

Metode *Tuning Operating Range* Fuzzy PID Controller pada Sistem Orde Tiga

Nana Sutarna¹ dan Bernadeta Siti Rahayu Purwanti²

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta
Jl. Prof. Dr. G.A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425, Indonesia
nana.sutarna@elektro.pnj.ac.id¹, rahayu.purwanti@elektro.pnj.ac.id²

Abstract— This research discusses the development of a model Fuzzy Proportional, Integral, Derivative (Fuzzy PID) controller models and self-tuning. This method has been implemented in the third-order system of Differential Equations, as a sample implementation of a PID controller. The methods self-tuning known are fuzzy rules, membership function (MF), and scaling factor. The focus of the discussion in this research is to introduce self-tuning to the operating range (OR) setting of MF. Previous research has succeeded in converting a PID controller to a Fuzzy Logic Controller (FLC) which is in accordance with the PID structure. The FLC has three inputs and one output as in the PID controller, hereinafter referred to as Fuzzy PID controller. Knowledgebase on the FLC structure of three inputs one output is expressed in the form of cubic fuzzy associative memory (FAM). The conversion was done by mapping errors, integrals error, derivative errors and outputs of PID controller into the OR of MF Fuzzy input/output. The size of the OR conversion value on the MF fuzzy input was set, so the response transient is set-to-point. While the OR value of the MF fuzzy output was fixed as a limitation. Improved settling time was reached up to 75.3% and percent overshoot was reduced by 57.7% in Fuzzy PID with PID controller. The output signal from the Fuzzy PID controller showed the smallest amplitude of 24.12, while the PID controller was 32.53. The amplitude unit depends on the Fuzzy PID controller parameters when it applied the real plant. The third-order Fuzzy PID controller has been successfully simulated in Simulink/Matlab.

Keywords— PID, Fuzzy PID, operating range, third order system

Abstrak— Riset ini membahas pengembangan model Fuzzy Proportional, Integral, Derivative (Fuzzy PID) controller dan self-tuning. Metode tersebut telah diimplementasikan pada sistem orde tiga dari persamaan Diferensial, sebagai sampel implementasi PID controller. Metode self-tuning yang dikenal adalah fuzzy rules, membership function (MF), dan scaling factor. Fokus pembahasan pada riset ini memperkenalkan self-tuning pada pengaturan operating range (OR) dari MF. Penelitian sebelumnya telah berhasil mengonversi PID controller ke Fuzzy Logic Controller (FLC) yang strukturnya sesuai dengan PID controller. FLC yang dimaksud dengan tiga input satu output seperti pada PID controller yang selanjutnya disebut Fuzzy PID controller. Knowledgebase pada struktur FLC tiga input satu output dinyatakan dalam bentuk kubik fuzzy associative memory (FAM). Konversi yang dilakukan dengan pemetaan error, integral error, derivative error dan output PID controller ke dalam OR dari MF Fuzzy input/output. Besar kecilnya nilai konversi OR pada MF input fuzzy diatur sedemikian rupa hingga response transients sesuai set point. Sementara nilai OR dari MF fuzzy output dibuat tetap sebagai batasan. Perbaikan settling time tercapai hingga 75,3% dan percent overshoot berkurang sebesar 57,7% pada Fuzzy PID controller dengan perbandingan PID controller. Sinyal output dari Fuzzy PID controller menunjukkan amplitudonya paling kecil 24,12, sedangkan PID controller adalah sebesar 32,53. Satuan amplitudo bergantung pada parameter-parameter Fuzzy PID controller, bila direalisasikan real plant. Fuzzy PID controller orde tiga telah berhasil disimulasikan dalam Simulink/Matlab.

Kata kunci— PID, Fuzzy PID, operating range, sistem orde tiga

I. PENDAHULUAN

Teknik tuning sudah banyak diteliti, namun masih terbuka luas peluang pengembangannya. Utamanya pada sistem kontrol Proportional Integral Derivative (PID) dengan berbagai pengembangan teknik tuning-nya. Salah satu pengembangan tersebut dengan metode tree physiology optimization (TPO) yang diimplementasikan [1] pada Proportional-Integral (PI). Teknik tuning lainnya adalah self-tuning Fuzzy Logic Controller (FLC) on-line dengan

mengatur fuzzy control rules [2], [3]. PID controller juga dapat di-tuning oleh FLC adaptive dengan pengaturan bentuk Membership Function (MF) [4]. Self-tuning fuzzy [5] dan fuzzy inference rule [6] telah diimplementasikan pada tuning PID controller. Seluruh teknik tuning menargetkan performa respon transien yang terlihat pada settling time, rise time, percent overshoot, dan error steady state [7].

Tuning parameter PID pada tiga variabel bebas mempengaruhi sinyal keluaran sistem. Tuning sebuah sistem PID controller sulit, jika salah setting parameter

mengakibatkan respon transien yang buruk. Oleh karena itu untuk menghindari buruknya respon, perlu teknik *tuning*. Salah satu teknik *tuning* adalah Ziegler-Nichols [8]. Peneliti [9] telah mengembangkan teknik *tuning* PID controller dengan *relay auto-tuning* (RA). Peneliti [10] menggunakan teknik *optimization algorithm* untuk melakukan *tuning* PID controller. Hasilnya menunjukkan teknik *tuning optimization algorithm* lebih unggul dibanding metode klasik.

Pada FLC, prosedur standar untuk teknik *tuning* belum ada. Metode teknik *tuning* pada FLC masih terus berkembang. Teknik *tuning* sederhana pada FLC menggunakan metode *trial and error*. *Tuning* pada bentuk MF dilakukan dengan mengubah dari bentuk simetris ke asimetris [2], [11]. *Tuning* pada *fuzzy rules* dilakukan dengan pengaturan *consequence* dan *antecedent* terhadap output fuzzy [12] - [14]. *Tuning* pada *fuzzy controller* juga dapat dilakukan dengan metode lain seperti *scaling factor* [15], [16]. Sementara *Operating Range* (OR) dari MF input/output hanya dibatasi pada angka tertentu saja. Sehingga menjadi sebuah pemahaman yang mutlak bahwa OR dari MF input/output tidak bisa dikembangkan [3], [6], [13], [14].

Respon transien hasil *tuning* PID controller dan FLC dibandingkan [17], [18]. Hal ini dimaksudkan untuk melihat kinerja controller pada obyek yang sama. Penggabungan FLC dan PID controller [3], [19] menghasilkan performa sesuai dengan target respon transien, tetapi strukturnya berbeda. Struktur Fuzzy PID controller dalam seri susunannya *master-slave* [20]. Struktur paralel Fuzzy PID controller menempatkan FLC sebagai *adaptive controller* dengan PID controller sebagai obyek *tuning* [21] - [23].

Peneliti [24] telah mengembangkan model Fuzzy PID controller yang diperoleh dari konversi PID controller menjadi sebuah FLC. Fuzzy PID controller ini merupakan FLC dengan tiga input dan satu output. Struktur Fuzzy PID controller [24] lebih sederhana dibanding model Fuzzy PID controller [3], [19] - [23]. Strukturnya memiliki input yang sama seperti PID controller. Fuzzy PID controller [24] memiliki ekuivalen dengan PID controller. Kedua controller memiliki hubungan linier dan kesetaraan.

Pada riset sebelumnya [24], MF dari Fuzzy PID controller telah dilakukan pengaturan dari bentuk *uniform* ke *ununiform*. Output sistemnya menunjukkan adanya perubahan respon transien. Sesuai ke hasil riset [24], peneliti [25] juga telah menyimulasikan Fuzzy PID controller untuk pengaturan kecepatan putaran motor DC. Hasil akhir risetnya adalah sebuah rancangan optimal *fuzzy controller*. *Tuning* Fuzzy PID controller [25] dilakukan dengan mengatur interval OR dan mengubah bentuk MF. Teknik *tuning* dengan pengaturan OR dioptimalkan dengan metode *Genetic Algorithm* (GA). Hasil output sistemnya menunjukkan respon transien yang optimal, namun amplitudo sinyal outputnya mencapai lebih dari 1500V [25].

Berdasarkan permasalahan yang telah dijelaskan, fokus penelitian adalah teknik *tuning* pada Fuzzy PID controller. Metodenya dengan pengaturan OR dari MF terhadap respon transien sistem dengan memperhatikan amplitudo sinyal output controller. Pengaturan OR dari MF belum banyak diteliti dan penting untuk ditelusuri implementasinya. Sistem

orde tiga berbentuk Persamaan Diferensial ini menjadi obyek teoritis yang dikontrol dengan Fuzzy PID. Bentuk input MF fuzzy adalah segitiga dengan output *singleton*, sesuai tipe FLC Sugeno. Kemudian respon transien dari output sistem Fuzzy PID controller dibandingkan dengan Fuzzy-PD controller dan PID controller. Hasil riset awal dalam artikel ini untuk mendukung penelitian selanjutnya, yaitu mengimplementasikan Fuzzy PID controller pada *Brushless Direct Current Motor* (BLDC).

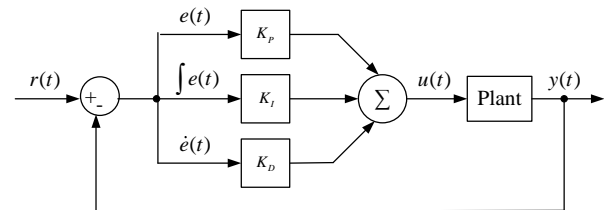
II. METODE

Sistem yang digunakan dalam penelitian ini adalah persamaan differensial orde tiga yang telah digunakan dengan PID controller. Persamaan *transfer function* $G_p(s)$ pada (1) sebagai pendekatan optimal komputasi hasil Transformasi Laplace pada desain PID controller.

$$G_p(s) = \frac{1,2}{0,36s^3 + 1,86s^2 + 2,5s + 1} \quad (1)$$

A. PID Controller

PID controller merupakan penjumlahan paralel dari tiga gain seperti terlihat di Gambar 1 dan representasi persamaannya dinyatakan dalam (2).



Gambar 1. Struktur PID controller

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

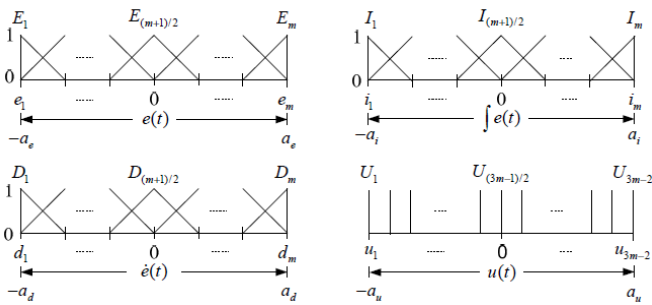
Dengan $u(t)$ adalah output controller, $e(t)$ adalah sinyal error, $\int e(t)$ adalah integral error, dan $\frac{de(t)}{dt}$ adalah derivative error. K_p adalah *proportional gain*, K_i adalah *integral gain*, K_d adalah *differential gain*.

B. Fuzzy Logic Controller

Penyelesaian permasalahan-permasalahan pada sistem linier maupun nonlinier seringkali menggunakan control cerdas, salah satunya FLC. Cara mendesain FLC, semua masukan *real* sistemnya dikonversi ke dalam variabel linguistik. Hasil konversinya disimpan di dalam *knowledgebase fuzzy* dan proses konversinya disebut fuzzifikasi. Mesin *inference fuzzy* berupa "IF-THEN" [26], merupakan aturan fuzzy yang memproses *set-set* input fuzzy menjadi sinyal output fuzzy. Selanjutnya output fuzzy dikembalikan ke bentuk *real* melalui proses defuzzifikasi.

C. Ekuivalensi antara FLC dan PID Controller

Input/output dari variabel PID controller seperti pada (1) dapat dimasukkan sebagai variabel dalam rancang FLC. Variabel output $u(t)$, dan tiga input $e(t)$, $\int e(t)$, dan $\dot{e}(t)$ diasumsikan sebagai OR output/input dari MF.

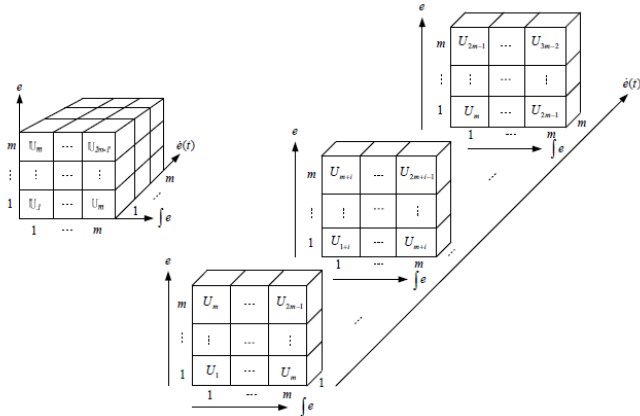


Gambar 2. Pemetaan input/output MF dan variable FLC [24]

Ketiga input dan satu output dari MF dinyatakan berturut-turut dalam $OR_e = [-a_e, a_e]$, $OR_{ie} = [-a_i, a_i]$, $OR_{de} = [-a_d, a_d]$, dan $OR_u = [-a_u, a_u]$ [24]. Jumlah MF masing-masing input adalah m , sedangkan variabel output $u(t)$ yang difuzzifikasi jumlahnya $(3m - 2)$. Gambar 2 menunjukkan bentuk input dan output, serta jumlah MF. Input MF fuzzy berbentuk segitiga, sedangkan outputnya singleton [24]

Tiga variabel input ($e(t)$, $\int e(t)$, dan $\dot{e}(t)$) fuzzy rules, dinyatakan dalam kubik FAM, seperti ditunjukkan dalam Gambar 3. Output fuzzy-nya sebagai hasil *consequence* dan *antecedent*, yang didefinisikan dalam (3) [24].

$$\begin{aligned} & \text{IF } e(t) \text{ is } E_i \text{ and } \int e(t) \text{ is } I_j \text{ and } \dot{e}(t) \text{ is } D_k \\ & \text{THEN } u(t) \text{ is } U_l \\ & l = i + j + k - 2 \end{aligned} \quad (3)$$



Gambar 3. Irisan kubik dari FAM [24]

Detail uraian dan penurunan dari *fuzzy rule* dijelaskan dalam riset sebelumnya [24]. Sehingga kesesuaian persamaan output $u(t)$ FLC dinyatakan dalam (4).

$$u(t) = \frac{a_u}{3a_e} e(t) + \frac{a_u}{3a_i} \int e(t) + \frac{a_u}{3a_d} \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Dengan a_e adalah *range error*, a_i adalah *range integral error*, a_d adalah *range differential error*, dan a_u adalah *range output*.

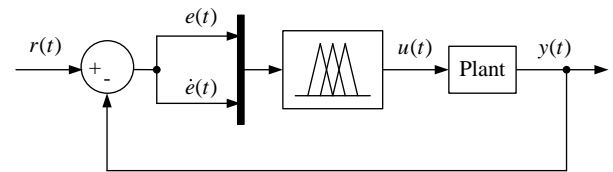
Persamaan (4) sesuai dengan (2) dan menunjukkan bahwa PID controller ekuivalen dengan FLC [24]. Dengan demikian PID controller dapat dikonversi ke dalam bentuk FLC. Konversi ini melibatkan kedua variabel pengendali, yaitu *gain PID controller* (K_p, K_i, K_d) dan OR dari MF input/output fuzzy (a_e, a_i, a_d , dan a_u). Variable-variabel tersebut

merepresentasikan amplitudo untuk sinyal-sinyal *error*, *integral error*, *derivative error*, dan output. Fungsi persamaan konversi antara PID controller dan FLC ditunjukkan pada (5). Sementara bentuk struktur FLC hasil konversi dengan PID controller ditunjukkan pada Gambar 5.

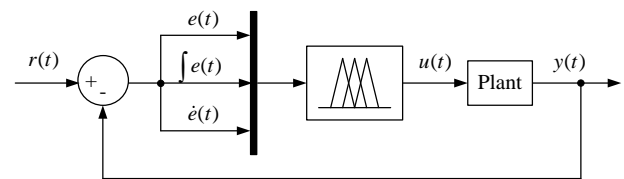
$$K_p = \frac{a_u}{3a_e}, \quad K_i = \frac{a_u}{3a_i}, \quad K_d = \frac{a_u}{3a_d} \quad (5)$$

D. Desain Controller

FLC yang dibahas terdiri dari Fuzzy PD controller dan Fuzzy PID controller. Input Fuzzy PD controller terdiri dari $e(t)$ dan $\dot{e}(t)$ dan outputnya $u(t)$. Sedangkan input Fuzzy PID controller terdiri dari $e(t)$, $\int e(t)$, dan $\dot{e}(t)$, serta outputnya $u(t)$. Strukturnya seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Sementara untuk Fuzzy PID controller strukturnya ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Struktur Fuzzy PD controller



Gambar 5. Struktur Fuzzy PID controller [24]

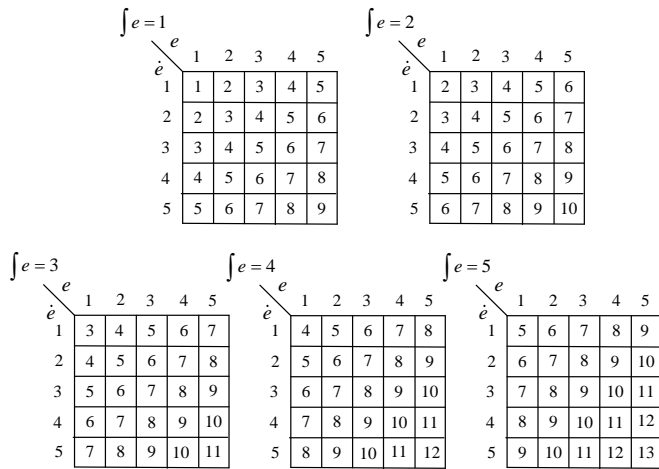
\dot{e}	e	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5	
2	2	3	4	5	6	
3	3	4	5	6	7	
4	4	5	6	7	8	
5	5	6	7	8	9	

Gambar 6. FAM Fuzzy PD controller

Gambar 6 menunjukkan FAM Fuzzy PD controller dengan dua input satu output. Jumlah MF masing-masing input dipilih 5. Alasan pemilihan jumlah tersebut adalah pertimbangan waktu komputasi.

Input MF dinyatakan dengan notasi 1, 2, 3, 4, 5, sedangkan outputnya 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, dan 9. Formula perhitungan variabel outputnya atau $u(t)$ untuk 2 input adalah $(2m - 1)$. Penggunaan notasi-notasi tersebut dimaksudkan untuk memudahkan penulisan FAM. Total *fuzzy rules* untuk 2 input MF yang berjumlah 5 adalah 25. Hal yang sama juga berlaku untuk FAM Fuzzy PID controller. Jumlah total *fuzzy rules* untuk 3 input MF yang berjumlah 5 adalah 125. Formula perhitungan variabel outputnya atau $u(t)$ untuk 3 input adalah

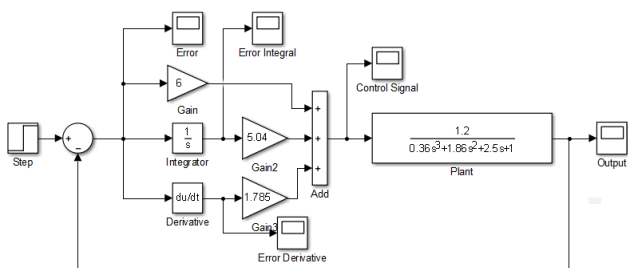
(3m - 2). Bentuk FAM untuk Fuzzy PID controller ditunjukkan pada Gambar 7.



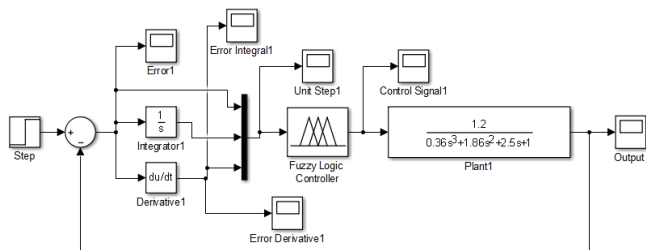
Gambar 7. FAM Fuzzy PD controller

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem orde tiga dengan PID controller ditunjukkan pada Gambar 8. Tuning PID controller disimulasikan dengan metode kedua Ziegler-Nichols. Pencarian critical gain (K_{cr}) dilakukan sampai output sistemnya mengalami osilasi dan terlihat periodenya (P_{cr}). Kedua nilai K_{cr} dan P_{cr} digunakan untuk mengkonversi ke K_p , T_i , dan T_d . Akhirnya diperoleh nilai $K_p = 6$, $K_i = 5,04$, dan $K_d = 1,785$.



Gambar 8. PID controller pada sistem orde tiga

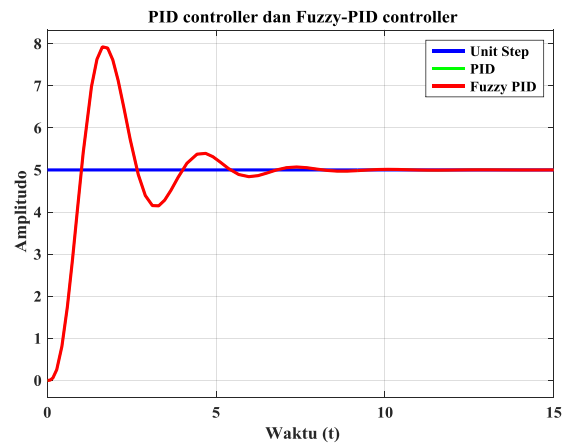


Gambar 9. Fuzzy PID controller hasil konversi

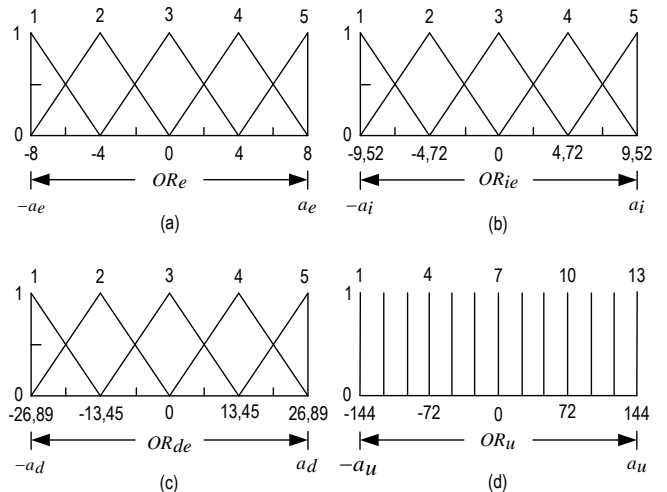
Konversi PID controller ke FLC, digunakan (5). Nilai a_e didapat dari hasil pengukuran amplitudo sinyal error pada Gambar 8. Amplitudo sinyal error terukur sebesar 8. Dengan demikian diperoleh nilai-nilai $a_e = 8$, $a_i = 9,52$, $a_d = 26,89$, dan $a_u = 144$. Gambar 9 adalah bentuk rangkaian Fuzzy PID controller hasil konversi dengan PID controller.

Sinyal keluaran dari sistem menunjukkan sebuah kesetaraan antara sinyal PID controller dengan sinyal Fuzzy PID controller, seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Sinyal

Fuzzy PID controller (warna merah) menutupi sinyal PID controller (warna hijau) dan kedua sinyal tersebut adalah identik.



Gambar 10. Sinyal respon transien keluaran sistem PID controller dan Fuzzy PID controller.

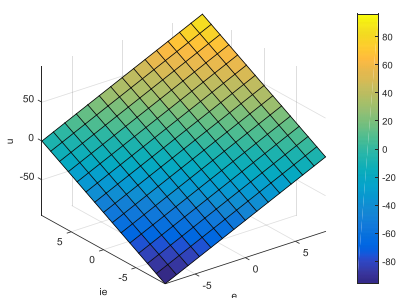


Gambar 11. Input dan output MF pada Fuzzy PID controller

Bentuk MF Fuzzy PID controller untuk ketiga input (a_e , a_i , dan a_d) berupa segitiga ditunjukkan pada Gambar 11 (a), 11 (b), dan 11 (c). Nilai OR dari MF untuk input fuzzy berturut-turut $OR_e = (-8, 8)$, $OR_{ie} = (-9,52, 9,52)$, dan $OR_{de} = (-26,89, 26,89)$. Sedangkan bentuk MF output fuzzy berupa fuzzy singleton yang ditunjukkan pada Gambar 11 (d). Nilai jangkauan operasi untuk fungsi keanggotaan keluaran fuzzy $OR_u = (-144, 144)$.

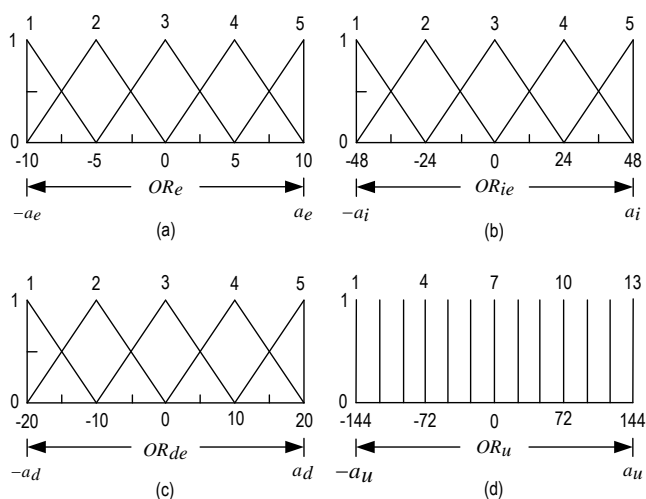
Hubungan ketiga input terhadap output fuzzy ditunjukkan pada Gambar 12 berbentuk surface view. Tampilan surface view datar yang menunjukkan bahwa ruang lingkup FLC linier.

Perbaikan respon transien Fuzzy PID controller pada Gambar 10, dengan mengatur interval OR pada MF input. Nilai OR dari ke tiga input MF fuzzy (a_e , a_i , dan a_d) diatur menjadi besar atau kecil. Pengaturan nilai OR dilakukan hingga respon transien sesuai set point. Teknik tuning ini dilakukan secara coba-coba (trial and error). Sementara interval OR pada output MF fuzzy (a_u) dibuat tetap yaitu sebesar $OR_u = (-144, 144)$.

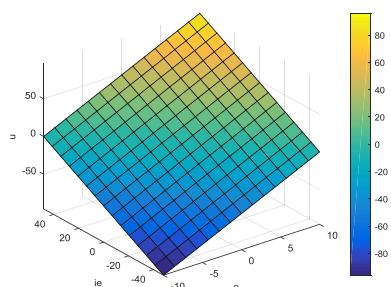


Gambar 12. Tampilan *surface view* Fuzzy-PID controller

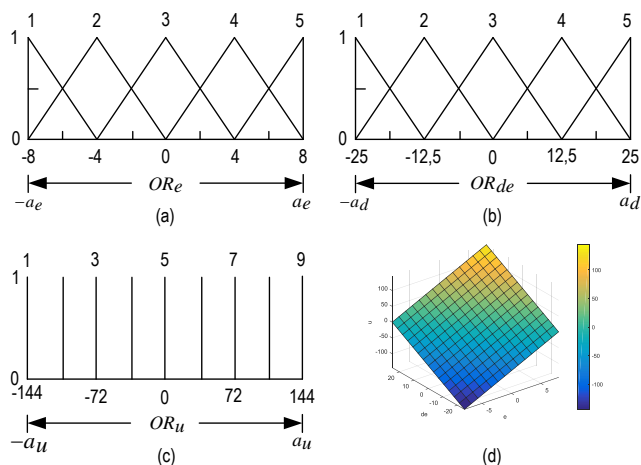
Perubahan nilai OR dari MF output berpengaruh terhadap amplitudo sinyal output *controller*. Sinyal output *controller* dibahas pada artikel berikutnya, artikel ini hanya membahas OR dari MF input. Bentuk input MF fuzzy hasil *tuning* untuk Fuzzy PID controller ditunjukkan pada Gambar 13 (a), 13 (b), 13 (c). Nilai OR pada input MF fuzzy setelah proses *tuning* masing-masing adalah $OR_e = (-10, 10)$, $OR_{ie} = (-48, 48)$, dan $OR_{de} = (-20, 20)$. Sedangkan nilai OR dari output MF fuzzy dibuat tetap pada $OR_u = (-144, 144)$ dalam bentuk *singleton*, seperti ditunjukkan pada Gambar 13 (d). Hasil tampilan permukaan setelah *tuning* pada Fuzzy PID controller ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 13. Input dan output MF fuzzy pada Fuzzy PID controller



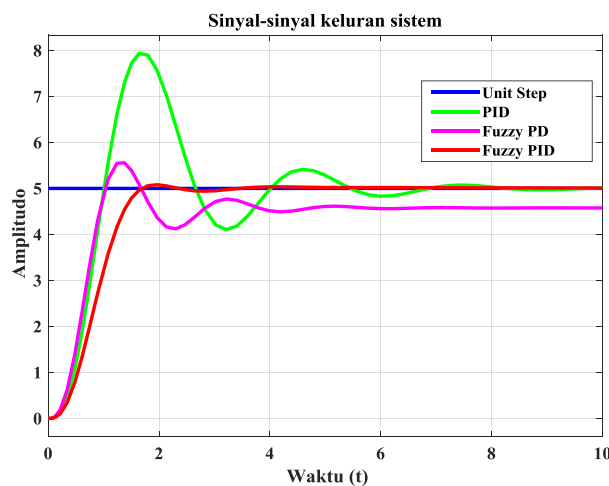
Gambar 14. Tampilan *surface view* Fuzzy-PID controller



Gambar 15. Gambar input/output MF Fuzzy dan *surface view*

Selanjutnya untuk Fuzzy PD controller, diberlakukan teknik *tuning* yang sama seperti pada Fuzzy PID controller. Rancangan Fuzzy PD controller tidak melibatkan nilai a_i . Nilai OR setelah *tuning* pada input MF fuzzy adalah $OR_e = (-8, 8)$, dan $OR_{de} = (-25, 25)$. Sedangkan nilai OR untuk MF keluaran Fuzzy PID adalah tetap sebesar $OR_u = (-144, 144)$.

Bentuk MF fuzzy masing-masing input ditunjukkan pada Gambar 15 (a) dan 15 (b). Gambar 15 (c) adalah bentuk output MF-nya berupa fuzzy *singleton*. Sedangkan Gambar 15 (d) adalah bentuk dari tampilan permukaan yang merupakan *representative* dari gabungan antara input dan output fuzzy. Sinyal respons transien hasil *tuning* untuk PID controller, Fuzzy PD controller, dan Fuzzy PID controller ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Sinyal-sinyal keluran sistem pada PID controller, Fuzzy PD controller, dan Fuzzy PID controller

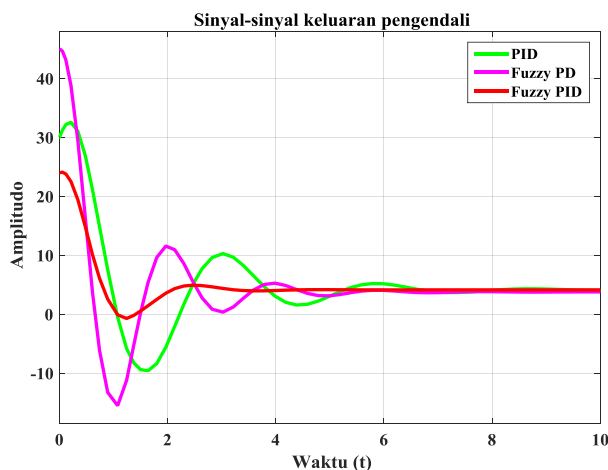
Respon keluaran sistem PID controller, untuk *rise time* T_r lebih cepat diawal yaitu 0,60s namun memiliki *Percent Overshoot* (PO) yang paling tinggi sebesar 58,9% dan mencapai *settling time* (T_s) lebih lama sebesar 6,49s dengan *error steady state* (E_{ss}) mencapai nol. Sebaliknya Fuzzy PD controller, mampu mengurangi PO sebesar 47,8% dan memperbaiki T_s sebesar 1,30s namun nilai *offset* atau E_{ss} sebesar 0,42. Hal ini disebabkan karena Fuzzy PD controller

tidak memiliki Integral *controller*. Sementara itu, pada Fuzzy PID *controller* mampu meredam nilai PO hingga 1,3% dan memiliki T_s yang paling cepat sebesar 1,60s dengan nilai $E_{ss} = 0$. Namun demikian, untuk T_r tidak secepat PID *controller* maupun Fuzzy PD *controller* yaitu sebesar 0,97s. Rangkuman respon transien keluaran sistem dari ketiga *controller* ditunjukkan pada Tabel I.

TABEL I. PERBEDAAN RESPON TRANSIEN PENGENDALI

Controller	T_r (s) 10%-90%	T_s (s)= $\pm 2\%$	PO (%)	E_{ss}
PID	0,60	6,49	58,94	0
Fuzzy PD	0,62	5,19	11,10	0,42
Fuzzy PID	0,97	1,60	1,26	0

Gambar 17 menunjukkan sinyal output dari ketiga model *controller*. Fuzzy PID *controller* mempunyai amplitudo sinyal *control* paling kecil sebesar 24,12. Namun sebaliknya, Fuzzy PD *controller* mempunyai amplitudo sinyal output *control* paling besar yaitu 45,00. Sedangkan sinyal output PID *controller* amplitudonya sebesar 32,53. Ini berarti bahwa Fuzzy PID *controller* memiliki energi yang lebih hemat dan lebih efisien dibanding PID *controller* dan Fuzzy PD *controller*. Rangkuman tentang amplitudo sinyal output *controller* ditunjukkan pada Tabel II.

Gambar 17. Sinyal output dari beberapa *controller*

TABEL II. RESPON SINYAL KELUARAN TIGA MODEL PENGENDALI

Pengendali	Amplitudo sinyal keluaran kendali
PID	32,53
Fuzzy PD	45,00
Fuzzy PID	24,12

Berdasarkan simulasi, hasil konversi antara PID *controller* dengan Fuzzy PID *controller* menunjukkan kesetaraan. Kedua sinyal menunjukan identik. Setelah proses *tuning* pada Fuzzy PID *controller*, respon transien sistem menunjukkan perbaikan. Nilai T_s PID *controller* telah diperbaiki oleh Fuzzy PID *controller* hingga 75,3% dan PO berkurang hingga 57,7%. Sementara hasil *tuning* Fuzzy PD *controller* tidak menunjukkan perbaikan signifikan respons transien seperti pada Fuzzy PID *controller*. Hasilnya menunjukkan bahwa

respon transien T_s PID *controller* diperbaiki hanya 20,0% dan PO-nya berkurang 47,8%.

Teknik *tuning* OR MF input pada Fuzzy PID *controller* mampu memperbaiki respon transien dari PID *controller*. Data di Tabel I dan Tabel II, Fuzzy PID *controller* menunjukkan keunggulan dibandingkan kedua *controller* tersebut.

IV. PENUTUP

Pengembangan metode *tuning* Fuzzy PID berbasis PID *controller* terhadap sistem orde tiga metode pengaturan OR telah berhasil. Dari hasil simulasi terbukti bahwa Fuzzy PID *controller* unggul dibandingkan Fuzzy PD *controller* dan PID *controller*. Keunggulan dimaksud pada respon transienya lebih cepat, yang ditunjukkan dengan perbaikan T_s hingga 75,3% dan PO. berkurang sebesar 57,7%. Perubahan T_s dan PO pada Fuzzy PID tersebut menggunakan pembandingan PID *Controller*. Selain itu, amplitudo lebih rendah yaitu Fuzzy PID: PID *controller* adalah 24,12:32,53. Nilai-nilai PO, T_s , dan amplitudo tersebut menunjukkan bahwa performa Fuzzy PID dengan teknik *tuning* pengaturan OR dan MF lebih baik dibandingkan dengan PID *controller*. Hasil penelitian ini dapat mendasari penelitian selanjutnya, yaitu mengimplemetasikan Fuzzy PID pada BLDC.

REFERENSI

- [1] A. H. Halim and I. Ismail, "Tree Physiology Optimization tuning rule for Proportional-Integral control," in *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 131, p. 3018.
- [2] Z. Salleh, M. Sulaiman, and R. Omar, "Tuning fuzzy membership functions to improve performance of vector control induction motor drives," *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 1-4, 2016.
- [3] J. Yin, D. Zhu, J. Liao, G. Zhu, Y. Wang, and S. Zhang, "Automatic Steering Control Algorithm Based on Compound Fuzzy PID for Rice Transplanter," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 13, p. 2666, 2019.
- [4] Y. Qin, L. Sun, Q. Hua, and P. Liu, "A fuzzy adaptive PID controller design for fuel cell power plant," *Sustainability*, vol. 10, no. 7, p. 2438, 2018.
- [5] W. Hao and J. Kan, "Application of self-tuning fuzzy proportional-integral-derivative control in hydraulic crane control system," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 6, p. 1-10, 2016.
- [6] W. Gubara, M. Elhaim, and S. F. Babiker, "Comparative study on the speed of DC motor using PID and FLC," in *2016 Conference of Basic Sciences and Engineering Studies (SGCAC)*, 2016, pp. 24-29.
- [7] O. Ibrahim, S. A. Y. Amuda, O. O. Mohammed, and G. A. Kareem, "Performance Evaluation of three PID Controller Tuning Algorithm on a process plant," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 5, no. 5, 2015.
- [8] N. Allu and S. Salu, "Aplikasi Penalaan Dengan Metode Ziegler Nichols di Perancangan Pengendali PID pada Putaran Motor DC," in *Prosiding Seminar Nasional Sinergitas Multidisiplin Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 2018, vol. 1, pp. 203-207.
- [9] R. Kumar, S. K. Singla, and V. Chopra, "Comparison among some well known control schemes with different tuning methods," *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 409-4015, 2015.
- [10] J. M. S. Ribeiro, M. F. Santos, M. J. Carmo, and M. F. Silva, "Comparison of PID controller tuning methods: analytical/classical techniques versus optimization algorithms," in *2017 18th International Carpathian control conference (ICCC)*, 2017, pp. 533-538.
- [11] N. Pitalúa-Díaz, E. J. Herrera-López, G. Valencia-Palomo, A. González-Angeles, R. A. Rodríguez-Carvajal, and N. R. Cazarez-Castro, "Comparative Analysis between Conventional PI and Fuzzy LogicPI Controllers for Indoor Benzene Concentrations," *Sustainability*, vol. 7, no. 5, pp. 5398-5412, 2015.

- [12] D. O. Njoku, A. O. Agbakwuru, I. A. Amaefule, and I. S. Onyema, "Application and Implementation of Fuzzy Logic Controller (FLC) for Feed Chemical Concentration Process," *transport*, vol. 2, pp. 16-19, 2018.
- [13] F. A. Bakri, M. Y. Mashor, S. M. Sharun, S. N. B. Sarpinah, and Z. A. Bakar, "Adaptive fuzzy logic controller with direct action type structures for InnoSAT attitude control system," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 152, no. 1, p. 12032.
- [14] J. A. Bala, O. M. Olaniyi, T. A. Folorunso, and O. T. Arulogun, "Poultry Feed Dispensing System Control: A Case between Fuzzy Logic Controller and PID Controller," *Balk J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 171-177, 2019.
- [15] V. T. Aghaei and A. Onat, "Tuning scaling factors of fuzzy logic controllers via reinforcement learning policy gradient algorithms," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*, 2017, pp. 146-151.
- [16] W. Gritli, H. Gharsallaoui, and M. Benrejeb, "PID-type fuzzy scaling factors tuning using genetic algorithm and simulink design optimization for electronic throttle valve," in *2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 2016, pp. 216-221.
- [17] A. M. Najar and D. K. Arif, "Comparison between PID controller and fuzzy sliding mode control (FSMC) on super heater system," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1218, no. 1, p. 12055.
- [18] A. Kharidege, D. Jianbiao, and Y. Zhang, "Performance Study of PID and Fuzzy Controllers for Position Control of 6 DOF arm Manipulator with Various Defuzzification Strategies," in *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 77, p. 1011.
- [19] J. Dong and B. He, "Novel fuzzy PID-type iterative learning control for quadrotor UAV," *Sensors*, vol. 19, no. 1, p. 24, 2019.
- [20] A. Pappachen and A. P. Fathima, "BFOA based FOPID controller for multi area AGC system with capacitive energy storage," *Int. J. Electr. Eng. Informatics*, vol. 7, no. 3, p. 429, 2015.
- [21] Z. Chen and J. Qu, "Control of suspended low-gravity simulation system based on self-adaptive fuzzy PID," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 231, no. 1, p. 12070.
- [22] Y. Tao *et al.*, "Fuzzy PID control method of deburring industrial robots," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2447-2455, 2015.
- [23] S. Zhang, Y. Zhang, X. Zhang, and G. Dong, "1888. Fuzzy PID control of atwo-link flexible manipulator.," *J. Vibroengineering*, vol. 18, no. 1, 2016.
- [24] C.-T. Chao, N. Sutarna, J.-S. Chiou, and C.-J. Wang, "Equivalence between fuzzy PID controllers and conventional PID controllers," *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 6, p. 513, 2017.
- [25] C.-T. Chao, N. Sutarna, J.-S. Chiou, and C.-J. Wang, "An Optimal Fuzzy PID Controller Design Based on Conventional PID Control and Nonlinear Factors," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 6, p. 1224, 2019.
- [26] K. Yan and H. Mo, "Application of fuzzy control under time-varying universe in unmanned vehicles," in *2018 33rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)*, 2018, pp. 439-444.