

Desain dan Implementasi Kontroler *Fuzzy-Supervised PID* berbasis PLC pada Sistem Kontrol Level Cairan *Coupled-Tank*

Shaumi Arif Al Faizin, Josaphat Pramudijanto

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: jos@elect-eng.its.ac.id

Abstrak— Karena sistem pengaturan level pada *coupled-tank* mempunyai karakter *nonlinear*, dicirikan oleh pengendaliannya berhubungan dengan kondisi *plant* saat dioperasikan, maka kontroler PID dengan parameter tetap tidak bisa menjamin performa yang diinginkan untuk semua kondisi operasi. Oleh karena itu *fuzzy-supervised* PID didesain untuk memodifikasi parameter PID secara *online* sesuai kondisi *plant*. Strategi kontrol diprogramkan pada PLC yang banyak digunakan pada otomasi industri. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontrol *fuzzy-supervised* PID dapat mempertahankan spesifikasi respon dengan $ts(5\%)$ sebesar 30 detik, tidak ada *overshoot*, dan *zero offset* pada nilai *set point* 10, 15, 20, dan 25. Sedangkan respon PID dengan parameter tetap menunjukkan adanya *error steady-state* (*ess*). Hasil implementasi dengan nilai *set point* 10, 13, 15, 18, 20, 22, dan 25 cm menunjukkan metode *fuzzy-supervised PID* memiliki *%ess* sebesar 0,74% dan $ts(5\%)$ sebesar 34,71 detik lebih baik dibanding PID dengan nilai 3,1% dan 37,7 detik.

Kata Kunci— *coupled-tank*, *fuzzy-supervisor*, kontroler *fuzzy*, kontroler PID, PLC.

I. PENDAHULUAN

Pengaturan level *coupled-tank* pada penerapannya memiliki karakter berupa respon yang lambat dan pengendaliannya berhubungan langsung dengan kondisi *plant* saat itu. Atau dapat dikatakan parameter sistemnya berubah tergantung pada kondisi aktual *plant*. Karena sifatnya, pengaturan level cairan pada *coupled-tank* dapat dimasukkan dalam kasus *nonlinear* [1]. Oleh karena itu untuk menghasilkan performa sistem yang bagus diperlukan strategi kontrol yang dapat beradaptasi terhadap perubahan kondisi *plant*.

Kontrol proses pada penerapannya memiliki karakter berupa respon yang lambat dan pengendaliannya berhubungan langsung dengan kondisi *plant* saat itu sehingga dapat dimasukkan ke dalam kasus *nonlinear*. Karena ketidaklinearan itu maka relatif lebih mudah untuk mendesain kontroler PID linear untuk bekerja pada kondisi operasi tertentu, misal ketika *set point* yang diberikan berupa nilai tertentu [2].

Pada sistem kontrol proses dengan *range* pengontrolan yang kecil hal ini tidak terlalu masalah. Namun untuk *range* kontrol yang lebih lebar biasanya dibutuhkan nilai *gain* yang berbeda untuk *range* variabel kontrol yang lebih tinggi dan lebih rendah guna menghindari terjadinya *overshoot* dan osilasi. Ini dibutuhkan karena nilai *overshoot* yang berlebihan contohnya dapat memicu alarm dan menghentikan proses yang

dikontrol [3].

Dari semua jenis kontroler yang digunakan industri saat ini, 90% lebih menggunakan algoritma PID [4]. Algoritma ini banyak digunakan karena kesederhanaan strukturnya, kekokohnya yang baik [5], performanya yang bagus untuk *range* pengoperasian yang luas dan kesederhanaannya sehingga *engineer* mudah mengimplementasikan [6]. Pada prakteknya parameter kontroler PID (K_p , T_i , dan T_d) diatur sedemikian rupa sehingga dapat dihasilkan respon sistem yang bagus di sekitar nilai *steady-state* tertentu. Seringkali parameter PID perlu diatur ulang ketika kondisi *plant* berubah, misalnya ketika diberikan nilai *set point* yang berbeda, karena seperti yang dijelaskan sebelumnya proses di industri adalah *nonlinear*. Oleh karena itu untuk mengatur parameter PID diperlukan operator yang sudah memiliki pengalaman akan kerja kontroler tersebut sehingga dapat dihasilkan respon sesuai yang diinginkan. Untuk mengatasi hal tersebut digunakan kontroler *fuzzy-supervised* PID di mana parameter kontrol PID akan di-*tuning* menggunakan algoritma *fuzzy* berdasarkan kondisi aktual *plant* yang menjadi masukan *fuzzy*.

II. KONTROLER PID DAN FUZZY-SUPERVISED PID

A. Kontroler PID

Kontroler PID merupakan penjumlahan dari tiga aksi kontrol yaitu proporsional, integral, dan derivatif terhadap nilai *error*. Kontroler PID ditunjukkan oleh (1)

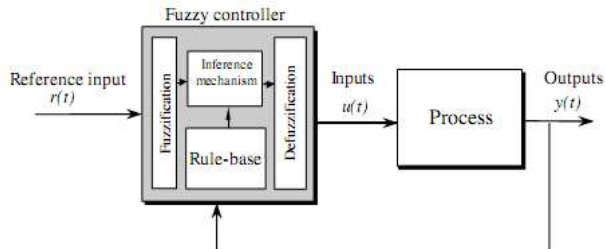
$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

dengan $u(t)$ adalah sinyal kontrol, $e(t)$ sinyal *error*, K_p , T_i , T_d berturut-turut adalah *gain* proporsional, waktu integral, dan waktu derivatif.

Ada banyak metode yang dapat digunakan dalam mendesain sebuah kontroler PID. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Direct-Synthesis* (DS). Desain kontroler dengan metode DS didasarkan pada model proses dan model proses *closed-loop* hasil desain yang diinginkan. Objektif metode ini untuk mengikuti perubahan *set point*, meskipun begitu objektif dari metode ini bisa juga ditujukan untuk mengatasi *disturbance* [7].

B. Kontroler Fuzzy

Sistem *fuzzy* merupakan pemetaan *nonlinear* antara *input* dan *output*-nya. *Input* dan *output* dari *fuzzy* adalah nilai real bukan merupakan himpunan *fuzzy*. Kontrol *fuzzy* menyediakan metodologi yang bersifat formal untuk merepresentasikan, memanipulasi, dan mengimplementasikan pengetahuan heuristik manusia tentang bagaimana mengontrol sebuah sistem [8]. Blok kontrol *fuzzy* ditunjukkan oleh Gambar 1 yang disajikan dalam sebuah sistem kontrol *closed-loop*.



Gambar. 1. Arsitektur Kontroler Fuzzy [8]

Kontroler *fuzzy* mempunyai empat komponen utama: 1) Basis aturan, berisi satu set aturan tentang bagaimana cara mengontrol sebuah sistem. 2) Mekanisme inferensi, yang mengevaluasi aturan mana yang paling baik untuk digunakan pada saat itu dan kemudian memutuskan *input* apa yang akan diberikan pada *plant*. 3) Fuzzifikasi, menerjemahkan *input* kontroler agar sesuai dengan basis aturan dan menerjemahkan *input* kontroler agar sesuai dengan basis aturan dan kemudian membandingkannya. Terakhir 4) Defuzzifikasi, merubah kesimpulan yang didapat pada mekanisme inferensi menjadi *input* yang sesuai untuk *plant*.

Untuk mendesain sebuah kontroler *fuzzy*, *engineer* harus mempunyai pengetahuan tentang bagaimana kontroler *fuzzy* bertindak dalam sebuah sistem *closed-loop*. Informasi ini bisa didapat dari orang yang paham dengan proses kontrol yang terjadi atau dengan memahami sendiri dinamika dari *plant* dan kemudian menuliskannya dalam sebuah basis aturan berbentuk “*if-then*”.

C. Fuzzy-Supervised PID

Konsep dari kontroler *fuzzy-supervised* PID (FS-PID) adalah *men-tuning* parameter PID (K_p , T_i , dan T_d) secara *online* menggunakan logika *fuzzy*. Penggunaan kontroler dengan hierarki yang lebih tinggi, melalui penerapan *fuzzy* supervisor, diharapkan dapat mengurangi kesulitan dalam *men-tuning* kontroler dan memperbaiki respon sistem dalam semua keadaan operasi yang diinginkan pendesain.

Variabel yang digunakan sebagai *input* kontroler *fuzzy* dapat bermacam-macam sesuai pendesain. *Output* dari kontroler *fuzzy* ini dapat berupa nilai parameter PID secara langsung atau berupa penambahan terhadap nilai parameter PID nominal yang telah ditentukan sebelumnya.

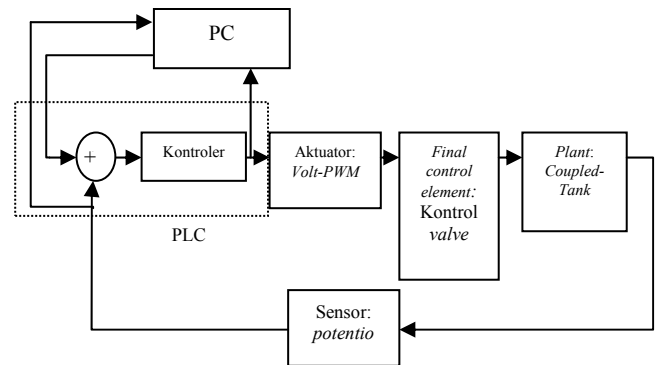
Penggunaan kontroler FS PID memungkinkan penggunaan berbagai metode *tuning* PID dalam mendesain aturan *fuzzy*. Strategi kontrol ini juga menggabungkan keunggulan dari kontroler PID dan *fuzzy* sehingga sistem dapat mencapai respon yang lebih cepat, kekokohan yang bagus, akurasi *steady-state* yang bagus, dan kemampuan

beradaptasi terhadap perubahan parameter *plant* [9].

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Arsitektur Sistem

Sistem pengaturan yang dirancang pada Gambar 2,



Gambar. 2. Arsitektur Sistem

Untuk menghasilkan sinyal umpan balik ke kontroler digunakan sensor level yang dibuat menggunakan potensiometer. Potensiometer yang digunakan adalah tipe *wirewound*.

Sebagai aktuator digunakan *ball valve* yang telah dimodifikasi sehingga dapat diatur persentase bukaanannya menggunakan motor servo posisi DC. Pengaturan posisi motor servo menggunakan sinyal yang dihasilkan oleh modul konverter tegangan ke PWM. Lebar pulsa sinyal PWM yang dihasilkan oleh konverter proporsional terhadap tegangan keluaran PLC

Pemberian *set point*, *monitoring* respon, dan pemberian parameter PID dilakukan melalui PC yang terkoneksi dengan PLC lewat *Human Machine Interface* (HMI).

Penampang *plant* yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.



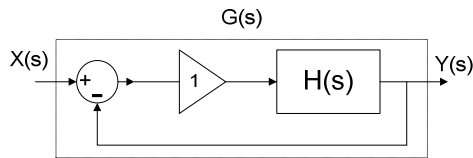
Gambar. 3. Penampang Coupled-Tank

Plant coupled-tank yang dibuat terdiri dari dua buah tangki dengan masing-masing memiliki ukuran $t \times p \times l = 40 \times 10 \times 10$ cm. Kedua tangki dihubungkan oleh sebuah *manual valve* dan terletak diatas sebuah reservoir yang digunakan untuk menampung air yang dipompa. Di dasar masing-masing

tangki terdapat *manual valve* yang terhubung ke reservoir.

B. Identifikasi Sistem

Identifikasi *plant* dilakukan secara statis dengan memberikan sinyal *step*. Identifikasi dilakukan dengan memberikan 4 nilai *set point* yang berbeda yaitu 10, 15, 20, dan 25 cm. Identifikasi sistem dilakukan secara *closed-loop* tanpa kontroler. Hal ini dilakukan karena *gain overall* dari *plant* yang tinggi sehingga air dapat melebihi kapasitas tangki sehingga identifikasi tidak mungkin dilakukan secara *open-loop*. Diagram blok identifikasi ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar. 4. Diagram Blok Identifikasi

Dengan $G(s)$ adalah persamaan *closed-loop* hasil identifikasi dan $H(s)$ adalah persamaan *open-loop plant*.

Respon yang sudah didapat akan dimodelkan menggunakan metode Smith sehingga akan didapatkan model dalam bentuk (2)

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1} = \frac{K(1-\theta s)}{\alpha s^2 + \beta s + 1} \quad (2)$$

Dengan K (gain), τ , ζ (zeta), θ (waktu tunda) adalah parameter *plant* yang dicari. Metode Smith dipilih karena model yang dihasilkan dapat berupa sistem orde-2 *overdamped*, *criticallydamped*, atau *underdamped* [10], sedangkan metode lain seperti Strejc dan Viteckova hanya terbatas pada model *criticallydamped*.

Untuk masing masing *set point* dilakukan pengambilan data sebanyak 5 kali yang akan dicari nilai RMSE-nya yang terkecil. Hasil identifikasi untuk *set point* 25, 20, 15 dan 10 cm disertai RMSE-nya yang terkecil ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1.
Persamaan *Closed Loop* Sistem, $G(s)$

Set Point	Fungsi Alih	RMSE
10	$G(s) = \frac{0,9696e^{-0,1688s}}{76,2758s^2 + 17,4672s + 1}$	0,3585
15	$G(s) = \frac{0,9665e^{-0,4923s}}{67,5733s^2 + 16,4406s + 1}$	0,2115
20	$G(s) = \frac{0,9553e^{-0,5s}}{78,1155s^2 + 17,6766s + 1}$	0,1076
25	$G(s) = \frac{0,9370e^{-0,6714s}}{68,0031s^2 + 16,4928s + 1}$	0,1579

Dari nilai $G(s)$ dapat dicari nilai $H(s)$ yang merupakan model *plant* dalam (3)

$$H(s) = \frac{K'e^{-\theta s}}{\alpha's^2 + \beta's + 1} \quad (3)$$

Dengan parameter K' , α' , dan β' ditunjukkan dalam (4)

$$K' = \frac{K}{1-K}; \alpha' = \alpha(1+K); \beta' = \beta(1+K) + K\theta \quad (4)$$

Fungsi Alih $H(s)$ dibutuhkan untuk mendesain kontroler PID. Nilai $H(s)$ untuk masing masing *set point* ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 2.
Model *Plant* $H(s)$

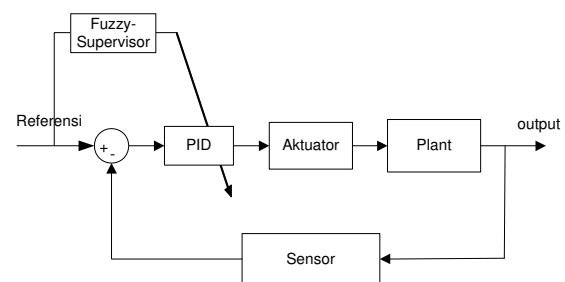
Set Point	Fungsi Alih
10	$H(s) = \frac{31,8947e^{-0,1688s}}{2545,4004s^2 + 584,1075s + 1}$
15	$H(s) = \frac{28,8507e^{-0,4923s}}{2017,1144s^2 + 504,9674s + 1}$
20	$H(s) = \frac{21,3714e^{-0,5s}}{1745,5514s^2 + 346,8179s + 1}$
25	$H(s) = \frac{14,8730e^{-0,6714s}}{1079,4145s^2 + 229,8897s + 1}$

Keempat model $H(s)$ tersebut selanjutnya dijadikan acuan dalam mendesain kontroler. Parameter kontroler PID yang didapatkan dari keempat model ini dijadikan dasar dalam mendesain kontrol *fuzzy-supervisor* yang selanjutnya akan menala parameter PID.

IV. PERANCANGAN KONTROLER

A. Perancangan Kontroler PID

Diagram blok dari *fuzzy-supervised* PID yang dirancang ditunjukkan oleh Gambar 5 dimana *fuzzy* akan menala parameter PID berdasar nilai *set point* sistem



Gambar. 5. Diagram Blok Sistem

Desain kontroler dengan metode DS didasarkan pada model proses dan model proses *closed-loop* hasil desain yang diinginkan. Jika persamaan sistem yang akan dikontrol ditunjukkan oleh (5)

$$H(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (5)$$

dan model *closed-loop* yang diinginkan adalah (6)

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{e^{-\theta s}}{\tau_c s + 1} \quad (6)$$

dengan $Y(s)$ adalah respon level, $R(s)$ nilai *set point*, dan τ_c

adalah konstanta waktu sistem maka dapat diperoleh kontroler dengan struktur PID dalam (7)

$$Kp = \frac{\tau_1 + \tau_2}{K(\tau_c + \theta)}; Ti = \tau_1 + \tau_2; Td = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \quad (7)$$

Spesifikasi desain PID dalam penelitian ini adalah $ess = 0\%$ dan $ts(5\%) = 3 * \tau_c = 30$ detik. Dengan mengubah bentuk $H(s)$ ke dalam (5) kemudian menggunakan (7) maka nilai parameter PID dapat diperoleh. Nilai parameter PID hasil metode DS ditunjukkan dalam Tabel 3.

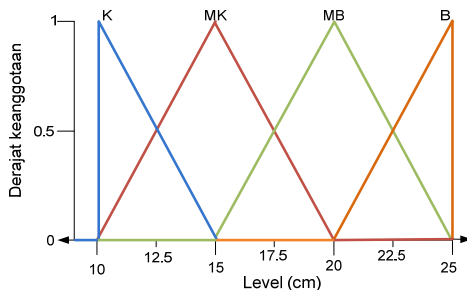
Tabel 3.
Parameter PID

Set Point	Kp	τ_i	τ_d
25	1,8272	592,6251	4,3573
20	1,6650	504,0274	3,9952
15	1,5595	349,9427	5,0403
10	1,4618	232,0689	4,6971

B. Perancangan Kontroler Fuzzy Supervisor

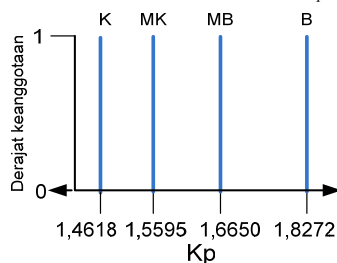
Metode *fuzzy* yang digunakan dalam penelitian ini adalah tipe Sugeno. Ini dikarenakan dari segi komputasi metode Sugeno lebih efisien dibanding Mamdani karena lebih mudah dieksekusi dan dibuat algoritmanya. *Fuzzy* yang dirancang akan mempunyai satu nilai *input* yaitu *set point* dan tiga nilai *output* yaitu K_p , T_i , dan T_d .

Fungsi keanggotaan dari *input fuzzy* ditunjukkan oleh Gambar 6 yang berbentuk segitiga simetris.



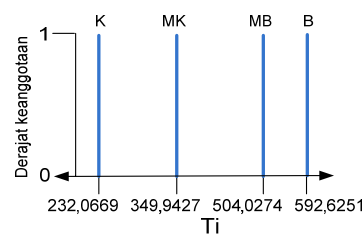
Gambar 6. Fungsi Keanggotaan Input

Fungsi keanggotaan *output* K_p ditunjukkan oleh Gambar 7.



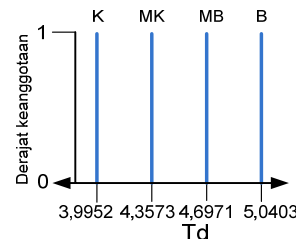
Gambar 7. Fungsi Keanggotaan Output K_p

Fungsi keanggotaan *output* T_i ditunjukkan oleh Gambar 8.



Gambar 8. Fungsi Keanggotaan Output T_i

Fungsi keanggotaan *output* T_d ditunjukkan oleh Gambar 9.



Gambar 9. Fungsi Keanggotaan Output T_d

Dapat dilihat bahwa bentuk fungsi keanggotaan *output* berbentuk *singleton* yang merupakan ciri dari *fuzzy* tipe Sugeno.

Basis aturan dapat dibentuk dengan memperhatikan parameter PID yang telah didapat pada Tabel 3 dan variabel linguistic dari fungsi keanggotaan *input-output fuzzy* (K, MK, MB, B). Sehingga didapat basis aturan berikut:

- (0) If Level is K then K_p is K, T_i is K, T_d is MB
- (1) If Level is MK then K_p is MK, T_i is MK, T_d is B
- (2) If Level is MB then K_p is MB, T_i is MB, T_d is MK
- (3) If Level is B then K_p is B, T_i is B, T_d is K

Untuk proses defuzzifikasi digunakan metode *weighting-average* yang ditunjukkan oleh (8)

$$out = \frac{\sum_{i=0}^3 (mf(i) * center(rule(i)))}{\sum_{i=0}^3 mf(i)} \quad (8)$$

dengan *out* adalah nilai *output fuzzy* (nilai K_p , T_i , atau T_d), $mf(i)$ adalah nilai fungsi keanggotaan *input* i dimana i adalah indeks dari variabel linguistic (K=0, MK=1, MB=2, B=3), *center* adalah nilai dari variabel linguistic pada fungsi keanggotaan *output fuzzy*, *rule* (i) adalah basis aturan ke i .

V. PEMBUATAN PROGRAM PLC DAN HMI

Pembuatan program di PLC Siemens S7-300 dilakukan dengan mengombinasikan *ladder diagram* dengan *Structure Control Language* (SCL). Program yang dihasilkan diletakkan ke dalam dua blok utama yaitu *cyclic block* yang selalu di-scan oleh PLC tiap waktu dan sebuah *interrupt block* yang dieksekusi oleh PLC tiap 500 ms. Di dalam *interrupt block* diletakkan program kontroler FS-PID yang telah dirancang. Penggunaan blok *interrupt* ditujukan untuk menjaga waktu *sampling* dari kontroler tetap presisi karena kontroler yang

dibuat berada dalam domain diskrit.

HMI yang dibuat terdiri dari 4 jendela. Jendela pertama untuk monitoring *plant*, jendela kedua untuk mengatur mode kontroler, jendela ketiga untuk mengisikan parameter PID dan *fuzzy*, dan jendela keempat untuk memonitor *trend* dari variabel *plant* (SP, MV, PV). Desain HMI yang dibuat ditunjukkan oleh Gambar 10.



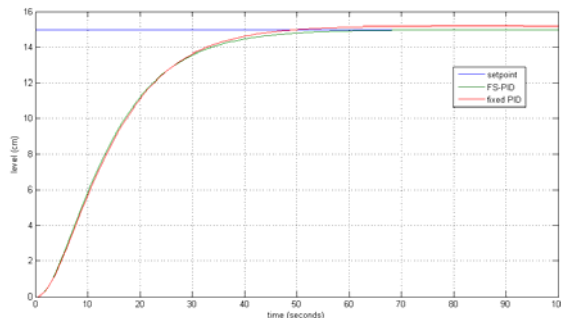
Gambar. 10. Jendela Ketiga HMI yang Dibuat

VI. SIMULASI DAN IMPLEMENTASI

A. Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan Matlab/Simulink. Pada simulasi, *set point* yang diberikan adalah 10, 15, 20, dan 25 cm. Di sini akan dibandingkan hasil antara metode FS-PID yang telah dirancang dengan PID parameter tetap. Untuk PID dengan parameter tetap, nilai K_p , T_i , dan T_d yang digunakan berasal dari hasil desain berdasarkan model $H(s)$ untuk *set point* 10 cm.

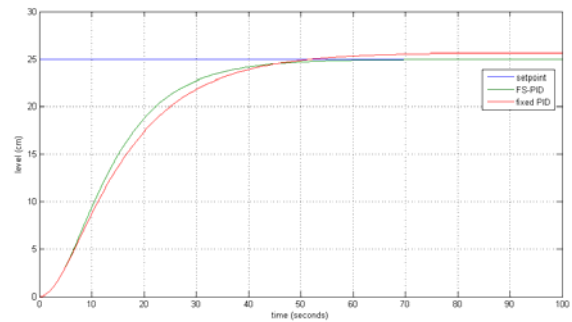
Hasil simulasi untuk *set point* 25 cm ditunjukkan oleh Gambar 11.



Gambar. 11. Respon Hasil Simulasi dengan Set Point 15 cm

Gambar 12 menunjukkan respon untuk kontroler PID memiliki %*ess* sebesar 1,22% dan $ts(5\%)$ sebesar 35,5 detik. Untuk kontroler FS-PID respon memiliki spesifikasi yang sedikit lebih bagus yaitu $ts(5\%)$ sebesar 36,5 detik dan zero offset.

Hasil simulasi untuk *set point* 25 cm ditunjukkan oleh Gambar 12.



Gambar. 12. Respon Hasil Simulasi dengan Set Point 25 cm

Respon untuk kontroler PID memiliki %*ess* sebesar 2,52% dan $ts(5\%)$ sebesar 39 detik. Untuk kontroler FS-PID respon memiliki spesifikasi yang sedikit lebih bagus yaitu $ts(5\%)$ sebesar 36 detik dan zero offset.

Spesifikasi waktu dari keempat respon untuk tiap *set point* dari hasil simulasi ditunjukkan oleh Tabel 4

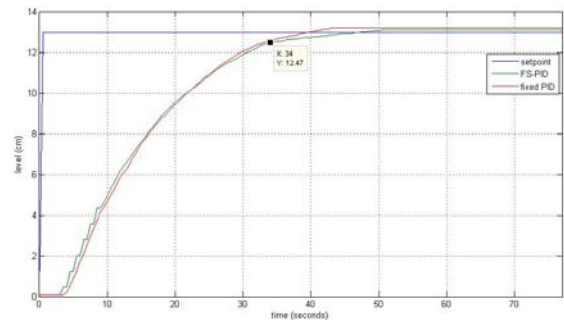
Tabel 4.
Perbandingan Spesifikasi Waktu Hasil Simulasi

Set Point	%ess		$ts(5\%)$ (detik)		τ (detik)		$tr(10-90\%)$ (detik)	
	PID	FS-PID	PI D	FS-PID	PID	FS-PID	PID	FS-PID
10	0 %	0 %	35,5	35,5	15	15	24,5	24,5
15	1,22 %	0 %	35,5	36,5	16,5	16	26	25,5
20	2,2 %	0 %	38	35,5	17,5	15	29	24,5
25	2,52%	0 %	39	36	18,5	16	30,5	24,5

B. Implementasi

Implementasi dilakukan pada *set point* 10, 15, 20, dan 25 cm, nilai *set point* yang menjadi acuan dalam membuat aturan *fuzzy*, serta *set point* 13, 18, dan 22 cm untuk menguji kontroler FS-PID pada nilai *set point* yang tidak dijadikan acuan dalam mendesain kontroler *fuzzy*.

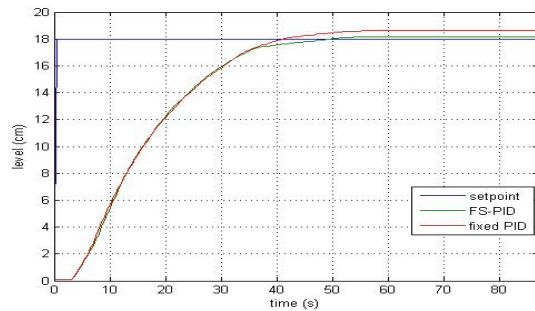
Respon sistem untuk *set point* 13 cm ditunjukkan oleh Gambar 13.



Gambar. 13. Respon Hasil Implementasi dengan Set Point 13 cm

Respon kontroler PID respon sistem memiliki %*ess* sebesar 1,6% dengan $ts(5\%)$ sebesar 33,5 detik. Sedangkan untuk kontroler FS-PID respon sistem memiliki %*ess* sebesar 0,9% dengan $ts(5\%)$ sebesar 35 detik.

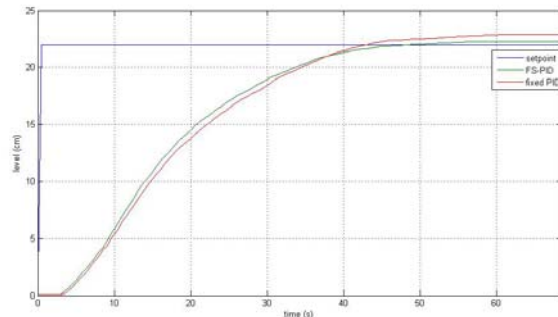
Respon sistem untuk *set point* 18 cm ditunjukkan oleh Gambar 14.



Gambar. 14. Respon Hasil Implementasi dengan Set Point 18 cm

Untuk kontroler PID respon sistem memiliki %*ess* sebesar 3,4% dengan *ts*(5%) sebesar 38,5 detik. Sedangkan untuk kontroler FS-PID respon sistem memiliki %*ess* sebesar 0,8% dengan *ts*(5%) sebesar 35 detik.

Respon sistem untuk *set point* 22 cm ditunjukkan oleh Gambar 15.



Gambar. 15. Respon Hasil Implementasi dengan Set Point 22 cm

Untuk kontroler PID respon sistem memiliki %*ess* sebesar 4,18% dengan *ts*(5%) sebesar 42 detik. Sedangkan untuk kontroler FS-PID respon sistem memiliki %*ess* sebesar 1% dengan *ts*(5%) sebesar 38 detik.

Secara keseluruhan perbandingan parameter waktu *ts*(5%), *tr*, *ts*(5%), dan %*ess* hasil pengujian *plant* menggunakan kontroler PID dan FS-PID dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5.
Perbandingan Spesifikasi Waktu Hasil Implementasi

Set Point	% <i>ess</i>		<i>ts</i> (5%) (detik)		τ (detik)		<i>tr</i> (10-90%) (detik)	
	PID	FS-PID	PID	FS-PID	PID	FS-PID	PID	FS-PID
10	1,3 %	1,3 %	27	27	12,5	12,5	18,5	18,5
15	2,93 %	0,9%	34	35,5	17	17	24	24,5
20	3,45 %	0,3 %	41	35,5	20	18	29	26
25	4,24%	0,3 %	43,5	38	22	20,5	32	28
13	1,6%	0,9%	33,5	34	17	16,5	23,5	23,5
18	3,4%	0,8%	38,5	35	19	18,5	27	25,5
22	4,18%	1%	42	38	21	19	30	27,5

Dari ketujuh data dapat dilihat bahwa nilai %*ess* untuk metode FS-PID selalu lebih kecil dibandingkan metode PID dengan parameter tetap. Rata-rata nilai %*ess* untuk metode FS-PID sekitar 0,74% sedangkan untuk metode PID dengan parameter tetap 3,1%. Nilai *ts*(5%) untuk metode FS-PID juga lebih kecil dengan rata-rata 34,71 detik dibanding PID parameter tetap dengan rata-rata 37,07 detik.

Nilai *ts*(5%) yang lebih besar untuk metode FS-PID hanya terjadi pada *set point* 13 dan 15 cm. Hal ini sesuai dengan hasil simulasi seperti ditunjukkan Tabel 4. Dari Tabel 5 juga dapat dilihat bahwa semakin jauh nilai *set point* yang diberikan pada sistem terhadap nilai *set point* di mana kontroler didesain (dalam percobaan ini *set point* 10 cm) nilai %*ess* dan *ts*(5%) juga semakin besar.

VII. KESIMPULAN

Hasil simulasi dan implementasi menunjukkan kontroler FS-PID dapat memberikan respon yang lebih baik dibandingkan dengan kontroler PID dengan parameter tetap ditinjau dari nilai %*ess* dan *ts*(5%) untuk *input* berupa *step* dengan nilai yang bervariasi. Agar dapat menghasilkan performa kontroler FS-PID yang lebih bagus jumlah parameter *input fuzzy* dapat ditambah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yan Zhao, "Research on Application of Fuzzy PID Controller in Two-Container Water Tank System Control", *2010 International Conference on Machine Vision and Human-Machine Interface (MVHI)*, pp. 679-682, 24-25 April 2010.
- [2] M. Dotoli, B. Maione dan B. Turchiano, "Fuzzy-Supervised PID Control: Experimental Results", *EUNITE 2001, Annual Symposium on "Intelligent Technologies, Hybrid Systems and their Implementation in Smart Adaptive Systems"*, Tenerife, 13-14 December 2002.
- [3] Zhiqiang Gao, Trautzsch, T.A., dan Dawson, J.G., "A stable self-tuning fuzzy logic control system for industrial temperature regulation", *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference*, vol.2, pp.1232, 2000.
- [4] Sehab, R., "Fuzzy PID Supervision for a Nonlinear, System: Design and Implementation", *Fuzzy Information Processing Society, 2007. NAFIPS '07. Annual Meeting of the North American*, pp. 36-41, 24-27 June 2007.
- [5] Zhen-Yu Zhao; Tomizuka, M.; Isaka, S., "Fuzzy gain scheduling of PID controllers", *First IEEE Conference on Control Applications*, pp. 698-703, vol.2, 13-16 Sep 1992.
- [6] Richard C.Dorf dan Robert H. Bishop, "Modern Control Systems", Prentice Hall, New Jersey, Ch. 7, 2008.
- [7] Chen, D. dan Seborg, D.E., "PI/PID Controller Design Based on Direct Synthesis and Disturbance Rejection", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Volume 41, 4807-4822, 2002.
- [8] Passino, K.M, Yurkovich, S., "Fuzzy Control", Addison Wesley Longman, California, Ch 2, 1998.
- [9] Z. Jike, W. Shengtie, dan W. Zhihe, "Nonlinear Fuzzy PID Control Strategy for Nonlinear Plant with Large Inertia", *Proceedings of 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 2537-2541, July 2012.
- [10] Seborg D.E, Edgar, T.F, dan Mellichamp D.A, "Process Dynamics and Control", John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, Ch 6-7, 2004.