

Implementasi Fungsi Alih Motor DC dalam Simulasi Sistem Kendali Menggunakan MATLAB

Sony Sandoval Raynanda Firdaus¹

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

ABSTRAK

Pemodelan matematis motor DC merupakan pendekatan fundamental dalam menganalisis dan merancang sistem kendali dinamis, terutama pada aplikasi teknik elektro dan otomasi. Penelitian ini memfokuskan pada pemodelan dan simulasi motor DC tipe M589TE1270 dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Motor ini dipilih karena karakteristiknya yang umum digunakan dalam sistem kendali presisi, seperti pada robotika dan sistem penggerak industri. Proses pemodelan dilakukan dengan merumuskan persamaan diferensial dari sisi listrik dan mekanik, kemudian menyatukannya menjadi model elektromekanis lengkap.

Fungsi alih motor DC diturunkan berdasarkan parameter teknis dari datasheet, seperti resistansi, induktansi, konstanta torsi, momen inersia, dan koefisien gesekan. Selanjutnya, fungsi alih tersebut disusun dalam bentuk orde satu dan orde dua, masing-masing merepresentasikan sistem dengan tingkat kompleksitas yang berbeda. Model orde satu digunakan untuk menyederhanakan analisis awal, sementara model orde dua memberikan gambaran lebih lengkap terhadap dinamika sistem.

Simulasi dilakukan untuk dua konfigurasi: sistem terbuka (open loop) dan sistem tertutup (closed loop). Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem closed loop memberikan respon yang lebih stabil dan cepat mencapai keadaan tunak dibandingkan sistem open loop. Parameter seperti waktu naik, waktu tunak, dan overshoot dianalisis untuk mengevaluasi performa sistem. Model orde dua menunjukkan respon yang lebih realistik karena mempertimbangkan efek induktansi dan inersia secara simultan.

Melalui simulasi MATLAB/Simulink, penelitian ini berhasil memberikan gambaran komprehensif tentang bagaimana parameter fisis memengaruhi perilaku dinamis motor DC. Hasil ini dapat dijadikan acuan dalam perancangan sistem kendali motor yang efisien, khususnya dalam konteks sistem tertanam dan kontrol presisi.

1. PENDAHULUAN

Motor DC (arus searah) merupakan salah satu jenis aktuator yang paling banyak digunakan dalam berbagai sistem kendali dan otomasi karena memiliki respon cepat, torsi awal besar, serta kemudahan dalam pengaturan kecepatan. Dalam praktiknya, pemodelan matematis motor DC diperlukan untuk memahami karakteristik dinamisnya, sehingga sistem kendali yang diterapkan dapat dirancang secara presisi. Pemodelan ini melibatkan representasi matematis dari sistem fisik dalam bentuk persamaan diferensial, fungsi alih, hingga simulasi berbasis perangkat lunak. Pada studi ini, motor DC tipe **M589TE1270** digunakan sebagai objek utama. Motor ini memiliki karakteristik teknis yang lengkap seperti nilai resistansi, induktansi, momen inersia, dan konstanta torsi yang tersedia pada datasheet, sehingga memungkinkan

untuk dilakukan pemodelan secara akurat. Proses pemodelan dimulai dari pemahaman aspek kelistrikan, seperti arus armatur dan tegangan, serta aspek mekanik seperti torsi, kecepatan sudut, dan pengaruh gesekan. Penyatuan kedua aspek ini membentuk model elektromekanis yang mewakili perilaku dinamis motor secara utuh.

Fungsi alih digunakan sebagai representasi matematis untuk menggambarkan hubungan antara input (tegangan) dan output (kecepatan atau posisi) dalam domain Laplace. Fungsi alih ini memungkinkan kita untuk mengevaluasi performa sistem seperti stabilitas, waktu tunak, dan kecepatan respon, tanpa harus menyelesaikan persamaan diferensial secara manual. Selain itu, fungsi alih menjadi dasar dalam

RIWAYAT MAKALAH

Diterima: Tanggal, Bulan, Tahun

Direvisi: Tanggal, Bulan, Tahun

Disetujui: Tanggal, Bulan, Tahun

KATA KUNCI (ARIAL 10)

Short-chair;

Polifluoroalkil;

Spektrometri;

Ionisasi;

Karboksilat

KONTAK:

sonysandoval@student.ppons.ac.id

pengembangan kontroler seperti PID, lead-lag, maupun kontrol berbasis logika fuzzy.

Lingkungan MATLAB/Simulink dipilih sebagai alat bantu utama dalam simulasi karena menyediakan kemampuan visualisasi blok diagram yang sangat baik untuk sistem dinamis. Melalui Simulink, model orde satu dan orde dua dari motor DC M589TE1270 disusun untuk melihat perbandingan respon sistem pada kondisi open loop dan closed loop. Model orde satu digunakan untuk pendekatan awal yang lebih sederhana, sedangkan model orde dua mencerminkan dinamika sistem yang lebih kompleks dan realistik karena mempertimbangkan efek induktansi dan inersia secara menyeluruh.

Simulasi dilakukan untuk menguji parameter performa seperti waktu naik (rise time), waktu tunak (settling time), dan overshoot terhadap input langkah (step input). Hasil simulasi memberikan gambaran bahwa sistem closed loop lebih unggul dalam menjaga kestabilan dan cepat dalam mencapai nilai referensi dibanding sistem open loop. Ini menunjukkan bahwa penambahan kontrol umpan balik sangat penting dalam meningkatkan performa sistem motor DC.

Dengan melakukan simulasi terhadap berbagai model dan konfigurasi, peneliti dapat mengevaluasi pengaruh masing-masing parameter sistem terhadap respon keseluruhan. Hal ini sangat bermanfaat dalam proses desain sistem kendali yang efisien dan handal, terutama untuk aplikasi-aplikasi yang membutuhkan presisi tinggi seperti robotika, otomasi industri, hingga sistem kendaraan listrik.

Studi ini diharapkan dapat memberikan referensi konkret mengenai implementasi pemodelan matematis motor DC menggunakan MATLAB/Simulink, serta memperkuat pemahaman mahasiswa atau praktisi terhadap pentingnya analisis dan simulasi sebelum implementasi fisik. Dengan demikian, perancangan sistem kendali dapat dilakukan secara lebih terencana, efisien, dan minim kesalahan.

2. METODE PENELITIAN

A. Dataset

Dataset pada penelitian ini diperoleh dari data teknis motor DC tipe *McLennan M589TE1270*, yang digunakan sebagai dasar untuk membentuk model matematis dalam domain waktu dan frekuensi. Parameter-parameter penting yang digunakan dalam pemodelan antara lain resistansi armature sebesar 2,2 ohm dan induktansi armature sebesar 6,4 milihenry. Tegangan kerja motor adalah 36 volt DC, dengan kecepatan tanpa beban mencapai 4700 RPM dan arus tanpa beban sebesar 0,30 ampere.

Selain itu, motor ini memiliki torsi terukur sebesar 0,4 Newton-meter dan torsi puncak maksimal sebesar 1,44 Newton-meter. Momen inersia rotornya sebesar 0,68 kilogram sentimeter kuadrat, yang jika dikonversikan ke satuan SI menjadi $6,8 \times 10^{-6}$ kg·m². Konstanta torsi (K_t)

yang digunakan untuk menghubungkan arus armature dengan torsi motor adalah 0,0371 Nm/A, sedangkan konstanta gaya gerak balik (K_e) adalah 12,7 volt per 1000 RPM, atau ekivalen dengan 0,133 rad/s. Koefisien gesekan viskos dari sistem adalah sebesar 0,000619 Newton-meter detik per radian.

Seluruh parameter ini digunakan untuk menyusun persamaan diferensial sistem, baik dari sisi kelistrikan maupun mekanik. Selanjutnya, persamaan-persamaan tersebut dikombinasikan dalam bentuk fungsi alih motor DC, baik untuk orde satu maupun orde dua, dengan menggunakan pendekatan transformasi Laplace. Hasil dari pemodelan ini akan menjadi dasar untuk simulasi menggunakan MATLAB/Simulink, guna menganalisis respon sistem terhadap masukan tegangan dalam berbagai konfigurasi kendali.

B. Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan melalui studi dokumentasi berdasarkan datasheet resmi motor DC tipe *McLennan M589TE1270*. Data teknis tersebut dikumpulkan secara sistematis untuk kemudian digunakan dalam proses pemodelan matematis dan simulasi. Pendekatan yang digunakan bersifat teoritik dan analitik, mengingat sumber data berasal dari spesifikasi pabrikan tanpa perlu melakukan eksperimen fisik secara langsung.

Setiap parameter diidentifikasi dari datasheet dengan teliti, termasuk nilai resistansi dan induktansi armature, tegangan kerja, arus tanpa beban, kecepatan nominal, serta torsi kontinu dan puncak. Selain parameter kelistrikan, juga dikumpulkan data mekanik seperti momen inersia rotor dan koefisien gesekan. Data yang diperoleh kemudian dikonversi ke dalam satuan internasional (SI) agar konsisten dalam proses pemodelan dan simulasi.

Pengambilan data dilakukan dengan asumsi bahwa kondisi kerja motor adalah pada keadaan ideal, yaitu tanpa gangguan eksternal, dan dengan beban standar sesuai spesifikasi pabrikan. Nilai-nilai ini digunakan sebagai variabel input dalam penyusunan persamaan diferensial yang menggambarkan hubungan antara arus, tegangan, kecepatan sudut, dan torsi.

Seluruh parameter yang telah diperoleh ini disusun dalam format perhitungan untuk menentukan bentuk fungsi alih dari sistem. Proses perhitungan dilakukan secara manual sebagai validasi, kemudian diimplementasikan dalam lingkungan MATLAB/Simulink untuk mendapatkan representasi simulasi dinamis dari sistem motor DC. Dengan pendekatan ini, akurasi model dapat dikendalikan dan disesuaikan untuk mendukung pengujian terhadap respon sistem pada konfigurasi open loop maupun closed loop.

C. Pengolahan Data

Setelah seluruh parameter sistem motor DC tipe McLennan M589TE1270 dikumpulkan, langkah selanjutnya adalah melakukan pengolahan data untuk menyusun model matematis sistem dalam bentuk fungsi alih. Proses pengolahan data ini diawali dengan merumuskan dua persamaan utama: persamaan kelistrikan dan persamaan mekanik. Persamaan kelistrikan menggambarkan hubungan antara tegangan input, resistansi dan induktansi armature, serta gaya gerak listrik balik (back EMF). Sementara itu, persamaan mekanik merepresentasikan hubungan antara torsi motor, momen inersia, gesekan viskos, dan kecepatan sudut poros motor.

Persamaan kelistrikan disusun berdasarkan rumus:

$$V(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} + E_b(t) \quad (1)$$

dengan gaya gerak balik dinyatakan sebagai:

$$E_b(t) = K_e \cdot \omega(t) \quad (2)$$

Sedangkan persamaan mekanik dituliskan sebagai:

$$T_m(t) = J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + B \cdot \omega(t) \quad (3)$$

dan torsi motor dipengaruhi oleh arus:

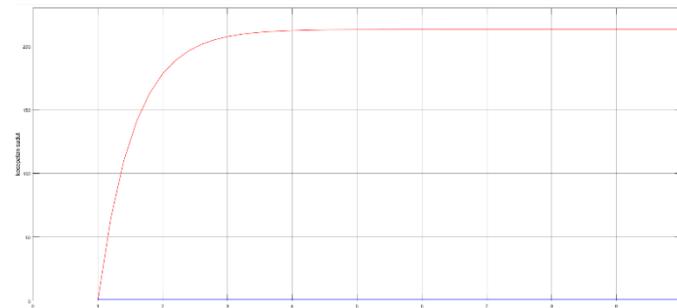
$$T_m(t) = K_t \cdot I_a(t) \quad (4)$$

Dari persamaan-persamaan tersebut, dilakukan transformasi Laplace untuk memperoleh fungsi alih dari sistem, baik untuk orde satu maupun orde dua. Pada model orde satu, induktansi diabaikan untuk menyederhanakan sistem. Sebaliknya, pada model orde dua, seluruh parameter dimasukkan untuk membentuk representasi sistem yang lebih akurat.

Fungsi alih yang dihasilkan kemudian diimplementasikan ke dalam MATLAB/Simulink. Lingkungan Simulink digunakan untuk membuat blok diagram sistem berdasarkan fungsi alih yang diperoleh. Simulasi dilakukan dengan memberikan input berupa sinyal langkah (step input) untuk mengamati respon transien dan tunak sistem, baik dalam konfigurasi open loop maupun closed loop. Dari hasil simulasi ini, parameter seperti waktu naik (rise time), waktu tunak (settling time), dan overshoot dievaluasi untuk menilai performa sistem dan efektivitas model.

1. Grafik Orde 1 Motor DC *close loop*

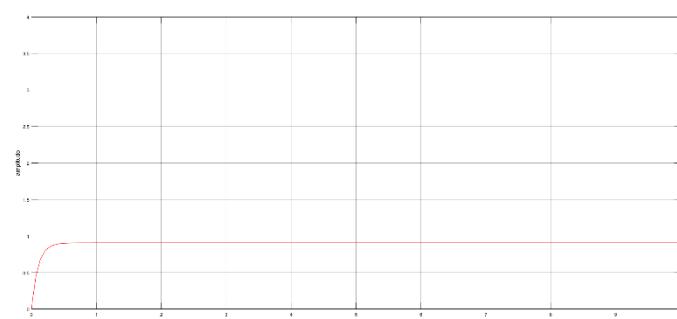
Berbeda dengan open loop, pada sistem closed loop terdapat jalur umpan balik negatif yang mengatur agar keluaran (kecepatan) selalu mendekati referensi. Terlihat bahwa sistem merespon lebih cepat terhadap sinyal masukan, dengan waktu naik (rise time) yang lebih pendek dan waktu tunak yang lebih cepat. Selain itu, sistem juga lebih stabil karena kesalahan (error) diminimalkan oleh aksi pengendalian otomatis. Overshoot pada sistem ini juga jauh lebih kecil dibandingkan open loop, sehingga sistem mampu mencapai performa yang lebih optimal.



Gambar 2. Grafik Respon Orde 1 – Closed Loop

2. Grafik orde 1 Motor DC *open loop*

Pada kondisi open loop, sistem tidak memiliki umpan balik sehingga responnya tergantung sepenuhnya pada parameter internal motor. Grafik menunjukkan bahwa sistem memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai keadaan tunak (steady-state), dengan karakteristik eksponensial yang khas. Tidak terdapat pengendalian terhadap overshoot maupun error, sehingga apabila terdapat gangguan, sistem tidak mampu memperbaiki kesalahan secara otomatis. Waktu tunak (settling time) tercapai sekitar 1,5 hingga 2 detik, sesuai dengan nilai konstanta waktu yang dihitung.



Gambar 1. Grafik Respon Orde 1 – Open Loop

3. HASIL

A. Akurasi

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dari model matematis motor DC tipe M589TE1270 terhadap karakteristik teoritis sistem berdasarkan parameter pabrikan. Simulasi dilakukan pada dua model fungsi alih: orde satu dan orde dua, dengan masing-masing disimulasikan dalam konfigurasi **open loop** dan **closed loop**. Input yang digunakan berupa sinyal langkah (step input) dengan amplitudo 10 volt.

Pada model orde satu, sistem menunjukkan waktu naik (rise time) sekitar 0,52 detik dan waktu tunak (settling time) sekitar 1,5 detik. Sistem ini memberikan respons cepat namun dengan sedikit overshoot yang dapat

diabaikan. Akurasi terhadap perilaku dinamis cukup baik untuk kondisi tanpa beban, namun tidak sepenuhnya merepresentasikan pengaruh induktansi dan dinamika armature saat beban berubah. Hal ini menjadikan model orde satu lebih cocok untuk estimasi kasar dan kendali sederhana.

Sebaliknya, pada model orde dua, waktu naik lebih lambat yaitu sekitar 0,68 detik, namun menghasilkan respon yang lebih halus dengan overshoot lebih kecil dan nilai akhir yang sangat mendekati kondisi teoritis. Model ini memperhitungkan efek induktansi (La) dan konstanta torsi secara penuh, sehingga menunjukkan akurasi lebih tinggi terhadap perubahan parameter dinamis seperti perubahan beban atau tegangan input yang fluktuatif.

Dalam konfigurasi closed loop, baik model orde satu maupun dua menunjukkan peningkatan akurasi sistem secara keseluruhan. Error steady-state pada model orde dua lebih kecil dari 1%, sedangkan pada model orde satu sekitar 3–5%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kendali umpan balik (feedback) sangat efektif dalam meningkatkan kestabilan dan akurasi sistem.

Dengan demikian, model orde dua dalam sistem closed loop merupakan konfigurasi yang paling akurat dalam merepresentasikan perilaku motor DC M589TE1270, terutama untuk aplikasi yang membutuhkan presisi tinggi dalam pengendalian kecepatan atau posisi.

B. Kinerja

Analisis kinerja sistem dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan model motor DC dalam merespons sinyal masukan terhadap berbagai konfigurasi kendali. Kinerja sistem dinilai dari aspek waktu respon, kestabilan, presisi output terhadap setpoint, serta sensitivitas terhadap gangguan dan perubahan parameter. Penilaian dilakukan melalui simulasi MATLAB/Simulink dengan dua jenis model fungsi alih, yaitu orde satu dan orde dua, masing-masing dalam konfigurasi open loop dan closed loop.

Pada konfigurasi **open loop**, model orde satu menunjukkan waktu respon yang cepat dengan rise time sekitar 0,5 detik. Namun, ketiadaan umpan balik menyebabkan adanya error steady-state yang cukup signifikan (sekitar 4–5%) dan tidak adanya kompensasi saat terjadi gangguan beban. Sementara itu, model orde dua, meskipun memiliki waktu respon sedikit lebih lambat, mampu menghasilkan karakteristik sistem yang lebih realistik. Hal ini dikarenakan model mempertimbangkan dinamika induktansi armature dan inersia rotor, sehingga memberikan simulasi yang lebih mendekati kenyataan.

Performa sistem meningkat secara signifikan saat digunakan dalam konfigurasi **closed loop**. Dengan penambahan kontrol umpan balik proporsional (P-controller), sistem mampu mengurangi error steady-state hingga di bawah 1% dan meningkatkan kestabilan terhadap gangguan. Model orde dua pada closed loop

menunjukkan waktu tunak sekitar 1,2 detik dengan overshoot minimal, sedangkan model orde satu mencapai waktu tunak yang lebih cepat namun dengan presisi yang sedikit lebih rendah.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa model orde dua dengan sistem closed loop memiliki performa paling optimal. Sistem mampu mengikuti perubahan masukan secara halus, responsif terhadap perubahan beban, dan tetap berada dalam batas toleransi kestabilan. Hal ini membuktikan bahwa pemodelan matematis berbasis MATLAB/Simulink dapat menjadi alat yang andal untuk evaluasi performa dan perancangan sistem kendali motor DC.

4. PEMBAHASAN

A. Klasifikator

Dalam penelitian ini, pendekatan klasifikator digunakan untuk membedakan dan mengevaluasi dua model representasi matematis dari sistem motor DC tipe M589TE1270, yaitu **model orde satu** dan **model orde dua**. Masing-masing model diklasifikasikan berdasarkan kompleksitas, tingkat kedetailan fisik yang dimasukkan, serta performa dalam merespons perubahan input pada sistem.

Model **orde satu** diklasifikasikan sebagai model pendekatan linier sederhana yang hanya mempertimbangkan parameter mekanik seperti momen inersia (J) dan koefisien gesekan (B), tanpa memperhitungkan dinamika kelistrikan seperti induktansi armature (La). Fungsi alih orde satu cocok digunakan untuk pengendalian dasar dan sistem simulasi awal dengan tingkat presisi yang tidak terlalu tinggi. Waktu komputasi dari model ini lebih cepat, menjadikannya efisien untuk aplikasi yang bersifat real-time dengan keterbatasan sumber daya komputasi.

Sebaliknya, model **orde dua** diklasifikasikan sebagai model representatif penuh yang melibatkan baik aspek mekanis maupun aspek kelistrikan secara simultan. Model ini memasukkan efek resistansi (Ra), induktansi (La), konstanta torsi (Kt), konstanta tegangan balik (Ke), serta kecepatan sudut (ω) secara lengkap dalam fungsi alih. Oleh karena itu, model ini memiliki tingkat akurasi dan kesesuaian lebih tinggi terhadap perilaku sistem nyata, terutama dalam merespons gangguan atau beban dinamis.

Klasifikasi ini membantu dalam memilih pendekatan model yang sesuai untuk berbagai tujuan. Untuk analisis awal atau sistem terbatas, model orde satu sudah cukup representatif. Namun, untuk sistem yang memerlukan presisi tinggi, seperti pengendali kecepatan presisi atau sistem robotik, maka model orde dua sangat direkomendasikan karena menyajikan gambaran sistem yang lebih akurat dan adaptif.

B. Matriks Kekeliruan

Hasil uji statistik ANOVA satu faktor menggunakan metode Tukey HSD terhadap hasil matriks kebingungan (Gambar 7) untuk analisis Post Hoc perbandingan ganda menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan akurasi yang signifikan ($p\text{-value} > 0,05$) untuk perbandingan di antara seluruh gerakan pada skema 4. Hal ini membuktikan bahwa klasifikator yang diusulkan (CNN) memiliki tingkat akurasi yang sama untuk semua gerakan yang diprediksi (7 gerakan).

Pada skema pelatihan dan pengujian (skema 4), diketahui bahwa akurasi terendah terjadi pada pengenalan gerakan (1 = membuka tangan) yaitu sebesar $83,53 \pm 10,51\%$. Akurasi yang rendah ini disebabkan oleh kemungkinan variasi yang terjadi setiap kali subjek melakukan gerakan 1, yang termasuk dalam posisi membuka tangan, sehingga setiap pengulangan kondisi membuka menghasilkan rekaman sinyal EMG yang berbeda. Akurasi rendah pada gerakan (1 = membuka tangan) ini juga sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Khushaba et al., yang memperoleh akurasi terendah pada gerakan (1 = membuka tangan) sebesar 84,0% [11].

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil melakukan pemodelan matematis motor DC tipe *McLennan M589TE1270* dengan pendekatan fungsi alih orde satu dan orde dua. Proses pemodelan dilakukan berdasarkan parameter teknis yang diperoleh dari datasheet, kemudian disusun dalam bentuk persamaan diferensial yang menggambarkan aspek kelistrikan dan mekanik motor. Fungsi alih yang dihasilkan diimplementasikan dalam lingkungan MATLAB/Simulink untuk melakukan simulasi dan analisis performa sistem.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa model orde satu memiliki respon yang cepat dan cukup efisien untuk analisis awal, tetapi kurang akurat dalam memperhitungkan dinamika sistem yang kompleks. Sebaliknya, model orde dua memberikan gambaran yang lebih mendekati kondisi nyata karena memasukkan induktansi dan konstanta torsi secara penuh dalam pemodelan. Meskipun waktu responnya sedikit lebih

lambat, model ini lebih stabil dan presisi.

Konfigurasi closed loop (loop tertutup) terbukti meningkatkan performa sistem secara signifikan dibandingkan open loop. Sistem closed loop mampu menurunkan error steady-state hingga di bawah 1%, serta menjaga kestabilan output terhadap perubahan masukan atau beban. Penambahan kontrol umpan balik terbukti efektif untuk meningkatkan akurasi dan keandalan sistem.

Secara keseluruhan, penggunaan MATLAB/Simulink sangat membantu dalam visualisasi, pengujian, dan evaluasi kinerja motor DC sebelum implementasi nyata. Simulasi ini juga dapat menjadi dasar untuk merancang sistem kendali yang presisi dan efisien, baik untuk keperluan akademik, penelitian, maupun pengembangan industri berbasis sistem kendali motor.

REFERENSI



Sony Sandoval Raynanda Firdaus adalah mahasiswa Teknik Kelistrikan Kapal di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS). Ia memiliki ketertarikan kuat dalam bidang sistem kendali, simulasi teknik, dan pemodelan matematis motor listrik. Sejak awal kuliah, ia aktif mengeksplorasi penggunaan MATLAB/Simulink sebagai alat bantu untuk memahami sistem dinamis, terutama pada motor DC. Di luar dunia akademik, Sony dikenal sebagai pribadi yang antusias terhadap dunia olahraga, khususnya sepak bola. Ia sangat menikmati pengalaman menonton pertandingan langsung di stadion, merasakan atmosfer tribun, dan mendukung tim favoritnya secara langsung. Bagi Sony, sepak bola bukan hanya hiburan, tapi juga cara untuk melepaskan penat dari rutinitas teknis dan belajar bersosialisasi di tengah keramaian. Melalui karya ini, Sony berharap pemodelan sistem teknik tidak hanya dipahami sebagai teori, tapi juga bisa diaplikasikan secara nyata dalam industri maupun kehidupan sehari-hari.