

## RANCANG BANGUN PROTOTYPE SISTEM KONTROL BERTINGKAT MENGUNAKAN FUZZY-PID BERBASIS ARDUINO

Chalidia Nurin Hamdani<sup>1\*)</sup>, Arfany Azizy<sup>1</sup>, Roni Heru Triyanto<sup>1</sup> dan Humaidillah Kurniadi Wardana<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada No. 38 Cepu, Blora – Jawa Tengah 58312

<sup>2</sup>Universitas Hasyim Asy'ari, Jalan Irian Jaya No.55 Jombang - Jawa Timur 61471

<sup>\*)</sup>E-mail: hamdani113@gmail.com

### Abstrak

Sistem kontrol bertingkat merupakan skema kontrol yang banyak digunakan di industri proses. Skema kontrol ini menawarkan respon terhadap gangguan yang relatif lebih baik jika dibandingkan dengan sistem kontrol *single-loop*. Selain gangguan, tantangan dalam kontrol proses adalah adanya perubahan kebutuhan karakteristik respon ketika *process variable* yang diinginkan juga berubah. Tantangan ini bersifat nonlinier sehingga seringkali menyebabkan operator harus merubah parameter PID secara *trial and error* guna menghasilkan karakteristik respon yang berbeda berdasarkan *process behavior*. Dalam penelitian ini, peneliti melakukan desain dan implementasi sistem kontrol bertingkat untuk level fluida (*primary loop*) dan aliran fluida (*secondary loop*) dengan menggunakan kontroler fuzzy - PID. Sistem kontrol fuzzy akan melakukan penalaan parameter PID secara langsung berdasarkan pemetaan parameter PID yang ditentukan sehingga operator tidak perlu mengganti parameter PID secara manual. Pemetaan parameter PID dibuat berdasarkan titik kerja proses dan *process behavior* sehingga parameter PID akan berubah berdasarkan *setpoint* yang diberikan. Sistem kontrol hasil rancangan diuji dengan simulasi dan diimplementasikan dalam bentuk prototype berbasis Arduino. Hasil pengujian pada prototype menunjukkan hasil yang menjanjikan: respon *zero overshoot* dan *zero offset* dengan *settling time* yang berbeda-beda menyesuaikan *setpoint* yang diberikan.

*Kata kunci: sistem kontrol bertingkat, level fluida, aliran fluida, fuzzy-PID, arduino*

### Abstract

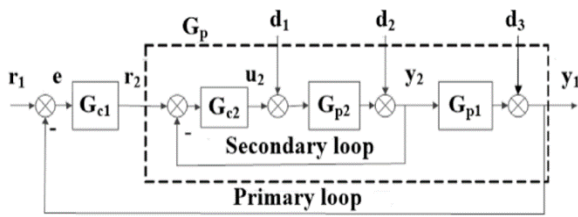
*Cascade control system is the one of control scheme that is widely used in process industry. This control scheme propose a better response to disturbance rather than single-loop control system. Beside of disturbance, response characteristics changing is another challenge on process control system. Operator frequently need to retune PID parameter so the system can give an appropriate response characteristic based on process requirement. In this research, we have designed and implemented a cascade control system for fluid level (primary loop) and flow (secondary loop) using Fuzzy-PID controller. Fuzzy control system have been designed to retune the PID parameter on primary loop based on determined PID parameters mapping so operator do not need to retune the PID manually. Parameters mapping is made based on operating point and process behavior so PID parameter will be changed by fuzzy logic control output based on setpoint given. Control system design have been tested by simulation and implemented on prototype product based on Arduino. The prototype test show the promising results: zero overshoot dan zero offset responses with settling time value that can adapt to the setpoint given.*

*Keywords: cascade control system, fluid level, fluid flow, fuzzy-PID, arduino*

### 1. Pendahuluan

Salah satu skema kontrol yang masih banyak diterapkan di industri proses seperti pada kilang minyak dan industri petrokimia adalah sistem kontrol bertingkat atau *cascade*. Secara umum, skema ini membagi sistem kontrol proses menjadi dua bagian, yaitu *outer-loop/ primary-loop* dan *inner-loop/ secondary-loop* [1]. Struktur sistem kontrol bertingkat dapat dilihat pada Gambar 1. Kontroler untuk

*primary-loop* adalah  $G_{c1}$  dan kontroler untuk *secondary-loop* adalah  $G_{c2}$ .  $G_{p1}$  dan  $G_{p2}$  berturut-turut adalah proses pada *primary-loop* dan proses pada *secondary-loop*. Komponen  $r_1$  merupakan *setpoint* untuk *primary-loop* dan keluaran dari  $G_{c1}$  menjadi *setpoint* untuk *secondary-loop*. Keunggulan skema ini adalah *secondary-loop* mampu mengatasi gangguan sebelum gangguan tersebut berpengaruh pada *primary-loop* [2].



Gambar 1. Skema Kontrol Bertingkat

Sistem kontrol bertingkat dapat diterapkan untuk keempat proses variabel: level, aliran, suhu dan tekanan. Seperti pada [3], kontrol bertingkat diterapkan untuk sistem kontrol suhu pada pengondisi udara. Sistem kontrol bertingkat untuk proses level disajikan pada [4] dan beberapa penelitian lain tentang sistem kontrol bertingkat dapat dibaca di [5]-[7].

Di industri saat ini, kontroler *Proportional Integral Derivative* (PID) masih menjadi andalan. Penggunaan kontroler PID di industri masih mencapai 90% [8]. Namun, perancangan dan pengembangan kontroler PID masih menjadi tantangan tersendiri untuk diteliti sebagai upaya untuk meningkatkan performa kontroler. Beberapa metode perancangan kontroler PID yang telah dikenal antara lain seperti metode Ziegler-Nichols [9][10], metode *Direct Synthesis* [11] dan metode *Internal Model Control* (IMC) [12].

Pengembangan kontroler PID juga telah banyak dilakukan dengan menggabungkan metode PID dengan metode lain. Seperti pada [13], kontroler PID dikombinasikan dengan jaringan saraf tiruan dan logika fuzzy untuk sistem pemanas. Respon sistem kontrol yang dihasilkan cukup baik: overshoot relatif kecil dengan settling time yang juga kecil.

Pada [14], logika fuzzy digunakan untuk menentukan nilai parameter PID berdasarkan nilai *error* dan *delta-error*. Metode ini cukup efektif untuk memodifikasi parameter PID sehingga menghasilkan respon yang lebih baik daripada PID konvensional.

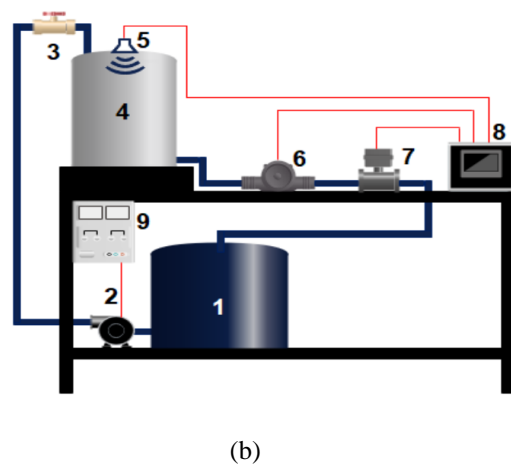
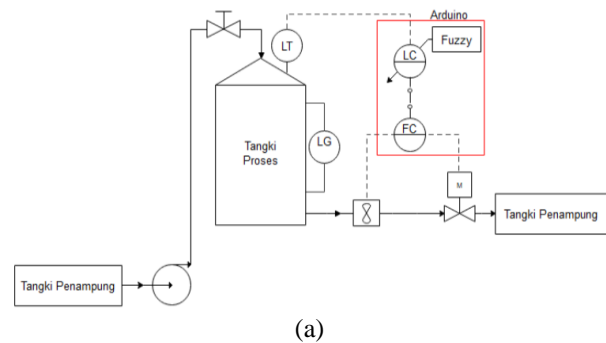
Dalam pengendalian proses menggunakan kontroler PID, seringkali dibutuhkan perubahan nilai *process variable* dan karakteristik responnya. Hal ini mengharuskan operator kontroler melakukan penalaan ulang secara *trial and error* sehingga diperoleh respon yang diinginkan. Perpaduan antara perubahan *process variable* dan perubahan kebutuhan karakteristik respon bersifat nonlinier berdasarkan kebutuhan proses, sehingga operator seringkali mengalami kesulitan dalam melakukan penalaan kontroler PID. Untuk mengatasi itu, dibutuhkan metode kontrol nonlinier untuk mengatasi permasalahan tersebut.

Dalam penelitian ini, dirancang sistem kontrol bertingkat untuk level dan aliran fluida dengan menggunakan metode fuzzy-PID. Kontroler PID dirancang dengan metode

*Direct Synthesis* dengan 3 (tiga) karakteristik model sistem *closed-loop* yang berbeda. Parameter tersebut kemudian digunakan untuk merancang kontrol logika fuzzy sehingga penalaan PID dapat dilakukan secara langsung oleh kontrol logika fuzzy. Sistem kontrol hasil rancangan diuji dengan simulasi dan diimplementasikan dalam bentuk *prototype*. Penjelasan detail mengenai metode yang digunakan dalam penelitian ini terdapat di bagian berikutnya. Lalu di bagian ketiga disajikan hasil pengujian simulasi dan hasil implementasi dalam bentuk *prototype* beserta pengujiannya.

## 2. Metode

Penelitian dilaksanakan dalam 4 (empat) tahapan, antara lain perancangan dan pembuatan *prototype*, desain dan pemrograman *Human Machine Interface* (HMI), pemodelan plant, perancangan dan penerapan sistem kontrol.



Gambar 2. Rancangan prototype (a) P&ID (b) 2D

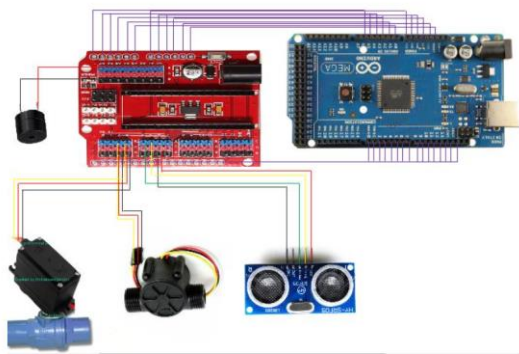
### 2.1. Perancangan dan Pembuatan Prototype

Sistem kontrol bertingkat dibuat antara proses level dan aliran dengan rancangan P&ID sebagaimana pada Gambar 2(a). Dari P&ID tersebut dapat dilihat bahwa proses aliran dari keluaran tangki merupakan *secondary loop* dan proses level merupakan *primary loop*. Penentuan ini dilakukan

berdasarkan kecepatan respon proses. Proses aliran memiliki respon yang lebih cepat daripada proses level, sehingga proses aliran ditempatkan sebagai *secondary loop*.

Berdasarkan P&ID tersebut, kemudian didesain *prototype* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2(b). Komponen utama dalam *prototype* tersebut antara lain: (1) tangki penyimpanan, (2) pompa, (3) *hand valve*, (4) tangki proses, (5) sensor level ultrasonik, (6) Sensor aliran, (7) *servo valve*, (8) kontroler, dan (9) catu daya.

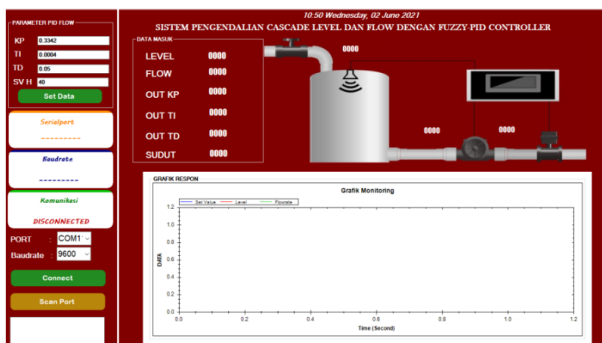
Untuk perangkat keras kontroler, Arduino mega dipilih sebagai kontroler utama dan funduino shield sebagai modul *input-output*. Kontroler ini dihubungkan dengan sensor level ultrasonik HY-SRF05 dan sensor aliran YF-S201 dan dua aktuatur yaitu *servo valve* dan *buzzer*. Rancangan diagram pengkabelan pada kontroler dapat dilihat pada Gambar 3 dengan detail pengkabelan untuk sensor dan aktuatur sebagaimana pada Tabel 1.



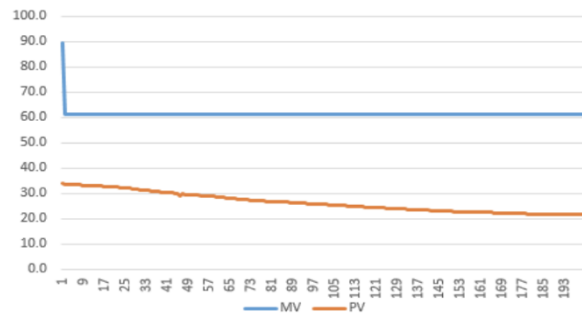
Gambar 3 Rancangan Pengkabelan

Tabel 1. Detail Pengkabelan

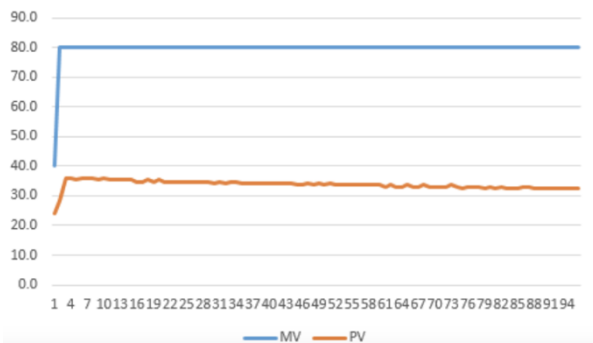
Perangkat	Pin Perangkat	Funduino
Sensor level ultrasonik HY-SRF05	Pin Trigger	Pin 4
	Pin Echo	Pin 5
Sensor aliran YF-S201	Pin output	Pin 2
<i>Servo valve</i>	Pin data	Pin 3
Buzzer	Pin positif	Pin A0
	Pin negatif	Pin GND



Gambar 4 Desain HMI



(a)



(b)

Gambar 5 Hasil Step Test pada (a) Level (b) Aliran

## 2.2. Desain dan Pemrograman HMI

Human Machine Interface (HMI) dirancang menggunakan software Microsoft Visual Studio 2010 dengan penampakan front panel sebagaimana pada Gambar 4. Terdapat 5 (lima) bagian penting dalam HMI yang dibuat, antara lain:

1. Bagian input data parameter PID
2. Bagian komunikasi dan antarmuka
3. Bagian hasil pengukuran data
4. Bagian grafik hasil pemantauan
5. Bagian animasi *prototype*

## 2.3. Pemodelan Plant

Pemodelan plant dilakukan dengan metode black box. Measured Variable (MV) diberi masukan sinyal uji berupa sinyal step dengan nilai tertentu. Pada proses level, bukaan *servo valve* dirubah dari 90% menjadi 60% sehingga diperoleh grafik *Process Variable* (PV) sebagaimana pada Gambar 5(a). Hal yang serupa dilakukan pada proses aliran dengan memberikan perubahan MV dari 40% ke 80% sehingga dihasilkan PV sebagaimana Gambar 5(b). Kedua hasil monitoring MV dan PV tersebut digunakan untuk memperoleh fungsi alih proses dengan bantuan *software* MATLAB.

Dengan bantuan *toolbox System Identification* pada *software* MATLAB, diperoleh model proses level dan

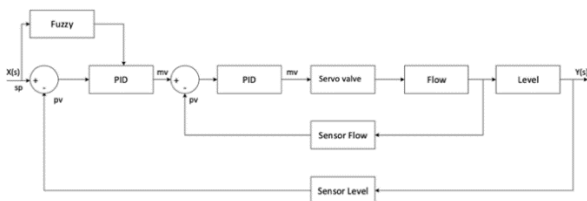
aliran berturut-turut sebagaimana persamaan (1) dan (2). Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa model proses level yang diperoleh merupakan persamaan orde 1 dan model proses aliran merupakan persamaan orde 2.

$$G_1(s) = \frac{0,27516}{14,365s + 1} \quad (1)$$

$$G_2(s) = \frac{3,99}{s^2 + 6.70s + 0.008} \quad (2)$$

#### 2.4. Perancangan dan Penerapan Sistem Kontrol

Sistem kontrol bertingkat dirancang sebagaimana diagram blok pada Gambar 6. Pada sistem ini dibutuhkan 2 (dua) kontroler, yaitu kontroler pada *primary loop* (proses level) dan kontroler pada *secondary loop* (proses aliran). Metode fuzzy-PID digunakan pada *primary loop* dan metode PID digunakan pada *secondary loop*.



Gambar 6 Blok Rancangan Sistem Kontrol Bertingkat

##### 1. Secondary loop

Kontroler PID pada *secondary loop* dirancang dengan menggunakan metode *direct synthesis*. Parameter dihitung berdasarkan model sistem *closed-loop* yang diinginkan dengan mengacu pada model proses level [11]. Model sistem *closed-loop* diperoleh dengan pendekatan *time constant* yang ditetapkan.

Persamaan umum kontroler PID:

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3)$$

dengan  $K_p$ ,  $T_i$  dan  $T_d$  berturut-turut merupakan parameter kontroler PID yang terdiri dari *proportional gain*, *integral time constant* dan *derivative time constant*.

Sistem *closed-loop* pada *secondary-loop* dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_2(s)}{1 + G_c(s)G_2(s)} \quad (4)$$

dengan  $G_2(s)$  merupakan model proses aliran pada persamaan (2). Dari persamaan (4), dapat diperoleh persamaan kontroler:

$$G_c(s) = \frac{C(s)/R(s)}{\left( 1 - C(s)/R(s) \right) G_2(s)} \quad (5)$$

Model sistem *closed-loop* dibuat dengan pendekatan persamaan orde 1 dengan parameter yang diperoleh dari karakteristik sistem yang diinginkan. Dalam penelitian ini, sistem *closed-loop* mempunyai *settling time* sekitar 15 detik dengan toleransi  $\pm 5\%$  sehingga diperoleh *time constant* yang diinginkan yaitu:

$$T_s(\pm 5\%) \approx 3\tau^* = 15 \text{ detik}$$

$$\tau^* = 5 \text{ detik}$$

Dari *time constant* tersebut, diperoleh model sistem *closed-loop* untuk *secondary-loop*:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\tau^* s + 1} = \frac{1}{5s + 1} \quad (6)$$

Dengan substitusi persamaan (2) dan (6) ke persamaan (5), maka diperoleh:

$$G_c(s) = 0,336 + \frac{1}{2493,75s} + 0,05s \quad (9)$$

Dari persamaan (9) dan mengacu pada persamaan (3), maka diperoleh parameter PID :  $K_p = 0,336$ ;  $T_i = 837,9$ ;  $T_d = 0,149$ .

##### 2. Primary loop

Perancangan kontroler fuzzy-PID pada *primary-loop* dimulai dengan menghitung parameter PID dengan menggunakan metode yang sama seperti yang diterapkan pada *secondary-loop* yaitu metode *direct synthesis*. Namun, pada *primary loop* ditetapkan 3 (tiga) model sistem *closed-loop* dengan *time constant* yang berbeda yang akan diterapkan pada tiga *set point* berbeda. Dengan metode ini, diharapkan karakteristik respon sistem *closed-loop* akan menyesuaikan dengan *set point* yang diberikan.

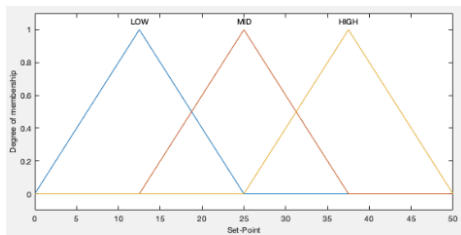
Berdasarkan hasil perancangan pada *secondary loop*, maka diperoleh total fungsi alih proses pada *primary loop* sebagai berikut:

$$G_p(s) = \frac{0,27516}{71,825s^2 + 19,365s + 1} \quad (10)$$

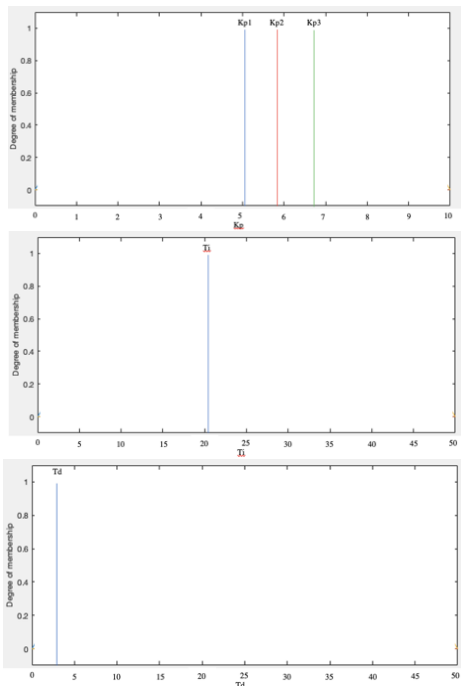
Dengan langkah yang sama seperti pada *secondary-loop*, yaitu dengan menentukan karakteristik sistem *closed-loop* yang diinginkan maka diperoleh parameter PID pada model sistem *closed-loop* sebagaimana Tabel 2.

Tabel 2. Parameter PID

Settling time yang diinginkan (detik)	Model Sistem Closed-loop pada <i>primary loop</i>	Parameter PID
40	$\frac{1}{13.33s + 1}$	$K_p = 5.09$ $T_i = 20,8$ $T_d = 3,7$
35	$\frac{1}{11.67s + 1}$	$K_p = 5.87$ $T_i = 20,8$ $T_d = 3,7$
30	$\frac{1}{10s + 1}$	$K_p = 6.75$ $T_i = 20,8$ $T_d = 3,7$



(a)



(b)

Gambar 7. Fungsi keanggotaan (a) input (b) output

Hasil perhitungan parameter PID digunakan sebagai *output* kontroler fuzzy. Untuk memudahkan algoritma dan efisiensi perhitungan, dipilih tipe fuzzy Sugeno dengan 1 *input* dan 3 *ouput*. Penentuan jumlah input dan output didasarkan pada kebutuhan nilai yang dibaca sebagai masukan dan yang akan dikeluarkan sebagai keluaran.

Masukan sistem fuzzy dalam penelitian ini berupa setpoint, sehingga cukup 1 input yang dibutuhkan. Sedangkan keluaran yang dibutuhkan adalah parameter PID yaitu  $K_p$ ,  $T_i$  dan  $T_d$  sehingga dibutuhkan 3 output.

Di bagian input, digunakan 3 fungsi keanggotaan LOW, MID dan HIGH. Penentuan ini didasarkan pada titik kerja proses yang dibagi ke dalam tiga kategori. Ketiga fungsi keanggotaan tersebut menggunakan fungsi segitiga. Sedangkan pada bagian output  $K_p$  digunakan 3 fungsi keanggotaan berupa fungsi singleton yaitu [ $K_{p1}$   $K_{p2}$   $K_{p3}$ ], dan pada output  $T_i$  dan  $T_d$  digunakan 1 fungsi keanggotaan berupa fungsi singleton [ $T_i$ ], dan [ $T_d$ ]. Metode implikasi, agregasi dan defuzzifikasi yang digunakan berturut-turut adalah minimum, maksimum dan *weighted average*. Adapun basis aturan fuzzy yang digunakan adalah sebagai berikut:

If [Set-Point is LOW] Then [ $K_p$  is  $K_{p1}$ ], [ $T_i$  is  $T_i$ ], [ $T_d$  is  $T_d$ ]  
 If [Set-Point is MID] Then [ $K_p$  is  $K_{p2}$ ], [ $T_i$  is  $T_i$ ], [ $T_d$  is  $T_d$ ]  
 If [Set-Point is HIGH] Then [ $K_p$  is  $K_{p3}$ ], [ $T_i$  is  $T_i$ ], [ $T_d$  is  $T_d$ ]

Pada bagian *input*, ditetapkan 3 variabel linguistik yaitu LOW, MID dan HIGH dengan fungsi segitiga sebagai fungsi keanggotaan masing-masing variabel linguistik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7a. Parameter fungsi segitiga pada masing-masing variabel linguistik yaitu: LOW [0 11,25 22,5], MID [11,25 22,5 33,75] dan HIGH [22,5 33,75 45]. Pada bagian *output*, ditetapkan 3 output yaitu  $K_p$ ,  $T_i$  dan  $T_d$  dengan fungsi keanggotaan berupa fungsi singleton sebagaimana pada Gambar 7.b. Parameter fungsi singleton pada ketiga ouput menggunakan parameter PID pada Tabel 2.

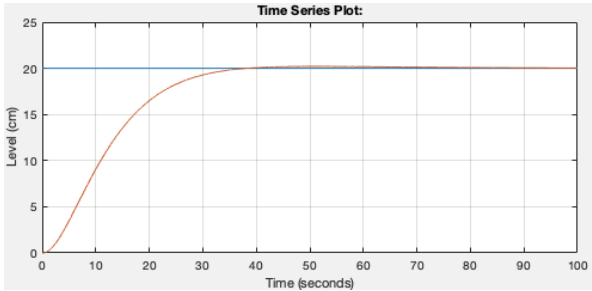
### 3. Hasil dan Analisis

Untuk mengevaluasi hasil rancangan, sistem kontrol bertingkat disimulasikan dengan SIMULINK pada *software* MATLAB. Pengujian sistem kontrol hasil rancangan dilakukan dengan memberikan setpoint berupa sinyal step. Terdapat 3 kali pengujian dengan setpoint berbeda-beda, yaitu 20 cm, 30 cm dan 40 cm.

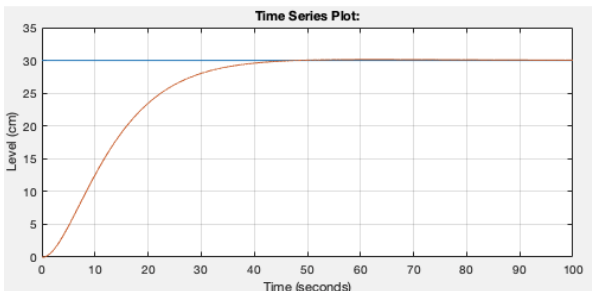
Respon sistem kontrol pada setpoint 20 cm dapat dilihat pada Gambar 8(a). Respon yang dihasilkan memiliki *maximum overshoot* sebesar 1,02% dan mencapai kondisi *steady* (toleransi 5%) dalam waktu 28,31 detik dengan *rise time* sebesar 20,45 detik, *time constant* sebesar 13,84 detik dan *zero offset*.

Pengujian berikutnya dilakukan dengan memberikan *setpoint* sebesar 30 cm. Respon sistem kontrol dapat dilihat pada Gambar 8(b). Respon yang dihasilkan memiliki *maximum overshoot* sebesar 0,4% dan mencapai kondisi *steady* (toleransi 5%) dalam waktu 32,07 detik dengan *rise time* sebesar 22,93 detik, *time constant* sebesar 15,98 detik dan *zero offset*.

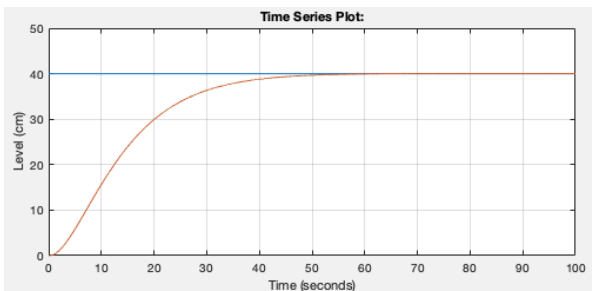
Pengujian ketiga dilakukan dengan dengan memberikan *setpoint* sebesar 40 cm. Respon sistem kontrol dapat dilihat pada Gambar 8(c). Respon yang dihasilkan memiliki *maximum overshoot* sebesar 0,07% dan mencapai kondisi *steady* (toleransi 5%) dalam waktu 35,62 detik dengan *rise time* sebesar 25,21detik, *time constant* sebesar 15,75 detik dan *zero offset*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 8. Respon Sistem pada Pengujian Setpoint (a) 20 cm (b) 30 cm (c) 40 cm

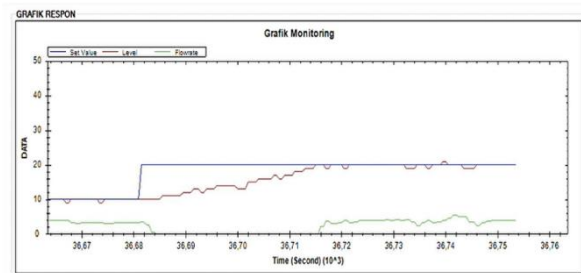
Hasil simulasi menunjukkan bahwa respon sistem kontrol yang telah mendekati karakteristik yang telah ditentukan. Hal ini dapat dilihat dari *settling time* dan *time constant* yang dihasilkan. Perbedaan kecepatan respon sistem pada *setpoint* berbeda ini juga membuktikan bahwa kontrol fuzzy telah bekerja dengan baik. Namun, sebagaimana hasil simulasi, respon sistem kontrol masih memiliki *overshoot* walaupun persentasenya relatif kecil sehingga dapat ditoleransi. Untuk itu, sistem kontrol kemudian direalisasikan dalam bentuk *prototype* seperti Gambar 9.

Pengujian *prototype* dilakukan untuk mengetahui respon yang dihasilkan oleh sistem kontrol bertingkat baik tanpa gangguan maupun dengan gangguan. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali dengan *setpoint* yang berbeda-beda, yaitu 20 cm, 30 cm dan 40 cm. Hal ini dilakukan untuk menguji kontrol fuzzy-PID yang telah diterapkan pada *primary loop*.

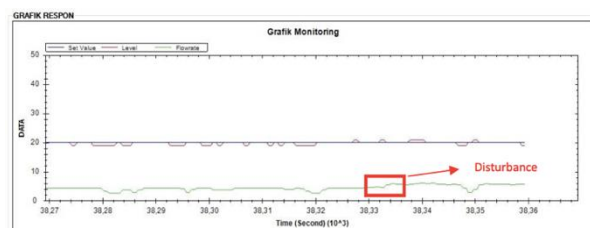
Pengujian pertama dilakukan dengan kondisi awal 10 cm dan pemberian *setpoint* 20 cm. Grafik respon sistem yang dihasilkan dan tampil di HMI dapat dilihat pada Gambar 10(a). Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon sistem yang dihasilkan adalah *zero overshoot* dengan *settling time* sebesar 30 detik. Pada saat sistem mencapai *steady state*, terdapat *ripple* sekitar 1 cm.



Gambar 9. Prototype Sistem Kontrol Bertingkat



(a)



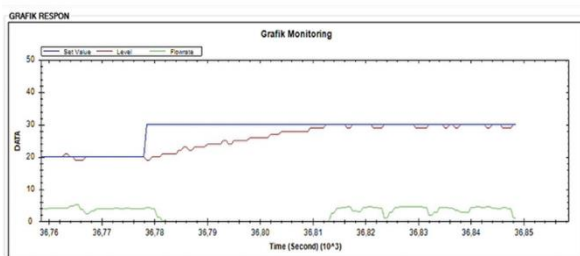
(b)

Gambar 10 Respon Sistem pada (a) Setpoint 20 cm (b) saat diberi gangguan

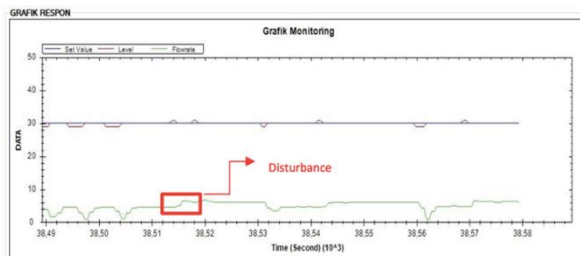
Kemudian pada detik ke 38,33 sistem diberi gangguan kecil berupa perubahan tegangan pada pompa yang semula 7 V menjadi 9 V. Peningkatan suplai tegangan menyebabkan putaran motor pada pompa meningkat sehingga aliran yang dihasilkan pun meningkat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10(b). Secara umum, respon sistem *primary-loop* tidak terpengaruh oleh gangguan. Kontroler *secondary-loop* langsung memberikan aksi mengurangi bukaan *servo valve* sehingga aliran berkurang pada detik ke 38,35 dan kondisi *steady* sistem *primary-loop* tetap terjaga sesuai dengan *setpoint* yaitu 20 cm.

Pengujian berikutnya dilakukan dengan perubahan *setpoint* menjadi 30 cm. Respon sistem terhadap perubahan *setpoint* tersebut dapat dilihat pada Gambar 11(a). Dari grafik respon dapat dilihat bahwa respon sistem yang dihasilkan adalah *zero overshoot* dengan *settling time* sebesar 34,5 detik. Pada saat kondisi *steady*, terjadi hal yang sama seperti saat pengujian pertama, yaitu terdapat *ripple* sekitar 1 cm.

Perlakuan yang sama diberikan seperti pada pengujian pertama, yaitu pemberian gangguan sebagaimana terlihat pada Gambar 14b. Terlihat pada grafik, respon sistem tidak terpengaruh oleh gangguan karena kontroler memberikan aksi kontrol untuk mengurangi bukaan pada *servo valve* pada detik ke 38,53.

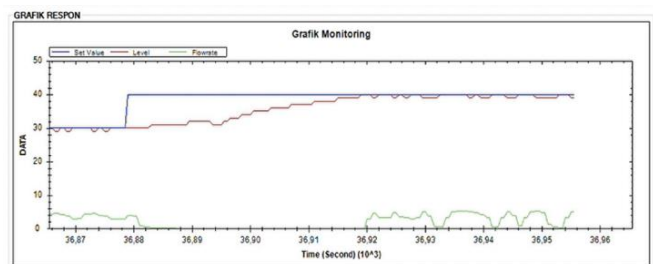


(a)

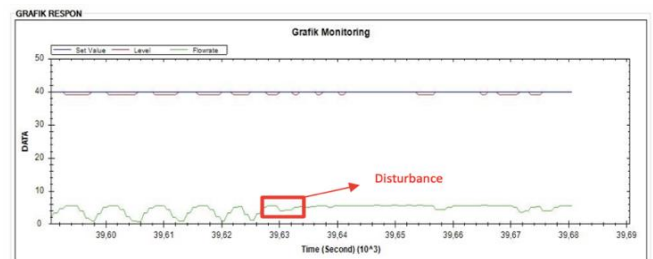


(b)

Gambar 11. Respon Sistem pada (a) Setpoint 30 cm (b) saat diberi gangguan



(a)



(b)

Gambar 12. Respon Sistem pada (a) Setpoint 40 cm (b) saat diberi gangguan

Pengujian ketiga dilakukan dengan mengubah *setpoint* menjadi 40 cm. Respon sistem yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 12(a). Hasilnya tidak begitu berbeda dengan pengujian sebelumnya. Respon sistem yang dihasilkan adalah *zero overshoot* dengan *settling time* sebesar 37 detik. *Ripple* sebesar 1 cm masih terjadi saat sistem mencapai kondisi *steady*.

Pemberian gangguan pun diberikan pada saat sistem mencapai kondisi *steady* di 40 cm. Sebagaimana terlihat pada Gambar 12(b), kontroler pada *secondary-loop* dapat mengatasi gangguan pada aliran sehingga tidak berpengaruh pada respon sistem *primary-loop*. Dari ketiga pengujian dengan *setpoint* yang berbeda, terlihat bahwa *settling time* yang dihasilkan berbeda-beda untuk setiap *setpoint*. Artinya *settling time* menyesuaikan terhadap *setpoint*. Hal ini menunjukkan bahwa kontroler fuzzy-PID telah bekerja dengan baik.

Rangkuman data hasil pengujian simulasi dan pengujian langsung pada *prototype* disajikan pada Tabel 3. Pada pengujian *prototype*, respon sistem kontrol tidak memiliki *overshoot*. Namun, dari segi waktu respon, respon sistem kontrol pada *prototype* lebih lambat dari respon sistem kontrol pada simulasi. Hal ini bisa dilihat dari *settling time*, *time constant* dan *rise time* yang dihasilkan. Pada *setpoint* 20 cm, respon *prototype* memiliki *settling time* 1,7 detik lebih lambat daripada respon simulasi. Hal yang sama juga terjadi pada *setpoint* 30 cm dan 40 cm dengan selisih *settling time* berturut-turut adalah 2,43 detik dan 1,38.

Tabel 3. Karakteristik Respon Hasil Pengujian

Parameter	Simulasi			Prototype		
	Setpoint 20 cm	Setpoint 30 cm	Setpoint 40cm	Setpoint 20 cm	Setpoint 30 cm	Setpoint 40cm
Max Overshoot (%)	1,02	0,4	0,07	0	0	0
Settling time (detik)	28,31	32,07	35,62	30	34,5	37
Time Constant (detik)	13,84	15,98	15,75	18	22	24
Rise time (detik)	20,45	22,93	25,21	23,15	24,30	27,95
Dead time (detik)	0	0	0	0	4	4
Error steady state (%)	0	0	0	0	0	0
Ripple (cm)	0	0	0	1	1	1

Dari hasil pengujian prototype juga bisa dilihat bahwa terdapat deadtime pada respon sistem kontrol yang tidak muncul saat pengujian dengan simulasi. *Deadtime* sekitar 4 detik muncul pada pengujian prototype di semua setpoint. *Deadtime* ini yang membuat respon prototype lebih lambat mencapai kondisi *steady* dibandingkan saat simulasi. Hal ini menjadi catatan untuk penelitian berikutnya bahwa dalam pemodelan proses level perlu disertakan perhitungan *deadtime*.

Selain itu, pada respon prototype muncul *ripple* sebesar 1 cm. Nilai *ripple* relative kecil dan masih di bawah batas toleransi nilai proses yang ditetapkan yaitu 5% sehingga *ripple* ini bisa diabaikan. *Ripple* yang diperoleh ini mirip dengan yang diperoleh pada penelitian lain [15]. Dari hasil pengamatan saat pengujian prototype, *ripple* muncul karena range sinyal kontrol yang kecil sehingga perubahan kecil pada sinyal kontrol memberikan pengaruh signifikan pada bukaan servo valve. Masalah *ripple* ini bisa menjadi topik tersendiri ke depannya jika ketelitian proses yang dibutuhkan lebih tinggi.

#### 4. Kesimpulan

Paper ini menyajikan hasil rancang bangun sistem kontrol bertingkat dengan menggunakan metode fuzzy-PID. Proses yang dikontrol adalah proses level sebagai *primary loop* dan proses aliran sebagai *secondary loop*. Sistem kontrol hasil rancangan diuji simulasi dengan SIMULINK pada MATLAB untuk kemudian direalisasikan dalam bentuk *prototype*. Hasil pengujian *prototype* menunjukkan bahwa sistem kontrol fuzzy mampu melakukan penalaan parameter PID secara langsung sehingga dihasilkan karakteristik respon sistem kontrol sesuai *behavior* yang ditetapkan. Artinya, permasalahan nonlinieritas pada *process behavior* dapat diatasi oleh algoritma kontrol fuzzy dengan berdasarkan pada *setpoint* yang diberikan. Perpaduan fuzzy-PID terbukti tidak mempengaruhi performa skema kontrol bertingkat. Gangguan aliran fluida yang diberikan dapat diatasi di *secondary loop*, tanpa memberikan efek signifikan pada proses level di *primary loop*.

#### Referensi

- [1]. G. Lloyds Raja dan A. Ali, *Enhanced Tuning of Smith Predictor based Series Cascaded Structure for Integrating Process*, ISA Transactions, vol. 114, pp. 191-205, 2020.
- [2]. Raja GL dan A. Ali, *Series Cascade Control: An Outline Survey*. Proceedings of Indian Control Conference (ICC), pp. 409-14, 2017..
- [3]. J. Gao et al, *Model-based Space Temperature Cascade Control for Constant Air Volume Air-Conditioning System*, International Journal of Building Science and Its Application, vol. 145, pp. 308-318, 2018.
- [4]. Elena-Lorena Hedrea et al, *Cascade Control Solution for Level Control of Vertical Three Tank System*, IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligent and Informatics, 2019.
- [5]. Fengxiang Chen et al, *Robus Polymer Electrolyte Mebrane Fuel Cell Temperature Tracking Control Based on Cascade Internal Model Control*, Journal of Power Sources, vol. 479, 2020.
- [6]. B. Ilic, M. Milos, dan J. Isacovic, *Cascade Nonlinear Feedforward-feedback Control of Stagnation Pressure in a Supersonic Blowdown Wind Tunnel*, Journal of the International Measurement Confederation, vol. 95, pp. 424-438, 2017.
- [7]. A. Campos-Rodriguez, J.P Garcia-Sandoval, V, Gonzalez-Alvarez and A. Gonzales-Alvarez, *Hybrid Cascade Control for A Class of Nonlinear Dynamical Systems*, Journal of Process Control, vol. 76, pp 141-154, 2019.
- [8]. M.M. Noh, M.S. Najib, N.S. Abdullah, *Simulator of Water Tank Level Control System Using PID-Controller*, IEEE 3<sup>rd</sup> Int. Conf. On Water Resources, Hydraulics & Hydrology, 2008.
- [9]. J.G. Ziegler dan N.B. Nichols, *Optimum Settings for Automatic Controllers*, Journal of Dynamic systems, Measurement and Control, pp. 220-222, 1993.
- [10]. K. Astrom dan T. Hagglund, *PID Controller: Theory, Design and Tuning*, 2nd ed, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, pp. 120-134,1994.
- [11]. 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.
- [12]. J.Singh, K. Chatterjee dan C.B. Vishwakarma, *Two Degree of Freedom Internal Model Control PID Design for LFC of Power System via Logarithmic Approximation*, ISA Transaction, vol. 72, pp. 185-196, 2018.
- [13]. A. Dehghani dan H. Khodadadi, *Designing a Neuro -Fuzzy PID Controller Based on Smith Predictor for Heating System*, IEEE 17<sup>th</sup> Int. Conf. on Control, Automation and Sys., 2017.
- [14]. 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.
- [15]. S.K. Almasa, T.H. Ariwibowo, E. Tridianto, *Studi Performasi Sistem Pengendalian PID Bertingkat Pada Shell-And-Tube Heat Exchanger Menggunakan Matlab/Simulink*, Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan V, 2017