

# Analisis Komparatif Sistem Satu Derajat Kebebasan dan Dua Derajat Kebebasan pada Pengendalian Kecepatan Motor Sinkron Magnet Permanen dengan Metode *Self Tuning Fuzzy*

Nadia Julian Putri, M.T.<sup>1</sup>, Tiya Muthia, M.T.<sup>2</sup>, Nurrahma, S.Si., M.T.<sup>3</sup>, Fahrur Riza Priyana, M.T.<sup>4</sup>

Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, Bandar Lampung  
Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung 35145

<sup>1</sup>nadiajulian@eng.unila.ac.id

<sup>2</sup>tiyamuthia@eng.unila.ac.id

<sup>3</sup>nurrahma06@eng.unila.ac.id

<sup>3</sup>fahrurrizap@eng.unila.ac.id

**Intisari** — Penggunaan motor sinkron magnet permanen (PMSM) sangat berkembang pesat dalam industri dan juga kendaraan listrik. Perkembangan ini karena keunggulan dari PMSM dimana struktur yang sederhana, ukuran yang lebih kecil dan ringan, memiliki efisiensi yang tinggi, faktor daya yang baik, serta torsi yang optimal untuk kecepatan rendah. Untuk memastikan performa PMSM yang optimal, maka kecepatan PMSM harus dikendalikan dengan metode yang tepat. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah sistem kendali *self-tuning fuzzy logic*. Pada penelitian ini akan melakukan analisis komparatif antara sistem kendali satu derajat kebebasan berbasis *self-tuning* PI dan sistem kendali dua derajat kebebasan berbasis *self-tuning* PI-P untuk menentukan sistem kendali yang lebih stabil dan responsif. Perancangan dan simulasi sistem kendali ini dilakukan menggunakan *software* MATLAB/Simulink. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode *self tuning-fuzzy logic* 2 DOF menghasilkan performa yang lebih baik dari pada sistem kendali *self tuning-fuzzy logic* 1 DOF, dengan menghasilkan respon kecepatan yang mendekati kondisi ideal. Metode ini menghasilkan overshoot yang lebih rendah, yaitu sebesar 0.505% dengan nilai *settling time* yang lebih cepat sebesar 0.061 detik.

**Kata kunci** — Satu Derajat Kebebasan, Dua Derajat Kebebasan, *Self-Tuning Fuzzy*, SVPWM.

**Abstract** — Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs) have been rapidly growing in industrial and electric vehicle applications. This growth is driven by their advantages, including a simple structure, smaller and lighter design, high efficiency, good power factor, and optimal torque performance at low speeds. To ensure optimal PMSM performance, precise speed control is essential. One widely used control method is the self-tuning fuzzy logic control system. This study compares the single-degree-of-freedom (1 DOF) control system based on self-tuning PI and the two-degree-of-freedom (2 DOF) control system based on self-tuning PI-P to determine which system provides better stability and responsiveness. The control system is designed and simulated using MATLAB/Simulink. Simulation results indicate that the self-tuning fuzzy logic 2 DOF method outperforms the self-tuning fuzzy logic 1 DOF system, producing a speed response that closely approximates the ideal condition. This method achieves a lower overshoot of 0.505% and a faster settling time of 0.061 seconds, demonstrating its superior performance.

**Keywords**— One Degree of Freedom, Two Degree of Freedom, Self-Tuning Fuzzy, SVPWM.

## I. PENDAHULUAN

Penggunaan motor sinkron magnet permanen (PMSM) berkembang pesat dalam berbagai aplikasi industri dan kendaraan listrik. PMSM, yang merupakan salah satu jenis motor AC, memiliki beberapa keunggulan, seperti struktur yang sederhana, ukuran yang lebih ringkas dan ringan, efisiensi tinggi, serta faktor daya yang optimal. Selain itu, PMSM juga mampu menghasilkan

torsi yang besar, terutama pada kecepatan rendah. Jika dibandingkan dengan jenis motor listrik lainnya, PMSM menunjukkan performa dinamis yang lebih unggul, berkat desainnya yang lebih kompak dan tingkat efisiensi yang lebih tinggi.

Pengendalian pada kecepatan PMSM berfungsi untuk meningkatkan performa motor, meningkatkan kestabilan, kecepatan respon dan juga ketahanan terhadap gangguan ketika motor diberi beban. Metode

pengendalian kecepatan PMSM yang telah banyak diterapkan yaitu metode kendali berbasis PI konvensional. Namun, metode ini memiliki keterbatasan yaitu *overshoot* yang besar, *steady-state error* yang signifikan, serta ketidakmampuan untuk menangani variasi parameter sistem dan gangguan beban secara optimal. Oleh karena itu, berbagai metode adaptif telah dikembangkan untuk mengatasi kelemahan tersebut, salah satunya adalah *self-tuning fuzzy logic control*.

Beberapa penelitian telah dilakukan mengenai pendekatan dalam pengendalian kecepatan PMSM. Pada artikel dari jurnal [1] menerapkan metode *fuzzy logic* yang dapat menyesuaikan parameter pengendalian PI secara adaptif sesuai dengan konfigurasi motor dan *error* kecepatan. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem kendali *fuzzy logic* dapat mengurangi fluktuasi kecepatan dan meningkatkan stabilitas sistem kendali. Pada artikel dari jurnal [2] membandingkan sistem kendali *fuzzy* PI dan PI konvensional, di mana *fuzzy* PI memberikan respons kecepatan dan torsi yang lebih stabil dibandingkan PI konvensional.

Selain itu, pada artikel dari jurnal [3] membandingkan performa sistem kendali *fuzzy logic* tetap dengan sistem *self-tuning fuzzy*. Hasilnya menunjukkan bahwa *self-tuning fuzzy* lebih unggul dalam aspek *overshoot*, *rise time*, *settling time*, dan *recovery time* dalam kondisi transien maupun *steady state*. Penelitian lain [4] menunjukkan bahwa metode berbasis kecerdasan komputasional menghasilkan respons sistem yang lebih optimal dibandingkan dengan sistem kendali PI konvensional.

Dalam studi lain [5] menunjukkan bahwa sistem kendali PI berbasis *fuzzy* tetap mampu menjaga kestabilan kecepatan PMSM meskipun terjadi perubahan beban. Sementara itu, pada artikel dari jurnal [6] membuktikan bahwa penerapan *self-tuning fuzzy logic control* menghasilkan respons kecepatan motor yang lebih optimal, dengan *step response* dan *disturbance response* yang mendekati respons ideal, sehingga meningkatkan kestabilan dan kinerja sistem kendali PMSM secara signifikan.

Selain itu, pada artikel pada jurnal [7] menunjukkan bahwa metode kendali PID

konvensional memiliki keterbatasan dalam mencapai performa optimal baik dalam *tracking setpoint* maupun penekanan gangguan secara bersamaan. Studi ini menunjukkan bahwa metode *self-tuning fuzzy* dapat menghasilkan waktu penyetelan yang lebih singkat, *overshoot* yang kecil, dan ketahanan terhadap gangguan yang lebih kuat dibandingkan dengan kendali PID konvensional.

Berdasarkan berbagai penelitian sebelumnya, terlihat bahwa penerapan *self-tuning fuzzy logic* dalam pengendalian PMSM dapat meningkatkan kestabilan sistem dan respons kecepatan motor dibandingkan dengan metode konvensional. Namun, masih terdapat celah penelitian yang belum banyak dikaji, yaitu perbandingan antara sistem kendali satu derajat kebebasan (1 DOF) berbasis *self-tuning* PI dan dua derajat kebebasan (2 DOF) berbasis *self-tuning* PI-P. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi dan menganalisis performa kedua sistem kendali tersebut dalam hal performa kecepatan motor, stabilitas sistem.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam memahami perbedaan kinerja antara kendali 1 DOF dan 2 DOF, serta menjadi referensi untuk pengembangan lebih lanjut dalam pengendalian motor sinkron magnet permanen yang lebih adaptif dan andal.

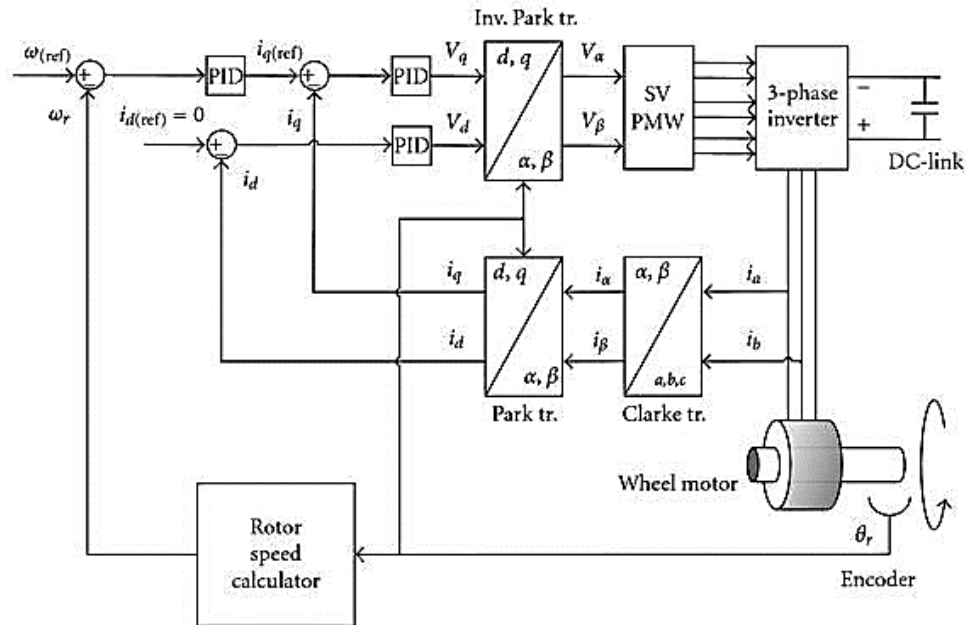
## II. METODE PENELITIAN

Motor Sinkron Magnet Permanen (PMSM) adalah motor listrik AC tiga fasa yang menggunakan magnet permanen pada rotor untuk menghasilkan fluks magnetik. Tidak seperti motor sinkron konvensional yang membutuhkan sistem eksitasi tambahan, PMSM memiliki efisiensi lebih tinggi karena mengurangi kebutuhan daya eksitasi. Selain itu, motor ini memiliki kepadatan daya yang tinggi, respons dinamis yang baik, serta torsi tinggi pada kecepatan rendah, sehingga banyak digunakan dalam aplikasi industri dan kendaraan listrik.

### A. Model Matematis dan Teknik Kendali PMSM

Untuk merancang sistem kendali PMSM, pada penelitian ini menggunakan sistem kendali vector control yang dapat dilihat pada

gambar 1. Pada sistem kendali vector control ini mengubah koordinat 3 fasa menjadi 2 fasa berdasarkan transformasi Park dan transformasi Clarke.



Gbr 1. Sistem Kendali Vector Control [8]

Persamaan matematis PMSM transformasi Clarke yaitu:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sehingga, persamaan arus  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah,

$$\begin{aligned} i_\alpha &= i_a \\ i_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}} i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b \end{aligned} \quad (2)$$

Persamaan matematis transformasi Park yaitu:

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p \cdot L_q & \omega_r \cdot L_d \\ -\omega_r \cdot L_q & R_s + p \cdot L_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_r \cdot \lambda_f \\ p \cdot \lambda_f \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Transformasi Park dan Clarke merupakan transformasi koordinat yang mengubah

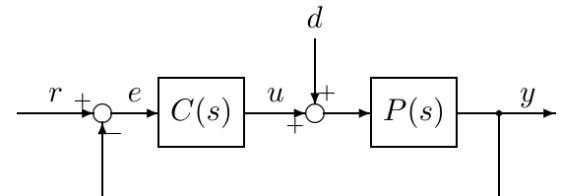
koordinat a-b-c menjadi koordinat d-q, sehingga persamaan torsi pada PMSM adalah:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_d I_q$$

### B. Sistem Kendali Self Tuning-Fuzzy Logic

Sistem kendali self tuning-fuzzy logic merupakan sistem kendali adaptif. Pada penelitian ini nilai parameter PI-P akan ditentukan menggunakan sistem kendali ini.

Sistem kendali satu derajat kebebasan (1 DOF) merupakan sistem kendali dengan satu fungsi transfer loop tertutup.

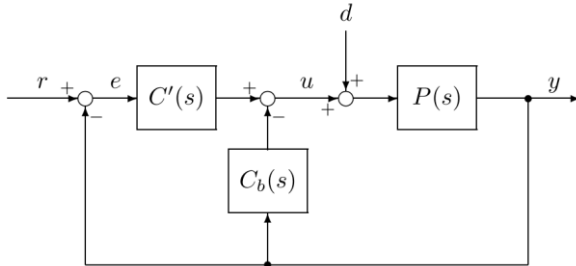


Gbr 2. Sistem Kendali 1 DOF [9]

Pada sistem kendali 1 DOF hanya ada satu pengendali yang menangani dua fungsi transfer yaitu  $G_{yr}$  dan  $G_{yd}$ , dimana persamaan kedua fungsi transfer ini adalah:

$$G_{yr1}(s) = \frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)}$$

Sistem kendali dua derajat kebebasan (2DOF) merupakan sistem kendali dengan dua fungsi *transfer loop* tertutup.



Gbr 3. Sistem Kendali 2DOF [9]

Pada penelitian ini digunakan sistem kendali 2 DOF dengan tipe *feedback*, dimana terdapat dua jalur kendali yaitu kompensator utama  $C'(s)$  dan kompensator umpan balik  $C_b(s)$ . Persamaan matematis dari sistem kendali 2 DOF adalah:

$$\begin{aligned} C'(s) &= K_p \left\{ 1 - \alpha + \frac{1}{T_1 s} + (1 - \beta) T_D D(s) \right\} \\ C_b(s) &= K_p \{ \alpha + \beta T_D S(s) \} \end{aligned}$$

Dengan dua kompensator sistem kendali 2 DOF dapat mengatur respon terhadap perubahan *setpoint* dan gangguan secara terpisah.

### C. Fuzzy Rules

Pada penelitian ini digunakan sistem kendali *fuzzy logic* dengan metode mamdani dengan *fuzzy rules* untuk parameter Kp dan Ki dapat dilihat pada tabel 1 dan 2. Masukan pada sistem kendali ini yaitu *error* dan *delta error*. Pada sistem kendali satu derajat kebebasan akan digunakan sistem kendali *fuzzy PI*, sedangkan pada sistem kendali dua derajat kebebasan menggunakan sistem kendali PI-P.

Tabel 1. *Fuzzy rules* parameter Kp

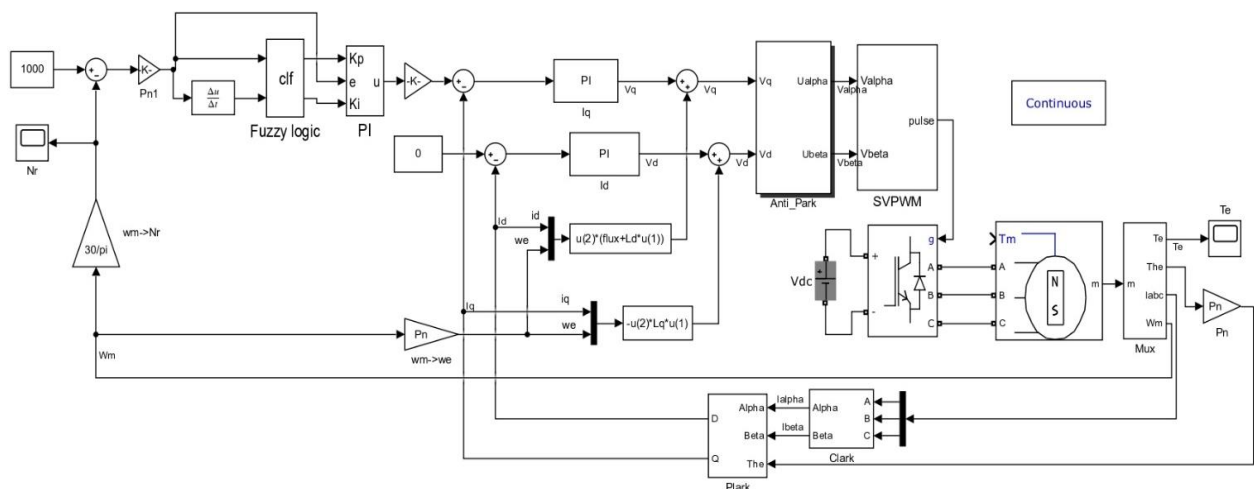
| $\epsilon/\Delta\epsilon$ | $\Delta\text{NB}$ | $\Delta\text{NS}$ | $\Delta\text{ZE}$ | $\Delta\text{PS}$ | $\Delta\text{PB}$ |
|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| NB                        | B                 | 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 2. *Fuzzy rules* parameter Ki

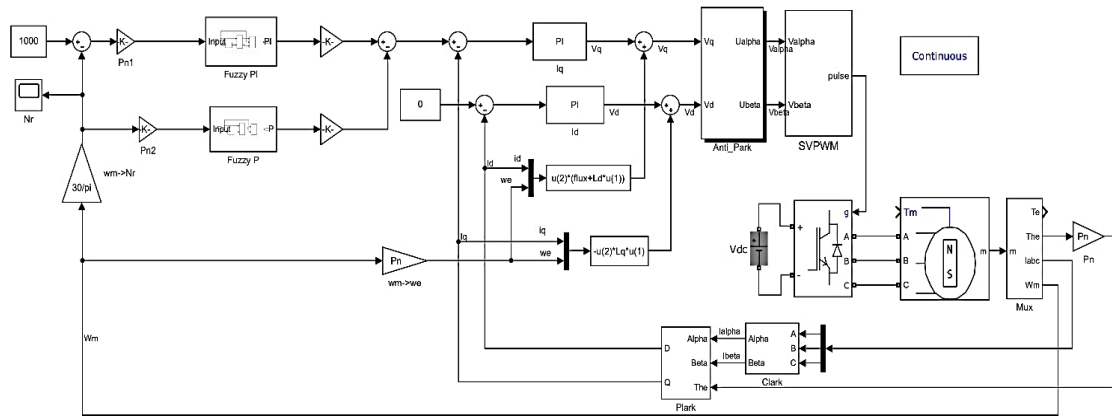
| e/ $\Delta$ e | $\Delta$ NB | $\Delta$ NS | $\Delta$ ZE | $\Delta$ PS | $\Delta$ PB |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| NB            | B           | S           | S           | S           | B           |
| NS            | S           | B           | S           | B           | B           |
| ZE            | B           | B           | B           | B           | B           |
| PS            | B           | B           | B           | B           | B           |
| PB            | B           | S           | S           | S           | B           |

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan *software* MATLAB Simulink untuk mensimulasikan sistem kendali PMSM. Simulasi ini dilakukan dengan membandingkan sistem kendali satu derajat kebebasan dengan dua derajat kebebasan.



#### Gbr 4. Sistem *selftuning* 1 DOF

Gbr 5. Sistem *selftuning* 2 DOF

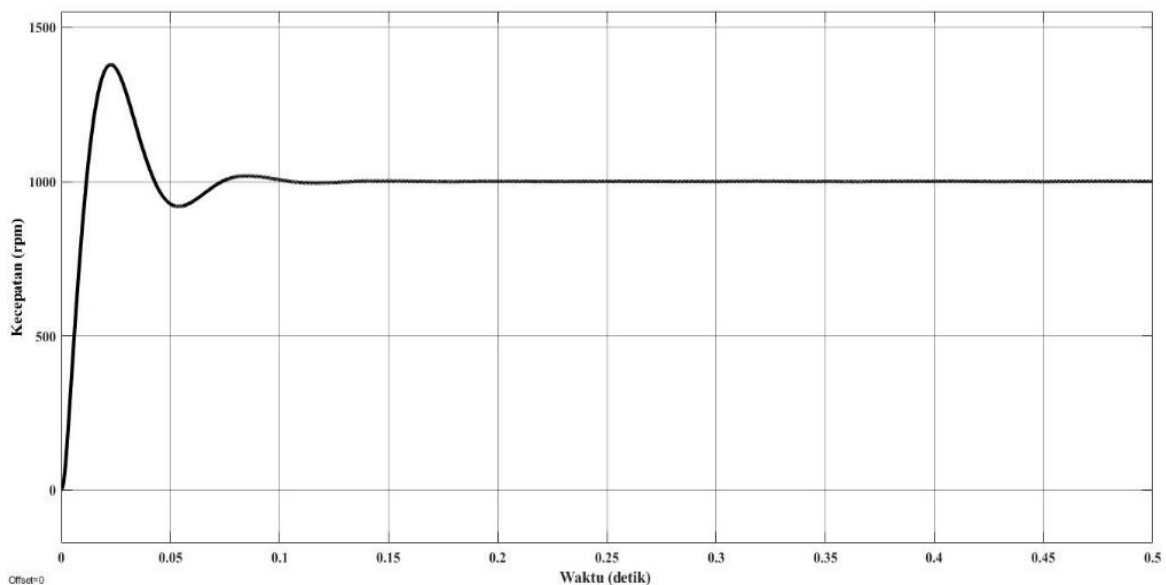
Spesifikasi PMSM yang digunakan pada simulasi ini dapat dilihat pada tabel 3.

#### A. Hasil Respon Sistem pada Sistem Kendali 1 DOF

Respon sistem berupa gelombang kecepatan PMSM dengan sistem kendali 1 DOF dapat dilihat pada gambar 6.

Tabel 3. Spesifikasi PMSM

|               |                             |
|---------------|-----------------------------|
| Resistansi    | 0.958 $\Omega$              |
| Induktansi d  | $5.25 \times 10^{-3}$ H     |
| Induktansi q  | $12 \times 10^{-3}$ H       |
| Momen Inersia | 0.003 J(Kg.m <sup>2</sup> ) |
| Tipe Rotor    | Salient Pole                |



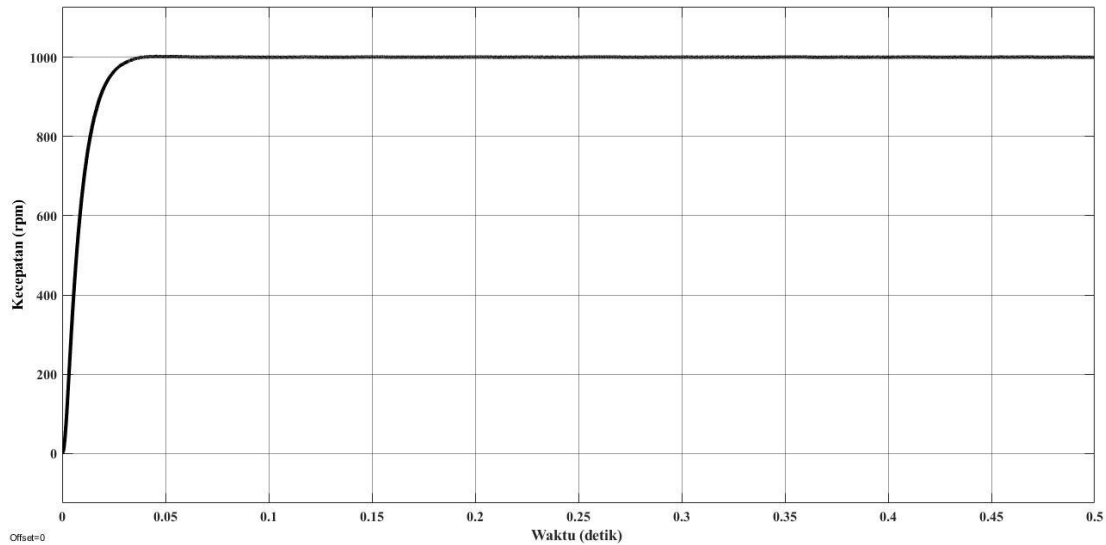
Gbr 6. Respon sistem kecepatan pada sistem kendali 1 DOF

Kecepatan referensi pada simulasi ini yaitu 1000 rpm, simulasi dilakukan tanpa diberi gangguan atau beban pada motor. Pada sistem kendali 1 DOF respon sistem terdapat *overshoot* dengan kecepatan puncak adalah 1379 rpm, kemudian waktu yang dibutuhkan respon sistem mulai mencapai kondisi *steady state* adalah sekitar 0.1 detik dengan waktu simulasi totalnya adalah 0.5 detik. Nilai overshoot sebesar 38% merupakan nilai yang tinggi dan ini menunjukkan bahwa sistem

kendali 1 DOF kurang optimal dalam mengurangi lonjakan kecepatan pada awal sistem. Respon sistem seperti ini dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem kendali motor dalam aplikasi nyata.

#### B. Hasil Respon Sistem pada Sistem Kendali 2 DOF

Pada sistem kendali 2 DOF, hasil respon sistem menunjukkan peningkatan performa dibandingkan dengan sistem kendali 1 DOF.



Gbr 7. Respon sistem kecepatan pada sistem kendali 2 DOF

Kecepatan puncak yang dicapai pada sistem kendali ini adalah sebesar 1002 rpm, yang berarti bahwa *overshoot* hanya sebesar 0.505%, nilai *overshoot* ini jauh lebih rendah dibandingkan sistem kendali 1 DOF. Selain itu, *settling time* berkurang menjadi 0.061 detik, yang menunjukkan bahwa sistem kendali 2 DOF dapat mencapai kestabilan sistem lebih cepat dan lebih responsif dibandingkan dengan sistem kendali 1 DOF.

pada 2 DOF menunjukkan bahwa sistem lebih mampu mengendalikan lonjakan kecepatan awal, dimana ini penting bagi aplikasi motor listrik. *Settling time* pada sistem kendali 2 DOF lebih singkat menunjukkan sistem lebih cepat mencapai kondisi *steady state* setelah perubahan *setpoint*, sehingga sistem kendali ini lebih cocok digunakan pada aplikasi dinamika tinggi.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, sistem kendali dua derajat kebebasan (2 DOF) berbasis *self tuning-fuzzy logic* terbukti memberikan performa respon sistem yang lebih unggul dibandingkan dengan sistem kendali satu derajat kebebasan (1 DOF) pada pengendalian kecepatan PMSM. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *overshoot* yang lebih kecil, *settling time* yang lebih cepat, dan respon sistem yang lebih stabil pada sistem kendali 2 DOF.

Sistem kendali 2 DOF ini juga dapat meningkatkan presisi dalam mengikuti kecepatan referensi dan menghasilkan respons yang lebih stabil. Dengan demikian, penerapan sistem kendali 2 DOF *self tuning-fuzzy logic* dapat menjadi solusi yang lebih efektif dalam meningkatkan performa dan kestabilan pada sistem kendali PMSM.

Tabel 4. Nilai Respon Sistem

| No. | Respon Sistem      | Sistem Kendali         |                       |
|-----|--------------------|------------------------|-----------------------|
|     |                    | Satu Derajat Kebebasan | Dua Derajat Kebebasan |
| 1.  | Delay Time (s)     | 0.0059                 | 0.0069                |
| 2.  | Rise Time (s)      | 0.012                  | 0.04                  |
| 3.  | Peak Time (s)      | 0.023                  | 0.046                 |
| 4.  | Settling Time (s)  | 0.105                  | 0.061                 |
| 5.  | Overshoot (%)      | 38.194                 | 0.505                 |
| 6.  | Nilai Puncak (rpm) | 1379                   | 1002                  |

Berdasarkan hasil simulasi, sistem kendali 2 DOF lebih baik dalam kestabilan sistem dan respon sistem dibandingkan dengan sistem kendali 1 DOF. *Overshoot* yang lebih rendah

## REFERENSI

- [1] C. Mingkai and Y. Yanjun, "Variable Parameter PI Control based on Fuzzy Logic Strategy for Dual-Winding PMSM," *2021 IEEE 4th Student Conference on Electric Machines and Systems (SCEMS)*, Huzhou, China, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/SCEMS52239.2021.9646082.
- [2] B. Sonkriwal, P. R. D and H. Tiwari, "Analysis of FUZZY-PI and PI Control Strategies for Permanent Magnetic Synchronous Motor Drive," *2023 Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)*, Trichirappalli, India, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEEICT56924.2023.10157901.
- [3] N. Farah *et al.*, "A Novel Self-Tuning Fuzzy Logic Controller Based Induction Motor Drive System: An Experimental Approach," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 68172-68184, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2916087.
- [4] Nicola, M., & Nicola, C. I. (2021). Tuning of PI Speed Controller for PMSM Control System Using Computational Intelligence. *Proceedings of 2021 21st International Symposium on Power Electronics, Ee 2021*. <https://doi.org/10.1109/Ee53374.2021.9628297>.
- [5] Vu Quynh, N., & Llopis-Albert, C. (2020). The Fuzzy PI Controller for PMSM's Speed to Track the Standard Model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1698213>.
- [6] Harahap, C. R., Endah Komalasari, & Nadia Julian Putri. (2023). Perancangan Self Tuning Dua Derajat Kebebasan dengan Metode Fuzzy Logic pada Pengendalian Kecepatan Motor Sinkron Magnet Permanen Menggunakan Metode Vector Control. *Electrician: Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro*, 17(3), 253-261. <https://doi.org/10.23960/elc.v17n3.2483>.
- [7] N. Dong, X. Li and Z. Chen, "Research on two-degree-of-freedom PID controller of permanent magnet synchronous motor based on fuzzy inference," *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney, NSW, Australia, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEMS.2017.8056263.
- [8] Oliveira, J. G., Schettino, H., Gama, V., Carvalho, R., & Bernhoff, H. (2012). Implementation and control of an AC/DC/AC converter for double wound flywheel application. *Advances in Power Electronics*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/604703>.
- [9] Araki, M., & Taguchi, H. (2003). Two-Degree-of-Freedom PID Controllers. In *International Journal of Control, Automation, and Systems* (Vol. 1, Issue 4).