

Pengendalian Kecepatan Motor *Brushless DC (BLDC)* menggunakan Metode Logika *Fuzzy*

Agung Dwi Yulianta¹, Sasongko Pramono Hadi², Suharyanto³
^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No.2 Kampus UGM Yogyakarta 55281
Email: agungdy@gmail.com, sasongko@ugm.ac.id, suharyanto@ugm.ac.id

(Received: 10 April 2015; Revised: 15 Juni 2015; Accepted: 27 Juni 2015)

ABSTRAK

Motor BLDC banyak dioperasikan di lingkungan industri, terutama industri yang mudah terbakar dan efisiensinya lebih tinggi dari pada motor induksi. Logika fuzzy digunakan sebagai salah satu metode pengendalian kecepatan motor. Perancangan pengendali fuzzy dilakukan dengan simulasi kecepatan keluaran berdasar referensi pengendalian fuzzy sehingga diperoleh hasil yang optimal. Beberapa jenis defuzzifikasi yang digunakan adalah COA/centroid, bisektor, MOM, LOM, dan SOM. Metode transien dan perhitungan ISE digunakan untuk menganalisis optimalisasi perancangan pengendalian. Pada penelitian, dihasilkan bahwa metode defuzzifikasi yang mampu mengikuti setting kecepatan yang diberikan adalah metode COA. Pengujian perubahan kecepatan dari 1000 rpm sampai 2000 rpm dihasilkan karakteristik tanggapan sistem kendali PID konvensional dengan rata-rata waktu kenaikan (tr) 0.29 sekon, waktu tunak (ts) 0.9 sekon, overshoot sebesar 8.63 %, dan persentase ISE sebesar 98.19%. Pada struktur fuzzy dihasilkan rata-rata waktu kenaikan (tr) 0.25 sekon, waktu tunak (ts) 0.27 sekon, overshoot sebesar 0.15 % dan persentase ISE sebesar 99.36%.

Kata Kunci: BLDC, kontrol, logika *fuzzy*, motor

ABSTRACT

BLDC motors were operated in many industrial environments, especially flammable industry. Besides, it possessed higher efficiency than induction motors. Fuzzy logic was used as one of the motor speed controlling methods. The design of fuzzy controllers was done by simulating the output speed based on fuzzy controlling reference in order to obtain optimal control results. Several types of defuzzification used were COA / centroid, bisector, MOM, LOM, and SOM. Transient and ISE calculation methods were used to analyze the design optimization of control. The result showed that defuzzification method was able to follow the speed setting that was provided by COA method. The testing on changes of the speed setting from 1000 rpm to 2000 rpm showed the response characteristics of conventional PID control system with an average value of the rise time(tr) 0.29 second, steady time(ts) 0.9 second, overshoot 8.63%, and the percentage of ISE 98.19%. While results generated on fuzzy control system were average value of rise time(tr) 0.25 second, steady time(ts) 0.27 second, overshoot 0.15% and the percentage of ISE 99.36%.

Keywords: *BLDC, control, fuzzy logic, motor*

Pendahuluan

Latar Belakang

Kini telah berkembang mesin arus searah, terutama untuk mesin yang kecil, di antaranya sebagai motor kendali, ataupun motor servo. Mesin penggerak bertenaga elektrik yang populer adalah motor arus searah tanpa sikat (motor BLDC), karena memiliki kelebihan dibanding dengan jenis mesin penggerak bertenaga elektrik lainnya. Kelebihan motor BLDC adalah efisiensi lebih tinggi daripada motor induksi, dimensi lebih kecil

daripada motor arus searah konvensional. Selain itu, dengan tidak adanya sikat, maka perawatan menjadi ringan, hampir tidak ada derau/*noise*, dan bisa dioperasikan pada lingkungan yang mudah terbakar. Kelebihan lain dibanding mesin induksi adalah tanggapannya lebih cepat, umur pakai lebih lama, dan mempunyai rentang kecepatan yang lebar [1].

Sistem motor BLDC mengacu pada konsep rangkaian elektromekanik sistem penggerak yang tanggap dan hemat energi. Sistem tersebut dibangun melalui perpaduan elektromekanik, rangkaian

elektronika, sistem sensor dan rangkaian logika atau algoritma kendali mikro. Pada bagian elektromekanik menonjolkan konsep keunggulan motor DC konvensional dalam hal pengendalian, dan keunggulan motor sinkron 3 fasa dalam hal efisiensi. Pada bagian elektronika terdiri dari saklar statik dengan memanfaatkan komponen transistor untuk mengubah tegangan searah menjadi tegangan bolak balik (*inverter*). Pengaturan tegangan keluaran inverter dilakukan dengan mengatur lebar pulsa pensaklaran inverter disesuaikan dengan kebutuhan kecepatan atau torsi beban [2].

Motor BLDC sudah banyak digunakan digunakan di industri seperti industri otomotif, konsumsi, kesehatan, otomasi industri dan instrumentasi. Dengan adanya keperluan pemakaian motor BLDC di berbagai bidang tersebut, maka perlu diatur kecepatannya agar sesuai dengan tanggapan kecepatan yang diharapkan.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya dapat dirumuskan permasalahannya yaitu bagaimana merancang sebuah pengendali kecepatan motor BLDC dengan logika *fuzzy* dengan struktur yang optimal.

Tujuan Penelitian

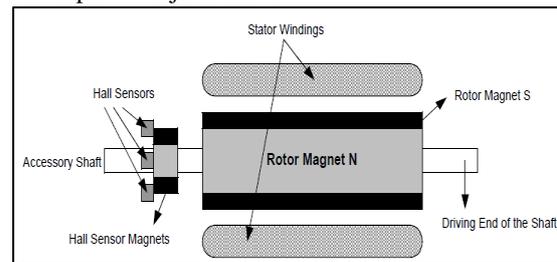
Tujuan penelitian ini untuk melakukan perancangan kendali kecepatan motor BLDC dengan logika *fuzzy* dan mengetahui parameter-parameter yang digunakan untuk pengendalian kecepatan motor BLDC agar sesuai dengan yang diharapkan.

Tinjauan Pustaka

Pada perancangan sistem kontrol dengan menggunakan logika *fuzzy* terdapat tiga proses, yaitu fuzzifikasi, logika pengambilan keputusan/*evaluasi rule* dan defuzzifikasi. Masing-masing proses tersebut akan mempengaruhi respon sistem yang dikendalikan. Defuzzifikasi merupakan langkah terakhir dalam suatu sistem logika *fuzzy* dengan bertujuan mengkonversi setiap hasil dari inference engine yang diekspresikan dalam bentuk *fuzzy* set ke suatu bilangan real. Hasil konversi tersebut merupakan aksi yang diambil oleh sistem kendali logika *fuzzy*. Karena itu, pemilihan metode defuzzifikasi yang sesuai juga turut mempengaruhi sistem kendali logika *fuzzy* dalam menghasilkan respon yang optimum. Dalam penelitian ini menggunakan metode Mamdani dan diperoleh hasil bahwa metode defuzzifikasi yang terbaik sangat tergantung pada perancangan fungsi keanggotaan dan basis aturan *fuzzy* yang digunakan [3].

Pada Gambar 1 menunjukkan bagian melintang dari motor BLDC dengan rotor yang memiliki N dan S magnet permanen. Sensor hall

terletak di bagian stasioner motor. Untuk menyederhanakan proses pemasangan sensor Hall kestator, beberapa motor memiliki magnet sensor Hall padarotor, selain magnet rotor utama. Oleh karena itu, setiap kali rotor berputar, magnet sensor Hall memberikan efek yang sama seperti magnet utama. Sensor Hall biasanya dipasang di board dan sifatnya tetap untuk penutup di ujung blok mesin. Hal ini memungkinkan pengguna untuk menyesuaikan perakitan lengkap sensor Hall, menyelaraskan dengan magnet rotor, dan untuk mencapai kinerja terbaik.



Gambar 1 Kontruksi motor BLDC [4]

Motor BLDC tidak menggunakan sikat-sikat untuk komutasinya dan memiliki kecepatan yang sinkron antara medan putar stator dan rotornya. Rotor motor BLDC adalah magnet permanen sehingga tidak diperlukan kumparan penguat dan tidak ada arus beban yang mengalirinya. Metode pengaturan kecepatan pada motor BLDC ada 2 macam, yaitu pengaturan tegangan catu dan pengaturan percepatan sudut fasa (*phase advance angle*). Pada pengaturan percepatan sudut fasa, kecepatan optimal dapat diperoleh ketika arus dan ggI bersamaan dalam waktu atau dengan kata lain sefase [5].

Metode Penelitian

Karakteristik kontrol

Dalam pengendalian motor BLDC, terdapat parameter yang dapat sebagai dasar dari optimalisasi kinerjanya. Parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut [1].

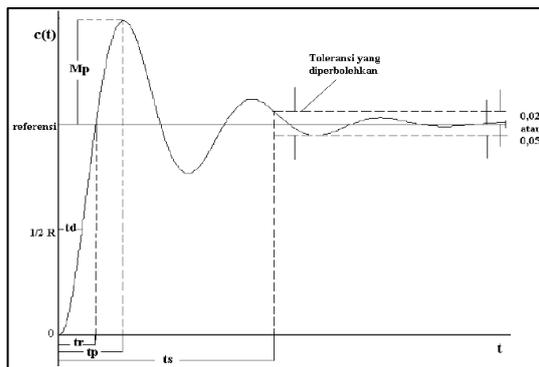
- Waktu tunda (t_d) adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai setengah nilai akhir yang pertama kali.
- Waktu naik (t_r) adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk naik dari 10 sampai 90%, 5 sampai 95%, atau 0 sampai 100% dari nilai akhirnya. Untuk sistem orde kedua redaman kurang, biasanya digunakan waktu 0 – 100%. Untuk sistem redaman lebih, biasanya digunakan waktu naik 10 – 90%.
- Waktu puncak (t_p) adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali.
- Persen lewatan maksimum (M_p) adalah nilai relatif yang menunjukkan nilai perbandingan antara nilai maksimum tanggapan yang

melewati nilai *steady state*/keadaan tunak dengan keadaan mantap. Parameter M_p menunjukkan kestabilan relatif sistem. Parameter ini didefinisikan seperti (1).

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

- e. Waktu keadaan tunak, *steady state* (t_s) adalah waktu yang diperlukan kurva tanggapan untuk mencapai keadaan mantap dan menetap dalam daerah sekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan presentase mutlak dari harga akhir (biasanya 5% atau 2%).

Apabila diilustrasikan, parameter-parameter tersebut dapat dibuat seperti Gambar 2.



Gambar 2. Grafik ilustrasi karakteristik kontrol

Perancangan struktur PID

Perancangan program PID pada *Matlab Simulink*, dilakukan dengan metode *autotune* yang ada pada *matlab* sehingga diperoleh nilai K_p , K_i , dan K_d dengan nilai yang optimal.

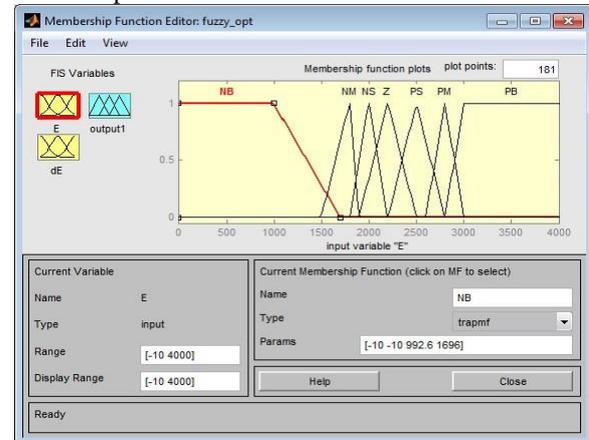
Perancangan struktur fuzzy

Perancangan struktur *fuzzy* pada *Matlab Simulink* dilakukan dengan melakukan perubahan nilai rentang dan bentuk dari fungsi keanggotaan yang digunakan, baik masukan maupun keluaran. Karakteristik yang umum dipergunakan dalam suatu pengendalian sistem adalah stabilitas, sensitivitas, kecepatan tanggapan, dan akurasi [6].

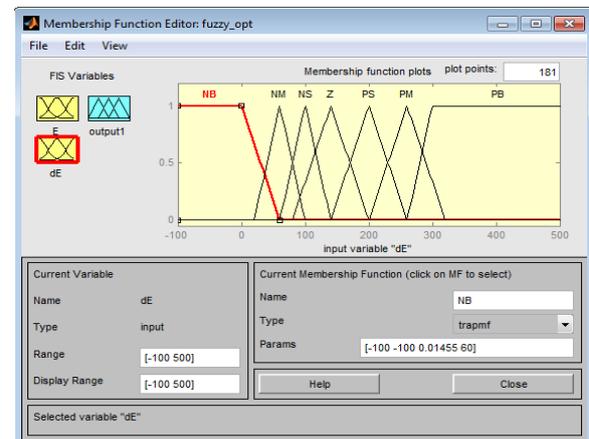
Prosedur logika *fuzzy* yang digunakan meliputi proses *fuzzyfikasi*, *evaluasi rule* dengan metode Mamdani dan proses *defuzzyfikasi*. Data diambil berdasarkan perubahan dari variasi *setting point* dan jenis *fuzzyfikasinya*. Untuk memperoleh tanggapan kecepatan yang sesuai, dilakukan dengan perubahan fungsi keanggotaan dengan rentang nilai tertentu. Data kecepatan dimasukkan ke dalam sistem pengendali agar diperoleh data koreksi kecepatan (*error*) dan selisih koreksi kecepatan (*derror*), sedangkan output berupa *error* yang semakin kecil [7].

Rentang masukan *error* dirancang dengan nilai (-10 – 4000), rentang input *derror* dengan nilai (-100 – 500), dan rentang output dirancang dengan

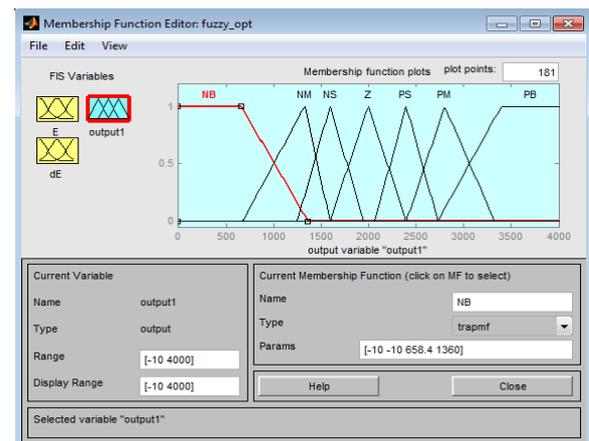
nilai (-10 – 4000). Bentuk fungsi keanggotaan masukan *error* ditunjukkan pada Gambar 3 dan masukan *derror* pada Gambar 4, sedangkan keluaran pada Gambar 5.



Gambar 3. Perancangan masukan error



Gambar 4. Perancangan input derror



Gambar 5. Perancangan output

Evaluasi aturan adalah proses mengevaluasi derajat keanggotaan setiap fungsi keanggotaan masukan ke dalam basis aturan yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini menggunakan 7 (tujuh) variasi masukan, sehingga akan diperoleh 49

(empat puluh sembilan) aturan pengendalian *fuzzy* dan dapat dibuat seperti Tabel 1.

Tabel 1. basis aturan pengendalian dengan logika *fuzzy*

Error \ dError	NB	N	NS	Z	PS	P	PB
NB	NB	NB	NB	NB	N	NS	Z
N	NB	NB	NB	N	NS	Z	PS
NS	NB	NB	N	NS	Z	PS	P
Z	NB	N	NS	Z	PS	P	PB
PS	N	NS	Z	PS	P	PB	PB
P	NS	Z	PS	P	PB	PB	PB
PB	Z	PS	P	PB	PB	PB	PB

Perancangan pengendali *fuzzy* dilakukan dengan simulasi kecepatan keluaran berdasar kecepatan referensi pengendalian *fuzzy* sehingga diperoleh hasil pengendalian yang optimal. Kendali *fuzzy* ini menggunakan beberapa jenis defuzzifikasi, yaitu COA/centroid, bisector, MOM, LOM, dan SOM [8].

Metode defuzzifikasi pada komposisi aturan MAMDANI, antara lain:

a. Metode Centroid (*Composite Moment*)

Metode ini paling konsisten dan memiliki tinggi serta lebar total daerah *fuzzy* yang sensitif. Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil titik pusat (z) daerah *fuzzy*. Secara umum dirumuskan (1) dan (2) sebagai berikut.

$$z = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \quad (1)$$

$$z = \frac{\int_z z \mu(z) dz}{\int_z \mu(z) dz} \quad (2)$$

b. Metode Bisektor

Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai pada domain *fuzzy* yang memiliki nilai keanggotaan setengah dari jumlah total nilai keanggotaan pada daerah *fuzzy*. Secara umum dituliskan i berikut.

$$z_p \leftrightarrow \int_{R1}^p \mu(z) dz = \int_p^{Rn} \mu(z) dz \quad (3)$$

c. Metode Mean of Maximum (MOM)

Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai rata-rata domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum. Secara umum dituliskan sebagai berikut.

$$z = \text{mean}\{z_i | \mu(z_i) = \max \mu\} \quad (4)$$

d. Metode Largest of Maximum (LOM)

Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai terbesar dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

Secara umum LOM dituliskan sebagai berikut.

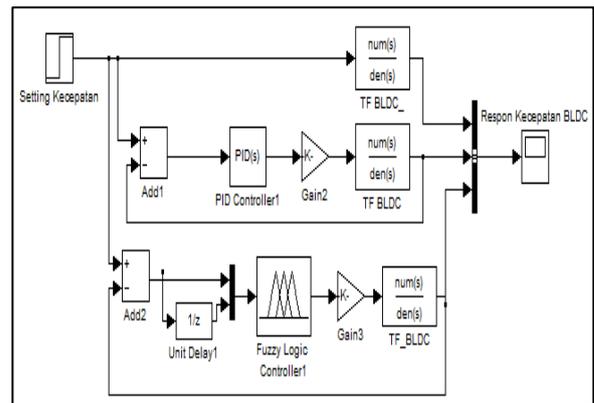
$$z = \max\{abs(z_i) | \mu(z_i) = \max \mu\} \quad (5)$$

e. Metode Smallest of Maximum (SOM)

Pada metode ini, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil nilai terkecil dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum. Secara umum dituliskan sebagai berikut.

$$z = \min\{abs(z_i) | \mu(z_i) = \max \mu\} \quad (6)$$

Perancangan pengendali *fuzzy* dirancang seperti Gambar 6.



Gambar 6. Perancangan pengendali *fuzzy*

Rancangan yang dibuat menggunakan program Matlab Simulink. Eksperimen ini membutuhkan pemodelan motor BLDC yang telah diteliti oleh peneliti sebelumnya yang menggunakan metode identifikasi model ARX (*autoregressive exogenous*) dan kriteria pemilihan persamaannya menggunakan kriteria FPE (*final prediction error*) [1].

Dari penelitian tersebut, diperoleh persamaan fungsi transfer (7).

$$TF = \frac{0.05264}{z^2 - 0.5243z - 0.4271} \quad (7)$$

Untuk analisis sistem kendali kecepatan motor BLDC, lebih mudah apabila dilakukan pada sistem kontinyu, sehingga persamaan (7) perlu diubah menjadi fungsi kontinyu. Untuk mengubah persamaan tersebut diperlukan penentuan waktu pencuplikan yang mengacu pada persamaan (8).

$$T \leq 0.1\tau \text{ detik} \quad (8)$$

Dengan konstanta waktu motor BLDC adalah $\tau = 0.6$, maka diperoleh $T \leq 0.06$ detik. Jika motor BLDC dioperasikan pada kecepatan maksimum sebesar 3000 rpm, maka kecepatan sudut (ω) motor BLDC dapat dihitung $\omega = 2\pi.n / 60 = 2\pi.3000 / 60 = 100\pi$

dengan pembatasan waktu cuplikan $(2\pi/T) \geq 2 \omega$, maka diperoleh $T \leq 0.01$ dan waktu sampling 0.01 detik.

Dari parameter-parameter tersebut diperoleh fungsi transfer dalam bentuk fungsi kontinyu (9) sebagai berikut,

$$TF = \frac{-212s + 39125}{17s^2 + 10592s + 36123} \quad (9)$$

Integral Square Error (ISE)

Salah satu indikator analisis kinerja sistem pengendali adalah dengan kriteria integral galat minimum (ISE). Sistem kendali yang memiliki umpan balik dapat mengurangi galat suatu sistem pada setiap variabel dan akan mencapai nilai nol dengan cepat, sehingga kriteria yang digunakan untuk mengukur kualitas tanggapan sistem akan memperhitungkan variasi galat selama rentang waktu tertentu. ISE merupakan integrasi kuadrat dari kesalahan dari waktu ke waktu. Dengan galat-galat yang kecil saja dapat menghasilkan ISE yang besar. Sistem kendali yang ditentukan untuk meminimalkan ISE akan cenderung menghilangkan kesalahan besar dengan cepat, tapi akan mentolerir kesalahan kecil yang bertahan untuk jangka waktu yang lama [9].

Analisis ISE menggunakan persamaan fungsi sistem kontinyu (10) atau sistem diskret (11).

$$ISE = \int e(t)^2 dt \quad (10)$$

$$ISE = \sum_{t=0}^n e_t^2 ; t=0,1,2,3,\dots,n \quad (11)$$

Dengan e_t adalah error kecepatan pada saat t , yang merupakan selisih antara *setting* kecepatan dengan kecepatan aktual pada saat t .

Metode Analisis

Analisis data hasil pengujian dilakukan dengan cara melakukan simulasi algoritma *fuzzy*

yang optimal dengan fungsi keanggotaan tertentu yang menghasilkan fungsi respon yang optimal.

Analisis pengujian kinerja sistem tersebut berdasar parameter respon *transient* kecepatan motor BLDC, dan *integral square error* (ISE). Analisis respons *transient* dilakukan dengan menampilkan grafik hubungan kecepatan terhadap waktu. Analisis ISE untuk menilai kinerja pengendali berdasarkan error, yang dimulai dari kondisi peralihan (*transient*) sampai kondisi tunak [9]. Persamaan ISE yang digunakan persamaan (10) atau persamaan (11).

Pada panduan ini akan dijelaskan tentang penulisan *heading*. Jika *heading* anda melebihi satu, gunakan level kedua *heading* seperti di bawah ini.

Hasil dan Pembahasan

Pengujian perbedaan defuzzifikasi

Dari penelitian diperoleh perbedaan nilai parameter transien pada setiap jenis defuzzifikasi yang digunakan. Data yang diperoleh dibuat tabel untuk setiap jenis parameter yang dianalisis. Pada Tabel 2 menunjukkan bahwa rata-rata waktu keadaan tunak yang paling kecil adalah metode defuzzifikasi dengan MOM dengan waktu 0.14 sekon, sedangkan yang paling besar adalah dengan COA, yaitu 0.266 sekon, sedangkan waktu tunda rata-rata dan waktu naik rata-rata terkecil diperoleh dengan metode SOM dengan waktu 0.04 sekon dan 0.073 sekon.

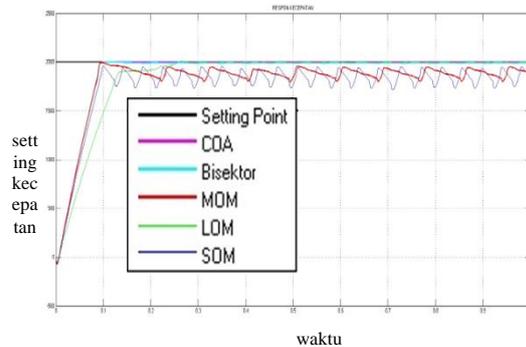
Tabel 2. Perbandingan parameter transien defuzzifikasi

Metode	Transien	Referensi (rpm)					Rata-rata
		1000	1200	1500	1800	2000	
COA	td(s)	0.047	0.047	0.047	0.047	0.048	0.047
	tr(s)	0.400	0.400	0.240	0.092	0.094	0.245
	ts(s)	0.400	0.400	0.250	0.099	0.180	0.266
	Error %	0	0	0	0	0	0
	MP %	0.05	0	0	0.46	0.25	0.15
Bi-sektor	td(s)	0.046	0.046	0.046	0.046	0.048	0.046
	tr(s)	0.300	0.300	0.145	0.091	0.094	0.186
	ts(s)	0.372	0.365	0.171	0.130	0.145	0.237
	Error %	0	0	0.11	0.44	0.84	0.28
	MP %	0	0	0.11	0.44	0.84	0.28
MOM	td(s)	0.033	0.038	0.042	0.046	0.048	0.041
	tr(s)	0.061	0.071	0.080	0.089	0.092	0.079
	ts(s)	0.111	0.108	0.120	0.144	0.219	0.140
	Error %	-	0	-	-	-4.2	-1.48
	MP %	0.65	0.52	0.67	0.56	0.92	0.66

LOM	td(s)	0.06 5	0.06 2	0.05 9	0.06 3	0.07 0	0.064
	tr(s)	0.29 0	0.22 6	0.15 3	0.16 3	0.22 4	0.211
	ts(s)	0.30 0	0.25 3	0.23 2	0.20 4	0.25 2	0.248
	Error %	- 0.32	- 0.42	-0.2	- 0.06	-0.1	-0.22
	MP %	0	0.16	0.63	0.53	0.31	0.33
SOM	td(s)	0.03 0	0.03 4	0.04 0	0.04 4	0.05 1	0.039
	tr(s)	0.05 1	0.06 1	0.07 2	0.08 3	0.10 0	0.073
	ts(s)	0.20 0	0.14 5	0.16 5	0.15 2	0.14 5	0.161
	Error %	- 13.9	- 5.29	-7	-3.5	-2.6	-6.45
	MP %	1	0.83	0.67	0.56	0.50	0.71

Perbandingan kelima metode defuzzifikasi yang digunakan untuk pengendalian BLDC pada penelitian diperoleh hasil bahwa metode defuzzifikasi COA dapat mengendalikan sistem dengan persentase error dan overshoot paling kecil, yaitu persentase error 0% untuk semua kecepatan yang diberikan dan overshoot rata-rata 0.15% pada rentang kecepatan 1000 rpm – 2000 rpm.

Secara grafik, bisa dibandingkan kelima bentuk tanggapan pada kecepatan 2000 rpm sesuai Gambar 7 bahwa metode defuzzifikasi COA lebih mampu mengikuti setting kecepatan yang diberikan pada BLDC yang diuji meskipun secara rata-rata waktu tunda dan waktu naik lebih besar dari metode defuzzifikasi SOM. Pemilihan metode defuzzifikasi pada aturan Mamdani dalam penggunaan struktur pengendali fuzzy tergantung pada perancangan fungsi keanggotaan dan basis aturan fuzzy yang digunakan untuk mengendalikan BLDC.



Gambar 7 Grafik tanggapan defuzzifikasi

Pengujian Struktur Pengendali Fuzzy

Pengujian simulasi sistem menggunakan struktur pengendali fuzzy, PID, dan open loop secara bersamaan. Parameter PID yang digunakan yaitu hasil dari autotune dengan simulasi matlab dan diperoleh nilai $K_p = 1.95$, $K_i = 7.18$, $K_d = -0.19$, dengan koefisien filter $N = 7.08$, sedangkan untuk struktur fuzzy, defuzzifikasi menggunakan COA. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian

ini dapat dibuat Tabel 3 yang berisi parameter transient.

Tabel 3. Perbandingan parameter transien struktur kendali

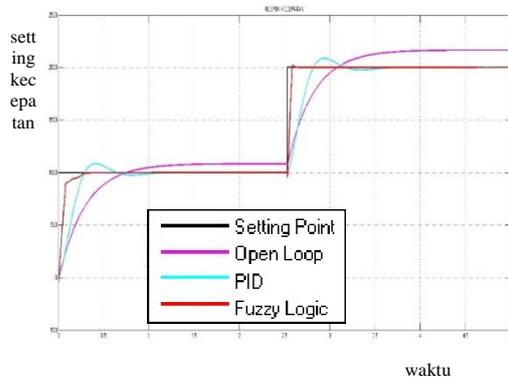
Kontrol	Parameter	Setting point				
		1000	1200	1500	1800	2000
Open Loop	tp (s)	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
	td (s)	0.19	0.188	0.188	0.188	0.188
	tr (s)	0.75	0.756	0.756	0.756	0.756
	ts (s)	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
	Mp (%)	0	0	0	0	0
	Error (%)	8.4	8.4	8.4	8.4	8.3
PID	tp (s)	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	td (s)	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	tr (s)	0.3	0.29	0.291	0.29	0.29
	ts (s)	0.9	0.9	0.901	0.9	0.9
	Mp (%)	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6
	Error (%)	0	0	0	0	0
Fuzzy	tp (s)	0.4	0.4	0.24	0.099	0.097
	td (s)	0.047	0.047	0.047	0.047	0.048
	tr (s)	0.4	0.4	0.24	0.092	0.094
	ts (s)	0.4	0.4	0.25	0.099	0.18
	Mp (%)	0.05	0	0	0.46	0.25
	Error (%)	0	0	0	0	0

Analisis menggunakan ISE diperoleh nilai yang lebih terlihat, yaitu untuk pengendali fuzzy lebih rendah dibanding dengan pengendali PID. Pengurangan ISE untuk PID dan fuzzy sudah ada, dengan struktur pengendali fuzzy sudah bisa mencapai 99% sedangkan pada struktur PID sekitar 98%, seperti pada Tabel 4. Analisis ini sesuai dengan tujuan pengendalian yaitu mendapatkan nilai kecepatan sesuai dengan yang diharapkan dan tetap menjaga kondisi kecepatan dapat tetap dipertahankan sampai waktu tertentu.

Tabel 4. Pengurangan ISE

Kecepatan	PID	Fuzzy
1000	98.19%	99.35%
1200	98.19%	99.36%
1500	98.19%	99.37%
1800	98.19%	99.36%
2000	98.19%	99.35%
Rata-rata	98.19%	99.36%

Pada pengujian perubahan kecepatan, diperoleh hasil bahwa struktur fuzzy dapat menyesuaikan kecepatan yang diberikan namun masih tertunda. Tanggapan sistem pada struktur fuzzy masih lebih baik dari tanggapan sistem dengan pengendali PID. Hasil tanggapan perubahan kecepatan dari 1000 rpm menjadi 2000 rpm seperti pada Gambar 8.



Gambar 8 Grafik tanggapan perubahan kecepatan

Kesimpulan

Dari penelitian, dapat disimpulkan bahwa sistem pengendalian fuzzy yang diimplementasikan untuk mengatur motor BLDC dapat memperbaiki kinerja PID konvensional. Metode defuzzifikasi yang mampu mengikuti *setting* kecepatan yang diberikan adalah COA karena metode ini paling konsisten dan memiliki tinggi serta lebar total daerah fuzzy. Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil titik pusat daerah fuzzy.

Pengujian perubahan *setting* kecepatan dihasilkan karakteristik tanggapan sistem kendali PID konvensional dengan rata-rata waktu kenaikan (tr) 0.29 sekon, waktu tunak (ts) 0.9 sekon, *overshoot* sebesar 8.63 %, dan persentase ISE sebesar 98.19%, sedangkan struktur fuzzy dihasilkan rata-rata waktu kenaikan (tr) 0.25 sekon, waktu tunak (ts) 0.27 sekon, *overshoot* sebesar 0.15 % dan persentase ISE sebesar 99.36%.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Laboratorium Teknik Tegangan Listrik, Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.

Daftar Pustaka

- [1] Hidayat, Pengembangan Hybrid PID-ANFIS (Proportional Integral Derivative-Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems) sebagai Pengendali Kecepatan Mesin Arus Searah Tanpa Sikat (MASTS), Desertasi Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2014.
- [2] Sutikno, Perbandingan Metode Defuzzifikasi Aturan Mamdani Pada Sistem Kendali Logika Fuzzy, Tugas akhir, Universitas Diponegoro. Semarang, 2005.
- [3] Suratno, Pengaruh Perbedaan Tipe Fungsi Keanggotaan pada Pengendali Logika Fuzzy terhadap Tanggapan Waktu Sistem Orde Dua secara umum, Tugas akhir Universitas Diponegoro, Semarang, 2002.
- [4] NXP, AN10898 BLDC motor control with LPC1700. Rev. 01, NXP Semiconductors. Hongkong, 2010.
- [5] Munawar, I. and Yahuarsyah, H., Pemodelan dan Analisis Sistem Pensaklaran Motor Arus Searah Tanpa Sikat, Desertasi S3 Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2005.
- [6] Diepenbrock, J., *On Power Electronics 3*. pp 420, IEEE Trans, North Carolina, 1998.
- [7] Mathworks, *Applications of Fuzzy Logic in Control Design*, The Mathworks Inc, USA, 1996.
- [8] Kusumadewi, Sri, *Analisis dan Desain Sistem Fuzzy menggunakan Toolbox Matlab*, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2002.
- [9] Kealy, T. and O'Dwyer, A., *Analytical ISE Calculation and Optimum Control System Design*. Proceeding of 2003 The Irish Signals and System Conference, Irelandia, 2003, pp. 418-423