

**OPTIMALISASI UNJUK KERJA PLANT *TIME VARYING*  
MENGUNAKAN KENDALI FUZZY ADAPTIF DENGAN METODE SECARA  
TIDAK LANGSUNG ( Studi Kasus Pada Kontrol Level *Surge Tank* )**

**Akhmad Khumaeni**

**Sumardi**

**Iwan Setiawan**

Laboratorium Teknik Kontrol Otomatik  
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro  
**Jl. Prof. H. Soedarto SH. Tembalang Semarang**  
**Telepon : (024) 7460057, Fax : (024) 7460057 email: lab\_kontrol@elektro.undip.ac.id**

*Proses perancangan kendali fuzzy yang berdasarkan pada penggunaan informasi heuristik dari seorang ahli telah terbukti sukses dalam berbagai penerapan di bidang industri. Ada beberapa masalah serius yang ditemukan pada penerapan di bidang kontrol, antara lain : penentuan fungsi keanggotaan dan aturan dasar sistem dalam menemukan unjuk kerja sistem agar sesuai dengan setting point yang diinginkan, masih dilakukan dengan coba-coba (trial and error). Kedua, kendali fuzzy yang dibentuk berdasarkan pada sifat-sifat plant saja kurang sesuai dengan kebutuhan pengendalian plant tersebut, karena apabila terjadi perubahan parameter plant, atau jika ada beberapa gangguan dan pengaruh dari lingkungan sekitarnya menyebabkan pengontrolan tidak lagi sesuai untuk plant yang digunakan. Pendekatan kendali fuzzy adaptif dengan metode secara tidak langsung (indirect adaptive fuzzy control) mampu memberikan pengendalian dalam suatu perubahan dinamik proses sistem dan karakter sebuah gangguan dan plant tidak tentu (time varying), pendekatan kendali fuzzy adaptif metode secara tidak langsung menggunakan identifikasi secara on-line untuk mengestimasi parameter model plant, pengestimasi parameter model plant menggunakan metode Recursive Least Square (RLS). Kendali fuzzy adaptif dengan metode secara tidak langsung mampu melakukan pengontrolan terhadap plant surge tank ( plant time varying ) dengan nilai overshoot sebesar 3,1038 persen, nilai waktu naik sebesar 14,4 detik dan waktu penetapan sebesar 19,9 detik, untuk masukkan sinyal step, pengontrolan juga dilakukan untuk masukkan sinyal pulsa dan sembarang step dan didapatkan sistem mampu mengikuti referensi dengan baik.*

**Kata Kunci: Fuzzy, Adaptif, Recursive Least Square (RLS).**

## **1. PENDAHULUAN**

Proses perancangan kendali fuzzy yang berdasarkan pada penggunaan informasi heuristik dari seorang ahli telah terbukti sukses dalam berbagai penerapan di bidang industri. Ada beberapa masalah serius yang ditemukan pada penerapan di bidang kontrol, antara lain : Pertama, perancangan kendali fuzzy yang dibentuk berdasarkan sifat khusus sistemnya akan menyulitkan sekali dalam menentukan parameter pengontrol, sebagai contoh, penentuan fungsi keanggotaan dan aturan dasar sistem dalam menemukan unjuk kerja plant agar sesuai dengan setting point yang diinginkan, masih dilakukan dengan coba-coba (*trial and error*). Kedua, kendali fuzzy yang dibentuk berdasarkan pada sifat-sifat plant saja kurang sesuai dengan kebutuhan pengendalian plant tersebut, karena apabila terjadi perubahan parameter plant, atau jika ada beberapa gangguan dan pengaruh dari lingkungan sekitarnya menyebabkan pengontrolan tidak lagi sesuai untuk plant yang digunakan.

Pendekatan kendali fuzzy adaptif dengan metode secara tidak langsung (*indirect adaptive fuzzy control*) mampu memberikan pengendalian dalam suatu perubahan dinamik proses sistem dan karakter sebuah gangguan plant tidak tentu (*time varying*), pendekatan kendali fuzzy adaptif metode secara tidak langsung menggunakan identifikasi secara *on-line* untuk mengestimasi parameter model plant, dari parameter model plant tersebut digunakan oleh perancang kendali (*controller designer*) untuk menspesifikasikan parameter pengendali plant yang digunakan, sehingga kendali yang diumpankan ke plant sesuai pada saat keadaan parameter plant berubah, pengestimasi parameter model plant menggunakan metode *Recursive Least Square* (RLS). Kendali fuzzy adaptif dengan metode secara tidak langsung menyediakan pengestimasi parameter model plant yang berubah-ubah mampu memberikan kinerja sistem kendali yang memuaskan.

## 2. KONSEP DASAR FUZZY

Teori himpunan fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh Lotfi A Zadeh pada tahun 1965. Teori himpunan fuzzy adalah merupakan perluasan dari teori logika Boolean yang menyatakan tingkat angka 1 atau 0 atau pernyataan benar atau salah, sedang pada teori logika fuzzy terdapat tingkat nilai antara 1 dan 0 sebagai tingkat pernyataan kebenaran atau kesalahan.

### 2.1 Himpunan Fuzzy

Himpunan fuzzy adalah suatu himpunan dari prinsip-prinsip matematik untuk memodelkan informasi yang didasarkan pada tingkat keanggotaan (*membership grade*).

Suatu himpunan fuzzy  $F$  dalam semesta pembicaraan  $U$  dapat digambarkan oleh suatu fungsi keanggotaan (*membership function*)  $\mu_F$  yang mewakili nilai dalam interval  $[0,1]$  untuk tiap  $u$  dalam  $U$  dinyatakan dalam persamaan 2.1.

$$\mu_F = U \rightarrow [0, 1] \quad (2.1)$$

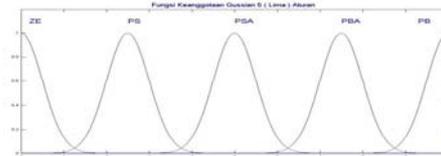
Yang digambarkan dalam bentuk Gambar 2.1 seperti berikut :



Gambar.2.1 Himpunan fuzzy dan fungsi keanggotaan.

### 2.2 Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan menyatakan derajat keanggotaan dari masing-masing anggota dalam semesta pembicaraan dan fungsi keanggotaan ini dapat didefinisikan dengan memakai dua cara yaitu dengan numerik dan dengan fungsional. Definisi numerik menyatakan fungsi keanggotaan himpunan fuzzy dalam sebuah vektor dimana dimensinya tergantung pada tingkat diskretisasi. Definisi fungsional mendefinisikan fungsi keanggotaan himpunan fuzzy dalam pernyataan analitik dimana tingkat keanggotaan masing-masing elemen dihitung di dalam semesta pembicaraan, dengan menggunakan fungsi keanggotaan Gaussian sebagai fungsi pemetaan fuzzy.

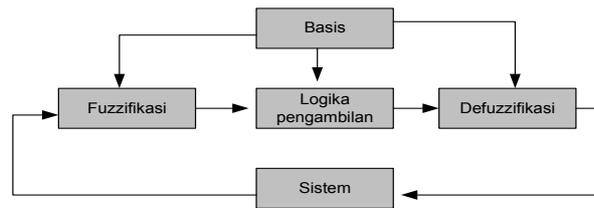


Gambar 2.2 Fungsi keanggotaan masukan fuzzy dengan lima fungsi Gaussian.

## 3. KONFIGURASI DASAR KENDALI LOGIKA FUZZY

Kendali fuzzy mempunyai empat komponen sebagaimana ditunjukkan Gambar 2.3 yaitu :

1. *Fuzifikasi* adalah proses modifikasi masukan tegas sehingga dapat diinterpretasikan dan dibandingkan dengan aturan – aturan dalam basis aturan.
2. Basis aturan atau “*rule base*” berisi pengetahuan dalam bentuk himpunan aturan, mengenai cara terbaik untuk mengontrol sistem.
3. Mekanisme pengambilan keputusan atau “*inference mechanism*” yaitu evaluasi terhadap aturan kontrol yang akan diterapkan bersesuaian dengan kondisi yang sedang berlangsung kemudian memutuskan input yang harus diumpangkan ke plant sebagai suatu aksi kontrol.
4. *Defuzifikasi* adalah proses pengubahan konklusi yang diambil dalam *inference mechanism* kedalam input plant berupa aksi pengendalian.

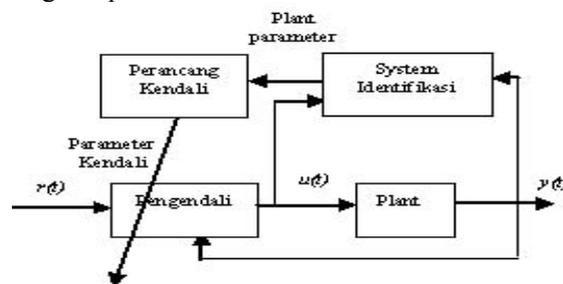


Gambar 3.1 Konfigurasi dasar kendali logika fuzzy.

#### 4. KENDALI FUZZY ADAPTIF METODE SECARA TIDAK LANGSUNG (INDIRECT ADAPTIVE FUZZY CONTROL)

Kendali fuzzy adaptif metode secara tidak langsung menggunakan sebuah model plant dan metode identifikasi sistem secara *on line* untuk mengestimasi parameter plant model, kemudian hasil parameter terestimasi digunakan oleh perancang kendali (*designer controller*) untuk menspesifikasikan parameter pada pengontrolnya, jika kondisi plant berubah maka pengidentifikasi akan mengestimasi parameter model plant dan perancang kendali (*controller designer*) akan terus menala (*tuning*) parameter pengontrolnya.

Kendali fuzzy adaptif metode secara tidak langsung (*Indirect fuzzy adaptive control*) mempunyai bentuk blok diagram pada Gambar 2.5.



Gambar 4.1 *Indirect adaptive control*.

Sifat yang melekat pada perancang kendali (*controller designer*) menganggap bahwa, plant model merepresentasikan sebagai plant secara sempurna, sehingga parameter plant yang digunakan oleh perancang kendali mampu secara sempurna menyediakan parameter pengontrolnya.

Pengidentifikasi secara *on line* dilakukan dengan menggunakan metode RLS, RLS digunakan untuk menala parameter plant model (dalam hal ini adalah fungsi *center* keanggotaan keluaran fuzzy).

#### 5. PERANCANGAN SISTEM FUZZY

Pada perancangan sistem fuzzy yang dipakai adalah memakai aturan sistem Takagi Sugeno fuzzy model, yang juga sebagai sistem pengidentifikasi dalam perancangan fuzzy adaptif yang dipakai, Takagi Sugeno memiliki aturan sistem fuzzy yang diberikan pada persamaan 5.1

$$\text{Jika } h(k) \text{ adalah } \tilde{A}_i \text{ maka } \tilde{h}_i(k+1) = \alpha_{i,1}h(k) + \beta_{i,1}u(k) \quad (5.1)$$

$h(k)$  adalah masukan sistem fuzzy dan juga sebagai keluaran sistem plant,  $u(k)$  adalah masukan sistem

plant,  $\tilde{A}_i$  adalah variabel linguistik, dan  $\tilde{h}_i(k+1)$  sebagai keluaran fuzzy dan juga sebagai

keluaran pengidentifikasi yang dipakai.

Dengan menggunakan fungsi keanggotaan masukan *Gaussian* sebagai fungsi pemetaan  $h(k)$  dipakai persamaan 5.2

$$\mu(h(k)) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{h(k) - c_i^i}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (5.2)$$

dan dengan menggunakan *center average* defuzzifikasi untuk sistem fuzzy yang dipakai adalah persamaan 5.3

$$\tilde{h}(k+1) = \theta^T \xi(h(k)) \tag{5.3}$$

$$\xi(h(k)) = \begin{bmatrix} h(k)\xi_{1.1} \\ h(k)\xi_{2.1} \\ \vdots \\ h(k)\xi_{R.1} \\ u(k)\xi_{1.1} \\ u(k)\xi_{2.1} \\ \vdots \\ u(k)\xi_{R.1} \end{bmatrix}, \quad \text{dan} \quad \theta = \begin{bmatrix} \alpha_{1.1} \\ \alpha_{2.1} \\ \vdots \\ \alpha_{R.1} \\ \beta_{1.1} \\ \beta_{2.1} \\ \vdots \\ \beta_{R.1} \end{bmatrix}$$

Pada bentuk desain kendali fuzzy adaptif metode secara tidak langsung terdapat blok identifikasi sistem yang didalamnya terjadi proses estimasi keluaran plant dan keluaran model, dan mekanisme estimasi yang dilakukan menggunakan RLS (*Recursive Least Square*).

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + P(k+1)\xi(h(k))(h(k+1) - (\xi(h(k)))^T \hat{\theta}(k)) \tag{5.4}$$

dimana gain adaptasi diperoleh secara rekursif dengan persamaan 5.5

$$P(k+1) = \frac{1}{\lambda} \left( I - \frac{P(k)\xi(h(k))\xi(h(k))^T}{\lambda I + \xi(h(k))^T P(k)\xi(h(k))} \right) P(k) \tag{5.5}$$

dengan  $\lambda$  disebut sebagai *forgetting factor* dengan besar nilai antara  $0 < \lambda \leq 1$ , dan pada awal perhitungan diberikan nilai inisial untuk masing-masing nilai awal  $\hat{\theta}(t)$  dan  $F(t)$ , dengan nilai  $F(t) = \alpha I$ ,  $\alpha$  adalah nilai bilangan yang besar positif (misal dipilih 2000), dan I adalah matrik identitas. Dan pada perancangan blok diagram sistem fuzzy (Gambar 4.1) dipakai aturan pengendali dengan menggunakan sistem aturan Takagi Sugeno pada persamaan 5.6

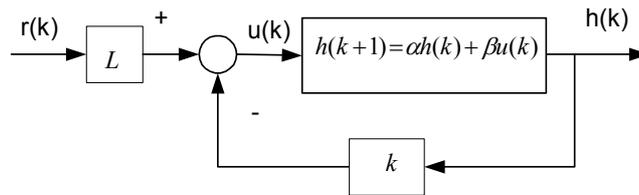
$$u(k) = \frac{\sum_{i=1}^R u_i(k) \mu_i}{\sum_{i=1}^R \mu_i} \tag{5.6}$$

$$u_i(k) = L_i(r(k), y(k)) = k_{i,0}r(k) - k_{i,1}y(k) \tag{5.7}$$

### 6. PERANCANGAN PENEMPATAN POLE

Konsep penempatan pole adalah mencari aturan umpan balik pada pole loop tertutup agar sesuai pada letak pole yang diinginkan. Sebagai sistem dinamik diberikan persamaan 6.1 dan diberikan ilustrasi gambar pada Gambar 6.1.

$$h(k+1) = \alpha h(k) + \beta u(k) \tag{6.1}$$



Gambar. 6.1 Struktur kanonikal R-S-T untuk pengontrol.

Sistem kalang tertutup dibentuk dengan membalikkan variabel keadaan dengan suatu matrik fungsi alih dengan konstana K dan matrik L, maka dari Gambar 6.1 diberikan persamaan 6.2.

$$u(k) = -Kh(k) + Lr(k) \quad (6.2)$$

dengan mensubstitusikan persamaan 6.2 ke persamaan 6.1 maka didapat persamaan 6.3

$$h(k+1) = \alpha h(k) + \beta(-Kh(k) + Lr(k)) \quad (6.3)$$

Dengan menerapkan persamaan 6.3 untuk sistem fuzzy yang dipakai dan mengangaap plant model sebagai pengidentifikasi yang akurat maka didapatkan persamaan sebagai persamaan 6.4.

$$\hat{h}_i(k+1) = h_i(k+1) = \alpha_{i,1} h_i(k) + \beta_{i,1} [k_{i,0} r(k) - k_{i,1} h_i(k)] \quad (6.4)$$

dengan mentransformasikan bentuk persamaan 6.4 maka didapatkan persamaan 6.5

$$\frac{H_i(z)}{R(z)} = \frac{\beta_{i,1} k_{i,0}}{z + \beta_{i,1} k_{i,1} - \alpha_{i,1}} \quad (6.5)$$

untuk menetapkan letak pole pada titik 0.1 maka dipilih persamaan 6.6

$$k_{i,1} \beta_{i,1} - \alpha_{i,1} = -0.1 \quad (6.6)$$

$$k_{i,1} = \frac{\alpha_{i,1} - 0.1}{\beta_{i,1}} \quad (6.7)$$

dengan nilai  $\beta_{i,1}$  lebih besar nol

Untuk menetapkan nilai *steady-state* error adalah nol maka  $h_i(k+1) = h_i(k) = r(k)$  dan dari persamaan 6.4 maka didapatkan persamaan berikut

$$1 = \alpha_{i,1} + \beta_{i,1} k_{i,0} - \beta_{i,1} k_{i,1} \quad (6.8)$$

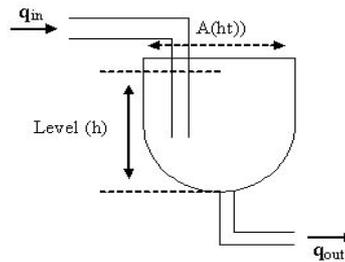
dan nilai  $k_{i,0}$  untuk perancang kendalinya adalah :

$$k_{i,0} = \frac{1 - \alpha_{i,1} + \beta_{i,1} k_{i,1}}{\beta_{i,1}} \quad (6.9)$$

## 7. STUDI KASUS PADA PLANT SURGE TANK

### 7.1 Karakteristik Plant Surge Tank

Sistem persamaan surge tank digambarkan sebagai sistem plant *time varying* dengan sistem plant adalah sistem tinggi muka carian, sistem dapat digambarkan sebagai Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Surge tank.

Persamaan plant surge tank memiliki persamaan sebagai berikut :

$$\frac{dh}{dt} = \frac{-A_o \sqrt{2gh}}{A(h)} + \frac{1}{A(h)} u(t) \quad (7.1)$$

Persamaan plant yang terbentuk disini adalah persamaan plant bentuk *time varying* karena dengan melihat bentuk parameter-parameter plant yang berubah-ubah terhadap waktu dan pada kasus ini perubahan  $A(h) = ah(t)^2 + b$  dengan a dan b adalah parameter plant yang ditentukan ada awal perhitungan.

## 7.2 Pengontrolan Level Surge Tank

Dengan menggunakan pendekatan metode Euler untuk menuliskan persamaan dalam simulasi diberikan persamaan

$$h(k+1) = h(k) + T \left[ \frac{-\sqrt{19,6h(k)}}{h^2(k)+2} + \frac{u(k)}{h^2(k)+2} \right] \quad (7.2)$$

dimana  $T = 0.1$

Pada perancangan nilai kontrol  $u(k)$  dapat bernilai positif atau negatif ( masukan air dapat bersifat mengalirkan air ke tank atau menyedot air yang ada dalam tank ), untuk besar kontrol yang diumpankan ke plant mempunyai nilai batas yaitu bernilai :

$$u(k) = \begin{cases} 50 & \text{jika } u(k) > 50 \\ u(k) & \text{jika } -50 \leq u(k) \leq 50 \\ -50 & \text{jika } u(k) < -50 \end{cases} \quad (7.3)$$

Perancangan sistem disini, dipilih level surge tank agar tidak bernilai negatif, maka dilakukan pembatasan nilai minimal level surge tank dipilih nilai 0.001 dan untuk mensimulasikan persamaan surge tank maka dipakai persamaan

$$h(k+1) = \max \left\{ 0.001, h(k) + T \left[ \frac{-\sqrt{19,6h(k)}}{h^2(k)+2} + \frac{u(k)}{h^2(k)+2} \right] \right\} \quad (7.4)$$

## 8 PENGUJIAN SIMULASI

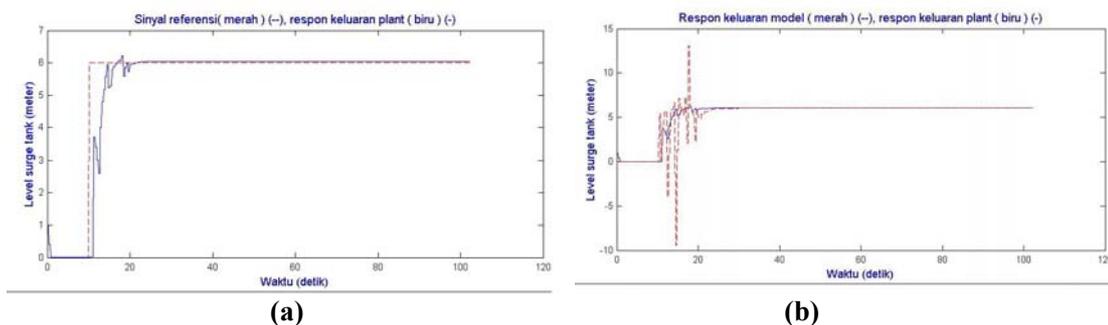
Pengujian simulasi bertujuan untuk menemukan hasil tracking keluaran level surge tank sesuai dengan sinyal referensi yang diberikan, penentuan parameter-parameter masukan ditentukan berdasarkan pada bentuk karakteristik plant yang digunakan, dan penentuan nilai parameter-parameter masukan sangat menentukan hasil tracking keluaran level surge tank.

Pada pengujian program simulasi, ada beberapa masukan yang dapat diubah, seperti keadaan tinggi level awal, besar gain adaptasi, dan batas nilai minimal beta, tapi dalam pengujian harus ditetapkan hanya satu variable masukan yang dapat diubah-ubah, ini dilakukan untuk menyederhanakan dan memudahkan pencapaian nilai keluaran level surge tank sesuai keinginan.

Percobaan dilakukan dengan menggunakan jumlah fungsi keanggotaan gaussian sejumlah lima ( menggunakan lima aturan fuzzy ), untuk lebih jelasnya data-data masukkan dapat dituliskan sebagai berikut :

1. Titik center Mf Gaussian = [0 2.5 5 7.5 10].
2. Theta awal = [0 2 4 6 8 10 12 14 16 18].
3. Gain adaptasi =  $2000 * I$ , I adalah matrik identitas  $10 \times 10$ .
4. Nilai minimal beta = 0.00018954.
5. Forgetting factor = 1 ( non weighted RLS ).
6. Waktu sampling = 0.1 detik.
7. Penempatan pole terdekat = 0.1 ( di koordinat z ).
8. Keadaan tinggi awal = 1 meter.
9. Parameter plant : a = 1, b = 2.

### 8.1 Pengujian untuk Referensi Sinyal Step

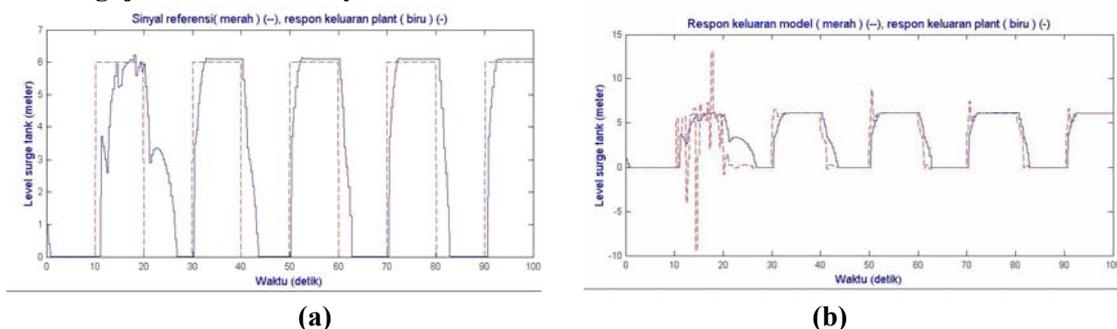


**Gambar 4.2 (a) Keluaran sinyal referensi dan keluaran level plant surge tank (b) keluaran respon plant model dan plant surge tank ( untuk referensi masukkan sinyal step )**

**Tabel 4.1 karakteristik respon transien**

No	Parameter	
3	Waktu puncak	18 detik
4	Lewatan maksimum	3,1038 persen
5	Waktu penetapan	19,9 detik

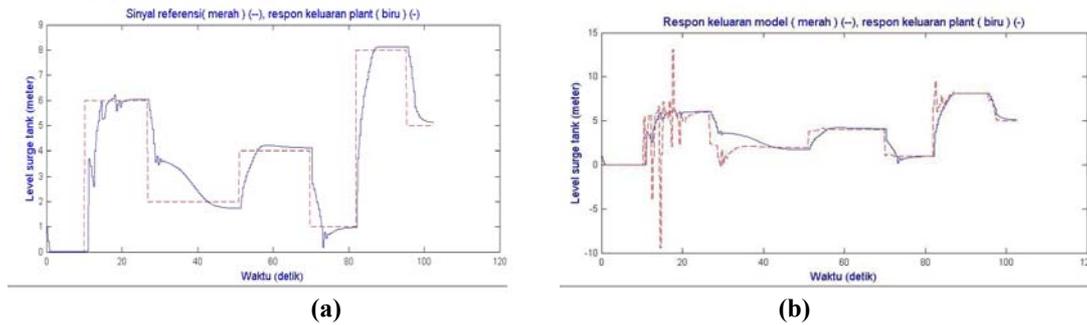
### 8.2 Pengujian Referensi Sinyal Pulsa



**Gambar 4.5 (a) Keluaran sinyal referensi dan keluaran level plant surge tank (b) Keluaran respon plant model dan plant surge tank ( untuk referensi masukkan sinyal pulsa ).**

Dari Gambar 4.5 terlihat bahwa keluaran surge tank berhasil menyesuaikan terhadap setting poin yang diberikan, meski pada awal periode pulsa keluaran surge tank terjadi lonjakan, ini dikarenakan kondisi plant belum teridentifikasi sempurna.

### 8.3 Pengujian Referensi Sembarang Step



**Gambar 4.8 (a) Keluaran sinyal referensi dan keluaran level plant surge tank (b) keluaran respon plant model dan plant surge tank (untuk referensi masukkan sembarang step ).**

Gambar 4.8 adalah pemberian sinyal sembarang step terhadap sistem, terlihat bahwa ternyata respon plant surge tank mampu mengikuti jejak referensi yang diberikan, pada kondisi ini sistem dalam keadaan teridentifikasi atau dapat terkontrol.

## 9. KESIMPULAN

Setelah melakukan serangkaian ujicoba serta pengujian terhadap perangkat lunak Fuzzy Adaptif dengan Metode *indirect* dalam pengontrolan *plant time varying* didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengkarakteristikan plant yang dipakai perlu dilakukan untuk membatasi aturan (kontrol) yang akan diterapkan pada plant tersebut, seperti menetapkan nilai awal parameter plant model dan besar penguatan yang akan diberikan.
2. Pengujian sistem dengan sinyal masukan berupa sinyal step didapatkan karakteristik respon transien, antara lain : waktu puncak sebesar 18 detik, lewatan maksimum sebesar 3.1038 persen, waktu penetapan sebesar 19,9 detik.
3. Pengujian sistem dengan masukan sinyal pulsa, didapatkan respon untuk periode pulsa pertama, respon sistem terjadi osilasi, sedang untuk periode pulsa kedua dan selanjutnya didapatkan respon dengan tidak terjadi osilasi yang besar.
4. Berdasarkan pengujian sistem dengan sinyal referensi sembarang, respon sistem mampu mengikuti referensi dengan baik.
5. Berdasarkan percobaan, hasil *tracking* keluaran level surge tank dipengaruhi oleh keluaran plant model identifikasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Astrom, Karl Johan, 1995, *Adaptive Control*, Lund Institute of Technology, Addison Wesley Publishing Company inc.
- Ioannou, Petros A, 1996, *Electrical Engineering-system*, University of Southern California, Jing Sun, Control sistem, Ford Scientific Research Laboratory, *Robust Adaptive Control*, Prentice-Hall International inc.
- Kuo, Benjamin C, 1995, *Teknik Kontrol Automatik*, PT Prenhallindo, Jakarta.
- Ogata, Katsuhiko, 1997, *Discrete-time Control system*, University of Minnesota, Prentice Hall, New Jersey.
- Palm III, William J., *Modeling, Analysis, and Control of Dynamic System*, University of Rhode Island, Jhon Willey & Sons, Inc.
- Paraskevopoulos, P. N., 1996, *Digital Control System*, Prentice-Hall Europe.
- Passino, M. Kevin and Steven Yurkovic, 1998, *Fuzzy Control*, Departement of Electricl Enggineering The Ohio State University, Addison Wesley Longman, Inc.
- Sumardi, ST. MT, , 2001, *Dasar-dasar kontrol logika fuzzy*, Materi pelatihan kontrol logika fuzzy, Jurusan Teknik Elektro, Undip.
- Tjokronegoro, Hariyono A., 1996, *Identifikasi Parameter Sistem*, Jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung.



Akhmad Khumaeni (L2F 098 582 )

Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang, mengambil konsentrasi di bidang kontrol, saat ini sedang menyelesaikan pendidikan S-1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro

Menyetujui / Mengesahkan :

Pembimbing I

Pembimbing II

Sumardi, ST. MT.  
NIP 132 125 670

Iwan Setiawan, ST. MT.  
NIP 132 283 183