

Perancangan Pengontrol *Adaptive Fuzzy PID* pada *Brushless DC Motor*

¹Ferdinand Natanael ^{*}), ²Faisal Wahab

Universitas Katolik Parahyangan
Program Studi Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika
Bandung, Indonesia
6316032@student.unpar.ac.id

Abstrak

Aplikasi *brushless DC motor* (BLDC) memerlukan pengontrol agar mampu mencapai performa yang diinginkan. Jenis pengontrol yang umum antara lain, pengontrol PID, *fuzzy logic controller* (FLC), serta gabungan pengontrol PID dan FLC yang disebut *Adaptive fuzzy PID* (AFPID). Pada penelitian ini, diajukan penerapan desain pengontrol PID untuk kontrol kecepatan angular (ω) BLDCM menggunakan kombinasi kontrol logika fuzzy (*Fuzzy logic control*, FLC) dengan pengontrol PID konvensional yang disebut *Adaptive Fuzzy PID* (AFPID). Metode penelitian yang dilakukan adalah penurunan model dinamika BLDC, melakukan iterasi penentuan komponen konstanta pengontrol PID, perancangan logika fuzzy berdasarkan *fuzzy rules* untuk pengontrol *adaptive fuzzy PID*, dan membandingkan hasil simulasi pengontrol PID dengan *adaptive fuzzy PID*. Parameter yang diamati adalah *rise time*, *overshoot*, dan *settling time*. Pengontrol *adaptive fuzzy PID* yang diterapkan pada *brushless DC Motor* memberikan performa respons transien yang lebih baik daripada pengontrol PID konvensional pada ketiga parameter (*rise time*: 0.364s, *overshoot*: 4.737%, dan *settling time*: 2.971s).

Kata kunci: BLDC, *adaptive pid*, *fuzzy*, pengontrol, transien

I. PENDAHULUAN

Pada beberapa tahun terakhir, penggunaan motor arus searah tanpa sikat atau disebut *brushless DC motor* (BLDCM) berkembang secara pesat, hal ini disebabkan oleh performa BLDCM yang lebih baik dibandingkan jenis motor DC konvensional sehingga menjadi pilihan berbagai industri seperti: otomotif, penerbangan dan eksplorasi luar angkasa, hingga peralatan rumah tangga [1, 9]. Pada aplikasi BLDCM, perlu diberikan pengontrol agar mampu mencapai performa yang diinginkan. Jenis pengontrol yang umum digunakan pada penelitian sebelumnya antara lain: pengontrol PID, *fuzzy logic controller* (FLC), serta gabungan pengontrol PID dan FLC yang disebut *Adaptive fuzzy PID* (AFPID).

Pengontrol PID (*proportional*, *integral*, *derivative*) konvensional merupakan jenis pengontrol yang paling banyak digunakan karena memiliki algoritma yang sederhana, stabil, dan mudah disesuaikan. Kontrol yang umumnya digunakan pada BLDCM adalah kontrol kecepatan angular (ω). Namun, pada mayoritas proses

industri, melibatkan ketidakpastian dari parameter dan model matematis dari sistem sehingga menyulitkan untuk melakukan pengaturan parameter pengontrol PID dengan hasil ketahanan (*robustness*) yang baik [2].

Kontrol logika fuzzy (*Fuzzy Logic Control*, FLC) adalah pengontrol dengan parameter yang beradaptasi secara waktu nyata berdasarkan aturan fuzzy (*fuzzy rules*) dan secara analitis dibuktikan mampu memberikan performa transien dan tunak yang lebih baik dibandingkan pengontrol PID konvensional seperti parameter: waktu naik (*rise time*), dan kesalahan tunak.

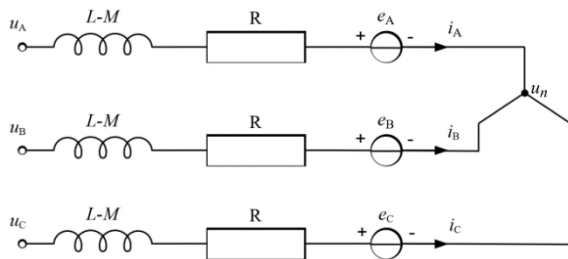
Berdasarkan hasil peninjauan literature terhadap kontrol PID dan logika fuzzy, maka pada penelitian ini, diajukan penerapan kombinasi kontrol logika fuzzy (*Fuzzy logic control*, FLC) dengan pengontrol PID konvensional yang disebut *Adaptive Fuzzy PID* (AFPID) untuk melakukan kontrol kecepatan angular (ω) dari BLDCM [10]. AFPID secara garis besar adalah pengontrol PID dengan pengaturan parameter berdasarkan aturan fuzzy dalam waktu nyata (*real-time*). FLC akan memproduksi parameter tambahan untuk masing-masing

parameter pengontrol PID konvensional (*proportional, integral, derivative*). Variasi dari keluaran FLC membuat pengontrol dapat beradaptasi secara implisit. Hasil simulasi penggunaan pengontrol *Adaptive Fuzzy PID* (AFPID) dapat meningkatkan ketahanan (*robustness*) dan performa respons transien dari sistem [3].

II. METODE PENELITIAN

A. Model Dinamika *Brushless DC Motor* (BLDCM)

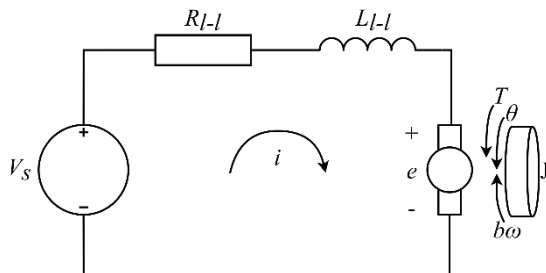
Model rangkaian dari BLDCM [7] yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1,



Gambar 1. Rangkaian ekivalen BLDCM

dimana u_A , u_B , dan u_C adalah sumber tegangan berbeda fasa, L adalah induktansi diri (*self inductance*), M adalah induktansi bersama (*mutual inductance*), R adalah resistansi; e_A , e_B , dan e_C adalah tegangan gerak elektrik balik (*back electromotive force, back EMF*) tiap fasa; i_A , i_B , dan i_C adalah arus tiap fasa, dan u_n adalah tegangan netral.

Model dinamika dinyatakan secara matematis untuk mendeskripsikan sistem nyata. Rangkaian ekivalen dari BLDCM merupakan tiga rangkaian berbeda fasa yang terhubung dengan konfigurasi wye dan diasumsikan arus mengalir melewati dua fasa berbeda dalam satu waktu bersamaan, maka dari itu, model linier BLDCM dapat dinyatakan sebagai rangkaian motor satu fasa dengan resistansi dan induktansi *line-to-line* [1].



Gambar 2. Rangkaian ekivalen BLDCM

Analisa rangkaian elektrik menggunakan Hukum tegangan *Kirchoff* (*Kirchoff's Voltage law, KVL*),

$$\sum V = 0 \quad (1)$$

menghasilkan,

$$V_s = R_{l-l}i + L_{l-l} \frac{di}{dt} + e \quad (2)$$

dimana V_s adalah sumber tegangan, i adalah arus, e adalah tegangan gerak elektrik balik (*back electromotive force, back EMF*), R_{l-l} adalah resistansi *line-to-line*, dan L_{l-l} adalah induktansi *line-to-line*.

Analisa rangkaian elektro-mekanis menggunakan Hukum gaya Lorentz,

$$F = Bil \quad (3)$$

dimana F adalah gaya, B adalah medan magnet, i adalah arus listrik, dan l adalah panjang kawat yang dialiri arus listrik (i).

Torsi (*torque, τ*) motor dinyatakan pada persamaan berikut,

$$\tau = Fp \quad (4)$$

dengan p adalah jarak titik tumpuan gaya dihitung dari poros motor. Substitusi persamaan (3) ke persamaan (4), dengan mengasumsikan nilai medan magnet B adalah konstan maka menghasilkan persamaan berikut,

$$\tau = K_\tau i \quad (5)$$

Back EMF adalah gerak arus listrik yang dihasilkan putaran motor dan memiliki arah yang berlawanan dengan sumber arus listrik, secara matematis dapat dinyatakan sebagai,

$$e = K_b \omega \quad (6)$$

dimana e adalah *back EMF*, K_b adalah konstanta *back EMF*, dan ω adalah kecepatan angular motor.

Analisa rangkaian mekanis berdasarkan gambar rangkaian ekivalen menyatakan persamaan gerak sebagai berikut,

$$\tau - \tau_L = J \frac{d\omega}{dt} + b\omega \quad (7)$$

dimana τ_L merupakan beban torsi, J adalah momen inersia, dan b adalah konstanta viskositas gerak.

Fungsi transfer dari BLDCM (8) didapat dari transformasi laplace hasil substitusi persamaan (3), (4), (5), (6) dan (7) ke persamaan (2),

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} \quad (8)$$

$$= \frac{K_\tau}{(JL_{l-l})s^2 + (JR_{l-l} + bL_{l-l})s + (bR_{l-l} + K_bK_\tau)}$$

dengan mengabaikan nilai konstanta viskositas gerak maka persamaan (8) dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$G(s) = \frac{K_\tau}{(JL_{l-l})s^2 + (JR_{l-l})s + (K_bK_\tau)} \quad (9)$$

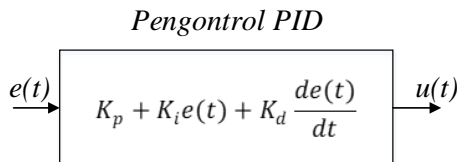
B. Pengontrol PID (Proporsional, Integral, Derivatif)

Pengontrol diperlukan untuk mengurangi nilai kesalahan suatu sistem dengan cara mengolah nilai kesalahan dengan sinyal kontrol sehingga sistem dapat mencapai performa respon transien sistem yang lebih baik [2]. Pengontrol PID dapat dinyatakan dalam persamaan berikut,

$$u(t) = K_p + K_i e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

K_p adalah konstanta pengali proporsional, dimana nilainya bergantung pada kesalahan di waktu saat ini, K_i adalah konstanta pengali integral, dimana nilainya bergantung pada kesalahan di waktu sebelumnya, sedangkan K_d adalah konstanta pengali derivatif, dimana nilainya bergantung pada kesalahan di waktu yang akan datang.

Persamaan (10) digambarkan dengan diagram blok sebagai berikut,



Gambar 3. Diagram blok pengontrol PID

Pada penelitian ini, pengontrol PID digunakan untuk melakukan kontrol terhadap kecepatan angular (ω) dari BLDCM. Pengontrol PID terdiri dari tiga buah komponen, yaitu proporsional (P), integral (I), derivatif (D) yang dinyatakan dalam konstanta pengali K_p , K_i , dan K_d [2].

C. Kontrol Logika Fuzzy

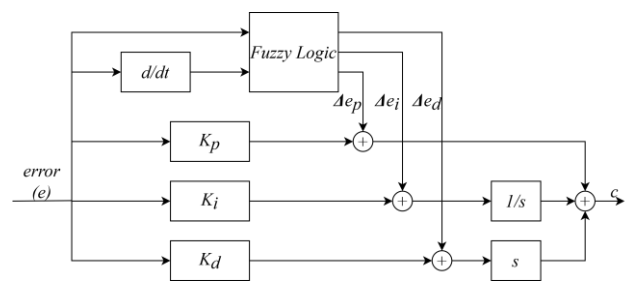
Logika fuzzy dibuat berdasarkan cara manusia merepresentasikan suatu nilai yang ambigu. Di sisi lain, komputer hanya mengenal representasi digital biner yang disebut crisp, agar komputer dapat memahami representasi ambigu, maka crisp harus dikonversi menjadi komponen variabel fuzzy.

Implementasi kontrol logika fuzzy membutuhkan tiga langkah berikut [4, 5]:

1. *Fuzzification*, proses mengubah data *crisp* menjadi data fuzzy atau menyatakan derajat keanggotaan (*membership function, MF*),
2. *Fuzzy inference process*, proses menyatakan output sebagai hubungan antar MF yang diatur dalam *fuzzy rules*.
3. *Defuzzification*, proses mengalkulasikan *output* dalam tabel (*lookup table*) terhadap *input* saat ini berdasarkan *fuzzy rules*.

C.1. Aturan Fuzzy (Fuzzy Rules)

Aturan *fuzzy* atau *fuzzy rules* adalah aturan hubungan antara *input* dan *output* yang didasari oleh pengetahuan dan pengalaman manusia dalam menerjemahkan masalah. Aturan yang digunakan bisa berbeda untuk tiap aplikasinya. Prinsip dari aturan fuzzy adalah menyatakan hubungan "jika" pada *input* terhadap "maka" untuk *output*. Aturan tersebut dinyatakan secara linguistik sebagai berikut [4, 5]:



Gambar 4. Diagram blok pengontrol AFPID

Jika (*input*) adalah (...), maka (*output*) adalah (...).

Aturan *fuzzy* dapat dinyatakan dalam tabel aturan *fuzzy* berikut:

Tabel 1. Aturan Fuzzy

Fuzzy Rules	Input 1		
	Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3

Input 2	Kondisi 1	Output 1.1	Output 1.2	...
	Kondisi 2	Output 2.1
	Kondisi 3

Aturan *fuzzy* akan digunakan untuk mengkalkulasikan nilai keluaran berupa nilai *crisp* melalui proses *defuzzification*. Pada penelitian ini akan menggunakan proses defuzzifikasi *weighted average* (titik berat). Defuzzifikasi *weighted average* (*wtaver*) dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut [4, 5, 6],

$$wtaver = \frac{\sum_1^n \mu(g) \cdot g}{\sum_1^n \mu(g)} \quad (11)$$

dimana, $\mu(g)$ adalah nilai derajat keanggotaan, dan g adalah nilai elemen.

D. Pengontrol Adaptive Fuzzy PID

Pengontrol *adaptive fuzzy PID* (AFPID) adalah pengontrol PID dengan penyetelan berdasarkan *fuzzy rules* dalam waktu nyata (*real-time*). Persamaan PID konvensional pada persamaan (10) memiliki tiga buah konstanta yaitu K_p , K_i , dan K_d , sedangkan pada AFPID terdapat tiga buah variable berubah berdasarkan waktu yang disebut $K_p(t)$, $K_i(t)$, dan $K_d(t)$. Ketiga variabel ini dapat diuraikan menjadi,

$$\begin{aligned} K_p(t) &= K_p^0 + \Delta K_p \\ K_i(t) &= K_i^0 + \Delta K_i \\ K_d(t) &= K_d^0 + \Delta K_d \end{aligned} \quad (12)$$

dimana K_p^0 , K_i^0 , dan K_d^0 merupakan konstanta yang ditentukan melalui *tuning*, sedangkan ΔK_p , ΔK_i , dan ΔK_d adalah nilai variable bantuan yang beradaptasi terhadap waktu. Substitusi persamaan (12) ke persamaan (10) menghasilkan,

$$u(t) = PID + \left[\Delta K_p e(t) + \int \Delta K_i e(t) + \Delta K_d(t) \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (13)$$

Persamaan (13) dapat disederhanakan dengan menyatakan hubungan berikut,

$$\begin{aligned} \Delta e_p(t) &= \Delta K_p(t)e(t) \\ \Delta e_i(t) &= \Delta K_i(t)e(t) \\ \Delta e_d(t) &= \Delta K_d(t)e(t) \end{aligned} \quad (14)$$

menghasilkan,

$$u(t) = PID + \left[\Delta e_p(t) + \int \Delta e_i(t) + \frac{d(\Delta e_d(t))}{dt} \right] \quad (15)$$

Persamaan (15) dapat dinyatakan dalam hubungan diagram blok pada Gambar 4,

Pada AFPID, *input* logika *fuzzy* berupa nilai *error* (e) dan perubahan *error* (ce), sedangkan untuk *output* berupa nilai $\Delta e_p(t)$, $\Delta e_i(t)$, dan $\Delta e_d(t)$. *Input* dan *output* dinotasikan sebagai himpunan *fuzzy* yang terdiri dari *negative big* (NB), *negative medium* (NM), *negative small* (NS), *zero* (ZE), *positive small* (PS), *positive medium* (PM), dan *positive big* (PB) [3, 8].

Tabel 2. Aturan *fuzzy* untuk Δe_p

ce/e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	ZE	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	NB

Tabel 3. Aturan *fuzzy* untuk Δe_i

ce/e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB	PB

Tabel 4. Aturan *fuzzy* untuk Δe_d

ce/e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	PS	ZE	ZE	ZE	PB	PB
NM	NS	NS	NS	NS	ZE	NS	PM
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
PM	NM	NS	NS	NS	ZE	PS	PS
PB	PS	ZE	ZE	ZE	ZE	PB	PB

Berdasarkan Gambar 4, nilai $\Delta e_p(t)$, $\Delta e_p(t)$, dan $\Delta e_p(t)$ ditentukan melalui hubungan *input* dan *output* logika *fuzzy* yang dapat dilihat pada tabel aturan keluaran nilai ketiga variabel (Tabel 2,3, dan 4).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi respons pada persamaan (9) dilakukan menggunakan bantuan blok diagram pada *toolbox Simulink MATLAB*. BLDCM yang digunakan adalah BLDCM *Maxon EC 60* dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 5. Spesifikasi BLDCM

Spesifikasi	Nilai
Tegangan Masukan (V)	48
Inersia (J)	92.5
Konstanta Torsi (K_T)	147
Resistansi <i>line-to-line</i> (R_{l-l})	1.03
Induktansi <i>line-to-line</i> (L_{l-l})	0.82

Konstanta <i>back-EMF</i> (K_b)	0.004
-------------------------------------	-------

Fungsi transfer pada persamaan (9) menggunakan spesifikasi pada Tabel 5, dapat dituliskan sebagai berikut,

$$G(s) = \frac{147}{0.07585 s^2 + 95.28s + 0.588} \quad (10)$$

A. Pengontrol PID dan AFPID

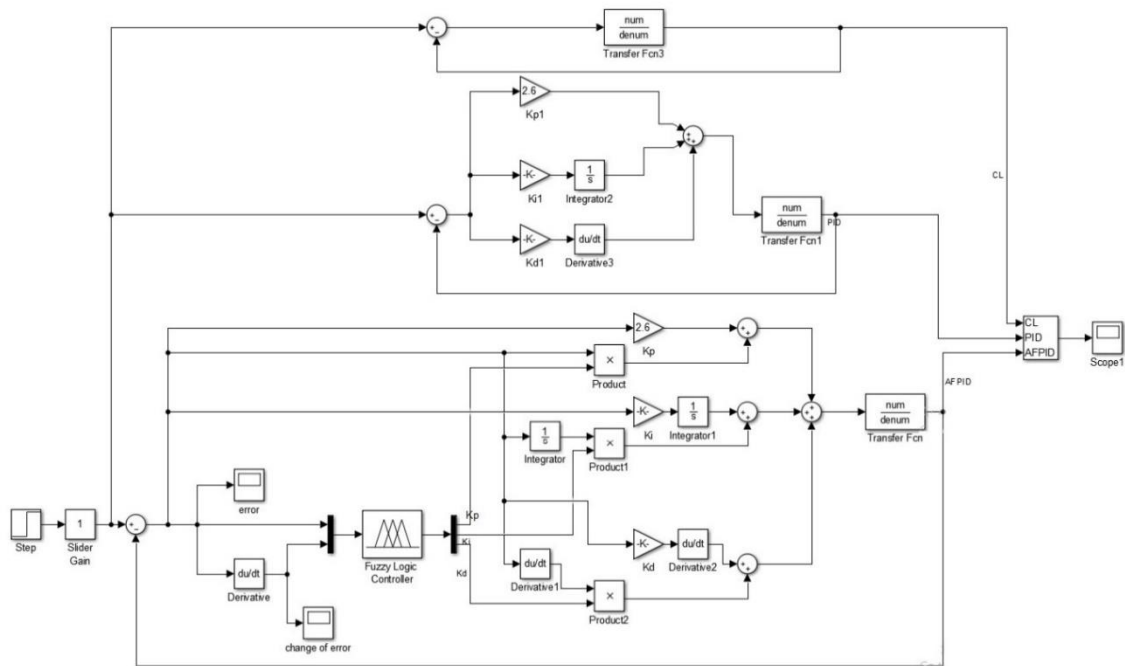
Berdasarkan persamaan (10), nilai konstanta PID pada penelitian ini ditentukan menggunakan metode iterasi. Berikut adalah nilai konstanta yang digunakan,

Tabel 6. Nilai parameter K_p , K_i , dan K_d

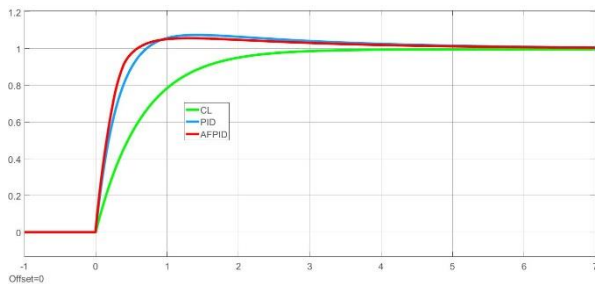
Parameter	K_p	K_i	K_d
Nilai	2.6	1.06	0.067

sedangkan untuk AFPID, nilai konstanta K_p^0 , K_i^0 , dan K_d^0 akan menggunakan nilai K_p , K_i , dan K_d berturut-turut sesuai pada tabel 6. Namun, untuk nilai $\Delta e_p(t)$, $\Delta e_i(t)$, dan $\Delta e_d(t)$, akan dihasilkan oleh pengolahan logika *fuzzy* dengan rentang input [-3 3] dan rentang *output* untuk masing-masing adalah [-1 1].

Berikut adalah hasil simulasi (Gambar 5) perbandingan respons transien antara sistem lup tertutup (*close loop, CL*), hasil pengontrol *PID*, dan hasil pengontrol *adaptive fuzzy PID*.



Gambar 5. Diagram blok simulasi SIMULINK MATLAB



Gambar 6. Simulasi lup tertutup (hijau), pengontrol PID (biru), dan pengontrol AFPID (merah)

Performa respons transien yang dapat dianalisa antara lain: *rise time*, *overshoot*, dan *settling time*. Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 6, performa ketiganya dapat dibandingkan pada Tabel berikut ini,

Tabel 4. Perbandingan performa transien

Performa transien	CL	PID	AFPID
<i>Rise time (s)</i>	1.388	0.497	0.364
<i>Overshoot (%)</i>	0.503	5.851	4.737
<i>Settling time (s)</i>	1.936	3.146	2.971

Tabel 4 membandingkan performa transien dari kedua pengontrol, yaitu pengontrol PID konvensional dengan tiga buah konstanta yang

ditentukan berdasarkan iterasi dibandingkan dengan pengontrol *adaptive fuzzy PID* yang menggabungkan pengontrol PID konvensional dengan penyetelan nilai konstanta melalui pengolahan berdasarkan logika *fuzzy*. AFPID menghasilkan nilai *rise time* yang lebih cepat, *overshoot* yang lebih rendah, dan *settling time* yang lebih cepat dibandingkan dengan sistem dengan pengontrol PID konvensional.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pengontrol *adaptive fuzzy PID* yang diterapkan pada *brushless DC Motor* memberikan performa respons transien yang lebih baik daripada pengontrol PID konvensional. Penggunaan logika *fuzzy* untuk menghasilkan variabel bantuan ($\Delta e_p(t)$, $\Delta e_i(t)$, dan $\Delta e_d(t)$) secara waktu nyata terhadap nilai konstanta pengontrol *PID* dapat memberikan respons transien yang lebih baik dilihat pada parameter *rise time*, *overshoot*, dan *settling time*.

Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan melakukan *tuning* terhadap parameter PID menggunakan metode kuantitatif seperti metode *Ziegler-nichols* dan meninjau respons dari perubahan *setpoint* sistem ketika menggunakan kontrol *adaptive fuzzy PID (AFPID)*.

REFERENSI

- [1] C. L. Xia, *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*. 2012.
- [2] K. Ogata, *Modern Control Engineering Fourth Edition*, New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [3] Y. Yang, W. Yang, M. Wu, Q. Yang, and Y. Xue, "A new type of adaptive fuzzy PID controller," *Proc. World Congr. Intell. Control Autom.*, no. 1, pp. 5306–5310, 2010.
- [4] Y. Bai and D. Wang, "Fundamentals of fuzzy logic control — fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications," *Adv. Ind. Control*, no. 9781846284687, pp. 17–36, 2006.
- [5] D. K. Wedding, *Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications*, vol. 14, no. 3. 1997.
- [6] T. Yulianto, S. Komariyah, and N. Ulfaniyah, "Application of fuzzy inference system by Sugeno method on estimating of salt production," 2017.
- [7] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. II. The brushless DC motor drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 25, no. 2, pp. 274–279, 1989.
- [8] R. Arulmozhiyal and R. Kandiban, "Design of Fuzzy PID controller for Brushless DC motor," *2012 International Conference on Computer Communication and Informatics*, 2012.
- [9] R. Krishnan, *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2010.
- [10] J.-U. Chu, I.-H. Moon, G.-W. Choi, J.-C. Ryu, and M.-S. Mun, "Design of BLDC motor controller for electric power wheelchair," *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, 2004. ICM '04*.