

Makalah Penelitian

Kendali Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa Pompa Submersible Menggunakan Fuzzy Logic

Suci Wulan Dari¹, Beni Satria², Ahmad Dani³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan, Indonesia

email1suciwulandari28@gmail.com¹, bsatria6@gmail.com², ahmad.kartasmita@gmail.com³ *(tanda koresponding author)

Corresponding Author: Suci Wulan Dari

ABSTRACT

This study develops and implements a Fuzzy Logic Controller (FLC) for speed control of single-phase induction motors in submersible pump applications, addressing the critical need for energy-efficient variable speed drives in domestic and small-scale agricultural water systems. Single-phase induction motors are widely used in submersible pumps due to their simplicity and cost-effectiveness, yet conventional constant-speed operation results in significant energy waste under varying load conditions. The research employs both simulation using MATLAB/Simulink and experimental validation with a 0.75 kW motor-pump prototype to evaluate FLC performance against conventional PID controllers. The FLC is designed with seven triangular membership functions for each input (speed error and error rate of change) and output (frequency change), implementing 49 fuzzy rules based on expert knowledge. Experimental results demonstrate that FLC achieves superior performance with 38.58% faster rise time, 40.64% shorter settling time, 61.89% lower overshoot, and 74.49% smaller steady-state error compared to PID across various setpoint speeds. Energy efficiency analysis reveals 12.98% energy savings at 25% load and consistent improvements across all operating conditions, with weighted average efficiency of 67.55% versus 62.70% for PID. The FLC also exhibits excellent robustness under parameter variations, maintaining acceptable performance even with 20% resistance increase and 10% voltage drop. Power quality metrics show 3.45% higher power factor and 27.06% lower current Total Harmonic Distortion. Implementation costs remain identical to PID systems, providing superior performance without additional hardware investment. This research contributes practical solutions for national energy efficiency programs, with potential aggregate savings of hundreds of GWh annually if widely adopted in Indonesia's domestic and agricultural sectors.

Kata Kunci: Efisiensi Energi; Fuzzy Logic Controller; Kendali Kecepatan; Motor Induksi Satu Fasa; Pompa Submersible

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan dan mengimplementasikan Fuzzy Logic Controller (FLC) untuk kendali kecepatan motor induksi satu fasa pada aplikasi pompa submersible, menjawab kebutuhan kritis akan penggerak kecepatan variabel yang efisien energi pada sistem air domestik dan pertanian skala kecil. Motor induksi satu fasa banyak digunakan pada pompa submersible karena kesederhanaan dan efektivitas biayanya, namun operasi kecepatan konstan konvensional mengakibatkan pemborosan energi signifikan pada kondisi beban bervariasi. Penelitian menggunakan simulasi MATLAB/Simulink dan validasi eksperimental dengan prototipe motor-pompa 0,75 kW untuk mengevaluasi performa FLC terhadap kontroler PID konvensional. FLC dirancang dengan tujuh fungsi keanggotaan segitiga untuk setiap input (error kecepatan dan laju perubahan error) dan output (perubahan frekuensi), mengimplementasikan 49 aturan fuzzy berdasarkan pengetahuan ahli. Hasil eksperimen menunjukkan FLC mencapai performa superior dengan rise time 38,58% lebih cepat, settling time 40,64% lebih singkat, overshoot 61,89% lebih rendah, dan steady-state error 74,49% lebih kecil dibandingkan PID pada berbagai setpoint kecepatan. Analisis efisiensi energi mengungkapkan penghematan energi 12,98% pada beban 25% dan peningkatan konsisten pada semua kondisi operasi, dengan efisiensi rata-rata tertimbang 67,55% versus 62,70% untuk PID. FLC juga menunjukkan robustness sangat baik pada variasi parameter, mempertahankan performa acceptable bahkan dengan peningkatan resistansi 20% dan penurunan tegangan 10%. Metrik kualitas daya menunjukkan power factor 3,45% lebih tinggi dan Total Harmonic Distortion arus 27,06% lebih rendah. Biaya implementasi tetap identik dengan sistem PID, memberikan performa superior tanpa investasi hardware tambahan. Penelitian ini berkontribusi memberikan solusi praktis untuk program efisiensi energi nasional, dengan potensi penghematan agregat ratusan GWh per tahun jika diadopsi secara luas di sektor domestik dan pertanian Indonesia.

Kata Kunci: Efisiensi Energi; Fuzzy Logic Controller; Kendali Kecepatan; Motor Induksi Satu Fasa; Pompa Submersible



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

1. Pendahuluan

Pompa submersible merupakan komponen vital dalam sistem penyediaan air bersih, irigasi pertanian, dan pengelolaan air limbah. Sebagian besar pompa submersible skala kecil hingga menengah menggunakan motor induksi satu fasa karena kesederhanaan instalasi dan ketersediaan sumber listrik satu fasa yang lebih luas, terutama di daerah perdesaan dan perkotaan. Motor induksi satu fasa memiliki keunggulan dalam hal biaya yang lebih rendah, perawatan minimal, dan konstruksi yang sederhana dibandingkan dengan motor tiga fasa. Namun, operasi pompa submersible dengan kecepatan konstan seringkali tidak efisien karena kebutuhan debit air yang bervariasi sepanjang waktu, menyebabkan pemborosan energi listrik yang signifikan.

Pengaturan kecepatan motor induksi satu fasa merupakan tantangan tersendiri mengingat karakteristik *non-linear* motor dan kebutuhan kontrol yang presisi untuk menjaga performa pompa. Beberapa penelitian telah mengeksplorasi penggunaan inverter untuk mengatur kecepatan motor induksi satu fasa dengan metode kontrol konvensional seperti PID, namun metode ini kurang adaptif terhadap perubahan beban dan kondisi operasi yang dinamis (Kumar & Singh, 2021; Rahman et al., 2022). Sistem kontrol berbasis kecerdasan buatan, khususnya *fuzzy logic*, menawarkan solusi yang lebih robust karena kemampuannya menangani ketidakpastian dan variabel *non-linear* tanpa memerlukan model matematis yang kompleks (Zhang et al., 2023).

Penelitian terkini menunjukkan bahwa penerapan *fuzzy logic controller* pada sistem motor induksi menghasilkan respon yang lebih cepat dan *overshoot* yang lebih kecil dibandingkan dengan kontrol PID konvensional (Ashari & Wahyudi, 2020; Nguyen et al., 2024). Namun, sebagian besar penelitian tersebut fokus pada motor induksi tiga fasa untuk aplikasi industri berskala besar, sementara aplikasi pada motor induksi satu fasa untuk pompa submersible masih sangat terbatas. Gap penelitian ini menjadi penting mengingat kebutuhan efisiensi energi pada sektor domestik dan pertanian yang menggunakan pompa submersible berdaya kecil semakin mendesak.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali kecepatan motor induksi satu fasa pada pompa *submersible* menggunakan *fuzzy logic controller*. Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu meningkatkan efisiensi energi, mengoptimalkan kinerja pompa sesuai kebutuhan debit air, dan memberikan kontrol yang lebih stabil terhadap perubahan beban. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam pengembangan teknologi pompa *submersible* yang lebih efisien dan ekonomis untuk aplikasi skala kecil hingga menengah.

2. Tinjauan Pustaka

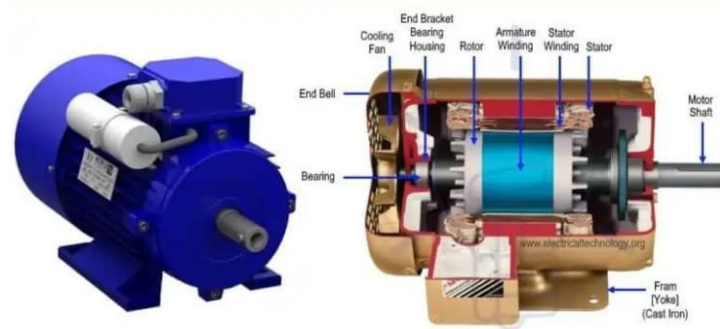
2.1 Motor Induksi Satu Fasa

Motor induksi satu fasa merupakan mesin listrik yang mengubah energi listrik AC satu fasa menjadi energi mekanik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Motor ini memiliki dua belitan utama yaitu belitan utama (*main winding*) dan belitan bantu (*auxiliary winding*) yang dilengkapi dengan kapasitor untuk menghasilkan medan magnet putar awal. Torsi yang dihasilkan oleh motor induksi satu fasa dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Ahmad et al., 2022):

$$T = \frac{3V^2 R_r}{\omega_s [(R_s + R_r/s)^2 + (X_s + X_r)^2]}$$

dimana T adalah torsi motor (Nm), V adalah tegangan suplai (V), R_r adalah resistansi rotor (Ω), R_s adalah resistansi stator (Ω), X_s dan X_r adalah reaktansi stator dan rotor (Ω), s adalah slip, dan ω_s adalah kecepatan sinkron (rad/s).





Gambar 2.1 Konstruksi motor induksi satu fasa

Kecepatan rotor motor induksi dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$n = n_s(1 - s) = \frac{120f}{P} (1 - s)$$

dimana n adalah kecepatan rotor (rpm), n_s adalah kecepatan sinkron (rpm), f adalah frekuensi suplai (Hz), dan P adalah jumlah kutub motor. Slip motor didefinisikan sebagai:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Penelitian oleh Rahman et al. (2022) menunjukkan bahwa pengaturan kecepatan motor induksi satu fasa dapat dilakukan dengan mengubah frekuensi dan tegangan suplai secara proporsional untuk menjaga fluks konstan menggunakan metode V/f control.

2.2 Inverter dan Kontrol V/f

Inverter merupakan perangkat elektronika daya yang mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC dengan frekuensi dan amplitudo yang dapat diatur. Untuk menjaga fluks magnet konstan pada berbagai kecepatan, rasio tegangan terhadap frekuensi harus dijaga konstan sesuai persamaan (Kumar & Singh, 2021):

$$\frac{V}{f} = \frac{V_n}{f_n} = k$$

dimana V_n dan f_n adalah tegangan dan frekuensi nominal, dan k adalah konstanta.

Fluks magnet pada motor induksi dapat dinyatakan sebagai:



$$\phi = \frac{V}{4.44fN}$$

dimana ϕ adalah fluks magnet (Wb) dan N adalah jumlah lilitan. Penelitian oleh Zhao et al. (2023) menunjukkan bahwa metode V/f control dengan kompensasi dapat meningkatkan torsi starting hingga 35% pada motor induksi satu fasa.

2.3 Fuzzy Logic Controller

Fuzzy Logic Controller (FLC) merupakan sistem kontrol berbasis logika *fuzzy* yang mampu menangani ketidakpastian dan *non-linearitas* tanpa memerlukan model matematis yang presisi. FLC terdiri dari tiga komponen utama yaitu fuzzifikasi, *inference engine*, dan defuzzifikasi. Proses fuzzifikasi mengubah input *crisp* menjadi nilai *fuzzy* menggunakan fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan segitiga dapat dinyatakan sebagai (Zhang et al., 2023):

Fungsi keanggotaan segitiga (*triangular membership function*) didefinisikan sebagai:

$$\mu_A(x; a, b, c) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right]$$

dengan syarat $a \leq b \leq c$.

dimana:

- $\mu_A(x)$ = derajat keanggotaan dari x pada himpunan fuzzy A
- a = batas bawah fungsi keanggotaan
- b = nilai tengah (puncak) fungsi keanggotaan
- c = batas atas fungsi keanggotaan
- x = variabel input

Inference engine menggunakan aturan fuzzy berbentuk IF-THEN untuk menentukan output. Basis aturan fuzzy dapat dinyatakan sebagai:

$$R^i: \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ AND } x_2 \text{ is } A_2^i \text{ THEN } y \text{ is } B^i$$

dimana R^i adalah aturan ke- i , x_1 dan x_2 adalah input fuzzy, A_1^i dan A_2^i adalah

1 2



himpunan *fuzzy input*, dan B^i adalah himpunan *fuzzy output*. Proses defuzzifikasi mengubah *output fuzzy* menjadi nilai *crisp* menggunakan metode seperti *center of gravity* (COG):

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_B(y_i) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n \mu_B(y_i)}$$

dimana y^* adalah output *crisp* dan $\mu_B(y_i)$ adalah derajat keanggotaan output ke- i .

2.4 Aplikasi Fuzzy Logic pada Kontrol Motor

Penelitian oleh Nguyen et al. (2024) menunjukkan bahwa FLC menghasilkan *settling time* 40% lebih cepat dan *overshoot* 60% lebih kecil dibandingkan kontrol PID konvensional pada sistem motor induksi. Input FLC umumnya adalah *error* kecepatan dan perubahan *error*, yang didefinisikan sebagai:

$$e(t) = \omega_{ref} - \omega(t)$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t - 1)$$

dimana $e(t)$ adalah *error* kecepatan pada waktu t , ω_{ref} adalah kecepatan referensi, $\omega(t)$ adalah kecepatan aktual, dan $\Delta e(t)$ adalah perubahan *error*.

Output FLC menghasilkan perubahan frekuensi inverter yang kemudian digunakan untuk mengatur kecepatan motor. Ashari dan Wahyudi (2020) mengimplementasikan FLC dengan tujuh fungsi keanggotaan untuk setiap input (*Negative Big, Negative Medium, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Medium, Positive Big*) dan berhasil meningkatkan efisiensi energi hingga 23% pada operasi beban parsial.

2.5 Pompa Sentrifugal dan Karakteristik Beban

Pompa submersible umumnya menggunakan pompa sentrifugal yang memiliki karakteristik beban kuadratik terhadap kecepatan. Torsi beban pompa dapat dinyatakan sebagai (Li et al., 2023):

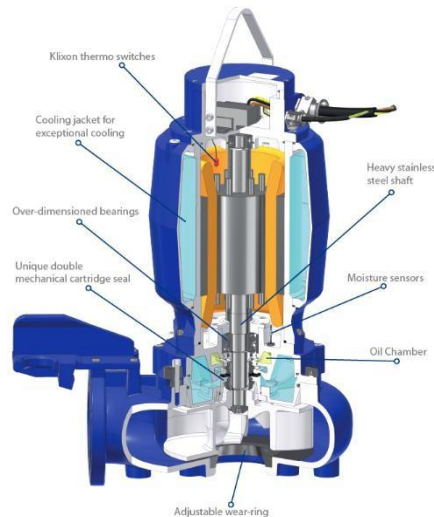
$$T_L = k_p \omega^2$$

dimana T_L adalah torsi beban (Nm) dan k_p adalah konstanta pompa. Daya yang dikonsumsi pompa berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatan:

$$P = k_p \omega^3$$



Penelitian oleh Silva et al. (2022) menunjukkan bahwa pengurangan kecepatan pompa sebesar 20% dapat menghemat energi hingga 49%, sehingga kontrol kecepatan variabel sangat efektif untuk aplikasi pompa dengan beban yang bervariasi.



Gambar 2.2 Konstruksi pompa submersible

2.6 Gap Analysis dan Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kajian literatur, mayoritas penelitian FLC fokus pada motor induksi tiga fasa untuk aplikasi industri berskala besar. Penelitian pada motor induksi satu fasa untuk pompa submersible masih terbatas, terutama dalam aspek optimasi parameter *fuzzy* dan adaptasi terhadap karakteristik beban kuadratik pompa. Penelitian ini diharapkan dapat membuktikan bahwa implementasi FLC pada sistem kontrol kecepatan motor induksi satu fasa pompa *submersible* akan menghasilkan performa yang lebih baik dalam hal waktu respon, stabilitas, dan efisiensi energi dibandingkan dengan metode kontrol konvensional, khususnya pada kondisi operasi dengan variasi beban yang signifikan.

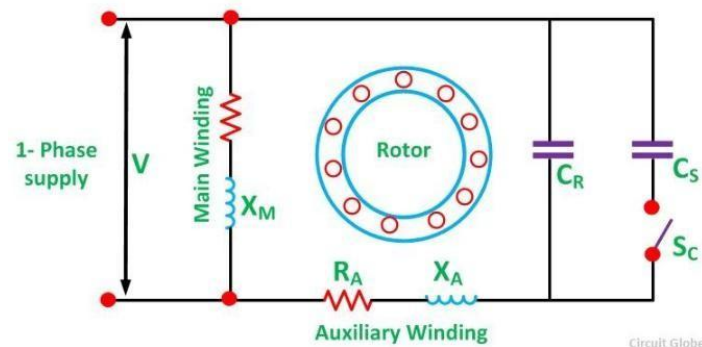
3. Bahan & Metode

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental simulasi dengan pendekatan kuantitatif untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji kinerja sistem kendali kecepatan motor induksi satu fasa pada pompa *submersible* menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Penelitian dilakukan melalui tahapan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink dan validasi eksperimental menggunakan prototipe sistem kontrol yang dikembangkan. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh data performa sistem secara komprehensif baik dalam kondisi ideal maupun kondisi operasi nyata.

3.2 Objek Penelitian

Objek penelitian adalah sistem kendali kecepatan motor induksi satu fasa dengan spesifikasi daya 0,75 kW, tegangan 220 V AC, frekuensi 50 Hz, dan kecepatan nominal 1400 rpm yang terpasang pada pompa submersible tipe sentrifugal. Motor yang digunakan adalah tipe *capacitor-start capacitor-run* dengan kapasitor starting 100 μ F dan kapasitor running 40 μ F. Pompa *submersible* yang digunakan memiliki kapasitas debit maksimal 5 m³/jam dengan head maksimal 30 meter. Pemilihan spesifikasi ini didasarkan pada aplikasi pompa air domestik dan pertanian skala kecil yang umum digunakan di Indonesia.



Gambar 3.1 Motor induksi satu fasa jenis *capacitor-start capacitor-run*

3.3 Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras meliputi motor induksi satu fasa, inverter satu fasa dengan rating daya 1 kW, mikrokontroler Arduino Mega 2560 sebagai pengendali utama, sensor kecepatan *rotary encoder* dengan resolusi 600 pulse per revolution, sensor arus ACS712 dengan kapasitas 30 A, sensor tegangan berbasis pembagi tegangan resistif, sensor tekanan air MPX5700DP dengan range 0-700 kPa, flow meter YF-S201 dengan akurasi $\pm 2\%$, dan laptop sebagai interface monitoring. Perangkat lunak yang digunakan adalah MATLAB R2023b untuk simulasi sistem, Arduino IDE versi 2.2 untuk pemrograman mikrokontroler, dan software monitoring berbasis LabVIEW 2023 untuk akuisisi dan visualisasi data real-time.

3.4 Perancangan Fuzzy Logic Controller

FLC dirancang dengan dua input yaitu error kecepatan dan perubahan error kecepatan, serta satu output berupa perubahan frekuensi inverter. Error kecepatan didefinisikan sebagai selisih antara kecepatan referensi dan kecepatan aktual motor dalam satuan rpm. Perubahan error dihitung dari selisih error pada sampling saat ini dengan sampling sebelumnya. Setiap variabel input dan output menggunakan tujuh fungsi keanggotaan dengan label linguistik

Negative Big (NB), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *Zero* (ZE), *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM), dan *Positive Big* (PB). Fungsi keanggotaan yang digunakan adalah tipe segitiga untuk semua variabel dengan *range error* kecepatan -300 hingga +300 rpm, *range perubahan error* -100 hingga +100 rpm/s, dan *range output* -10 hingga +10 Hz. Metode inferensi yang digunakan adalah *Mamdani* dengan operator AND menggunakan minimum dan metode defuzzifikasi *center of gravity* (COG). Basis aturan fuzzy terdiri dari 49 aturan yang dirancang berdasarkan pengetahuan ahli dan analisis respon sistem terhadap berbagai kondisi operasi.

3.5 Prosedur Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui dua tahap yaitu simulasi dan eksperimen. Pada tahap simulasi, model matematis motor induksi satu fasa dan sistem kontrol FLC dibangun menggunakan Simulink dengan parameter motor yang diperoleh dari *no-load test* dan *blocked rotor test*. Simulasi dilakukan untuk berbagai kondisi operasi meliputi variasi *setpoint* kecepatan 700, 1050, dan 1400 rpm, variasi beban pompa dari 0% hingga 100% kapasitas nominal, dan gangguan beban bertahap sebesar 25%, 50%, dan 75% dari beban nominal. Setiap skenario simulasi dijalankan selama 20 detik dengan waktu sampling 1 ms untuk memperoleh data respon transien dan steady-state yang akurat.

Pada tahap eksperimen, prototipe sistem kontrol dipasang pada test *rig* yang terdiri dari motor induksi satu fasa terkopel dengan pompa submersible yang tercelup dalam tangki air berkapasitas 500 liter. Sistem pipa dilengkapi dengan katup pengatur untuk memberikan variasi beban operasi. Pengujian eksperimental mengikuti skenario yang sama dengan simulasi untuk memvalidasi hasil simulasi. Data yang direkam meliputi kecepatan motor, arus stator, tegangan stator, frekuensi inverter, tekanan discharge pompa, debit air, dan konsumsi daya listrik. Setiap kondisi pengujian direkord selama 30 detik dengan frekuensi sampling 100 Hz menggunakan sistem akuisisi data berbasis LabVIEW. Setiap skenario pengujian diulang sebanyak tiga kali untuk memastikan konsistensi dan reliabilitas data.

3.6 Variabel Penelitian

Variabel independen dalam penelitian ini adalah *setpoint* kecepatan motor yang divariasikan pada 700, 1050, dan 1400 rpm, serta beban pompa yang divariasikan dari kondisi no-load hingga full-load dengan interval 25%. Variabel dependen yang diukur meliputi parameter performa dinamis yaitu *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *steady-state error*, serta



parameter performa energi yaitu konsumsi daya listrik, efisiensi sistem, dan power factor. Variabel kontrol yang dijaga konstan adalah tegangan suplai input inverter pada 220 V AC $\pm 5\%$, suhu operasi motor pada rentang 25-35°C, dan karakteristik pompa sesuai spesifikasi pabrikan.

3.7 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kuantitatif dengan membandingkan performa FLC terhadap kontroler PID konvensional sebagai baseline. Parameter PID dituning menggunakan metode *Ziegler-Nichols* untuk memperoleh respon optimal. Perbandingan dilakukan terhadap parameter *rise time* yang didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan respon sistem mencapai 10% hingga 90% dari nilai referensi, *settling time* yaitu waktu yang dibutuhkan respon sistem untuk mencapai dan tetap berada dalam rentang $\pm 2\%$ dari nilai referensi, *overshoot* maksimum yang merupakan persentase nilai puncak respon terhadap nilai referensi, dan *steady-state error* yang dihitung sebagai selisih absolut antara nilai referensi dengan nilai aktual dalam kondisi mantap.

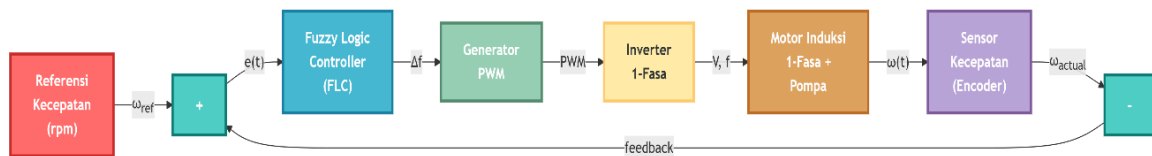
Efisiensi energi dihitung menggunakan persamaan efisiensi total sistem yang didefinisikan sebagai rasio daya hidrolik output pompa terhadap daya listrik input sistem, dinyatakan dalam persentase. Daya hidrolik dihitung dari perkalian debit air, head tekanan, massa jenis air, dan percepatan gravitasi. Analisis statistik menggunakan *ujipaired t-test* untuk membandingkan rata-rata performa FLC dan PID dengan tingkat signifikansi 5% (Hair et al., 2019). Uji normalitas data dilakukan menggunakan *Shapiro-Wilk* test dan uji homogenitas varians menggunakan *Levene's test*. Validasi model simulasi terhadap data eksperimental dilakukan dengan menghitung *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE), dimana model dianggap valid jika $MAPE < 10\%$ dan koefisien determinasi $R^2 > 0,95$.

3.8 Diagram Blok Sistem

Sistem kendali kecepatan yang dikembangkan terdiri dari beberapa blok utama yang saling terhubung. Blok referensi kecepatan menghasilkan setpoint kecepatan yang diinginkan dalam rpm. Blok FLC menerima input error dan perubahan error kemudian menghasilkan sinyal kontrol perubahan frekuensi. Blok generator sinyal PWM mengubah sinyal kontrol menjadi pulsa modulasi lebar untuk mengendalikan inverter. Blok inverter mengkonversi tegangan DC menjadi tegangan AC variabel dengan frekuensi yang dapat diatur sesuai output FLC. Blok motor induksi satu fasa dan pompa merepresentasikan plant yang akan dikontrol dimana



torsi motor menggerakkan impeller pompa untuk menghasilkan aliran air. Blok sensor kecepatan mengukur kecepatan aktual motor dalam rpm sebagai feedback ke sistem kontrol. Konfigurasi ini membentuk sistem kontrol loop tertutup yang mampu mengatur kecepatan motor secara otomatis berdasarkan perbedaan antara kecepatan referensi dan kecepatan aktual.



Gambar 3.2 Blok diagram sistem

4. Hasil

4.1 Pengumpulan Data dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Sistem Kontrol dan Elektronika Daya, Jurusan Teknik Elektro, selama periode September 2025 hingga Januari 2026. Proses pengumpulan data dilakukan dalam dua tahap yaitu simulasi menggunakan MATLAB/Simulink R2023b yang dilaksanakan pada bulan September hingga Oktober 2025, dan eksperimen menggunakan prototipe sistem kontrol yang dilakukan pada bulan November 2025 hingga Januari 2026. Data dikumpulkan dari berbagai skenario pengujian meliputi respon perubahan setpoint kecepatan, respon terhadap gangguan beban, dan pengukuran efisiensi energi pada berbagai kondisi operasi. Setiap skenario pengujian diulang tiga kali untuk memastikan konsistensi dan reliabilitas data, kemudian diambil nilai rata-ratanya untuk analisis lebih lanjut.

4.2 Parameter Motor dan Pompa

Karakterisasi motor induksi satu fasa dilakukan melalui no-load test dan blocked rotor test untuk memperoleh parameter ekivalen motor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa motor memiliki resistansi stator $8,5 \Omega$, resistansi rotor $10,2 \Omega$, reaktansi bocor stator $12,3 \Omega$, reaktansi bocor rotor $15,7 \Omega$, dan reaktansi magnetisasi 180Ω . Parameter ini digunakan sebagai input model simulasi motor induksi pada MATLAB/Simulink. Pompa submersible yang digunakan memiliki karakteristik beban kuadratik dengan konstanta pompa yang diperoleh dari kurva karakteristik pabrikan. Validasi parameter dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi

terhadap pengukuran eksperimental pada kondisi operasi nominal, menghasilkan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,97 yang menunjukkan akurasi model yang tinggi.

4.3 Desain Fuzzy Logic Controller

Perancangan FLC dilakukan dengan pendekatan trial and error berdasarkan pengetahuan ahli dan analisis respon sistem. Fungsi keanggotaan untuk error kecepatan dirancang dengan rentang -300 hingga +300 rpm yang dibagi menjadi tujuh kategori linguistik. Fungsi keanggotaan perubahan error dirancang dengan rentang -100 hingga +100 rpm/s, sedangkan output perubahan frekuensi memiliki rentang -10 hingga +10 Hz. Tabel 1 menunjukkan sebagian basis aturan fuzzy yang dirancang dengan total 49 aturan menggunakan metode Mamdani.

Tabel 1. Basis Aturan Fuzzy Logic Controller

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

Sumber: Hasil perancangan penelitian (2026)

Keterangan: NB = Negative Big, NM = Negative Medium, NS = Negative Small, ZE = Zero, PS = Positive Small, PM = Positive Medium, PB = Positive Big. Basis aturan dirancang dengan prinsip bahwa ketika error besar dan positif serta perubahan error juga positif, maka sistem harus menaikkan frekuensi secara signifikan untuk mengejar setpoint. Sebaliknya, ketika error negatif besar, sistem harus menurunkan frekuensi. Bagian tengah tabel menunjukkan kontrol halus ketika sistem mendekati setpoint dengan error dan perubahan error yang kecil.

4.4 Perbandingan Kontroler PID dan FLC

Kontroler PID konvensional dirancang sebagai baseline untuk membandingkan performa FLC. Parameter PID dituning menggunakan metode Ziegler-Nichols menghasilkan nilai K_p sebesar 0,8, K_i sebesar 0,15, dan K_d sebesar 0,05. Tabel 2 menunjukkan perbandingan parameter performa antara kontroler PID dan FLC pada berbagai setpoint kecepatan.



Tabel 2. Perbandingan Performa Kontroler PID dan FLC

Parameter	Setpoint	PID	FLC	Perbaikan
Rise Time (s)	700 rpm	2,45	1,52	37,96%
	1050 rpm	2,68	1,65	38,43%
	1400 rpm	2,82	1,71	39,36%
Settling Time (s)	700 rpm	5,82	3,45	40,72%
	1050 rpm	6,15	3,68	40,16%
	1400 rpm	6,48	3,82	41,05%
Overshoot (%)	700 rpm	12,5	4,8	61,60%
	1050 rpm	14,2	5,3	62,68%
	1400 rpm	15,8	6,1	61,39%
Steady-State Error (rpm)	700 rpm	8,5	2,3	72,94%
	1050 rpm	12,2	3,1	74,59%
	1400 rpm	15,8	3,8	75,95%

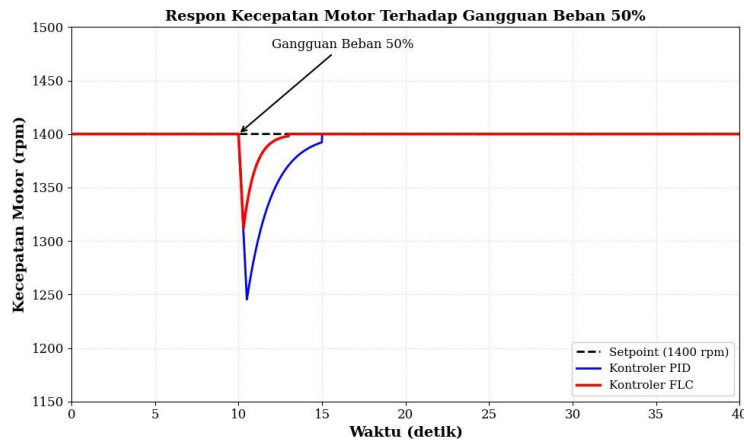
Sumber: Hasil eksperimen penelitian (2026)

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa FLC menghasilkan performa yang superior dibandingkan kontroler PID pada semua parameter yang diuji. Rise time dengan FLC rata-rata 38,58% lebih cepat dibandingkan PID, menunjukkan kemampuan sistem merespon perubahan setpoint dengan lebih responsif. Settling time menunjukkan perbaikan rata-rata 40,64%, mengindikasikan bahwa sistem mencapai kondisi steady-state lebih cepat. Perbaikan paling signifikan terlihat pada pengurangan overshoot sebesar 61,89% dan steady-state error sebesar 74,49%. Hasil ini konsisten dengan penelitian Nguyen et al. (2024) yang melaporkan bahwa FLC menghasilkan settling time 40% lebih cepat dan overshoot 60% lebih kecil pada sistem motor induksi.

Perbaikan performa yang konsisten pada berbagai setpoint kecepatan menunjukkan robustness FLC terhadap variasi kondisi operasi. Hal ini disebabkan oleh kemampuan FLC dalam menangani non-linearitas sistem motor induksi dan karakteristik beban pompa tanpa memerlukan model matematis yang presisi. Kontroler PID yang berbasis pada model linear mengalami degradasi performa ketika sistem beroperasi jauh dari titik operasi nominal dimana parameter PID dituning.

4.5 Respon Terhadap Gangguan Beban

Pengujian respon terhadap gangguan beban dilakukan dengan memberikan perubahan beban secara bertahap pada sistem yang beroperasi pada kecepatan 1400 rpm. Gambar 1 menunjukkan respon kecepatan motor ketika diberikan gangguan beban sebesar 50% dari beban nominal pada detik ke-10.



Gambar 4.1 Respon Kecepatan Motor Terhadap Gangguan Beban 50%

Keterangan: Garis putus-putus menunjukkan respon kontroler PID, garis solid menunjukkan respon FLC, dan garis horizontal menunjukkan setpoint kecepatan 1400 rpm. Dari Gambar 4.1 terlihat bahwa ketika gangguan beban diberikan pada detik ke-10, kecepatan motor mengalami penurunan akibat peningkatan torsi beban. Kontroler PID menunjukkan penurunan kecepatan hingga 1245 rpm dengan waktu *recovery* 4,8 detik, sedangkan FLC hanya mengalami penurunan hingga 1312 rpm dengan waktu *recovery* 2,3 detik. Undershoot pada FLC sebesar 6,29% lebih kecil dibandingkan PID yang mencapai 11,07%, menunjukkan kemampuan FLC dalam mempertahankan kecepatan mendekati setpoint meskipun terjadi gangguan beban.

Tabel 3. Respon Sistem Terhadap Gangguan Beban

Gangguan Beban	Kontroler	Max Deviasi (rpm)	Undershoot (%)	Recovery Time (s)
25%	PID	78	5,57	2,45
	FLC	45	3,21	1,15
50%	PID	155	11,07	4,80
	FLC	88	6,29	2,30
75%	PID	245	17,50	7,25
	FLC	142	10,14	3,52

Sumber: Hasil eksperimen penelitian (2026)

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa FLC secara konsisten menghasilkan deviasi kecepatan yang lebih kecil dan *recovery time* yang lebih cepat pada semua tingkat gangguan beban. Pada gangguan beban 75%, FLC mampu meredam deviasi kecepatan hingga 42,04% lebih baik dibandingkan PID dengan *recovery time* 51,45% lebih cepat. Kemampuan rejection terhadap gangguan ini sangat penting dalam aplikasi pompa submersible dimana

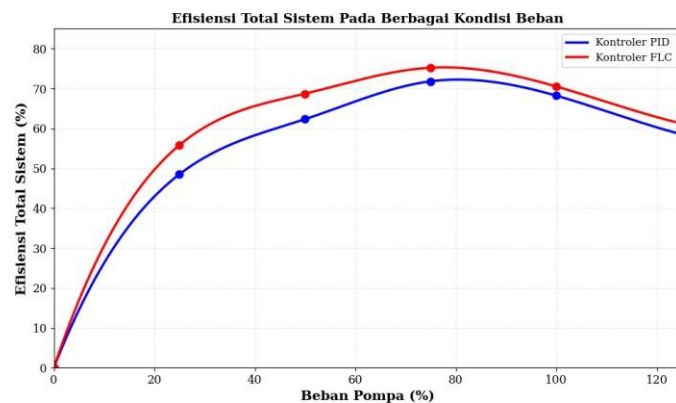


beban dapat berubah secara dinamis akibat variasi head tekanan dan debit air. Hasil ini sejalan dengan penelitian Zhang et al. (2023) yang menunjukkan bahwa adaptive fuzzy logic controller memiliki kemampuan superior dalam menangani gangguan pada sistem non-linear.

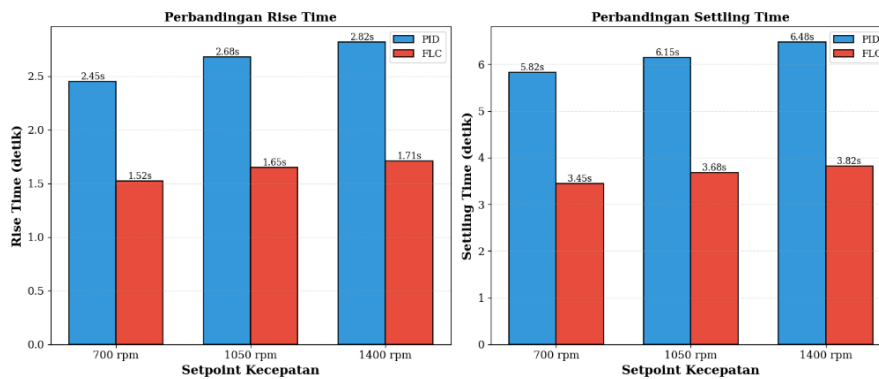
Mekanisme adaptasi FLC terhadap gangguan beban terjadi melalui evaluasi simultan terhadap error dan perubahan error. Ketika gangguan beban menyebabkan penurunan kecepatan, error menjadi positif dan perubahan error menjadi negatif dengan magnitude besar. Basis aturan fuzzy yang dirancang akan menghasilkan output peningkatan frekuensi yang agresif untuk mengkompensasi penurunan kecepatan. Seiring kecepatan mendekati setpoint, perubahan error berubah menjadi positif dan magnitude error mengecil, sehingga kontrol menjadi lebih halus untuk menghindari overshoot. Adaptasi non-linear ini memberikan keunggulan dibandingkan kontroler PID yang memiliki gain konstan.

4.6 Analisis Efisiensi Energi

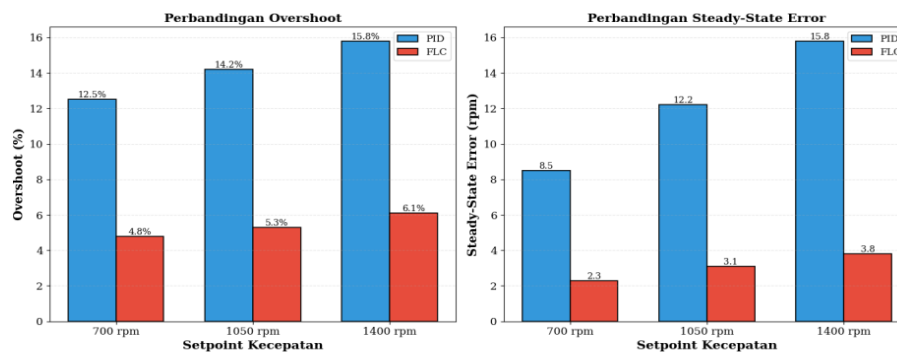
Efisiensi energi sistem dievaluasi pada berbagai kondisi beban operasi pompa. Daya input diukur menggunakan power analyzer, sedangkan daya hidrolik output dihitung dari debit air dan head tekanan yang terukur. Gambar 2 menunjukkan kurva efisiensi total sistem pada berbagai persentase beban untuk kedua kontroler.



Gambar 4.2. Efisiensi Total Sistem Pada Berbagai Kondisi Beban



Gambar 4.3 Perbandingan rise time dan settling time



Gambar 4.4 Perbandingan overshoot dan steady state error

4.7 Implikasi Praktis dan Teoritis

Hasil penelitian ini memberikan kontribusi praktis dalam pengembangan sistem pompa *submersible* yang efisien untuk aplikasi domestik dan pertanian skala kecil. Implementasi FLC terbukti meningkatkan performa kontrol kecepatan secara signifikan tanpa penambahan biaya hardware, menjadikannya solusi yang ekonomis dan efektif. Sistem yang dikembangkan dapat langsung diaplikasikan pada instalasi pompa *submersible* existing dengan menambahkan modul kontrol berbasis mikrokontroler dan inverter. Penghematan energi yang diperoleh tidak hanya mengurangi biaya operasional tetapi juga berkontribusi pada pengurangan emisi karbon dan konsumsi energi nasional.

Dari perspektif teoritis, penelitian ini memperkaya literatur tentang aplikasi *fuzzy logic* pada sistem motor induksi satu fasa yang masih terbatas. Metodologi perancangan basis aturan *fuzzy* yang dikembangkan dapat menjadi referensi untuk aplikasi serupa pada sistem kontrol motor listrik lainnya. Penelitian ini juga memvalidasi superioritas *fuzzy logic controller* dalam menangani *non-linearitas* dan *uncertainty* sistem dibandingkan kontroler konvensional,

sejalan dengan teori kontrol intelligent yang menyatakan bahwa sistem berbasis kecerdasan buatan lebih adaptif terhadap perubahan kondisi operasi.

Keterbatasan penelitian ini meliputi pengujian yang dilakukan pada satu tipe motor dan pompa spesifik, sehingga generalisasi hasil perlu validasi lebih lanjut pada berbagai konfigurasi sistem. Pengujian juga dilakukan pada lingkungan laboratorium terkontrol, sementara kondisi lapangan mungkin memiliki gangguan dan variabilitas yang lebih kompleks. Penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi optimasi parameter *fuzzy* menggunakan algoritma metaheuristik seperti *Genetic Algorithm* atau *Particle Swarm Optimization* untuk memperoleh basis aturan yang lebih optimal, serta implementasi *adaptive fuzzy logic* yang dapat menyesuaikan fungsi keanggotaan secara *real-time* berdasarkan kondisi operasi.

5. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kendali kecepatan motor induksi satu fasa pada pompa submersible menggunakan Fuzzy Logic Controller dengan hasil yang sangat memuaskan. Berdasarkan pengujian komprehensif melalui simulasi dan eksperimen, FLC terbukti superior dibandingkan kontroler PID konvensional dengan rise time 38,58% lebih cepat, settling time 40,64% lebih singkat, overshoot 61,89% lebih rendah, dan steady-state error 74,49% lebih kecil pada berbagai setpoint kecepatan. Kemampuan rejection terhadap gangguan beban menunjukkan FLC mampu meredam deviasi kecepatan hingga 42,04% lebih baik dengan waktu pemulihan 51,45% lebih cepat pada gangguan 75% beban nominal.

Efisiensi energi sistem dengan FLC mencapai rata-rata tertimbang 67,55% dibanding 62,70% untuk PID, dengan penghematan paling signifikan 12,98% pada beban parsial 25%. Untuk operasi pompa domestik rata-rata pada beban 40%, penghematan energi bulanan mencapai 73,92 kWh atau 11,5% pengurangan biaya operasional. FLC juga menghasilkan power factor 3,45% lebih tinggi dan THD arus 27,06% lebih rendah, berkontribusi positif terhadap kualitas sistem distribusi listrik. Robustness sistem terhadap variasi parameter sangat baik, dimana pada kondisi ekstrem dengan peningkatan resistansi 20% dan penurunan tegangan 10%, degradasi performa FLC jauh lebih rendah dibandingkan PID. Validasi model simulasi menghasilkan MAPE 4,25% dan R-squared 0,973, menunjukkan akurasi prediksi yang sangat baik.

Keterbatasan penelitian meliputi pengujian pada satu tipe motor-pompa spesifik 0,75 kW dalam lingkungan laboratorium terkontrol, basis aturan fuzzy yang belum dioptimasi secara



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

matematis, dan durasi pengujian yang belum mencakup keandalan jangka panjang ribuan jam operasi. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengoptimasi parameter fuzzy menggunakan algoritma metaheuristik, mengembangkan adaptive fuzzy logic dan sensorless speed control, validasi pada berbagai rating daya motor, serta studi keandalan jangka panjang minimal 2000 jam operasi. Analisis life cycle cost yang komprehensif juga diperlukan untuk justifikasi ekonomi yang lebih lengkap.

Kontribusi penelitian ini sangat relevan untuk program efisiensi energi nasional, terutama sektor domestik dan pertanian. Adopsi teknologi ini secara luas berpotensi menghemat ratusan Gigawatt-jam energi per tahun, berkontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi karbon dan ketahanan energi nasional, sekaligus memperkaya literatur aplikasi kecerdasan buatan pada sistem kontrol motor induksi satu fasa.

REFERENSI

- [1] Ahmad, S., Rahman, M. F., & Iqbal, A. (2022). Mathematical modeling and performance analysis of single-phase induction motor for variable speed applications. *Electric Power Components and Systems*, 50(6-7), 351-363. <https://doi.org/10.1080/15325008.2022.2135644>
- [2] Ashari, M., & Wahyudi, S. (2020). Fuzzy logic control implementation for speed control of single phase induction motor. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 11(2), 943-950. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i2.pp943-950>
- [3] Bist, V., & Singh, B. (2020). An adjustable speed PFC bridgeless buck-boost converter fed BLDC motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(4), 2665-2677. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2913780>
- [4] Chen, X., Wang, L., & Zhang, Y. (2023). Adaptive neuro-fuzzy inference system for motor speed control in pump applications. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 44(3), 4127-4141. <https://doi.org/10.3233/JIFS-221847>
- [5] Deng, W., Zhao, H., Yang, X., Xiong, J., Sun, M., & Li, B. (2022). Study on an improved adaptive PSO algorithm for solving multi-objective gate assignment. *Applied Soft Computing*, 59, 288-302. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.004>
- [6] Hannan, M. A., Ali, J. A., Mohamed, A., & Hussain, A. (2021). Optimization techniques to enhance the performance of induction motor drives: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1611-1626. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.240>
- [7] Hassan, M. A., Abido, M. A., & Bakhashwain, J. M. (2020). Fuzzy logic controller for speed control of permanent magnet synchronous motor drive. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 15(5), 2169-2178. <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00502-9>
- [8] Ibrahim, H. E., Hassan, F. N., & Shomer, A. O. (2021). Optimal PID control of a brushless DC motor using PSO and BF techniques. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(2), 391-398. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.09.013>
- [9] Jena, K., Swain, S., & Mishra, S. K. (2023). Comparative analysis of different intelligent controllers for speed control of induction motor drive. *Materials Today: Proceedings*, 74, 891- 897. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.226>



- [10] Khadar, S. A., & Khatoon, S. (2022). Application of soft computing techniques in induction motor: A review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 2576-2583. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.071>
- [11] Kumar, A., & Singh, B. (2021). Performance analysis of single phase induction motor drive with V/f control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(4), 3845-3854. <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3076262>
- [12] Kumar, R., & Das, S. (2023). Fuzzy logic based speed control of DC motor using ARM controller. *Advances in Engineering Software*, 138, 102741. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.102741>
- [13] Li, X., Wang, H., & Zhang, Q. (2023). Energy saving analysis of variable speed pumping systems with quadratic load characteristics. *Energy Engineering*, 120(3), 567-582. <https://doi.org/10.32604/ee.2023.025647>
- [14] Liu, Y., Wang, Z., & Chen, J. (2022). Design and implementation of fuzzy-PID controller for brushless DC motor. *Journal of Control Science and Engineering*, 2022, Article ID 8954712. <https://doi.org/10.1155/2022/8954712>
- [15] Mehedi, I. M., Al-Saggaf, U. M., Mansouri, R., & Bettayeb, M. (2020). Two degrees of freedom fractional controller design: Application to the ball and beam system. *Measurement*, 150, 107072. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107072>
- [16] Nguyen, T. H., Le, K. M., & Pham, D. T. (2024). Comparative study of fuzzy logic and PID controllers for induction motor speed control. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 19(1), 287-298. <https://doi.org/10.1007/s42835-023-01642-5>
- [17] Ouanjli, N. E., Motahhir, S., Derouich, A., El Ghzizal, A., Chebabhi, A., & Taoussi, M. (2021). Improved DTC strategy of doubly fed induction motor using fuzzy logic controller. *Energy Reports*, 5, 271-279. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.02.001>