

# Multiple Model Fuzzy Control:

## Rancangan dan Simulasi Pada Tower Crane

Hendra Tjahyadi  
Jurusan Sistem Komputer  
Universitas Pelita Harapan  
Tangerang, Indonesia  
hendra.tjahyadi@uph.edu

Torang Simamora  
Project engineer  
S.C. Johnson  
Surabaya, Indonesia  
TSimamor@scj.com

**Abstrak**—Untuk meningkatkan performansi respon transient dari sistem *tower crane* yang memiliki tingkat non-linearitas dan faktor ketidakpastian yang tinggi, sebuah pengontrol yang menggabungkan metoda *multiple model* dan logika *fuzzy* telah dirancang dan disimulasikan. Pada metoda ini plant dibandingkan dengan beberapa *fuzzy model* dalam sebuah bank model. Sebuah *supervisor* selanjutnya akan mengidentifikasi model mana yang terdekat dengan kondisi dari plant pada saat tersebut, dan akan mengaktifkan pengontrol yang terkait dengan model yang terpilih sehingga respon transient yang cepat dapat dicapai. Simulasi pada sistem *tower crane* menunjukkan *multiple model fuzzy control* yang dirancang menghasilkan respon yang lebih baik dari *fuzzy control* konvensional yaitu menghasilkan simpangan beban yang lebih kecil.

**Keywords**—*multiple model; kontroller fuzzy; respon transient; tower crane, non-linear.*

### I. PENDAHULUAN

Mengontrol sistem *non-linear* merupakan tugas yang tidak mudah dilakukan. Kesulitan muncul karena beberapa faktor diantaranya adalah daerah kerja yang luas, non-linearitas yang besar (*hard nonlinearity*) dan ketidakpastian model [1]. Pengontrol yang didesain berdasarkan model linear dengan asumsi bahwa model yang akurat bisa diperoleh pada umumnya akan gagal memberikan unjuk kerja yang baik pada sistem *non-linear*, terkecuali pada daerah kerja yang sangat terbatas.

Ada beberapa metoda yang umum dipakai dalam mengontrol sistem *non-linear* seperti: *gain scheduling control* [2], *adaptive control* [3], *robust control* [4], *neural network control* [5] dan *fuzzy control* [6]. *Fuzzy control* menjadi pilihan yang menarik karena tidak memerlukan model matematika yang kompleks dalam proses desainnya, tetapi lebih berdasarkan kepada pengalaman seorang pakar yang dinyatakan dalam *variable linguistic* sehingga disebut sebagai desain dengan pendekatan pakar [7].

Untuk sistem dengan tingkat non-linearitas dan ketidakpastian yang besar penggunaan *fuzzy control* konvensional seringkali tidak memberikan performansi yang optimal. Hal ini terutama dikarenakan kesulitan untuk menentukan fungsi keanggotaan dari *fuzzy control* yang bisa mencakup daerah yang luas dengan ketidakpastian yang besar.

Untuk meningkatkan performansi dari *fuzzy control* dalam mengontrol sistem dengan non-linearitas dan

ketidakpastian yang besar, sebuah pengontrol yang menggabungkan *fuzzy control* dengan *multiple model control* diusulkan pada paper ini. Di sini *fuzzy model* dibagi menjadi beberapa model dengan jalan membagi daerah kerjanya menjadi beberapa bagian. Untuk masing-masing model didesain sebuah *fuzzy controller* terkait. Selanjutnya, pada setiap saat sistem akan membandingkan semua model dengan plant yang dikontrol. Hasil perbandingan tersebut akan diteruskan pada sebuah *supervisor* yang akan menentukan model yang terdekat dengan plant yang dikontrol. Informasi tersebut selanjutnya dipakai untuk memilih pengontrol yang terkait dengan model terpilih untuk mengontrol plant pada saat tersebut. Dengan cara seperti itu diharapkan respon transient dari sistem akan meningkat karena plant akan dikontrol oleh pengontrol yang tepat pada setiap saat.

Untuk mendemonstrasikan metoda yang diusulkan dipilih sebuah *tower crane* sebagai plant yang akan dikontrol. *Tower crane* dipilih karena mempunyai tingkat non-linearitas yang tinggi dan mempunyai ketidakpastian yang besar akibat perubahan beban yang dipindahkan.

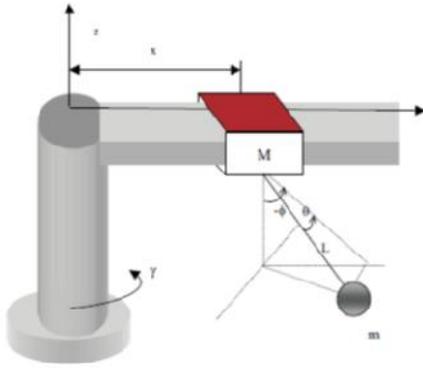
Pembahasan selanjutnya dari paper ini adalah sebagai berikut: Pada bagian II akan diberikan model dari *tower crane* yang menjadi plant yang akan dikontrol, selanjutnya bagian III akan mengulas mengenai metoda *multiple model* dan *fuzzy control*. Bagian IV akan berisi rancangan dan simulasi, dan akan ditutup dengan kesimpulan pada bagian V.

### II. MODEL TOWER CRANE

*Tower crane* merupakan suatu alat yang digunakan dalam industri untuk memindahkan beban yang berat dari satu tempat ke tempat lain yang berjauhan. *Tower crane* mengakomodasi pemindahan barang melalui ketinggian, sehingga efisiensi proses bongkar muat barang/beban meningkat.

Pada dasarnya sebuah *tower crane* memiliki struktur yang kompleks. Gambar.1 menunjukkan model *tower crane* yang bentuknya sudah disederhanakan, dengan sebuah beban (m) digantung tali dengan panjang (L) di bawah sebuah *trolley* (M). Saat digerakkan sejauh (x), beban mengalami simpangan/ayunan terhadap garis vertikal dengan sudut  $\theta$ . Sedangkan sudut yang dibentuk ketika beban berputar dilambangkan sebagai  $\theta$ .

Model dinamik dari *tower crane* diperoleh sebagai berikut [8]:



Gambar 1. Skematik Tower Crane

$$M\ddot{x} + b_x\dot{x} + mg\phi + Mx\dot{\gamma}^2 = F_x(1)$$

$$L\ddot{\theta} + 2L\dot{\gamma}\dot{\theta} - L\dot{\gamma}^2\theta + L\ddot{\gamma}\theta - \dot{x} - x\dot{\gamma}^2 + g\theta = 0(2)$$

$$(J_o + Mx^2)\ddot{\gamma} + b_\gamma\dot{\gamma} - mgx\phi + 2mxL\dot{\gamma}^2\theta + mL(\dot{x}\dot{\gamma})\phi + (m + 2M)x\dot{x}\dot{\gamma} = T(3)$$

$$L\ddot{\theta} - 2L\dot{\gamma}\dot{\theta} + g\theta - L\dot{\gamma}^2 - L\ddot{\gamma}\theta + x\ddot{\gamma} + \dot{x}\dot{\gamma} = 0(4)$$

dengan:

- $F_x$  = Besarnya gaya menggerakkan trolley untuk memindahkan beban (Newton)
- $T$  = Besarnya gaya untuk tower crane berotasi (Newton)
- $\phi$  = Besarnya sudut yang dibentuk secara vertikal (radian)
- $\gamma$  = Besarnya sudut yang dibentuk tower berotasi (radian)
- $\theta$  = Besarnya sudut yang dibentuk ketika payload/beban berputar (radian)
- $x$  = Jarak yang sudah ditempuh trolley (meter)
- $g$  = Gravitasi bumi ( $m/s^2$ )

Dari persamaan dinamika yang ditunjukkan pada persamaan (1) – (4) jelas tampak tower crane merupakan suatu sistem yang non-linear. Kenon-linieran sistem mempersulit identifikasi sistem tower crane dan mendesain sebuah pengontrol yang cocok untuk setiap keadaan yang dialami oleh tower crane agar lebih cepat dalam proses memindahkan beban.

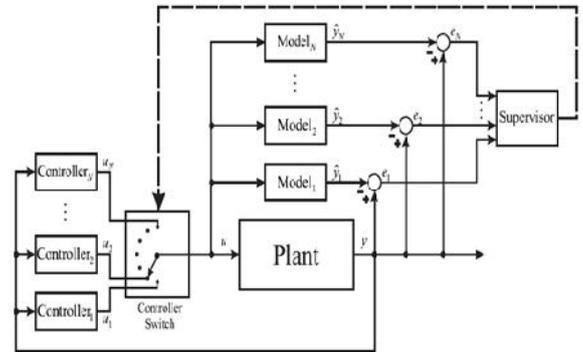
III. MULTIPLE MODEL DAN FUZZY CONTROL

Multiple Model Control

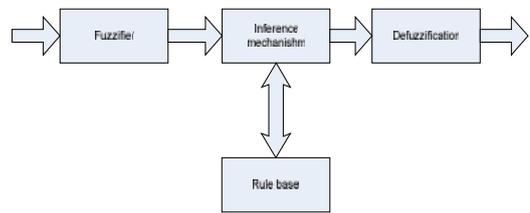
Multiple Model Control (MMC) merupakan suatu metode kontrol yang dipakai untuk mengatasi non-linearitas dan perubahan parameter plant.

Arsitektur dari MMC ditunjukkan pada Gambar 2 [9]. Dalam metoda ini, plant yang memiliki daerah kerja dannon-linearitas yang besar dibagi menjadi menjadi beberapa

model ( $M_1, M_2, \dots, M_n$ ) dengan daerah kerja yang lebih kecil sehingga



Gambar 2. Diagram Blok Dari Multiple Model Control



Gambar 3. Struktur Fuzzy Controller

faktor non-linearitas juga akan berkurang. Untuk masing-masing model,  $M_i$ , didesain sebuah pengontrol,  $C_i$ , yang secara relatif lebih mudah didesain. Kemudian sebuah mekanisme pemilih yang disebut sebagai supervisor akan memilih pengontrol yang tepat untuk mendapatkan respon yang diinginkan.

Supervisor bekerja dengan membandingkan error ( $e_1, e_2, \dots, e_n$ ) yang merupakan selisih antara output plant dan output setiap model. Supervisor akan mengidentifikasi model mana yang menghasilkan error terkecil selama periode waktu tertentu, dan memilih pengontrol yang paling sesuai untuk kondisi plant pada setiap waktu melalui mekanisme switching.

Fuzzy Control

Fuzzy logic controller merupakan sistem fuzzy yang diaplikasikan sebagai pengontrol. Variabel input pada pengontrol berupa selisih antara nilai referensi dengan nilai output yang disebut sebagai error. Sedangkan output fuzzy controller adalah sinyal kontrol yang menjadi masukan bagi aktuator.

Struktur fuzzy controller secara umum dapat digambarkan seperti pada Gambar 3. Bagian pertama disebut Fuzzier yang akan melakukan fuzifikasi terhadap nilai variabel input, ini dilakukan dengan cara mengubah nilai input fuzzy yang umumnya berupa suatu angka diubah kedalam besaran fuzzy. Rule-base berisi aturan-aturan yang menggambarkan mekanisme proses kontrol dan menjadi acuan dalam memutuskan suatu nilai output sebagai respon atas input yang masuk ke sistem fuzzy. Bagian mesin inferensi berfungsi

mengambil kesimpulan atas nilai input yang ada berdasarkan aturan-aturan pada *rule-base*. Bagian akhir berupa *defuzzification* berfungsi melakukan pemetaan ruang aksi kontrol *fuzzy* yang didefinisikan pada semesta keluaran berupa nilai tertentu dari pada domain *fuzzy*.

Dalam paper ini *fuzzy controller* direalisasikan dengan menggunakan bantuan *Fuzzy Inference System* (FIS) pada MATLAB. FIS adalah sistem yang menggunakan metode *fuzzy logic* untuk memetakan input yang ada terhadap output yang akan dihasilkan, sehingga menghasilkan suatu nilai output yang diinginkan.

IV. DESAIN DAN SIMULASI MULTIPLE MODEL FUZZY CONTROL UNTUK TOWER CRANE

Langkah pertama perancangan adalah memodelkan *tower crane* berdasarkan persamaan (1) – (4). Parameter yang dipilih untuk dimanipulasi dalam simulasi adalah massa *trolley* ( $M$ ), panjang tali ( $L$ ), massa beban ( $m$ ). Variabel yang dipilih sebagai variabel yang dikontrol adalah jarak yang ditempuh *trolley* ( $x$ ), besarnya sudut simpangan secara vertikal ( $\phi$ ), besarnya sudut beban berputar ( $\theta$ ), kecepatan dari *trolley* ( $v$ ).

Pada paper ini, kompleksitas dari sistem dibatasi dengan mengambil asumsi-asumsi berikut:

1. Massa dari lengan *tower crane* diabaikan.
2. Simpangan yang dialami oleh beban kecil,  $\theta$  dan  $\phi \leq 5^\circ$
3. Massa dari tali yang digunakan diabaikan.
4. Jarak maksimum yang ditempuh oleh *trolley* dibatasi yaitu sebesar 20 meter.
5. Kecepatan maksimum crane adalah 0,4 m/s
6. *Tower crane* tidak dalam keadaan berputar atau melakukan rotasi ( $T = 0$ ).

Spesifikasi *tower crane* dipakai dalam pemodelan dan simulasi dibuat mendekati nilai real dari komponen *tower crane* yang biasa digunakan dan ditunjukkan pada Tabel.1

Selanjutnya, jarak tempuh *trolley* maksimum sebesar 20 meter dibagi menjadi tiga daerah kerja dengan jalan melinearisasi model pada jarak 3 meter, 10 meter dan 18 meter untuk mendapatkan tiga buah model yang dinyatakan dalam bentuk *state-space*. Model linear tersebut diperoleh dengan jalan melinearisasi model *non-linear* yang dibangun di dalam SIMULINK dengan menggunakan perintah *linmod* pada MATLAB. Model akan memiliki 8 variabel  $state x_1 - x_8$  yang masing-masing secara berurutan adalah  $x, \phi, \gamma, \theta, \dot{x}, \dot{\gamma}, \dot{\phi}, \dot{\theta}$ . Titik-titik linearisasi untuk model 1 sampai model 3 ditunjukkan pada Tabel 2, harga  $F$  dan  $m$  untuk semua model adalah sama yaitu 100 N dan 1000 Kg.

Dengan memasukkan harga-harga tersebut pada perintah *linmod* maka akan diperoleh matriks *state spaced* dari masing-masing model  $M_1 - M_3$ .

Setelah model linear dibangun selanjutnya adalah mendesain *fuzzy controller*. Hal pertama yang dilakukan untuk mendesain *fuzzy controller* adalah menentukan variabel input dan variabel output pada MATLAB dengan menggunakan *FIS editor* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

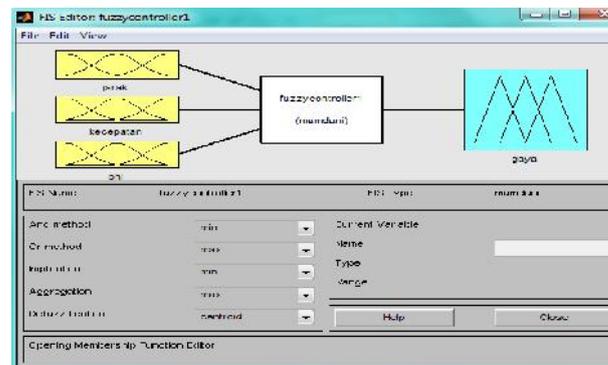
Gambar4 menjelaskan bahwa variabel input untuk mengendalikan *crane* adalah jarak yang ditempuh ( $x$ ), besarnya sudut simpangan vertikal yang dialami oleh beban ( $\phi$ ), dan kecepatan *crane* ( $v$ ). Sedangkan output-nya adalah besarnya

Tabel 1. Spesifikasi model *Tower Crane*

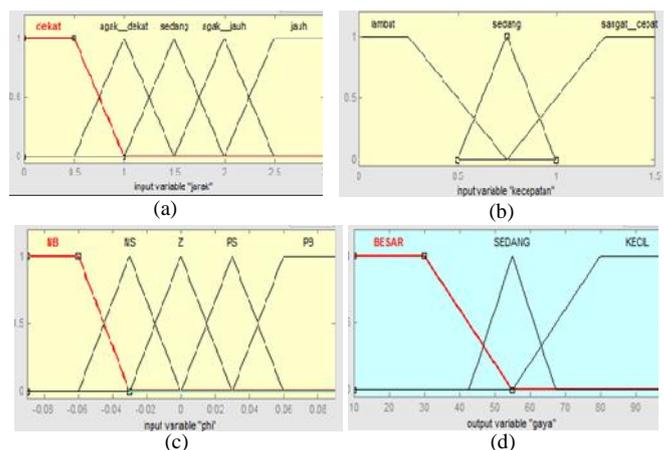
No	Variabel	Harga
1	Massa toley ( $M$ )	400 Kg
2	Massa Beban ( $m$ )	1000 Kg
3	Panjang tali ( $L$ )	50 m
4	Koefisien gesekan trolley ( $b_x$ )	2,65
5	Momen Inersia tower ( $J_0$ )	50 Kg $m^2$
6	Koefisien gesekan tower ( $b_{\theta}$ )	2,65

Tabel 2. Titik-titik linearisasi untuk mendapatkan model linear  $M_1 - M_3$ .

Model	Titik-titik	$\phi$	posisi	kecepatan	posisi	$\dot{\phi}$	$\ddot{\phi}$
$M_1$	3	5	0	3	0,15	0	0
$M_2$	10	5	0	3	0,40	0	0
$M_3$	18	5	0	3	0,2	0	0



Gambar 4. FIS editor untuk variabel input dan output



Gambar 5. Fungsi keanggotaan input dan output *fuzzy controller* pada sistem *tower crane*. (a) input  $x$ , (b) input  $v$ , (c) input  $\phi$ , (d) output  $F$ .

gaya ( $F$ ). Fungsi keanggotaan yang digunakan untuk masing - masing variabel ditunjukkan pada Gambar 5. Jarak yang ditempuh ( $x$ ) dibagi dalam lima nilai linguistik yaitu dekat, agak dekat, sedang, agak jauh dan jauh, kecepatan crane ( $v$ )

dibagidalam tiga nilai lingustik yaitu lambat, sedang dan cepat, besarnya sudut simpangan ( $\theta$ ), dibagi dalam 5 nilai lingustik yaitu *Negative Big* (NB), *Negative Small* (NS), *Zero* (Z), *Positive Small* (PS), *Positive Big* (PB).

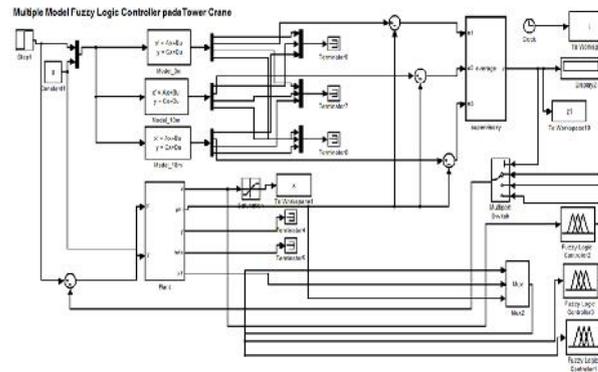
Setelah membuat partisi fuzzy dan memilih fungsi keanggotaan untuk masing – masing variabel input dan output, proses berikutnya adalah menentukan aturan – aturan kontrolfuzzy (*rule base*). Tipe *fuzzy controller* yang digunakan pada paper ini adalah tipe *Mamdani* karena lebih tepat digunakan untuk model plant yang tidak diketahui secara pasti, tetapi terdapat operator atau pakar yang mengetahui karakteristik sistem yang dikontrol. Aturan kontrolfuzzy yang dirancang berdasarkan pengetahuan *engineer* atau operator yang diekspresikan dalam bentuk implikasi fuzzy yaitu aturan IF – THEN. Diperoleh 60 aturan untuk *fuzzy controller* yang akan direalisasikan, beberapa diantaranya disampaikan di bawah ini sebagai contoh, pembaca diminta mengacu pada [10] untuk aturan selengkapnya.

1. If (jarak is dekat) and (kecepatan is lambat) and (phi is NB) then (gaya is CEPAT) (1)
2. If (jarak is dekat) and (kecepatan is lambat) and (phi is NS) then (gaya is CEPAT) (1)
3. If (jarak is dekat) and (kecepatan is lambat) and (phi is Z) then (gaya is LAMBAT) (1)
4. If (jarak is dekat) and (kecepatan is lambat) and (phi is PS) then (gaya is SEDANG) (1)
5. If (jarak is dekat) and (kecepatan is lambat) and (phi is PB) then (gaya is LAMBAT) (1)
6. If (jarak is dekat) and (kecepatan is sedang) and (phi is NB) then (gaya is CEPAT) (1)
7. If (jarak is dekat) and (kecepatan is sedang) and (phi is NS) then (gaya is SEDANG) (1)
8. If (jarak is dekat) and (kecepatan is sedang) and (phi is Z) then (gaya is LAMBAT) (1)
9. If (jarak is dekat) and (kecepatan is sedang) and (phi is PS) then (gaya is SEDANG) (1)
10. If (jarak is dekat) and (kecepatan is sedang) and (phi is PB) then (gaya is LAMBAT) (1)

Metoda defuzzifikasi yang digunakan yaitu *center of area* (COA) pada MATLAB dipilih *centroid*. Metoda COA diyakini lebih baik dalam menghasilkan kondisi respon *transient*. Selanjutnya *fuzzy controller* yang dirancang akan di-*cluster* untuk masing- masing model. Model diasumsikan sebagai *fuzzy set* untuk membuat batasan – batasan daerah kerja dari masing – masing *fuzzy controller* yang digunakan, sehingga *fuzzylogiccontroller* tidak bekerja untuk keseluruhan sistem, tetapi akan bekerja pada saat keadaan-keadaan(*cluster*) tertentu yang sudah ditentukan.

Proses selanjutnya adalah membuat *supervisor* yang digunakan memilih model yang memberikan pendekatan terbaik untuk kondisi plantsaat bekerja. *Supervisor* akan melakukan perhitungan terhadap setiap *error* dari masing – masing model dan membandingkannya untuk medapatkan *error* mana yang paling kecil yang akan digunakan memberitahu *switch* untuk mengaktifkan pengontrol yang tepat.

Setelah semua tahapan dilalui maka *multiple model fuzzy control* untuk tower crane diimplementasikan dalam SIMULINK. Diagram blok dari keseluruhan sistem ditunjukkan pada Gambar 6.



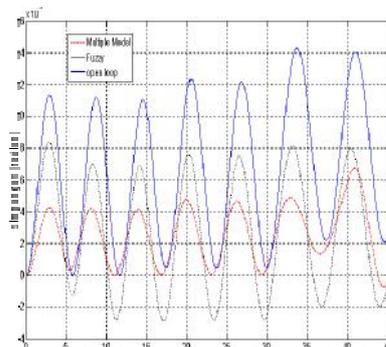
Gambar 6. Diagram blok *multiple model fuzzy control*

Ada dua simulasi yang akan ditampilkan dalam paper ini. **Simulasi pertama** adalah kasus dimana terjadi pengurangan massa beban yang dibawa saat *crane* bergerak dari titik awal menuju titik akhir. Sedangkan **simulasi kedua** merupakan kasus dimana terjadi penambahan massa beban yang dibawa *crane* saat *crane* bergerak dari titik awal menuju titik akhir. Penambahan atau pengurangan massa beban bisa terjadi misalnya saja diakibatkan oleh perubahan besar angin yang menekan beban ke atas atau ke bawah sehingga *crane* akan melihat hal itu sebagai pengurangan atau penambahan massa beban. Untuk kasus pengurangan massa beban bisa juga terjadi karena misalnya ada bagian dari massa yang terlepas atau terjatuh dari *crane*.

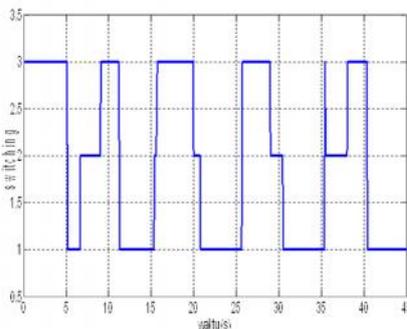
Untuk kedua simulasi ini besarnya gaya yang diterapkan adalah sebesar 80 N dan jarak yang harus ditempuh adalah sebesar 20 meter. Variabel yang menjadi pengamatan adalah besarnya sudut simpangan,  $\theta$ . Akan dibandingkan respon sistem yang dikontrol oleh *fuzzy control* konvensional dengan yang dikontrol oleh *multiple model fuzzy control*. Untuk *multiple model fuzzy control* akan ditunjukkan diagram *switching* yang menunjukkan bagaimana sistem memilih model yang berbeda agar bisa mendapatkan respon yang lebih baik.

#### Simulasi pertama

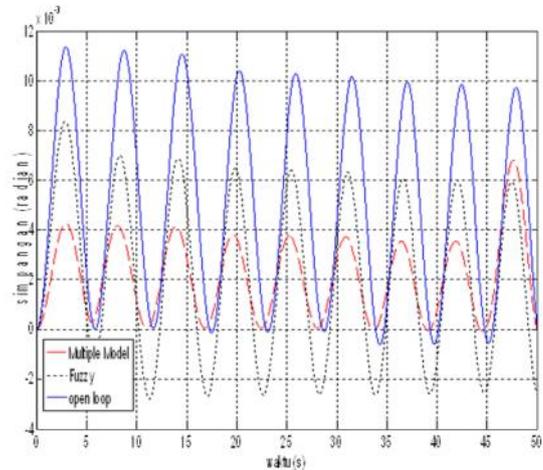
Pada simulasi inimassa beban yang dibawa oleh *crane* berubah dari 1000 Kg pada saat  $t = 0$  detik menjadi 800 Kg pada saat  $t = 16$  detik dan berubah menjadi 700 Kg pada saat  $t = 32$  detik. Respon simpangan sistem ditunjukkan pada Gambar 7 dan diagram *switching* dari sistem ditunjukkan pada Gambar 8.



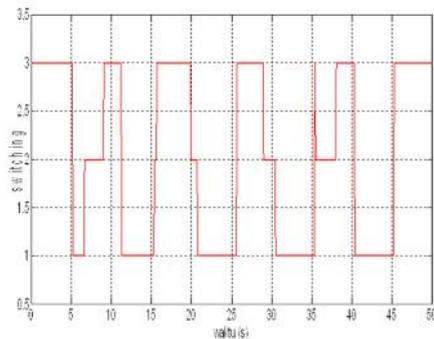
Gambar 7. Respon sudut simpangan untuk perubahan beban dari  $m=1000 \text{ kg} \rightarrow 800 \text{ kg} \rightarrow 700 \text{ kg}$



Gambar 8. Diagram *switching* untuk perubahan beban dari  $m=1000 \text{ kg} \rightarrow 800 \text{ kg} \rightarrow 700 \text{ kg}$  dengan  $F=80 \text{ N}$ .



Gambar 9. Respon sudut simpangan untuk perubahan beban dari  $m=1000 \text{ kg} \rightarrow 1100 \text{ kg} \rightarrow 1200 \text{ kg} \rightarrow 1300 \text{ kg}$



Gambar 10. Diagram *switching* untuk perubahan beban dari  $m=1000 \text{ kg} \rightarrow 1100 \text{ kg} \rightarrow 1200 \text{ kg} \rightarrow 1300 \text{ kg}$

Dari Gambar 7 terlihat simpangan beban ( $\theta$ ) maksimum saat sistem tidak dikontrol adalah sebesar 0.014 radian. Simpangan ini diperbaiki menjadi maksimum sebesar 0.008 radian dengan menggunakan *fuzzy controller* konvensional dan diperbaiki menjadi maksimum sebesar 0.006 radian dengan menggunakan *multiple model fuzzy controller*. Hal ini menunjukkan bahwa *multiple model fuzzy controller* memberikan respon terhadap open loop dan lebih baik dibandingkan hanya menggunakan satu *fuzzy controller*. Gambar 8 menunjukkan bagaimana model-model yang berbeda-beda dipilih oleh *supervisor* untuk dapat memberikan performansi yang lebih baik pada setiap saat terlepas dari adanya perubahan parameter sistem.

**Simulasi kedua**

Pada simulasi ini massa beban yang dibawa oleh *crane* berubah dari 1000 Kg pada saat  $t = 0$  detik menjadi 1100 Kg pada saat  $t = 12$  detik kemudian berubah menjadi 1200 Kg pada saat  $t = 24$  detik dan kembali berubah menjadi 1300 Kg pada saat  $t = 36$  detik. Respon simpangan sistem ditunjukkan pada Gambar 9 dan diagram *switching* dari sistem ditunjukkan pada Gambar 10.

Seperti pada simulasi pertama saat beban berkurang, pada kasus penambahan beban *multiple model fuzzy controller* mampu memperbaiki respon yang diberikan oleh *fuzzy control* konvensional. Simpangan beban ( $\theta$ ) maksimum saat sistem tidak dikontrol adalah sebesar 0.011 radian. Simpangan ini diperbaiki menjadi maksimum sebesar 0.008 radian dengan menggunakan *fuzzy controller* konvensional dan diperbaiki menjadi maksimum sebesar 0.004 radian dengan menggunakan *multiple model fuzzy controller*. Gambar 10 menunjukkan perilaku yang serupa dengan Gambar 8. Terlihat bagaimana *supervisor* berpindah memilih model yang berbeda saat *crane* berpindah dari satu tempat ke tempat yang lain dan mengalami perubahan beban.

**V. KESIMPULAN**

Kombinasi antara prinsip *multiple model* dan *fuzzy control* terbukti berhasil meningkatkan performansi sistem dengan memperbaiki respon *transient* untuk sistem dengan non-linearitas dan ketidakpastian yang tinggi. Hal ini dibuktikan berdasarkan hasil simulasi pada model *tower crane* dengan ketidakpastian model yaitu perubahan massa beban, terlihat bahwa *multiple model fuzzy logic controller* dengan mekanisme

*switching* yang dimilikinya berhasil mengurangi besarnya simpangan pada beban ( $\emptyset$ ) dibandingkan *fuzzy logic controller* tanpa prinsip *multiple model*.

## REFERENCES

- [1] Slotine, J.J.E., and Li, W. *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991.
- [2] Garcia, S.J. et al., Modelling, simulation, and gain scheduling control of large radiotelescopes, *Simulation Practice and Theory* 8: 141-160, 2000.
- [3] Sun Z., Liu Y., Adaptive state-feedback stabilization for a class of high-order nonlinear uncertain systems. *Automatica*, 43(10): 1772–1783, 2007.
- [4] Mahdi Jalili, M. et al., Design of robust sub-optimal nonlinear Hinf controllers with some applications, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 12: 1053–1067, 2007.
- [5] Shafiq, M. and Butt, N.R., Utilizing Higher-Order Neural Networks in U-model Based Controllers for Stable Nonlinear Plants, *Journal of Control, Automation, and Systems*, 9(3):489-496, 2011.
- [6] Abid, H. et al., An Indirect Model Reference Robust Fuzzy Adaptive Control for a Class of SISO Nonlinear Systems, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 7(6):982-991, 2009.
- [7] Reznik, L., *Fuzzy Controller*, Butterworth-Heinemann, 1997.
- [8] Al-Mousa, A. A., *Control of Rotary Cranes Using Fuzzy Logic and Time-Delayed Position Feedback Control*, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [9] Narendra, K.S. and Balakrishnan, J., “Adaptive control using multiple models and switching,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 42: 171-187, 1997.
- [10] Simamora, T. *Desain dan Simulasi Multiple Model Fuzzy Logic Control pada Tower Crane*, Tugas Akhir, Universitas Kristen Maranatha, Bandung, 2011.