

# Pengaruh Perbedaan Tipe Fungsi Keanggotaan Pada Pengendali Logika Fuzzy Terhadap Tanggapan Waktu Sistem Orde Dua Secara Umum

SURATNO L2F096628

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

**Abstrak**—Dalam merancang pengendali berdasarkan logika fuzzy, faktor mendasar yang harus dipenuhi adalah penskalaan dari input-output, aturan dasar kendali fuzzy dan tipe fungsi keanggotaan yang digunakan. Ada beberapa tipe fungsi keanggotaan pada pengendali logika fuzzy antara lain Triangular MF, Trapezoidal MF, Generalized Bell MF, Gaussian MF, Pi MF, Signoidal MF (terdiri dari  $\mu_{\text{psigmf}}$  dan  $\mu_{\text{dsigmf}}$ ), S MF dan Z MF. Pada penelitian ini berbagai tipe fungsi keanggotaan digunakan untuk mengetahui pengaruh perbedaannya terhadap tanggapan waktu sistem orde dua secara umum. Plant yang digunakan mewakili plant under damping, plant critical damping dan plant over damping.. Unjuk kerja sistem yang dicari berupa tanggapan waktu keadaan peralihan (*respon transient*) dan indeks performansi kesalahan. Dengan hasil tersebut dapat digunakan untuk merancang pengendali logika fuzzy yang baik/optimal pada sistem orde dua secara umum.

dilakukan dengan penyempitan skala Zero pada variabel *Error*. Tetapi perubahan ini menimbulkan lonjakan dan osilasi.

Dalam tugas akhir ini akan diteliti tentang pengaruh perbedaan tipe fungsi keanggotaan pada pengendali logika fuzzy yang meliputi *Triangular MF*, *Trapezoidal MF*, *Generalized Bell MF*, *Gaussian MF*, *Pi MF*, *DSignoidal MF*, *S MF* dan *Z MF*, terhadap tanggapan waktu sistem pada plant orde dua dengan menggunakan beberapa plant sample orde dua yang mewakili *plant under damping*, *plant critical damping* dan *plant over damping* secara umum. Sebagai acuan digunakan fungsi keanggotaan tipe segitiga dengan jumlah fungsi keanggotaan sebanyak tujuh buah pada penskalaan awal serta penskalaan yang menghasilkan respon sistem yang baik, sedangkan fungsi keanggotaan tipe lainnya merupakan hasil distribusi pendekatan dari fungsi keanggotaan tipe segitiga pada penskalaan yang bersesuaian.

Analisa keluaran dilakukan terhadap tanggapan peralihan yang terdiri dari waktu tunda (*delay time*), waktu naik (*rise time*), waktu puncak (*peak time*), waktu penetapan (*settling time*), lonjakan maksimum (*maksimum overshoot*), dan osilasi (*oscillation*) yang terjadi. Tolok ukur penampilan dilihat berdasarkan nilai indeks performansi kesalahan yang meliputi kriteria integral kuadrat kesalahan (ISE), integral dari waktu kali kuadrat kesalahan (ITSE), integral harga mutlak kesalahan (IAE) serta integral dari waktu kali harga mutlak kesalahan (ITAE). Dengan menggunakan program Bantu Matlab tipe fungsi keanggotaan yang menghasilkan respon yang baik/optimal.

## I. PENDAHULUAN

**D**alam merancang pengendali berdasarkan logika fuzzy (*Fuzzy Logic Controller*), faktor mendasar yang harus diperhatikan adalah penskalaan dari input-output, aturan dasar kendali fuzzy dan tipe fungsi keanggotaan fuzzy yang digunakan. Suatu tipe fungsi keanggotaan dapat diterjemahkan/dirubah menjadi fungsi keanggotaan dengan tipe yang berlainan. Fungsi akan berusaha menyesuaikan sehingga derajat keanggotaan  $\mu_F$  yang bernilai 0.5 akan menjadi titik penyeberangan.

Perbaikan respon sistem pada plant orde dua dapat dilakukan dengan merubah penskalaan (*scaling*) dari penskalaan awal fungsi keanggotaan tipe segitiga yang telah ditentukan. Penskalaan yang menghasilkan respon sistem yang baik dapat dilakukan sebagai berikut [19]:

☞ Untuk mempercepat respon sistem tanpa terjadinya lonjakan dan osilasi dapat dilakukan dengan pelebaran skala Positif Sedang & Negatif Sedang (PS&NS) atau pelebaran skala Positif Besar & Negatif Besar (PB&NB) pada variabel *Error* atau dengan pelebaran skala Zero pada variabel *dError* atau pelebaran sisi luar skala (PK)&(NK) pada variabel *dError*. Namun perubahan ini tidak memberikan pengaruh perubahan terhadap kesalahan keadaan tunak/*offset*.

☞ Untuk mempercepat respon sistem sekaligus memperkecil kesalahan keadaan tunak/*offset* dapat

## II. DASAR TEORI

### A. Konsep Dasar Logika Fuzzy

Fuzzy berarti samar, kabur atau tidak jelas. Fuzzy adalah istilah yang dipakai oleh Lotfi A Zadeh pada bulan Juli 1964 untuk menyatakan kelompok/himpunan yang dapat dibedakan dengan kelompok lain berdasarkan derajat keanggotaan dengan kabur.

Didalam teori himpunan klasik dinyatakan suatu objek adalah anggota (ditandai dengan “1”) atau bukan anggota (ditandai dengan “0”) dari suatu himpunan dengan batas keanggotaan yang jelas/tegas (*crisp*). Namun dalam teori himpunan fuzzy memungkinkan derajat keanggotaan (*member of degree*) suatu objek dalam himpunan untuk menyatakan peralihan keanggotaan secara bertahap dalam interval antara “0” dan “1” atau ditulis [0 1].

Himpunan fuzzy F dalam semesta X biasanya dinyatakan sebagai pasangan berurutan dari elemen x dan mempunyai derajat keanggotaan :

$$F = \{(x, \mu_F(x)) \mid x \in X\} \quad (1)$$

Dimana :

- F = Notasi himpunan fuzzy
- X = Semesta pembicaraan
- x = Elemen generik dari X

$\mu_F(x)$  = Derajat keanggotaan dari x (nilai antara 0 dan 1)

Fungsi keanggotaan (*membership function*) dari himpunan fuzzy dapat disajikan dengan dua cara yaitu numeric dan fungsional. Secara numeric himpunan fuzzy disajikan dalam bentuk gabungan derajat keanggotaan tiap-tiap elemen pada semesta pembicaraan yang dinyatakan sebagai:

$$F = \sum \mu_F(u_i) / u_i \quad (2)$$

Secara fungsional himpunan fuzzy disajikan dalam bentuk persamaan matematis sehingga untuk mengetahui derajat keanggotaan dari masing-masing elemen dalam semesta pembicaraan memerlukan perhitungan. Fungsi keanggotaan yang biasanya digunakan dalam logika fuzzy adalah:

1) Fungsi Keanggotaan Segitiga

$$\text{triangle}(x ; a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{untuk } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{untuk } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{untuk } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{untuk } x \geq c \end{cases} \quad (3)$$

2) Fungsi Keanggotaan Trapesium

$$\text{trapezoid}(x ; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & \text{untuk } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{untuk } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{untuk } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{untuk } c \leq x \leq d \\ 0 & \text{untuk } x \geq d \end{cases} \quad (4)$$

3) Fungsi Keanggotaan *Generalized Bell (GBell)*

$$\text{bell}(x ; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (5)$$

4) Fungsi Keanggotaan *Gaussian (Gauss)*

$$\text{gauss}(x ; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

5) Fungsi Keanggotaan *Sigmoid*

$$\text{sig}(x ; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (7)$$

6) Fungsi Keanggotaan *Difference of two Sigmoid*

Merupakan hasil pengurangan diantara dua buah kurva sigmoid yang dinyatakan dengan persamaan :

$$\text{dsig}(x ; a_1, c_1, a_2, c_2) = \text{sig}_1(x ; a_1, c_1) - \text{sig}_2(x ; a_2, c_2) \quad (8)$$

7) Fungsi Keanggotaan S

$$S(x ; a, b) = \begin{cases} 0 & \text{untuk } x \leq a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-b}{b-a}\right) \pi & \text{untuk } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{untuk } x \geq b \end{cases} \quad (9)$$

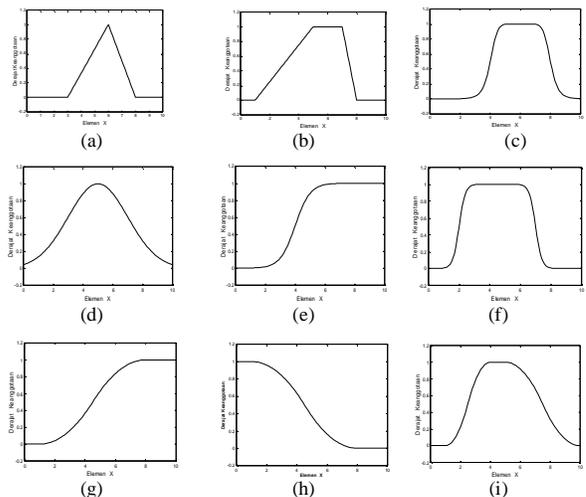
8) Fungsi Keanggotaan Z

$$Z(x ; a, b) = \begin{cases} 1 & \text{untuk } x \leq a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-b}{b-a}\right) \pi & \text{utk } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{untuk } x \geq b \end{cases} \quad (10)$$

9) Fungsi Keanggotaan *Pi*

Fungsi keanggotaan ini merupakan hasil kombinasi fungsi keanggotaan S dan Z dan dinyatakan sebagai

$$Pi(x ; a, b, c, d) = \min(S(x ; a, b), Z(x ; c, d)) \quad (11)$$



Gb. 1 Berbagai tipe fungsi keanggotaan : (a) Tipe Segitiga, (b) Tipe Trapesium, (c) Tipe Gbell, (d) Tipe Gaussian, (e) Tipe Sigmoid, (f) Tipe Dsigmoid, (g) Tipe S, (h) Tipe Z, (i) Tipe Pi

## B. Operasi Himpunan Fuzzy

Misalkan dua buah himpunan fuzzy A dan B dalam x dengan fungsi keanggotaannya  $\mu_A$  dan  $\mu_B$  maka akan dapat dilakukan beberapa operasi himpunan fuzzy antara lain :

- Kesamaan  

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \text{ untuk semua } x \in X \quad (12)$$

- Gabungan  

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \text{ untuk semua } x \in X \quad (13)$$

- Irisan  

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \text{ untuk semua } x \in X \quad (14)$$

- Komplemen  

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (15)$$

Relasi fuzzy R dari sub kumpulan X pada sub kumpulan Y adalah sub kumpulan dari Hasil Kartesian X x Y dan dicirikan oleh sebuah fungsi keanggotaan berpeubah dua  $\mu_R(x, y)$  dan disajikan dengan persamaan :

$$R \equiv \int_{x \times y} \mu_R(x, y) / (x, y) \quad (16)$$

## C. Logika Fuzzy

Dalam penalaran fuzzy, ada dua buah kaidah inferensi fuzzy yang sangat penting yaitu:

### 1). Generalized Modus Ponon (GMP)

Dalil 1 (Pengetahuan) : Jika x adalah A, maka y adalah B

Dalil 2 (Fakta) : x adalah A'

-----  
 Akibat (kesimpulan) : y adalah B'

### 2). Generalized Modus Tonon (GMT)

Dalil 1 (Pengetahuan) : Jika x adalah A maka y adalah B

Dalil 2 (Fakta) : y adalah B'

-----  
 Akibat (kesimpulan) : x adalah A'

Pernyataan “JIKA A MAKA B” dapat diubah menjadi sebuah relasi perkalian Kartesian kumpulan A dan B yaitu

$$R = A \times B \quad (17)$$

Sehingga jika terdapat keadaan baru A' maka untuk mendapatkan akibat B' dapat digunakan komposisi relasi :

$$B' = A' \circ R \quad (18)$$

Dimana :

R = fuzzy relation dari fuzzy implikasi “Jika A maka B”

o = operator komposisional

A' = data fuzzy, bisa berupa : “sangat A”, “lebih/kurang”, “bukan A” dll.

## D. Distribusi Pendekatan Perubahan Tipe Fungsi Keanggotaan.

Suatu tipe fungsi keanggotaan dapat diterjemahkan /dirubah menjadi fungsi keanggotaan dengan tipe yang berlainan. Fungsi akan berusaha menyesuaikan sehingga derajat keanggotaan  $\mu_F$  yang bernilai 0.5 akan menjadi titik penyeberangan (*crossover points*) antara tipe fungsi keanggotaan mula-mula dengan fungsi keanggotaan hasil perubahan.

Distribusi pendekatan perubahan fungsi keanggotaan tipe segitiga menjadi tipe lainnya dapat dilakukan dengan mendefinisikan terlebih dahulu beberapa persamaan sebagai berikut :

$$lftWaist = yWaist \times (inParams(2) - inParams(1)) + inParams(1) \quad (19)$$

$$lftShoulder = yShoulder \times (inParams(2) - inParams(1)) + inParams(1) \quad (20)$$

$$rtShoulder = (1 - yShoulder) \times (inParams(3) - inParams(2)) + inParams(2) \quad (21)$$

$$rtWaist = (1 - yWaist) \times (inParams(3) - inParams(2)) + inParams(2) \quad (22)$$

Dimana :

$$yWaist = 0.5$$

$$yShoulder = 0.9$$

inParams(1) = parameter pertama fungsi keanggotaan tipe segitiga yaitu a

inParams(2) = parameter kedua fungsi keanggotaan tipe segitiga yaitu b

inParams(3) = parameter ketiga fungsi keanggotaan tipe segitiga yaitu c

### 1). Perubahan Fungsi Segitiga menjadi Trapesium

Parameter fungsi keanggotaan tipe trapesium sebagai hasil distribusi pendekatan dari tipe segitiga dapat ditentukan sebagai berikut :

$$a = (2 \times (lftWaist)) - lftShoulder \quad (23)$$

$$b = lftShoulder \quad (24)$$

$$c = rtShoulder \quad (25)$$

$$d = (2 \times (rtWaist)) - rtShoulder \quad (26)$$

### 2). Perubahan Fungsi Segitiga menjadi GBell

Parameter fungsi keanggotaan tipe GBell sebagai hasil distribusi pendekatan dari tipe segitiga dapat ditentukan sebagai berikut :

$$a = \frac{rtShoulder + lftShoulder}{2} - lftWaist \quad (27)$$

$$b = 2 \times \frac{a}{(lftShoulder - lftWaist)} \quad (28)$$

$$c = \frac{rtShoulder + lftShoulder}{2} \quad (29)$$

### 3). Perubahan Fungsi Segitiga menjadi Gaussian

Parameter fungsi keanggotaan tipe Gaussian sebagai hasil distribusi pendekatan dari tipe segitiga dapat ditentukan sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{(rtWaist - (rtShoulder + lftShoulder)/2)}{\sqrt{(-2 \times \ln(yWaist))}} \quad (30)$$

$$c = \frac{(rtShoulder + lftShoulder)}{2} \quad (31)$$

4). Perubahan Fungsi Segitiga menjadi *Dsignoid*

Parameter fungsi keanggotaan tipe DSigmoid sebagai hasil distribusi pendekatan dari tipe segitiga dapat ditentukan sebagai berikut :

$$a = \frac{-1}{(lftShoulder - lftWaist)} \times \ln\left(\frac{1}{yShoulder} - 1\right) \quad (32)$$

$$b = lftWaist \quad (33)$$

$$c = \frac{1}{(rtShoulder - rtWaist)} \times \ln\left(\frac{1}{yShoulder} - 1\right) \quad (34)$$

$$d = rtWaist \quad (35)$$

5). Perubahan Fungsi Segitiga menjadi *Pi*

Parameter fungsi keanggotaan tipe Pi sebagai hasil distribusi pendekatan dari tipe segitiga dapat ditentukan sebagai berikut :

$$a = (2 \times (lftWaist)) - lftShoulder \quad (35)$$

$$b = lftShoulder \quad (36)$$

$$c = rtShoulder \quad (37)$$

$$d = (2 \times (rtWaist)) - rtShoulder \quad (38)$$

6). Perubahan Fungsi Trapezium menjadi *S*

Perubahan fungsi keanggotaan tipe trapesium menjadi tipe S dapat dilakukan dengan mendefinisikan beberapa persamaan sebagai berikut :

$$lftWaist = yWaist \times (\lnParams(2) - \lnParams(1)) + \lnParams(1) \quad (39)$$

$$lftShoulder = yShoulder \times (\lnParams(2) - \lnParams(1)) + \lnParams(1) \quad (40)$$

Dimana :

$$yWaist = 0.5$$

$$yShoulder = 0.9$$

$\lnParams(1)$  = parameter pertama fungsi keanggotaan tipe trapesium yaitu a

$\lnParams(2)$  = parameter kedua fungsi keanggotaan tipe trapesium yaitu b

Parameter fungsi keanggotaan tipe S hasil perubahan dari tipe trapesium ditentukan sebagai berikut :

$$a = (2 \times (lftWaist)) - lftShoulder \quad (41)$$

$$b = lftShoulder \quad (42)$$

7). Perubahan Fungsi Trapezium menjadi *Z*

Perubahan fungsi keanggotaan tipe trapesium menjadi tipe S dapat dilakukan dengan mendefinisikan beberapa persamaan sebagai berikut :

$$rtShoulder = (1 - yShoulder) \times (\lnParams(4) - \lnParams(3)) + \lnParams(3) \quad (43)$$

$$rtWaist = (1 - yWaist) \times (\lnParams(4) - \lnParams(3)) + \lnParams(3) \quad (44)$$

Dimana :

$$yWaist = 0.5$$

$$yShoulder = 0.9$$

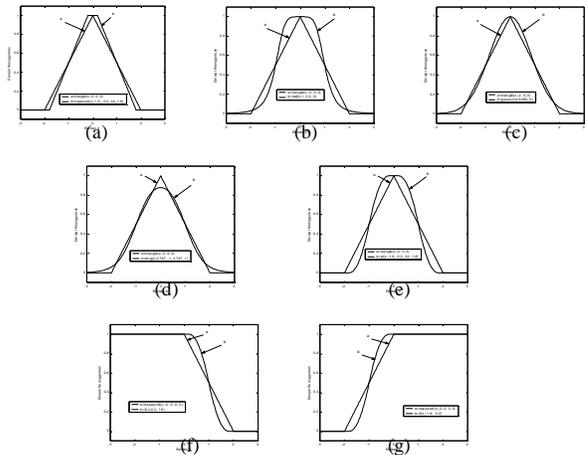
$\lnParams(3)$  = parameter ketiga fungsi keanggotaan tipe trapesium yaitu c

$\lnParams(4)$  = parameter ketiga fungsi keanggotaan tipe trapesium yaitu d

Parameter fungsi keanggotaan tipe Z hasil distribusi pendekatan dari tipe trapesium ditentukan sebagai berikut:

$$a = rtShoulder \quad (45)$$

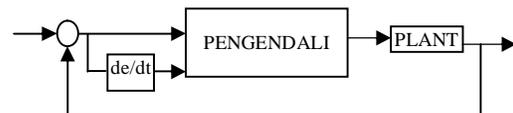
$$b = (2 \times (rtWaist)) - rtShoulder \quad (46)$$



Gb. 2 Distribusi pendekatan tipe fungsi keanggotaan : (a) Tipe Segitiga menjadi tipe Trapezium, (b) tipe Segitiga menjadi Tipe Gbell, (c) Tipe Segitiga menjadi tipe Gaussian, (d) Tipe Segitiga menjadi tipe DSigmoid, (e) Tipe Trapezium menjadi tipe S, (h) Tipe Trapezium menjadi tipe Z

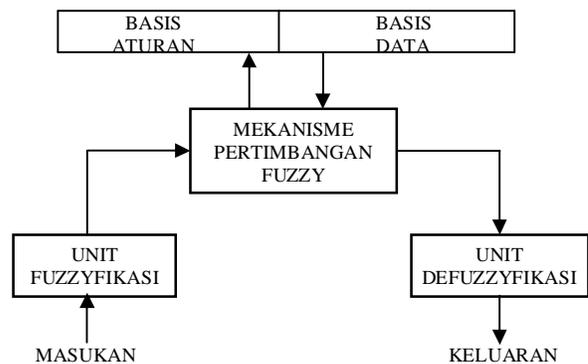
E. Pengendali Logika fuzzy

Untuk suatu pengendali logika fuzzy dalam sistem kalang tertutup dirunjukkan pada blok diagram gambar 3.



Gb. 3 Fuzzy Logic Controller pada sistem close loop

Struktur pengendali logika fuzzy (*fuzzy logic controller*) biasanya terdiri dari empat bagian utama seperti ditunjukkan pada diagram blok gambar 4.



Gb. 4 Blok diagram mekanisme pertimbangan fuzzy.

1). Unit *Fuzzyfikasi*

Unit *fuzzyfikasi* berfungsi untuk memetakan data masukan (input yang diukur) menjadi harga fuzzy dari beberapa harga variabel linguistik masukan, yang digunakan oleh mekanisme pertimbangan fuzzy. Data masukan yang teramati dalam proses kontrol berupa data tegas (*crisp*)

2). Basis Pengetahuan

Basis pengetahuan merupakan kumpulan dari aturan kontrol ahli yang dibutuhkan untuk mencapai tujuan kontrol. Basis pengetahuan terdiri dari basis data dan basis aturan. Basis data berisikan data fungsi keanggotaan, jangkauan masukan dan keluaran, faktor skala dari masukan dan keluaran serta semesta pembicaraan. Basis aturan berisikan aturan-aturan yang merepresentasikan keahlian manusia dalam mengatur sistem. Aturan inilah yang menghubungkan himpunan masukan dan himpunan keluaran.

3). Mekanisme Pertimbangan Fuzzy

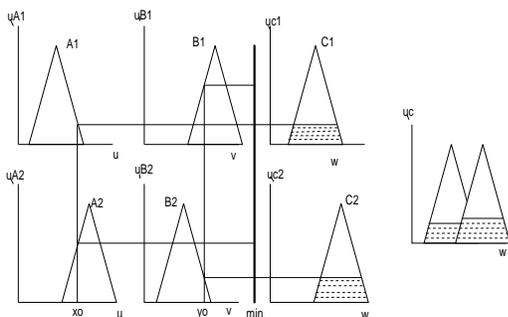
Menampilkan bermacam-macam operasi logika fuzzy selanjutnya mengambil keputusan mengenai aksi kendali fuzzy yang tepat untuk diterapkan. Mekanisme pertimbangan fuzzy ini didasarkan pada basis pengetahuannya. Teknik pengambilan keputusan yang sering digunakan adalah metode MAX-MIN dan metode MAX-DOT.

**Metode MAX-MIN**

Pada metode MAX-MIN, pengambilan keputusan didasarkan pada aturan operasi menurut Mamdani. Keputusan yang diambil berdasarkan aturan ke *i* dapat dinyatakan dengan  $\alpha_i \wedge \mu_{Ci}(w)$ , sehingga keanggotaan *C* adalah titik yang diberikan oleh :

$$\mu_C(w) = (\alpha_1 \wedge \mu_{C1}(w)) \vee ((\alpha_2 \wedge \mu_{C2}(w))) \quad (47)$$

Proses pengambilan keputusan MAX-MIN dapat dilukiskan seperti pada gambar 5



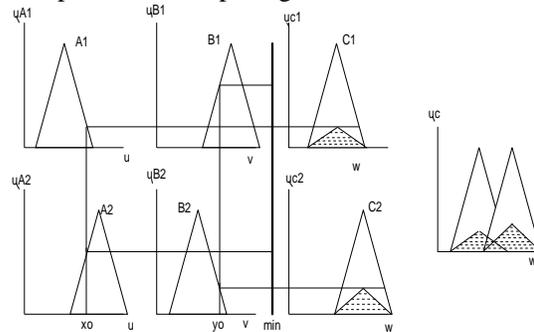
Gb. 5 MAX-MIN fuzzy inferensi

**Metode MAX-DOT**

Pada metode MAX-DOT pengambilan keputusan didasarkan pada aturan operasi perkalian Larsen. Keputusan yang diambil berdasarkan aturan ke *i* dapat dinyatakan dengan  $\alpha_i \cdot \mu_{Ci}(w)$  sehingga keanggotaan *C* adalah titik-titik yang diberikan oleh :

$$\mu_C(w) = (\alpha_1 \cdot \mu_{C1}(w)) \vee ((\alpha_2 \cdot \mu_{C2}(w))) \quad (48)$$

Proses pengambilan keputusan dengan metode MAX-DOT dapat dilukiskan pada gambar 6



Gb. 6 MAX-DOT fuzzy inferensi

4). Unit *Defuzzyfikasi*

Defuzzyfikasi merupakan proses perubahan aksi kendali fuzzy menjadi aksi kendali non fuzzy (*crisp*/data tegas). Tindakan kontrol fuzzy yang telah disimpulkan dirubah ke dalam nilai kontrol tegas yang dikehendaki untuk mengendalikan proses.

Teknik defuzzyfikasi yang sering digunakan antara lain :

**Metode Mean of Maximum (MOM)**

Pada metode rata – rata maksimum semua kendali yang mempunyai fungsi nilai maksimum dicari harga rata – ratanya. Dalam bentuk diskrit metode ini dinyatakan :

$$w_o = \sum_{j=1}^i (W_j / j) \quad (49)$$

dimana  $w_o = \max \mu_w (W)$ ;

$$w = W$$

*j* = jumlah fungsi keanggotaan mencapai harga maksimum.

**Metode Center of Area (COA)**

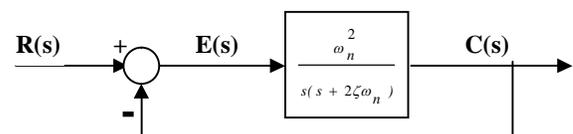
Metode COA (*Center of Area*) atau metode titik berat ini menghasilkan titik berat dari daerah distribusi kemungkinan aksi kendali fuzzy. Dalam bentuk diskrit metode ini dinyatakan :

$$w_o = \frac{\sum_{k=1}^n W_k \mu_w (W_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_w (W_k)} \quad (50)$$

dimana *m* adalah jumlah level kuantisasi dari keluaran.

F. Sistem Orde Dua

Diagram blok sistem orde dua seperti gambar 7.



Gb. 7 Sistem Orde Dua

Hubungan antara masukan dan keluaran diberikan oleh persamaan 2.51

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (51)$$

Jika  $0 < \zeta < 1$  maka kutub loop tertutup merupakan konjugat kompleks dan berada pada setengah sebelah kiri bidang s. Pada kondisi ini sistem dikatakan dalam peredaman (*under damp*) dan tanggapan transient akan beresilasi. Jika  $\zeta = 1$  sistem dikatakan teredam kritis (*critical damp*). Sistem atas redaman (*over damp*) terjadi jika  $\zeta > 1$ .

G. Spesifikasi Performansi Sistem

Spesifikasi performansi dapat diberikan dalam bentuk perilaku tanggapan transien terhadap masukan tertentu dalam bentuk indeks performansi.

1). Karakteristik Tanggapan Transient

Karakteristik kinerja suatu sistem kendali dapat dinyatakan dalam bentuk respon peralihan (*transient*) terhadap masukan tangga satuan (*unit step*). Beberapa parameter yang dapat ditentukan antara lain adalah :

Waktu tunda ( $t_d$ )

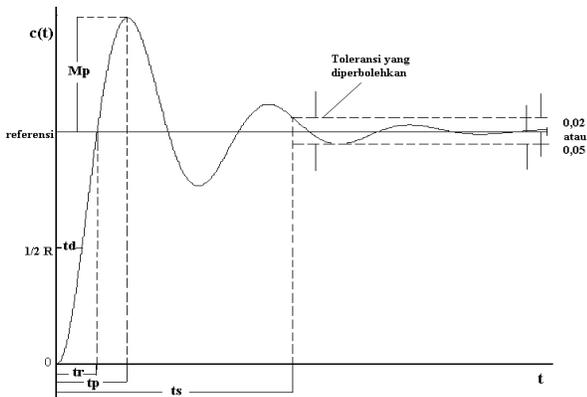
Waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai setengah nilai akhir untuk waktu yang pertama.

Waktu naik ( $t_r$ )

Waktu yang diperlukan tanggapan untuk naik dari 10% hingga 90%, 5% menjadi 95% atau 0% menjadi 100 % dari nilai akhir.

Waktu puncak ( $t_p$ )

Waktu yang diperlukan oleh tanggapan untuk mencapai puncak pertama overshoot.



Gb. 8 Kurva tanggapan sistem masukan tangga

Overshoot maksimum ( $M_p$ )

Persentase harga puncak maksimum kurva tanggapan terhadap harga pada keadaan tunaknya.

$$\text{Maksimum overshoot} = \frac{C(t_p) - C(n)}{C(n)} \times 100\% \quad (52)$$

$C(t_p)$  = harga puncak maksimum

$C(n)$  = harga pada keadaan tunak

Waktu turun ( $t_s$ )

Waktu yang diperlukan kurva respon untuk menetap disekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari harga akhir (biasanya 5% atau 2%).

Osilasi (*Oscillation*)

Menunjukkan jumlah periode gelombang osilasi yang terjadi.

(2). Indeks Performansi Kesalahan

Indeks performansi adalah angka yang menunjukkan “kebaikan” performansi sistem. Sistem kontrol dianggap optimal jika harga-harga parameter dipilih sedemikian rupa sehingga indeks performansi yang dipilih minimum atau maksimum. Beberapa indeks performansi kesalahan yaitu:

Kriteria Integral Kuadrat Kesalahan

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (53)$$

Kriteria Integral Waktu kali Kuadrat Kesalahan

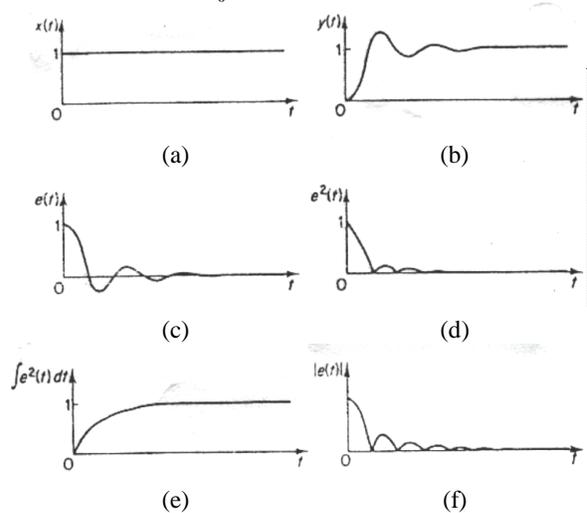
$$ITSE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (54)$$

Kriteria Integral Harga Mutlak Kesalahan

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (55)$$

Kriteria Integral Waktu kali Harga Mutlak Kesalahan

$$IAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (56)$$



Gb. 9 Kurva-kurva sebagai fungsi dari t: (a)Keluaran yang diinginkan x(t); (b) Keluaran sebenarnya; (c) Kesalahan e(t);(d) Kuadrat kesalahan;(e) Integral kuadrat kesalahan;(f) Harga mutlak kesalahan.

### III. PERANCANGAN SISTEM PENGENDALI LOGIKA FUZZY

Pada perancangan ini memanfaatkan aplikasi program bantu MATLAB dengan menggunakan beberapa sub program, yaitu *MATLAB Command Window*, *MATLAB Editor/Debugger*, *FIS Editor* dan *Simulink*.

#### 1). *MATLAB Command Window*

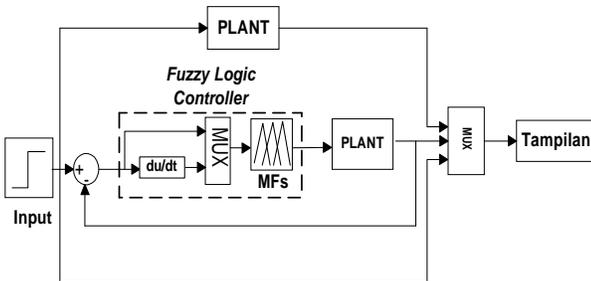
*MATLAB Command Window* digunakan untuk memanggil dan menjalankan hasil perancangan blok diagram dari *simulink* serta menampilkan hasil simulasi. Selain itu *MATLAB Command Window* juga berfungsi untuk memanggil tampilan dari *FIS Editor* dengan mengetikkan “ fuzzy ” pada bidang kerja. Hal ini diperlukan karena untuk menjalankan program pengendali logika fuzzy dengan menggunakan *Fuzzy Logic Toolbox*, parameter pengendali yang digunakan harus disimpan dalam *workspace*. Jika parameter yang dikehendaki telah disimpan dalam *workspace*, perintah selanjutnya adalah menjalankan program telah dibuat pada *MATLAB Editor/Debugger*.

#### 2). *MATLAB Editor/Debugger*

*MATLAB Editor/Debugger* digunakan untuk merancang program yaitu berupa program untuk memanggil dan menjalankan *simulink* dan program untuk menampilkan kurva tanggapan sistem dari hasil simulasi serta program untuk membuat tampilan demo.

#### 3). *MATLAB Simulink*

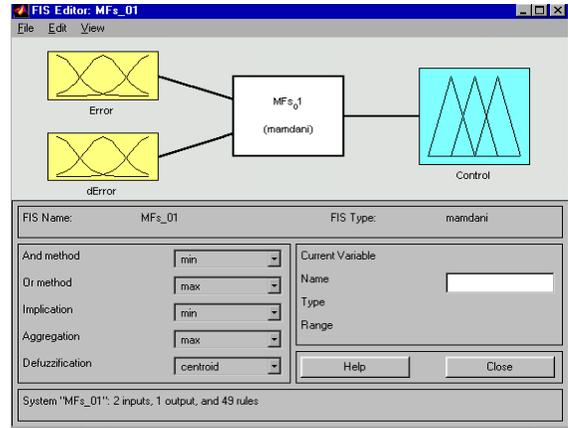
*MATLAB Simulink* digunakan untuk perancangan pengendali logika fuzzy dengan menyusun blok-blok diagram dari gambar penyusunnya sebagai satu kesatuan gambar yang saling terkait untuk membentuk suatu pengendali kalang tertutup.



Gb. 10. Blok diagram pengendali logika fuzzy pada simulink

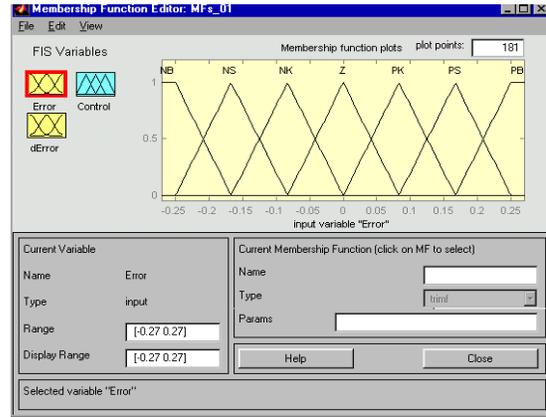
#### 4). *FIS Editor*

*FIS Editor* merupakan bagian dari *Fuzzy Logic Toolbox* digunakan untuk menentukan tipe fungsi keanggotaan yang digunakan, memasukkan dan merubah skala parameter fungsi keanggotaan serta untuk menentukan aturan/*rules* yang dipakai sebagai aturan parameter pengendali. Proses pengambilan keputusan dengan menggunakan metode MAX-MIN dan proses defuzzifikasi dengan menggunakan metode *Centroid* atau *Center of Area (COA)*



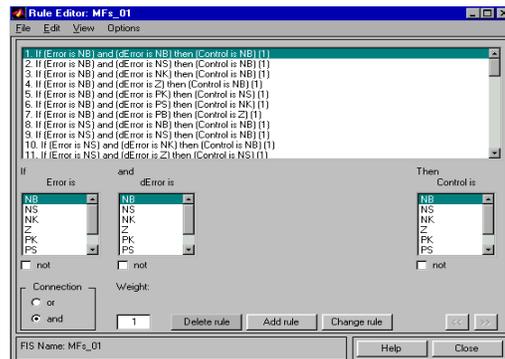
Gb. 11. Tampilan utama dari *FIS Editor* dengan parameter MFs\_01

Bagian kedua yang digunakan dari *FIS Editor* adalah *Membership Function Editor* Pada bagian ini digunakan untuk menentukan fungsi keanggotaan yang digunakan, jumlah variabel fungsi keanggotaan, serta untuk merubah skala parameter yang diinginkan.



Gb. 12. Tampilan *Membership Function Editor* pada *Fis Editor*

Tampilan ketiga dari *FIS Editor* adalah *Editor Rules* seperti terlihat pada gambar 13 yang digunakan untuk memasukkan aturan yang dipakai dalam perancangan pengendali logika fuzzy. Pada gambar 13 tersebut merupakan contoh aturan dari parameter MFs\_01 yang berisi 49 buah aturan.



Gb. 13. Tampilan *Editor Rules* pada *FIS Editor*

A. Perancangan Fungsi Keanggotaan

Tipe fungsi keanggotaan yang digunakan meliputi *Triangular MF*, *Trapezoidal MF*, *Generalized Bell MF*, *Gaussian MF*, *DSigmoidal MF*, *Pi MF*, *S MF* dan *Z MF* dengan jumlah variabel fungsi keanggotaan tujuh. Sebagai acuan digunakan fungsi keanggotaan tipe segitiga pada penskalaan awal serta pada penskalaan yang menghasilkan respon sistem yang baik, sedangkan fungsi keanggotaan tipe lainnya merupakan hasil distribusi pendekatan dari fungsi keanggotaan tipe segitiga tersebut pada penskalaan yang bersesuaian. Pada bagian masukan (*Error* dan *dError*) dan keluaran (*Control*) menggunakan tipe fungsi keanggotaan yang sejenis tanpa kombinasi.

B. Perancangan Aturan-Aturan

Pada bagian rules berisikan aturan-aturan yang menghubungkan parameter masukan yaitu *Error* dan *delta Error* dengan parameter keluaran yaitu *Control* yang selanjutnya digunakan untuk mengendalikan plant. Metode yang digunakan untuk perancangan aturan/rules adalah metode Mamdani. Aturan-aturan yang dipakai pada perancangan ini adalah aturan yang bersifat linier dan jumlahnya 49 buah. Aturan-aturan tersebut disusun seperti tabel berikut:

TABEL I  
ATURAN PENGENDALI LOGIKA FUZZY

<i>dError</i> <i>Error</i>	NB	NS	NK	Z	PK	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NS	NK	Z
NS	NB	NB	NB	NS	NK	Z	PK
NK	NB	NB	NS	NK	Z	PK	PS
Z	NB	NS	NK	Z	PK	PS	PB
PK	NS	NK	Z	PK	PS	PB	PB
PS	NK	Z	PK	PS	PB	PB	PB
PB	Z	PK	PS	PB	PB	PB	PB

C. Perancangan Plant

Plant yang digunakan berupa plant sample yang mewakili sistem orde dua yang diwakili oleh perubahan rasio redaman ( $\zeta$ ). Secara lengkap perancangan plant tersebut ditunjukkan seperti berikut:

1). Plant *under damping*

Plant *under damping* yang digunakan sebanyak tiga buah, yaitu :

a. 
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{25}{(s^2 + s + 25)}$$

- Rasio redaman ( $\zeta$ ) = 0,1
- Frekuensi alami tak teredam  $\omega_n = 5$ .

b. 
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{25}{(s^2 + 5s + 25)}$$

- Rasio redaman ( $\zeta$ ) = 0,5
- Frekuensi alami tak teredam  $\omega_n = 5$ .

c. 
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{25}{(s^2 + 9s + 25)}$$

- Rasio redaman ( $\zeta$ ) = 0,9
- Frekuensi alami tak teredam  $\omega_n = 5$ .

2). Plant *critical damping*

Plant *critical damping* yang digunakan hanya satu buah, yaitu :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{25}{(s^2 + 10s + 25)}$$

- Rasio redaman ( $\zeta$ ) = 1
- Frekuensi alami tak teredam  $\omega_n = 5$ .

3). Plant *over damping*

Plant *over damping* yang digunakan sebanyak tiga buah, yaitu :

a. 
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{25}{(s^2 + 30s + 25)}$$

- Rasio redaman ( $\zeta$ ) = 3
- Frekuensi alami tak teredam  $\omega_n = 5$ .

b. 
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{25}{(s^2 + 50s + 25)}$$

- Rasio redaman ( $\zeta$ ) = 5
- Frekuensi alami tak teredam  $\omega_n = 5$ .

c. 
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{25}{(s^2 + 70s + 25)}$$

- Rasio redaman ( $\zeta$ ) = 7
- Frekuensi alami tak teredam  $\omega_n = 5$ .

D. Perancangan Tampilan

Keluaran pengendali logika fuzzy ditampilkan dalam bentuk kurva tanggapan waktu (*respon time*). Pada bagian tampilan terdiri dari enam buah gambar, yaitu kurva tanggapan waktu untuk fungsi keanggotaan tipe segitiga, tipe trapesium, tipe *Generalized Bell*, tipe *Gaussian*, tipe *DSigmoid* dan tipe *Pi*. Analisa pengaruh perbedaan tipe fungsi keanggotaan pengendali logika fuzzy didasarkan pada waktu tunda ( $t_d$ ), waktu naik ( $t_r$ ), waktu puncak ( $t_p$ ), waktu penetapan ( $t_s$ ), lonjakan maksimum ( $M_p$ ), kesalahan keadaan tunak (*offset*) dan jumlah osilasi.

Tolok ukur penampilan dilihat berdasarkan nilai indeks performansi kesalahan yang meliputi kriteria integral kuadrat kesalahan (ISE), kriteria integral dari waktu kali kuadrat kesalahan (ITSE), kriteria integral harga mutlak kesalahan (IAE) serta kriteria integral dari waktu kali harga mutlak kesalahan (ITAE).

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISA

Unjuk kerja sistem yang dicari dari hasil simulasi meliputi karakteristik tanggapan transien ( $t_d$ ,  $t_r$ ,  $t_p$ ,  $t_s$ ,  $M_p$ , offset dan osilasi) dan indeks performansi kesalahan (ISE, ITSE, IAE dan ITAE).

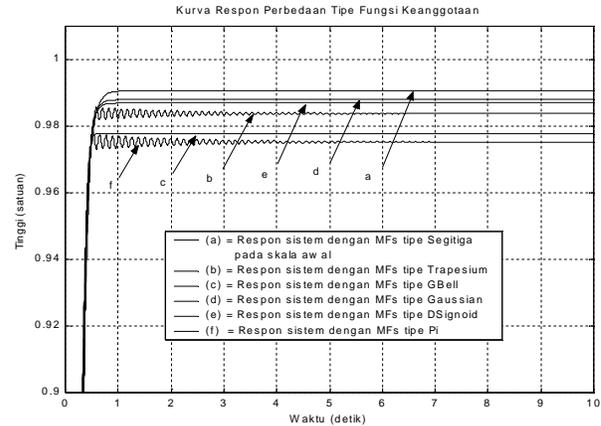
1). Karakteristik Tanggapan Transien

Pada salah satu hasil simulasi untuk plant under damping dengan rasio redaman ( $\zeta=0,1$ ) ditunjukkan pada tabel II. MFs\_01 merupakan fungsi keanggotaan tipe segitiga pada penskalaan awal, sedangkan pelebaran skala PS dan NS pd E, pelebaran skala PB dan NB pd E, pelebaran skala Z pd dE, pelebaran sisi luar skala PK dan NK pd dE serta penyempitan skala Z pd E secara berurutan ditunjukkan oleh MFs\_13, MFs\_19, MFs\_25, MFs\_31. Untuk fungsi keanggotaan tipe yang lain terletak dibawah tipe segitiga sesuai dengan penskalaannya. Sebagai contoh tipe trapezium pd penskalaan awal adalah MFs\_02, tipe trapezium dengan pelebaran skala PS dan NS pd E adalah MFs\_08 dan seterusnya.

TABEL II  
KARAKTERISTIK TANGGAPAN TRANSIEN PADA PLANT UNDER DAMPING DENGAN  $\zeta = 0,1$  DAN  $\omega_n = 5$

No	Parameter (MF)	Tipe MF	Karakteristik respon transien dan respon keadaan tunak						
			$t_d$ (det)	$t_r$ (det)	$t_p$ (det)	$M_p$ (%)	$t_s$ (det)	Osilasi (kali)	Offset
1	MFs_01	Segitiga	0.174	1.119	-	0	0.476	-	-0.0094
2	MFs_02	Trapezium	0.178	0.555	0.587	0.193	0.448	>25	-0.0162
3	MFs_03	GBell	0.172	0.586	-	0	0.426	-	-0.0221
4	MFs_04	Gaussian	0.167	0.902	-	0	0.447	-	-0.0121
5	MFs_05	Disgnoid	0.167	1.025	-	0	0.443	-	-0.0130
6	MFs_06	Pi	0.181	0.497	0.528	0.307	0.433	>25	-0.0248
7	MFs_07	Segitiga	0.174	1.112	-	0	0.469	-	-0.0094
8	MFs_08	Trapezium	0.178	0.548	0.581	0.193	0.442	>25	-0.0162
9	MFs_09	GBell	0.172	0.576	-	0	0.417	-	-0.0221
10	MFs_10	Gaussian	0.167	0.893	-	0	0.436	-	-0.0121
11	MFs_11	Disgnoid	0.166	1.014	-	0	0.432	-	-0.0130
12	MFs_12	Pi	0.181	0.487	0.518	0.307	0.424	>25	-0.0248
13	MFs_13	Segitiga	0.174	1.106	-	0	0.462	-	-0.0094
14	MFs_14	Trapezium	0.178	0.541	0.573	0.193	0.434	>25	-0.0162
15	MFs_15	GBell	0.172	0.577	-	0	0.418	-	-0.0221
16	MFs_16	Gaussian	0.167	0.896	-	0	0.439	-	-0.0121
17	MFs_17	Disgnoid	0.167	1.017	-	0	0.434	-	-0.0130
18	MFs_18	Pi	0.181	0.488	0.519	0.307	0.425	>25	-0.0248
19	MFs_19	Segitiga	0.174	1.059	-	0	0.416	-	-0.0094
20	MFs_20	Trapezium	0.178	0.498	0.530	0.193	0.399	>25	-0.0162
21	MFs_21	GBell	0.171	0.534	-	0	0.387	-	-0.0221
22	MFs_22	Gaussian	0.167	0.857	-	0	0.400	-	-0.0121
23	MFs_23	Disgnoid	0.165	0.977	-	0	0.395	-	-0.0130
24	MFs_24	Pi	0.181	0.445	0.477	0.307	0.398	>25	-0.0248
25	MFs_25	Segitiga	0.172	1.105	-	0	0.461	-	-0.0094
26	MFs_26	Trapezium	0.177	0.544	0.576	0.193	0.437	>25	-0.0162
27	MFs_27	GBell	0.164	0.389	0.416	0.376	0.363	1/2	-0.0430
28	MFs_28	Gaussian	0.163	0.961	-	0	0.463	-	-0.0094
29	MFs_29	Disgnoid	0.150	0.919	-	0	0.402	-	-0.0130
30	MFs_30	Pi	0.180	0.485	0.516	0.307	0.422	>25	-0.0248
31	MFs_31	Segitiga	0.175	0.439	0.454	0.251	0.418	1/2	-0.0060
32	MFs_32	Trapezium	0.179	0.452	0.464	0.393	0.429	>25	-0.0087
33	MFs_33	GBell	0.175	0.452	0.466	0.252	0.428	1/2	-0.0076
34	MFs_34	Gaussian	0.168	0.433	0.447	0.211	0.409	1/2	-0.0067
35	MFs_35	Disgnoid	0.167	0.431	0.445	0.221	0.408	1/2	-0.0071
36	MFs_36	Pi	0.184	0.471	0.487	0.444	0.447	>25	-0.0039

Dari tabel II terlihat bahwa tipe segitiga menghasilkan offset paling kecil dibandingkan tipe lain pada penskalaan yang bersesuaian. Namun hal ini disertai dengan respon waktu yang besar/lama. Perbandingan kurva untuk MFs\_01, MFs\_02, MFs\_03, MFs\_04, MFs\_05 dan MFs\_06 ditunjukan gambar 14.



Gb. 14 Perbandingan kurva tanggapan transien

2). Indeks Performansi Kesalahan

Perbedaan nilai indeks performansi kesalahan untuk tabel 4.1 ditunjukkan pada tabel III. Berdasarkan berbagai kriteria yang terdapat pada indeks performansi kesalahan (ISE, ITSE, IAE dan ITAE), fungsi keanggotaan tipe segitiga menghasilkan respon sistem yang lebih optimal jika dibandingkan tipe lainnya dengan ditandai nilai indeks performansi kesalahan yang paling kecil. Respon paling optimal pada fungsi keanggoaan tipe segitiga diperoleh dengan penyempitan skala Z pada E (MFs\_31).

TABEL III  
INDEKS PERFORMANSI KESALAHAN PADA PLANT UNDER DAMPING DENGAN  $\zeta = 0,1$  DAN  $\omega_n = 5$

No	Parameter (MF)	Tipe MF	Indeks Performansi Kesalahan			
			(ISE)	(ITSE)	(IAE)	(ITAE)
1	MFs_01	Segitiga	8.8530e-004	0.0044	0.0941	0.4705
2	MFs_02	Segitiga	8.8530e-004	0.0044	0.0941	0.4705
3	MFs_03	Segitiga	8.8530e-004	0.0044	0.0941	0.4705
4	MFs_19	Segitiga	8.8530e-004	0.0044	0.0941	0.4705
5	MFs_25	Segitiga	8.8530e-004	0.0044	0.0941	0.4705
6	MFs_31	Segitiga	3.6169e-004	0.0018	0.0601	0.3007
7	MFs_02	Trapezium	0.0026	0.0131	0.1619	0.8097
8	MFs_08	Trapezium	0.0026	0.0131	0.1619	0.8094
9	MFs_14	Trapezium	0.0026	0.0131	0.1618	0.8091
10	MFs_20	Trapezium	0.0026	0.0131	0.1619	0.8093
11	MFs_26	Trapezium	0.0026	0.0131	0.1619	0.8093
12	MFs_32	Trapezium	7.6530e-004	0.0038	0.0875	0.4374
13	MFs_03	GBell	0.0049	0.0244	0.2210	1.1051
14	MFs_09	GBell	0.0049	0.0244	0.2210	1.1051
15	MFs_15	GBell	0.0049	0.0244	0.2210	1.1051
16	MFs_21	GBell	0.0049	0.0244	0.2210	1.1051
17	MFs_27	GBell	0.0185	0.0926	0.4303	2.1514
18	MFs_33	GBell	5.7970e-004	0.0029	0.0761	0.3807
19	MFs_04	Gaussian	0.0015	0.0073	0.1206	0.6031
20	MFs_10	Gaussian	0.0015	0.0073	0.1206	0.6032
21	MFs_16	Gaussian	0.0015	0.0073	0.1206	0.6032
22	MFs_22	Gaussian	0.0015	0.0073	0.1206	0.6032
23	MFs_28	Gaussian	9.2474e-004	0.0046	0.0962	0.4808
24	MFs_34	Gaussian	4.5119e-004	0.0023	0.0672	0.3359
25	MFs_05	Disgnoid	0.0017	0.0085	0.1304	0.6518
26	MFs_11	Disgnoid	0.0017	0.0085	0.1304	0.6518
27	MFs_17	Disgnoid	0.0017	0.0085	0.1304	0.6518
28	MFs_23	Disgnoid	0.0017	0.0085	0.1304	0.6518
29	MFs_29	Disgnoid	0.0017	0.0087	0.1322	0.6612
30	MFs_35	Disgnoid	5.0228e-004	0.0025	0.0709	0.3544
31	MFs_06	Pi	0.0061	0.0307	0.2479	1.2397
32	MFs_12	Pi	0.0061	0.0307	0.2479	1.2397
33	MFs_18	Pi	0.0061	0.0307	0.2479	1.2397
34	MFs_24	Pi	0.0061	0.0307	0.2476	1.2379
35	MFs_30	Pi	0.0061	0.0307	0.2476	1.2396
36	MFs_36	Pi	7.8434e-004	0.0039	0.0886	0.4428

## V. PENUTUP

### A. Kesimpulan

1. Perbedaan penggunaan tipe fungsi keanggotaan pada pengendali logika fuzzy dengan menggunakan plant sampel orde dua untuk sistem *under damping*, *critical damping*, dan *over damping* dengan perubahan rasio redaman ( $\zeta$ ) mempengaruhi karakteristik tanggapan sistem, baik tanggapan peralihan maupun tanggapan tunak, tetapi tidak dapat menghilangkan kesalahan tunak (*error steady state*).
2. Berdasarkan karakteristik tanggapan peralihan, pada plant orde dua menggunakan plant sampel dengan perubahan rasio redaman ( $\zeta$ ), fungsi keanggotaan tipe trapesium dan tipe Pi paling baik digunakan untuk sistem *over damping*, karena pada sistem *under damping* dan *critical damping* menyebabkan sistem berosilasi dalam jumlah yang besar.
3. Berdasarkan kriteria *Integral Square Error* (ISE), *Integral Time Square Error* (ITSE), *Integral Absolute Error* (IAE) dan *Integral Time Absolute Error* (ITAE) yang terdapat pada indeks performansi kesalahan, fungsi keanggotaan tipe segitiga menghasilkan respon sistem yang lebih optimal jika dibandingkan tipe Trapesium, *GBell*, *Gaussian*, *Dsignoid*, serta tipe *Pi* dengan ditandai nilai indeks performansi kesalahan minimal.

### B. Saran

1. Untuk mencari kemungkinan hasil yang lebih optimal, dapat dilakukan dengan kombinasi penskalaan (*scaling*) pada masing-masing tipe fungsi keanggotaan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. A. Kandel, editor. *Fuzzy set and System*, CRC press, Inc, Boca Raton, FL, 1992.
- [2]. Barrie W. Jervis, Emmanuel C. Ifeachor, *Digital Signal Processing*, Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [3]. Bout Kosko, *Fuzzy Engineering*, Prentice-Hall, Inc 1997.
- [4]. C.C. Lee, *Fuzzy Logic In Control System: Fuzzy Logic Controller-Part 1*. IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics, 20(2):404-418, 1990.
- [5]. C.C. Lee, *Fuzzy Logic In Control System: Fuzzy Logic Controller-Part 2*. IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics, 20(2):419-435, 1990.
- [6]. Charles L. Philips, H. Troy Nagle, *Digital Control System Analysis and Design*, Prentice-Hall International, Inc, 1990.
- [7]. David K. Cheng, *Analisa Sistem Linear*, edisi Indonesia, Aksara Persada Press, Bandung, 1995.

- [8]. Duane Hanselman, Bruce Littlefield, *The Student Edition of MATLAB*, Prentice-Hall, Inc, 1995.
- [9]. Dubois D, H. Prade, *Fuzzy Sets and System : Theory and Application*, Academic Press, New York, 1980.
- [10]. I.J. Nagrath, M Gopal, *Control System Engineering*, Second Edition, Mc Graw Hill, 1995.
- [11]. J.S.R. Lang, C.T. Sun, E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall International, Inc, 1997.
- [12]. Katsuhiko Ogata, *Teknik Kontrol Automatik*, edisi kedua, Jilid 1, Erlangga, Jakarta, 1997.
- [13]. Li-Xin Wang, *A course In Fuzzy System and Control*, Prentice Hall International, Inc, 1997.
- [14]. Lotfy A. Zadeh, *Fuzzy Logic, Neural Network and Soft Computing*. One Page Announcement of CS 294-4, Spring 1993, the University of California at Berkeley, November 1992.
- [15]. Mamdani, E.H. and Gaines, B.R., *Fuzzy Reasoning and its Application*, London Academic, 1981.
- [16]. N. Gulley, J.S. Roger Jang, *Fuzzy Logic Toolbox*, Math Works Inc, 1995.
- [17]. Pedrycz, W., *Fuzzy Control and Fuzzy System*, John Wiley & Sons, 1989.
- [18]. Sugeno, M., *Industrial Application of Fuzzy Control*, Elsevier Science Pub. Co., 1985.
- [19]. Wahyu Ronika, *Pengaruh Penskalaan (Scaling) Parameter Pengendali Logika Fuzzy Terhadap Tanggapan Waktu Sistem*, Laporan Tugas Akhir 2001.
- [20]. Wang L.X., *Adaptive Fuzzy System and Control: Design and Stability Analysis*, Prentice Hall, 1994.
- [21]. Yager, R., "On a General Class of Fuzzy Connectives," *Fuzzy Set and System*, 1980.

**S U R A T N O**, pria kelahiran Grobogan 25 April 1978 ini walaupun sekilas kelihatan galak dan serius, namun sebenarnya adalah humoris. Jenjang pendidikan dasar dan menengah diselesaikan di kota tempat kelahirannya. Tahun 1996 beliau tercatat sebagai mahasiswa Teknik Elektro Universitas Diponegoro.

Mahasiswa yang sekaligus menjadi bapak bagi satu anak (*Ahmad Kayyis*) ini mengambil konsentrasi bidang teknik kontrol. Meskipun sempat terhenti cukup lama, akhirnya laporan Tugas Akhir yang bertema kontrol fuzzy dapat diselesaikannya juga. Semuanya berkat pertolongan Allah Swt semata. Hari Kamis 15 Agustus 2002 putra pertamanya genap berusia satu tahun. Mudah-mudahan menjadi anak yang shaleh. Amin. Tidak lupa beliau memohon do'a restu kepada rekan-rekan semua agar dalam ujian sarjana yang insya Allah sebentar lagi akan beliau hadapi diberikan kemudahan oleh Allah Swt. Amin.

Mengetahui dan mensahkan  
Pembimbing II Tugas Akhir

**(Aris Triwiyatno, S.T.)**