

Perancangan Sistem Kontrol Berbasis Fuzzy-PID untuk Pengendali Motor Induksi Penggerak Konveyor Batubara pada PLTU

Ravi Andika Pramulya, Muhammad Daud*, Rosdiana, Ezwarsyah, Raihan Putri

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh

Jalan Batam, Kampus UNIMAL Bukit Indah, Blang Pulo, Kec. Muara Satu, Lhokseumawe 24355

Received: 16-01-2026

Accepted: 21-05-2026

Keywords:

Motor Induksi;
Sistem Kontrol;
Fuzzy-PID;
Konveyor Batubara;
Simulink MATLAB.

Correspondent Email:

mdaud@unimal.ac.id

Abstrak. Motor induksi tiga fasa banyak digunakan sebagai penggerak konveyor batubara pada coal feeder PLTU karena konstruksinya yang sederhana dan andal. Namun, karakteristik nonlinier motor induksi menyebabkan kecepatan motor sulit dipertahankan konstan saat terjadi perubahan beban, sehingga mengganggu kestabilan aliran batubara dan menurunkan efisiensi pembakaran. Oleh karena itu, diperlukan sistem kendali yang mampu menjaga kestabilan kecepatan motor secara adaptif. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja pengendalian kecepatan motor induksi menggunakan metode Fuzzy-PID dan membandingkannya dengan PID konvensional. Metode penelitian dilakukan melalui pemodelan matematis motor induksi, perancangan pengendali Fuzzy-PID berbasis aturan Mamdani, dan tuning kendali secara manual dengan mengevaluasi grafik respon dari parameter K_p , K_i dan K_d . Pengujian dilakukan pada kondisi setpoint konstan, perubahan setpoint, dan variasi beban. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali Fuzzy-PID mampu memberikan respon yang lebih baik dengan rise time dalam waktu 0.5 detik, overshoot sebesar 0,8% dan undershoot dibawah 1%, serta kestabilan arus yang lebih baik dibandingkan PID konvensional. Dengan demikian, metode Fuzzy-PID terbukti lebih efektif dalam menjaga kestabilan kecepatan motor induksi dan meningkatkan keandalan sistem konveyor batubara di PLTU.

Abstract. Three-phase induction motors are widely used as coal conveyor drives in coal feeder systems at steam power plants due to their simple construction and high reliability. However, the nonlinear characteristics of induction motors make it difficult to maintain a constant motor speed when load changes occur, which can disrupt coal flow stability and reduce combustion efficiency. Therefore, a control system capable of adaptively maintaining motor speed stability is required. This study aims to analyze the performance of induction motor speed control using the Fuzzy-PID method and compare it with conventional PID control. The research method involves mathematical modeling of the induction motor, designing a Mamdani-based Fuzzy-PID controller, and manually tuning the controller by evaluating the response graphs of the K_p , K_i , and K_d parameters. Testing was carried out under constant setpoint conditions, setpoint changes, and load variations. The simulation results show that the Fuzzy-PID controller provides better performance, with a rise time of 0.5 seconds, an overshoot of 0.8%, an undershoot below 1%, and better current stability compared to the conventional PID controller. Therefore, the Fuzzy-PID method is proven to be more effective in maintaining induction motor speed stability and improving the reliability of coal conveyor systems in steam power plants.

1. PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa banyak diaplikasikan di sektor industri karena memiliki struktur yang sederhana, kebutuhan perawatan yang relatif kecil, serta tingkat keandalan operasi yang tinggi [1]. Lebih dari 65% konsumsi energi listrik di sektor industri digunakan oleh motor listrik, termasuk motor induksi. Dalam konteks Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), motor induksi banyak diaplikasikan sebagai penggerak utama konveyor batubara, salah satunya pada sistem coal feeder yang berfungsi menyalurkan batubara menuju ruang bakar boiler[2].

Meskipun demikian, motor induksi memiliki karakteristik yang bersifat nonlinier, sehingga sulit mempertahankan kecepatan konstan ketika terjadi perubahan beban [2]. Hal ini menjadi permasalahan serius, terutama dalam pengoperasian konveyor batubara di PLTU, karena fluktuasi kecepatan motor akan memengaruhi kestabilan aliran batubara ke furnace dan pada akhirnya berdampak pada efisiensi proses pembakaran[3]. Untuk itu, diperlukan sistem kontrol yang andal agar kecepatan motor induksi tetap stabil meskipun beban bervariasi [4].

Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan metode PID konvensional untuk pengendalian kecepatan motor induksi karena memiliki struktur yang sederhana dan mudah diimplementasikan. Namun, pengendali PID memiliki keterbatasan dalam menangani sistem nonlinier dan perubahan beban yang dinamis, sehingga respon sistem sering mengalami overshoot, undershoot, maupun waktu penstabilan yang relatif lama. Untuk mengatasi kelemahan tersebut, metode logika fuzzy mulai dikombinasikan dengan PID guna meningkatkan kemampuan adaptasi sistem terhadap perubahan kondisi operasi. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa metode Fuzzy-PID mampu memperbaiki performa respon transien dan meningkatkan kestabilan kecepatan motor dibandingkan PID konvensional. Akan tetapi, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada pengujian umum motor induksi dan belum secara spesifik mengkaji integrasi Fuzzy-PID dengan Variable Frequency Drive (VFD) pada aplikasi coal feeder PLTU yang memiliki karakteristik beban berubah-ubah secara kontinu. Selain itu, analisis terkait kestabilan

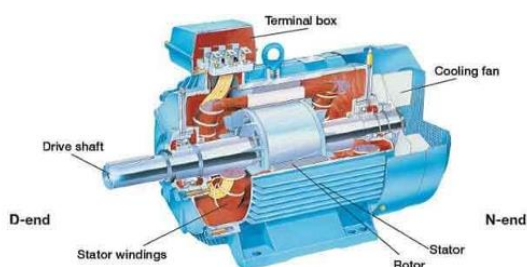
arus motor akibat perubahan beban pada sistem konveyor batubara juga masih terbatas.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini menawarkan penerapan metode Fuzzy-PID berbasis aturan Mamdani yang diintegrasikan dengan Variable Frequency Drive (VFD) pada sistem coal feeder PLTU. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada kemampuan sistem kendali dalam menyesuaikan parameter PID secara adaptif terhadap perubahan beban, sehingga kestabilan kecepatan dan arus motor dapat dipertahankan dengan lebih baik dibandingkan metode PID konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan motor induksi tiga fasa pada sistem konveyor batubara, merancang VFD yang sesuai dengan karakteristik coal feeder, menyusun aturan fuzzy sebagai penentu aksi kendali PID, serta menganalisis respon sistem berdasarkan parameter rise time, overshoot, undershoot, settling time, dan kestabilan arus motor[5]. Hasil yang diharapkan adalah diperolehnya metode kendali yang lebih adaptif dan efektif guna meningkatkan kestabilan aliran batubara serta mendukung efisiensi pembakaran di PLTU.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor arus bolak-balik yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, yaitu rotor tidak memperoleh energi listrik secara langsung melalui konduksi, melainkan melalui induksi dari medan magnet berputar pada stator, sehingga menghasilkan torsi keunggulan motor induksi terletak pada konstruksinya yang sederhana, kuat, biaya perawatan yang rendah, serta memiliki karakteristik kerja dan efisiensi yang baik, meskipun kinerjanya sangat dipengaruhi oleh kestabilan tegangan suplai dan perubahan beban selama pengoperasian[6]. Arus yang dihasilkan rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar yang dihasilkan oleh arus stator[7]. Bentuk penampang dari motor induksi diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Motor Induksi

2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi

Motor induksi tiga fasa bekerja berdasarkan medan magnet berputar yang dihasilkan oleh arus listrik tiga fasa pada belitan stator yang terpasang dengan sudut 120° . Medan magnet berputar ini menginduksi arus pada rotor sehingga terbentuk medan magnet rotor[8]. Interaksi antara medan magnet stator dan rotor menghasilkan torsi yang menyebabkan rotor berputar dan menghasilkan energi mekanik pada poros motor.

Pada motor induksi tiga fasa, nilai kecepatan putar ditentukan oleh frekuensi tegangan masukan dan konfigurasi jumlah kutub stator, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan (1).

$$N_s = \frac{120}{p} \cdot f \quad (1)$$

Keterangan:

- N_s = Kecepatan sinkron motor (rpm)
- f = Frekuensi (Hz)
- p = Jumlah kutub (Pole)

Perbedaan antara kecepatan rotor dan kecepatan sinkron dikenal sebagai slip. Besaran slip dapat dinyatakan dalam satuan putaran per menit, namun pada umumnya dinyatakan dalam bentuk persentase terhadap kecepatan sinkron [4]. Nilai slip tersebut dirumuskan pada Persamaan (2).

$$Slip = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

- Slip = Selisih kecepatan medan stator dengan motor (%)
- N_s = Kecepatan Sinkron (rpm)
- N_r = Kecepatan Rotor (rpm)

Torsi pada motor induksi sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya slip. Semakin

besar slip, maka arus rotor yang terinduksi juga semakin besar, sehingga torsi yang dihasilkan pun meningkat. Setelah motor mencapai kecepatan mendekati kecepatan sinkron, slip menjadi kecil dan torsi menjadi stabil sesuai beban. Untuk menghitung torsi pada motor dapat dilihat pada persamaan (3).

$$T = \frac{P}{\omega_s} \quad (3)$$

Keterangan:

- T = Torsi motor (Nm)
- P = Daya Motor (W)
- ω_s = Kecepatan sudut (rad/det)

Sebelum menghitung torsi motor induksi dengan persamaan 4, terlebih dahulu perlu diketahui besarnya daya motor yang dihasilkan. Besarnya daya motor P pada persamaan (4) dapat ditentukan melalui persamaan berikut.

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \quad (4)$$

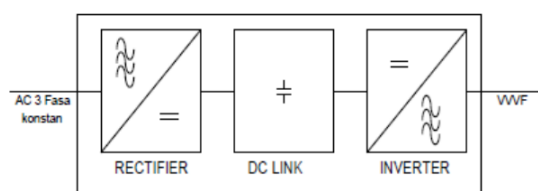
Keterangan:

- P = Daya aktif (Watt)
- V = Tegangan (V)
- I = Arus (A)
- $\cos\phi$ = Faktor Daya

Persamaan (4) menunjukkan bahwa daya aktif yang dihasilkan motor dipengaruhi oleh besar tegangan, arus, serta faktor daya. Dengan menggabungkan persamaan tersebut ke dalam persamaan torsi, maka perhitungan torsi motor induksi tidak hanya bergantung pada kecepatan sudut sinkron, tetapi juga dapat dianalisis berdasarkan besarnya daya listrik yang diserap motor dari sumber tiga fasa.

2.3 Inverter Tiga Fasa

Inverter merupakan perangkat yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor listrik AC dengan mengatur frekuensi daya yang disuplai ke motor. Melalui proses konversi frekuensi dari jaringan listrik ke frekuensi yang sesuai dengan kebutuhan motor, inverter memungkinkan pengaturan kecepatan motor induksi secara fleksibel dan cepat[9]. Secara umum, inverter memiliki dua fungsi utama, yaitu mengonversi frekuensi listrik dan mengendalikan frekuensi keluaran sesuai dengan kebutuhan pengoperasian motor.



Gambar 2. Prinsip Kerja Inverter

Berdasarkan Gambar 2, diagram blok tersebut menunjukkan prinsip kerja inverter pada motor induksi tiga fasa. Tegangan AC dari jala-jala 220/380 V dengan frekuensi 50 Hz terlebih dahulu disearahkan oleh rangkaian penyearah menjadi tegangan DC, yang pada penyearah terkendali dapat diatur nilainya[10]. Tegangan DC kemudian distabilkan pada DC link menggunakan kapasitor dan induktor. Selanjutnya, tegangan DC diubah kembali menjadi tegangan AC oleh rangkaian inverter dengan frekuensi dan tegangan yang dapat diatur sesuai kebutuhan motor [11].

2.4 Kendali PID

Sistem kendali PID (Proportional–Integral–Derivative) digunakan sebagai pengendali umpan balik guna meningkatkan akurasi pengaturan dan kestabilan respons pada sistem instrumentasi.[12] Pengendali ini terdiri dari aksi proporsional, integral, dan derivatif yang berfungsi memproses error antara nilai keluaran dan referensi, sehingga sistem mampu mencapai performa sesuai target yang ditetapkan [13].

Pengendali proporsional (P) berfungsi mempercepat respon sistem terhadap error, pengendali integral (I) digunakan untuk mengurangi *steady-state error*, sedangkan pengendali derivatif (D) membantu memperbaiki kestabilan sistem dengan meredam perubahan error yang terlalu cepat. Kombinasi ketiga aksi tersebut memungkinkan sistem memperoleh respon yang lebih cepat dan stabil dibandingkan penggunaan satu jenis pengendali saja [5].

Meskipun PID konvensional banyak digunakan karena struktur pengendalian yang sederhana dan mudah diimplementasikan, metode ini memiliki kelemahan pada sistem yang bersifat nonlinier dan dinamis, seperti motor induksi pada coal feeder PLTU. Nilai parameter PID yang tetap menyebabkan performa kontrol menurun ketika terjadi perubahan beban secara tiba-tiba. Kondisi

tersebut dapat menimbulkan overshoot, undershoot, serta waktu penstabilan yang lebih lama, sehingga kestabilan kecepatan motor sulit dipertahankan. Oleh karena itu, diperlukan metode pengendalian yang mampu menyesuaikan parameter kontrol secara adaptif terhadap perubahan kondisi operasi.

2.5 Fuzzy Logic

Logika fuzzy adalah metode kontrol cerdas yang menangani ketidakpastian dan data *continuous* dengan menggunakan derajat keanggotaan antara 0 dan 1, sehingga memungkinkan sistem membuat keputusan berdasarkan aturan *if–then* yang mirip dengan penalaran manusia tanpa memerlukan model matematis yang rumit [14]. Pendekatan ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi kontrol, misalnya untuk memperbaiki performa pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa, di mana logika fuzzy mampu memperkecil lonjakan dan meningkatkan respon sistem dibandingkan kontrol konvensional.

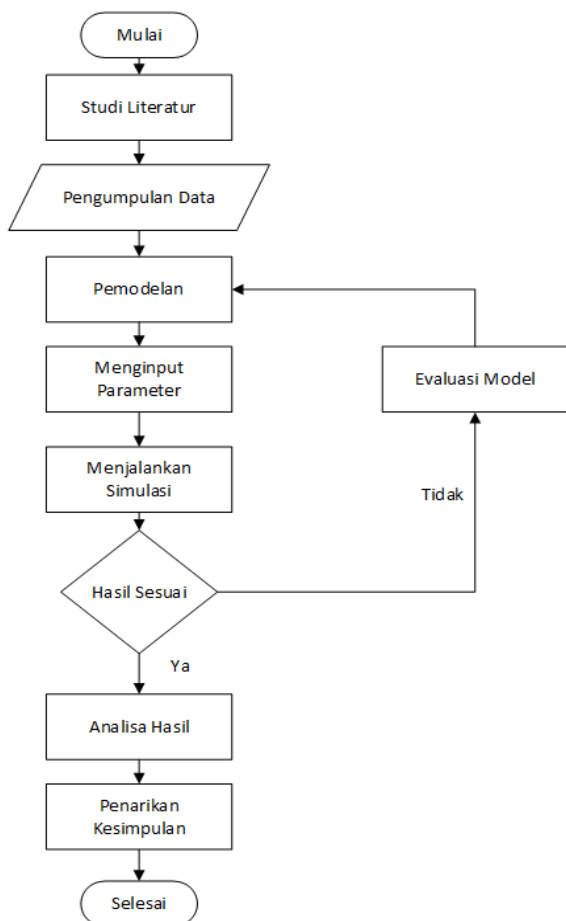
Dalam implementasinya, logika fuzzy direalisasikan melalui *Fuzzy Inference System* (FIS), yaitu kerangka kerja yang memproses input numerik (*crisp*) menjadi output berbasis aturan fuzzy *IF–THEN* [15]. Struktur dasar FIS terdiri dari empat komponen utama, yaitu:

1. Fuzzification yaitu mengubah input berupa nilai *crisp* menjadi nilai fuzzy melalui fungsi keanggotaan.
2. Rule Base yang berisi aturan *jika–maka* yang mendefinisikan hubungan antara variabel input dan output.
3. Inference Engine yaitu proses penalaran dengan menggunakan aturan-aturan fuzzy untuk menghasilkan keputusan sementara.
4. Defuzzification mengubah hasil keluaran fuzzy menjadi nilai *crisp* yang bisa digunakan sebagai output nyata sistem.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

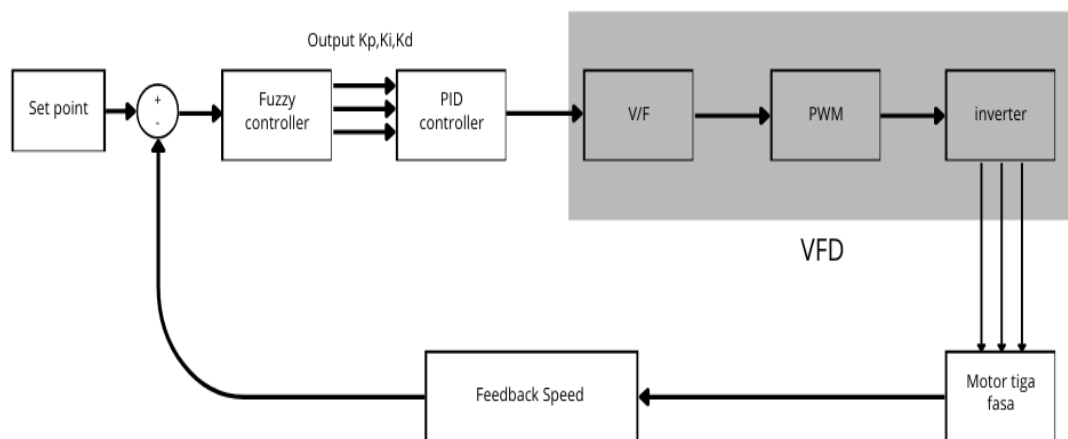
Tahapan penelitian yang telah ditempuh dapat disajikan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

3.2 Perancangan Sistem

Adapun alir rancangan sistem yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagaimana disajikan pada Gambar 4. Pada tersebut ditunjukkan bahwa sistem kendali motor induksi bekerja secara loop tertutup, di mana kecepatan motor terus dipantau dan dibandingkan dengan nilai set point. Selisih antara set point dan kecepatan aktual menghasilkan error yang digunakan oleh fuzzy controller untuk menyesuaikan parameter K_p , K_i , dan K_d pada PID secara adaptif. Selanjutnya, sinyal keluaran PID diproses oleh blok V/F control untuk menjaga rasio tegangan dan frekuensi agar torsi motor tetap stabil. Output V/F control diteruskan ke inverter tiga fasa yang menghasilkan tegangan AC tiga fasa untuk menggerakkan motor induksi. Kecepatan motor kemudian dikirim kembali sebagai feedback sehingga sistem dapat melakukan koreksi secara terus-menerus. Kombinasi Fuzzy-PID membuat respon sistem lebih stabil, halus, dan mampu beradaptasi terhadap perubahan beban. Secara umum efek kendali PID dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 4 Diagram Blok Sistem Kendali Fuzzy-PID

Tabel 1. Efek Kendali PID

Respon Closeloop	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady-State Error
Proporsional	Menurunkan	Meningkatkan	Perubahan Kecil	Menurunkan
Integral	Menurunkan	Meningkatkan	Meningkatkan	Mengeleminasi
Derivative	Perubahan Kecil	Menurunkan	Menurunkan	Perubahan Kecil

3.2 Pengumpulan Data

Pada tahap ini, data dan spesifikasi sistem yang digunakan diperoleh langsung dari konveyor batubara pada *Coal Feeder* Unit 1 di PLTU. Data tersebut menjadi acuan utama dalam pemodelan simulasi agar hasil yang diperoleh dapat merepresentasikan kondisi operasi nyata. Parameter yang dikumpulkan mencakup data motor induksi tiga fasa sebagai aktuator utama, inverter sebagai pengatur suplai daya. Pada Tabel 2 adalah spesifikasi motor induksi yang akan digunakan dalam perancangan simulasi.

Tabel 2. Spesifikasi Motor Induksi

Parameter	Value
Power	3kW / 5HP
Phase	3 Phase
Speed	1430 r/min
Frequency	50 Hz
Current	6.8 A
Voltage	380V
Power Factor	0.88
Effeciency	84.6%
Stator Resistance	1.383 Ω
Rotor Resistance	0.6258 Ω
Stator Inductance	16.42 mH
Rotor Inductance	5.473mH
Mutual Inductance	0.05 H
Inertia	0.05 kg·m ²
Friction Factor	0.00589 N·m·s
Pole Pair	4

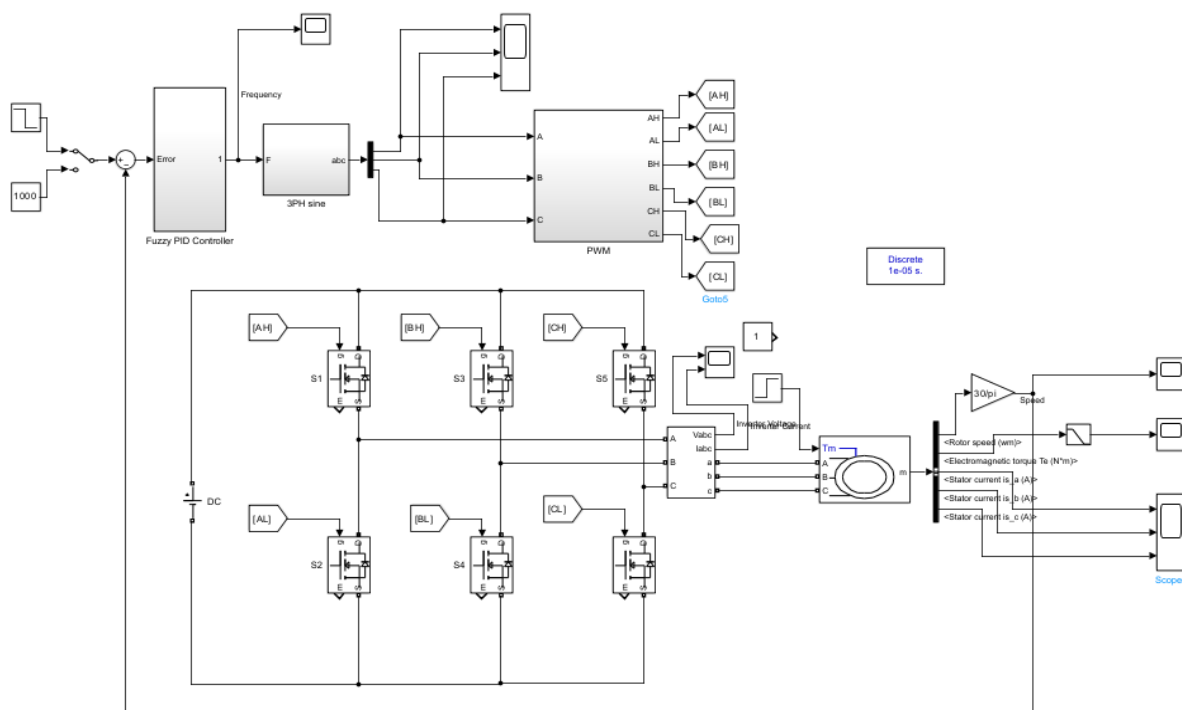
Adapun pada Tabel 3 adalah spesifikasi inverter yang terpasang pada konveyor batubara pada *Coal Feeder* Unit 1 adalah sebagai berikut.

Tabel 3. Spesifikasi Inverter

Parameter	Value
Phase	3 Phase
Voltage input / output	380 / 500 V
Current Input	8.9 A
Current Output	5.5 A
Frequency Input	50 / 60 Hz
Frequency Output	0.5 / 500 Hz

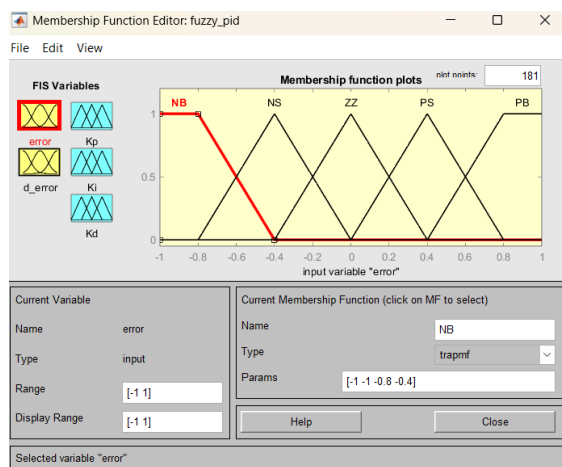
3.3 Perancangan Sistem

Simulasi pada Gambar 5 dimulai dari masukan set point kecepatan yang dibandingkan dengan kecepatan aktual motor untuk menghasilkan error. Nilai error ini diproses oleh Fuzzy-PID yang berfungsi mengatur frekuensi referensi agar sesuai dengan kebutuhan sistem [5]. Frekuensi yang dihasilkan kemudian masuk ke blok V/f untuk menjaga rasio tegangan terhadap frekuensi tetap konstan, sehingga motor tetap beroperasi dalam kondisi optimal [14]. Selanjutnya, sinyal tegangan tiga fasa dibentuk melalui blok generator sinusoidal (sine A, sine B, dan sine C) yang menjadi masukan bagi motor induksi.

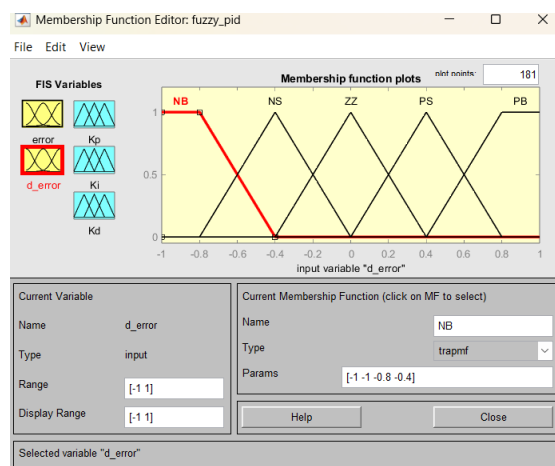


Gambar 5. Rangkaian Simulasi Kendali Fuzzy-PID

Pada simulasi kendali Fuzzy-PID, selisih antara nilai setpoint dan variabel proses menghasilkan sinyal *error* (*e*) yang digunakan sebagai input pertama pada sistem fuzzy. Selanjutnya, perubahan error terhadap waktu atau selisih antara error saat ini dan error sebelumnya membentuk sinyal *delta error* (Δ) yang digunakan sebagai input kedua. Untuk input *error* dan *delta error* dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.

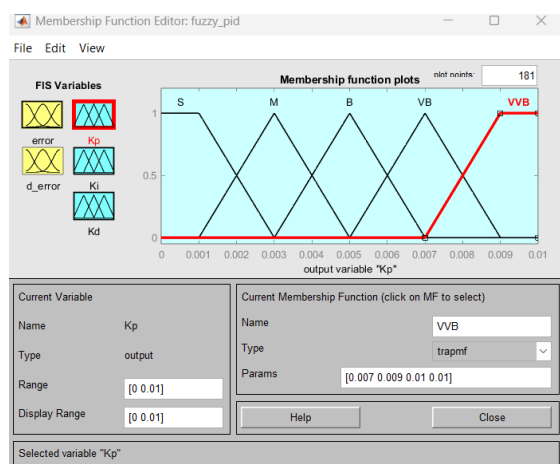


Gambar 6. Fungsi keanggotaan input error

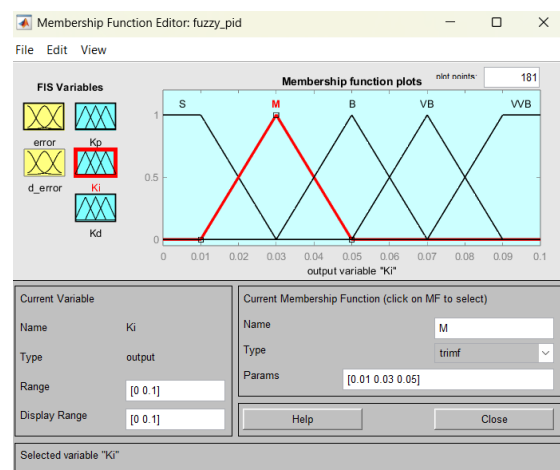


Gambar 7. Fungsi keanggotaan input delta error

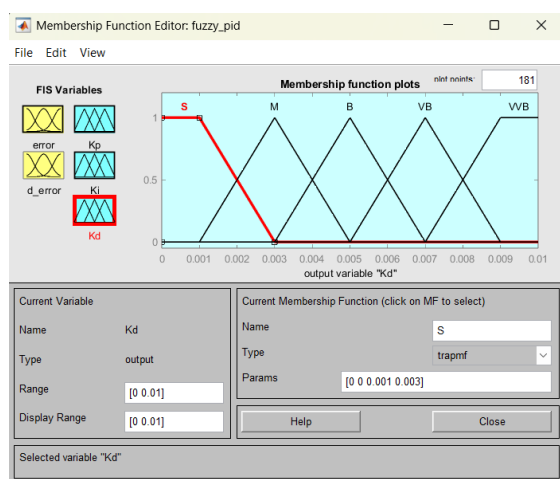
Metode defuzzifikasi yang digunakan adalah metode centroid yang akan menghitung output dengan mencari titik pusat dari kurva fuzzy sehingga hasilnya akan merepresentasikan nilai rata-rata dari seluruh daerah fuzzy [16]. Pada Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10 adalah fungsi keanggotaan dari output fuzzy.



Gambar 8. Fungsi keanggotaan output kp



Gambar 9 Fungsi keanggotaan output ki



Gambar 10. Fungsi keanggotaan output kd

Selanjutnya, rule base disusun untuk menghasilkan respon plant yang stabil dengan error steady-state minimal. Penyusunannya menggunakan pendekatan heuristik yang sederhana namun efektif, sehingga kontrol yang

dirancang diharapkan mampu meningkatkan kestabilan dan kinerja sistem secara keseluruhan [3]. Rule base untuk parameter Kp, Ki, dan Kd ditunjukkan pada Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 6.

Tabel 4. Rule base fuzzy kp

E	NB	NS	ZZ	PS	PB
DE					
NB	S	S	M	B	B
NS	S	M	M	B	VB
ZZ	M	M	B	VB	VB
PS	B	B	VB	VB	VVB
PB	B	VB	VB	VVB	VVB

Tabel 5. Rule base fuzzy ki

E	NB	NS	ZZ	PS	PB
DE					
NB	S	S	M	B	B
NS	S	M	M	B	VB
ZZ	M	M	B	VB	VB
PS	B	B	VB	VB	VVB
PB	B	VB	VB	VVB	VVB

Tabel 6. Rule base kd

E	NB	NS	ZZ	PS	PB
DE					
NB	M	M	VVB	B	S
NS	M	VB	VVB	B	S
ZZ	M	VB	VVB	B	S
PS	M	VB	VVB	B	S
PB	M	VB	VVB	B	S

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Nilai Torsi Mekanik

Pada penelitian ini digunakan variasi torsi mekanik antara 5 Nm hingga 25 Nm, dimana nilai tersebut merepresentasikan torsi maksimum yang dapat dicapai motor induksi. Penentuan nilai torsi mekanik maksimum (T_m) yang dimasukkan ke dalam simulasi harus disesuaikan dengan spesifikasi motor induksi yang digunakan. Untuk memperoleh nilai torsi maksimum tersebut, dapat dihitung menggunakan Persamaan (1) sebagai berikut.

$$n_s = 60 \times \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120}{p} f$$

$$n_s = \frac{120}{4} \times 50 = 1500 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = 1500 \times \frac{2\pi}{60} = 157 \text{ rad/s}$$

Maka dengan menggunakan persamaan (3) Sesuai dengan Tabel 2 nilai torsi pada motor adalah sebagai berikut:

$$T = \frac{P}{\omega_s}$$

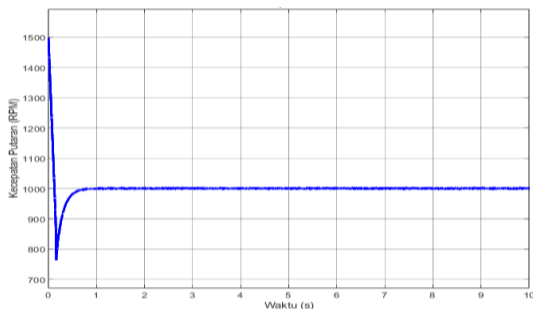
$$T = \frac{3025}{157} = 20,06 \text{ N.m} \approx 20 \text{ N.m}$$

4.2 Pengujian dan Analisa

Simulasi dijalankan dengan dua skenario, yaitu pengaturan setpoint konstan dan perubahan setpoint, serta ditambahkan variasi beban torsi untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menghadapi gangguan. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam menjaga kecepatan motor sesuai setpoint, arus stator, serta merespons torsi beban yang diberikan pada motor.

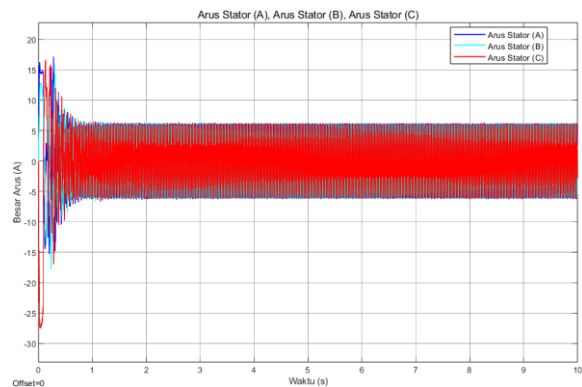
4.2.1 Pengujian dengan Kecepatan Tetap

Pada pengujian ini simulasi dijalankan dengan memberikan *setpoint* kecepatan konstan sebesar 1000 rpm dan tanpa penambahan torsi selama durasi 10 detik. Pengaturan ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mencapai dan mempertahankan kecepatan referensi secara stabil. Berikut adalah hasil pengujian saat simulasi pada setpoint tetap.



Gambar 11. Respon kecepatan kendali Fuzzy-PID motor saat mencapai sepoint

Pada Gambar 11 di atas terlihat respon kecepatan motor terhadap setpoint konstan 1000 rpm. Motor mampu mencapai kecepatan mendekati setpoint dalam waktu sekitar 0,5 detik, yang menunjukkan nilai *rise time* sistem. Setelah itu, pada waktu 1,16 detik, kecepatan sudah stabil dan bertahan di sekitar 1000 rpm tanpa fluktuasi. Selanjutnya untuk melihat arus stator yang dihasilkan pada simulasi dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 12 Respon arus pada saat keadaan tanpa beban

Pada Gambar 12 terlihat arus stator fasa a, b, dan c saat motor mulai dijalankan. Pada awal operasi terjadi lonjakan arus (*inrush current*) hingga sekitar 16,6 A karena kondisi awal motor masih diam. Setelah itu, arus menurun dan stabil pada sekitar detik ke-1,18 dengan nilai 6,1 A, sedikit di atas arus nominal motor sebesar 5,98 A. Hasil ini menunjukkan bahwa motor tanpa beban dapat beroperasi mendekati kondisi nominalnya.

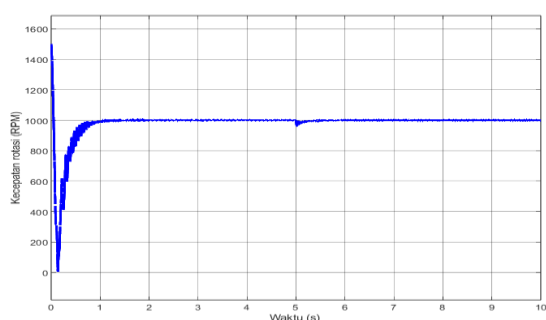
4.2.3 Pengujian dengan Perubahan Torsi

Pada skenario pengujian ini, motor dijalankan dengan setpoint kecepatan konstan sebesar 1000 rpm. Untuk melihat respon sistem terhadap perubahan beban, diberikan tambahan torsi sebesar 10 Nm pada awal pengujian, kemudian ditambahkan lagi 20 Nm pada detik 5. Untuk melihat respon dari kecepatan dapat dilihat pada Gambar 13 dan Gambar 14.

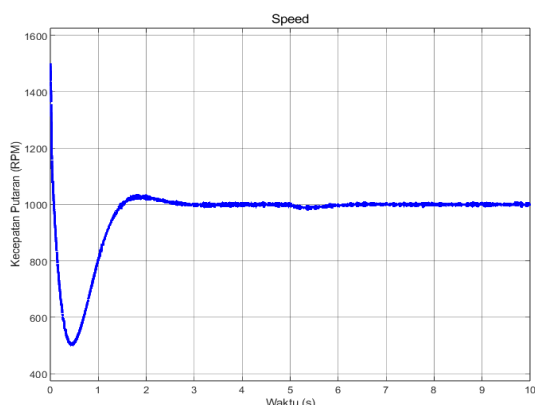
Grafik pada Gambar 13 menunjukkan respon kecepatan motor pada setpoint 1000 rpm dengan *rise time* sekitar 1,1 detik. Pada detik ke-5, penambahan beban 20 Nm menyebabkan penurunan kecepatan hingga 997 rpm, namun sistem kembali stabil pada 1000 rpm dalam waktu singkat, yaitu sekitar 5,16 detik, sehingga

menunjukkan kemampuan kendali yang baik terhadap gangguan beban.

Seperti terlihat pada Gambar 14, kendali PID mengalami overshoot hingga sekitar 1050 rpm saat melewati setpoint 1000 rpm, dengan rise time 1,5 detik dan settling time 3 detik. Pada detik ke-5, diberikan gangguan berupa penambahan beban 20 Nm yang menyebabkan undershoot hingga 980 rpm. Sistem kemudian kembali menuju setpoint dengan rise time sekitar 0,5 detik dan mencapai kondisi stabil pada waktu 7,13 detik dengan kecepatan mendekati 1000 rpm.



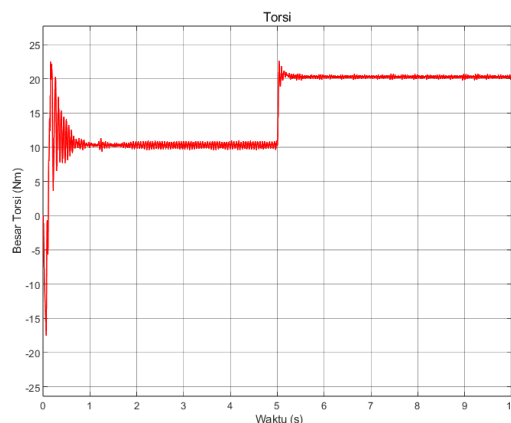
Gambar 13. Respon kecepatan kendali Fuzzy-PID saat mengalami perubahan beban



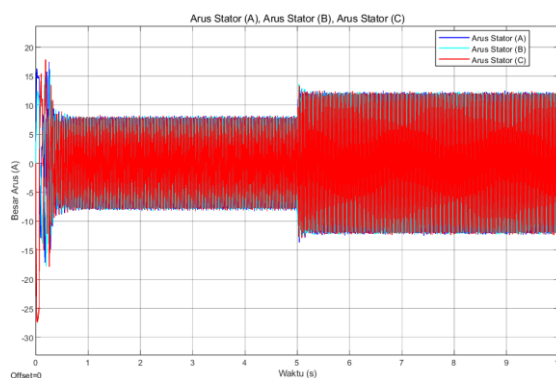
Gambar 14. Respon kecepatan pada kendali PID saat perubahan beban

Adapun respon dari torsi pada saat simulasi dilakukan sebagai berikut. Gambar 15 memperlihatkan respon torsi motor ketika diberikan beban awal sebesar 10 Nm dan ditambahkan lagi 20 Nm pada detik ke-5. Pada kondisi awal, torsi sempat mengalami fluktuasi cukup besar sebelum akhirnya stabil di sekitar 10 Nm. Dari grafik terlihat adanya overshoot dengan nilai puncak mencapai sekitar 22 Nm sebelum perlahan menurun dan stabil. Kemudian pada detik ke-5, ketika torsi

dinaikkan menjadi 20 Nm, respon grafik kembali menunjukkan *overshoot* yang lebih kecil, yaitu sekitar 23 Nm, sebelum akhirnya kembali stabil di sekitar nilai torsi 20 Nm.



Gambar 15. Respon torsi kendali Fuzzy-PID pada saat simulasi



Gambar 16 Respon gelombang arus stator motor saat mengalami perubahan Torsi

Grafik pada Gambar 16 menunjukkan respon arus stator fasa a, b, dan c saat terjadi perubahan torsi beban. Pada awal pengujian, arus mengalami lonjakan transien hingga sekitar 27 A sebelum stabil pada 7,8 A. Ketika torsi beban ditambah pada detik ke-5, amplitudo arus kembali meningkat dan setelah fase transien arus stabil pada nilai 12,7 A Untuk data lengkap perbandingan kendali PID dan Fuzzy-PID dapat dilihat pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Perbandingan Kendali Fuzzy-PID dan PID

Parameter Respon	Kendali PID	Kendali Fuzzy-PID
Overshoot awal	7 %	0,80 %
Rise time awal	1,5 detik	1,1 detik
Settling Time awal	3 detik	1,9 detik
Undershoot saat gangguan	2 %	1 %
Rise Time setelah gangguan	0,5 detik	0,3 detik
Settling Time setelah gangguan	2,13 detik	0,98 detik

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Sistem kendali Fuzzy-PID mampu meningkatkan kestabilan kecepatan motor induksi tiga fasa. Pada setpoint 1000 rpm, motor mencapai kecepatan referensi dalam waktu 0,5 detik dan stabil pada 1,16 detik, menunjukkan respon yang cepat dan stabil.
- Dibandingkan kendali PID konvensional, Fuzzy-PID menghasilkan overshoot yang jauh lebih kecil. Kendali PID mengalami overshoot sekitar 7% dengan rise time 1,5 detik, sedangkan Fuzzy-PID hanya menghasilkan overshoot sekitar 0,8%, sehingga lebih efektif dalam meredam lonjakan respon awal.
- Pada kondisi gangguan berupa penambahan beban, Fuzzy-PID menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam menahan penurunan kecepatan dan mempercepat kestabilan sistem dibandingkan PID konvensional, sehingga lebih sesuai untuk diterapkan pada sistem conveyor batubara di pembangkit listrik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Mery Nur Laili, Muhammad Cahyo Bagaskoro, Langlang Gumilar, Mohamad Rodhi Faiz, and Aripriharta, "Perancangan Kendali Motor Induksi Menggunakan Variable Speed Drive," *JURNAL KAJIAN TEKNIK ELEKTRO*, vol. 8, no. 1, Mar. 2023.
- D. Noviandri and E. Zondra, "Evaluasi Kinerja Motor Coal Feeder di PLTU Tenayan Raya Terhadap Pengaruh Perubahan Frekuensi," *Jurnal Teknik*, vol. 16, no. 1, pp. 88–95, 2022.
- L. Sartika *et al.*, "Analisis Daya Motor Induksi 3 Fasa Penggerak Conveyor 06 di PT. Mitrabara Adiperdana," 2024.
- L. Sartika *et al.*, "Analisis Daya Motor Induksi 3 Fasa Penggerak Conveyor 06 di PT. Mitrabara Adiperdana," 2024.
- A. B. Ashari, M. T. Suprianto, W. Aribowo, A. C. Hermawan, and S. St, "Kontrol Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Metode Field Orientation Control (FOC) Berbasis Fuzzy-PID 763," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 9, pp. 763–771, 2020, [Online]. Available: [Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri\), vol. 5, no. 1, pp. 35–43, 2020.](https://ajibx1.blogspot.com/2013/10/motor-A. Kurnia Pratama, E. Zondra, and H. Yuvendius,)
- M. Saleh Al Amin, N. nurdiana, P. Teknik Elektro, U. A. PGRI Palembang/JI Yani Lrg Gotong Royong, and U. Palembang "Analisis Daya Dan Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Pada Sistem Distribusi Air PDAM Desa Babat," *Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 19, no. 03, pp. 2549–3442, doi: 10.23960/elc.v19n3.2871.
- I Putu Adhe Putra Novantara, I Wayan Ata Wijaya, and I Made Suartika, "Analisis Pengaturan Putaran Motor Induksi 3 Fasa Dengan Mengatur Frekuensi Menggunakan Variable Speed Drive di PT PDAM Tirta Mangutama Kabupaten Bandung," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 8, 2021.
- F. Rahman Maulana, M. Daud, and S. Meliala, "Analisis Kemunculan Harmonisa pada Variable Frequency Drive dan Dampaknya terhadap Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fase," 2024.
- Nugrahanto, Indrawan, Putra Riatma, Galih, Dwi Risdhayanti, and Anindya, "Perancangan Variable Vrekuensi Drive (VFD) Satu Fasa dengan Menggunakan Metode Sinusoida Pulse Width Modulation Berbasis Mikrokontroler," *Jurnal Teknik*

- Elektro dan Informatika*, vol. 17, no. 2, pp. 32–44, 2022.
- [11] A. Akbar, G. Basyar, S. Handoko, and I. Setiawan, “Implementasi Inverter ALTIVAR 12 dan TOSHIBA VFS15 sebagai Pengendalian Kecepatan pada Motor Induksi 3 Fasa Untuk Aplikasi Sistem Konveyor Terkendali,” *TRANSIENT*, vol. 10, no. 1, pp. 2685–0206, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>
- [12] F. M. Wildan, E. A. Hakim, and D. Suhardi, “Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler PID Berbasis Genetic Algorithm,” *Makalah dikirim 26 Februari*, vol. 1, no. 1, pp. 2503–2259, 2016.
- [13] Arun Kumar R and Febin Daya J L, “A Novel Self - Tuning Fuzzy Based PID Controller for Speed Control of Induction Motor Drive,” *International Conference on Control Communication and Computing*, 2013.
- [14] A. A. Muntashir, E. Purwanto, and S. D. Nugraha, “Pengembangan Sugeno Fuzzy Model Dalam Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan V/F Scalar Control,” *PoliGrid*, vol. 1, no. 2, p. 65, Dec. 2020, doi: 10.46964/poligrid.v1i2.379.
- [15] I. Raihan, M. Daud, A. Hasibuan, A. Mardhiah, and G. Kerimzade, “Implementation of Fuzzy Logic to Automatic Flower Irrigation Device Using Matlab,” *Andalasian International Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 137–142, Aug. 2024, doi: 10.25077/aijaset.v4i2.117.
- [16] A. Kurniawan, B. Suprianto, T. Wrahatnob, and N. Kholis, “Analisis Pengendalian Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Fuzzy Logic Control,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 09, pp. 733–740, 2020.