



Pemodelan Matematis dan Validasi Eksperimental Sistem Kontrol Motor Brushless DC Menggunakan Fuzzy Logic

Erick Radwitya¹⁾, Syarif Ishak Alkadri²⁾

^{1,2,)}Jurusan Teknik Elektro dan Teknik Informatika, Politeknik Negeri Katapang

^{1,2,)}erickradwitya@politap.ac.id, sy.ishak@politap.ac.id

ARTICLE HISTORY

Received:

June 15, 2025

Revised

June 21, 2025

Accepted:

July 26, 2025

Online available:

July 30, 2025

Keywords:

BLDC motor, fuzzy logic, mathematical modeling, control system, experimental validation

*Correspondence:

Name: Erick Radwitya

E-mail: erickradwitya@politap.ac.id

Kantor Editorial

Politeknik Negeri Ambon

Pusat Penelitian dan Pengabdian

Masyarakat

Jalan Ir. M. Putuhena, Wailela-

Rumahtiga, Ambon Maluku,

Indonesia

Kode Pos: 97234

ABSTRACT

Alinea Brushless DC (BLDC) motors require sophisticated control systems to optimize their performance in modern industrial applications. This research develops a comprehensive mathematical model using a state-space approach and designs a fuzzy logic control system for BLDC motors with experimental validation. The mathematical model was developed based on electrical and mechanical parameters through DC and AC testing, resulting in a high-accuracy representation of system dynamics. The fuzzy logic control system was designed using a Mamdani structure with 49 rules and optimized using the Chameleon Swarm Algorithm. Experimental validation was conducted using a test bench platform with a 500W BLDC motor and a DSP-based control system. Model validation results showed RMSE values of 15.3-28.9 rpm for speed, and a coefficient of determination (R^2) ranging from 0.963 to 0.987. The fuzzy logic control system demonstrated superior performance with a rise time of 45.2 ms, a settling time of 132.5 ms, an overshoot of 2.8%, and a steady-state error of 0.5 rpm compared to a conventional PID controller. Tracking performance testing yielded an RMS error of 3.2 rpm for the sinusoidal reference, and robustness evaluation showed good resistance to load disturbances. This research successfully integrated accurate mathematical modeling with an adaptive control system that can be implemented in various industrial applications requiring high-precision motor control.

1. PENDAHULUAN

Motor brushless DC (BLDC) telah menjadi pilihan utama dalam berbagai aplikasi industri modern karena karakteristik unggulnya seperti efisiensi tinggi, keandalan operasional, dan umur pakai yang panjang dibandingkan dengan motor konvensional (Shenbagalakshmi et al., 2025). Dalam era revolusi industri 4.0, kebutuhan akan sistem kontrol motor yang presisi dan adaptif semakin meningkat, terutama dalam aplikasi robotika, kendaraan listrik, dan sistem manufaktur otomatis. Motor BLDC menawarkan keunggulan signifikan berupa konstruksi tanpa sikat (*brushless*) yang mengeliminasi keausan mekanis, menghasilkan *torque ripple* yang minimal, dan memberikan respons dinamis yang superior (Kethiri et al., 2025).

Namun demikian, kompleksitas sistem kontrol motor BLDC menuntut pengembangan strategi kontrol yang canggih untuk mencapai performa optimal.

Erick Radwitya et al

Sistem kontrol konvensional seperti PID (*Proportional-Integral-Derivative*) seringkali menghadapi keterbatasan dalam menangani karakteristik nonlinear dan ketidakpastian parameter yang inherent pada motor BLDC (Al Mashhadany et al., 2022). Dalam konteks ini, pendekatan *fuzzy logic* muncul sebagai solusi inovatif yang mampu mengatasi kompleksitas dan ketidakpastian sistem dengan memanfaatkan pengetahuan heuristik dan kemampuan penalaran yang menyerupai logika manusia.

Implementasi *fuzzy logic controller* (FLC) pada sistem motor BLDC telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam berbagai penelitian terdahulu. Sistem kontrol berbasis logika fuzzy mampu mengakomodasi ketidakpastian model matematika dan gangguan eksternal dengan lebih baik dibandingkan metode kontrol konvensional (Anshory et al., 2021). Keunggulan FLC terletak pada kemampuannya untuk menangani informasi yang tidak presisi (*imprecise*

Pemodelan Matematis dan Validasi Eksperimental ..



information) dan memberikan respons kontrol yang smooth tanpa memerlukan model matematika yang eksak dari sistem yang dikontrol.

Pemodelan matematis yang akurat menjadi fondasi penting dalam perancangan sistem kontrol motor BLDC yang efektif. Model matematika yang komprehensif memungkinkan analisis mendalam terhadap karakteristik dinamis motor, prediksi performa sistem, dan optimasi parameter kontrol (Khan et al., 2025). Integrasi antara model matematis yang robust dengan validasi eksperimental menjadi kunci dalam mengembangkan sistem kontrol yang reliable dan aplikatif di dunia industri.

Penelitian terkini menunjukkan bahwa kombinasi pemodelan matematis yang detail dengan implementasi *fuzzy logic* dapat menghasilkan sistem kontrol motor BLDC dengan performa superior dalam hal akurasi *speed regulation*, *torque control*, dan efisiensi energi (Bhayo et al., 2025). Validasi eksperimental menjadi tahap krusial untuk memverifikasi keakuratan model teoretis dan memastikan aplikabilitas praktis dari sistem yang dikembangkan. Pendekatan ini tidak hanya memberikan kontribusi akademis tetapi juga nilai praktis yang tinggi untuk implementasi industri.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini difokuskan pada beberapa permasalahan utama yang perlu diselesaikan. Pertama, bagaimana mengembangkan model matematis yang akurat dan komprehensif untuk sistem motor brushless DC yang dapat merepresentasikan karakteristik dinamis dan perilaku nonlinear motor secara detail. Kedua, bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol fuzzy logic yang optimal untuk motor BLDC dengan mempertimbangkan aspek kestabilan, akurasi, dan robustness terhadap gangguan. Ketiga, bagaimana melakukan validasi eksperimental yang sistematis untuk memverifikasi keakuratan model matematis dan mengevaluasi performa sistem kontrol fuzzy logic yang telah dikembangkan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model matematis yang komprehensif untuk sistem motor brushless DC dengan mempertimbangkan karakteristik elektrik, magnetik, dan mekanik secara terintegrasi. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol berbasis fuzzy logic yang mampu mengoptimalkan performa motor BLDC dalam hal akurasi kecepatan, stabilitas torque, dan efisiensi energi. Tujuan selanjutnya adalah melakukan validasi eksperimental menyeluruh untuk memverifikasi keakuratan model teoretis dan mengevaluasi efektivitas sistem kontrol yang dikembangkan melalui pengujian dalam berbagai kondisi operasional.

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan baik dari aspek akademis maupun praktis. Secara akademis, penelitian ini akan menghasilkan model matematis yang detail dan sistem kontrol fuzzy

logic yang inovatif untuk motor BLDC, yang dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dalam bidang sistem kontrol motor listrik. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat diaplikasikan dalam berbagai industri yang memerlukan sistem kontrol motor presisi tinggi, seperti industri otomotif, robotika, dan manufaktur otomatis. Implementasi sistem kontrol yang dikembangkan diharapkan dapat meningkatkan efisiensi energi, mengurangi biaya operasional, dan meningkatkan kualitas produk dalam aplikasi industri modern.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pemodelan Matematis Motor Brushless DC

Motor brushless DC (BLDC) merupakan sistem elektromekanikal kompleks yang memerlukan model matematis yang akurat untuk analisis performa dan perancangan sistem kontrol yang optimal. Pemodelan matematis motor BLDC umumnya didasarkan pada representasi *state space* yang menggambarkan hubungan dinamis antara variabel elektrik dan mekanik sistem (Shurajji & Shneen, 2022). Model matematis fundamental motor BLDC mencakup persamaan diferensial yang mendeskripsikan karakteristik elektrik stator, dinamika rotor, dan interaksi elektromagnetik antar komponen.

Model *state space* motor BLDC biasanya dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial orde pertama yang mencakup arus stator, kecepatan sudut rotor, dan posisi rotor sebagai variabel *state* utama (Shurajji & Shneen, 2022). Persamaan tegangan stator motor BLDC dapat dimodelkan dengan mempertimbangkan resistansi, induktansi, dan gaya elektromotif balik (*back EMF*) yang dihasilkan oleh pergerakan rotor. Model matematis ini menjadi fondasi penting dalam analisis stabilitas sistem, perancangan kontroler, dan prediksi performa motor dalam berbagai kondisi operasional.

Sistem Kontrol Fuzzy Logic untuk Motor BLDC

Fuzzy Logic Controller (FLC) telah terbukti sebagai metode kontrol yang efektif untuk mengatasi kompleksitas dan ketidakpastian sistem motor BLDC. Berbeda dengan kontroler konvensional yang memerlukan model matematis eksak, FLC bekerja berdasarkan pengetahuan heuristik dan aturan-aturan linguistik yang dapat menangani ketidakpastian dan nonlinearitas sistem (Aboused et al., 2025). Struktur dasar FLC terdiri dari tiga komponen utama yaitu *fuzzification*, *inference engine*, dan *defuzzification* yang bekerja secara sinergis untuk menghasilkan sinyal kontrol yang optimal.

Implementasi FLC pada kontrol kecepatan motor BLDC menunjukkan keunggulan signifikan dalam hal waktu respons, overshoot, dan *steady-state error* dibandingkan dengan kontroler PID konvensional (Ahmad et al., 2023). *Membership function* dan basis aturan fuzzy dirancang berdasarkan



karakteristik dinamik motor dan kriteria performa yang diinginkan. Penelitian terkini menunjukkan bahwa optimasi parameter FLC menggunakan algoritma cerdas dapat meningkatkan performa sistem kontrol secara substansial (Anshory, Robandi, et al., 2020).

Validasi Eksperimental dan Verifikasi Model

Validasi eksperimental merupakan tahap krusial dalam pengembangan sistem kontrol motor BLDC untuk memverifikasi keakuratan model teoritis dan mengevaluasi performa sistem dalam kondisi operasional nyata. Metodologi validasi yang komprehensif mencakup pengujian *open-loop* dan *closed-loop*, analisis respons transien dan *steady-state*, serta evaluasi robustness terhadap gangguan dan variasi parameter (Kaczmarczyk et al., 2024). Hasil validasi eksperimental tidak hanya mengkonfirmasi validitas model matematis tetapi juga memberikan insight berharga untuk perbaikan dan optimasi sistem.

Teknik validasi modern menggunakan platform eksperimental berbasis *real-time* yang memungkinkan implementasi dan pengujian algoritma kontrol secara langsung (Ahmed Baba et al., 2023). Perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen menjadi indikator utama keakuratan model dan efektivitas sistem kontrol yang dikembangkan. Pendekatan validasi yang sistematis dan komprehensif memastikan bahwa sistem yang dikembangkan dapat diimplementasikan secara reliable dalam aplikasi industri yang sesungguhnya.

3. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan rancangan eksperimental yang terdiri dari tiga tahap utama yaitu pengembangan model matematis, desain sistem kontrol *fuzzy logic*, dan validasi eksperimental. Metodologi yang dipilih memungkinkan analisis mendalam terhadap karakteristik dinamis motor BLDC dan evaluasi performa sistem kontrol secara komprehensif. Rancangan penelitian ini mengintegrasikan simulasi numerik dengan pengujian eksperimental untuk memastikan validitas dan reliabilitas hasil yang diperoleh (T. Wang et al., 2022).

Tahap pengumpulan data dimulai dengan identifikasi parameter elektrik dan mekanik motor BLDC menggunakan teknik pengujian DC dan AC dalam kondisi terkontrol. Parameter resistansi stator diukur menggunakan metode pengujian DC, sedangkan induktansi diperoleh melalui pengujian AC dengan variasi frekuensi. Konstanta motor seperti konstanta torque dan konstanta *back EMF* diidentifikasi melalui pengujian *no-load* dan *load test* dengan berbagai tingkat beban. Data karakteristik motor dikumpulkan menggunakan sistem akuisisi data *real-time* yang terintegrasi dengan *encoder* resolusi tinggi untuk pengukuran posisi dan kecepatan rotor yang akurat (Bahadir & Aydoğdu, 2023).

Pengembangan model matematis motor BLDC dilakukan dengan pendekatan *state-space* yang mencakup persamaan diferensial orde pertama untuk mendeskripsikan dinamika elektrik dan mekanik sistem. Variabel state yang didefinisikan meliputi arus stator tiga fase (i_a, i_b, i_c), kecepatan sudut rotor (ω), dan posisi rotor (θ). Model matematis dikembangkan dengan mempertimbangkan nonlinearitas sistem, efek saturasi magnetik, dan karakteristik *commutation*. Validasi model dilakukan melalui perbandingan respons simulasi dengan data eksperimental menggunakan indikator statistik seperti *Root Mean Square Error* (RMSE) dan koefisien determinasi (R^2) (Y. Wang, 2024).

Desain sistem kontrol *fuzzy logic* diimplementasikan dengan struktur *Mamdani* yang terdiri dari tiga komponen utama yaitu *fuzzification*, *inference engine*, dan *defuzzification*. *Membership function* dirancang menggunakan fungsi segitiga dan trapesium berdasarkan analisis karakteristik respons motor. Basis aturan fuzzy dikembangkan dengan 49 aturan yang menghubungkan error kecepatan dan *rate of change error* sebagai input dengan sinyal kontrol sebagai output. Optimasi parameter *fuzzy logic controller* dilakukan menggunakan algoritma *Chameleon Swarm Algorithm* untuk mencapai performa optimal dalam hal *settling time*, *overshoot*, dan *steady-state error* (Ponce et al., 2020).

Validasi eksperimental dilakukan menggunakan platform *test bench* yang terdiri dari motor BLDC, *three-phase inverter*, sistem kontrol berbasis DSP, dan instrumentasi pengukuran. Pengujian meliputi analisis respons *step*, pengujian tracking kecepatan, dan evaluasi robustness terhadap variasi beban. Metodologi pengujian mencakup kondisi operasi *no-load*, beban nominal, dan beban berlebih untuk mengevaluasi performa sistem dalam berbagai skenario operasional. Data eksperimental dianalisis menggunakan teknik statistik deskriptif dan inferensial untuk membandingkan performa sistem kontrol *fuzzy logic* dengan kontroler konvensional. Asumsi penelitian meliputi linearitas karakteristik sensor, kondisi operasi *steady-state* untuk identifikasi parameter, dan distribusi normal pada data eksperimental (Anshory, Hadidjaja, et al., 2020).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN HASIL

4.1 Hasil Pemodelan Matematis Motor BLDC

Pemodelan matematis motor BLDC telah berhasil dikembangkan menggunakan pendekatan *state-space* dengan identifikasi parameter yang akurat melalui pengujian eksperimental. Proses identifikasi parameter dilakukan melalui serangkaian pengujian DC dan AC yang menghasilkan karakteristik elektrik dan mekanik motor seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Parameter resistansi stator diperoleh melalui pengujian



DC dengan arus rendah untuk menghindari efek pemanasan, sedangkan induktansi stator diidentifikasi menggunakan pengujian AC dengan variasi frekuensi dari 50 Hz hingga 1000 Hz.

Tabel 1. Parameter Elektrik dan Mekanik Motor BLDC

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Resistansi Stator	R_s	2.85	Ω
Induktansi Stator	L_s	8.2	mH
Konstanta Torque	K_t	0.142	Nm/A
Konstanta Back EMF	K_e	0.138	V·s/rad
Momen Inersia Rotor	J	1.25×10^{-4}	kg·m ²
Koefisien Gesek Viskos	B	2.3×10^{-5}	Nm·s/rad
Jumlah Pasang Kutub	P	4	-
Tegangan Nominal	V_n	48	V
Arus Nominal	I_n	8.5	A
Kecepatan Nominal	ω_n	3000	rpm

Model matematis motor BLDC dalam representasi *state-space* dikembangkan dengan mendefinisikan variabel *state* sebagai vektor $x = [i_a \ i_b \ i_c \ \omega \ \theta]^T$, dimana i_a , i_b , i_c adalah arus stator tiga fase, ω adalah kecepatan sudut rotor, dan θ adalah posisi rotor. Persamaan *state-space* yang diperoleh adalah:

Persamaan State-Space Motor BLDC:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ed$$

$$y = Cx + Du$$

Dimana matriks A , B , C , D , dan E merepresentasikan dinamika sistem dengan mempertimbangkan karakteristik *commutation* dan nonlinearitas *back EMF*. Model ini mengintegrasikan persamaan tegangan stator, persamaan torque elektromagnetik, dan persamaan gerak rotor dalam satu representasi matematika yang komprehensif.

Validasi model matematis dilakukan melalui perbandingan respons simulasi dengan data eksperimental untuk berbagai kondisi operasional. Hasil validasi menunjukkan akurasi model yang tinggi dengan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dan koefisien determinasi (R^2) yang disajikan dalam Tabel 2. Pengujian validasi dilakukan pada kondisi *no-load*, beban nominal, dan beban berlebih dengan input tegangan *step* dan sinusoidal.

Tabel 2. Hasil Validasi Model Matematis

Kondisi Pengujian	Parameter	RMSE	R^2	MSE
No-load	Kecepatan (rpm)	15.3	0.987	234.1
No-load	Arus (A)	0.12	0.975	0.014
Beban Nominal	Kecepatan (rpm)	22.7	0.981	515.3
Beban Nominal	Arus (A)	0.18	0.968	0.032
Beban Berlebih	Kecepatan (rpm)	28.9	0.976	835.2
Beban Berlebih	Arus (A)	0.24	0.963	0.058

Hasil Desain Sistem Kontrol Fuzzy Logic

Sistem kontrol *fuzzy logic* telah berhasil dirancang dengan struktur *Mamdani* yang terdiri dari dua input (*error* kecepatan dan *rate of change error*) dan satu output (sinyal kontrol). *Membership function* untuk setiap variabel dirancang menggunakan kombinasi fungsi segitiga dan trapesium dengan tujuh tingkat linguistik: *Negative Big* (NB), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *Zero* (ZE), *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM), dan *Positive Big* (PB).

Basis aturan *fuzzy* dikembangkan dengan total 49 aturan yang menghubungkan kondisi *error* dan *rate of change error* dengan aksi kontrol yang sesuai. Struktur basis aturan dirancang berdasarkan pengetahuan ahli dan karakteristik respons motor BLDC yang diinginkan. Distribusi aturan *fuzzy* disajikan dalam Tabel 3 yang menunjukkan matriks keputusan lengkap untuk sistem kontrol.

Tabel 3. Basis Aturan Fuzzy Logic Controller

Error / Rate	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PM	PB	PB	PB

Optimasi parameter *fuzzy logic controller* dilakukan menggunakan algoritma *Chameleon Swarm Algorithm* untuk mencapai performa optimal. Parameter yang dioptimasi meliputi posisi dan lebar *membership function*, serta *scaling factor* untuk input dan output. Proses optimasi dilakukan dengan fungsi objektif yang meminimalkan *Integral of Time-weighted*



Absolute Error (ITAE) dengan mempertimbangkan *settling time*, *overshoot*, dan *steady-state error*.

Tabel 4. Parameter Optimal Fuzzy Logic Controller

Parameter	Simbol	Nilai Optimal	Satuan
Scaling Factor Error	Ke	0.125	-
Scaling Factor Rate	Kec	0.085	-
Scaling Factor Output	Ku	2.75	-
Membership Width NB/PB	σ_1	1.25	-
Membership Width NM/PM	σ_2	0.95	-
Membership Width NS/PS	σ_3	0.68	-
Membership Width ZE	σ_4	0.45	-

Hasil Validasi Eksperimental

Validasi eksperimental dilakukan menggunakan platform *test bench* yang terdiri dari motor BLDC 500W, *three-phase inverter*, sistem kontrol berbasis DSP TMS320F28335, dan instrumentasi pengukuran presisi. Pengujian komprehensif meliputi analisis respons *step*, *tracking performance*, dan evaluasi *robustness* sistem terhadap gangguan beban dan variasi parameter. Hasil pengujian respons *step* menunjukkan performa yang superior dari sistem kontrol *fuzzy logic* dibandingkan dengan kontroler PID konvensional. Analisis performa sistem disajikan dalam Tabel 5 yang mencakup parameter-parameter penting seperti *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *steady-state error* untuk berbagai kondisi operasional.

Tabel 5. Perbandingan Performa Sistem Kontrol

Kondisi	Kontroler	Rise Time (ms)	Settling Time (ms)	Overshoot (%)	SSE (rpm)
No-load	FLC	45.2	132.5	2.8	0.5
No-load	PID	52.7	185.3	8.2	1.2
Beban 50%	FLC	48.6	145.8	3.1	0.8
Beban 50%	PID	58.9	198.7	9.7	2.1
Beban 100%	FLC	52.1	162.4	3.5	1.1
Beban 100%	PID	65.3	225.6	11.4	2.8

Pengujian *tracking performance* dilakukan dengan memberikan referensi kecepatan sinusoidal dan gelombang persegi untuk mengevaluasi kemampuan

sistem mengikuti perubahan referensi dinamis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kontrol *fuzzy logic* memiliki kemampuan *tracking* yang lebih baik dengan *tracking error* yang lebih kecil dibandingkan kontroler konvensional.

Tabel 6. Hasil Uji Tracking Performance

Jenis Referensi	Kontroler	RMSE Error (rpm)	Max Error (rpm)	IAE	ITAE
Sinusoidal 0.5 Hz	FLC	3.2	8.7	245.6	1856.3
Sinusoidal 0.5 Hz	PID	5.8	15.4	428.9	3247.1
Square Wave	FLC	4.1	12.3	312.4	2134.7
Square Wave	PID	7.3	22.1	567.8	4156.9

Evaluasi *robustness* sistem dilakukan dengan mengaplikasikan gangguan beban mendadak dan variasi parameter motor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kontrol *fuzzy logic* memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap gangguan eksternal dengan waktu pemulihan yang lebih cepat dan deviasi kecepatan yang lebih kecil dibandingkan sistem kontrol konvensional.

PEMBAHASAN

Analisis Model Matematis

Pengembangan model matematis motor BLDC menggunakan pendekatan *state-space* dalam penelitian ini menunjukkan keberhasilan yang signifikan dalam merepresentasikan karakteristik dinamis sistem. Model matematis yang diperoleh dengan parameter elektrik dan mekanik yang telah diidentifikasi (Tabel 1) memberikan representasi yang akurat terhadap perilaku motor BLDC dalam berbagai kondisi operasional. Hasil validasi model dengan nilai RMSE berkisar antara 15.3-28.9 rpm untuk kecepatan dan 0.12-0.24 A untuk arus menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menekankan pentingnya pemodelan matematis yang tepat untuk sistem motor BLDC sebagai dasar pengembangan sistem kontrol yang efektif (Zafar et al., 2021).

Koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh berkisar antara 0.963-0.987 mengindikasikan bahwa model matematis yang dikembangkan mampu menjelaskan lebih dari 96% variasi dalam data eksperimental. Tingkat akurasi ini menunjukkan validitas asumsi-asumsi yang digunakan dalam pemodelan, termasuk linearitas karakteristik sensor dan kondisi operasi *steady-state*. Namun demikian, sedikit penurunan akurasi pada kondisi beban berlebih mengindikasikan adanya nonlinearitas sistem yang



tidak sepenuhnya tertangkap dalam model linear. Hal ini konsisten dengan karakteristik motor BLDC sebagai sistem yang sangat *coupled* dan nonlinear, sebagaimana dijelaskan dalam literatur bahwa motor BLDC merupakan contoh tipikal dari sistem nonlinear yang sangat terkopel (Shi et al., 2022).

Persamaan *state-space* yang dikembangkan dengan mempertimbangkan karakteristik *commutation* dan nonlinearitas *back EMF* memberikan representasi komprehensif terhadap dinamika elektrik dan mekanik motor. Integrasi persamaan tegangan stator, persamaan torque elektromagnetik, dan persamaan gerak rotor dalam satu representasi matematika memungkinkan analisis sistem yang holistik. Pendekatan ini sangat penting mengingat kompleksitas mekanisme pengendalian motor BLDC yang tidak memiliki *brush* untuk mendukung proses komutasi, sehingga memerlukan model matematis yang akurat untuk perancangan sistem kontrol (Rifqi Muwafiqul Hilmi et al., 2022).

Analisis sensitivitas parameter menunjukkan bahwa model matematis yang dikembangkan memiliki tingkat robustness yang baik terhadap variasi parameter sistem. Parameter resistansi stator (R_s) dan induktansi stator (L_s) menunjukkan pengaruh yang paling signifikan terhadap akurasi model, dengan sensitivitas sebesar 12.5% dan 8.7% masing-masing terhadap perubahan nilai parameter sebesar 10%. Hal ini mengindikasikan pentingnya identifikasi parameter yang akurat pada tahap awal pemodelan. Konstanta *back EMF* (K_e) juga menunjukkan sensitivitas yang cukup tinggi sebesar 7.2%, yang dapat dijelaskan oleh perannya yang krusial dalam menentukan karakteristik torsi dan kecepatan motor. Sebaliknya, inersia rotor (J) menunjukkan sensitivitas yang relatif rendah sebesar 3.1%, mengindikasikan bahwa model tetap stabil meskipun terdapat ketidakpastian dalam parameter mekanik.

Robustness model juga dievaluasi melalui analisis Monte Carlo dengan 1000 iterasi simulasi menggunakan parameter yang terdistribusi normal dengan standar deviasi 5% dari nilai nominal. Hasil analisis menunjukkan bahwa 95% simulasi menghasilkan error prediksi di bawah 5%, dengan rata-rata error 2.8% untuk kecepatan dan 3.2% untuk arus. Distribusi error yang terpusat dan simetris ini mengkonfirmasi stabilitas numerik model dan validitas asumsi-asumsi yang digunakan dalam derivasi persamaan *state-space*.

Model matematis berhasil mengkapture karakteristik dinamika transien motor BLDC dengan akurasi tinggi, khususnya pada fase start-up dan perubahan beban mendadak. Analisis respons transien menunjukkan bahwa konstanta waktu elektrik ($\tau_e = L_s/R_s$) berkisar antara 2.3-2.7 ms, sedangkan konstanta waktu mekanik ($\tau_m = J \times R_s / K_e^2$) berkisar antara 45-52 ms. Perbedaan signifikan antara konstanta waktu

elektrik dan mekanik ini mengkonfirmasi karakteristik multi-time-scale system yang inherent pada motor BLDC, di mana dinamika elektrik berlangsung jauh lebih cepat dibandingkan dinamika mekanik.

Pada kondisi steady-state, model menunjukkan konvergensi yang excellent dengan data eksperimental. Analisis spektral menggunakan Fast Fourier Transform (FFT) pada sinyal kecepatan dan arus menunjukkan bahwa model mampu mereproduksi komponen harmonik utama hingga frekuensi 500 Hz dengan akurasi di atas 90%. Komponen harmonik pada frekuensi $6f_e$ (dimana f_e adalah frekuensi elektrik fundamental) yang karakteristik pada motor BLDC berhasil ditangkap dengan baik, mengindikasikan bahwa efek ripple torsi akibat proses *commutation* telah dimodelkan dengan tepat.

Ekstensif validation dilakukan pada 15 titik operasi berbeda yang mencakup rentang kecepatan 500-3000 rpm dan torsi beban 0.1-2.5 Nm. Hasil validasi menunjukkan bahwa akurasi model tetap konsisten pada sebagian besar titik operasi, dengan RMSE rata-rata 19.2 rpm untuk kecepatan dan 0.18 A untuk arus. Namun, ditemukan adanya degradasi akurasi pada kondisi kecepatan rendah (<800 rpm) dan beban tinggi (>2.0 Nm), dengan RMSE meningkat menjadi 32.5 rpm dan 0.31 A masing-masing.

Degradasi akurasi pada kondisi ekstrim ini dapat diatribusikan kepada beberapa faktor. Pertama, pada kecepatan rendah, efek nonlinearitas karakteristik magnetisasi menjadi lebih dominan dan tidak dapat diabaikan seperti pada asumsi model linear. Kedua, pada beban tinggi, saturasi magnetik pada stator core mulai signifikan, menyebabkan perubahan nilai induktansi stator yang tidak diperhitungkan dalam model. Ketiga, efek losses yang bervariasi secara nonlinear terhadap operating point, termasuk core losses, windage losses, dan friction losses, memberikan kontribusi error yang tidak dapat diabaikan.

Analisis eigenvalue dari matriks sistem menunjukkan bahwa semua poles berada pada half-plane kiri dari s-domain, mengkonfirmasi stabilitas inherent sistem dalam konfigurasi open-loop. Pole dominan terletak pada $-186.2 \pm j94.7$ rad/s, yang berkorelasi dengan konstanta waktu mekanik sistem. Analisis controllability menggunakan Controllability Gramian menunjukkan bahwa sistem memiliki full rank, mengindikasikan bahwa semua states dapat dikontrol melalui input tegangan.

Analisis observability juga menunjukkan hasil yang memuaskan, dengan Observability Gramian memiliki condition number sebesar 24.7, yang berada dalam rentang acceptable untuk implementasi observer-based control. Hal ini sangat penting mengingat bahwa dalam implementasi praktis, tidak semua states (khususnya flux linkage dan posisi rotor) dapat diukur secara langsung, sehingga diperlukan state estimation menggunakan observer.



Model matematis yang telah divalidasi ini memberikan foundation yang solid untuk pengembangan sistem kontrol fuzzy logic. Karakteristik nonlinearitas yang teridentifikasi dari model, khususnya pada kondisi operasi ekstrim, dapat digunakan sebagai basis untuk desain membership function dan rule base yang adaptive. Analisis sensitivitas parameter memberikan insight tentang prioritas dalam tuning controller, dimana parameter yang memiliki sensitivitas tinggi harus mendapat perhatian khusus dalam desain fuzzy controller.

Time-scale separation yang jelas antara dinamika elektrik dan mekanik memungkinkan implementasi cascade control structure, dimana inner loop mengendalikan arus (dinamika elektrik) dan outer loop mengendalikan kecepatan (dinamika mekanik). Model matematis memberikan guidance untuk pemilihan sampling time yang optimal, yaitu 0.1 ms untuk inner loop dan 1 ms untuk outer loop, berdasarkan kriteria Nyquist frequency dan bandwidth requirement. Karakteristik ripple torsi yang berhasil dimodelkan juga memberikan informasi penting untuk desain fuzzy controller yang mampu meminimalkan torque pulsation. Frekuensi dominan ripple torsi pada 6fe dapat digunakan sebagai basis untuk desain notch filter atau feedforward compensation dalam struktur kontrol fuzzy logic, sehingga menghasilkan performa yang smooth dan efisien.

Evaluasi Performa Fuzzy Logic Controller

Implementasi sistem kontrol *fuzzy logic* dengan struktur *Mamdani* menunjukkan performa yang superior dibandingkan dengan kontroler PID konvensional dalam semua parameter evaluasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa FLC mampu mencapai *rise time* 45.2 ms dan *settling time* 132.5 ms pada kondisi *no-load*, yang secara signifikan lebih baik dibandingkan kontroler PID dengan *rise time* 52.7 ms dan *settling time* 185.3 ms. Keunggulan ini disebabkan oleh kemampuan FLC dalam menangani ketidakpastian sistem dan karakteristik nonlinear motor BLDC tanpa memerlukan model matematis yang eksak.

Desain *membership function* dengan tujuh tingkat linguistik dan basis aturan 49 aturan memberikan granularitas kontrol yang optimal untuk sistem motor BLDC. Optimasi parameter menggunakan algoritma *Chameleon Swarm Algorithm* berhasil menghasilkan parameter optimal yang meminimalkan fungsi objektif ITAE. Pendekatan optimasi ini sejalan dengan tren penelitian terkini yang menggunakan algoritma optimasi berbasis *swarm* untuk meningkatkan performa kontroler *fuzzy logic*. Penggunaan ITAE sebagai indikator performa terbukti efektif dalam mengoptimalkan respons dinamis sistem, konsisten dengan temuan penelitian yang menunjukkan bahwa ITAE memberikan hasil optimisasi torque ripple dan respons kecepatan yang terbaik (Shi et al., 2022).

Analisis *overshoot* menunjukkan bahwa FLC mampu mempertahankan *overshoot* di bawah 3.5% untuk semua kondisi beban, sementara kontroler PID menghasilkan *overshoot* hingga 11.4% pada beban penuh. Kemampuan FLC dalam meminimalkan *overshoot* ini sangat penting untuk aplikasi yang memerlukan tingkat keamanan tinggi, seperti yang dibutuhkan dalam teknologi asistif. *Steady-state error* yang rendah (0.5-1.1 rpm) juga menunjukkan kemampuan FLC dalam mempertahankan akurasi kontrol dalam jangka panjang, yang merupakan karakteristik penting untuk aplikasi industri yang memerlukan presisi tinggi.

Interpretasi Hasil Validasi Eksperimental

Validasi eksperimental yang dilakukan menggunakan platform *test bench* dengan motor BLDC 500W memberikan konfirmasi empiris terhadap keunggulan sistem kontrol yang dikembangkan. Konsistensi antara hasil simulasi dan eksperimental, dengan tingkat akurasi model matematis yang tinggi, memvalidasi pendekatan metodologi yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil pengujian *tracking performance* menunjukkan bahwa FLC memiliki kemampuan superior dalam mengikuti perubahan referensi dinamis, dengan RMS error 3.2 rpm untuk referensi sinusoidal dibandingkan 5.8 rpm untuk kontroler PID.

Pengujian *robustness* terhadap gangguan beban dan variasi parameter menunjukkan bahwa sistem kontrol *fuzzy logic* memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap gangguan eksternal. Hal ini sangat relevan untuk aplikasi industri dimana motor BLDC harus beroperasi dalam kondisi beban yang bervariasi dan gangguan lingkungan. Kemampuan sistem untuk mempertahankan performa yang stabil dalam berbagai kondisi operasional mengindikasikan potensi aplikasi yang luas, dari industri otomotif hingga sistem propulsi pesawat tanpa awak yang memerlukan efisiensi energi tinggi (Prasetyo et al., 2022).

Implementasi sistem kontrol pada platform DSP TMS320F28335 menunjukkan kelayakan praktis dari algoritma yang dikembangkan. Kemampuan sistem untuk beroperasi dalam *real-time* dengan instrumentasi pengukuran presisi memberikan indikasi bahwa sistem dapat diimplementasikan dalam aplikasi industri sebenarnya. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa akurasi pengukuran sensor mencapai tingkat error 5%, yang masih dalam batas toleransi untuk sebagian besar aplikasi industri (Satriawan et al., 2022).

Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan sistem kontrol motor BLDC dengan mengintegrasikan pemodelan matematis yang komprehensif, desain kontroler *fuzzy logic* yang optimal, dan validasi eksperimental yang sistematis. Dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang fokus pada aspek tunggal, penelitian ini mengadopsi



pendekatan holistik yang mencakup seluruh spektrum pengembangan sistem kontrol motor BLDC. Keunggulan utama penelitian ini terletak pada integrasi algoritma optimasi *swarm intelligence* dalam desain FLC, yang menghasilkan performa yang superior dibandingkan metode konvensional.

Kontribusi penelitian ini juga tercermin dalam metodologi validasi yang komprehensif, yang tidak hanya mengevaluasi performa kontrol dasar tetapi juga menguji *robustness* sistem terhadap gangguan dan variasi parameter. Pendekatan ini penting mengingat prediksi bahwa motor BLDC akan menjadi mainstream dalam transmisi daya industri menggantikan motor induksi tradisional pada tahun 2030 (Mohanraj et al., 2022). Hasil penelitian ini memberikan fondasi yang kuat untuk implementasi praktis sistem kontrol motor BLDC dalam berbagai aplikasi industri (Rahmansyah et al., 2025).

Penggunaan platform eksperimental berbasis *real-time* dengan instrumentasi presisi juga merupakan kontribusi metodologis yang penting. Pendekatan ini memungkinkan validasi yang akurat terhadap model teoretis dan memberikan insight berharga untuk optimasi sistem. Integrasi antara simulasi dan eksperimen yang sistematis dalam penelitian ini dapat menjadi rujukan untuk penelitian serupa di masa depan, terutama dalam konteks pengembangan media pembelajaran dan simulasi untuk pendidikan teknik (Ananditya, 2020).

5. PENUTUP

Penutup terdiri dari Kesimpulan dan Saran.

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Model matematis motor brushless DC berhasil dikembangkan menggunakan pendekatan state-space dengan tingkat akurasi tinggi, ditunjukkan oleh nilai RMSE berkisar 15.3-28.9 rpm untuk kecepatan dan 0.12-0.24 A untuk arus, serta koefisien determinasi R^2 mencapai 0.963-0.987 yang menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan lebih dari 96% variasi data eksperimental.
2. Sistem kontrol fuzzy logic dengan struktur Mamdani yang terdiri dari 49 aturan dan parameter yang dioptimasi menggunakan algoritma Chameleon Swarm Algorithm menunjukkan performa superior dibandingkan kontroler PID konvensional dalam semua parameter evaluasi, dengan rise time 45.2 ms, settling time 132.5 ms, overshoot 2.8%, dan steady-state error 0.5 rpm pada kondisi no-load.
3. Validasi eksperimental menggunakan platform test bench dengan motor BLDC 500W dan sistem kontrol berbasis DSP TMS320F28335 mengkonfirmasi keunggulan sistem kontrol fuzzy logic dalam hal tracking performance dengan RMS error 3.2 rpm untuk referensi sinusoidal dan kemampuan robustness yang baik terhadap gangguan beban dengan waktu pemulihan yang lebih cepat dibandingkan sistem kontrol konvensional.
4. Integrasi pemodelan matematis yang akurat dengan sistem kontrol fuzzy logic yang optimal menghasilkan sistem kontrol motor BLDC yang dapat diimplementasikan dalam aplikasi industri real-time dengan performa tinggi dan ketahanan yang baik terhadap gangguan eksternal.

5.2. Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengeksplorasi implementasi algoritma optimasi hibrid yang mengkombinasikan Chameleon Swarm Algorithm dengan metode optimasi lainnya guna meningkatkan konvergensi dan akurasi parameter fuzzy logic controller. Selain itu, perlu dilakukan pengujian pada berbagai jenis motor BLDC dengan spesifikasi yang berbeda untuk menguji generalisasi model matematis dan sistem kontrol yang dikembangkan. Pengembangan sistem kontrol adaptif yang dapat menyesuaikan parameter secara real-time berdasarkan kondisi operasional juga menjadi area penelitian yang menarik. Implementasi pada aplikasi industri spesifik seperti kendaraan listrik atau sistem robotika akan memberikan validasi lebih lanjut terhadap praktikalitas sistem yang dikembangkan. Penelitian lanjutan juga dapat fokus pada pengembangan interface pengguna yang user-friendly untuk memfasilitasi implementasi sistem kontrol dalam lingkungan industri yang sesungguhnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abouseda, A. I., Doruk, R. O., & Amini, A. (2025). Parameter Identification and Speed Control of a Small-Scale BLDC Motor: Experimental Validation and Real-Time PI Control with Low-Pass Filtering. *Machines*, 13(8), 656. <https://doi.org/10.3390/machines13080656>
- Ahmed Baba, M., Naoui, M., & Cherkaoui, M. (2023). Fault-Tolerant Control Strategy for Hall Sensors in BLDC Motor Drive for Electric Vehicle Applications. *Sustainability (Switzerland)*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/su151310430>
- Al Mashhadany, Y. I. M., Abbas, A. K., & Algburi, S. S. (2022). Modeling and analysis of brushless DC motor system based on intelligent controllers. *Bulletin of Electrical Engineering and*



- Informatics*, 11(6), 2995–3003. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i6.4365>
- Ananditya, B. A. (2020). *Modeling Of Working Systems And Characteristics Of Simple Electric Motors And Dc Motors With Isis Proteus*.
- Anshory, I., Hadidjaja, D., & Jakaria, R. B. (2020). Bldc Motor : Modeling and Optimization Speed Control Using Firefly Algorithm. *Dinamik*, 25(2), 51–58. <https://doi.org/10.35315/dinamik.v25i2.7851>
- Anshory, I., Hadidjaja, D., & Sulistiyowati, I. (2021). Measurement, Modeling, and Optimization Speed Control of BLDC Motor Using Fuzzy-PSO Based Algorithm. *Journal of Electrical Technology UMY*, 5(1), 17–25. <https://doi.org/10.18196/jet.v5i1.12113>
- Anshory, I., Robandi, I., & Wirawan. (2020). Identification parameter system for mathematical modeling BLDC motor using transfer function models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 821(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/821/1/012023>
- Bahadir, A., & Aydoğdu, Ö. (2023). Modeling of a brushless dc motor driven electric vehicle and its pid-fuzzy control with dSPACE. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 41(1), 156–177. <https://doi.org/10.14744/sigma.2023.00015>
- Bhayo, M. A., Laghari, J. A., Aljaidi, M., Koondhar, M. A., El-Sehiemy, R. A., Alkoradees, A. F., & Alaas, Z. M. (2025). High precision experimentally validated adaptive neuro fuzzy inference system controller for DC motor drive system. *Scientific Reports*, 15(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97549-4>
- Kaczmarczyk, G., Malarczyk, M., Ferreira, D. D., & Kaminski, M. (2024). Stable Rules Definition for Fuzzy TS Speed Controller Implemented for BLDC Motor. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/app14030982>
- Kethiri, Mohamed Fadi, Charrouf, Omar, Betka, Achour, Tibermacine, Imad Eddine, & Napoli, Christian. (2025). Hybrid fuzzy-PSO based self-tuning fractional order PI controller for BLDC motors in electric vehicles: Comparative analysis and experimental validation. *Journal of Vibration and Control*, 10775463251374112. <https://doi.org/10.1177/10775463251374112>
- Khan, M. A., Baig, D. E. Ze., Ali, H., & Albogamy, F. R. (2025). Optimized System Identification (SI) of Brushless DC (BLDC) motor using Data-Driven Modeling Methods. *Scientific Reports*, 15(1), 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93444-0>
- Mohanraj, D., Aruldavid, R., Verma, R., Sathiyasekar, K., Barnawi, A. B., Chokkalingam, B., & Mihet-Popa, L. (2022). A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. *IEEE Access*, 10, 54833–54869. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175011>
- Ponce, P., Rosales, J. A., Molina, A., Ponce, H., & MacCleery, B. (2020). Designing a Robust controller using SMC and fuzzy artificial organic networks for brushed dc motors. *Energies*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/en13123091>
- Prasetyo, E. E., Irmawan, E., Ratnadila, N., Tinggi, S., & Kedirgantaraan, T. (2022). *Studi Eksperimental Pengujian Arus Pada Brushless DC Motor Rotomax 150cc*. 10(1), 16–21.
- Rahmansyah, M. A., Rusimamto, P. W., Endryansyah, & Zuhrie, M. S. (2025). *Kepraktisan Media Pembelajaran Aplikasi Plc Ladder Simulator 2 Untuk Meningkatkan Hasil Belajar Siswa Pada Elemen Sistem Kendali*.
- Rifqi Muwafiqul Hilmi, D. R. Z., Arifin, A., Arifin, A., Estiyono, A., & Estiyono, A. (2022). Sistem Karakterisasi dan Perencanaan Pengendali PID sebagai Kontrol Kecepatan Motor Brushless DC untuk Kursi Roda Tricycle. *Jurnal Teknik ITS*, 11(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i2.85505>
- Satriawan, Y., Yulianto, Y., & Sungkono, S. (2022). Sistem Kontrol Penggerak Motor Stepper Molding Microplastik Metode Fuzzy Logic Berbasis Myrio. *Jurnal Elektronika Dan Otomasi Industri*, 9(1), 62. <https://doi.org/10.33795/elk.v9i1.256>
- Shenbagalakshmi, R., Mittal, S. K., Subramanian, J., Vengatesan, V., Manikandan, D., & Ramaswamy, K. (2025). Adaptive speed control of BLDC motors for enhanced electric vehicle performance using fuzzy logic. *Scientific Reports*, 15(1), 1–22. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90957-6>
- Shi, J., Mi, Q., Cao, W., & Zhou, L. (2022). Optimizing BLDC motor drive performance using particle swarm algorithm-tuned fuzzy logic controller. *SN Applied Sciences*, 4(11). <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05179-6>
- Shuraiji, A. L., & Shneen, S. W. (2022). Fuzzy Logic Control and PID Controller for Brushless Permanent Magnetic Direct Current Motor: A Comparative Study. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 3(6), 762–768. <https://doi.org/10.18196/jrc.v3i6.15974>
- Wang, T., Wang, H., Wang, C., & Hu, H. (2022). A novel PID controller for BLDCM speed control using dual fuzzy logic systems with HSA optimization. *Scientific Reports*, 12(1), 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15487-x>
- Wang, Y. (2024). Hardware Design and Experimental Validation of Thermal Management System for Power Batteries in Electric Vehicles. *Journal of*



Nanoelectronics and Optoelectronics, 19(8), 874–880. <https://doi.org/10.1166/jno.2024.3633>
Zafar, Z. U. A., Ali, N., & Tunç, C. (2021). Mathematical modeling and analysis of fractional-order brushless DC motor. *Advances in Difference Equations*, 2021(1). <https://doi.org/10.1186/s13662-021-03587-3>