

# PERANCANGAN KONTROLER LOGIKA FUZZY BERBASIS MIKROKONTROLER ATMEGA32 SEBAGAI KENDALI KECEPATAN MOTOR *BRUSHLESS* DC (BLDC)

Rio Dwirahayu<sup>\*)</sup>, Budi Setiyono, and Sumardi

Program Studi Sarjana Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

<sup>\*)</sup>E-mail: riodwirahayu@gmail.com

## Abstrak

Motor induksi dan motor *Direct Current* (DC) merupakan jenis motor listrik yang banyak digunakan dalam industri manufaktur, namun penggunaannya banyak digantikan oleh motor *Brushless Direct Current* (BLDC) seiring perkembangan teknologi. Motor BLDC memiliki biaya perawatan murah, kecepatan tinggi, efisiensi tinggi. Kesulitan dalam merancang pengendali motor BLDC adalah melibatkan proses yang kompleks sehingga sulit dimodelkan dengan model matematika biasa. Maka dari itu diperlukan suatu metode pengendalian motor BLDC yang mampu mengatasi kesulitan tersebut, salah satunya dengan Kontroler Logika *Fuzzy* (FLC). FLC dapat dilakukan secara otomatis tanpa melakukan pemodelan sistem. FLC memiliki kemampuan menghasilkan kinerja sistem yang memuaskan dan kemudahan dalam komputasi. Penelitian ini membahas perancangan Kontroler Logika *Fuzzy* berbasis mikrokontroler ATmega32 sebagai pengendali kecepatan motor BLDC. Variabel masukan FLC berupa *error* dan  $\Delta error$  sedangkan variabel keluarannya adalah  $\Delta PWM$ . Kinerja kontroler dianalisis berdasarkan parameter respon kecepatan melalui pengujian struktur dan parameter FLC pada variasi pengaturan kecepatan motor. Hasil pengujian dengan kecepatan tetap 2000-2500 RPM menunjukkan bahwa struktur dan parameter FLC yang dirancang dan diimplementasikan pada mikrokontroler ATmega32 untuk mengendalikan kecepatan motor BLDC dapat menghasilkan kinerja respon kecepatan motor yang stabil dengan rata-rata waktu kenaikan  $t_r$  dan waktu tunak  $t_s$  masing-masing sebesar 1,31 detik dan 5,03 detik, rata-rata galat keadaan tunak sebesar 1,56%.

*Kata kunci: Motor Brushless DC, Kontroler Logika Fuzzy, Mikrokontroler ATmega32*

## Abstract

Induction motors and Direct Current (DC) motors are types of electric motors widely used in industrial manufacturing, but have been replaced by Brushless Direct Current (BLDC) motors. BLDC motors have lower maintenance costs, higher speed and higher motor efficiency. BLDC motor controllers are more difficult to design and implementation. This controller involves the complex process with unusual mathematical models. Fuzzy Logic Controller (FLC) is a method of controlling BLDC motors that allows solving difficult the complex process. FLC can be done automatically without the modeling system. FLC has the ability to provide great system performances. This research discusses about design and implementation of FLC based ATmega32 microcontroller to control the speed of BLDC motors. System performances are analyzed based on the speed response. The results at constant speed of BLDC motors settings between 2000-2500 RPM shows the structure of FLC that was designed and implemented on ATmega32 microcontroller achieve stable speed response performance in a short time. The average of rise time  $t_r$  and settling time  $t_s$  respectively by 1,31 seconds and 5,03 seconds with steady-state error is 1.56%. FLC effective to control the speed of BLDC motors in the range of 1800-2500 RPM speed settings with the source voltage 11,5V.

*Keywords: Brushless DC motors, Fuzzy Logic Controller, Microcontroller ATmega32*

## 1. Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan teknologi di dunia industri manufaktur, maka kebutuhan motor listrik yang memiliki efisiensi tinggi, torsi yang tinggi, kecepatan yang tinggi

dan dapat divariasikan, serta biaya perawatan yang murah semakin meningkat. Motor induksi dan motor *Direct Current* (DC) banyak digunakan dalam dunia industri manufaktur. Diketahui bahwa jenis motor DC memiliki efisiensi yang tinggi namun memiliki biaya perawatan yang tinggi [1]. Sedangkan motor induksi memiliki biaya

perawatan yang lebih murah dan memiliki kecepatan yang lebih tinggi namun motor induksi memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan motor DC dan cepat panas [1]. Oleh karena itu untuk memenuhi semua kebutuhan akan penggunaan motor listrik maka digunakan motor *Brushless Direct Current* (BLDC). Dibandingkan dengan motor DC, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih murah dan kecepatan yang lebih tinggi [1]. Dibandingkan dengan motor induksi, BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi [1].

Motor BLDC adalah jenis motor listrik sinkron. Motor BLDC lebih efisien dalam mengkonversi listrik menjadi energi mekanik dari motor DC [2]. Pada motor BLDC, arus dan torsi motor, tegangan dan kecepatan motor selalu linear [3]. Dalam praktiknya, merancang pengendali motor BLDC melibatkan proses yang kompleks, seperti pemodelan sistem, pemilihan metode kontrol. Saat ini, beberapa solusi kontrol modern ditawarkan untuk merancang pengendali kecepatan motor BLDC [4].

Salah satu metode dalam mengendalikan kecepatan motor listrik adalah menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC). FLC terbukti efektif untuk proses yang kompleks, non-linear dan proses yang tidak mungkin diterapkan dengan sistem kontrol berbasis model biasa [4]. Namun, FLC tidak akan mendapatkan hasil yang optimal hanya dengan metode *trial-and-error* [4]. Beberapa upaya telah dilakukan untuk memecahkan masalah ini dengan menyederhanakan penalaan parameter *fuzzy* dan mengembangkan aturan-aturan baru dalam FLC sehingga FLC dapat optimal dan mampu diterapkan pada semua aplikasi bidang kontrol.

Tujuan penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan sistem pengendali kecepatan motor BLDC berbasis Kontroler Logika *Fuzzy* ke dalam mikrokontroler ATmega32 sehingga menghasilkan kecepatan motor BLDC yang stabil berdasarkan parameter respon kecepatan motor BLDC. Perancangan ini dapat memberikan pertimbangan pilihan metode pengendalian kecepatan motor BLDC. Penelitian ini telah mempertimbangkan segala kelebihan FLC yang digunakan dalam pengendalian kecepatan motor listrik dan kemudahan penerapan FLC.

## 2. Metode

### 2.1. Karakteristik Kontrol

Dalam sistem pengendalian motor BLDC, seringkali karakteristik kinerja sistem kontrol dinyatakan dalam bentuk respon transien terhadap masukan sistem. Karakteristik kinerja sistem kontrol yang diinginkan dinyatakan dalam bentuk besaran kawasan waktu. Untuk memudahkan perbandingan respon transien berbagai keadaan pada sistem, hal yang biasa dilakukan adalah menggunakan syarat awal standar bahwa sistem mula-

mula dalam keadaan diam sehingga keluaran dan semua turunan waktunya pada awal respon sama dengan nol [5]. Selanjutnya karakteristik respon secara mudah dapat dilakukan.

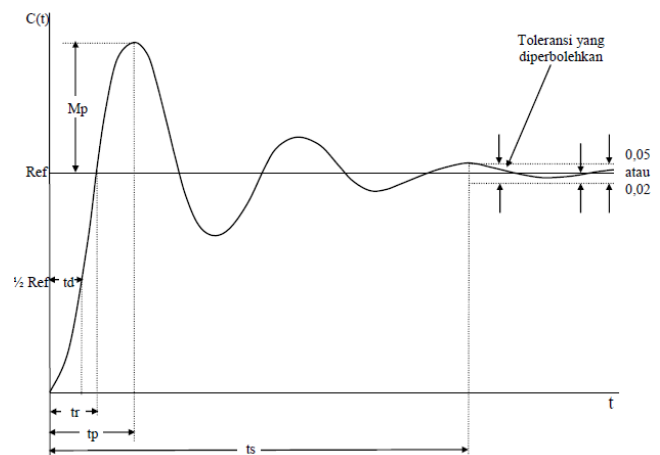
Respon transien sistem kontrol praktis sering menunjukkan osilasi teredam sebelum mencapai keadaan tunak [5]. Dalam menentukan karakteristik respon transien sistem pengendali kecepatan motor BLDC berbasis FLC terhadap masukan referensi kecepatan motor BLDC, biasanya dicari parameter berikut [5] :

- Waktu tunda ( $t_d$ ), adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai setengah harga naik yang pertama kali.
- Waktu naik ( $t_r$ ), adalah waktu yang diperlukan respon untuk naik. Untuk sistem orde kedua redaman kurang, biasanya digunakan waktu 0 – 100%.
- Waktu puncak ( $t_p$ ), adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali.
- (Persen) lewatan maksimum ( $M_p$ ), adalah harga puncak maksimum dari kurva respon yang diukur dari satu. Jika harga keadaan tunak respon tidak sama dengan satu, maka biasa digunakan persen lewatan maksimum. Parameter ini didefinisikan seperti persamaan 1.  

$$\text{Persen lewatan maksimum} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (1)$$

Besar  $M_p$  secara langsung menunjukkan kestabilan relatif sistem.
- Waktu penetapan ( $t_s$ ), adalah waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan menetap dalam daerah sekitar harga akhir yang ukurannya sebesar 2%.

Apabila diilustrasikan, parameter-parameter tersebut dapat dibuat seperti Gambar 1.

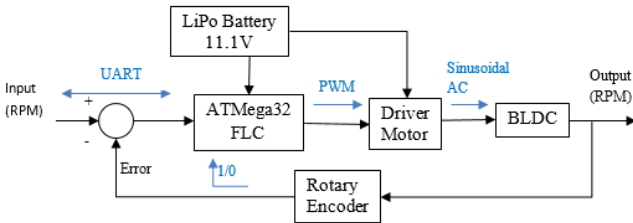


Gambar 1. Grafik Ilustrasi Karakteristik kontrol [5]

### 2.2. Perancangan Sistem

2.2.1. Gambaran Umum Sistem

Secara umum rencana dari sistem pengendalian kecepatan motor BLDC yang dibuat pada penelitian ini dapat dilihat pada diagram blok sistem sesuai Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Diagram Blok Perancangan Sistem

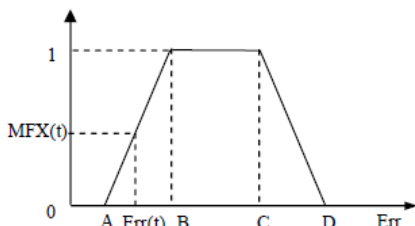
Gambar 2 menunjukkan bahwa mikrokontroler ATmega32 dirancang sebagai pengendali kecepatan motor BLDC berbasis FLC. Hasil keluaran sistem yaitu berupa kecepatan aktual setelah proses logika fuzzy yang dikirimkan kembali ke komputer dalam bentuk grafik respon transien sistem secara *real-time*, dan data dapat disimpan untuk keperluan analisis.

2.2.2. Perancangan Kontroler Logika Fuzzy

Perancangan kontroler logika fuzzy dilakukan dengan melakukan perubahan nilai rentang dan bentuk fungsi keanggotaan yang digunakan, baik masukan maupun keluaran.

Prosedur logika fuzzy yang digunakan meliputi proses fuzzifikasi, evaluasi *rule*/aturan dengan metode Mamdani dan proses defuzzifikasi menggunakan metode *Centre of Area* (COA). Data diambil berdasarkan perubahan variasi referensi dan jenis fuzzifikasinya. Untuk memperoleh tanggapan kecepatan yang sesuai, dilakukan dengan perubahan fungsi keanggotaan dengan rentang nilai tertentu. Data kecepatan dimasukkan ke dalam sistem pengendali agar diperoleh data koreksi kecepatan (*error*) dan selisih koreksi kecepatan ( $\Delta error$ ), sedangkan keluaran berupa *error* yang semakin kecil.

Pengubahan data kedalam bentuk fuzzy ini digunakan analisis grafik sumbu X sebagai masukan tegas dan sumbu Y sebagai hasil perhitungan dari fungsi keanggotaan setiap masukan seperti pada Gambar 3.



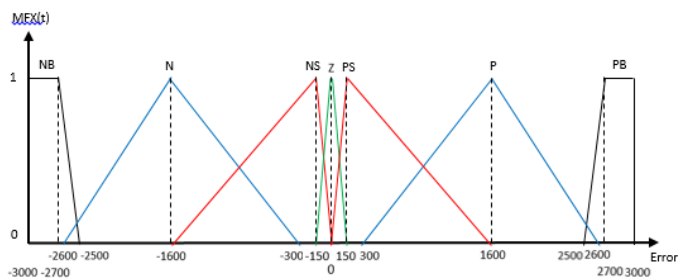
Gambar 3. Fungsi Keanggotaan *error* dan  $\Delta error$

Jika pada masing-masing label *error* dan  $\Delta error$  mempunyai bentuk fungsi keanggotaan seperti pada Gambar 4 dan A, B, C, D serta  $Err(t)$  merupakan variabel maka nilai dari  $MFx(t)$  dapat cari dengan persamaan 2.

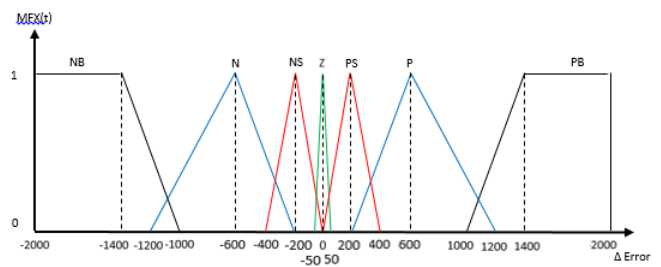
$$MFx(t) = \begin{cases} 0, & \text{Jika } Err(t) \leq A \\ \frac{Err(t)-A}{B-A}, & \text{Jika } A \leq Err(t) \leq B \\ 1, & \text{Jika } B \leq Err(t) \leq C \\ \frac{D-Err(t)}{D-C}, & \text{Jika } C \leq Err(t) \leq D \\ 0, & \text{Jika } D \leq Err(t) \end{cases} \quad (2)$$

Sistem logika fuzzy yang dirancang mempunyai 2 masukan yaitu *error* dan  $\Delta error$  serta 1 keluaran yaitu  $\Delta PWM$ . Dalam sistem ini dirancang fungsi keanggotaan *error*,  $\Delta error$ , dan  $\Delta PWM$  dengan jumlah label 7 label yaitu NB (*Negative Big*), N (*Negative*), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), P (*Positive*), PB (*Positive Big*).

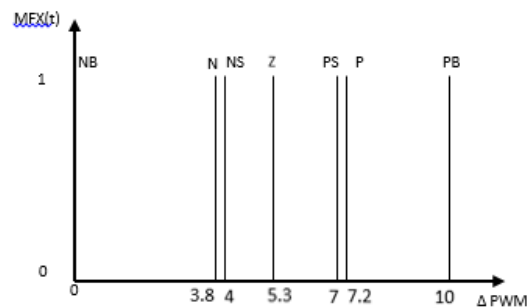
Fungsi keanggotaan masukan mempunyai bentuk trapesium dan segitiga serta keluaran mempunyai bentuk *singleton*. Gambar 4, Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan batasan-batasan fungsi keanggotaan *error*,  $\Delta error$ , dan  $\Delta PWM$ .



Gambar 4. Batasan Fungsi Keanggotaan *Error*



Gambar 5. Batasan Fungsi Keanggotaan  $\Delta Error$



Gambar 6. Batasan Fungsi Keanggotaan  $\Delta PWM$

Basis aturan merupakan keseluruhan aturan dari kombinasi dua masukan yang mungkin. Secara umum penentuan aturan-aturan ini yaitu:

- Jika besar *error* tidak sama dengan nol maka besarnya  $\Delta$ PWM sesuai dengan label pada *error*.
- Jika besar *error* sama dengan nol maka besarnya  $\Delta$ PWM sesuai label pada  $\Delta$ *error*.

Secara lengkap jumlah kombinasi yang mungkin dari dua himpunan masukan *fuzzy* pada perancangan sistem pengendali kecepatan motor BLDC dengan fungsi keanggotaan tujuh dikali tujuh adalah empat puluh sembilan aturan seperti pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Basis Aturan *Fuzzy*

$\Delta$ PWM	Error						
	NB	N	NS	Z	PS	P	PB
NB	NB	N	NS	NB	PS	P	PB
N	NB	N	NS	N	PS	P	PB
NS	NB	N	NS	NS	PS	P	PB
Z	NB	N	NS	Z	PS	P	PB
PS	NB	N	NS	PS	PS	P	PB
P	NB	N	NS	P	PS	P	PB
PB	NB	N	NS	PB	PS	P	PB

Pengendali logika *fuzzy* pada penelitian ini menggunakan metode defuzzifikasi *Centre of Area*. Metode ini terbukti mampu mengikuti referensi kecepatan yang diberikan [2][6][7]. Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil titik pusat daerah *fuzzy*, secara umum dirumuskan pada persamaan 3.

$$z_{coa} = \frac{\sum_{j=1}^7 z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^7 \mu(z_j)} \quad (3)$$

### 3. Hasil dan Analisa

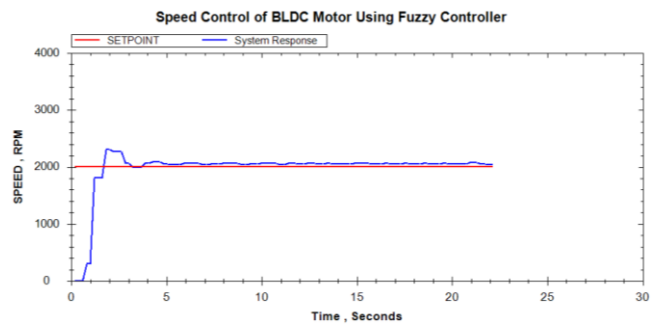
Hasil implementasi dari perancangan sistem pada penelitian ini adalah respon transien sistem berbentuk grafik dari pengujian variasi referensi kecepatan motor BLDC dan data diambil secara *real-time*. Grafik dan data dapat disimpan dalam bentuk *file* gambar yang nantinya akan dianalisis pengujian kinerja sistem. Parameter kestabilan sistem yang dianalisis diantaranya adalah waktu tunak  $t_s$ , waktu tunda  $t_d$ , waktu puncak  $t_p$ , waktu naik  $t_r$ , dan besar lewatan maksimum  $M_p$  dari respon transien sistem.

Pada pengujian ini dilakukan pengujian dengan jumlah label yang sama pada semua fungsi keanggotaan yaitu 7 label dan beberapa variasi referensi yaitu pada kecepatan 2000 RPM, 2100 RPM, 2200 RPM, 2300 RPM, 2400 RPM, dan 2500 RPM. Pada semua referensi diujikan batasan-batasan fungsi keanggotaan, basis aturan *fuzzy* metode defuzzifikasi yang sama. Metode defuzzifikasi yang digunakan adalah COA. Lama pengambilan data

pengujian dilakukan selama 25 detik dikarenakan sistem telah mencapai titik stabil sebelum 10 detik.

#### 3.1. Referensi 2000 RPM

Pada pengujian pertama dilakukan dengan memberikan referensi kecepatan tetap yaitu 2000 RPM. Kecepatan awal motor adalah 0 RPM. Respon sistem yang diharapkan adalah sistem dapat stabil pada referensi 2000 RPM dalam waktu yang singkat. Berikut didapatkan grafik respon sistem seperti pada Gambar 7.

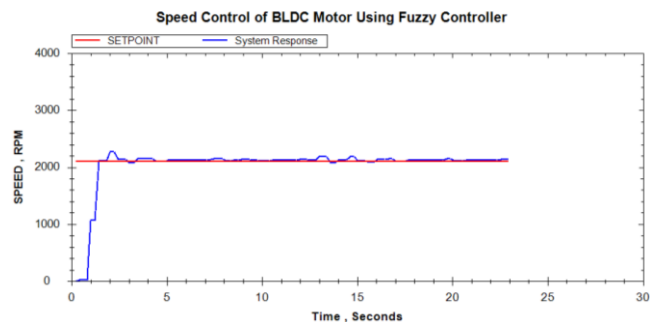


Gambar 7. Grafik Respon Sistem Referensi 2000 RPM

Pengujian dengan referensi tetap 2000 RPM sesuai Gambar 4 menghasilkan kecepatan motor yang stabil. Respon sistem dengan referensi 2000 RPM menghasilkan  $t_r$  selama 1,1 detik,  $t_p$  selama 1,7 detik,  $t_d$  selama 0,4 detik,  $t_s$  selama 4,5 detik. Pada respon sistem 2000 RPM menghasilkan lewatan maksimum  $M_p$  sebesar 17,5%.

#### 3.2. Referensi 2100 RPM

Pada pengujian pertama dilakukan dengan memberikan referensi kecepatan tetap yaitu 2100 RPM. Kecepatan awal motor adalah 0 RPM. Respon sistem yang diharapkan adalah sistem dapat stabil pada referensi 2100 RPM dalam waktu yang singkat. Berikut didapatkan grafik respon sistem seperti pada Gambar 8.



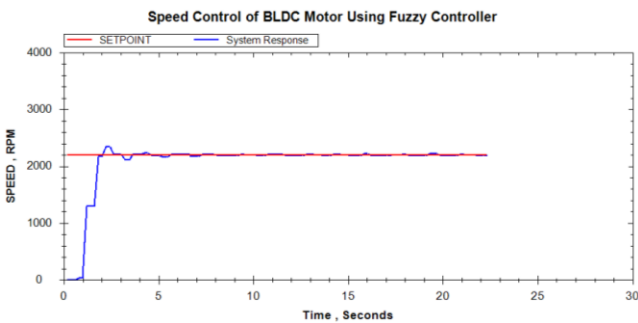
Gambar 8. Grafik Respon Sistem Referensi 2100 RPM

Pengujian dengan referensi tetap 2100 RPM sesuai Gambar 8 menghasilkan kecepatan motor yang stabil. Respon sistem dengan referensi 2100 RPM menghasilkan

$t_r$  selama 1,1 detik,  $t_p$  selama 1,7 detik,  $t_d$  selama 0,6 detik,  $t_s$  selama 4,6 detik. Pada respon sistem 2100 RPM menghasilkan lewatan maksimum  $M_p$  sebesar 8,3%.

### 3.3. Referensi 2200 RPM

Pada pengujian pertama dilakukan dengan memberikan referensi kecepatan tetap yaitu 2200 RPM. Kecepatan awal motor adalah 0 RPM. Respon sistem yang diharapkan adalah sistem dapat stabil pada referensi 2200 RPM dalam waktu yang singkat. Berikut didapatkan grafik respon sistem seperti pada Gambar 9.

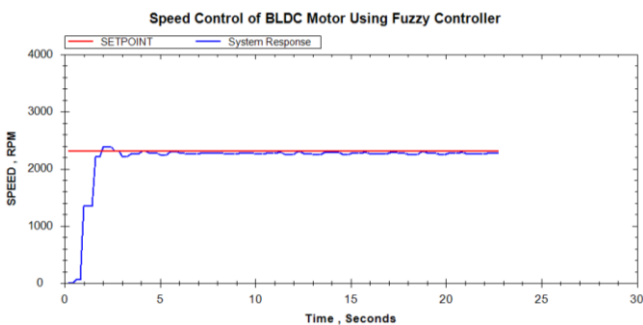


Gambar 9. Grafik Respon Sistem Referensi 2200 RPM

Pengujian dengan referensi tetap 2200 RPM sesuai Gambar 9 menghasilkan kecepatan motor yang stabil. Respon sistem dengan referensi 2200 RPM menghasilkan  $t_r$  selama 1,1 detik,  $t_p$  selama 1,6 detik,  $t_d$  selama 0,5 detik,  $t_s$  selama 5 detik. Pada respon sistem 2200 RPM menghasilkan lewatan maksimum  $M_p$  sebesar 6,8%.

### 3.4. Referensi 2300 RPM

Pada pengujian pertama dilakukan dengan memberikan referensi kecepatan tetap yaitu 2300 RPM. Kecepatan awal motor adalah 0 RPM. Respon sistem yang diharapkan adalah sistem dapat stabil pada referensi 2300 RPM dalam waktu yang singkat. Berikut didapatkan grafik respon sistem seperti pada Gambar 10.



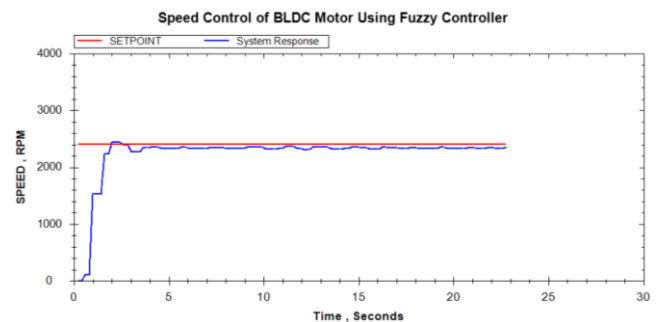
Gambar 10. Grafik Respon Sistem Referensi 2300 RPM

Pengujian dengan referensi tetap 2300 RPM sesuai Gambar 10 menghasilkan kecepatan motor yang stabil.

Respon sistem dengan referensi 2300 RPM menghasilkan  $t_r$  selama 1,5 detik,  $t_p$  selama 1,8 detik,  $t_d$  selama 0,5 detik,  $t_s$  selama 5,5 detik. Pada respon sistem 2300 RPM menghasilkan lewatan maksimum  $M_p$  sebesar 4,34%.

### 3.5. Referensi 2400 RPM

Pada pengujian pertama dilakukan dengan memberikan referensi kecepatan tetap yaitu 2400 RPM. Kecepatan awal motor adalah 0 RPM. Respon sistem yang diharapkan adalah sistem dapat stabil pada referensi 2400 RPM dalam waktu yang singkat. Berikut didapatkan grafik respon sistem seperti pada Gambar 11.

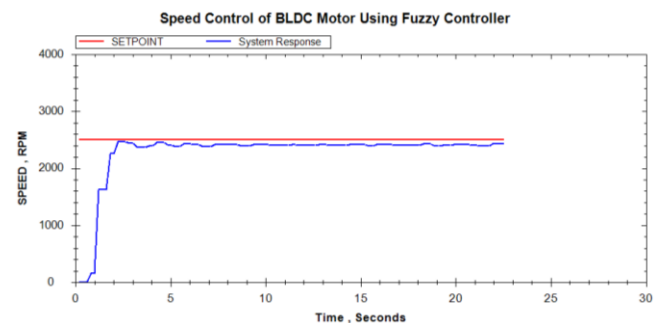


Gambar 11. Grafik Respon Sistem Referensi 2400 RPM

Pengujian dengan referensi tetap 2400 RPM sesuai Gambar 11 menghasilkan kecepatan motor yang stabil. Respon sistem dengan referensi 2400 RPM menghasilkan  $t_r$  selama 1,6 detik,  $t_p$  selama 1,8 detik,  $t_d$  selama 0,5 detik,  $t_s$  selama 4,1 detik. Pada respon sistem 2400 RPM menghasilkan lewatan maksimum  $M_p$  sebesar 2,08%.

### 3.6. Referensi 2500 RPM

Pada pengujian pertama dilakukan dengan memberikan referensi kecepatan tetap yaitu 2500 RPM. Kecepatan awal motor adalah 0 RPM. Respon sistem yang diharapkan adalah sistem dapat stabil pada referensi 2500 RPM dalam waktu yang singkat. Berikut didapatkan grafik respon sistem seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik Respon Sistem Referensi 2500 RPM

Pengujian dengan referensi tetap 2500 RPM sesuai Gambar 12 menghasilkan kecepatan motor yang stabil. Respon sistem dengan referensi 2500 RPM menghasilkan  $t_r$  selama 1,5 detik,  $t_p$  selama 1,5 detik,  $t_d$  selama 0,5 detik,  $t_s$  selama 6,5 detik. Pada respon sistem 2500 RPM tidak menghasilkan lewatan maksimum  $M_p$ .

Dari semua pengujian dengan variasi referensi tetap kecepatan motor dari 2000 RPM sampai 2500 RPM maka dapat dibuat Tabel 2 yang berisi parameter respon transien dari sistem sebagai berikut.

Tabel 2. Parameter Respon Transien Variasi Referensi

Kontrol	Parameter	Setting point (RPM)					
		2000	2100	2200	2300	2400	2500
Fuzzy	$t_r$ (s)	1,1	1,1	1,1	1,5	1,6	1,5
	$t_p$ (s)	1,7	1,7	1,6	1,7	1,8	1,5
	$t_d$ (s)	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
	$t_s$ (s)	4,5	4,6	5	5,5	4,1	6,5
	$M_p$ (%)	17,5	8,3	6,8	4,34	2,08	0
	Error (%)	1,75	0,95	0,56	1,52	1,6	3

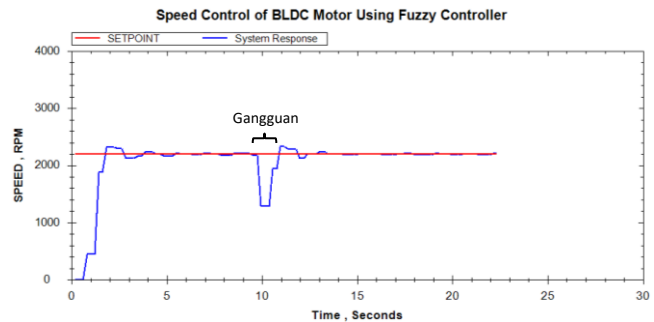
Dari Tabel 2 terlihat bahwa nilai  $t_r$  terkecil pada variasi referensi 2000 RPM sampai 2200 RPM selama 1,1 detik. Dari semua variasi referensi kecepatan menghasilkan nilai  $t_p$  dan  $t_d$  yang dapat dikatakan sama atau jika di rata-rata masing-masing 1,7 detik dan 0,5 detik. Waktu penetapan  $t_s$  dari variasi referensi kecepatan yang diujikan menghasilkan rata-rata selama 5 detik. Sedangkan lewatan maksimum terbesar berada pada kecepatan 2000 RPM sebesar 17,5% dari referensi yang diberikan.

Penggunaan metode defuzzifikasi COA pada FLC dalam mengendalikan kecepatan motor BLDC pada penelitian ini diperoleh hasil bahwa metode defuzzifikasi COA mampu mengendalikan sistem dengan rata-rata persentase *steady-state error* sebesar 1,56% atau dibawah 2%. Apabila dibandingkan variasi referensi tetap kecepatan motor BLDC yang diujikan dapat dilihat dari bentuk tanggapan transien sistem dan parameter kriteria kestabilan sistem maka kecepatan 2200 RPM sesuai Gambar 9 adalah keadaan stabil terbaik dikarenakan pada kecepatan 2200 RPM FLC mampu mempertahankan referensi kecepatan motor yang diberikan dengan *steady-state error* dan waktu naik  $t_r$  terkecil masing-masing sebesar 0,56% dan selama 1,1 detik.

### 3.7. Pengujian Sistem Terhadap Gangguan

Pada pengujian sistem terhadap gangguan, FLC diuji dengan sebuah gangguan yang menyerupai sinyal uji *impuls*. Sinyal uji *impuls* berguna untuk menguji respon sistem terhadap gangguan sesaat yang muncul tiba-tiba dan untuk menguji sistem yang responnya berubah dalam selang waktu yang sangat singkat. Gangguan yang dimaksud dalam pengujian ini adalah dengan memberikan pengereman sesaat pada motor BLDC sehingga kecepatan

motor BLDC turun drastis bahkan berhenti kemudian motor BLDC berputar kembali sesuai referensi yang diberikan seperti semula. Berikut respon sistem FLC terhadap gangguan dengan referensi kecepatan motor 2200 RPM seperti pada Gambar 13.



Gambar 13. Grafik Respon Sistem Referensi 2200 RPM Terhadap Gangguan

Pengujian dengan gangguan pada referensi 2200 RPM mengakibatkan kecepatan motor BLDC turun menjadi 1300 RPM, didapatkan respon sistem  $t_r$  selama 0,6 detik dan  $t_s$  selama 3,1 detik. Artinya untuk kembali mencapai referensi 2200 RPM dari kecepatan 1300 RPM, motor BLDC membutuhkan waktu naik selama 0,6 detik dan waktu tunak selama 3,1 detik. Dengan demikian kinerja FLC dalam mengendalikan kecepatan motor BLDC bekerja dengan baik karena mampu mempertahankan kembali referensi akibat adanya gangguan terhadap sistem dan mampu merespon gangguan dengan baik.

Dari grafik dan data hasil keseluruhan pengujian sistem pengendali FLC dalam mengendalikan kecepatan motor BLDC terlihat bahwa sistem tidak mengalami osilasi. Hasil ini dikarenakan pada saat kecepatan motor BLDC semakin mendekati dari referensi yang diberikan, FLC mampu mengambil keputusan yang tepat dengan memberikan perubahan keluaran sistem yang semakin kecil.

## 4. Kesimpulan

Dari penelitian, dapat disimpulkan bahwa kontroler logika fuzzy yang diimplementasikan ke dalam mikrokontroler ATmega32 untuk mengatur kecepatan motor BLDC dapat menghasilkan kinerja respon kecepatan motor yang stabil dilihat dari respon kecepatan motor BLDC yang telah memenuhi kriteria kestabilan sistem. Pengujian variasi referensi kecepatan dihasilkan respon sistem struktur pengendali fuzzy rata-rata waktu kenaikan ( $t_r$ ) 1,3 detik, waktu tunak ( $t_s$ ) 5,03 detik dengan kriteria 2% dari keadaan *steady-state*, lewatan maksimum  $M_p$  sebesar 6,5% dengan rata-rata *steady-state error* 1,56%.

## **Referensi**

- [1]. Dharmawan, Abe., "Pengendalian Motor Brushless DC dengan Metode PWM Sinusoidal Menggunakan ATmega16", Tugas Akhir, Teknik Elektro Universitas Indonesia, Jakarta, Indonesia, 2009.
- [2]. Yulianta, Agung Dwi., "Pengendalian Kecepatan Motor Brushless DC (BLDC) menggunakan Metode Logika Fuzzy", Jurnal Sains, Teknologi dan Industri, vol. 12, no. 2, hal. 248-254, Juni. 2015.
- [3]. Mosavi, M. R., Rahmati, A., dan Khoshsaadat A., "Design of Efficient Adaptive Neuro Fuzzy Controller Based on Supervisory Learning Capable for Speed and Torque Control of BLDC Motor", PRZGLAD ELEKTROTECHNICZHY (Electrical Review), R 88, 2012.
- [4]. Arulmozhiyal, R., dan Kandiban R., "Design of fuzzy PID controller for brushless DC motor", Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2012 International Conference on, IEEE, 2012.
- [5]. Ogata, Katsuhiko., "Alih bahasa Edi Leksono, Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan) Jilid 1", Erlangga, Jakarta, 1994.
- [6]. Sutikno, "Perbandingan Metode Defuzzifikasi Aturan Mamdani Pada Sistem Kendali Logika Fuzzy", Tugas akhir, Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia, 2005.
- [7]. Ana Ratna Wati, D., "Sistem Kendali Cerdas", Graha Ilmu, Yogyakarta, 2010.
- [8]. Lee, C. C., "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic controller Part I", IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, vol. 20, no. 2, Maret. 1990.
- [9]. Lee, C. C., "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic controller Part II", IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, vol. 20, no. 2, Maret. 1990.
- [10]. Aissaoui, A. G., dan Tahour A., "Application of Fuzzy Logic in Control of Electrical Machines", Fuzzy Logic-Controls, Concepts, Theories and Applications, Maret. 2012.