

Perancangan *Self Tuning* Dua Derajat Kebebasan dengan Metode *Fuzzy Logic* pada Pengendalian Kecepatan Motor Sinkron Magnet Permanen Menggunakan Metode *Vector Control*

Charles Ronald Harahap¹, Endah Komalasari², Nadia Julian Putri³

Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung, Bandar Lampung
Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung 35145

¹charles.harahap6@gmail.com

²endah.komalasari@eng.unila.ac.id

³nadiajulianputri@gmail.com

Intisari — Penelitian ini merancang sistem kendali dua derajat kebebasan Proportional-Integral/Proportional (PI-P) menggunakan metode *self tuning fuzzy logic* untuk mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen. Metode *self tuning* dapat menentukan parameter PI-P secara otomatis dengan menggunakan sistem kendali *fuzzy logic*. Pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen 3 fasa ini dilakukan dengan mengubah sistem 3 fasa (a-b-c) menjadi sistem 2 fasa (*direct-quadrature*) menggunakan metode *vector control*. Metode SVPWM digunakan untuk memodulasi enam saklar pada inverter 3 fasa. Hasil yang diperoleh dengan menggunakan MATLAB Simulink menunjukkan bahwa dengan menggunakan sistem kendali *self tuning fuzzy logic* dapat menghasilkan performa motor yang baik, dimana respon kecepatan dari motor sinkron magnet permanen menunjukkan bahwa, *step respon* dan *disturbance respon* mendekati respon idealnya.

Kata kunci — Motor Sinkron Magnet Permanen, *Self Tuning*, Dua Derajat Kebebasan, *Fuzzy Logic*, *Vector Control*.

Abstract — This paper proposes self tuning Proportional-Integral/Proportional gain controller parameter in a Two Degree of Freedom (2DoF) using fuzzy logic method for speed control of permanent magnet synchronous motor. The self tuning method can automatically determine the PI-P parameters using a fuzzy logic control system. Speed control of the 3-phase permanent magnet synchronous motor is carried out by changing the 3-phase system (a-b-c) to a 2-phase system (*direct-quadrature*) using the vector control method. SVPWM method is used to modulate six switches on a 3 phase inverter. The results obtained using MATLAB Simulink show that by using a self-tuning fuzzy logic control system, high motor performance results are obtained, where the speed response of the permanent magnet synchronous motor shows that the step response and disturbance response are close to the ideal response.

Keywords — Permanent Magnet Synchronous Motor, Self Tuning, Two Degrees of Freedom, Fuzzy Logic, Vector Control.

I. PENDAHULUAN

Penelitian ini mengusulkan perancangan parameter *Proportional-Integral/Proportional* (PI-P) dua derajat kebebasan menggunakan sistem kendali *self tuning* dengan metode *fuzzy logic*. Dalam menentukan parameter PI-P biasanya dilakukan dengan cara *trial and error*, dimana cara tersebut tidak efektif, tidak efisien dan memakan waktu lama. Untuk itu diusulkan *self tuning fuzzy logic* untuk menentukan parameter PI-P secara otomatis. Pengendalian dua derajat kebebasan merupakan sistem yang dapat menghasilkan *step response* dan *disturbance response* mendekati respon idealnya[1].

Sistem kendali *self tuning fuzzy logic* PI-P merupakan sistem kendali yang akan

mentuning parameter PI-P menggunakan *fuzzy logic*. Nilai *error* dan *delta error* merupakan masukan untuk *fuzzy logic* dan digunakan metode sugeno untuk proses dalam pengambilan keputusan. Hasil keluaran dari sistem kendali ini yaitu kp_1 , ki , dan kp_2 , dimana parameter ini yang akan digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen. Sistem kendali *self tuning fuzzy logic* menghasilkan performansi sistem yang lebih baik dibandingkan dengan sistem kendali konvensional[2].

Pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen sudah banyak dilakukan, baik menggunakan sistem kendali konvensional sampai ke sistem kendali cerdas. Penelitian dengan membandingkan

sistem kendali konvensional dengan sistem kendali *self tuning fuzzy logic* menghasilkan performa motor yang baik, dimana respon kecepatan memiliki nilai *overshoot* yang rendah dan *rise time* serta *settling time* yang cepat [3], [4].

Sistem kendali dua derajat kebebasan memiliki keunggulan dibandingkan dengan sistem kendali satu derajat kebebasan. Pengendalian kecepatan motor memiliki kelemahan dalam menahan gangguan beban, dengan sistem kendali dua derajat kebebasan dapat memperkirakan dan mengendalikan gangguan [5]. Telah diusulkan sebelumnya sistem kendali dua derajat kebebasan PI-P dengan metode FRIT pada pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen dimana menghasilkan respon yang ideal, baik pada *step response* maupun pada *disturbance response* [6].

Pada penelitian ini dimodelkan pengaturan kecepatan motor sinkron magnet permanen menggunakan metode *vector control* berbasis *Space Vector Pulse Width Modulation* (SVPWM). Pengendalian *vector control* merupakan metode pengendalian berdasarkan teori transformasi koordinat. Metode ini menggunakan transformasi clark dan park untuk mengkonversi arus AC 3-fasa ke menjadi sistem 2-fasa. Dengan menggunakan metode *vector control* motor sinkron magnet permanen akan dikendalikan seperti mengendalikan motor DC [7], [8], [9]. Inverter pada pengendalian kecepatan motor dikendalikan dengan metode SVPWM, metode ini mengendalikan enam buah *switches* pada inverter. SVPWM merupakan rangkaian pemacu saklar khusus dan kombinasi lebar pulsa dari inverter sumber tegangan tiga fasa pada motor sinkron magnet permanen yang akan menghasilkan tiga bentuk gelombang sinusoidal dengan sudut 120° yang berbeda satu sama lain [10].

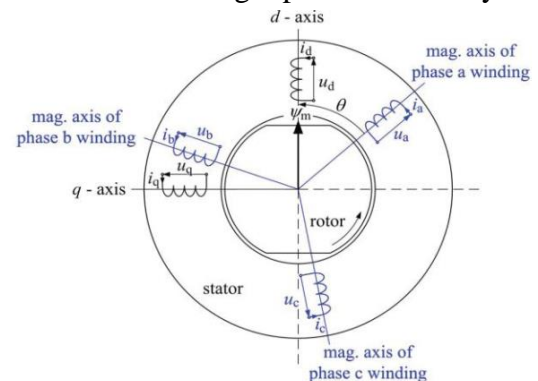
Pada penelitian ini perancangan sistem kendali dua derajat kebebasan PI-P dengan metode *self tuning fuzzy logic* pada pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen dengan pengendalian *vector control* disimulasikan dengan MATLAB Simulink. Performa motor sinkron magnet permanen yang baik dengan respon kecepatan yang dihasilkan memiliki nilai *overshoot* yang rendah dan *rise time* serta

settling time yang cepat merupakan tujuan dari penelitian ini.

II. METODOLOGI

A. Model Matematis Motor Sinkron Magnet Permanen

Model matematis motor sinkron magnet permanen diperlukan untuk pengembangan sistem kendali. Persamaan dinamis belitan tiga fasa yang menghubungkan tegangan terminal ke fluks lingkup dan arus fasa yaitu:



Gbr 1. Model Matematis Motor Sinkron Magnet Permanen [11]

Persamaan matematis tegangan tiga fasa motor sinkron magnet permanen yaitu :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \cdot \text{ia}bc + \begin{bmatrix} \lambda_m \cos \theta \\ \lambda_m \cos(\theta - 120^\circ) \\ \lambda_m \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \cdot p \quad (1)$$

Dimana $p = \frac{d}{dt}$, sehingga

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\lambda_m \sin \theta \\ -\lambda_m \sin(\theta - 120^\circ) \\ -\lambda_m \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Persamaan tegangan motor sinkron magnet permanen dalam sumbu dq dapat dilihat pada persamaan (3) [12].

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + P L_a & -\omega_{re} L_a \\ \omega_{re} L_a & R_a + P L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{\Omega m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dimana v_d dan v_q merupakan tegangan sumbu direct dan quadrature, sedangkan i_d dan i_q merupakan arus umbu direct dan quadrature, R_a merupakan resistansi *armature*, L_a merupakan *self-inductance*,

ω_{rE} merupakan kecepatan angular, dan Φ_m merupakan fluks magnetic maksimum. Persamaan torsi elektromagnetik dapat dilihat pada persamaan (4)

$$T_e = \lambda \Phi_a i_q = k_t i_q \tag{4}$$

Dimana λ merupakan jumlah kutub motor, Φ_a merupakan fluks *armature*, dan k_t merupakan koefisien torsi.

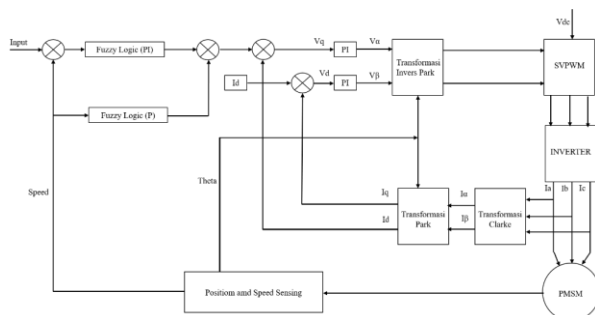
B. Vector Control

Vector control merupakan sistem kendali yang mengubah koordinat 3-fasa menjadi 2-fasa. Sistem kendali *vector control* mengendalikan torsi dan kecepatan motor secara langsung berdasarkan elektromagnetik motor, sistem kendali vector adalah sistem kendali yang mengendalikan motor AC seperti motor DC. Dengan pemisahan antara komponen arus stator (fluks magnetisasi dan torsi), komponen penghasil torsi dari fluks stator dapat dikendalikan secara independen [8].

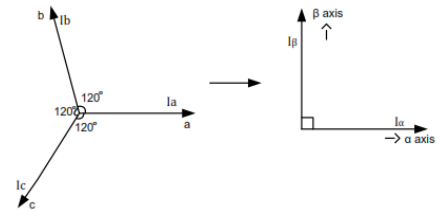
Untuk mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen pada penelitian ini motor sinkron magnet permanen akan dikendalikan seperti motor DC, dimana sistem tiga fasa akan diubah menjadi sistem dua fasa dengan transformasi Clarke dan Park, kemudian transformasi invers Clarke dan Park untuk mengubah kembali sistem tiga fasa sebagai masukan untuk inverter yang akan mengendalikan kecepatan motor [13].

C. Persamaan Transformasi Clarke

Transformasi Clarke merupakan transformasi yang berfungsi mengubah sistem tiga fasa a, b dan c menjadi sistem dua fasa yaitu α dan β .



Gbr 2. Sistem Kendali *Vector Control* pada Pengendalian Motor Sinkron Magnet Permanen



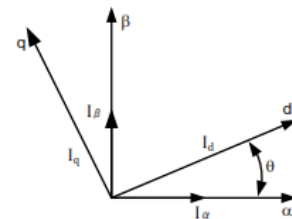
Gbr 3. Koordinat Transformasi Clarke [14]

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{6}$$

D. Persamaan Transformasi Park

Transformasi park merupakan transformasi koordinat yang mengubah sistem dua fasa α dan β tidak bergerak menjadi sistem d dan q bergerak.



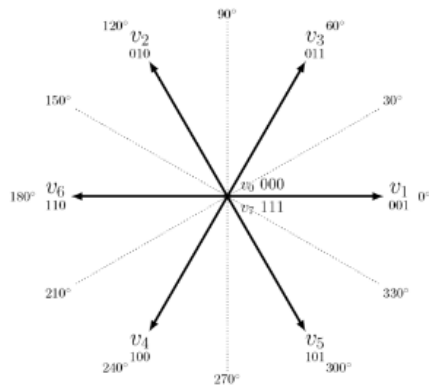
Gbr 4. Koordinat Transformasi Park [15]

Persamaan arus d dan q pada motor sinkron magnet permanen adalah

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{7}$$

E. Perancangan Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM)

Untuk mengendalikan inverter pada penelitian ini dibutuhkan sistem kendali SVPWM yang akan mengatur *switching* pada inverter. metode SVPWM ini memiliki enam *vector* dasar dan dua *vector null*, dengan waktu kerja yang berbeda. SVPWM merupakan rangkaian pemacu saklar khusus dan kombinasi lebar pulsa dari inverter sumber tegangan tiga fasa pada motor sinkron magnet permanen yang akan menghasilkan tiga bentuk gelombang sinusoidal dengan sudut 120° yang berbeda satu sama lain [15].



Gbr 5. Vector Dasar SVPWM [16]

Tabel 1. Aturan *Switching Vector* 0 sampai *Vector 7*

Vector	A ⁺	B ⁺	C ⁺	A ⁻	B ⁻	C ⁻	V _{AB}	V _{BC}	V _{CA}
V ₀ ={000}	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	0	0	0
V ₁ ={001}	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	0	-V _{dc}	+V _{dc}
V ₂ ={010}	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	-V _{dc}	+V _{dc}	0
V ₃ ={011}	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	-V _{dc}	0	+V _{dc}
V ₄ ={100}	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	+V _{dc}	0	+V _{dc}
V ₅ ={101}	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	+V _{dc}	-V _{dc}	0
V ₆ ={110}	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	0	+V _{dc}	-V _{dc}
V ₇ ={111}	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	0	0	0

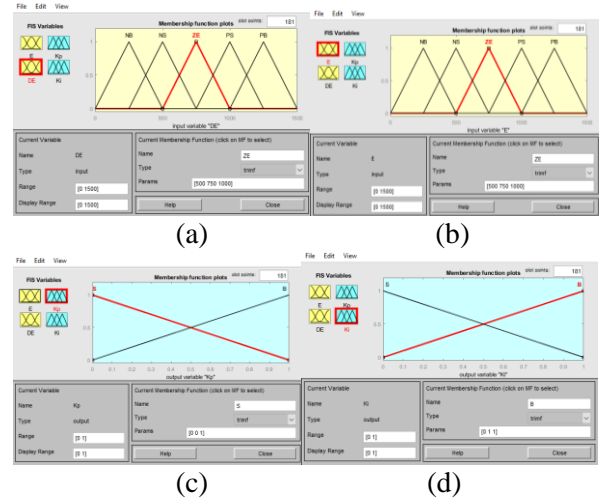
Model matematis untuk tiap sektor dapat dilihat pada persamaan dibawah ini

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |V_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) \\
 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |V_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \frac{n}{3} \pi - \alpha \right) \\
 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |V_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \frac{n}{3} \pi \cos \alpha - \cos \frac{n}{3} \pi \cdot \sin \alpha \right) \\
 T_2 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |V_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\alpha - \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) \\
 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |V_{ref}|}{V_{dc}} \cdot \left(-\cos \alpha \cdot \sin \frac{n-1}{3} \pi - \sin \alpha \cdot \cos \frac{n-1}{3} \pi \right) \\
 T_0 &= T_z - T_1 - T_2 \tag{8}
 \end{aligned}$$

F. Perancangan Sistem Kendali Dua Derajat Kebebasan PI-P dengan Metode Self Tuning Fuzzy Logic

Pada tahap ini perancangan *self tuning* dua derajat kebebasan menggunakan metode *self tuning fuzzy logic* yang disimulasikan menggunakan software MATLAB Simulink. Pada penelitian ini untuk menentukan nilai kp1, ki dan kp2 digunakan metode *self tuning* dengan mengatur *fuzzy control rules* yang dapat dilihat pada tabel 1 dan tabel 2. Sistem

kendali *fuzzy logic* memiliki dua buah masukan yaitu *error* (E) dan *delta error* (DE) dan keluarannya berupa nilai Kp1, Ki dan Kp2. Diagram blok *fuzzy logic* yang disimulasikan menggunakan MATLAB Simulink dapat dilihat pada gambar 6.



Gbr 6. Perancangan *Membership Function* pada MATLAB Simulink (a). *error*, (b). *delta error* (c). keluaran kp1 (d). keluaran ki

Tabel 2. Ketentuan *Fuzzy Rules P*

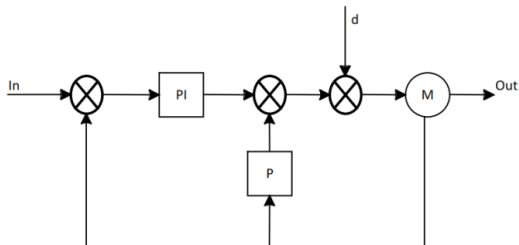
e/Δe	ΔNB	ΔNS	ΔZE	ΔPS	ΔPB
NB	B	B	B	B	B
NS	S	B	B	B	S
ZE	S	S	B	S	S
PS	S	B	B	B	S
PB	B	B	B	B	B

Tabel 3. Ketentuan *Fuzzy Rules I*

e/Δe	ΔNB	ΔNS	ΔZE	ΔPS	ΔPB
NB	S	S	S	S	S
NS	B	S	S	S	B
ZE	B	B	S	B	B
PS	B	S	S	S	B
PB	S	S	S	S	S

Diagram blok dari sistem *self tuning* dua derajat kebebasan, dimana dapat dilihat pada gambar 7 bahwa sistem dua derajat kebebasan memiliki dua buah *closed loop*, *closed loop* pertama merupakan *closed loop step* dan *closed loop* kedua merupakan *closed loop disturbance* [5]. Parameter in merupakan kecepatan referensi merupakan masukan yang diberikan pada sistem, sedangkan PI merupakan kendali yang akan mengendalikan nilai *error* dari keluaran

sistem. *Closed loop* kedua merupakan *disturbance*, untuk mengendalikan motor agar tetap stabil Ketika terjadi gangguan maka dibutuhkan kendali P. Hasil *self tuning* untuk nilai kp_1 , ki dan kp_2 dapat dilihat pada tabel 5.



Gbr 7. Diagram blok *self tuning* dua derajat kebebasan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi perancangan ini memperlihatkan respon kecepatan dan respon torsi dari kecepatan motor sinkron magnet permanen tanpa beban dan dengan beban. Blok simulasi dapat dilihat pada gambar 8.

Pada penelitian ini, sistem kendali *self tuning* dua derajat kebebasan PI-P dengan menggunakan metode *fuzzy logic* digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen dengan spesifikasi motor sinkron magnet permanen yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3. Tujuan dari penelitian ini untuk mengevaluasi performa respon kecepatan dan respon torsi dari sistem kendali yang diusulkan. Evaluasi dari hasil pengujian yang perlu diperhatikan diantaranya, *rise time*, *settling time*, dan *overshoot*.

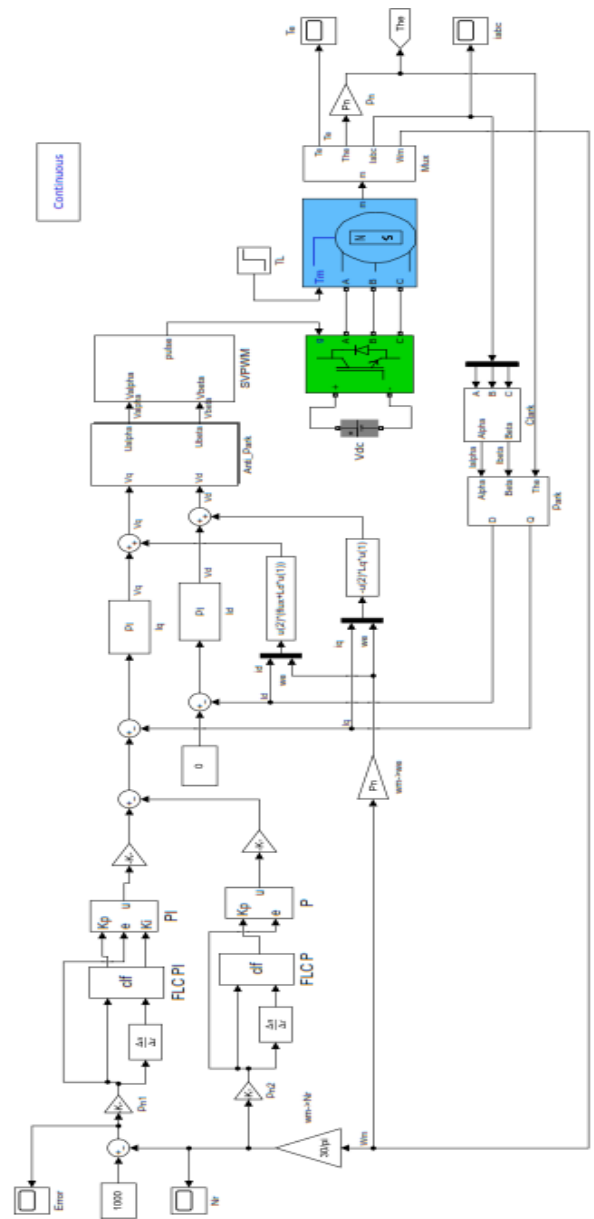
Hasil parameter pengendalian nilai kp_1 , ki dan kp_2 dari perancangan dua derajat kebebasan PI-P dengan metode *self tuning fuzzy logic* dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 4. Spesifikasi Motor Sinkron Magnet Permanen

Resistansi (R_s)	0,958 Ω
Induktansi d (L_d)	5,25 x 10 ⁻³ H
Induktansi q (L_q)	12 x 10 ⁻³ H
Flux Linkage	0,1827
Momen Inersia	0,003 J(Kg.m ²)
Jumlah Kutub	4
Tipe Rotor	<i>Salient Pole</i>
Tegangan (Vdc)	311 Volt

Tabel 5. Nilai kp_1 , ki dan kp_2

Parameter Kendali	Nilai
kp_1	0,03
ki	3,465
kp_2	0,03

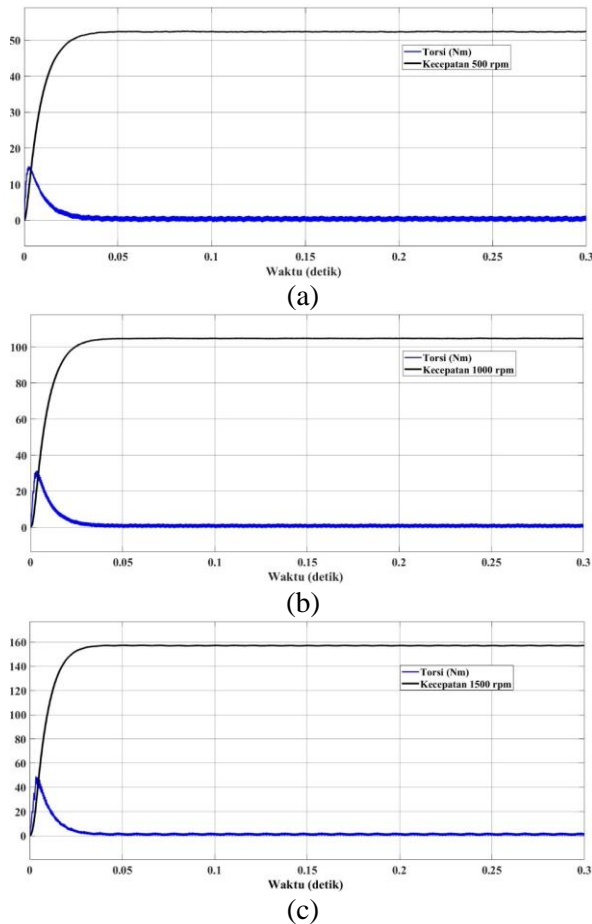


Gbr 8. Blok Simulasi *Self tuning* Dua Derajat Kebebasan PI-P pada Motor Sinkron Magnet Permanen dengan Metode *Vector Control*

Pengujian pertama yaitu pengendalian tanpa beban dengan kecepatan referensi tetap sebesar 500 rpm, 1000 rpm dan 1500 rpm. Gambar 9 merupakan kurva respon kecepatan dan respon torsi dari pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen.

Performa kecepatan motor sinkron magnet permanen dengan kecepatan referensi 500 rpm, 1000 rpm, dan 1500 rpm menghasilkan

respon kecepatan dan respon torsi yang baik, kecepatan keluaran yang dihasilkan sesuai dengan kecepatan referensi yang diberikan dengan *rise time* yang cepat dan overshoot yang kecil. Respon kecepatan dapat dilihat pada tabel 6 berikut ini.



Gbr 9. Kurva Respon Kecepatan dan Torsi Tanpa Beban, (a). Kecepatan Referensi 500 rpm, (b). Kecepatan Referensi 1000 rpm, (c). Kecepatan Referensi 1500 rpm

Tabel 6. Respon Kecepatan Motor Sinkron Magnet Permanen Tanpa Beban

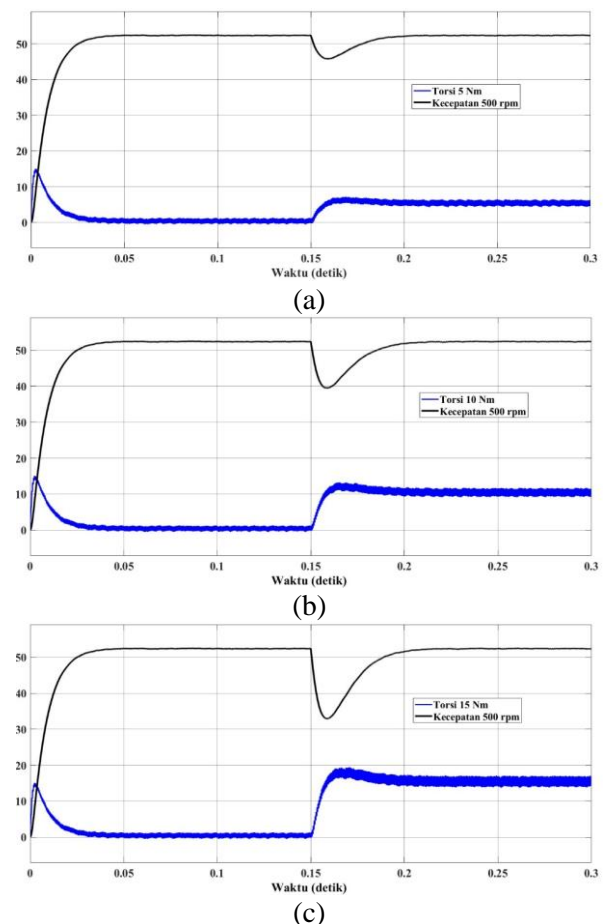
Kecepatan (rpm)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)
500	0.017	0.027	0.44
1000	0.016	0.027	0.505
1500	0.015	0.028	0.505

Tabel 7. Nilai k_p1 , k_i dan k_p2

Nilai Puncak (rpm)	Waktu Puncak (s)	Steady State Error (%)
501	0.22	0.2
1001	0.075	0.13
1503	0.051	0.19

Respon kecepatan yang dihasilkan pada Tabel 5 dapat dikatakan sesuai dengan kecepatan referensi yang ditentukan. Tidak membutuhkan waktu yang lama untuk respon kecepatan mencapai kondisi *steady state*, sehingga dengan sistem kendali *self tuning* dua derajat kebebasan PI-P dengan metode *fuzzy logic* untuk mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen dengan sistem kendali *vector control* dapat dikatakan berhasil yang menghasilkan respon kecepatan yang baik dan dinamis.

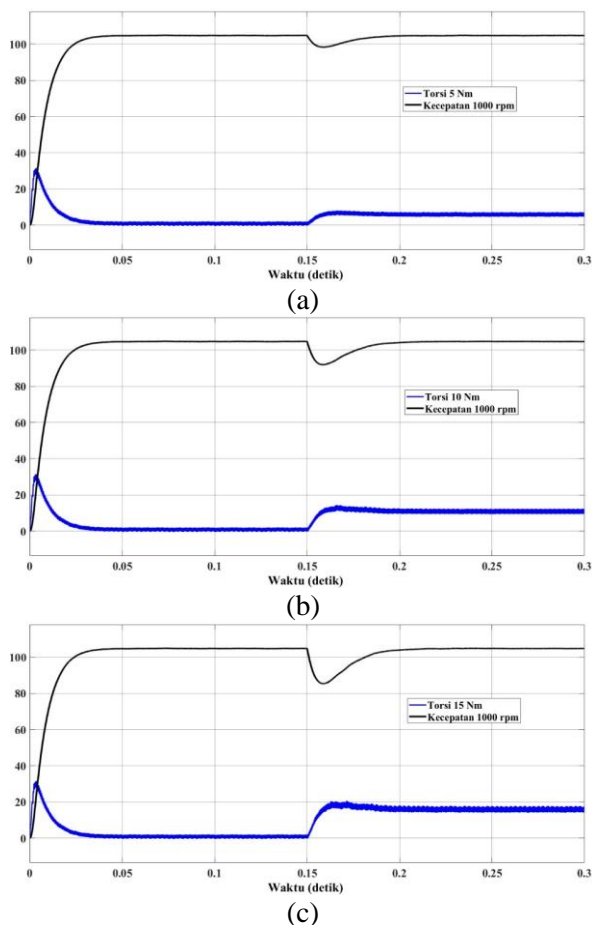
Pengujian kedua yaitu pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen dengan beban yang ditambahkan sebesar 5 Nm, 10 Nm, dan 15 Nm yang diberikan pada saat $t=0,15$ detik dengan kecepatan yang diberikan sebesar 500 rpm, 1000 rpm, dan 1500 rpm. Respon kecepatan dapat dilihat pada gambar 10-12.



Gbr 10. Kurva Respon Kecepatan dan Torsi dengan Beban pada Kecepatan 500 rpm, (a). Beban 5 Nm, (b). Beban 10 Nm (c). Beban 15 Nm

Pengujian pada saat kecepatan referensi yang diberikan sebesar 500 rpm dengan dengan memvariasikan beban sebesar 5 Nm,

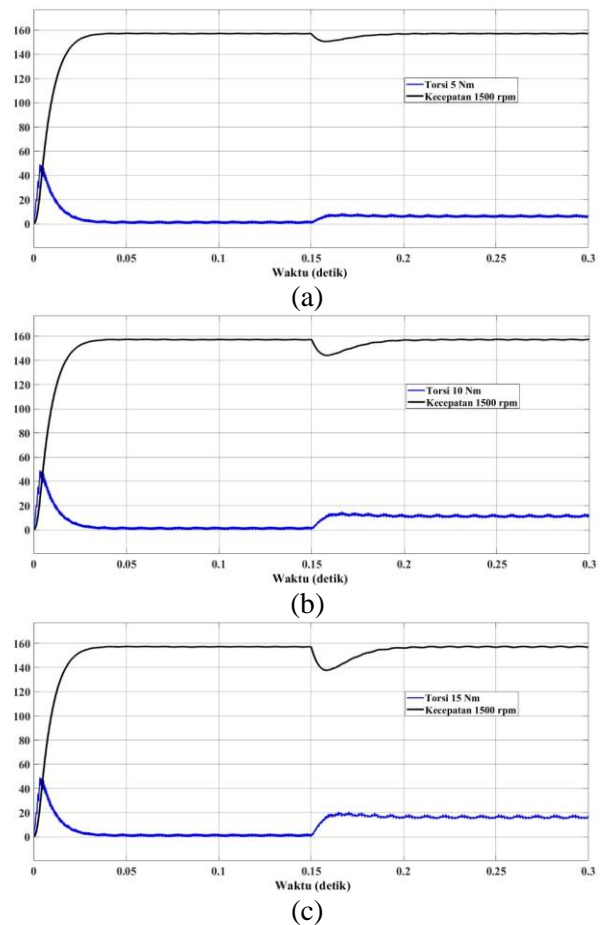
10 Nm, dan 15 Nm yang diberikan pada waktu $t = 0.15$ detik. Gambar 11 menunjukkan Ketika motor diberi beban sebesar 5 Nm pada waktu 0,15 detik sehingga kecepatan turun hingga 437,8 rpm, Ketika motor diberi beban sebesar 10 Nm kecepatan turun hingga 376,7 rpm, dan Ketika motor diberi beban sebesar 15 Nm kecepatan turun hingga 316 rpm. Pemberian beban pada motor akan mengalami penurunan kecepatan, namun dengan sistem kendali yang diusulkan pada penelitian ini, gangguan akan cepat diatasi sehingga Kembali kekecepatan referensinya.



Gbr 11. Kurva Respon Kecepatan dan Torsi dengan Beban pada Kecepatan 1000 rpm, (a). Beban 5 Nm, (b). Beban 10 Nm (c). Beban 15 Nm

Pengujian pada saat kecepatan referensi yang diberikan sebesar 1000 rpm dengan dengan memvariasikan beban sebesar 5 Nm, 10 Nm, dan 15 Nm yang diberikan pada waktu $t = 0.15$ detik. Gambar 12 menunjukkan Ketika motor diberi beban sebesar 5 Nm pada waktu 0,15 detik sehingga kecepatan turun hingga 939 rpm,

Ketika motor diberi beban sebesar 10 Nm kecepatan turun hingga 877,5 rpm, dan Ketika motor diberi beban sebesar 15 Nm kecepatan turun hingga 814,7 rpm.



Gbr 12. Kurva Respon Kecepatan dan Torsi dengan Beban pada Kecepatan 1500 rpm, (a). Beban 5 Nm, (b). Beban 10 Nm (c). Beban 15 Nm

Pengujian pada saat kecepatan referensi yang diberikan sebesar 1500 rpm dengan dengan memvariasikan beban sebesar 5 Nm, 10 Nm, dan 15 Nm yang diberikan pada waktu $t = 0.15$ detik. Gambar 12 menunjukkan Ketika motor diberi beban sebesar 5 Nm pada waktu 0,15 detik sehingga kecepatan turun hingga 1438 rpm, Ketika motor diberi beban sebesar 10 Nm kecepatan turun hingga 1376 rpm, dan Ketika motor diberi beban sebesar 15 Nm kecepatan turun hingga 1314,8 rpm.

Performa yang dihasilkan pada simulasi pengaturan kecepatan motor sinkron manet permanen dengan beban dapat dilihat pada Tabel 6, dimana beban yang diberikan sebesar 5 Nm, 10 Nm, dan 15 Nm pada waktu $t = 0.15$ detik dengan kecepatan

referensi sebesar 500 rpm, 1000 rpm, dan 1500 rpm. Pada Tabel dapat dilihat bahwa respon yang didapatkan Ketika penambahan beban tidak mengurangi performa dari kecepatan motor sinkron magnet permanen. Ketika beban diberikan pada waktu 0,15 detik terjadi penurunan kecepatan namun akan cepat kembali pada kecepatan referensi pada waktu $t = 0,19$ detik. Berdasarkan hasil ini dapat dikatakan bahwa sistem kendali *self tuning* dua derajat kebebasan dengan metode *fuzzy logic* dapat mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen walau diberi gangguan atau berbeban.

Tabel 7. Respon Kecepatan Motor Sinkron Magnet Permanen dengan Beban

Kecepatan (rpm)	Beban (Nm)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	Steady State Error (%)
500	5	0,017	0,027	0,444	0,2
	10	0,017	0,027	0,444	0,2
	15	0,017	0,0272	0,423	0,2
1000	5	0,016	0,027	0,505	0,13
	10	0,016	0,027	0,505	0,13
	15	0,016	0,027	0,5	0,13
1500	5	0,015	0,028	0,505	0,13
	10	0,015	0,028	0,484	0,21
	15	0,015	0,028	0,505	0,29

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini mengusulkan perancangan dua derajat kebebasan PI-P menggunakan metode *self tuning fuzzy logic* pada pengendalian kecepatan motor sinkron magnet permanen. Sistem kendali *self tuning fuzzy logic* akan mentuning nilai parameter PI-P secara otomatis yang akan digunakan sebagai parameter pengendalian. Dengan nilai parameter tersebut respon kecepatan dan respon torsi yang dihasilkan memiliki nilai *rise time*, *settling time* yang cepat dan nilai *overshoot* yang rendah. Dengan metode ini juga motor sinkron magnet permanen dapat dikendalikan dalam kondisi tanpa beban maupun dengan beban. Dengan demikian, dapat dikatakan sistem kendali *self tuning fuzzy logic* dapat mengendalikan motor sinkron magnet permanen dengan hasil *step response* dan *step disturbance*-nya sesuai dengan respon idealnya.

REFERENSI

- [1] *sFreedom Control of PMSM with Load Disturbance Compensation*, IEEE. - 2016. - pp. 220-224.
- [2] Sumardi Wahyudi, M. Rosaliana, A. Ajulian, B. Winardi, *Self-Tuning Fuzzy PID Design for BLDC Speed Control*, GRD Journals, 2018. - 4 : Vol. 3.
- [3] Oyas Wahyunggoro, Nordin Saas, *Development of Fuzzy-logic-based Self Tuning PI Controller for Servomotor*, intechopen. - 2010. - pp. 311-328.
- [4] Yuan Zhou, Wendong Shang, Mingshan Liu, Xiaokun Li, Ying Zeng, *Simulation of PMSM Vector Control Based on Self-Tuning Fuzzy PI Controller*, IEEE. - 2015. - pp. 609-613.
- [5] Mituhiko Araki, Hidefumi Taguchi, *Two-Degree-of-Freedom PID Controllers*, IICAS. - 2003.
- [6] Charles Ronald Harahap, Tsuyoshi Hanamoto, *Fictitious reference Iterative Tuning-Based Two-Degrees-of-Freedom Method for Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control Using FPGA for a High-Frequency SiC MOSFET Inverter*, applsci. - 2016.
- [7] Yan Gangfeng, *Simulation for the Vector Control Algorithm of Permanent Magnet Synchronous Motor*, IEEE. - 2015. - pp. 456-459.
- [8] Jiaxin Wu, Hanpei Wei, Yi Zhang, Haifeng Wei, *Sensorless Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Model Reference Adaptive System*, IEEE. - 2017. - pp. 2879-2883.
- [9] Oguz Tahmaz, Melih Nafi Ekim, Ali Bekir Yildiz, *Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor by a Two-Level SPWM Inverter*, IEEE. - 2020.
- [10] Xudong Wang, Risha Na, *Simulation of PMSM Field-Oriented Control Based on SVPWM*, IEEE. - 2009. - pp. 1465-1469.
- [11] S S Kulkarni, A D Thosar, *Mathematical Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Machine*, IEEE Vol. 1, No. 2. - 2013. - pp. 66-71.
- [12] C.R. Harahap R. Saito, H. Yamada, T. Hanamoto, *Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Using FPGA for High Frequency SiC MOSFET Inverter*, JESTEC. - 2014. - pp. 11-20.
- [13] Gaiceanu Marian, *Advanced Control of the Permanent Magnet Synchronous Motor*, IntechOpen, 2018.

- [14] Quang Nguyen Phung, *Vector ontrol of Three-Phase AC Machines*, German : Springer, 2008.
- [15] Taha A. Hussein Laith A. Mohammed Detailed, *Simulink implementation for induction motor control based on space vector pulse width modulation SVPWM* , IJEECS. - 2021. - pp. 1251-1262.
- [16] Prasanta Sarkar, Sourav Bhunia, *SVPWM Based Vector Control of PMSM Drive in Delta Domain*, ECCE. - 2017.