

PENGENDALI LOGIKA FUZZY PADA MEKANISME GERAKAN LURUS PRESISI

Ilham Budi Santoso⁽¹⁾, Zainal Abidin⁽²⁾

(1) Progam Studi Teknik Sistem Mekanika-Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Pascasarjana –ITB

(2)Laboratorium Dinamika - PPAU Ilmu Rekayasa - ITB

email : ilham@dynamic.pauir.itb.ac.id

Telepon/Fax. (022) 2506283

Ringkasan

Dalam makalah ini dibahas tentang penerapan pengendali logika fuzzy pada mekanisme gerakan lurus presisi. Mekanisme gerakan lurus presisi yang merupakan sistem atur dalam penelitian ini merupakan mekanisme yang sengaja dibuat untuk mempelajari metode pemosisian presisi. Pada mekanisme ini penerapan pengendali PID (Proporsional, Integral, dan Derivative) konvensional tidak akan dapat menghasilkan prestasi yang baik karena mekanisme ini bersifat tak linier. Dalam makalah ini ditunjukkan bahwa pemakaian teknik kendali logika fuzzy yang berbasis pada keahlian operator dapat mengatasi masalah ketidaklinieran tersebut dengan baik.

Kata kunci : informasi linguistik, aturan dasar fuzzy, mekanisme presisi, pengendali PID

Abstract

This paper discusses the implementation of a fuzzy logic controller on a precision straight-line motion mechanism. The precision straight-line motion mechanism, which is studied in this research, is a mechanism that was built to study methods of precision positioning. For this mechanism, a conventional PID (Proportional, Integral, and Derivative) controller will not be able to produce good performances because of non-linearity behavior of this mechanism. This paper shows that a fuzzy logic controller based on knowledge of a human (an operator) can solve this nonlinearity problem.

keywords : linguistic information, fuzzy rule base, precision mechanism, PID Controller

1. PENDAHULUAN

Prestasi dari suatu sistem kendali sangat ditentukan oleh kemampuannya dalam memperoleh maupun mengolah informasi dari sistem atur. Secara umum, informasi tersebut terbagi atas dua jenis informasi yaitu informasi numerik dan informasi linguistik. Informasi numerik menunjukkan tingkat keadaan sistem dalam besaran numerik yang biasanya diperoleh dari hasil pengukuran. Karena dinyatakan dalam besaran numerik maka informasi yang dibawa bersifat pasti. Sedangkan informasi linguistik membawa informasi yang bersifat fuzzy (tidak tegas). Informasi fuzzy tersebut biasanya berupa interpretasi manusia (operator atau ahli) terhadap tingkat keadaan dari suatu sistem kendali. Dalam informasi linguistik tingkat keadaan sistem dinyatakan dalam besaran linguistik seperti *besar, kecil, sangat besar*, dan lain-lain.

Pengendali konvensional, seperti PID (*Proporsional plus Integral plus Derivative*), hanya bisa memanfaatkan informasi numerik saja. Informasi

linguistik tidak dapat dimanfaatkan oleh pengendali konvensional karena informasi yang dibawanya bersifat tidak pasti, samar, atau fuzzy. Meskipun bersifat fuzzy, namun informasi linguistik sering membawa informasi yang penting tentang tingkat keadaan suatu sistem terutama dalam menggambarkan perilaku sistem. Agar informasi linguistik yang bersifat fuzzy dapat digunakan dalam suatu sistem kendali maka dikembangkan suatu pengendali yang mampu mengolah informasi tersebut. Pengendali semacam ini dikenal sebagai pengendali logika fuzzy (*fuzzy logic controller*).

Pengendali logika fuzzy mencoba menerapkan pengetahuan seorang ahli tentang suatu sistem atur ke dalam algoritme kendalinya. Oleh karena itu pengendali semacam ini banyak digunakan pada sistem yang memiliki ketidaklinieran dan ketidakpastian, namun dasar-dasar pengetahuan tentang sistem tersebut sudah diketahui. Dalam penelitian ini, pengendali logika fuzzy akan diterapkan pada suatu mekanisme gerakan lurus presisi.

Mekanisme gerakan lurus presisi yang digunakan dalam penelitian ini dibuat untuk mempelajari teknik pemosisian presisi. Penelitian tentang teknik pemosisian presisi ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan industri saat ini untuk membuat produk dengan ketelitian tinggi. Untuk menghasilkan produk yang memiliki ketelitian tinggi diperlukan teknologi pemesinan presisi. Salah satu pendukung teknologi pemesinan presisi ini adalah teknik pemosisian presisi.

Kepresisian pemosisian dari suatu mekanisme sangat dipengaruhi oleh ketelitian dari dimensi komponen mekaniknya. Tingkat ketelitian dimensi dari komponen mekanik ini selalu dibatasi oleh ketidaksempurnaan proses pemesinan pada saat proses pembuatan dilakukan. Ketidaksempurnaan dimensi ini akan sangat mempengaruhi perilaku dinamik dari suatu mekanisme. Selain dimensi dari komponen mekanik, hal-hal lain yang ikut mempengaruhi perilaku dinamik dari suatu mekanisme adalah aktuator yang digunakan, mekanisme transmisi, proses perakitan komponen, dan lain-lain. Semua faktor-faktor tersebut membuat perilaku dinamik dari mekanisme menjadi tidak linier. Untuk mencapai pemosisian presisi pengendali dalam mekanisme harus mampu mengatasi ketidaklinieran sistem.

Pada pengendali konvensional, agar dapat mengatasi masalah ketidaklinieran tersebut, memerlukan model matematik yang lengkap dari mekanisme. Sayangnya, untuk memperoleh model matematik yang lengkap dari suatu mekanisme yang memiliki perilaku dinamik tak linier, memerlukan proses yang cukup rumit dan tidak mudah. Padahal, dasar-dasar pengetahuan tentang perilaku dari mekanisme ini dalam variabel linguistik jauh lebih mudah untuk diperoleh. Oleh karena itu, adalah hal yang menarik untuk mencoba melakukan pemosisian presisi pada mekanisme gerakan lurus presisi dengan menggunakan pengendali logika fuzzy.

2. DASAR TEORI LOGIKA FUZZY [1,2]

Pengendali logika fuzzy dibangun oleh dua komponen utama yaitu teori himpunan fuzzy (*fuzzy set*), yang diperkenalkan pertama kali oleh Zadeh pada tahun 1965, dan aturan jika-maka (*if-then rule*). Konsep himpunan fuzzy merupakan perluasan dari konsep himpunan tegas (*crisp set*).

Dalam himpunan tegas keanggotaan dari suatu anggota himpunan dinyatakan secara tegas oleh bilangan 1 atau 0. Jika suatu variabel merupakan anggota dari suatu himpunan tegas maka nilai keanggotaannya sama dengan 1 dan jika bukan anggota maka nilai keanggotaannya sama dengan 0. Dalam himpunan fuzzy perubahan keanggotaan

suatu variabel dalam suatu himpunan berlangsung secara gradual dari 0 ke 1 dengan mengikuti fungsi keanggotaan (*membership function*) tertentu. Jika X adalah kumpulan dari obyek x , maka himpunan fuzzy A dalam X dapat dinyatakan sebagai :

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in X\}$$

dimana $\mu_A(x)$ merupakan fungsi keanggotaan untuk himpunan fuzzy A . Dengan memandang variabel linguistik sebagai suatu himpunan fuzzy dan variabel numerik sebagai obyek dalam suatu semesta pembicaraan, maka setiap variabel numerik dapat dinyatakan dalam variabel linguistik dengan melihat derajat keanggotaannya.

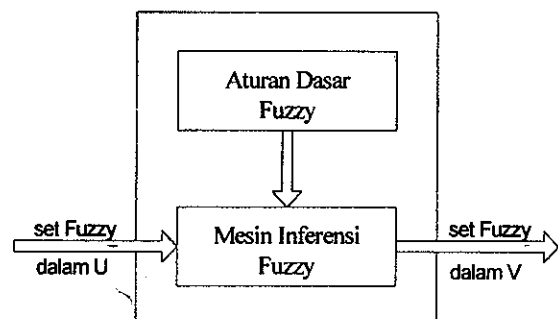
Komponen lain yang membangun pengendali logika fuzzy adalah aturan jika- maka; atau yang juga dikenal sebagai aturan dasar fuzzy (*fuzzy rule base*). Aturan jika-maka merupakan tempat penerapan basis logika pengetahuan ahli atau operator. Aturan dasar fuzzy merupakan kumpulan kaidah-kaidah jika-maka sebagai berikut

$R^{(1)}$: Jika x_1 adalah F^1_1 dan x_2 adalah $F^1_2 \dots$ dan x_n adalah F^1_n maka y adalah G^1

$R^{(2)}$: Jika x_1 adalah F^2_1 dan x_2 adalah $F^2_2 \dots$ dan x_n adalah F^2_n maka y adalah G^2

$R^{(m)}$: Jika x_1 adalah F^m_1 dan x_2 adalah $F^m_2 \dots$ dan x_n adalah F^m_n maka y adalah G^m

dimana F^i dan G^i adalah himpunan fuzzy pada kaidah ke- i untuk $i=1,2,\dots,m$, $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in U$ dan $y \in V$ adalah masukan dan keluaran dari sistem. Secara skematik sistem logika fuzzy ini ditunjukkan pada Gambar 1. Pada gambar ini diperlihatkan bahwa sistem logika fuzzy memetakan suatu himpunan fuzzy dalam semesta pembicaraan U kepada suatu himpunan fuzzy dalam semesta pembicaraan V . Pemetaan tersebut dilakukan oleh suatu mesin inferensi yang bekerja berdasarkan aturan dasar fuzzy.



Gambar 1 Diagram skematik dari suatu sistem logika fuzzy.

Dalam penerapannya, sistem logika fuzzy di atas banyak mengalami modifikasi sesuai dengan permasalahan yang dihadapi. Salah satu modifikasi tersebut diajukan oleh Tagaki, Sugeno dan Kang yang dikenal sebagai logika fuzzy Sugeno [1,2]. Sistem ini diajukan untuk menghasilkan suatu sistem fuzzy yang mempunyai pendekatan sistematis dalam menyusun aturan dasarnya. Jika pada suatu logika fuzzy Sugeno memiliki m kaidah jika-maka, maka kaidah ke- l pada sistem ini akan berbentuk :

$R^{(l)}$: Jika x_1 adalah F_1^l dan ... dan x_n adalah F_n^l maka $y' = c_0^l + c_1^l x_1 + c_2^l x_2 + \dots + c_n^l x_n$,

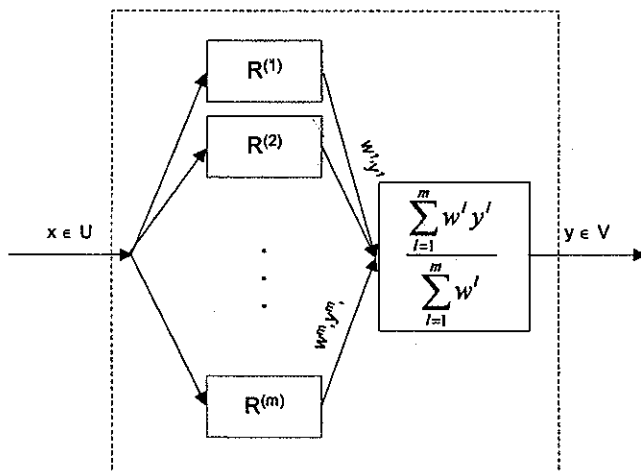
dimana adalah F^l adalah set fuzzy pada kaidah ke- l , $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in U$ adalah masukan sistem, c_i adalah suatu konstanta, y' adalah keluaran sistem. Sedangkan keluaran dari sistem keseluruhan logika fuzzy Sugeno adalah :

$$y(x) = \frac{\sum_{l=1}^m w^l y^l}{\sum_{l=1}^m w^l}$$

dimana w^l adalah :

$$w^l = \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i)$$

Jadi persamaan di atas merupakan nilai kebenaran dari keseluruhan premise pada kaidah R^l . Secara keseluruhan mekanisme logika fuzzy Sugeno dinyatakan pada Gambar 2.



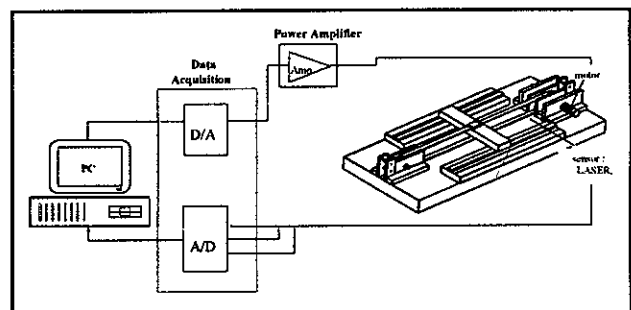
Gambar 2 Sistem logika fuzzy Sugeno [1,2]

Dalam penelitian ini digunakan logika fuzzy Sugeno sebagai pengendali pada mekanisme gerakan lurus presisi. Pemilihan logika fuzzy Sugeno ini didasarkan pada sifat logika ini dimana bagian konsekuennya berupa set tegas yang harganya merupakan kombinasi linier dari variabel masukannya. Dengan memilih variable masukan sistem berupa galat dan laju perubahan galat maka fungsi linier pada

konsekuensi logika fuzzy Sugeno dapat disusun berdasarkan pengalaman operator dalam menentukan harga K_p dan K_d pada pengendali PD (*Proportional plus Derivative*).

3. SISTEM GERAKAN LURUS PRESISI [3,4,5]

Sistem gerakan lurus presisi terdiri dari aktuator, sensor posisi, kartu akuisisi data, penguat daya, komputer, dan komponen mekanik. Komponen mekanik berupa sebuah meja yang dapat meluncur di sepasang *linear motion*. Gerakan meja tersebut dihasilkan oleh motor dan diteruskan oleh mekanisme sabuk dan puli. Adapun posisi meja di monitor oleh sensor posisi. Informasi numerik yang dihasilkan oleh sensor posisi dikirimkan ke komputer melalui kartu akuisisi data untuk masukan bagi algoritme kendali. Aksi kendali yang dihasilkan oleh algoritme kendali selanjutnya dikirimkan ke aktuator setelah dikuatkan oleh penguat daya. Secara skematik, sistem ini ditunjukkan pada Gambar 3.

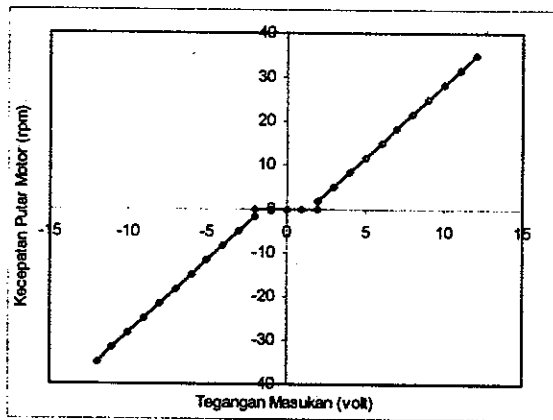


Gambar 3 Skema dari sistem kendali mekanisme gerakan lurus presisi

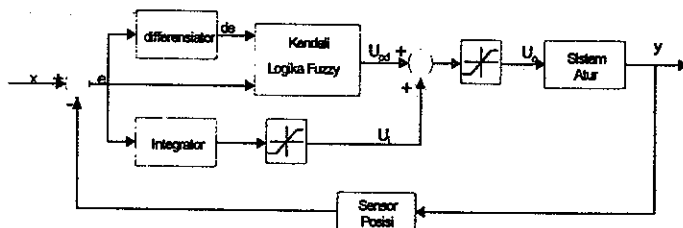
Motor yang digunakan sebagai aktuator pada mekanisme ini adalah motor DC dengan magnet permanen. Pemilihan motor DC ini bertujuan untuk memudahkan strategi pengendalian karena kecepatan putar motor DC sebanding dengan tegangan listrik yang diberikan. Namun pada daerah tegangan masukan ± 0.15 volt motor menunjukkan perilaku *dead zone*. Rentang *dead zone* ini diperbesar lagi oleh adanya friksi di antara meja dan *linear motion*. Akibat friksi tersebut motor baru dapat menggerakkan meja apabila tegangan masukannya di atas 1.75 volt. Karakteristik kecepatan putar motor penggerak pada mekanisme gerakan lurus presisi dalam keadaan terakit diperlihatkan pada Gambar 4.

4. PERANCANGAN PENGENDALI FUZZY

Sistem kendali untuk mekanisme gerakan lurus presisi dirancang dengan menggunakan pengendali logika fuzzy sebagai pengendali langsung. Diagram blok dari sistem kendali mekanisme gerakan lurus presisi ini ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Karakteristik kecepatan motor terhadap tegangan masukan dalam keadaan terakut.



Gambar 5 Diagram blok sistem kendali mekanisme gerakan lurus presisi.

Pada gambar tersebut diperlihatkan bahwa pengendali logika fuzzy memiliki dua buah masukan dan satu buah keluaran, U_{fd} . Kedua buah masukan tersebut adalah galat, e , yang didefinisikan sebagai

$$e(k) = x(k) - y(k)$$

dan perubahan galat, Δe , yang didefinisikan sebagai

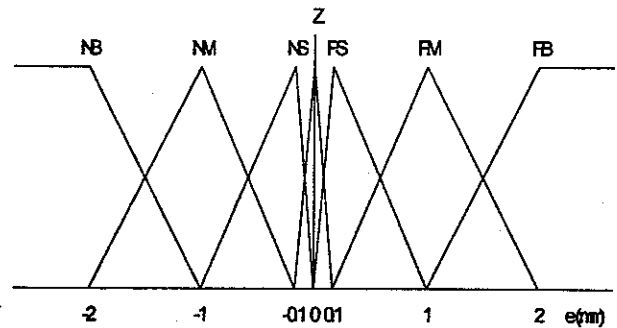
$$\Delta e = e(k) - e(k-1)$$

dimana : $x(k)$ adalah sinyal referensi,
 $y(k)$ adalah posisi meja,
 $e(k)$ adalah galat saat ini, dan
 $e(k-1)$ adalah galat sebelumnya.

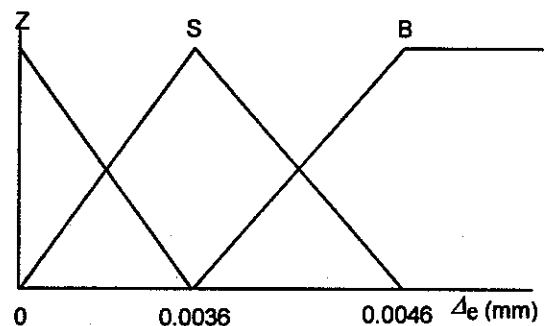
Untuk mendapatkan variabel linguistik dari harga masukan tersebut perlu disusun *fuzzyfier* dengan semesta pembicaraan galat dan perubahan galat. Pada semesta pembicaraan galat ditentukan tujuh himpunan fuzzy yaitu negatif besar (NB), negatif medium (NM), negatif kecil (NS), nol (Z), positif kecil (PS), positif medium (PM), dan positif besar (PB). Sedangkan pada semesta pembicaraan perubahan galat dibuat tiga himpunan fuzzy yaitu besar (B), kecil (S), dan nol (Z). Fungsi keanggotaan dari setiap himpunan fuzzy dibentuk oleh fungsi segitiga. Jika A adalah suatu set fuzzy dan x adalah obyek dalam semesta pembicaraan maka derajat keanggotaan x dalam A, dengan menggunakan fungsi segitiga sebagai fungsi keanggotaannya, dapat dinyatakan sebagai :

$$\mu_A(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right]$$

dimana $a < b < c$ adalah koordinat batas kiri, koordinat puncak, dan koordinat batas kanan segitiga. Pembagian set fuzzy untuk semesta pembicaraan galat dan perubahan galat ini diperlihatkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6 Set fuzzy untuk masukan galat



Gambar 7 Set fuzzy untuk masukan perubahan galat

Setelah data masukan yang berupa set fuzzy sudah terbentuk maka dapat dilakukan inferensi dengan menggunakan aturan logika fuzzy yang dibuat berdasarkan pengetahuan perancang. Aturan logika fuzzy tersebut diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Logika Fuzzy untuk Sistem Kendali Mekanisme Gerakan Presisi

$\Delta e \backslash e$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
B	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
S	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
Z	NB	NM	NM	Z	PM	PM	PB

dimana NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB pada konsekuen aturan logika fuzzy adalah :

$$\begin{aligned} \text{NB} &= \max(\min(e+2.5*(\Delta e), -3), -8), \\ \text{NM} &= \max(\min(4*e+5.25*(\Delta e), -2.5), -6), \\ \text{NS} &= \max(\min(5*e+10*(\Delta e), 0), -4), \\ \text{Z} &= 10*e+10*(\Delta e), \\ \text{PS} &= \min(\max(5*e+10*(\Delta e), 0), 4), \\ \text{PM} &= \min(\max(4*e+5.25*(\Delta e), 2.5), 6), \\ \text{PB} &= \min(\max(e+2.5*(\Delta e), 3), 8). \end{aligned}$$

Penentuan harga-harga koefisien di atas didasarkan pada pengalaman menjalankan peralatan dan sedikit faktor coba-coba.

Tabel 1 apabila dijabarkan dalam aturan jika-maka akan membentuk 21 aturan, sebagai berikut :

$R^{(1)}$: Jika e adalah NB dan Δe adalah B maka U_{pd} adalah NM

$R^{(2)}$: Jika e adalah NM dan Δe adalah B maka U_{pd} adalah NM

$R^{(21)}$: Jika e adalah PB dan Δe adalah Z maka U_{pd} adalah PB

Dengan menerapkan aturan jika-maka di atas ke dalam sistem logika fuzzy Sugeno maka aksi pengaturan pengendali fuzzy (U_{pd}) dapat diperoleh.

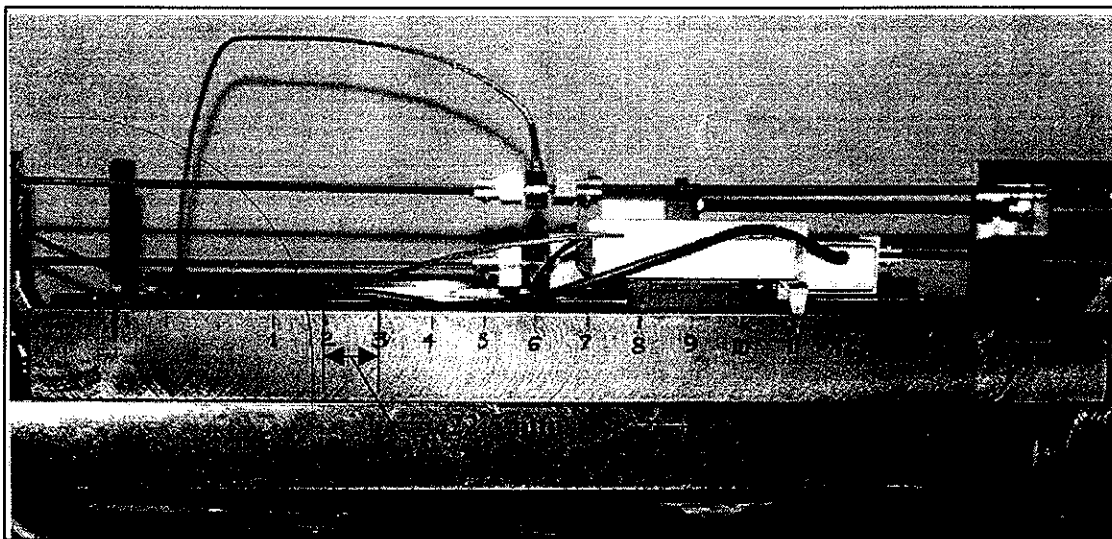
Pada Gambar 5 selain pengendali fuzzy tampak pula adanya pengendali integrator. Pemakaian pengendali integrator ini dimaksudkan untuk mengatasi ketidaklinieran akibat adanya *dead zone* pada mekanisme gerakan presisi. Aksi dari pengendali integrator ini dibatasi maximum 1.5 volt dan minimum -1.5 volt hal ini dengan pertimbangan bahwa perilaku *dead zone*, yang ditunjukkan pada Gambar 4, tidaklah seragam di sepanjang *linear motion*. Selain itu, pada Gambar 5 diperlihatkan pula adanya fungsi saturasi pada keluaran pengendali. Fungsi saturasi tersebut merupakan karakteristik dari penguat daya yang memiliki tegangan keluaran maksimum dan minimum sebesar 12 dan -12 volt.

5. KAJI EKSPERIMENTAL

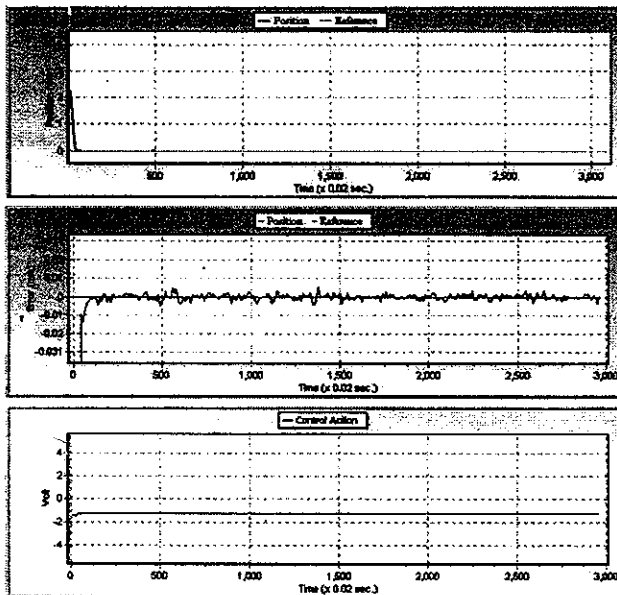
Untuk melihat prestasi dari pengendali logika fuzzy yang dirancang, dilakukan pengujian pada beberapa posisi operasi di sepanjang *linear motion*. Titik-titik operasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 8. Pada setiap titik operasi ini selanjutnya dilakukan pengujian pemosisian untuk arah gerakan ke kiri maupun ke kanan. Untuk keperluan pengujian tersebut digunakan sensor posisi berupa LASER yang memiliki resolusi pembacaan 0.125 μm dengan rentang pengukuran maksimum 10 mm. Sedangkan untuk pengendali digunakan komputer PC dengan prosesor Intel 166 MHz, memory sebesar 32 Mbytes, dan sistem operasi Windows 95. Dengan menggunakan komputer PC tersebut frekuensi cuplik yang dapat dilakukan sebesar 50 Hz.

Hasil pengujian pemosisian di sekitar titik operasi 10 untuk arah gerakan ke kiri diperlihatkan pada Gambar 9a dan untuk arah ke kanan diperlihatkan pada Gambar 9b. Pada setiap arah gerakan ditampilkan 3 buah grafik. Grafik pertama menunjukkan pergerakan posisi meja. Grafik kedua menunjukkan selisih antara posisi meja aktual dengan posisi meja yang diinginkan. Grafik terakhir menunjukkan aksi kendali dari pengendali. Hasil pengujian pemosisian untuk arah gerakan ke kiri dan ke kanan di sekitar titik operasi 1 ditampilkan pada Gambar 10.

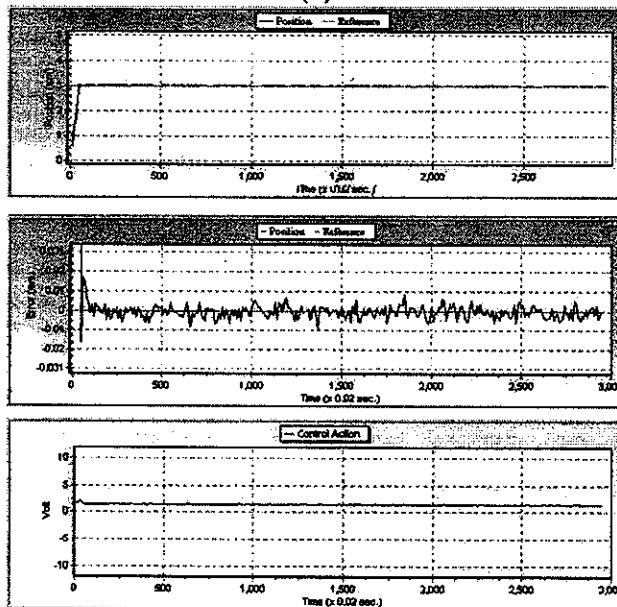
Sebagai pembandingan terhadap prestasi pengendali logika fuzzy, dilakukan pula pengujian dengan menggunakan pengendali PID. Penentuan parameter



Gambar 8 Titik-titik operasi untuk pengujian pemosisian presisi



(a)

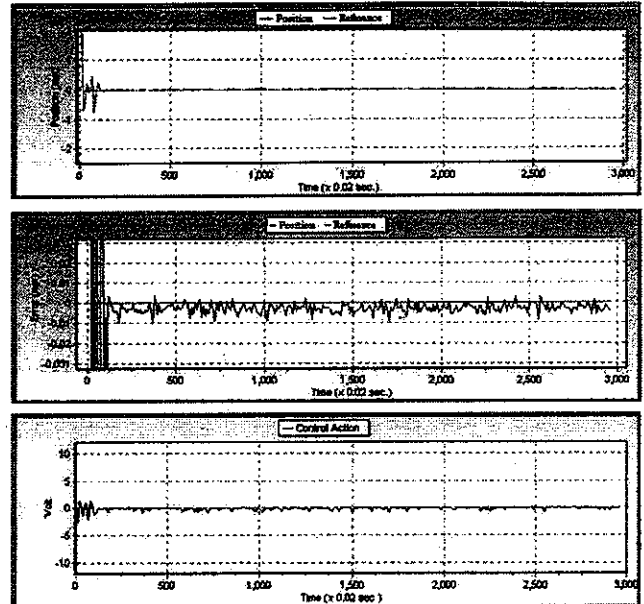


(b)

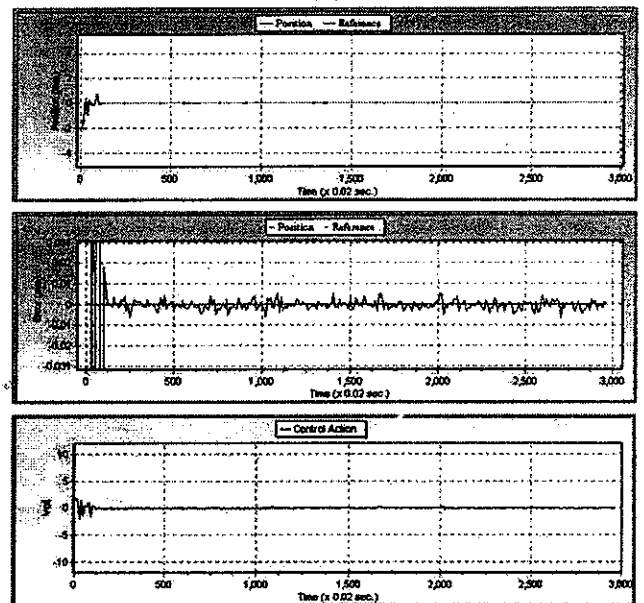
Gambar 9 Pemosisian dengan titik operasi 10
 (a) Pemosisian dari posisi 3 ke 0 mm
 (b) Pemosisian dari posisi 0 ke 3 mm

Kp, Ki dan Kd dilakukan dengan cara coba-coba untuk mendapatkan prestasi terbaik di salah satu titik operasi. Dengan metode tersebut diperoleh harga $K_p=0.5$, $K_i=0.075$, dan $K_d=0.5$. Harga K_p , K_i , dan K_d yang sama kemudian digunakan untuk pengujian di titik operasi yang lain. Hasil yang diperoleh dari pengujian pemosisian di sekitar titik 1 dan 10 diperlihatkan pada Gambar 11 dan Gambar 12.

Dari hasil-hasil pengujian yang telah dilakukan tampak bahwa ketelitian yang dapat dicapai pada pemosisian dengan pengendali logika fuzzy adalah $\pm 10 \mu m$ untuk titik operasi 10. Pada titik operasi 1



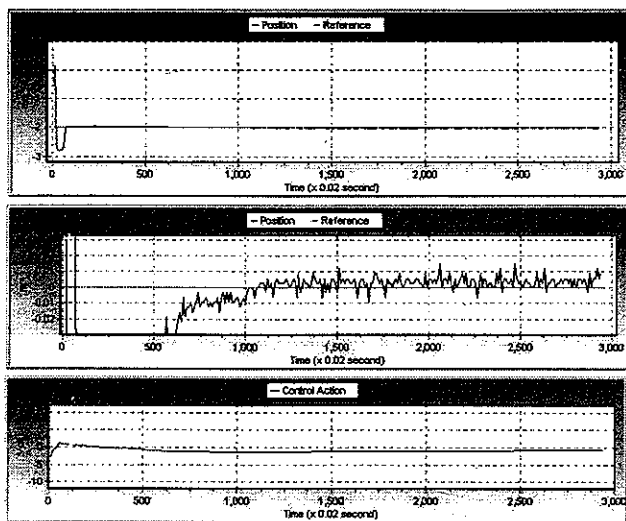
(a)



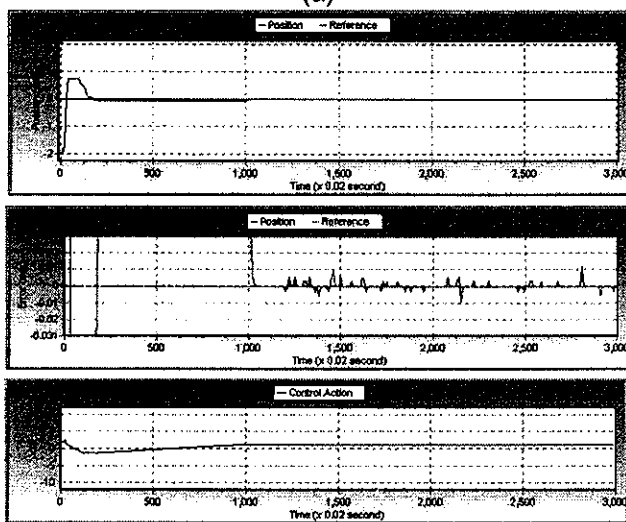
(b)

Gambar 10 Pemosisian dengan titik operasi 1
 (a) Pemosisian dari posisi 2 ke 0 mm
 (b) Pemosisian dari posisi -2 ke 0 mm

ketelitian yang dapat dicapai adalah $\pm 10 \mu m$ meskipun pada awalnya terjadi osilasi yang cukup besar. Sedangkan pada pengendali PID, ketelitian yang dicapai berubah secara drastis untuk titik operasi yang berbeda. Pemakaian pengendali PID pada titik operasi 1 misalnya, menghasilkan ketelitian sebesar $\pm 10 \mu m$ sedangkan pada titik operasi 10 diperoleh ketelitian $\pm 100 \mu m$. Kondisi lebih buruk terjadi terutama untuk gerakan ke kanan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem gerakan lurus presisi memiliki karakteristik dinamik yang berbeda baik untuk titik operasi yang berbeda maupun untuk arah



(a)



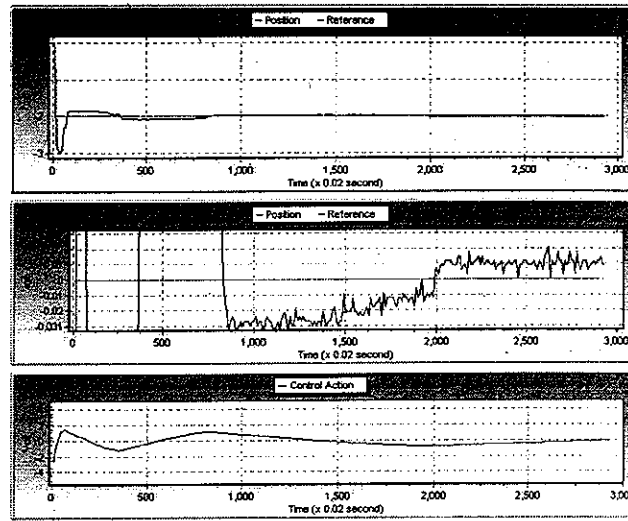
(b)

Gambar 11 Pemosisian dengan pengendali PID untuk titik operasi 1

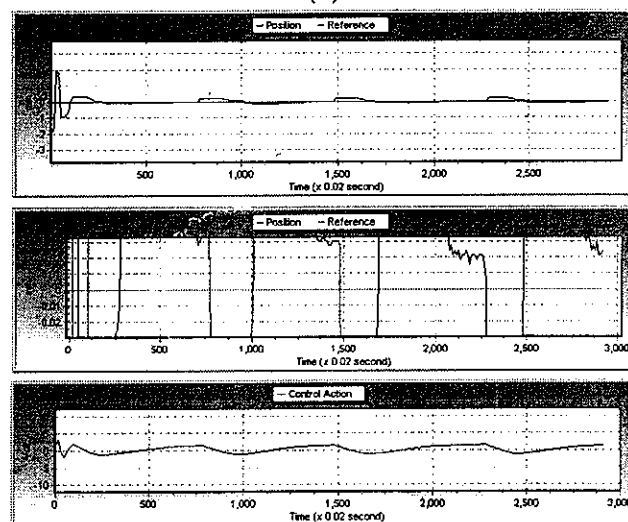
- (a) Pemosisian dari posisi 0 ke -2 mm
(b) Pemosisian dari posisi -2 ke 0 mm

gerakan yang berbeda. Hal ini juga ditunjukkan oleh perbedaan harga *overshoot* yang terjadi baik untuk titik operasi yang berbeda maupun arah gerakan yang berbeda.

Perlu dicatat bahwa ketelitian pemosisian yang dihasilkan oleh mekanisme gerakan presisi yang digunakan pada penelitian ini tidak dapat langsung dibandingkan dengan ketelitian mesin perkakas yang ada di pasar. Hal ini karena mekanisme gerakan lurus presisi ini memiliki sabuk sebagai transmisi gerakannya. Penggunaan sabuk ini akan menyebabkan fleksibilitas yang tinggi sehingga dinamika sistem menjadi lebih rumit dibandingkan dengan dinamika mesin perkakas yang menggunakan transmisi *leadscrew* atau *ballscrew*. Namun demikian, penggunaan sabuk akan



(a)



(b)

Gambar 12 Pemosisian dengan pengendali PID untuk operasi titik 10

- (a) Pemosisian dari posisi 0 ke -2 mm
(b) Pemosisian dari posisi -2 ke 0 mm

memungkinkan penelitian yang lebih mendalam tentang mekanisme gerakan presisi.

6. KESIMPULAN

Pada makalah ini telah diuraikan tentang pengendalian mekanisme gerakan lurus presisi dengan menggunakan pengendali logika fuzzy Sugeno. Pengendali logika fuzzy ini dirancang berdasarkan pengetahuan dan pengalaman operator. Dari hasil pengujian yang dilakukan, terlihat bahwa prestasi kendali yang dihasilkan cukup baik walaupun digunakan di dua posisi titik operasi yang letaknya berjauhan. Meskipun demikian pada titik operasi 1 masih terjadi osilasi yang cukup besar sebelum tercapainya kondisi tunak.

Sedangkan pada penerapan pengendali PID konvensional pemosisian di dua titik operasi tersebut menghasilkan perbedaan ketelitian yang cukup besar. Hal ini memperkuat dugaan bahwa perilaku dinamik dari sistem ini berubah di sepanjang lintasan geraknya.

7. UCAPAN TERIMA KASIH

Makalah ini merupakan hasil dari Penelitian Hibah Tim yang berjudul *Dynamic Modeling and Control of A High Precision Straight-Motion Mechanism* yang didanai oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan melalui kontrak nomor : 017/HTTP-III/URGE/1997.

8. DAFTAR PUSTAKA

1. Jang, Jyh-Shing Roger, Cheun-Tsai Sun, dan Eiji Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall, 1997.
2. Wang, Li Xing, *Adaptive Fuzzy System and Control : Design and Stability*, Prentice Hall Inc., 1994.
3. Suardana, I Wayan, *Perancangan, Pembuatan, dan Pengendalian Mekanisme Gerakan Lurus Presisi Tinggi*, Jurusan Teknik Mesin ITB, 1996.
4. Riyanto, Latief, *Pemodelan Dinamik dan Identifikasi Parameter dari Mekanisme Gerakan Lurus Presisi*, Jurusan Teknik Mesin ITB, 1998.
5. Sibenordy, *Pemodelan Dinamik dan Penerapan Teknik Kendali PID Digital pada Mekanisme Gerakan Lurus Presisi Tinggi*, Jurusan Teknik Mesin ITB 1998.