

## STRATEGI PENCARIAN NILAI PARAMETER KONTROLER FUZZY PID DAN IMPLEMENTASI PADA SISTEM KONTROLER PID KONVENSIONAL

Indrazno Siradjuddin

**Abstrak:** Perbaikan kinerja suatu sistem kontroler *fuzzy* lebih sulit dibandingkan dengan perbaikan kinerja pada sistem kontroler PID, hal ini disebabkan oleh sifat nonlinear sistem kontroler *fuzzy*. Makalah ini akan menjelaskan prosedur perancangan dan pencarian nilai parameter sistem kontroler PID dan sistem kontroler *fuzzy* PID. Tahapan perancangan dimulai dari cara mencari penguatan yang tepat pada sistem kontroler PID konvensional, mengganti dengan sistem kontrol *fuzzy* yang ekuivalen, perbaikan kinerja sistem kontrol *fuzzy* PID.

**Kata kunci:** Kontrol PID, kontrol *fuzzy*, metode *tuning* PID

Permasalahan pada sistem kontrol pada dasarnya adalah meregulasi keluaran kontroler pada nilai yang diharapkan (*setpoint*). Baik pada sistem kontrol PID maupun *fuzzy*, regulasi atau perbaikan kinerja dihitung dengan mempertimbangkan besarnya faktor penguatan pada nilai umpan balik *error*, integral dan *derivative error*. Pada sistem kontrol *fuzzy* akan lebih sulit untuk mengetahui pengaruh kinerja sistem terhadap perubahan faktor penguatan pada nilai *error*, integral dan *derivative error* dibandingkan dengan sistem kontrol PID konvensional. Kinerja sistem dapat diamati dari beberapa hal seperti nilai waktu naik (*rise time*), maksimum overshoot, dan waktu keadaan mantap (*settling time*). Pencarian terhadap konfigurasi nilai PID yang tepat dapat dilakukan dengan beberapa cara, seperti dengan cara manual (*hand-tuning*), Ziegler-Nichols *tuning*, loop shaping, metode analitikal, atau dengan *auto-tuning* (Smith, 1979). Cara-cara tersebut dapat juga diterapkan pada sistem kontrol *fuzzy* dengan beberapa asumsi tertentu (Siller, Ying, 1989).

Namun masih terdapat perbedaan perlakuan antara PID konvensional dengan sistem kontrol PID dengan metode *fuzzy*. Makalah ini akan menyampaikan strategi perancangan dan implementasi sistem kontrol PID dengan metode *fuzzy* dari sistem PID konvensional.

Pencarian nilai penguatan PID konvensional

Model matematis secara umum dari suatu sistem kontrol PID adalah:

$$u = K_p \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e \cdot dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (1)$$

Menghasilkan keluaran sistem kontrol  $u$ , konstanta  $K_p$  adalah penguatan proporsional,  $T_i$  adalah waktu integral,  $T_d$  adalah waktu *derivative*,  $e$  adalah *error* an-tara hasil keluaran dengan referensi. Dalam bentuk digital, dengan waktu sampling  $T_s$  maka persamaan (1) dapat dirubah dalam bentuk persamaan diskrit sbb:

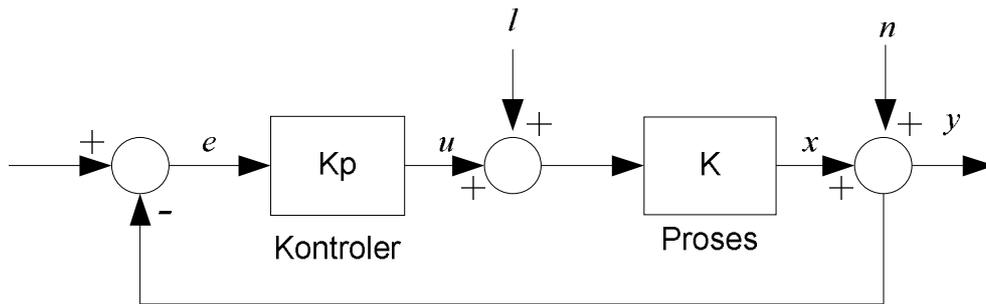
$$U_n = K_p \left( e_n + \frac{1}{T_i} \sum_{j=1}^n e_j T_s + T_d \frac{e_n - e_{n-1}}{T_s} \right) \quad (2)$$

Index  $n$  merupakan menunjukkan waktu diskrit. Perbaikan parameter sistem kontrol dengan mencari nilai yang tepat pada parameter  $K_p$ ,  $T_i$  dan  $T_d$ . Untuk sistem kontrol proporsional, gambar 1, maka persamaan (2) memiliki nilai parameter  $T_i$  dan  $T_d$  adalah sama dengan 0, sehingga persamaan (2) menjadi

$$U_n = K_p e_n \quad (3)$$

Sedangkan persamaan dari diagram blok kontrol pada Gambar 1, adalah:

$$x = \frac{K_p K}{1 + K_p K} (\text{Ref} - n) + \frac{K}{1 + K_p K} l \quad (4)$$



Gambar 1 Kontrol Proporsional, beban  $l$  dan noise  $n$ .

Jika nilai  $n$  dan  $l$  adalah 0, maka untuk menghasilkan nilai *output* yang sama dengan nilai Ref, nilai  $K_p = \infty$ . Namun jika nilai  $l$  adalah bukan 0, maka dengan nilai  $K_p$  yang besar, sistem menjadi tidak sensitif terhadap perubahan pembebanan  $l$ . Dan jika nilai noise  $n$  tidak 0, maka nilai  $K_p$  harus lebih moderat, jika tidak maka sistem akan sangat sensitif terhadap noise  $n$ . Jika dipandang secara menyeluruh dengan memberikan nilai  $K_p$  yang sangat besar, maka sistem kontrol menjadi tidak stabil, untuk sistem yang dinamik. Sehingga perubahan nilai  $K_p$  akan mempengaruhi stabilitas, sensitifitas terhadap noise, dan regulasi terhadap perubahan nilai beban.

Salah satu cara untuk perbaikan nilai dari parameter kontrol adalah dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols (Ziegler-Nichols *tuning*) (Astrom K.J, et al, 1995).

Tabel 1 Aturan Ziegler-Nichols

Kontroler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_u$		
PI	$0,45K_u$	$T_u/1,2$	
PID	$0,6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

Prosedur Ziegler-Nichols Tuning

1. Menghilangkan pengaruh integral dan *derivative* dengan membuat nilai  $K_i$  ( $1/T_i$ ) dan  $K_d$  ( $T_d$ ) sama dengan 0, dan menaikkan nilai  $K_p$  sampai terjadi osilasi pada keluaran sistem kontrol. Nilai  $K_p$  pada saat itu disebut ultimate gain atau critical gain,  $K_u$ .

2. Menghitung nilai periode osilasi sinyal keluaran dari langkah 1,  $T_u$
3. Menggunakan tabel 1, untuk mengetahui nilai  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$

Periode sampling berhubungan dengan nilai dari  $T_d$ . Biasanya mempunyai nilai antara 1/10 sampai 1/2 dari nilai  $T_d$ . (Wittenmark, et al, 1984). Sehubungan dengan aturan Ziegler-Nichols periode sampling  $T_s$  antara 1/10 sampai dengan 1/5 dari  $T_u$ .

Metode lain yang bisa digunakan dalam perbaikan nilai dari parameter kontrol adalah dengan cara *hand-tuning*. Metode ini didasarkan pada pengalaman insinyur kontrol yang telah berpengalaman. Aturan Hand-Tuning dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2 Aturan Hand-Tuning Kontrol PID

Aksi	Rise-Time, Tr	Overshoot	Stability
$K_p$	Cepat	Bertambah	Berkurang
$T_d$	Lambat	Berkurang	Bertambah
$1/T_i$	Cepat	Bertambah	Berkurang

Prosedur *Hand-Tuning*

1. Menghilangkan pengaruh integral dan *derivative* dengan membuat nilai  $T_d=0$  dan  $1/T_i=0$
2. Melakukan pencarian nilai  $K_p$  sampai respon sistem seperti yang diharapkan, dengan menghiraukan nilai referensi.
3. Menambah nilai  $K_p$  seiring dengan melakukan koreksi terhadap overshoot

- yang terjadi dengan menyesuaikan nilai Td.
- Melakukan penyesuaian nilai 1/Ti dengan memperhatikan nilai akhir respon dengan nilai referensi, mencapai steady state error yang dikehendaki.
  - Ulangi tahapan tersebut dengan menambah nilai Kp sebesar mungkin.

**METODE**

**Kontrol Fuzzy Proportional (FP)**

Diagram sederhana dari sistem kontrol fuzzy proportional (FP) (gambar. 2) mempunyai masukan error dan keluaran berupa sinyal kontrol U. Dibanding dengan sistem kontrol proporsional yang hanya memiliki 1 buah parameter penguatan Kp, fuzzy proportional mempunyai dua buah penguatan GE dan GU. Selain sebagai penguatan untuk perbaikan respon sistem juga berfungsi sebagai faktor pensekalaan, sehingga nilai yang dihasilkan memenuhi batas nilai dari himpunan semesta (universe) himpunan fuzzy. Dalam bentuk notasi fungsi persamaan dapat dinyatakan sbb.:

$$U_n = f(G_E * e_n) * G_U \tag{5}$$

Notasi f adalah merupakan fungsi input-ouput sistem fuzzy, dengan mengg-

unakan pendekatan persamaan linear, maka

$$f(G_E * e_n) = G_E * e_n \tag{6}$$

Dengan melihat lagi persamaan (3), maka

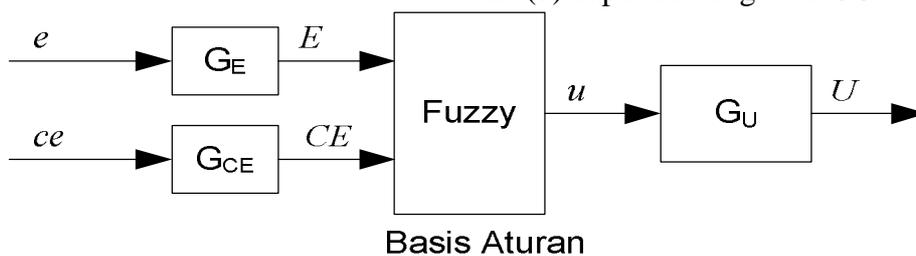
$$U_n = G_E * e_n * G_U = G_E * G_U * e_n \tag{7}$$

Ketepatan sistem fuzzy proportional tergantung dari fungsi keanggotaan fuzzy (membership function) dan basis aturan (rule base). Jika himpunan semesta (universe) input dan output mempunyai jangkauan nilai [-100, 100]. Contoh basis aturannya adalah

If E is Pos then u is 100

If E is Neg then u is -100

Positif (Pos) dan negatif (Neg) adalah tanda nilai E = (reference-Un), Jika sebagai contoh: nilai maksimum reference adalah 1, sehingga maksimum nilai en adalah 1. Dan himpunan semesta dari E adalah [-100,100], maka GE dapat ditetapkan mempunyai nilai 100. Maka dengan demikian perubahan parameter penguatan KP dalam sistem kontrol proporsional menjadi parameter penguatan pada sistem fuzzy proportional (GE dan GU) dapat dilakukan, yaitu: dengan telah ditetapkannya nilai GE =100 dan diketahuinya nilai KP, maka dengan menggunakan persamaan (7) dapat dihitung nilai GU.



Gambar 3 Kontrol fuzzy PD (FPD)

Dua masukan dalam sistem kontrol fuzzy proportional-derivative, pada Gambar 3, adalah sinyal error dan sinyal derivative dari error, atau biasa disebut perubahan error (ce, change in error)

$$ce_n = \frac{e_n - e_{n-1}}{T_s} \tag{9}$$

Persamaan (9) adalah bentuk diskrit dari bentuk persamaan differential sinyal error. Dalam komputasi persamaan beda secara langsung. Diagram kontrol FPD, pada Gambar 3 dapat dinotasikan sbb:

$$U_n = (G_E * e_n + G_{CE} * ce_n) * G_U \tag{10}$$

atau

$$U_n = \left( e_n + \frac{G_{CE}}{G_E} * ce_n \right) * G_U * G_E \quad (11)$$

Bila dibandingkan dengan persamaan (8), maka

$$K_p = G_U * G_E \quad (12)$$

$$T_d = \frac{G_{CE}}{G_E} \quad (13)$$

Pendekatan perencanaan himpunan semesta pada sistem FPD, akan baik jika himpunan semesta keluaran adalah jumlah dari himpunan semesta masukan ( $u = E + CE$ ). Sebagai contoh, jika 2 buah masukan mempunyai himpunan semestanya memiliki nilai  $[-100,100]$ , maka himpunan semesta pada keluaran adalah  $[-200,200]$ .

Kontroler *fuzzy* proportional-derivative FPD dapat digunakan jika kontroler *fuzzy* proportional FP menghasilkan respon sistem yang kurang memuaskan. Bentuk *derivative* dapat mengurangi nilai overshoot namun mempunyai sensitifitas terhadap noise yang cukup tinggi. Biasanya dapat digunakan filter terlebih dahulu sebelum masuk dalam ke dalam sistem yang mengandung bentuk *derivative*.

#### Kontrol Fuzzy Proportional –Integral (FPI)

Jika suatu sistem kontrol memiliki nilai steady state *error*, maka untuk memperbaikinya dapat menggunakan bentuk *integrator*. Suatu aksi integral akan menaikkan nilai keluaran kontrol jika sistem memiliki nilai *error* yang positif, meskipun *error* positif tersebut mempunyai harga yang kecil. Aksi integral juga akan menurunkan nilai keluaran kontrol jika sistem mempunyai nilai *error* negatif meskipun bernilai kecil. Suatu kontroler yang menggunakan bentuk aksi integral akan bisa memiliki  $error=0$  pada keadaan mantap (steady state  $error =0$ ). Kontroler PI konvensional dapat di-ganti dengan sistem kontrol *fuzzy* PI, meskipun sedikit lebih sulit untuk mem-buat basis aturan *fuzzy* dibanding dengan kontroller *fuzzy* P atau PD. Permasalahannya *fuzzy* PI yaitu pada kasus integral *windup*. *Windup* terjadi

saat aktuator atau plant mempunyai batasan maksimum, se-bagai contohnya kecepatan maksimum putaran motor. Pada saat motor telah men-capai kecepatan maksimumnya atau satu-rasi, sistem kontrol bekerja konstan, namun proses integral terhadap *error* tetap bekerja, akibatnya bentuk integral meng-hasilkan nilai yang cukup besar, dan dibutuhkan waktu yang lama bagi sistem untuk dapat merubah tanda dari positif menjadi negatif, sehingga sistem terkorek-si dan kemudian menurunkan nilai keluar-an dari sistem kontrol. Atau dengan menggunakan bentuk integral terdapat konsekuensi berupa sinyal yang *overshoot*.

Ada beberapa cara untuk menghindari masalah *windup* ini (Astrom, Hugglund, 1995). Cara yang biasa digunakan adalah dengan mengkonfigurasi sistem kontrol sebagai *incremental controller*. Suatu *incremental controller* menambahkan perubahan dari keluaran sinyal kontrol ke dalam perhitungan, sbb:

$$u_n = u_{n-1} + \Delta u_n \quad (14)$$

$$\Delta u_n = K_p \left( e_n - e_{n-1} + \frac{1}{T_i} * e_n * T_s \right) \quad (15)$$

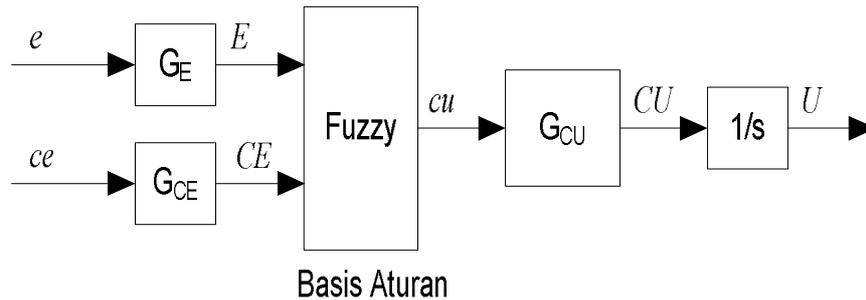
Kontroler *fuzzy* incremental pada Gambar 4, mirip dengan bentuk FPD, yang membedakan adalah terdapat *integrator* sebelum sinyal keluaran kontrol  $U_n$ . Sinyal kontrol  $U_n$  adalah merupakan bentuk penjumlahan dari proses penjumlahan sebelumnya (bentuk integral dalam diskrit).

$$U_n = \sum_i (cu_i * G_{CU} * T_s) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} U_n &= \sum_{i=1}^n ((E_i + CE_i) * G_{CU} * T_s) \\ &= G_{CU} * \sum_{i=1}^n \left[ G_E * e_i + G_{CE} * \frac{e_i - e_{i-1}}{T_s} \right] * T_s \\ &= G_{CU} * \left[ G_E * \sum_{i=1}^n e_i * T_s + G_{CE} * \sum_{i=1}^n (e_i - e_{i-1}) \right] \\ &= G_{CE} * G_{CU} * \left[ \frac{G_E}{G_{CU}} * \sum_{i=1}^n e_i * T_s + e_n \right] \quad (17) \end{aligned}$$

Kontroler *fuzzy* incremental pada gambar 4, mirip dengan bentuk FPD, yang membedakan adalah terdapat *integrator* sebelum sinyal keluaran kontrol  $U_n$ . Sinyal kontrol  $U_n$  adalah merupakan bentuk penjumlahan dari proses penjumlahan sebelumnya (bentuk integral dalam diskrit)

Dengan membandingkan persamaan (17) dengan persamaan (8), maka didapatkan



Gambar 4 Kontrol Fuzzy Incremental (FInc)

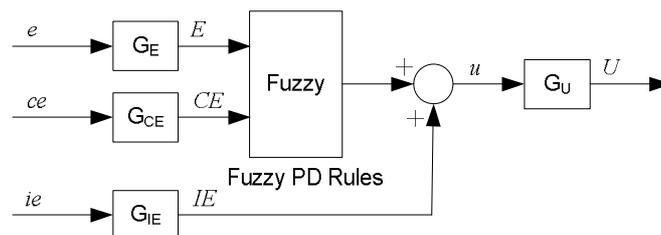
**Kontrol Fuzzy Proportional-Integral-Derivative (FPID)**

Sistem kontrol *fuzzy* PID sudah jelas mempunyai 3 masukan yaitu masukan proportional, *derivative* dan integral. Hal akan menjadikan basis aturan pada sistem *fuzzy* menjadi besar dan bertambah sulit. Solusinya adalah dengan memisahkan menjadi *fuzzy* PD + I, seperti pada gambar 5.

Berdasarkan gambar 5 dapat dibuat model persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 U_n &= [G_E * e_n + G_{CE} * ce_n + G_{IE} * ie_n] * G_U \\
 &= G_E * G_U * \left[ e_n + \frac{G_{CE}}{G_E} * ce_n + \frac{G_{IE}}{G_E} * ie_n \right]
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Dengan membandingkan dengan persamaan kontrol PID konvensional pada persamaan (2), maka



Gambar 5. Kontrol Fuzzy PD+I

$$K_P = G_{CE} * G_{CU} \tag{18}$$

$$\frac{G_E}{G_{CU}} = \frac{1}{T_s} \tag{19}$$

Dengan demikian parameter  $K_P$  bergantung pada  $G_{CE}$ , dan penguatan bentuk integral bergantung pada besarnya rasio penguatan kedua *input* kontroler yaitu  $G_E$  dan  $G_{CE}$ .

$$G_E * G_U = K_p \tag{21}$$

$$\frac{G_{CE}}{G_E} = T_d \tag{22}$$

$$\frac{G_{IE}}{G_E} = \frac{1}{T_i} \tag{23}$$

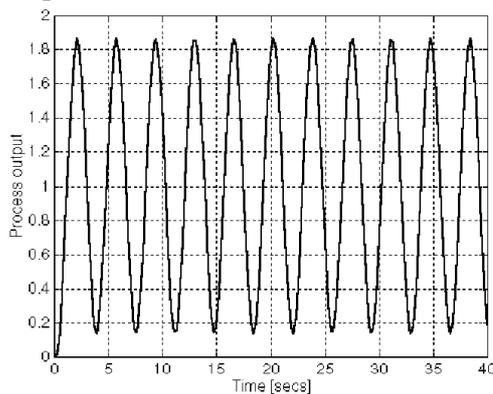
**HASIL**

Untuk menguji tahapan proses disain *fuzzy* kontroler yang diimplementasikan ke dalam sistem kontrol konvensional dibuat suatu program untuk menganalisis dan menguji kebenaran strategi disain yang telah disampaikan. Langkah pengujian dimulai dengan disain sistem kontrol PID konvensional. Suatu sistem kontrol PID harus menggerakkan suatu plant dengan model

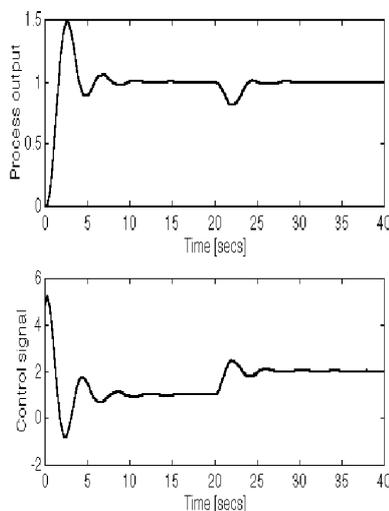
$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^3} \quad (24)$$

Dengan menggunakan langkah Ziegler-Nichols *tuning*.

1. Menghilangkan pengaruh *derivative* dan integral ( $T_d = 0$  dan  $1/T_i = 0$ )
2. Menambah nilai  $K_p$  secara bertahap, hingga tercapai respon sistem yang berosilasi secara periodik. Seperti pada gambar 6
3. Kemudian didapatkan nilai  $K_p$  pada saat itu atau  $K_u = 8$ . Dan waktu periode osilasi  $T_u = 15/4$
4. Berdasarkan tabel 1, dapat dihitung nilai  $K_p = 0,6 * K_u = 4,8$ ;  $T_i = T_u/2 = 15/8$ ;  $T_d = T_u/8 = 15/32$ .
5. Dengan memberikan nilai parameter PID yang dihasilkan dari proses diatas, didapatkan hasil respon sistem seperti pada Gambar 7.



Gambar 6 Respon sistem berosilasi periodik



Gambar 7 Hasil respon sistem kontrol PID

Pengujian selanjutnya adalah menerapkan sistem kontrol *fuzzy* PD+I. Dengan memberikan nilai  $G_E = 100$ , berdasarkan hasil Gambar 7, nilai maksimum *error* adalah 1.

$$G_U = K_P / G_E = 4,8 / 100 \quad (25)$$

$$G_{CE} = G_E * T_d = 100 * 15 / 32 \quad (26)$$

$$G_{IE} = G_E * \frac{1}{T_i} = 100 * 8 / 15 \quad (27)$$

PEMBAHASAN

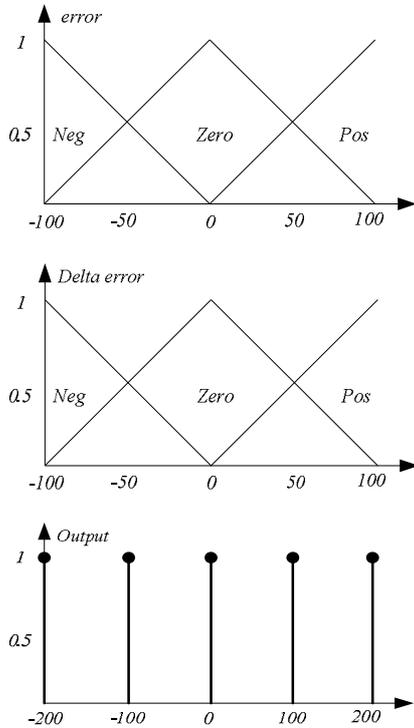
Disain *membership function* dari sistem *fuzzy* dengan menggunakan 3 *membership function* untuk masing-masing masukan sistem kontrol *fuzzy* PD+I, dan mempunyai daerah overlap 50%. Dan *membership function* untuk keluaran dalam bentuk singleton seperti pada Gambar 8.

Proses defuzzifikasi dengan menggunakan metode COG, centre of gravity. Dengan mengakomodasi semua konfigurasi *input* maka dapat ditentukan jumlah *rule* = 3 x 3 = 9 *rule* yaitu:

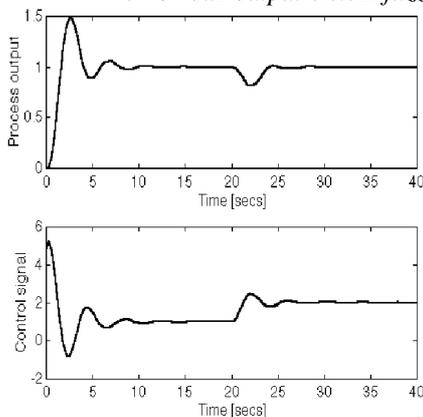
1. *If error is Neg AND delta error is Neg then output is -200*
2. *If error is Neg AND delta error is Zero then output is -100*
3. *If error is Neg AND delta error is Pos then output is 0*
4. *If error is Zero AND delta error is Neg then output is -100*
5. *If error is Zero AND delta error is Zero then output is 0*
6. *If error is Zero AND delta error is Pos then output is 100*
7. *If error is Pos AND delta error is Neg then output is 0*
8. *If error is Pos AND delta error is Zero then output is 100*
9. *If error is Pos AND delta error is Pos then output is 200*

Respon sistem Fuzzy PD+I seperti pada gambar 9. Dengan menambah nilai  $G_E = 400$ , dengan cara yang sama dilakukan proses perhitungan seperti pada persama-

an (25 s/d 27), dihasilkan respon sistem yang mengalami saturasi seperti pada Gambar 10.



Gambar 8 Membership function error, delta error dan output sistem fuzzy PD+I



Gambar 9. Respon Fuzzy PD+I, GE = 100

**KESIMPULAN**

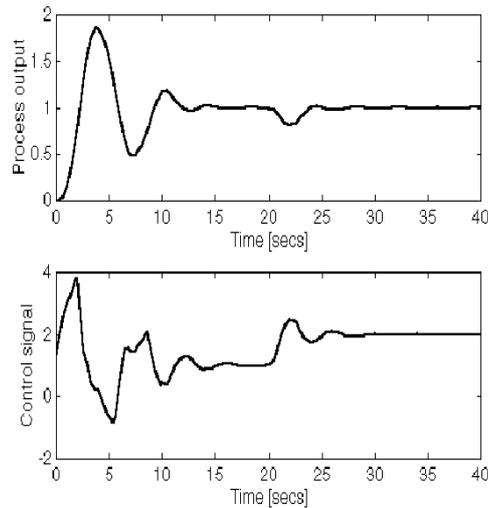
Teknik *tuning* pada sistem kontrol konvensional, proporsional, proporsional-derivatif, proporsional-integral, proporsional-derivatif-integral dapat juga diterapkan dalam sistem kontrol fuzzy FP, FPD, FPI dan FPD+I.

Hasil respon yang dicapai pada sistem PID konvensional mempunyai kemiri-

pan dengan hasil respon sistem kontrol fuzzy PD+I.

FPD+I memiliki 2 faktor penguatan, yang berfungsi untuk normalisasi nilai *crisp* ke dalam skala penuh *universe fuzzy*.

Penguatan GE meningkatkan waktu naik, GCE, GCE dapat meredam overshoot, dan GIE dapat menghilangkan steady state error, atau nilai steady state error = 0



Gambar 10. Respon fuzzy PD+I, GE = 400

**DAFTAR RUJUKAN**

Astrom K., Hang C, 1992. *Toward intelligent PID Control*, Automatica  
 Astrom K, Hagglund T, 1995. *PID controllers – Theory, Design and Tuning*, Instrument Society of America, North Carolina, USA  
 Astrom.K, Wittenmark, 1984, *Computer Controlled Systems Theory and Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs  
 George A. P, 1991, *Computer Controlled Systems Theory And Applications*, Kluwer Academic Publishers, London, UK.  
 Curtis Johnson, Heidar Malki., 2002. *Control System Technology*. Prentice-Hall, New Jersey –USA.  
 Mohammad Jamshidi, Nader V, Timothy J. Ross, 1993. *Fuzzy Logic And Control–Software, Hardware Appli-*

*cations*, Prentice-Hall, New Jersey-USA

Robert B, 2001, *Fuzzy And Neural Control*, Disc Course Lecture Notes, Control Engineering Laboratory, Delft University of Technology, Netherland.]

Panos J.A, Kevin M.P, 1992, *An Introduction Intelligent Autonomous Control*, Kluwer Academic P