

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA PADA PENGGERAK MOBIL LISTRIK

M. S. Sunardiyanta¹⁾, D. C. Happyanto²⁾, N. A. Windarko³⁾, K. R. S. Suda⁴⁾

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

⁴ D3 Teknik Elektronika, Politeknik Nasional

Email: akbardito27@gmail.com, dedid@pens.ac.id, ayub@pens.ac.id, redasetiawan1@gmail.com

ABSTRAK

Motor induksi 3 fasa memiliki karakteristik yang tidak linier karena dipengaruhi oleh nilai resistansi rotor yang sering berubah sehingga memiliki kecepatan yang tidak konsisten, sehingga diperlukan sebuah metode kontrol yang lebih mudah seperti pada karakteristik motor DC yang linier, pengaturan yang diterapkan pada sebuah motor induksi memiliki 2 metode yaitu metode skalar dan metode vektor, dimana pada penelitian ini akan menggunakan salah 1 cabang dari metode vektor yaitu Field Oriented Control (FOC) yang berorientasi pada fluks medan pada rotor secara tidak langsung atau yang sering disebut dengan Indirect Field Oriented Control (IFOC). Metode pengontrolan sistem yang dipakai pada penelitian ini menggunakan PIDFuzzy yang akan diterapkan pada IFOC. Kontrol PID dapat digunakan untuk melakukan perbaikan pada sistem agar memiliki nilai yang sesuai dengan keinginan dan kontrol Fuzzy yang dibuat berdasar intuisi manusia dapat digunakan untuk mengetahui aturan yang diterapkan pada sistem, Penelitian ini dilakukan pada aplikasi matlab dimana PIDFuzzy sendiri dibuat untuk dapat mencapai nilai sistem dengan aturan yang sudah dibuat, hasil performa yang didapat pada kecepatan 200 rpm dengan dan tanpa beban memiliki rata rata keunggulan performa sebesar 39.12%, pada kecepatan 500 rpm memiliki rata rata keunggulan performa sebesar 32.46%, pada kecepatan 1000 memiliki keunggulan tanpa beban sebesar 20%

Kata kunci: IFOC, Fuzzy, PID, PIDFuzzy, Motor Induksi, Matlab

ABSTRACT

Three phase induction motor have a non linier characteristic its because the effect of the value of resistance is always changing so the speed is not steady. Therefore we need a control method that similar to the linier DC control method, to control a three phase induction motor we have 2 method which are the scalar and vector method, this research the writer used one of those 2 method, which is the Field Oriented Control (FOC) this method is oriented on indirect fluks control is also called Indirect Field Oriented Control (IFOC). This IFOC method the writer use a PIDFuzzy control, the PID control can used to fix the system when cannot reach the set point, Fuzzy method based on a human intuition to make the rule for the system. This research is made in Matlab aplication where PIDFuzzy is made to reach the set point based on the rule. On this research was found that at the speed of 200 rpm with or without the load the PIDFuzzy is 39.12% better than the conventional PID, for the 500 rpm PIDFuzzy is 32.46% better than the conventional PID, and the 1000 rpm the PIDFuzzy is 20% better than PID.

Keywords : IFOC, Fuzzy, PID, PIDFuzzy, Induction Motor, Matlab

1. PENDAHULUAN

Motor induksi merupakan salah satu perangkat elektronik yang umum digunakan pada area industri sebagai penggerak, hal ini dikarenakan harga yang murah, perawatan yang mudah, dan desain yang cukup handal [1]. Dibalik kehandalan yang ditawarkan terdapat pula kelemahan dari motor induksi, yaitu karakteristiknya yang tidak linier, hal ini mengakibatkan kecepatan rotor menjadi tidak stabil, hal ini juga dipengaruhi oleh nilai resistansi motor yang berubah ubah seiring kondisi kerja motor [2].

Dalam mengendalikan sebuah motor induksi, terdapat beberapa tantangan dikarenakan karakteristiknya yang tidak linier, pengendalian motor paling umum adalah pengendalian motor DC

Penulis akan menjelaskan ruang lingkup pengerjaan dari penelitian ini, penelitian ini akan menggunakan aplikasi matlab sebagai sarana uji coba sistem, mulai dari pembuatan logika fuzzy, kontrol PID, dan analisa hasil ujicoba. Logika fuzzy yang dibangun pada penelitian ini bertujuan agar dapat melakukan penyesuaian nilai konstanta proporsional sistem.

Gambar 1. merupakan sistem secara keseluruhan yang sudah dibuat, kotak dengan warna merah merupakan sistem IFOC dengan input berupa set poin kecepatan dan hasil pembacaan sensor kecepatan pada blok speed control, 3 input dari sensor berupa nilai ia, ib, dan ic yang akan digunakan pada transformasi clarke. Kotak berwarna hijau merupakan blok inverter yang menggunakan 6 buah IGBT sebagai komponen switching guna menghasilkan sinyal AC 3 fasa. Kotak berwarna iru merupakan blok motor induksi 3 fasa dimana pada pengendalian motor dengan metode IFOC memerlukan parameter motor yang digunakan.

Desain PIDFuzzy akan diterapkan pada blok diagram kontrol kecepatan, input dari logika fuzzy yang digunaka adalah nilai error dan selisih error, dimana hasil dari logika fuzzy adalah nilai konstanta Kp pada kontrol kecepatan itu sendiri, diharapkan dengan nilai konstanta Kp yang berubah sesuai dengan kondisi motor akan menghasilkan perbaikan dari respon sistem.

A. Model Motor Induksi 3 Fasa

Pengendalian motor dengan karakteristik yang tidak linier memiliki banyak kesulitan, tidak cukup hanya dengan melihat respon aksi dan reaksi dari sistem yang sudah dibuat maka diperlukan juga sebuah pendekatan lain yaitu berupa pendekatan matematis, hal ini masih dpat dilakukan karena dalam beberpa tahun terakhir konstruksi dari motor induksi sendiri tidak banyak mengalami perubahan. Analisis dengan referensi sumbu putar adalah salah 1 mtode pendekatan yang digunakan [5], Persamaan (1) – (10) merupakan persamaan pada sumbu putar d-q,

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(-R_E i_{sd} + \sigma L_s \omega_s i_{sq} + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \psi_{rd} + \omega_r \frac{L_m}{L_r} \psi_{rq} + V_{sd} \right) \quad (1)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(-R_E i_{sq} + \sigma L_s \omega_s i_{sd} + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \psi_{rd} + \omega_r \frac{L_m}{L_r} \psi_{rq} + V_{sq} \right) \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{rd} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sq} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3pR_r}{2JL_r} (i_{sq} \psi_{rd} - \psi_{rd} i_{sd}) - \frac{B}{J} \omega_r - \frac{T_L}{J} \quad (5)$$

$$R_E = R_s + \frac{L_m^2 R_r}{L_r} \quad (6)$$

$$\sigma = 1 + \frac{L_m^2 R_r}{L_s L_r} \quad (7)$$

$$T_E = \frac{3pL_m}{2L_r} (i_{sq} \psi_{rd} - i_{sd} \psi_{rq}) \quad (8)$$

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r = \frac{L_r i_{sq}^*}{R_r i_{sd}^*} \quad (9)$$

$$\theta_s = \int \omega_s dt \quad (10)$$

Dimana

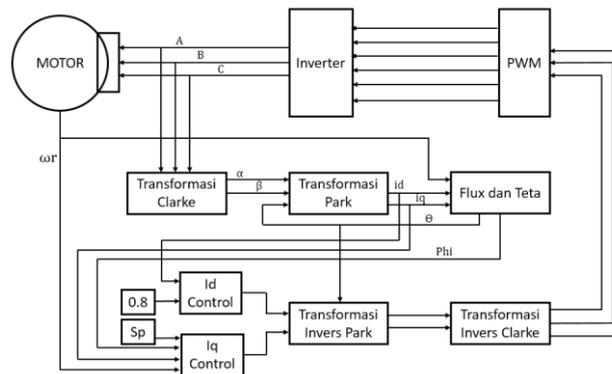
ω_r	= Kecepatan Rotor
ω_s	= Kecepatan Sinkron Stator
V_{sd}	= Tegangan Stator Pada Sumbu d
V_{sq}	= Tegangan Stator Pada Sumbu q
I_{sd}	= Arus Stator Pada Sumbu d
I_{sq}	= Arus Stator Pada Sumbu q
Ψ_{rd}	= Fluks Rotor Pada Sumbu d

Ψ_{rq}	= Fluks Rotor Pada Sumbu q
R_s	= Resistansi Stator
R_r	= Resistansi Rotor
L_s	= Induktansi Stator
L_r	= Induktansi Rotor
L_m	= Induktansi Mutual
p	= Pole atau Jumlah Kutub
R_E	= Resistansi Ekuivalen
σ	= Koefisien Leakage

Persamaan (1)-(10) dapat dilihat bahwa motor induksi merupakan sebuah motor yang memiliki karakteristik tidak linier dan dipengaruhi oleh banyak faktor, dapat dilihat juga bahwasanya posisi fluks pada awal pengoperasian motor adalah 0. Dikarenakan fluks awal memiliki nilai 0 maka nilai integral nya juga akan 0, hal ini menyebabkan perhitungan awal fluks sudah dapat dilakukan.

B. Metode IFOC

Metode IFOC merupakan metode yang digunakan dengan tujuan melakukan kontrol motor AC induksi 3 fasa agar dapat dikontrol seperti motor DC, dimana pada motor induksi 3 fasa yaitu fasa ABC akan diubah menjadi 2 fasa d-q dengan acuan sumbu putar. Pada proses transformasi dari 3 fasa menuju 2 fasa ini diperlukan metode yaitu metode clarke dan park, Gambar 2 menunjukkan blok diagram IFOC



Gambar 2. Blok Diagram Sistem IFOC

Metode clarke merupakan metode yang digunakan dalam mengubah sistem 3 fasa ABC menjadi 2 fase $\alpha\beta$ dengan acuan sumbu diam atau stasioner, metode park sendiri merupakan transformasi yang digunakan untuk mengubah sumbu 2 fasa $\alpha\beta$ menjadi fase d-q dengan acuan sumbu putar. Pada fase ini pengendalian sudah dapat dilakukan namun karena sistem bersifat *close/loop* maka sistem 2 fasa harus dikembalikan lagi ke sistem 3 fasa yang disebut juga dengan invers clarke park [7],

Transformasi Clarke

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (11)$$

Transformasi Park

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

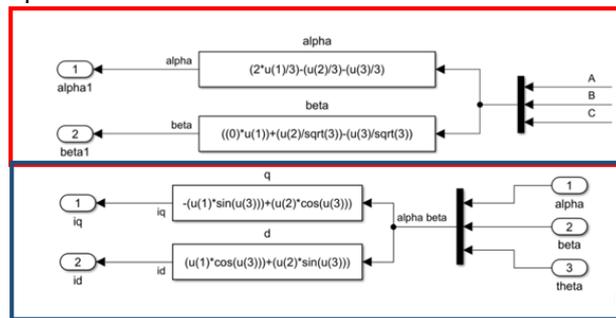
Invers Transformasi Clarke

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (13)$$

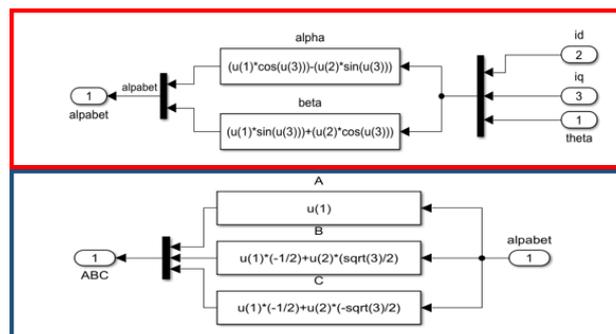
Invers Transformasi Park

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (14)$$

Permodelan dari masing masing transformasi dapat dibuat pada aplikasi matlab, Gambar 3. merupakan hasil transformasi clarke park, dan Gambar 4. merupakan hasil permodelan untuk transformasi invers clarke park.



Gambar 3. Transformasi Clarke (merah) dan Transformasi Park (biru)



Gambar 4. Transformasi Invers Park (merah) dan Invers Clarke (biru)

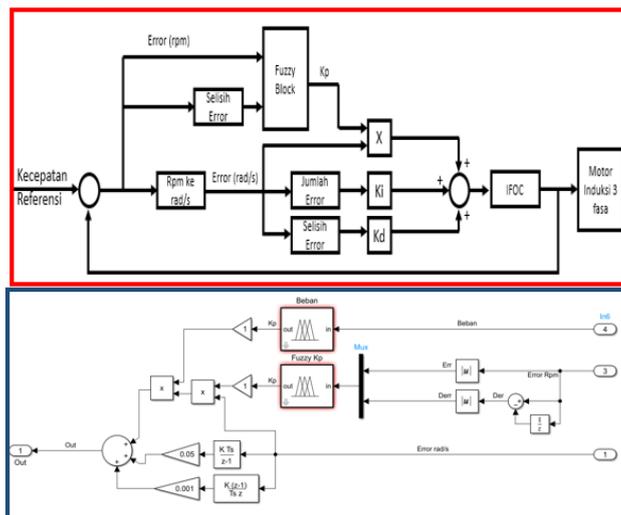
C. Metode PIDFuzzy

Metode fuzzy merupakan sebuah metode yang dibuat dan dikembangkan dengan memperhatikan logika dari pembuat sistem tersebut, bobot dalam masing masing aturan sangat mempengaruhi ketepatan kontrol dalam mengambil keputusan dari input system. Metode kontrol ini juga sangat fleksibel dikarenakan dari sisi input dan output jumlahnya dapat disesuaikan dengan kebutuhan, sehingga metode ini lebih cocok digunakan pada sistem yang sifatnya masih samar atau abu abu namun dapat dianalisa dalam sudut pandang logika manusia.

PID merupakan susunan metode kontrol yang terdiri dari 3 bagian yaitu proporsional (P), integral (I), dan derivate (D). Metode ini dapat digunakan tersendiri seperti contohnya kontrol proporsional yang hanya menggunakan konstanta P, namun dapat juga digunakan ke 3 nya namun dengan beberapa kombinasi sehingga terbentuk metode P saja, PI saja, atau PID. Nilai konstanta dari masing masing parameter dapat mempengaruhi respon sistem yaitu, konstanta P akan mempercepat waktu naik namun memiliki overshoot yang tinggi, konstanta I dapat menurunkan overshoot namun

memperlambat respon, dan konstanta D akan mempengaruhi waktu konstan sistem. Nilai yang dapat digunakan pada kontroler PID sendiri adalah nilai kesalahan atau selisih antara kecepatan referensi dengan nilai kecepatan aktual motor [9]. Penentuan nilai konstanta PID didapat dari fungsi alih sebuah sistem, baik tanpa beban, dengan beban nominal, beban minimal, dan beban maksimal [10].

Metode PIDFuzzy diterapkan pada penentuan nilai konstanta proporsional pada kontrol kecepatan, pada kontrol kecepatan digunakan input berupa hasil pembacaan sensor kecepatan pada rotor dan set poin yang diinginkan. Maka pada PID yang digunakan pada kontrol kecepatan ini memerlukan 3 aspek, yaitu eror kecepatan, selisih eror kecepatan, dan jumlah eror. Masing masing parameter memiliki konstanta pengali yang berbeda beda, untuk konstanta integral dan derivate nilainya tetap sama, untuk nilai konstanta proporsional selalu berubah ubah mengikuti nilai eror dan delta eror pada pengukuran kecepatan, metode yang digunakan pada penentuan nilai konstanta proporsional ini adalah fuzzy, diharapkan respon kecepatan yang dihasilkan semakin baik bila diberikan dan tanpa diberikan beban pada sistem tanpa adanya overshoot yang berlebih. Gambar 5. merupakan desain sistem PIDFuzzy yang dibuat pada aplikasi matlab, terdapat 2 logika fuzzy yang digunakan, untuk fuzzy yang atas merupakan fuzzy yang digunakan pada saat terjadi pembebanan dan akan memiliki keluaran bernilai 1 jika sistem tanpa beban, dan fuzzy yang bawah merupakan fuzzy yang berjalan pada sistem.



Gambar 5. Desain Blok PIDFuzzy (merah) dan PIDFuzzy pada matlab

Desain Fuzzy Kp yang dipakai pada penelitian ini memiliki 2 input dengan 1 output, untuk input 1 didefinisikan sebagai eror untuk input ke 2 yaitu delta eror atau selisih eror dengan membership ke dua inputnya sejumlah 7, adapun membershipnya adalah positif besar (PB), positif sedang (PS), positif kecil (PK), zero (Z), negatif kecil (NK), negatif sedang (NS), dan negatif besar (NB). Untuk output didefinisikan sebagai nilai Kp dengan membershipnya sejumlah 7 yaitu sangat besar (SB), besar (B), agak besar (AB), sedang (S), agak kecil (AK), kecil (K), sangat kecil (SK). Untuk Fuzzy beban memiliki 1 input dan 1 output, dimana membership input terdapat 10 jenis yaitu zero, dangat kecil, lumayan kecil, kecil, agak kecil, agak bebsar, bear, lumayan besar, sangat besar, dan infinite dan outputnya sebanyak 5 yaitu zero, kecil, sedang, besar, sangat besar.

Tabre 1. Parameter Nilai Error

Titik	Error						
	NB	NS	NK	Z	PK	PS	PB
A	-27	-25	-16	-7	2	11	20
B	-27	-18	-9	0	9	18	27
C	-20	-11	-2	7	16	25	27

Tabre 2. Parameter Nilai Selisih Error

Titik	Selisih Error						
	NB	NS	NK	Z	PK	PS	PB
A	-10	-5.5	-3.5	-1.5	0.5	2.5	4.5

B	-6	-4	-2	0	2	4	6
C	-4.5	-2.5	-0.5	1.5	3.5	5.5	10

Tabe 3. Parameter Nilai Kp

Titik	Error						
	SK	K	AK	S	AB	B	SB
A	1	1.067	1.233	1.4	1.567	1.733	1.9
B	1.033	1.167	1.333	1.5	1.667	1.833	2
C	1.1	1.267	1.433	1.6	1.767	1.933	2

Tabel 1. dan Tabel 2. merupakan keterangan titik dari masing masing membership yang digunakan, untuk Tabel 3. adalah membership dari Kp. Tabel 4 merupakan rulebase yang dipakai pada fuzzy Kp,

Tabel 4. Rulebase Fuzzy Kp

	Error							
	NB	NS	NK	Z	PK	PS	PB	
Selisih Eror	NB	SB	B	AB	K	AB	B	SB
	NS	B	B	S	AK	S	B	B
	NK	AB	S	AK	SK	AK	S	AB
	Z	K	AK	SK	SK	SK	AK	K
	PK	AB	S	AK	SK	AK	S	AB
	PS	B	B	S	AK	S	B	B
	PB	SB	B	AB	K	AB	B	SB

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini merupakan hasil dari simulasi PIDFuzzy untuk menerapkan kontrol kecepatan, dalam penelitian ini menggunakan motor dengan daya 4000 watt atau 5.4 HP dengan teknik modulasi berupa SPWM. Pada penelitian ini akan membandingkan 2 metode PID yaitu PID konvensional dan PIDFuzzy, pada metode PID konvensional nilai dari masing masing konstanta ditetapkan dengan metode trial and eror dimana masing masin nilai akan dimainkan dengan menambah atau mengurangi nilai dari masing masing parameter sedikit demi sedikit. Nilai dari masing masing parameter sendiri adalah, $K_p = 25$, $K_i = 0.05$, $K_d = 0.001$, untuk metode PIDFuzzy sendiri nilai K_p akan berubah sedemikian rupa mengikuti karakteristik motor yang sedang berjalan. Dalam menentukan metode yang terbaik digunakan index performance berupa nilai risetime (T_r), settling time (T_s), Overshoot, dan eror steady state.

Tabel 5. Parameter Motor Induksi

NO	Parameter	Nilai
1	Resistansi Stator (Ohm)	1.405
2	Resistansi Rotor (Ohm)	1.395
3	Induktansi Stator (H)	0.005839
4	Induktansi Rotor (H)	0.005839
5	Tegangan (V)	400
6	Daya (Watt)	4000
7	Jumlah Kutub	4
8	Frekuensi (Hz)	50

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa kondisi, kondisi kondisi yang akan diuji pada penelitian ini adalah dengan 3 buah set point dengan 2 buah pembebanan, kecepatan motor akan diatur secara bervariasi dengan nilai 200, 500, dan 1000 rpm. Pada pengujian tanpa beban, motor akan diberikan nilai sebesar set point, lalu akan dilihat bagaimana respon dan index performance yang sudah ditentukan sebelumnya. Untuk pengujian berbeban motor pada kondisi awal pada $t = 0s$ hingga $t = 0.1s$ motor tidak akan diberikan beban lalu pada $t = 0.1s$ motor akan diberikan beban sebesar 35N atau 50N.

Tabel 6. Hasil Perbandingan Tanpa Beban

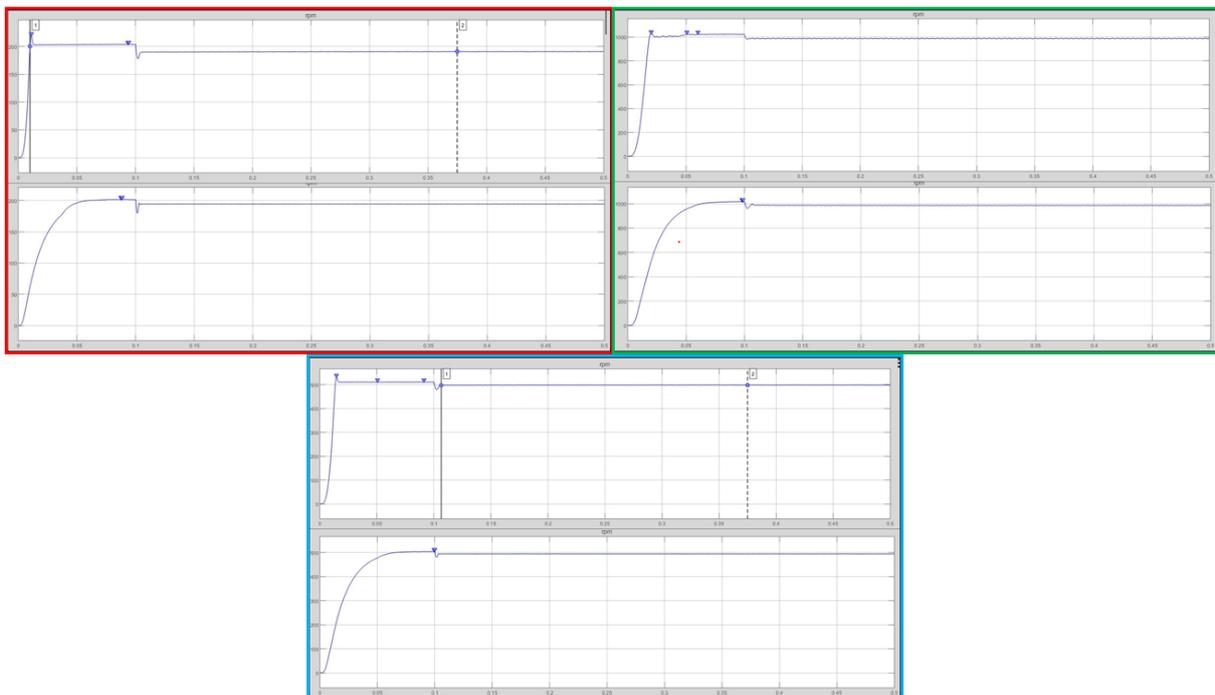
Parameter	200		500		1000	
	PID	PIDF	PID	PIDF	PID	PIDF
Rise Time (s)	0.01	0.048	0.014	0.049	0.02	0.045
Settling Time (s)	0.105	0.053	0.02	0.115	0.12	0.069
Overshoot (%)	7.1	2.55	6	2.56	2.7	2.5
Error Steady State (%)	2.1	1.939	2.24	2.236	2.2	2.192
Total Indeks	9.26	4.59	8.434	4.96	5.04	4.806

Dapat dilihat pada Tabel 6. bahwa dari 3 kali percobaan tanpa beban pada kecepatan 200 rpm metode PIDFuzzy unggul 50,26% dari PID konvensional, pada kecepatan 500 rpm PIDFuzzy unggul 41.19%, lalu pada pengujian 1000 rpm PIDFuzzy kembali unggul 4.64%. Dapat dilihat juga bahwa semakin tinggi rpm yang digunakan pada sistem selisih indeks akan semakin mengecil, namun pada kecepatan rendah PIDFuzzy cenderung lebih kecil, dapat dilihat juga bahwa PIDFuzzy lebih stabil meski diimplementasikan pada kecepatan yang berbeda.

Tabel 7. Hasil Perbandingan Dengan Beban 35N

Parameter	200		500		1000	
	PID	PIDF	PID	PIDF	PID	PIDF
Rise Time (s)	0.00985	0.053	0.018	0.05	0.02	0.046
Settling Time (s)	1.05	0.1	0.106	0.13	0.112	0.110
Overshoot (%)	7.1	1.75	6	1.9	2.7	0.22
Undershoot (%)	11.2	9.15	4.06	4.3	1.8	3.7
Recovery Time (s)	0.05	0.006	0.06	0.003	0.12	0.002
Error Steady State (%)	4.6	3.979	0.5	1.64	1.3	1.64
Total Indeks	24	15.083	10.798	8.023	7.14	5.718

Pada percobaan berbeban, beban sebesar 35N akan diberikan pada detik ke 0.1 dimana pada kecepatan 200 rpm, PIDFuzzy unggul 37.1% dari PID konvensional lalu pada kecepatan 500 rpm PIDFuzzy unggul 25.69% daripada PID konvensional, dan pada kecepatan 1000 rpm PIDFuzzy lagi lagi unggul sebesar 19.9% dari PID konvensional, berbeda dengan percobaan tanpa beban, respon indeks dari masing masing kontroler tidak stabil pada kecepatan yang berbeda, hal ini dikarenakan adanya nilai *overshoot* dan *undershoot* yang dimasukkan kedalam perhitungan sistem. Gambar 6. merupakan representasi dari Tabel 7.

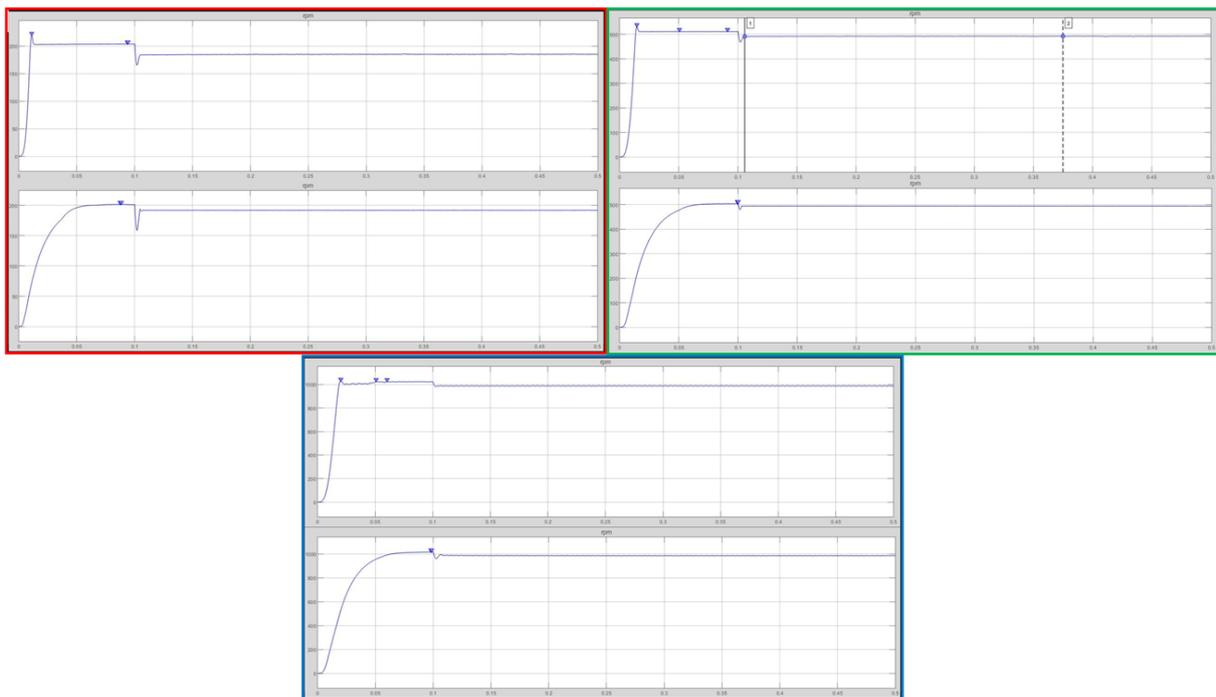


Gambar 6. Grafik Hasil pengujian 35N 200 rpm (merah), 500 rpm (hijau), 1000 rpm (biru)

Tabel 7. Hasil Perbandingan Dengan Beban 50N

Parameter	200		500		1000	
	PID	PIDF	PID	PIDF	PID	PIDF
Rise Time (s)	0.01	0.053	0.01	0.05	0.02	0.045
Settling Time (s)	0.105	0.108	0.106	0.112	0.11	0.1
Overshoot (%)	9.65	1.75	6.18	0.95	2.7	2.2
Undershoot (%)	17.3	16.3	6.38	6.46	3.34	5.71
Recovery Time (s)	0.05	0.008	0.06	0.009	0.01	0.009
Error Steady State (%)	7.5	5.88	1.6	2.372	2	2.182
Total Indeks	34.615	24.099	14.336	9.953	8.18	10.244

Pada percobaan dengan beban 50N, didapatkan hasil pada 200 rpm PIDFuzzy unggul 30% dari PID konvensional, pada kecepatan 500 rpm PIDFuzzy unggul 30.5% dari PID konvensional, pada kecepatan 1000 rpm PID konvensional unggul sebesar 20.1% dari PIDFuzzy, hal ini terjadi dikarenakan pada kecepatan tinggi PIDFuzzy mengalami undeershoot yang lebih tinggi daripada PID konvensional.



Gambar . Grafik Hasil pengujian 50N 200 rpm (merah), 500 rpm (hijau), 1000 rpm (biru)

4. SIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil data diatas didapat hasil performa kendali motor induksi 3 fasa dengan metode PIDFuzzy berbeban dan kecepatan yang berubah ubah memiliki hasil yang lebih baik daripada PID konvensional. Dapat dilihat dari nilai masing masing hasil performa yang didapat bahwasannya pada kecepatan 200 rpm baik dengan dan tanpa beban memiliki rata rata keunggulan performa sebesar 39.12 %, pada kecepatan 500 rpm memiliki rata rata keunggulan performa sebesar 32.46%, pada kecepatan 1000 memiliki keunggulan pada saat tanpa beban sebesar 4.64%. Pada beberapa pengujian memiliki kemiripan indeks performa dari metode PID dan PIDFuzzy, seperti pada pengujian beban 35N dan 50N dengan kecepatan 1000 rpm nilai indeksnya hanya terpaut 2%, maka pada penelitian ini metode PIDFuzzy dapat digunakan pada kecepatan rendah hingga tinggi dengan keunggulan nilai overshoot dan eror steadystate nya yang cenderung kecil dibawah 5% namun dengan nilai rise time yang sangat lambat. Hal ini dapat ditoleransi karena saat mengoperasikan motor yang terutama diterapkan pada sebuah purwarupa kendaraan, perubahan kecepatan perlu diperhatikan juga sehingga dapat mempengaruhi kenyamanan pengguna. Kedepannya dapat dikembangkan lagi sebuah metode yang dapat digunakan untuk mempercepat risetime dari sistem, namun juga perlu diperhatikan bahwasannya parameter tersebut bisa disesuaikan dengan kebutuhan motor itu sendiri

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Kurniawan, B. Suprianto, T. Wrahatnolo, and N. Kholis, "Analisis Pengendalian Motor Induksi Tiga Fasa menggunakan Fuzzy Logic Control," *J. Tek. Elektro*, vol. 09, no. 03, pp. 733–740, 2020.
- [2] R. Fauzi, D. C. Happiyanto, and I. A. Sulistijono, "Pengembangan Pi Controller Sebagai Kendali Respon Cepat Pada Motor Induksi 3 Fasa Berbasis Indirect Field Oriented Control (Ifoc)," *Simp. Nas. RAPI*, pp. 99–106, 2014.
- [3] R. Ridwan, E. Purwanto, H. Oktavianto, M. R. Rusli, and H. Toar, "Desain Kontrol Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Fuzzy Pid Berbasis Idirect Field Oriented Control," *J. Integr.*, vol. 11, no. 2, pp. 146–155, 2019, doi: 10.30871/ji.v11i2.1356.
- [4] S. Ekavandy and D. C. Happyanto, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Metode PID Self Tuning Berdasarkan Fuzzy pada Rancangan Mobil Hybrid," pp. 2–6.
- [5] R. O. Y. Hendra, E. Purwanto, H. Oktavianto, A. A. Muntashir, and K. R. S. Suda, "PENGENDALIAN MOTOR INDUKSI 3 FASA DENGAN BEBAN DINAMIS KONTROL PID FUZZY MENGGUNAKAN METODE FOC-TAK LANGSUNG (INDIRECT FIELD ORIENTED CONTROL) PADA LABVIEW," vol. 19, no. 1, pp. 45–55, 2022.
- [6] A. B. Ashari, "Kontrol Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Metode Field Orientation Control (FOC) Berbasis Fuzzy-PID," *J. Tek. Elektro*, vol. 9, pp. 763–772, 2020.
- [7] R. Fauzi and J. Khair, "Pemodelan Direct Quadrate (D-Q) Pada Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Phasa dengan Field Oriented Control (FOC) Berbasis Kendali P-I," *Sci. Comput. Sci. Informatics J.*, vol. 1, no. 2, p. 25, 2019, doi: 10.22487/j26204118.2018.v1.i2.12059.
- [8] S. Hussain and M. A. Bazaz, "Review of vector control strategies for three phase induction motor drive," *2015 Int. Conf. Recent Dev. Control. Autom. Power Eng. RDCAPE 2015*, pp. 96–101, 2015, doi: 10.1109/RDCAPE.2015.7281376.
- [9] F. M. W. Fatih Mutamimul Wildan, "Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler PID Berbasis Genetic Algorithm," *Kinetik*, vol. 1, no. 1, pp. 23–32, 2016, doi: 10.22219/kinetik.v1i1.14.
- [10] B. Muslim, "Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler Fuzzy-PID," *J. Tek. Elektro ITS*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2015.