

# Tuning Parameter Kontrol Proporsional–Integral

## Menggunakan Sugeno *Fuzzy Inference System*

**Wahyudi**  
**Iwan Setiawan**  
**Eduward Tigor**

**Abstract** PI (Proportional-Integral) controller is a control method that have been applying in industrial process. This control method have two control parameters the proporsional parameter ( $K_p$ ) and the integral parameter ( $K_i$ ). In conventional methot, parameter PI is tuned by using trial and error. That problem is how tuning parameter is easily and not long time to find this parameter. Autotuning paramer by using fuzzy logic is one method to solve this problem. In autotuning method, PI parameter is calculate by some of rules base. This methode have two inputs, error and change of error. Main controller of this plant, control fluid level, use Atmega8535 microcontroller and water pump as the actuator to control. This reseach is succesfull for tuning PI parameter and to control the fluid level as we want. The respon system have rapid rise time, no offset and no overshoot. The respon system is stable although we add some noise in the system.

**Key Word** : PI (Proportional-Integral), autotuning fuzzy, and ATmega 8535 microcontroller.

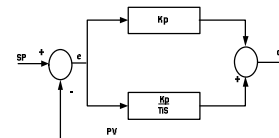
Pada industri-industri banyak digunakan kendali konvensional seperti PID dan PI. Kendala yang sering dihadapi adalah bahwa sistem kendali konvensional ini membutuhkan pengetahuan tentang parameter-parameter sistem terlebih dahulu atau dapat dilakukan dengan cara coba-coba. Permasalahan akan bertambah rumit jika digunakan untuk sistem yang kompleks.

Kendali Logika Fuzzy dapat digunakan untuk membantu memudahkan penalaan parameter-parameter kendali konvensional tersebut. Kendali Logika Fuzzy menerapkan suatu sistem kemampuan manusia untuk mengendalikan sesuatu dengan menggunakan aturan jika-maka (*if-then rule*), sehingga proses pengendalian akan mengikuti pendekatan secara linguistik. Pada makalah ini dirancang suatu sistem pengendalian level cairan. Kontroler dengan menggunakan PI yang ditala dengan menggunakan FIS model Sugeno. Mikrokontroler ATmega 8535 sebagai kontroler yang bertujuan untuk mendapatkan respon sistem yang baik yaitu *rise time* yang cepat dan *overshoot* yang minimal.

Gabungan aksi kontrol proporsional dan aksi kontrol integral membentuk aksi kontrol proporsional plus integral (*controller PI*).

Wahyudi dan Iwan Setiawan ([wahyuditinom@yahoo.com](mailto:wahyuditinom@yahoo.com)), adalah dosen di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Jl. Prof. Sudharto, S.H. Tembalang, Semarang 50275  
 Eduward Tigor adalah mahasiswa di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Jl. Prof. Sudharto, S.H. Tembalang, Semarang 50275

Gabungan aksi ini mempunyai keunggulan dibandingkan dengan masing-masing kontrol yang menyusunnya. Keunggulan utamanya adalah diperolehnya keuntungan dari masing-masing aksi kontrol dan kekurangan dari aksi kontrol yang satu dapat diatasi dengan aksi kontrol yang lain. Elemen-elemen *controller P* dan *I* secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem dan menghilangkan *offset*. Untuk dapat mengimplementasikan sistem kendali PI pada komputer, PI harus diubah ke dalam persamaan diskrit. Gambar 1 adalah blok sistem aksi kontrol PI .



**Gambar 1 Blok Aksi Kontrol Proporsional-Integral.**

Pengolahan parameter-parameter PI menjadi konstanta-konstanta pengendalian secara diskrit sesuai dengan penjelasan perhitungan berikut.

$$co(s) = K_p E(s) + \frac{K_p}{T_i s} E(s)$$

$$co(s) = \frac{K_p s E(s) + \frac{K_p}{T_i} E(s)}{s}$$

$$sco(s) = K_p s E(s) + \frac{K_p}{T_i} E(s) \quad (1)$$

Persamaan 1 diubah kembali ke kawasan waktu, sehingga menjadi :

$$\frac{dco(t)}{dt} = K_p \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} e(t) \quad (2)$$

Persamaan 2 diubah ke dalam bentuk diskrit dengan menggunakan persamaan *backward difference*, sehingga diperoleh :

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{y(k) - y(k-1)}{T} \quad \text{dan}$$

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = \frac{y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)}{T^2}$$

sehingga Persamaan (2) menjadi:

$$\frac{co(k) - co(k-1)}{T} = K_p \left[ \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right] + \frac{K_p}{T_i} e(k)$$

$$co(k) - co(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + \frac{K_p T}{T_i} e(k)$$

$$co(k) = co(k-1) + \left[ K_p + \frac{K_p T}{T_i} \right] e(k) - [K_p] e(k-1) \quad (3)$$

Persamaan 3 menunjukkan persamaan pengendali PI dalam bentuk diskrit, dari persamaan 3 dapat diketahui bahwa pengendali PI menggunakan konstanta pengendalian sebagai berikut.

$$co(k) = co(k-1) + K_2 e(k) - K_3 e(k-1) \quad (4)$$

dengan

$$K_2 = (K_p + K_1) \Rightarrow K_1 = \frac{K_p T}{T_i} \quad (5)$$

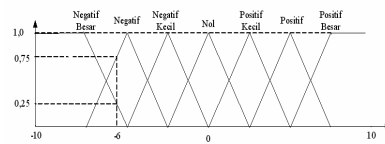
$$K_3 = K_p \quad (6)$$

Kendali logika Fuzzy dilakukan dalam tiga tahap, yaitu fuzzifikasi, evaluasi aturan dan defuzzifikasi. Gambar 2 menunjukkan mekanisme kendali logika Fuzzy.



**Gambar 2** Kendali logika Fuzzy kalang tertutup.

Komponen Fuzifikasi berfungsi untuk memetakan masukan data tegas ke dalam himpunan Fuzzy menjadi nilai Fuzzy dari beberapa variabel linguistik masukan. Gambar 3 menunjukkan proses Fuzzyfikasi



**Gambar 3** Proses Fuzzyfikasi.

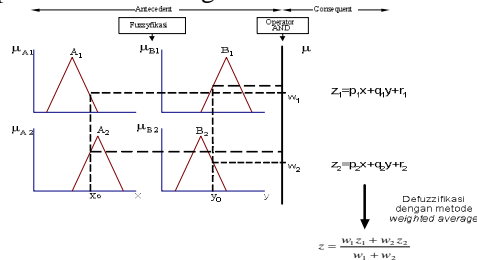
Basis pengetahuan berisi pengetahuan sistem kendali sebagai pedoman evaluasi keadaan sistem untuk mendapatkan keluaran kendali sesuai yang diinginkan perancang. Basis pengetahuan terdiri dari basis data dan basis aturan Fuzzy.

Basis data merupakan komponen untuk mendefinisikan himpunan Fuzzy dari masukan dan keluaran. Basis Aturan Fuzzy merupakan kumpulan pernyataan aturan 'IF-THEN' yang didasarkan kepada pengetahuan pakar.

Logika pengambilan keputusan disusun dengan cara menuliskan aturan yang menghubungkan antara masukan dan keluaran sistem Fuzzy. Aturan ini diekspresikan dalam kalimat: 'jika <masukan> maka <keluaran>'. Metode ini mempunyai bentuk aturan seperti persamaan 7

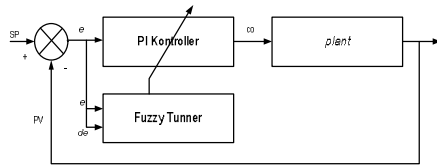
$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = k \quad (7)$$

Defuzzifikasi dapat didefinisikan sebagai proses perubahan besaran Fuzzy yang disajikan dalam bentuk himpunan-himpunan Fuzzy keluaran dengan fungsi keanggotaan untuk mendapatkan kembali bentuk tegasnya (*crisp*). Gambar 4 menunjukkan proses pengambilan keputusan metode sugeno.



**Gambar 4** Proses pengambilan keputusan FIS Sugeno.

Pada metode *Fuzzy Multiterm Controllers*, logika Fuzzy akan dipergunakan untuk menala atau mengadaptasi sebuah kontroler *multiterm* seperti kontroler PI seperti yang terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Tuning Kontroler PI dengan fuzzy.

Kontroler PI dapat direpresentasikan oleh salah satu dari dua bentuk berikut yaitu

1. Bentuk Kontinyu :

$$co(t) = Kp.e(t) + Ki \int e(t)dt$$

2. Bentuk Diskrit :

$$co(k) = Kp.e(k) + KiTs \sum_{i=1}^n e(i)$$

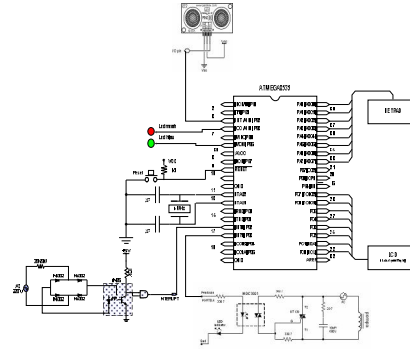
Dimana  $Kp$  dan  $Ki$  masing-masing adalah konstanta Proporsional, dan konstanta Intergral, Nilai  $Ti = Kp/Ki$ , sering dikenal sebagai konstanta waktu integral,  $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ ,  $Ts$  adalah periode sampling dan  $n$  adalah jumlah sampel data. Pendekatan dasar dalam mengadaptasi kontroler *multiterm* (kontroler PI) dengan menggunakan logika Fuzzy adalah dengan merencanakan *supervisory rules* dari Fuzzy tersebut dengan aturan (rule) berikut ini :

IF  $e(k)$  is  $Ai$  and  $\Delta e(k)$  is  $Bi$ , THEN  $Kp$  is  $Ci$  and  $Ki$  is  $Di$  (8)

Dimana,  $Ai$ ,  $Bi$ ,  $Ci$ , dan  $Di$  adalah variabel linguistik dari *rule ke-I* ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) yang dapat direpresentasikan dengan fungsi keanggotaan tertentu.

### PERANCANGAN

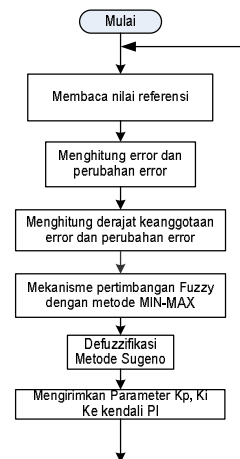
Sistem mikrokontroler digunakan sebagai unit kendali utama yang didalamnya berisi program untuk mengendalikan proses pengaturan pompa (*pump*), termasuk pengesetan parameter, pengaturan tampilan LCD, pengaturan data serial dan *clock* input sensor PING, kendali PI dan penalaan dengan logika Fuzzy serta mengatur aliran data komunikasi serial melalui RS232 dengan komputer untuk proses *monitoring*. Secara umum, alokasi penggunaan *port* pada rangkaian ATmega 8535 dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Sistem mikrokontroler ATmega 8535.

Program kendali Fuzzy terdiri atas Fuzzifikasi, evaluasi aturan, mekanisme pengambilan keputusan, dan defuzzifikasi. Keluaran pada proses defuzzifikasi merupakan hasil dari proses sistem Fuzzy secara keseluruhan. Blok diagram program Fuzzy sebagai *tuning* kendali PI diperlihatkan pada Gambar 7.

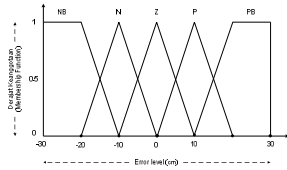
Tahapan awal proses Fuzzifikasi adalah menentukan parameter-parameter fungsi keanggotaan pada setiap himpunan Fuzzy masukan. Pada pemrograman Fuzzifikasi ini digunakan parameter fungsi keanggotaan masukan berupa *error* dan *d\_error*. Derajat keanggotaan bernilai antara 0 dan 1, sedangkan dalam pemrograman *tuning* dengan logika Fuzzy ini, nilai derajat keanggotaan dinormalisasi ke dalam nilai 0 hingga 200 dengan tujuan menghemat memori *flash* pada mikrokontroler.



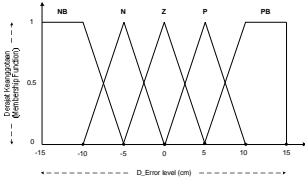
Gambar 7 Diagram blok utama sistem Fuzzy.

Seluruh proses perancangan kendali logika Fuzzy dilakukan dengan menggunakan mikrokontroler ATmega 8535, sehingga seluruh

parameter fungsi keanggotaan *error* dan *d\_error* pada Gambar 8 dan Gambar 9 dinormalisasi ke dalam bahasa pemrograman C.



Gambar 8 Fungsi keanggotaan *error level*.



Gambar 9 Fungsi keanggotaan *d\_error level*.

Tahapan kedua dalam *Fuzzy Inference System* adalah evaluasi aturan. Tujuan dari evaluasi aturan ini adalah menentukan derajat keanggotaan dari keluaran Fuzzy. Himpunan Fuzzy keluaran yang digunakan dalam perancangan *tuning* parameter PI adalah *singleton*. Sebelum melakukan evaluasi aturan terlebih dahulu ditetapkan basis aturan. Basis aturan merupakan keseluruhan aturan dari kombinasi dua masukan yang mungkin. Secara lengkap, jumlah kombinasi yang mungkin dari dua himpunan Fuzzy masukan dengan masing-masing lima fungsi keanggotaan adalah dua puluh lima aturan. Basis aturan yang dibuat berdasarkan tingkah laku plant yang diinginkan. Keluaran Fuzzy akan menentukan nilai konstanta PI. Dua puluh lima aturan yang digunakan terlihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1 Basis Aturan *tuning* PI dengan Logika Fuzzy untuk Konstanta Kp.

D_Error	NB	N	Z	P	PB
Error	NB	N	Z	P	PB
	NB	N	Z	P	PB
	NB	N	Z	P	PB
	NB	N	Z	P	PB
	NB	N	Z	P	PB

Tabel 2 Basis Aturan *tuning* PI dengan Logika Fuzzy untuk Konstanta Ki.

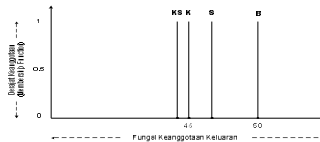
D_Error	NB	N	Z	P	PB
Error	NB	N	Z	P	PB

NB	B	B	B	B	B
N	K	S	S	S	K
Z	KS	KS	KS	KS	KS
P	K	S	S	S	K
PB	B	B	B	B	B

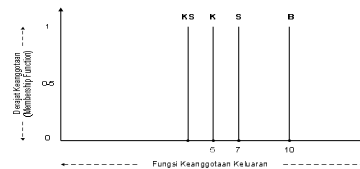
Metode pengambilan keputusan (inferensi) yang digunakan dalam pemrograman ini adalah metode Max-Min. Setelah semua aturan fuzzy dieksekusi, dilakukan proses agregasi dengan mengambil nilai maksimal dari masing-masing fungsi keanggotaan variabel keluaran.

Tahap terakhir dari inferensi Fuzzy adalah defuzzifikasi. Defuzzifikasi merupakan kebalikan dari proses Fuzzifikasi, yaitu mengubah himpunan Fuzzy keluaran menjadi keluaran tegas (*crisp*). Perubahan ini diperlukan karena konstanta kendali PI hanya mengenal nilai tegas sebagai variabel parameter. Perancangan ini, menggunakan sebuah himpunan Fuzzy keluaran dengan fungsi keanggotaannya berupa *singleton*, seperti tampak pada Gambar 10 dan Gambar 11.

Nilai tegas (*crisp*) keluaran diperoleh dari himpunan-himpunan Fuzzy keluaran dengan menggunakan metode rata-rata terbobot. Pada makalah ini digunakan kendali PI untuk mendapatkan tinggi muka cairan yang diinginkan. Nilai konstanta Kp dan Ki diperoleh dari Sistem Fuzzy sebagai penala.

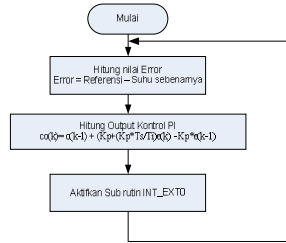


Gambar 10 Fungsi keanggotaan keluaran konstanta Kp.



Gambar 11 Fungsi keanggotaan keluaran konstanta Ki.

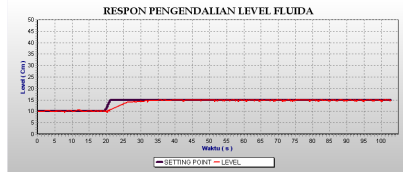
Perhitungan dengan algoritma PI dimulai dengan menghitung *error* antara *setpoint* level dengan level sebenarnya. *Error* digunakan sebagai masukan pada kendali PI. Diagram alir proses pengontrolan dengan menggunakan algoritma kendali PI digital ditunjukkan dalam Gambar 12.



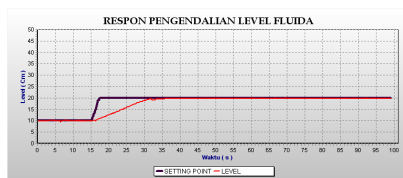
Gambar 12 Diagram alir algoritma PI

## PENGUJIAN DAN ANALISIS

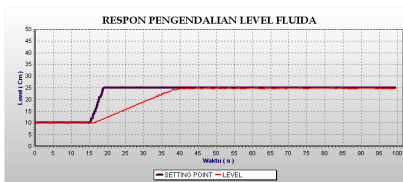
Tanggapan pengendalian sistem level tanpa gangguan dengan memberikan nilai referensi level yang berbeda yaitu 15 Cm, 20 Cm, dan 25 Cm. Respon sistem dapat dilihat pada Gambar 13, Gambar 14, dan Gambar 15.



Gambar 13 Tanggapan sistem kendali level tanpa gangguan dengan referensi 15 Cm.



Gambar 14 Tanggapan sistem kendali level tanpa gangguan dengan referensi 20 Cm.



Gambar 15 Tanggapan sistem kendali level tanpa gangguan dengan referensi 25 Cm.

Gambar 13 adalah grafik respon kendali level dengan referensi 15 Cm. Respon sistem stabil tidak terjadi kesalahan keadaan tunak, setelah detik ke 100 pengujian dihentikan. Waktu tunda ( $t_d$ ) yang diperlukan adalah 1 detik, waktu naik ( $t_r$ ) 8 detik. Gambar 14 adalah grafik respon kendali level dengan referensi 20 Cm. Respon sistem stabil tidak terjadi kesalahan keadaan tunak, setelah detik ke 100 pengujian dihentikan. Waktu tunda ( $t_d$ ) yang diperlukan adalah 1 detik,

waktu naik ( $t_r$ ) 15 detik. Gambar 15 adalah grafik respon kendali level dengan referensi 25 Cm. Respon sistem stabil tidak terjadi kesalahan keadaan tunak, setelah detik ke 100 pengujian dihentikan. Waktu tunda ( $t_d$ ) yang diperlukan adalah 1 detik, waktu naik ( $t_r$ ) 24 detik.

Ketiga hasil pengujian sistem kendali level tanpa gangguan dapat disimpulkan bahwa semakin besar referensi level yang diberikan, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan stabil akan semakin lama, dengan level awal yang sama. Kendali PI dengan penalaan logika Fuzzy pada sistem tanpa gangguan yang diuji sudah bekerja secara optimal, dimana semua respon sistem untuk referensi yang berbeda dapat mencapai keadaan stabil.

Pengujian terhadap pengaruh gangguan pada sistem kendali level dilakukan dengan dua variasi, yaitu pengujian pengaruh gangguan sesaat pada sistem dan pengaruh gangguan kontinu. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan atau untuk kerja kendali PI dengan penalaan logika Fuzzy terhadap gangguan luar.

Pengaruh gangguan sesaat pada sistem kendali level dengan variasi pemberian referensi level dilakukan dengan cara memberikan tambahan aliran pada bagian inlet plant. Pemberian gangguan dilakukan ketika mencapai keadaan stabil, sesuai dengan referensinya. Pemberian gangguan sesaat dilakukan selama 10 detik setelah itu aliran inlet dihentikan. Gangguan dilakukan pada referensi 15 cm, 20 cm, dan 23 cm. Hasil pengujian respon sistem ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16 Tanggapan sistem kendali level dengan gangguan sesaat referensi 15, 20, dan 23 cm.

Pada Gambar 16 menunjukkan respon sistem kendali level dengan gangguan sesaat pada referensi 15 cm, gangguan diberikan dengan memberikan aliran inlet pada waktu 40 detik, selama 10 detik level sistem berangsur-angsur naik sampai level tertinggi yaitu 17 cm. Setelah itu aliran inlet dihentikan, dan waktu pemulihan menuju kestabilan selama 20 detik setelah terjadi lonjakan. Pada referensi 20 cm, gangguan diberikan dengan memberikan aliran inlet sesaat

pada waktu 40 detik, selama 10 detik level sistem berangsur-angsur naik sampai level tertinggi yaitu 23 cm. Setelah itu aliran inlet dihentikan, dan waktu pemulihan menuju kestabilan selama 24 detik setelah terjadi lonjakan. Pada referensi 23 cm, gangguan diberikan dengan memberikan aliran inlet sesaat pada waktu 206 detik, selama 8 detik level sistem berangsur-angsur naik sampai level tertinggi yaitu 24 cm. Setelah itu aliran inlet dihentikan, dan waktu pemulihan menuju kestabilan selama 20 detik setelah terjadi lonjakan.

Pengaruh gangguan kontinu pada sistem kendali level dengan variasi pemberian referensi level dilakukan dengan cara memberikan tambahan aliran pada bagian inlet plant secara kontinu. Pemberian gangguan dilakukan ketika mencapai keadaan stabil, sesuai dengan referensinya. Gangguan dilakukan pada referensi 15 cm, 20 cm, dan 23 cm. Hasil pengujian respon sitem ditunjukkan pada Gambar 17.



**Gambar 17 Tanggapan sistem kendali level dengan gangguan kontinu referensi 15cm, 20cm, dan 23 cm.**

Pada Gambar 17 menunjukkan respon sistem kendali level dengan gangguan kontinu pada referensi 15 cm, gangguan diberikan dengan memberikan aliran inlet pada waktu 30 detik, selama 60 detik level sistem berangsur-angsur naik sampai level tertinggi yaitu 16 cm hingga kembali ke keadaan *steady*. Setelah itu referensi diubah menjadi 20 cm. Pada referensi 20 cm, gangguan kontinu diberikan dengan memberikan aliran inlet pada waktu 85 detik, selama 60 detik level sistem mengalami *offset* tunak sebesar 0.1 cm. Setelah itu referensi diubah menjadi 23 cm. Pada referensi 23 cm, gangguan kontinu diberikan dengan memberikan aliran inlet pada waktu 144 detik, selama 100 detik level sistem mengalami *offset* tunak sebesar 0,1 cm.

#### PENUTUP

1. Pada pengujian dengan nilai referensi tetap, mampu menghasilkan respon yang baik yaitu *rise time* yang cepat dan *overshoot* yang

sangat kecil, untuk referensi 15 cm menghasilkan waktu tunda ( $t_d$ ) yang diperlukan adalah 1 detik, waktu naik ( $t_r$ ) 8 detik, untuk referensi 20 cm menghasilkan waktu tunda ( $t_d$ ) yang diperlukan adalah 1 detik, waktu naik ( $t_r$ ) 15 detik, untuk referensi 25 cm menghasilkan waktu tunda ( $t_d$ ) yang diperlukan adalah 1 detik, waktu naik ( $t_r$ ) 25 detik, dari ketinggian awal 10 cm.

2. Pada pengujian dengan gangguan sesaat, pada referensi 15, 20, 23 cm, gangguan diberikan dengan memberikan aliran inlet, selama 10 detik level sistem berangsur-angsur naik sampai range 1-2 cm. Setelah itu aliran inlet dihentikan, dan waktu pemulihan menuju kestabilan selama 20 detik setelah terjadi lonjakan.
3. Pada pengujian dengan gangguan kontinu, diberikan perubahan debit pada sisi *inlet*, respon keluaran mengalami *offset* keadaan tunak sebesar 0,1 cm.
4. Penalaan konstanta PI dengan logika Fuzzy akan terus mengalami perubahan konstanta sesuai dengan perubahan nilai *error* dan *delta error*.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Astrom, John and Bjorn Wittenmark, *Adaptive Control Second Edition*, Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1995.
- Benjamin C. Kuo, *Automatic Control System Sixth Edition*, Prentice-Hall, New Jersey, 1991.
- Brosilow, Coleman and Babu Joseph, *Techniques of Model-Based Control*, Prentice Hall International Series, New Jersey, 2001.
- Budiharto Widodo, *Panduan Praktikum Mikrokontroler AVR ATmega16*, PT Elex Media Komputindo, Jakarta, 2008.
- Heryanto, M. Ary dan Wisnu Adi P, *Pemrograman Bahasa C Untuk Mikrokontroler AT MEGA 8535*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2008.
- Jamshidi, Mohammad, *Application of Fuzzy Logic*, Prentice-Hall International Inc, New Jersey, 1980.
- Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*, diterjemahkan oleh Edi Leksono, Erlangga, Jakarta, 1994.
- Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 2*, diterjemahkan oleh Edi Leksono, Erlangga, Jakarta, 1994.