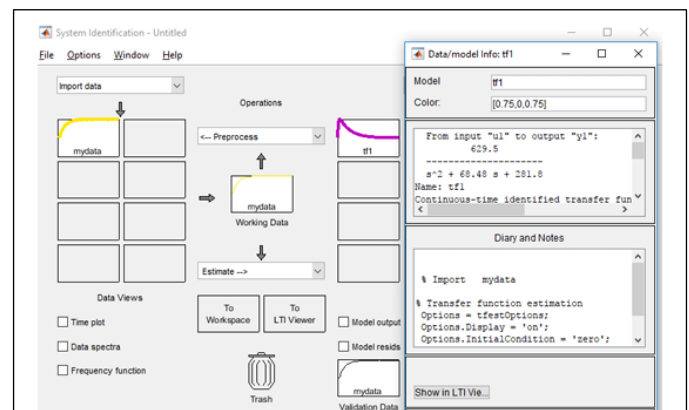
Tipe model : Orde 2

Best Fit : 85,74%

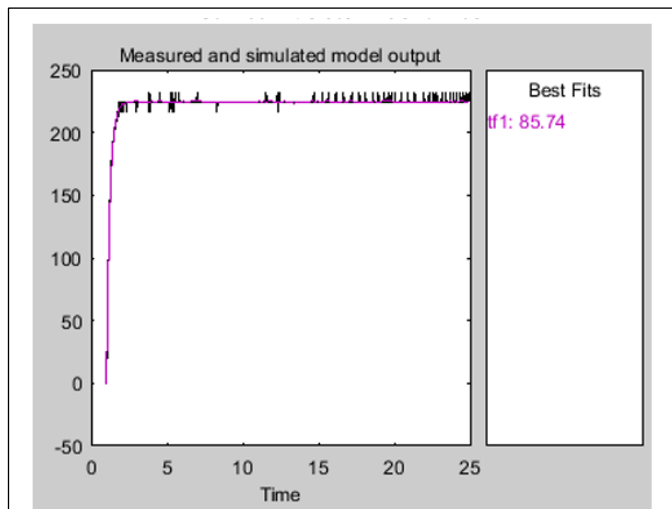
Fungsi alih :

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{629.5}{s^2 + 68.48s + 281.8}$$

(3)



Gambar 7. Tampilan Pemodelan Sistem Dinamis Berbasis Data: Estimasi Fungsi Alih dan Validasi Model Terintegrasi

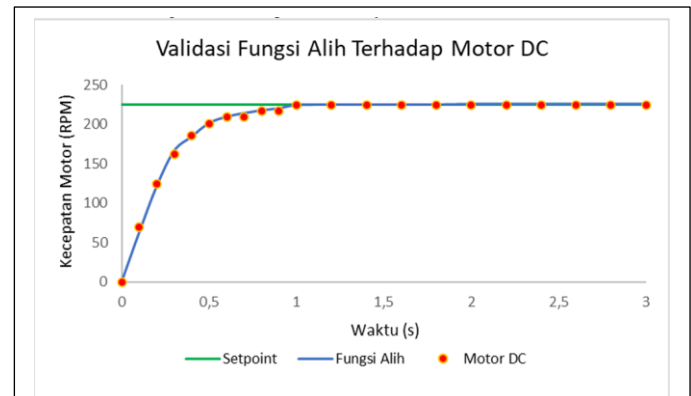


Gambar 8. Tampilan Hasil Pemodelan Sistem Dinamis Berbasis Data: Estimasi Fungsi Alih dan Validasi Model Terintegrasi

Tahapan lanjutan dalam proses pengujian sistem adalah melakukan validasi terhadap *transfer function* motor DC yang sebelumnya telah diperoleh melalui metode identifikasi sistem. Validasi ini dilakukan dengan pendekatan komparatif, yaitu dengan membandingkan respons sistem yang dihasilkan dari model matematis dengan output nyata yang diperoleh dari pengukuran langsung melalui sensor rotary encoder. Pendekatan validasi seperti ini telah banyak digunakan dalam studi identifikasi sistem karena mampu memberikan gambaran kuantitatif terhadap akurasi model.

Dalam praktiknya, fungsi alih hasil identifikasi merupakan model linier orde dua yang menggambarkan hubungan antara input tegangan dan output kecepatan dalam domain waktu atau frekuensi. Sementara itu, rotary encoder berfungsi sebagai perangkat umpan balik yang merekam kecepatan aktual motor sebagai respons terhadap sinyal input tertentu. Perbandingan antara data simulasi dan hasil pengukuran aktual menjadi dasar dalam menguji konsistensi antara model identifikasi dan karakteristik sistem riil.

Prosedur ini memungkinkan dilakukannya analisis kuantitatif dan kualitatif terhadap potensi penyimpangan model, baik dari aspek amplitudo, fase, maupun respons transien. Evaluasi semacam ini menjadi penting terutama dalam desain sistem kendali yang menuntut presisi dan keandalan tinggi. Visualisasi hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 9., yang menunjukkan tingkat kemiripan bentuk gelombang antara data hasil simulasi dan data aktual dari pengukuran sensor. Validasi ini juga menjadi dasar untuk menentukan apakah model hasil identifikasi cukup representatif untuk digunakan dalam proses tuning pengendali maupun dalam simulasi lanjutan.



Gambar 9. Validasi Fungsi Alih terhadap Motor DC

E. Pengujian Observabilitas dan Kontrolabilitas Sistem

Fungsi alih yang ditunjukkan pada persamaan 3 kemudian dikonversi menjadi bentuk state-space pada persamaan 4, untuk kebutuhan melakukan analisa observabilitas dan kontrolabilitas sistem.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4)$$

$$y = Cx + Du \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} -68,48 & -281,8 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C = [0 \quad 629,5] \quad (8)$$

Dari persamaan state-space pada persamaan 4, maka diketahui matriks observabilitas system adalah:

$$Obsv = \begin{bmatrix} 0 & 629,5 \\ 629,5 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Rank matriks obsv adalah 2, yang berarti system observable. Diketahui pula matriks kontrolabilitas dari system adalah:

$$Ctrb = \begin{bmatrix} 1 & -68,48 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Rank matriks ctrb adalah 2, yang berarti system controllable. Maka memiliki kemungkinan untuk meneruskan oengujian ke penerapan kontroler PID.

4. PEMBAHASAN

A. Keseluruhan Sistem

Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi apakah seluruh komponen dalam sistem telah bekerja secara terpadu dan sesuai dengan desain teknis yang telah direncanakan sebelumnya. Visualisasi dari integrasi sistem ini dapat diamati pada Gambar 10. Sebelum dilakukan proses pengujian, seluruh elemen dalam system termasuk motor DC, driver motor, pengendali PID, serta sensor rotary encoder diintegrasikan secara menyeluruh sesuai dengan konfigurasi skematik. Tahapan ini mengikuti pendekatan implementasi sistem

kontrol tertutup berbasis PID sebagaimana digunakan dalam berbagai studi sebelumnya.

Dalam implementasinya, motor DC dikoneksikan dengan driver motor yang berfungsi untuk mengatur suplai daya berdasarkan sinyal kontrol yang dihasilkan oleh pengendali PID. Sementara itu, rotary encoder dipasang secara presisi pada poros motor guna menyediakan umpan balik berupa data kecepatan aktual. Model umpan balik berbasis sensor rotary encoder telah terbukti efektif dalam menjaga kestabilan kecepatan putaran motor pada berbagai penelitian eksperimen dan simulasi. Pengendali PID kemudian diprogram untuk memproses sinyal umpan balik tersebut dan mengatur keluaran berupa sinyal PWM yang akan diteruskan ke driver motor guna mengontrol kecepatan motor, sebagaimana umum digunakan pada sistem berbasis Arduino dan MATLAB.

Tahapan awal pengujian dilakukan dalam kondisi tanpa beban (unloaded), di mana motor dijalankan tanpa adanya gangguan dari beban eksternal. Setpoint kecepatan ditentukan terlebih dahulu, dan pengendali PID diaktifkan untuk mempertahankan kecepatan motor sesuai nilai tersebut. Teknik ini banyak diterapkan dalam studi-studi eksperimental untuk mengevaluasi performa dinamis awal sistem sebelum memasuki pengujian berbeban. Data hasil pengukuran kecepatan yang diperoleh dari rotary encoder digunakan sebagai input koreksi dalam loop kontrol PID. Proses ini terekam secara grafis pada [Gambar 11.](#), yang memperlihatkan hubungan antara sinyal kontrol dan kecepatan aktual motor.

Parameter pengendali PID pada sistem ini diperoleh melalui proses penyetelan manual (hand-tuning), dengan nilai parameter masing-masing: konstanta proporsional (K_p) sebesar 0.1, konstanta integral (K_i) sebesar 2.0, dan konstanta turunan (K_d) sebesar 0.01. Metode tuning manual masih menjadi pendekatan umum pada tahap awal eksperimen karena sifatnya yang fleksibel dan mudah diaplikasikan, terutama dalam lingkungan pengujian berbasis Arduino dan simulasi real-time. Selama pengujian berlangsung, kecepatan motor diamati dan dicatat untuk dianalisis dalam konteks dinamika sistem terhadap perubahan setpoint. Berdasarkan hasil pengamatan, sistem menunjukkan karakteristik dinamis yang cukup baik, dengan waktu mencapai keadaan tunak (steady-state) sebesar 2,5 detik, maksimum overshoot sebesar 3,45%, dan *error steady-state* mendekati nol. Hasil tersebut sejalan dengan temuan beberapa studi terdahulu mengenai performa PID dalam pengaturan kecepatan motor DC pada mode kontrol kecepatan dasar.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan rangkaian proses penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem kendali kecepatan motor DC berbasis PID yang dirancang dan diuji berhasil menunjukkan performa yang sesuai dengan ekspektasi teknis. Proses pemodelan sistem diawali

dengan identifikasi parameter motor menggunakan sinyal PRBS, yang kemudian diolah melalui perangkat lunak MATLAB untuk memperoleh model matematis dalam bentuk fungsi alih orde dua. Hasil identifikasi menunjukkan tingkat kecocokan model sebesar 85,74%, yang menandakan bahwa model mampu merepresentasikan dinamika sistem secara akurat.

Validasi sistem menunjukkan bahwa output simulasi dari fungsi alih memiliki kesesuaian yang tinggi dengan data aktual dari rotary encoder. Uji observabilitas dan kontrolabilitas mengonfirmasi bahwa sistem dapat diamati dan dikendalikan sepenuhnya, sehingga layak untuk diimplementasikan pengendali PID. Setelah dilakukan tuning parameter PID ($K_p=0.1$, $K_i=2.0$, $K_d=0.01$), hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat merespons setpoint dengan waktu tunak sebesar 2,5 detik, overshoot sebesar 3,45%, dan *error steady-state* mendekati nol.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan tidak hanya mampu mengatur kecepatan motor dengan stabil dan responsif, namun juga memiliki potensi untuk diadaptasi pada berbagai skenario industri yang memerlukan kontrol presisi dan keandalan tinggi.

REFERENSI

- W. H. Larik dan P. Peerzada, "Simulation Analysis of DC Motor Speed Control Using PID Controller," *Int. J. Electr. Eng. Emerging Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 9–12, Jun. 2021.
- J. Linggarjati, "Advanced PID Simulation for DC Motor using Scilab," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 426, 012136, 2020.
- V. N. Huynh dan X. B. Dang, "An adaptive PID controller for precisely angular DC motor control," *J. Technical Education Sci.*, vol. 17, no. 1, pp. 48–55, Feb. 2022.
- S. I. Samsudin, K. Osman, S. F. Sulaiman, S. I. M. Salim, dan N. I. M. Aliashak, "Simulation and Experimental Study of Arduino DC Motor Speed Control with PID Controller," *Adv. and Sustainable Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 133–143, Des. 2024.
- Haj, Muhammad Izzul, Rama Arya Sobhita, and Anggara Trisna Nugraha. "Performance Analysis of DC Motor in SISO Circuit Using LQR Control Method: A Comparative Evaluation of Stability and Optimization." *ICCK Transactions on Power Electronics and Industrial Systems 1.1* (2025): 23-30.
- Rohman, Yulian Fatkur, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Optimization of DC Motor Control System FL57BL02 Using Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT): Performance Analysis." *ICCK Transactions on Power Electronics and Industrial Systems 1.1* (2025): 15-22.

- Haj, Muhammad Izzul, et al. "Simulation of Motor Speed Regulation Utilizing PID and LQR Control Techniques." MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology 2.1 (2025): 41-49.
- Nugraha, Anggara Trisna, Rama Arya Sobhita, and Akhmad Azhar Firdaus. "Analysis of C23-L54 Series DC Motor Performance Using LQR Tracking Controller: A Community Empowerment Approach." Emerging Trends in Industrial Electronics 1.1 (2025): 1-8.
- Eviningsih, Rachma Prilian, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Circuits on DC Motor BN12 Control." Sustainable Energy Control and Optimization 1.1 (2025): 10-19.
- Nugraha, Anggara Trisna, et al. "System Optimization Using LQR and LQT Methods on 42D29Y401 DC Motor." SAINSTECH NUSANTARA 2.2 (2025): 14-25.
- Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Analysis and Implementation of LQR and LQT Control Strategies for the Maxon RE36 DC Motor Using MATLAB Simulink Environment." SAINSTECH NUSANTARA 2.2 (2025): 1-13.
- Sobhita, Rama Arya, Anggara Trisna Nugraha, and Mukhammad Jamaludin. "Analysis of Capacitor Implementation and Rectifier Circuit Impact on the Reciprocating Load of A Single-Phase AC Generator." Sustainable Energy Control and Optimization 1.1 (2025): 1-9.
- Eviningsih, Rachma Prilian, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "DC Motor A-max 108828 and Noise using LQR and LQT Methods." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 3.1 (2025): 29-38.
- Nugraha, Anggara Trisna, and Rama Arya Sobhita. "Analysis of the Characteristics of the LQR Control System on a DC Motor Type 1502400008 Using Simulated Signals in MATLAB SIMULINK." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 3.1 (2025): 66-75.
- Haj, Muhammad Izzul, and Anggara Trisna Nugraha. "Optimization of Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Systems." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 3.1 (2025): 1-9.
- Ashlah, Muhammad Bilhaq, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Image processing with the thresholding method using MATLAB R2014A." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 3.1 (2025): 39-47.
- Sobhita, Rama Arya, and Anggara Trisna Nugraha. "Optimization of DC Motor 054B-2 By Method LQR and LQT in MATLAB SIMULINK." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 3.1 (2025): 18-28.
- Budi, Febri Setya, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Comparison of LQR and LQT Control of Uncertain Nonlinear Systems." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 3.1 (2025): 10-17.
- Setiawan, Edy, et al. "Integration of Renewable Energy Sources in Maritime Operations." Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 185-210.
- Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Case Studies of Successful Energy Management Initiatives." Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 211-228.
- Eviningsih, Rachma Prilian, and Anggara Trisna Nugraha. "Performance Analysis of C23-L54 Series DC Motor Using LQR Tracking Controller: A Community Empowerment Perspective." Maritime in Community Service and Empowerment 3.1 (2025).
- Ashlah, Muhammad Bilhaq, Rama Arya Sobhita, and Anggara Trisna Nugraha. "Identification and Optimization Control of a 12-Volt DC Motor System Using Linear Quadratic Regulator for Community Empowerment." Maritime in Community Service and Empowerment 3.1 (2025).
- Nugraha, Anggara Trisna. "Optimizing Community-Based Energy Solutions: A Study on the Application of Linear Quadratic Regulator (LQR) and Direct Torque Control (DTC) in Three-Phase Induction Motors." Maritime in Community Service and Empowerment 3.1 (2025).
- A. Ma'arif dan N. R. Setiawan, "Control of DC Motor Using Integral State Feedback and Comparison with PID: Simulation and Arduino Implementation," *J. Robot. Control*, vol. 2, no. 5, pp. 456–461, Sep. 2021.
- T. Wati, S. Subiyanto, dan Sutarno, "Simulation model of speed control DC motor using fractional order PID controller," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1444, 012022, 2020.
- A. M. Alkawla, M. J. Hussein, dan A. T. Abdullah, "A Comparative Study of DC Motor Speed Control Techniques Using Fuzzy, SMC and PID," *J. Electr. Syst. Appl.*, doi:10.18280/jesa.570209, Apr. 2024.
- M. Hilal, H. T. H. Salim ALRikabi, dan I. A. Aljazeera, "Tuning of PID Controller for Speed Control of DC-Motor by using GRNN and IWO," *Wasit J. Eng. Sci.*, vol. 11, no. 3, pp. 45–56, Des. 2023.
- M. Nassim dan A. Abdelkader, "Speed Control of DC Motor Using Fuzzy PID Controller," *arXiv preprint*, Aug. 2021.

Penulis utama: Muhammad 'Athaya Akhdan, mathaya@student.ppnns.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).

- G. Gamazo-Real, E. Vázquez-Sánchez, dan J. Gómez-Gil, "Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques," *arXiv preprint*, Feb. 2024.

BIOGRAFI PENULIS



Muhammad 'Athaya Akhdan. Saat ini saya sedang menempuh pendidikan di bidang Teknik Kelistrikan Kapal, sebuah jurusan yang cukup unik dan menantang, di mana saya belajar bagaimana sistem kelistrikan bekerja di dunia maritim. Bagi saya, jurusan ini bukan sekadar belajar soal arus dan tegangan, tapi juga memahami bagaimana teknologi kelistrikan mendukung keselamatan dan efisiensi operasional kapal.

Sebagai mahasiswa, saya sedang berada dalam fase pencarian jati diri—menemukan apa yang benar-benar ingin saya tekuni, sekaligus mencoba hal-hal baru yang mungkin bisa membuka jalan masa depan saya.

Dunia teknik ini sangat luas, dan saya tertarik dengan banyak hal: mulai dari sistem kelistrikan kapal, kontrol otomatisasi, hingga dunia pemrograman dan simulasi kelistrikan berbasis software.

Di luar kampus, saya suka eksplorasi hal-hal ringan seperti membaca, desain visual, atau ngobrol santai dengan teman-teman sambil bertukar ide soal teknologi. Saya percaya bahwa menjadi seorang teknisi kelistrikan kapal bukan hanya soal keahlian teknis, tapi juga soal mentalitas: tahan banting, terus belajar, dan siap beradaptasi di lingkungan kerja yang keras seperti di dunia perkapalan.

Saat ini saya terus mencoba menyeimbangkan antara tugas akademik, pengembangan diri, dan hidup sebagai pemuda yang masih terus tumbuh. Mungkin saya belum sepenuhnya tahu arah saya ke mana, tapi saya percaya proses belajar ini pelan-pelan akan membawa saya pada versi terbaik dari diri saya sendiri.