

Perancangan Sistem Kontrol Level Nonlinier Menggunakan Fuzzy-PID Supervision

Chalidia Nurin Hamdani, S.T., M.T.

Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu, Jawa Tengah, Indonesia

email: hamdani113@gmail.com

Abstrak - Sistem level dapat dikategorikan sebagai sistem nonlinier karena dinamika dan *deadtime* yang dimilikinya. Perubahan dinamika terjadi ketika *setpoint* yang diberikan berubah. Karakteristik ini menyebabkan kontroler PID konvensional dengan parameter tetap tidak mampu mengatasinya. Kontroler perlu di-*tuning* setiap *setpoint* berubah untuk menyesuaikan dengan dinamika sistem agar respon yang dihasilkan sesuai keinginan. Dalam paper ini, kami merancang sistem kontrol level menggunakan PID dengan parameter yang disupervisi oleh kontrol fuzzy. PID dirancang menggunakan metode *Direct Synthesis* (DS) untuk semua titik kerja yang ditentukan. Kontrol fuzzy dirancang berdasarkan nilai-nilai parameter PID yang diperoleh sehingga kontrol fuzzy secara langsung memetakan parameter kontroler PID didasarkan pada *setpoint* yang diberikan. Metode ini cukup sederhana namun efektif: PID tidak perlu di-*tuning* ulang meskipun *setpoint* berubah karena kontroler dirancang secara *behavior-based*. Hasil rancangan disimulasikan menggunakan *software* MATLAB. Simulasi menunjukkan bahwa sistem kontrol level hasil rancangan mampu mencapai *setpoint* yang diberikan dengan *settling time* t_s ($\pm 5\%$) berkisar antara 4 s.d. 6,5 detik, *zero overshoot* dan *zero offset*. Perbandingan dengan sistem kontrol PID konvensional juga menunjukkan hasil yang baik. Sistem kontrol level hasil rancangan mampu menjamin respon yang memenuhi performa *zero overshoot* dan *zero offset*.

Kata Kunci - sistem level, nonlinear, fuzzy, *direct synthesis*

Abstract - Level system can be classified as nonlinear system because of its dynamic and deadtime. One of its dynamic characteristics is the changeable depend on setpoint given. So, the conventional PID controller cannot handle it perfectly in one tuning or synthesis condition. In this paper, we propose a level control system using PID with input based fuzzy supervision. PID is designed using Direct Synthesis (DS) method for every operating point determined before. Fuzzy control is designed based on PID parameters from DS calculation so it is able to mapping all of parameters and setpoints. This control design is simple but effective: retuning PID is not necessary even though setpoint is changed because the controller have been designed using behaviour-based. The algorithms have been simulated using MATLAB. The results show that the level control designed is able to reach setpoint given with *settling time* ($\pm 5\%$) around 4 to 6,5 sec, *zero overshoot* and *zero offset*. System control designed was compared with conventional PID and the result is quite good. The fuzzy-PID supervision is able to guarantee that the responses will satisfy the desired performance: *zero overshoot* and *zero offset*.

Keywords - level system, nonlinear, fuzzy, direct sythesis

I. PENDAHULUAN

Dalam proses di industri, dikenal 4 sistem proses dasar yang harus dikontrol: sistem level, aliran, tekanan, dan suhu. Penelitian ini fokus pada salah satu proses dasar tersebut, yaitu sistem level. Dalam pengaplikasiannya, sistem level memiliki karakteristik respon yang lambat. Hal ini disebabkan adanya *deadtime* dan *delay time*. Selain itu, dinamika sistem level dapat berubah

berdasarkan perubahan *setpoint*. Sehingga sistem ini dapat diklasifikasikan sebagai sistem nonlinier [1][2].

Sebagai sistem nonlinier, sistem kontrol level sangat menarik untuk diteliti. Akan tetapi, hingga saat ini kontroler PID masih merupakan kontroler yang banyak digunakan di industri untuk sistem ini. Dalam [3] disebutkan bahwa penggunaan kontroler PID di industri masih mencapai 90%. Data ini menunjukkan bahwa kontroler PID masih diandalkan di pengendalian proses industri. Meskipun begitu, masih banyak tantangan dalam perancangan kontroler PID itu sendiri.

Pada tahun 1942, Ziegler-Nichols memperkenalkan formula tuning berdasarkan respon sistem dan pengalaman mereka [4][5]. Kelamahan metode ini adalah ketidakpastian dalam memperoleh parameter yang cocok untuk sistem yang akan dikendalikan. Parameter kontroler PID yang dihitung dengan metode ini tidak selalu menghasilkan respon sistem yang bagus. Artinya, dengan metode ini, seorang perancang sistem kontrol tidak dapat menentukan performa sistem yang diinginkan.

Dalam [6], Chen dan Seborg memperkenalkan metode Direct Synthesis (DS) untuk merancang kontroler PID berdasarkan model sistem yang akan dikontrol. Metode ini menawarkan formula yang lebih baik dalam perancangan kontroler. Perancang sistem kontrol dapat menghitung parameter kontroler berdasarkan respon sistem lup tertutup yang diinginkan. Metode ini dapat diterapkan pada kontroler PID pada sistem linier. Untuk sistem nonlinear, seperti sistem level, dibutuhkan perhitungan ulang ketika dinamika sistem berubah sesuai *setpoint* yang diberikan. Hal ini akan menjadi semakin tidak efektif jika *setpoint* sistem berubah-ubah dalam range yang cukup lebar. Perbedaan perancangan kontroler untuk sistem linier dan nonlinier secara khusus dibahas di [7].

Banyak peneliti yang mempelajari metode-metode pengembangan kontroler PID untuk sistem nonlinier seperti pada [8][9][10]. Selain itu, [11][12][13] menggunakan metode lain namun dengan struktur PID dengan harapan meningkatkan performa sistem kontrol yang dirancang. Kendala utama dalam metode-metode tersebut adalah algoritma yang sulit diimplementasikan. Seperti yang banyak terjadi di lapangan, algoritma kontroler PID dirancang dan diimplementasikan dengan program tertentu dalam bentuk produk perangkat keras tertentu, seperti PLC, DCS dan lain-lain. Hal ini menyebabkan modifikasi algoritma PID menjadi terbatas.

Salah satu cara yang mungkin dilakukan adalah metode kombinasi. Penelitian tentang pengkombinasian suatu metode dengan PID sudah cukup banyak dilakukan. Seperti pada [14], jaringan saraf tiruan dan logika fuzzy dikombinasikan dengan kontroler PID untuk sistem pemanas. Hasil yang diperoleh cukup bagus: respon cepat, *overshoot* minimal, *rise time* dan *settling time* kecil. Akan tetapi, algoritma yang dihasilkan masih terlalu kompleks untuk diimplementasikan. Dibutuhkan perangkat keras dengan kecepatan prosesor yang cukup tinggi untuk bisa menjalankan algoritma ini.

Metode lainnya yang cukup simpel disajikan dalam [15]. Logika fuzzy dirancang untuk menentukan nilai parameter PID berdasarkan nilai *error* dan *delta-error*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem kontrol yang dirancang mampu meningkatkan performa dari PID konvensional pada sistem nonlinier.

Dalam pengendalian sistem nonlinier, yang perlu diperhatikan pertama adalah bagaimana supaya sinyal kontrol dalam sistem lup tertutup dapat beradaptasi dan mengatasi sifat nonlinieritas dari sistem. Kemudian, yang kedua tentukan performa yang diinginkan. Lalu tentukan metode cocok agar sinyal kontrol mampu mengendalikan sistem sesuai performa yang diinginkan. Hal ini yang membuat topik pengendalian sistem nonlinier menarik untuk diteliti.

Dalam penelitian ini, kami merancang sistem kontrol level yang simpel namun efektif. Kontroler utama menggunakan struktur PID dengan parameter yang dihitung menggunakan metode *Direct Synthesis*. Kontroler PID disupervisi oleh kontrol fuzzy yang dirancang sesuai titik kerja dari plant yang ditentukan. Pada bagian berikutnya kami perjelas metode yang digunakan dalam penelitian ini. Kemudian bagian 3, ditunjukkan hasil simulasi dan pembahasan dari penelitian ini.

II. METODE

A. Model Sistem Level

Sistem level yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulator proses yang ada di Laboratorium Instrumentasi dan Elektronika PEM Akamigas. Sistem level terdiri dari tanki proses, tanki reservoir, pompa, *control valve* dan *DP transmitter*. Sistem ini dapat dinyatakan secara matematis menggunakan hukum fisika. Pertama, ditinjau dari perubahan massa cairan dalam tangki:

$$m_{t+\Delta t} - m_t = m_{in\Delta t} - m_{out\Delta t} \tag{1}$$

Persamaan (1) dapat dinyatakan dalam persamaan massa jenis berikut:

$$\rho Ah_{t+\Delta t} - \rho Ah_t = \rho Q_{in\Delta t} - \rho Q_{out\Delta t} \tag{2}$$

$$\frac{d\rho Ah}{dt} = \rho Q_{in} - \rho Q_{out} \tag{3}$$

Dengan ρ adalah massa jenis cairan, A adalah luas penampang, h adalah tinggi permukaan cairan dan, Q_{in} , Q_{out} kecepatan aliran masuk dan keluar.

Dengan menggunakan hukum Bernoulli dan asumsi berikut:

1. Pada bagian atas tangki, kecepatan aliran cairan sangat kecil (mendekati nol) karena luas permukaan *intake* jauh lebih kecil dibandingkan luas permukaan tangki;
2. Pada dasar tangka, ketinggian cairan adalah nol;

maka dapat diperoleh:

$$gh_1 + \frac{p}{\rho} = \frac{V_2^2}{2} + \frac{p}{\rho} \tag{4}$$

$$V_2 = \sqrt{2gh} \tag{5}$$

Substitusi Persamaan (5) ke Persamaan (3):

$$\frac{d\rho Ah}{dt} = \rho Q_{in} - \rho a\sqrt{2gh} \tag{6}$$

$$\frac{dAh}{dt} = Q_{in} - a\sqrt{2gh} \tag{7}$$

Dari Persamaan (7), dapat dilihat bahwa sistem level adalah nonlinier. Dalam beberapa aplikasi dengan rentang *setpoint* yang sempit, sistem bisa dianggap linier, sehingga kontroler PID konvensional bisa menanganinya. Akan tetapi, pada rentang *setpoint* yang lebar, kontroler PID dengan parameter tetap tidak bisa menangani sistem ini. Perlu dilakukan tuning ulang ketika set poin dirubah agar respon sistem tetap memenuhi performa yang diinginkan.

Untuk mendapatkan model matematika dari sistem level, digunakan metode pemodelan *black box* [16]. Dengan menentukan beberapa *manipulated variabel* (MV) yang akan digunakan sebagai acuan pemodelan dan bantuan *System Identification Toolbox* dalam *software* MATLAB, maka diperoleh model matematika sistem sebagaimana pada Tabel 1.

TABEL 1. FUNGSI ALIH SISTEM LEVEL CAIRAN

MV	Fungsi Alih	Fit to Estimation Data
15	$\frac{2,5968e^{-0,192462s}}{1 + 1,8074s}$	81,47%

20	$\frac{2,3906e^{-0,190940s}}{1 + 2,0816s}$	90,83%
25	$\frac{2,4862e^{-0,1870462s}}{1 + 2,91886s}$	92,16%
30	$\frac{1,8965e^{-0,1973s}}{1 + 2,3415s}$	90,85%

B. Kontroler PID

Persamaan umum kontroler PID [17]:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \tag{8}$$

dengan K_p , T_i dan T_d merupakan parameter kontroler PID: penguatan proporsional, waktu integral dan waktu derivatif.

Perancangan kontroler PID dilakukan dengan menggunakan metode Direct Synthesis (DS) Metode DS memungkinkan perancangan kontroler dengan didasarkan pada persamaan model sistem dan model yang diinginkan [18]. Jika sistem orde satu yang akan dikontrol dinyatakan dalam persamaan:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \tag{9}$$

maka fungsi alih sistem lup tertutup secara keseluruhan dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \tag{10}$$

Dari persamaan (10), dapat diperoleh persamaan kontroler yang dinyatakan sebagai fungsi sistem lup tertutup, yaitu:

$$G_c(s) = \frac{C(s)/R(s)}{\left(1 - C(s)/R(s)\right)G(s)} \tag{11}$$

Dengan menentukan fungsi alih model sistem lup tertutup:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{e^{-\theta s}}{\tau_c s + 1} \tag{12}$$

Persamaan (11) dapat dinyatakan dengan:

$$G_c(s) = \frac{\frac{e^{-\theta s}}{\tau_c s + 1}}{\left(1 - \frac{e^{-\theta s}}{\tau_c s + 1}\right)\frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1}} \tag{13}$$

Persamaan (13) dapat disederhanakan dengan operasi matematika sederhana dan substitusi fungsi eksponensial dengan deret Taylor:

$$e^{-\theta s} \cong 1 - \theta s$$

Sehingga diperoleh:

$$G_c(s) = \frac{\tau}{K(\tau_c + \theta)} + \frac{1}{K(\tau_c + \theta)s} \tag{14}$$

atau

$$G_c(s) = \frac{\tau}{K(\tau_c + \theta)} \left(1 + \frac{1}{\tau s} \right) \tag{15}$$

Persamaan (15) merupakan persamaan kontroler yang harus dipenuhi agar karakteristik model sistem lup tertutup yang diinginkan dapat dicapai. Dengan melihat kembali persamaan (8) dapat diketahui bahwa:

$$K_p = \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta + \tau_c} \tag{16}$$

$$T_i = \tau \tag{17}$$

$$T_d = 0 \tag{18}$$

Dari persamaan (16) - (18) dapat dilihat bahwa nilai T_d adalah nol. Artinya, dengan metode DS, sistem level cukup dikendalikan oleh kontroler PI dengan parameter yang dapat dihitung berturut-turut sebagaimana persamaan (16) dan (17). Model sistem lup tertutup yang diinginkan ditentukan sebagaimana pada Tabel 2.

TABEL 2. MODEL SISTEM LUP TERTUUP DIINGINKAN

MV	Fungsi Alih
15	$\frac{e^{-0,192462s}}{3s + 1}$
20	$\frac{e^{-0,190940s}}{3s + 1}$
25	$\frac{e^{-0,1870462s}}{3s + 1}$
30	$\frac{e^{-0,1973s}}{3s + 1}$

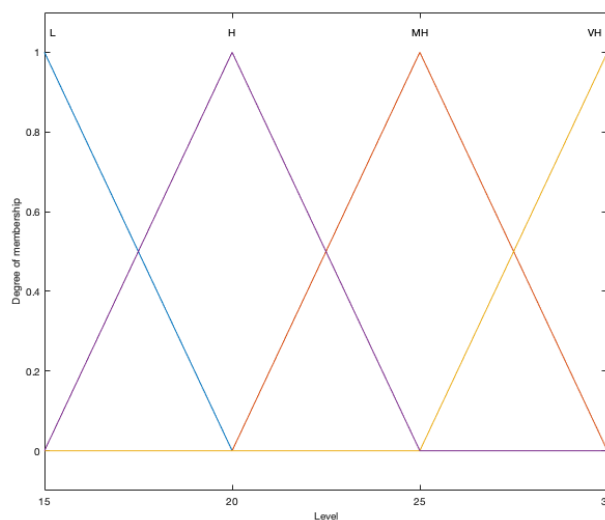
Hasil perhitungan parameter kontroler PID untuk masing-masing titik kerja dapat dilihat pada Tabel 3.

TABEL 3. FUNGSI ALIH SISTEM LEVEL CAIRAN

MV	Kp	Ti	Td
15	0,21801684	1,8074	0
20	0,3974293	2,0816	0
25	0,36837389	2,91886	0
30	0,38615168	2,3415	0

C. Kontroler Fuzzy

Perancangan kontroler fuzzy didasarkan pada hasil perhitungan parameter PID. Tipe fuzzy yang digunakan adalah tipe Sugeno. Pemilihan ini didasarkan pada keefisienan algoritma dan kemudahan dalam eksekusi. Kontrol fuzzy dirancang dengan satu masukan dan dua keluaran. *Membership function* pada masukan menggunakan fungsi segitiga dengan nilai *setpoint* pemodelan sebagai titik tengah sebagaimana pada Gambar 1.



Gambar 1. Membership function masukan

Untuk keluaran K_p dan T_i , membership function yang digunakan adalah fungsi konstan berdasarkan nilai parameter kontroler pada Tabel 2. *Rule base* yang digunakan adalah sebagai berikut:

- If Level is L then K_p is L, T_i is L
- If Level is H then K_p is H, T_i is H
- If Level is MH then K_p is MH, T_i is MH
- If Level is VH then K_p is VH, T_i is VH

Metode defuzzifikasi yang digunakan adalah *weighted average* dengan persamaan sebagaimana persamaan (19).

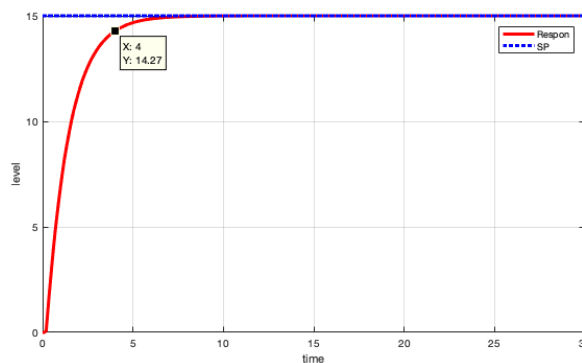
$$y^* = \sum_{i=0}^3 \frac{\mu(i).c(i)}{\mu(i)} \tag{19}$$

dengan y^* adalah nilai crisp, μ adalah derajat keanggotaan dan c adalah titik tengah *membership function*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

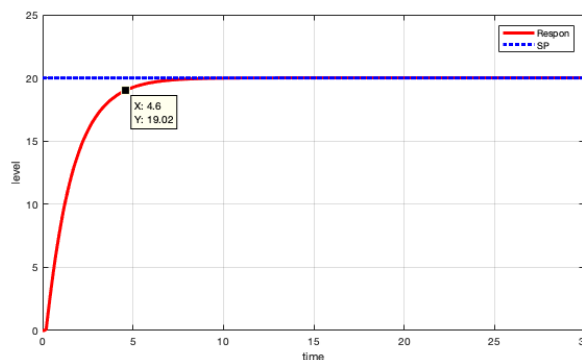
Sistem kontrol hasil rancangan disimulasikan dengan menggunakan bantuan SIMULINK MATLAB. Simulasi dibuat untuk melihat respon transien sistem lup tertutup, apakah sudah sesuai dengan karakteristik yang diinginkan atau belum.

Pertama, dilakukan simulasi dengan sinyal uji berupa sinyal step 15, 20, 25 dan 30 berturut-turut.



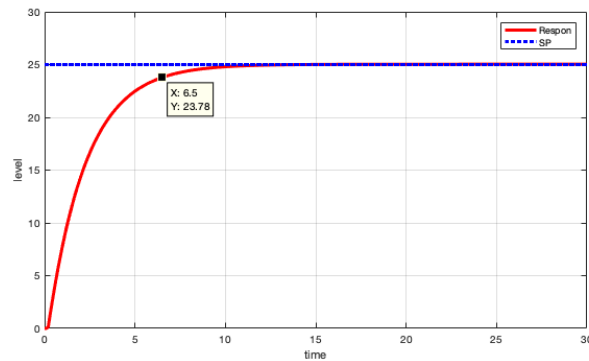
Gambar 2. Respon sistem terhadap sinyal step 15.

Respon sistem lup tertutup terhadap sinyal step 15 dapat dilihat pada Gambar 2. Karakteristik respon sistem yang diperoleh adalah *settling time* t_s ($\pm 5\%$) sekitar 4 detik, *zero offset* dan *zero overshoot*. Respon sistem lup tertutup terhadap sinyal step 20 dapat dilihat pada Gambar 3. Karakteristik respon sistem yang diperoleh adalah *settling time* t_s ($\pm 5\%$) sekitar 4,6 detik, *zero offset* dan *zero overshoot*.



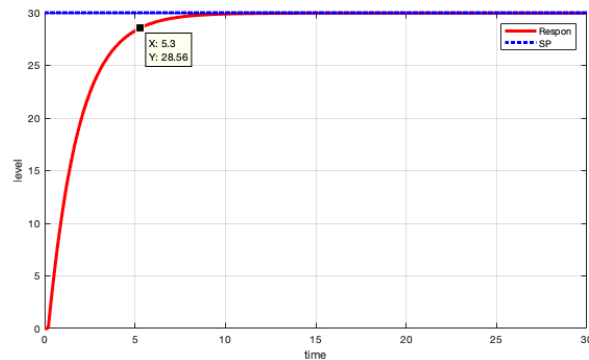
Gambar 3. Respon sistem terhadap sinyal step 20.

Respon sistem lup tertutup terhadap sinyal step 25 dapat dilihat pada Gambar 4. Karakteristik respon sistem yang diperoleh adalah *settling time* $t_s (\pm 5\%)$ sekitar 6,5 detik, *zero offset* dan *zero overshoot*.



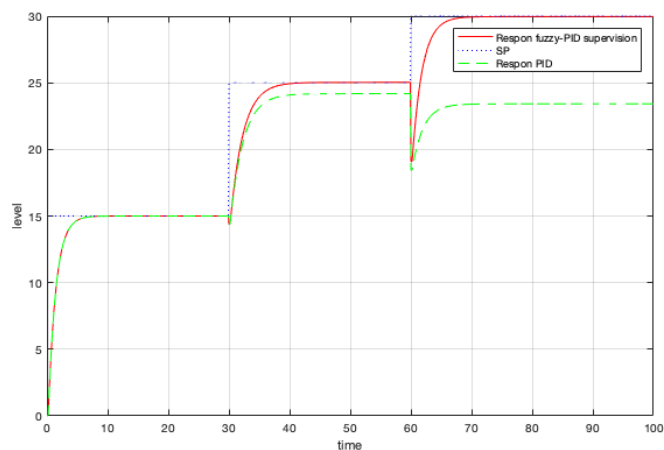
Gambar 4. Respon sistem terhadap sinyal step 25.

Respon sistem lup tertutup terhadap sinyal step 30 dapat dilihat pada Gambar 5. Karakteristik respon sistem yang diperoleh adalah *settling time* $t_s (\pm 5\%)$ sekitar 5,3 detik, *zero offset* dan *zero overshoot*.



Gambar 5. Respon sistem terhadap sinyal step 30.

Untuk membuktikan sistem kontrol hasil rancangan, dilakukan perbandingan dengan respon sistem kontrol PID parameter tetap. Sinyal uji yang digunakan adalah sinyal step bertingkat 15, 25 dan 30 secara kontinu. Hasil simulasi adalah sebagaimana pada Gambar 6.



Gambar 6. Respon sistem kontrol PI-fuzzy *supervision* vs PI.

Pada Gambar 6 terlihat jelas bahwa respon sistem kontrol hasil rancangan memiliki respon yang lebih baik jika dibandingkan dengan respon sistem kontrol PID konvensional. Perbedaan terlihat jelas pada tidak adanya *offset* pada respon sistem kontrol hasil rancangan. Dari hasil ini

dapat disimpulkan bahwa metode fuzzy-pid *supervision* mampu menjamin sistem memiliki respon sesuai performa yang diinginkan.

IV. KESIMPULAN

Sistem level merupakan sistem non-linier. Metode PID-fuzzy *supervision* yang digunakan dalam penelitian terbukti mampu mengatasi nonlinieritas dari sistem tersebut. Dari semua titik kerja yang ditentukan, hasil simulasi sistem kontrol menunjukkan performa yang cukup baik: *settling time* t_s ($\pm 5\%$) berkisar antara 4 s.d. 6,5 detik, *zero overshoot* dan *zero offset*. Perbandingan dengan sistem kontrol PID konvensional juga menunjukkan hasil yang baik. Sistem kontrol hasil rancangan mampu menjamin respon yang memenuhi performa: *zero overshoot* dan *zero offset*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillahirobbil'alamin. Terima kasih kepada pihak Politeknik Energi dan Mineral Akamigas dan semua pihak yang telah membantu, memfasilitasi dan memberikan dukungan kepada penulis sehingga penelitian ini dapat diselesaikan

REFERENSI

- [1] J. F. Kanaga and P.S.H. Jose, *Repetitive Controller for A Nonlinear Liquid Level System*, IEEE 2nd International Conference on Innofations in Information, embedded and Communication System, 2015.
- [2] X.Y. Feng, W.T. Chen and K.S. Lu, *DFL Nonlinear Control Design and Its Application in Water-Level Nonlinear Plant*, IEEE Proc. 1st International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2002.
- [3] M.M. Noh, M.S. Najib, N.S. Abdullah, *Simulator of Water Tank Level Control System Using PID-Controller*, IEEE 3rd Int. Conf. On Water Resources, Hydraulics & Hydrology, 2008.
- [4] J.G. Ziegler and N.B. Nichols, *Optimum Settings for Automatic Controllers*, Journal of Dynamic systems, Measurement and Control, pp. 220-222, 1993.
- [5] K. Astrom dan T. Hagglund, *PID Controller: Theory, Design and Tuning*, 2nd ed, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, pp. 120-134, 1994.
- [6] D. Chen dan D.E. Seborg, *PI/PID Controller Design Based on Direct Synthesis and Disturbance Rejection*, Ind. Eng. Chem., vol. 41, PP. 4807-4822, 2002.
- [7] L. Maheswari, R.S. Vadivoo and S. Vijayalakshmi, *Comparison of Linear and Nonlinear Controllers*, Int. Journal of Innovative Science, Engineering & Tech., Vol. 1 Issue 2, 2014.
- [8] Y. Ren, Z. Li and F. Zhang, *A New Nonlinear PID Controller and its Parameter Design*, World Academy of Science, Engineering and Technology, pp. 882-887, 2010.
- [9] D. Hryniuk, I. Suhorukova and I. Orobei, *Nonlinear PID Controller and Methods of its Setting*, IEEE Conference of Electrical, Electronic, and Information Sciences, 2017.
- [10] Y.X. Su, D. Sun, and B.Y. Duan, *Design of An Enhanced Nonlinear PID Controller*, Journal of Mechatronics, Volume 15, Issue 8, pp. 1005-1024, 2005.
- [11] Ma, Fengyin, *An Improved Fuzzy PID Control Algorithm Applied in Liquid Mixing System*, Proc. of IEEE Int. Conference on Information and Automation, 2014.
- [12] M. Santos, S. Dormido and J.M. de la Cruz, *Fuzzy-PID controllers vs. Fuzzy-PI Controllers*, Proc. of IEEE 5th Int. Fuzzy System, 1996.

- [13] Li, Qingchun, *A New PID Fuzzy Controller (Fuzzy P(I+D))*, IEEE Int. Conf. on Information Manag., Innovation Manag. and Industrial Engineering, 2011.
- [14] A. Dehghani and H. Khodadadi, *Designing a Neuro -Fuzzy PID Controller Based on Smith Predictor for Heating System*, IEEE 17th Int. Conf. on Control, Automation and Sys., 2017.
- [15] Zhao, Yan, *Research on Application of Fuzzy PID Controller in Two-Container Water Tank System Control*, IEEE Int. Conf. on Machine Vision and Human Machine Interface, 2010.
- [16] Zhang, Peng, *Industrial Control System Simulation Routines*, Advanced Industrial Control Technology, Elsevier Inc., Chapter 19, pp. 781-810, 2010.
- [17] Ogata K., *Modern Control System 5th edition*, Prentice Hall: New Jersey, 2010.
- [18] D.E. Seborg, T.E. Edgar and D.A. Mellichamp, *Process Dynamics and Control 2nd Edition*, John Wiley & Sons Inc.: USA, 2004.