



# Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis Teknik Modulasi Carrier Based Pulse Width Modulation (CBPWM) dengan Kendali Kontroller Fuzzy Logic

Lalu Ishadi Darwinata<sup>\*</sup>, I Ketut Wiryajati, Ida Bagus Fery Citarsa

Fakultas Teknik, Teknik Elektro, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

Email: <sup>1,\*</sup>laluishadidarwinata10@gmail.com, <sup>2</sup>kjatiwirya@unram.ac.id, <sup>3</sup>ferycitarsa@unram.ac.id

Email Penulis Korespondensi: laluishadidarwinata10@gmail.com

**Abstrak**—Seiring dengan peningkatan kemajuan dunia Industri di Indonesia, kebutuhan akan peralatan yang digunakan dalam produksi barang juga mengalami peningkatan. Salah satu peralatan yang penting dalam sebuah industri adalah alat penggerak. Motor listrik merupakan suatu alat penggerak yang sangat berpengaruh besar dalam sistem produksi barang. Oleh karena itu pada paper ini membahas mengenai pengaturan kecepatan motor listrik khususnya motor induksi 3 fasa menggunakan *Carrier Based Pulse Width Modulation* (CBPWM) dengan kendali *Fuzzy Logic* yang dilakukan di Mataram. Respon kecepatan dari sistem akan diperbaiki dengan *Fuzzy Logic Control* (FLC). Hasil dari observasi dibandingkan dengan sistem yang dikontrol oleh kontroller PID. Hasil simulasi dengan simulink menunjukkan bahwa dengan kontroller *Fuzzy Logic* berbasis *Carrier Based Pulse Width Modulation Control* memberikan respon yang lebih baik dari kontroller PID. Hal ini ditunjukkan pada saat terjadi *overshoot* 0%, *rise time* 0.5 detik dan *settling time* 1.5 detik, sedangkan pada kontroller PID saat terjadi *overshoot* 0.4 %, *rise time* 0.7 detik, dan *settling time* 2.5 detik, untuk kecepatan referensi motor 2 rad/detik dan torka beban 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200 Nm. Dari hasil simulasi terbukti menggunakan kontroller *Fuzzy Logic* berbasis *Carrier Based Pulse Width Modulation Control* respon kecepatan motor induksi tiga fasa menjadi lebih baik dibandingkan menggunakan kontroller PID.

**Kata Kunci:** Motor Induksi; Pengendali Kecepatan; CBPWM; Logika Fuzzy

**Abstract**—Along with increasing progress in the industrial world in Indonesia, the need for equipment used in the production of goods has also increased. One of the important equipment in an industry is a driving tool. The electric motor is a driving tool that has a big influence on the goods production system. Therefore, this paper discusses speed regulation of electric motors, especially 3-phase induction motors using Carrier Based Pulse Width Modulation (CBPWM) with Fuzzy Logic control which was carried out in Mataram. The speed response of the system will be improved with Fuzzy Logic Control (FLC). The results of the observations are compared with a system controlled by a PID controller. Simulation results with Simulink show that the Fuzzy Logic controller based on Carrier Based Pulse Width Modulation Control provides a better response than the PID controller. This is shown when there is an overshoot of 0%, a rise time of 0.5 seconds and a setting time of 1.5 seconds, whereas on the PID controller when there is an overshoot of 0.4%, a rise time of 0.7 seconds, and a setting time of 2.5 seconds, for a motor reference speed of 2 rad/second and load torque 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200 Nm. From the simulation results, it is proven that using a Fuzzy Logic controller based on Carrier Based Pulse Width Modulation Control, the speed response of a three-phase induction motor is better than using a PID controller.

**Keywords:** Induction Motor; Speed Controller; CBPWM; Fuzzy Logic

## 1. PENDAHULUAN

Motor induksi sangat banyak digunakan terutama di industri-industri karena memiliki kelebihan, yaitu konstruksi motor yang sederhana dan kokoh (*robust*), harga relatif lebih murah, perawatan lebih mudah dibandingkan dengan jenis motor lainnya, seperti motor dc dan motor sinkron, dan efisiensi yang cukup tinggi karena tidak ada *brushes* (sikat) seperti yang ada pada motor dc sehingga rugi-rugi gesekan berkurang, tetapi mengingat kekurangannya yaitu kecepatan putarnya sulit dikendalikan karena kecepatan tidak dapat divariasikan tanpa mengabaikan efisiensi motor induksi, kecepatan mengalami penurunan seiring penambahan beban. Untuk mengatasi kekurangan tersebut, maka dibutuhkan suatu metode pengendalian.

Pengontrolan kecepatan motor induksi 3 fasa dapat dilakukan melalui torsi atau frekuensi motor. Pengontrolan torsi motor dapat dilakukan melalui tegangan dan frekuensi. Untuk keperluan pengaturan tegangan dan frekuensi biasa digunakan catu daya yang berupa konverter. Untuk itu motor harus dimodelkan dalam koordinat d-q-n.

CBPWM adalah salah satu teknik untuk mengatur penyaklaran dalam inverter. Kontroller dapat dihasilkan dari beberapa metode antara lain PI, PID, *Fuzzy Logic Controller* (FLC) dan *Artificial Neural network* (ANN). Pada penelitian ini digunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) yang dirancang dan digunakan untuk mengatur gerakan kecepatan putar motor induksi sesuai dengan yang dibutuhkan (Hartono et al., 2019).

Pada penelitian Malik Ibrahim dkk 2023 dengan judul “Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Multilevel Inverter dengan Metode *Fuzzy Logic Controller*”, membahas mengenai pengaturan kecepatan motor listrik khususnya motor induksi 3 fasa menggunakan *Neutral Point clamped-multilevel* inverter yang diatur dengan *fuzzy logic controller*. Pengujian yang sudah dilakukan menunjukkan bahwa sistem kontrol fuzzy yang dirancang dapat mengatur kecepatan sesuai dengan set point yang diinginkan serta dapat mempertahankan kecepatan pada nilai tersebut dan juga dapat diketahui bahwa *Fuzzy Logic Controller* (FLC) mampu mengatur kecepatan motor induksi 3 fasa dengan rata-rata error sebesar 1.49% dan dapat mencapai kecepatan yang diinginkan selama 0.36 detik. Akan tetapi harus diperhatikan perbandingan antara beban yang digunakan dan kecepatan, Beban yang kecil tidak dapat berputar pada kecepatan rendah dan beban yang besar tidak dapat berputar pada kecepatan tinggi. Pada pengujian yang



telah dilakukan menunjukkan bahwa sistem kerja motor induksi tidak dimulai pada kecepatan 0 rpm tetapi dimulai dari kecepatan tertingginya yaitu 1500 rpm. Sehingga bisa dikatakan bahwa sistem ini dijalankan ketika motor telah berputar bukan dimulai dari kondisi *starting* motor (Malik Ibrahim et al., 2023).

Penelitian Pranata dkk 2018 dengan judul “Analisis Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Inverter 3 Fasa”, membahas mengenai *Variable speed drive* adalah alat yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi 3 fasa, dengan cara mengatur frekuensi yang akan diberikan kepada motor induksi tiga fasa. Pengaturan frekuensi pada inverter bertujuan untuk melakukan penghematan penggunaan daya dikarenakan pengaturan frekuensi berbanding lurus dengan pengaturan tegangan. Untuk mendapatkan nilai hasil untuk penghematan daya menggunakan inverter, akan dilakukan pengujian pengaturan kecepatan motor menggunakan inverter dengan motor pompa agar debitnya bisa diatur dengan mengatur kecepatan putaran motor, debit yang diatur saat menggunakan inverter dayanya akan dibandingkan dengan pengaturan debit menggunakan *throttle*. Selisih daya yang dibutuhkan untuk mengeluarkan debit yang sama untuk menunjukkan hasil penghematan energi. Pengujian menggunakan *throttle* dengan debit yang keluarannya diatur pada putaran *valve*. Pengaturan debit menggunakan inverter dengan mengatur kecepatan putar motor dengan cara mengatur frekuensinya. Nilai selisih penggunaan daya adalah efisiensi penghematan dayanya. Hasil dari percobaan yang dilakukan, nilai penghematan dayanya didapat sebesar 369,8 kWh/hari (Pranata et al., 2018).

Penelitian Suda dkk 2021 dengan judul “Pengaturan Kecepatan Motor induksi 3 Fasa dengan Menggunakan Pemodelan Sistem (DTC) *Direct Torque Control*”. Salah satu metode pengaturan kecepatan motor induksi yang dikembangkan selain vektor kontrol adalah metode *Direct Torque Control* (DTC). Metode kontrol DTC memungkinkan pengaturan fluks dan torsi secara langsung dan terpisah serta dapat dilakukan dengan vektor menggunakan sensor kecepatan. Estimasi putaran rotor, torsi dan fluks dilakukan oleh DTC yang diberikan masukan tegangan dan arus stator. Untuk mencapai fluks dan torsi yang dikehendaki digunakan estimasi sebagai umpan balik pada sistem kontrol. Pada artikel ini akan disimulasikan pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode DTC, dengan menerapkan metode DTC pada motor induksi 3 fasa menghasilkan respon speed dan torsi yang reliable. Pemodelan diaplikasikan menggunakan fasilitas *Simulink* dan *Power System Blockset* dari MATLAB 6.0 (Suda et al., 2021).

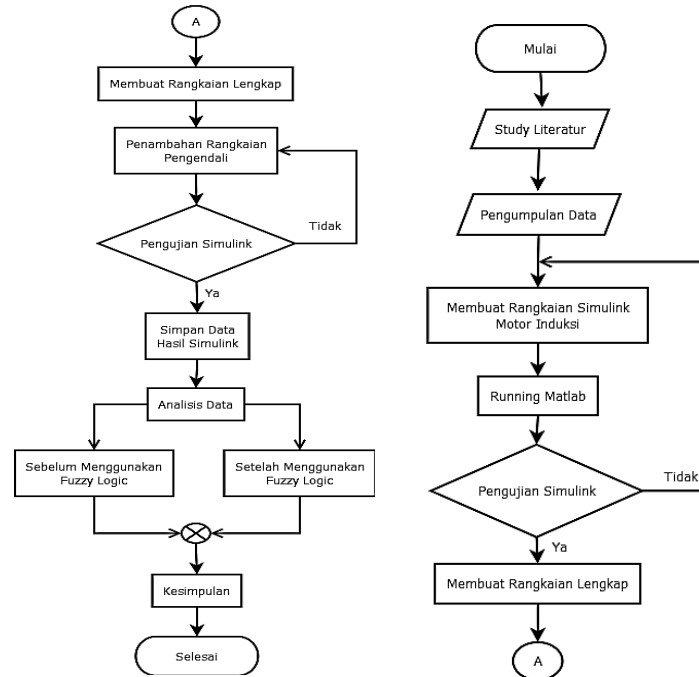
Penelitian Adhe dkk 2021 dengan judul “Analisis Pengaturan Putaran Motor Induksi 3 Fasa dengan Mengatur Frekuensi Menggunakan *Variable Speed Drive* Di PT. PDAM TIRTA MANGUTAMA Kabupaten Badung” memiliki tujuan yaitu untuk mengetahui apa yang menjadi pengaruh terjadinya putaran motor induksi 3 fasa pada saat pengaturan frekuensi terhadap kecepatan dan torsi pada *Variable Speed Drive*, serta pengaruh frekuensi terhadap besaran torsi. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan mengambil data kecepatan putaran yang terukur dengan VSD kemudian dibandingkan dengan hasil analisis perhitungan kecepatan dan torsi. Hasil penelitian berdasarkan pengaturan frekuensi pada Display VSD di PT.PDAM Tirta Mangutama Area Belusung. Hasil dari Pengaturan VSD didapatkan nilai frekuensi sebesar 30 Hz, 35 Hz, 40 Hz dan 45 Hz. Dengan perhitungan yang menggunakan persamaan kecepatan putaran motor terhadap frekuensi maka dibandingkan nilai dalam teoritis senilai 900 rpm dan dari hasil perhitungan menggunakan VSD tidak mempunyai selisih yaitu senilai 900 rpm. Maka dari data tersebut dapat dilihat bahwa data ketika praktik di lapangan mendapatkan hasil yang sama/setara dengan teori sehingga mendapatkan hasil terakhir bahwa kapasitas dari motor induks tersebut dalam kondisi baik (Adhe et al., 2021).

Penelitian Kurnia dkk 2020 dengan judul “Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Metode *Direct Torque Control*”. Pada metode *vector control*, pengaturan kecepatan dapat dilakukan dengan mudah karena sistem dibuat seolah-olah menyerupai karakteristik motor DC, dimana pengaturan fluks dan torsi dapat dilakukan secara terpisah. Sistem pada metode *Direct Torque Control*, didasarkan pada pengaturan fluks dan torsi menggunakan Estimator DTC untuk menghasilkan nilai fluks dan torsi estimasi. Selanjutnya, keluaran dari estimator beserta sektor sudut fluks stator yang akan menentukan vektor tegangan yang sesuai dengan metode *switching Sinusoidal Pulse Width Modulation Inverter*, sehingga keluaran dari inverter dapat mengatur kecepatan putaran motor. Untuk memperbaiki hasil respon kecepatan putaran motor digunakan controller PID. Penelitian ini dilakukan melalui simulasi menggunakan MATLAB. Motor induksi yang digunakan, memiliki daya 4 KW dengan tegangan 400 Vrms dan kecepatan putaran nominal 1430 RPM. Pengujian dilakukan pada kondisi tanpa beban dan juga berbeban untuk mengetahui hasil performansi sistem. Hasil simulasi menunjukkan nilai *rise time* 0,08 detik, nilai *settling time* 0,37 detik, dan nilai *overshoot* mencapai 14,11 % (Kurnia et al., 2020).

Beberapa penelitian terdahulu yang telah diuraikan belum membahas tentang penerapan teknik modulasi *Carrier Based Pulse Width Modulation* (CBPWM) dengan kendali Controller *Fuzzy Logic*. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan nilai putaran kecepatan motor induksi tiga fasa pada saat mengalami perubahan pembebanan menggunakan controller *Fuzzy Logic* dan membandingkan hasil kinerja dengan controller PID.

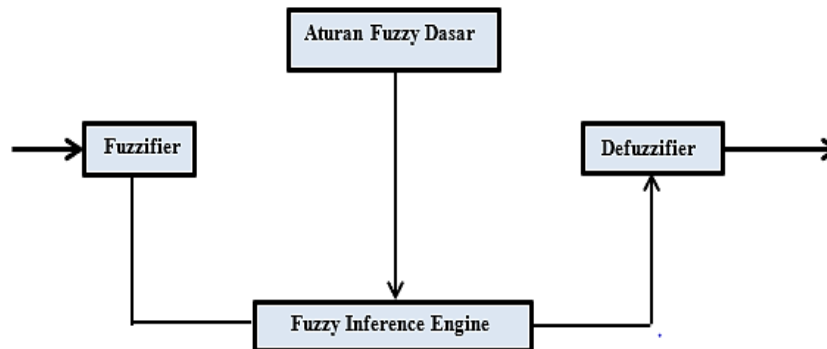
## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah dengan merancang “Pengaturan Motor Induksi Berbasis *Carrier Based PWM* Dengan Kendali *Kontroller Fuzzy Logic*” menggunakan *Simulink Matlab*, dibutuhkan pemahaman konsep yang mendasar. Setelah memahami dasar teori pada penelitian ini, maka akan dilakukan perancangan sistem yang akan digunakan untuk mengatur kecepatan putar motor induksi. Sistem yang dibuat dirancang untuk mengendalikan kecepatan motor induksi dari kecepatan minimal (0) sampai dengan kecepatan maksimum. Penelitian ini untuk mengatur kecepatan, tegangan dan arus motor induksi tiga fasa.



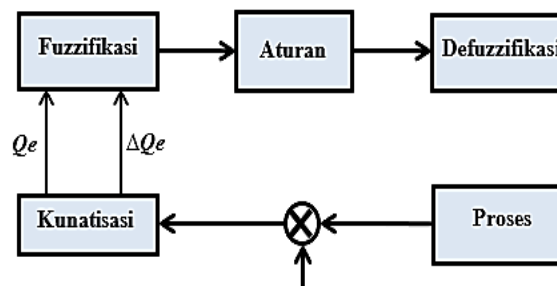
**Gambar 1.** Diagram Alir Penelitian.

Pada Gambar 1 Diagram Alir Penelitian menjelaskan tahapan-tahapan alur penelitian yang dimana dimulai dengan mencari Studi Literatur, pengumpulan data setelah itu dilanjutkan perancangan simulasi pada Simulink Matlab, jika rangkaian dianggap benar dilanjutkan dengan penambahan Kontroller sebelum melakukan penelitian dimana Kontroller yang digunakan adalah *Fuzzy Logic* dan PID.



**Gambar 2.** Konfigurasi Sistem Logika Fuzzy.

Pada Gambar 2 Perancangan pengendali logika *Fuzzy* memiliki struktur dasar umum yang terdiri dari unit fuzzifikasi, mekanisme inferensi *Fuzzy*, basis pengetahuan dan unit defuzzifikasi. Penerapan fuzzifikasi pada suatu sistem pengaturan, besaran suatu masukan yang diperoleh dari *plant* melalui sensor merupakan *crisp* yang sifatnya tidak pasti dan kuantitatif, sedangkan untuk pengolahan data dalam pengaturan logika *Fuzzy* didasarkan pada teori himpunan *Fuzzy* yang menggunakan variabel linguistik yang bersifat *Fuzzy*.



**Gambar 3.** Proses Kuantisasi.

Pada Gambar 3 perancangan pengendali logika *Fuzzy* dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB khususnya *Fuzzy editor*. Metode inferensi yang digunakan adalah MAX-MIN, sedangkan defuzzifikasinya



menggunakan metode *center of area* (COA). Dalam merancang unit pengendali logika *Fuzzy*, yang perlu diperhatikan bahwa masukan unit pengendali *Fuzzy* adalah *error* dan perubahan *error*, yang dinyatakan dengan :

$$e(k) = sp - y(k) \tag{1}$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1) \tag{2}$$

Dimana *sp* dan *y* adalah *setpoint* dari *output* sistem. Sedangkan indeks *k* dan *k-1* adalah urutan kejadian pencuplikan dari data sistem. *Error* (*e*) dan perubahan *error* yang terjadi selama sistem beroperasi kedalam sinyal yang difuzzifikasikan agar dapat menunjukkan pada tingkat keanggotaan. Kemudian proses perubahan sinyal masukan dalam ini *error* dan *delta error* dikuantisasi dahulu untuk dipetakan menjadi *error* yang terkuantisasi (*Qe*) dan perubahan *error* terkuantisasi ( $\Delta Qe$ ) untuk proses selanjutnya.

Level atau tingkat kuantisasi diproses menjadi pengolongan-pengolongan masukan menjadi daerah-daerah diskrit tertentu melalui interpolasi biasa dengan rentang kerja dari -6 sampai dengan 6. Pengatur *Fuzzy* akan menentukan aksi pengendali  $\Delta u$  (perubahan sinyal masukan sistem) dari keadaan sistem berupa kesalahan dan perubahan kesalahan yang merupakan masukan dari unit pengatur *Fuzzy*, secara matematika *u* dapat dinyatakan :

$$\Delta e(k) = F[e(k) - e(k - 1)] \tag{3}$$

Dimana *F* adalah tindakan dari fungsi *Fuzzy* berdasarkan aturan-aturan yang diberikan kepada sistem.

**Tabel 1.** Aturan Dasar Pengkoreksian Berbasis Fuzzy.

<i>e/Δe</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>NVS</i>	<i>ZE</i>
<i>NM</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>NVS</i>	<i>ZE</i>	<i>PVS</i>
<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>NVS</i>	<i>ZE</i>	<i>PVS</i>	<i>PS</i>
<i>ZE</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>NVS</i>	<i>ZE</i>	<i>PVS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>
<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>NVS</i>	<i>ZE</i>	<i>PVS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>PM</i>	<i>NVS</i>	<i>ZE</i>	<i>PVS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
<i>PB</i>	<i>ZE</i>	<i>PVS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>

Pada Tabel 1 memperlihatkan *Output* yang didapatkan setelah penggabungan *Input* Error dan Delta Error, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 1 diatas dan untuk keterangan symbol yang digunakan dijabarkan dibawah. *Fuzzy set* didefinisikan sebagai berikut :

*Z* = Zero.

*PS* = Positive Small.

*PM* = Positive Medium.

*PB* = Positive Big.

*NS* = Negative Small.

*NM* = Negative Medium.

*NB* = Negative Big.

*PVS* = Positive Very Small.

*NVS* = Negative Very Small.

**Tabel 2.** Parameter Motor Induksi.

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1.	Tegangan Motor (V)	389	Volt
2.	Frekuensi (f)	50	Hz
3.	Jumlah Kutub (P)	2	Pasang
4.	Tahanan Stator (Rs)	10	Ohm
5.	Tahanan Rotor (Rr)	6.3	Ohm
6.	Induktansi Stator (Ls)	0.004	Henry
7.	Induktansi Rotor (Lr)	0.004	Henry
8.	Induktansi Mutual (Lm)	0.42	Henry
9.	Momen Inersia (J)	0.01	N.m
10.	Tegangan Motor (P)	5	HP
11.	Arus (A)	1.2	Ampere
12.	Kecepatan (RPM)	1500	RPM

**Tabel 3.** Parameter Saklar Elektronika Daya.

No.	Parameter	Nilai
1.	Igbt Ron	0.001
2.	Igbt Induktansi	0
3.	Igbt Vf	1.2

No.	Parameter	Nilai
4.	Igbt Tf	1e-6
5.	Igbt Tt	2e-6
6.	Igbt Rs	Inf
7.	Dioda Ron	0.01
8.	Dioda Lon	0
9.	Dioda Vf	1.2V
10.	Dioda Rs	500e6
11.	Dioda Cs	250e-9

Kecepatan medan putar stator :

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \times 50}{2} = 3000 \text{ rpm.}$$

Slip :

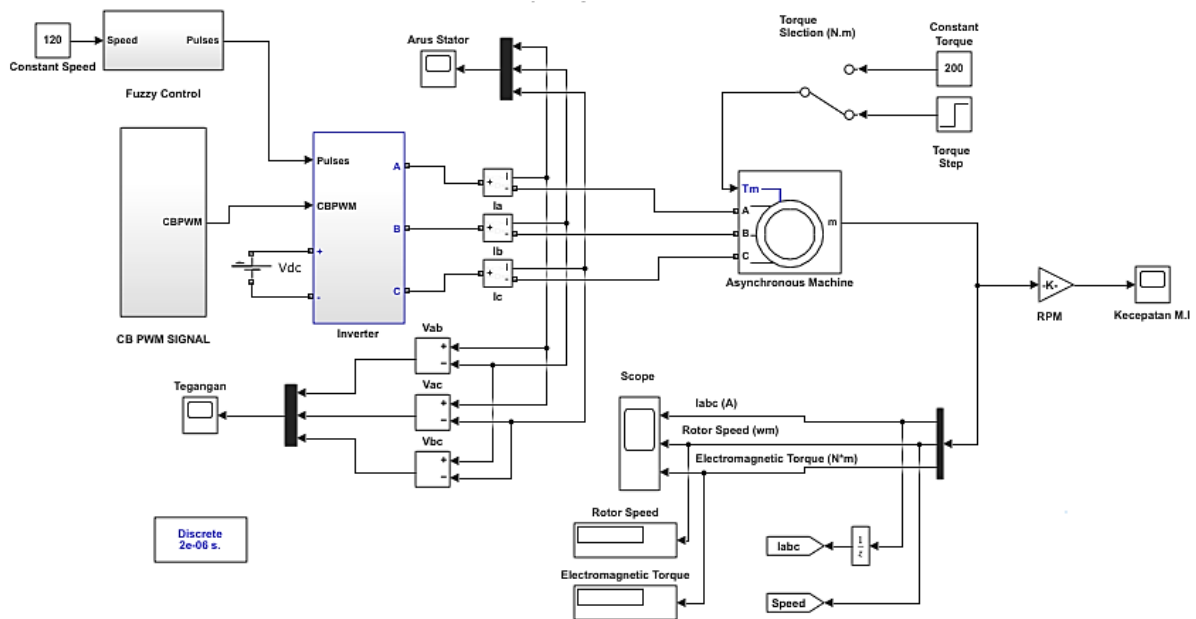
$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{3000 - 1500}{3000} = 0.5 = 50\%.$$

Frekuensi motor :

$$f' = S \cdot f = 0.5 \times 50 = 25 \text{ Hz.}$$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian yang telah dilakukan menggunakan motor induksi tiga fasa yang telah dijelaskan sebelumnya. Dimana pengujian dilakukan di *software* MATLAB 2021a. pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dilakukan menggunakan CBPWM inverter dengan *control switching* menggunakan *Fuzzy Mamdani*. Pengujian dilakukan secara *close loop* dengan kecepatan dan beban bervariasi. Rangkaian pengujian ditampilkan pada Gambar 4. Sedangkan rangkaian untuk proses *switching* ditampilkan pada Gambar 5.

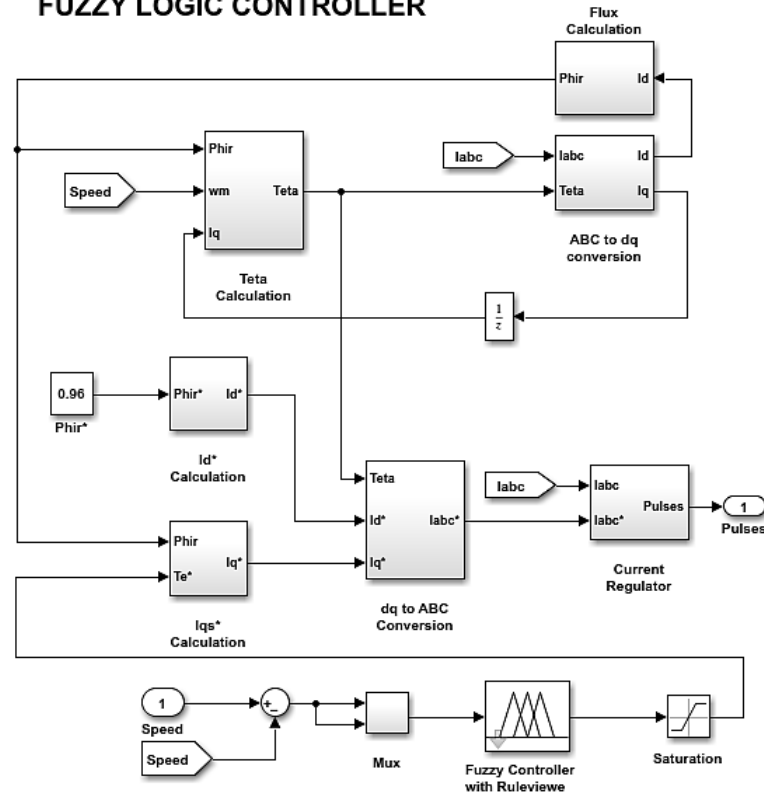


**Gambar 4.** Pemodelan Sistem dengan Simulink Matlab.

Pada Gambar 4 di atas merupakan rangkaian pengaturan kecepatan motor induksi dimana *Speed Reference* yang digunakan pada model ini yaitu konstan pada 120 rad/s yang merupakan kecepatan masukan, *Torque Reference* yang memberikan referensi nilai beban torsi kepada pengendali *Fuzzy Logic*, Sedangkan model rangkaian CBPWM Inverter dan ABC sebagai terminal *Output*. DC link sebagai sumber tegangan ke Inverter 780 Vdc. Blok pengukur arus dan tegangan digunakan untuk menampilkan visualisasi sinyal yang terukur. Arus, kecepatan dan sinyal torsi merupakan keluaran dari motor induksi tiga fasa. Sistem kendali menggunakan teknik *Sampling* selama 2 mikrodetik.

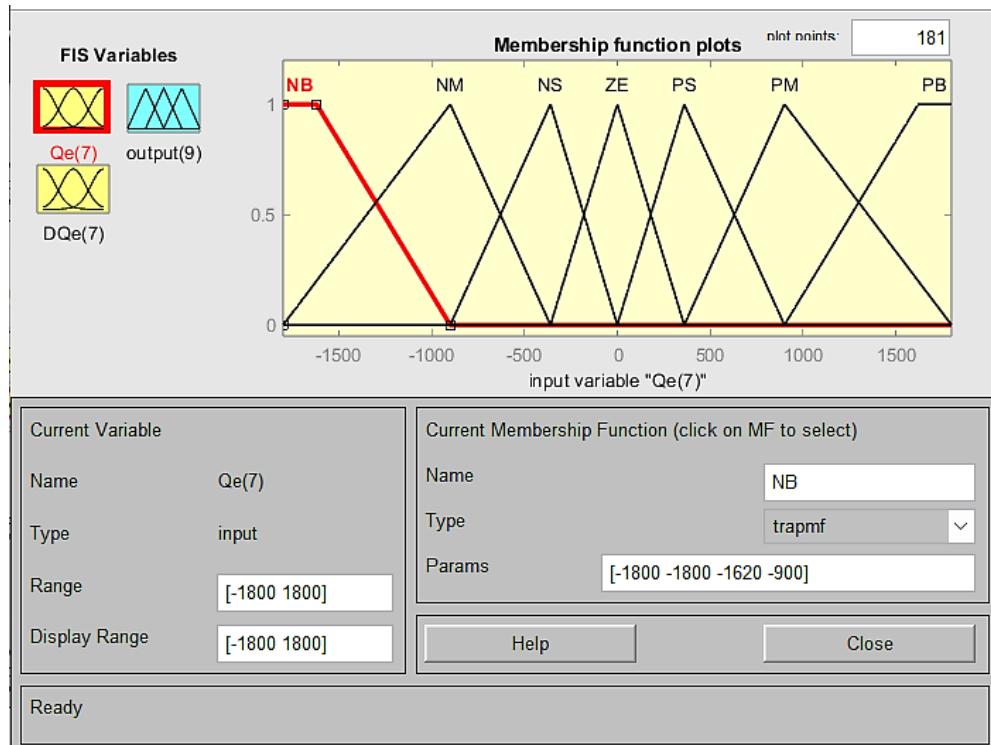
Sedangkan pada model pengendali Logika Fuzzy pada Gambar 4 Didalamnya terdapat rangkaian pengendali Logika Fuzzy yang lebih detail dan sekaligus merupakan tempat nilai masukan dan umpan balik yang diterima seperti pada Gambar 5.

**FUZZY LOGIC CONTROLLER**



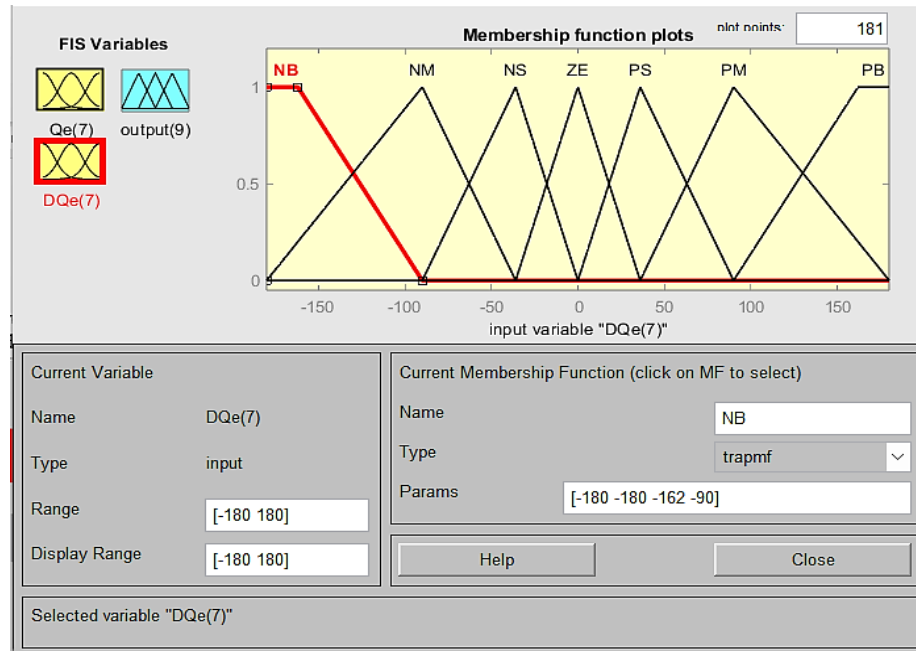
**Gambar 5.** Model Pengendali Logika Fuzzy.

Pada Gambar 5 diatas merupakan kontrol fuzzy yang digunakan merupakan tipe mamdani yang diberikan *input* berupa error dan delta error, serta output berupa ma yang digunakan untuk mengatur proses *switching* pada inverter. Gambar 6-8 menampilkan pengaturan FIS pada *fuzzy logic*.



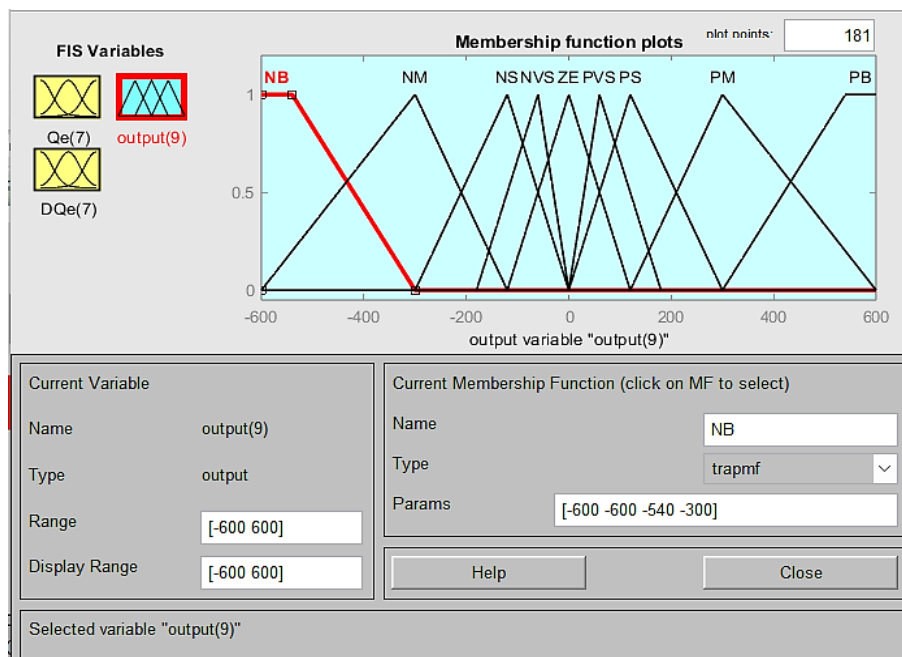
**Gambar 6.** Membership Function Input1.

Pada Gambar 6 memperlihatkan *Membership Function Fuzzy Logic* dimana menggunakan 7 masukan dengan *Range* -1800 sampai 1800.



**Gambar 7.** Membership Function Input2.

Pada Gambar 7 memperlihatkan *Membership Function Fuzzy Logic* dimana menggunakan 7 masukan dengan Range -180 sampai 180.



**Gambar 8.** Membership Function Output.

Pada Gambar 8 memperlihatkan *Membership Function Fuzzy Logic* dimana menggunakan 9 masukan dengan Range -600 sampai 600.

### 3.1 Performa Kontroller Fuzzy Logic.

Dari pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa motor induksi dapat berputar pada beban bervariasi dan kecepatan yang bervariasi pula. Pada gambar 9 menampilkan respon kecepatan putar akibat adanya pengaturan kecepatan. Dan hasil pengujian tertampil pada tabel 4.

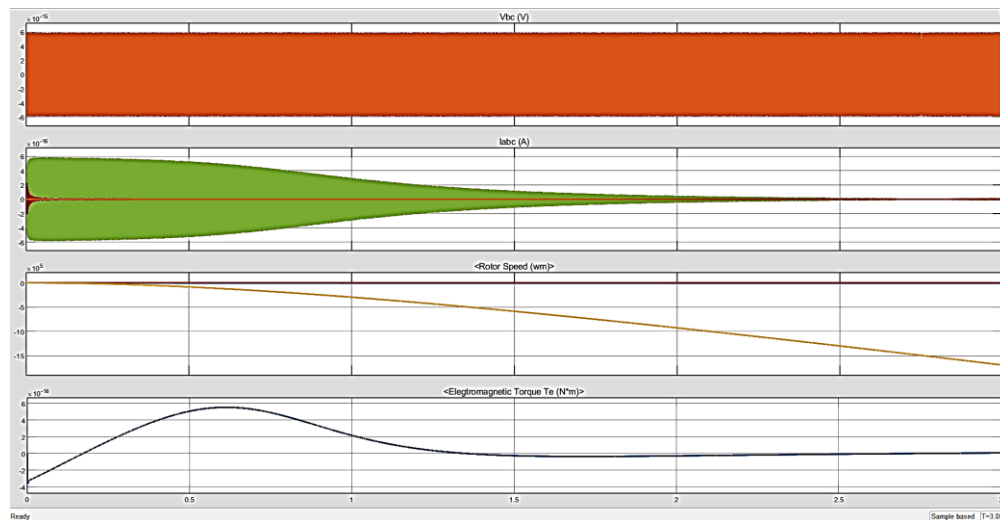
Pada beban 100 Nm, terdapat beberapa *set point* kecepatan yang diinginkan. Pada titik kecepatan yang diinginkan 1400 rpm memiliki waktu capai 0.1 detik dan error kecepatan sebesar 0.29%, sedangkan pada *set point* 1000 rpm memperoleh kecepatan 999 rpm dalam waktu 0.34 detik. Pada *set point* 800 rpm, sistem gagal berfungsi karena beban yang terlalu rendah dan kecepatan yang rendah juga, sehingga pengaturan kecepatan menggunakan fuzzy gagal.

berfungsi. Rata-rata error kecepatan untuk beban 10 Nm sebesar 0.27% dan memiliki rata-rata waktu capai selama 0.27 detik.

Pada beban 200 Nm, terdapat beberapa *set point* kecepatan yang diinginkan dengan nilai error rata-rata bernilai 1.2%. Pada titik kecepatan yang diinginkan 1400 rpm memiliki waktu capai 0.1 detik untuk kecepatan 1359 rpm, sedangkan pada *set point* 900 rpm sistem berjalan dalam kecepatan 891 rpm dengan waktu capai 0.14 detik. Pada *set point* 700 rpm, sistem gagal berfungsi karena beban dan kecepatan yang tidak seimbang, sehingga simulasi sistem yang dijalankan gagal.

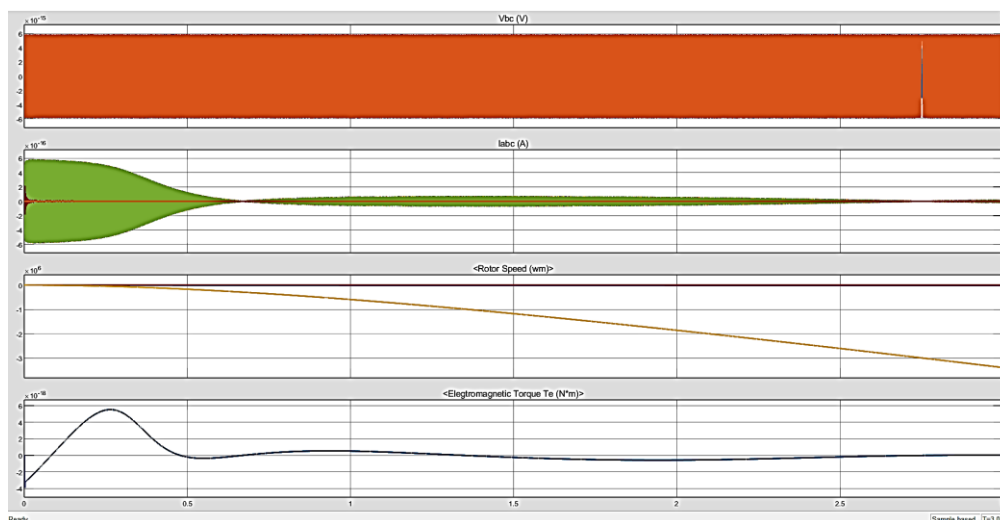
Pada beban Torsi Step, terdapat beberapa *set point* kecepatan yang diinginkan. Pada titik kecepatan yang diinginkan 1400 rpm sistem gagal berjalan, sedangkan pada *set point* 800 rpm sistem berjalan dalam kecepatan 770 rpm sehingga errornya 3.75% dengan waktu capai 0.14 detik. Pada *set point* 500 rpm, motor berputar pada kecepatan 460 rpm dalam waktu capai selama 1.98 detik, kondisi merupakan kondisi terburuk ditandai dengan waktu capai yang lama dengan rata-rata 0.67 detik dan error yang besar diatas 3%.

Hasil pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa sistem control kecepatan menggunakan fuzzy mamdani yang telah dibuat dapat digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa dengan error yang kecil untuk beban 100-200 Nm, sedangkan beban Torsi Step error kecepatan cukup besar. Waktu capai dari titik awal hingga *set point* yang diinginkan berhubungan dengan besar perubahan kecepatannya, kecepatan pada titik awal merupakan 1500 rpm, sehingga semakin jauh *set point* dari titik awal menyebabkan waktu capai yang semakin lama.



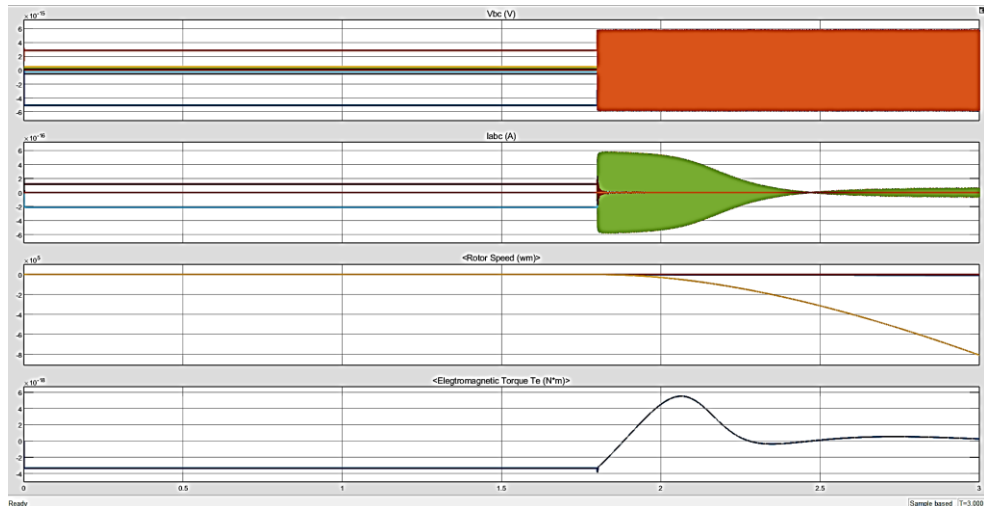
**Gambar 9.** Grafik Respon FLC untuk Beban 100 Nm.

Pada Gambar 9 memperlihatkan pengendali motor menggunakan FLC, dimana motor berputar dengan torsi beban 100 N.m dengan kecepatan masukan 120 rad/s. Terdapat *Overshoot* 0%, *Rise Time* 0.7 s, *Settling Time* 1.3 s dan *SteadyState Error* 0.003%. Pada arus dan torsi terjadi kondisi maksimum saat *Star* dan menurun setelah 0.7 s.



**Gambar 10.** Grafik Respon FLC untuk Beban 200 Nm.

Pada Gambar 10 memperlihatkan pengendali motor menggunakan FLC, dimana motor berputar dengan torsi beban 100 N.m dengan kecepatan masukan 120 rad/s. Terdapat *Overshoot* 0%, *Rise Time* 0.3 s, *Settling Time* 0.7 s dan *SteadyState Error* 0.003%. Pada arus dan torsi terjadi kondisi maksimum saat *Star* dan menurun setelah 0.3 s.



**Gambar 11.** Grafik Respon FLC untuk Beban Torsi Step.

Pada Gambar 11 memperlihatkan pengendali motor menggunakan FLC, dimana terjadi perubahan kecepatan, arus, torsi dan tegangan terjadi pada *Step Time* 1.8 s dengan perubahan beban dari nol menjadi 200 N.m. Penurunan kecepatan motor terjadi ketika  $t = 1.8$  s, hal ini disebabkan oleh perubahan beban secara mendadak setelah itu kembali pada kecepatan referensi. Terdapat *OverShoot* 0%, *Rise Time* 2.1 s, *Settling Time* 3.2 s dan *SteadyState Error* 0.003%.

### 3.2 Perbandingan Pengendali PID dan FLC.

**Tabel 4.** Hasil Percobaan Pengendali FLC.

Beban	Torsi (Nm)	Tr (s)	Ts (s)	Os/Us (%)	Ess (%)	THDv (%)	THDi (%)
0	8.084	0.5	1.5	0.0	0.003	6096.4	127.05
25	28.65	0.6	1.5	0.0	0.003	958.83	122.8
50	62.72	0.6	1.6	0.0	0.003	3004.93	119.8
75	92.08	0.7	1.6	0.0	0.003	751.69	118.83
100	117.3	0.8	1.7	0.0	0.003	788.22	76.57
125	125.9	1.0	1.9	0.0	0.003	1133.89	113.42
150	154	1.3	2.2	0.0	0.003	784.42	83.96
175	183.4	1.6	2.4	0.0	0.003	208.17	103.76
200	213	1.9	2.7	0.0	0.003	253.29	140.91
Step	197.8	2.3	3.2	0.0	0.003	1115.68	66.31

Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa terdapat hasil dari simulasi pada saat 3 detik yang diambil dari *display* kecepatan dan torsi. Nilai torsi yang akan ditampilkan fluktuasi dan kecepatan referensi selalu tetap yaitu 120 rad/s. Tabel diatas memperlihatkan bahwa dengan perubahan beban dari 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 dan 200 menyebabkan torsi meningkat, *Rise Time* meningkat, *Settling Time* meningkat dan *SteadyState Error* sebesar 0.003%. Pada pengendali FLC tidak terdapat *OverShoot*. Untuk masukan beban step menyebabkan terjadinya torsi menjadi naik karena perubahan beban secara mendadak dari nol menjadi 200 N.m tanpa terdapat *UnderShoot*.

**Tabel 5.** Hasil Percobaan Pengendali PID.

Beban	Torsi (Nm)	Tr (s)	Ts (s)	Os/Us (%)	Ess (%)	THDv (%)	THDi (%)
0	-5.545	0.7	2.5	0.4	0.005	6096.4	127.05
25	4.871	0.8	2.6	0.4	0.005	958.83	122.8
50	64.43	0.9	2.6	0.4	0.005	3004.93	119.8
75	86.37	1.0	2.7	0.3	0.005	751.69	118.83
100	112.7	1.1	2.7	0.3	0.005	788.22	76.57
125	137.1	1.4	2.8	0.3	0.005	1133.89	113.42
150	141.1	1.8	2.9	0.2	0.005	784.42	83.96
175	197.6	2.0	3.0	0.2	0.005	208.17	103.76
200	208.1	2.2	3.2	0.2	0.005	253.29	140.91
Step	226.5	2.1	3.5	0.2	0.005	1115.68	66.31

Pada Tabel 5 dapat dilihat bahwa terdapat hasil dari simulasi pada saat 3 detik yang diambil dari *display* kecepatan dan torsi. Nilai torsi yang akan ditampilkan fluktuasi dan kecepatan referensi selalu tetap yaitu 120 rad/s.



Tabel diatas memperlihatkan bahwa dengan perubahan beban dari 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 dan 200 menyebabkan torsi meningkat, *overshoot* menurun, *Rise Time* meningkat, *Settling Time* meningkat dan *SteadyState Error* sebesar 0.005%. Untuk masukan beban step menyebabkan terjadinya *undershoot* dan torsi menjadi naik karena perubahan beban secara mendadak dari nol menjadi 200 N.m.

Perbandingan antara pengendali PID dan FLC saat motor mulai berputar menunjukkan pengendali FLC memiliki kemampuan yang lebih baik dari pada pengendali PID dan memiliki waktu respon yang lebih cepat.

Perbandingan antara pengendali PID dan FLC saat perubahan beban step menunjukkan kecepatan motor mengikuti referensinya dengan tidak baik karena adanya *SteadyState error* dan respon yang cepat menggunakan pengendali FLC. Hal ini memperlihatkan bahwa respon kecepatan dipengaruhi oleh kondisi dari beban. Pengendali FLC juga memberikan respon yang lebih baik untuk *Overshoot*, *SteadyState error* dan respon yang cepat. Pengendali FLC juga dapat menangani perubahan kecepatan secara tiba-tiba tanpa adanya *Overshoot*, *Undershoot* dan *SteadyState error*.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan Simulasi yang dilakukan, diperoleh hasil menggunakan pengendali FLC dengan beban bervariasi dan masukan referensi 120 rad/s yang selalu tetap dan menghasilkan keluaran dengan waktu simulasi selama 3 detik. Keluaran yang dihasilkan adalah tanpa adanya *OverShoot*, *Rise Time* 0.5 s, *Settling Time* 1.5 s dan *SteadyState Error* 0.003%. Berdasarkan simulasi antara pengendali PID dan FLC saat motor berputar menunjukkan pengendali FLC mempunyai kemampuan yang lebih baik daripada pengendali PID dan memiliki waktu respon yang lebih cepat. Menggunakan sistem pengendali FLC dapat menangani kecepatan tanpa adanya *OverShoot*, *UnderShoot* dan *SteadyState Error* dengan perubahan beban yang mendadak. Pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa sistem *control fuzzy* yang dirancang dapat mengatur kecepatan sesuai dengan *set point* yang diinginkan serta dapat mempertahankan kecepatan pada nilai tersebut, akan tetapi harus diperhatikan perbandingan antara beban dan kecepatan. Beban yang kecil tidak dapat berputar pada kecepatan rendah dan beban yang besar tidak dapat berputar pada kecepatan tinggi. Waktu untuk mencapai nilai *set point* menunjukkan waktu yang cukup cepat dengan nilai error yang kecil. Fungsi Keanggotaan dalam pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa sangat dibutuhkan dimana fungsi keanggotaan tersebut sangat menentukan keadaan kestabilan dari kontrol motor yang digunakan.

#### REFERENCES

- Adhe, I. P. Putra Novantara., Wayan, I. Arta Wijaya & Suarta, I Made. (2021). Analisis Pengaturan Putaran Motor Induksi 3 Fasa dengan Mengatur Frekuensi Menggunakan Variable Speed Drive di PT. PDAM Tirta Mangutama Kabupaten Badung. *Jurnal Spektrum*. Vol. 8, No. 4.
- Ali, M. (2018). *Aplikasi Elektronika Daya Pada Sistem Tenaga Listrik. Aplikasi Elektronika Daya Pada Sistem Tenaga Listrik Muhamad Ali*, 5–24.
- Awdaa, M. A., Obed, A. A., and Saleh, A. L. (2020). *Three-phase Induction Motor SVPWM-FOC Control Based on PLC Matlab Translation Approach*. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 745, no. 1, p. 012028. doi: 10.1088/1757-899X/745/1/012028.
- Bagja, I. nyoman, & Parsa, I. M. (2018). *Motor-motor Listrik. CV. Rasi Terbit*, 1(1), 1–104.
- Bagus, I., Citarsa, F., Nyoman, I., Setiawan W., & Wiryajati, I. K. (2015). *Pengaruh Teknik Modulasi PWM pada Keluaran Inverter Tiga Fasa untuk Pengaturan Kecepatan Variabel Motor Induksi*. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Mataram, 2(1), 948732-948739.
- Eddine, S. Rezgui., Benalla, H., and Bouhebel, H. (2021). *Hybrid bacteria foraging particle swarm optimization algorithm in DTC performance improving for induction motor drive*. IJEECS, vol. 22, no. 2, p. 660. doi: 10.11591/ijeecs.v22.i2.pp660-669.
- Evalina, N., Azis, A. H., & Zulfikar. (2018). Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Programmable logic controller. *Journal of Electrical Technology*, 3(2), 73–80.
- Gafur, A., P.K, I. D., & Dewantara, B. Y. (2020). *Rancang Bangun Kendali Kecepatan Motor Berbasis Logika Fuzzy Untuk Sistem Propulsi Elektrik Pada Kapal Menggunakan Pulse Width Modulation*. *Media Elektrika*, 13(1), 24–32.
- Hartono, H., Sudjoko, R. I., and Iswahyudi, P. (2019). *Speed Control of Three Phase Induction Motor Using Universal Bridge and PID Controller*. J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1381, no. 1, p. 012053. doi: 10.1088/1742-6596/1381/1/012053.
- Izzaqi, F. A., Windarko, N. A., and Qudsi, O. A. (2022). Minimization of total harmonic distortion in neutral point clamped multilevel inverter using grey wolf optimizer. *IJPEDS*, vol. 13, no. 3, p. 1486, doi: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1486-1497.
- Kurnia Alvi, Vania., Wahjono, E., & Arsarul Qudsi, O. (2020). Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Metode Direct Torque Control. *Jurnal Inovatek*. Vol. 2, No. 3.
- Malik Ibrahim, M., Rafi Damas, Moch, Abdilla., & Chandra Arsandi, Feby. (2023). Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Multilevel Inverter Dengan Metode Fuzzy Logic Controller. *Jurnal Teknologi Terpadu* VOL. 11 NO. 1.



- Muntashir, A. A., Purwanto, E., & Nugraha, S. D. (2020). Pengembangan Sugeno Fuzzy Model Dalam Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan V/F Scalar Control. *PoliGrid*, 1(2), 65. <https://doi.org/10.46964/poligrid.v1i2.379>.
- Nasution, E. S., & Hasibuan, A. (2018). Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Merubah Frekuensi Menggunakan Inverter ALTIVAR 12P. *Sistem Informasi ISSN*, 2(1), 25–34.
- Pranata, Y. (2018). Analisis Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Inverter 3 Fasa. Bandung: Jurnal TELKA, Vol. 4, No. 2.
- Prasetyo, E. (2018). Penggunaan Variable Speed Drive Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Exhaust Fan Pada Dyno Test Room PT. Trakindo Utama Pekanbaru. Pekanbaru: Jurnal Teknik, Vol. 12, No. 2.
- Setiawan, A., Yanto, B., & Yasdomi, K. (2018). Logika Fuzzy Dengan Matlab (Contoh Kasus Penelitian Penyakit Bayi dengan Fuzzy Tsukamoto). In *Jayapangus Press Books* (Issue July).
- Setiawan, M. T., Efendi, A. D., and Rusmadi, G. J. (2020). Kontrol Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa melalui Arus Rotor menggunakan PI,” triac, vol. 7, no. 2, pp. 40–42. doi: 10.21107/triac.v7i2.5921.
- Setiawan, B. D. P., Habibi, M. N., Windarko, N. A., & Sutedjo, -. (2020). Pengaturan Kecepatan Motor Induksi dengan Metode Vf dan Kontrol PI-FUZZY. *Suara Teknik: Jurnal Ilmiah*, 11(2), 1. <https://doi.org/10.29406/stek.v11i2.2047>.
- Suda, K. R. S., Sumantri, B., Purwanto, E., et al. ((2021). Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa dengan Menggunakan Pemodelan Sistem (DTC) Direct Torque Control. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan* Vol. 18, No. 2.
- Simulink, *Fuzzy Logic Toolbox*, Matlab Ver.
- Wiryajati, I. K., Giriantari, A. ., Jasa, L., & Kumara, I. N. S. (2020). Speed Control Strategy for Three Phase Induction Machine Fed Inverter Base on Carrier Base Pulse Width Modulation (CBPWM). *International Journal of Engineering and Emerging Technology*, 5(1), 14. <https://doi.org/10.24843/ijeet.2020.v05.i01.p05>.