

# Kontrol *Fuzzy* Takagi-Sugeno Berbasis Sistem Servo Tipe 1 untuk Sistem Pendulum-Kereta

Helvin Indrawati dan Trihastuti Agustinah

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

*E-mail:* trihastuti@elect-eng.its.ac.id

**Abstrak**—Sistem Pendulum-Kereta adalah suatu plant yang terdiri dari batang pendulum yang bersumbu pada kedua sisi kereta yang dapat bergerak pada suatu lintasan dengan sumbu vertikal. Makalah ini membahas sistem kontrol *fuzzy* Takagi-Sugeno yang berbasis Sistem Servo Tipe 1 dengan plant tanpa Integral agar Sistem Pendulum-Kereta mampu bergerak mengikuti sinyal referensi berupa sinyal step dengan tetap mempertahankan batang pendulum pada posisi terbaliknya (0 radian) serta dapat mengatasi gangguan. Model nonlinear Sistem Pendulum-Kereta dapat direpresentasikan dengan model *fuzzy* Takagi-Sugeno yang didasarkan mengikuti kaidah *Paralel Distributed Compensation* (PDC). Gain state-feedback dan gain integral diperoleh dengan menggunakan metode *pole placement*. Hasil simulasi dan implementasi menunjukkan bahwa plant Sistem Pendulum-Kereta mampu mengikuti sinyal referensi step dan referensi *square wave* serta dapat tetap mempertahankan posisi pendulum pada 0 radian.

**Kata Kunci**—Sistem pendulum-kereta, *fuzzy* Takagi-Sugeno, metode *pole placement*, sistem servo tipe 1.

## I. PENDAHULUAN

SEIRING dengan perkembangan teknologi dan semakin banyaknya sistem yang nonlinear maka dibutuhkan kontrol yang tepat agar suatu sistem dapat memberikan respon yang baik. Salah satu sistem nonlinear adalah Sistem Pendulum-Kereta. Sistem Pendulum-Kereta ini terdiri dari sepasang batang pendulum yang bersumbu pada kedua sisi sebuah kereta yang dapat bergerak pada suatu trek dengan sumbu mendatar dan panjang lintasan tertentu. Karakteristik Sistem Pendulum-Kereta adalah nonlinear dan tidak stabil. Sistem Pendulum-Kereta digunakan untuk penelitian dan menguji metode-metode kontrol sehingga metode tersebut dapat diterapkan pada berbagai aplikasi dari sistem nonlinear yang lebih kompleks.

Permasalahan kontrol pada Sistem Pendulum-Kereta terdiri dari masalah swing-up (menganyunkan pendulum dari posisi menggantung ke posisi terbalik), stabilisasi (regulator) dan tracking sinyal referensi. Tujuan utama dari Makalah ini adalah mengatur posisi kereta sesuai dengan sinyal referensi step sekaligus menggerakkan batang pendulum dari posisi awal ke posisi ekuilibrium (posisi terbalik) dan menstabilkannya. Beberapa metode telah dikembangkan untuk mendapatkan solusi dari masalah *tracking* tersebut. Di antaranya menggunakan *fuzzy Tracking Controller*. Metode *fuzzy Tracking Controller* yang dilakukan oleh Andri Ashfahani [1] menghasilkan respon yang cukup baik dan *overshoot* yang cukup kecil.

Penyelesaian permasalahan dari Sistem Pendulum-Kereta menggunakan desain Sistem Servo Tipe 1 dengan plant tanpa Integral diharapkan dapat memberikan respon yang baik agar plant dapat mengikuti sinyal referensi. Model nonlinear plant Sistem Pendulum-Kereta direpresentasikan dengan model *fuzzy* Takagi-Sugeno dengan aturan kontroler *fuzzy* dibangun dengan mengikuti kaidah *Paralel Distributed Compensation* (PDC). Gain state-feedback dan gain integral diperoleh dengan menggunakan metode *pole placement*.

## II. MODEL MATEMATIKA

Pada umumnya, pendulum adalah suatu sistem yang selalu bergerak menuju ke posisi setimbangnya. Meskipun pada pendulum diberikan simpangan awal tetapi pada akhirnya pendulum ini mampu untuk kembali ke posisi setimbangnya. Sistem Pendulum-Kereta terdiri dari sepasang batang pendulum yang bersumbu pada kedua sisi kereta yang dapat bergerak pada suatu trek dengan panjang lintasan tertentu.

Model fisik Sistem Pendulum-Kereta terdiri dari dua bagian besar, yaitu kereta dan pendulum. Kereta dapat bergerak bebas pada arah horizontal dengan pendulum dapat berotasi terhadap sumbu rotasi yang terdapat pada sisi kereta. Diagram fisik Sistem Pendulum-Kereta ditunjukkan pada Gambar 1.

Model matematika Sistem Pendulum-Kereta dinyatakan dalam empat vektor *state* yaitu  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ , dengan:

$x_1$  : Posisi kereta (diukur dari titik tengah rel)

$x_2$  : Sudut pendulum terhadap garis vertikal

$x_3$  : Kecepatan kereta

$x_4$  : Kecepatan sudut pendulum

Model matematika dalam bentuk persamaan *state* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x}_1 = x_3$$

$$\dot{x}_2 = x_4$$

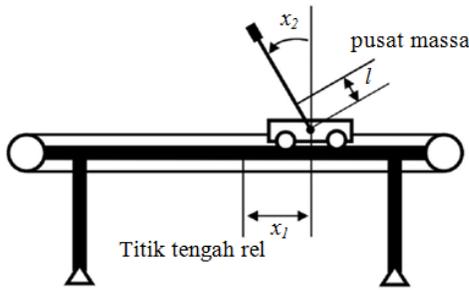
$$\dot{x}_3 = \frac{a(u - T_c - \mu x_4^2 \sin x_2) + l \cos x_2 (\mu g \sin x_2 - f_p x_4)}{J + \mu l \sin^2 x_2}$$

$$\dot{x}_4 = \frac{l \cos x_2 (u - T_c - \mu x_4^2 \sin x_2) + \mu g \sin x_2 - f_p x_4}{J + \mu l \sin^2 x_2} \quad (1)$$

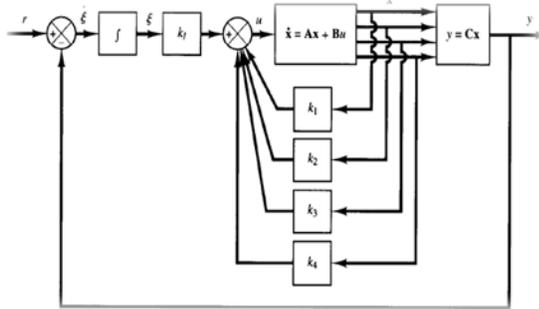
dengan:

$$a = l^2 + \frac{J}{m_c + m_p}$$

$$\mu = (m_c + m_p)l$$



Gambar. 1. Diagram fisik SPK [2].



Gambar. 2. Struktur Sistem Servo Tipe 1 dengan plant tanpa Integrator [3].

III. MODEL FUZZY TAKAGI-SUGENO

Sistem nonlinear dapat diilustrasikan dalam model fuzzy T-S yang memiliki aturan model plant yang dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut.

Aturan plant ke-*i*:  
**If**  $z_1(t)$  is  $M_{i1}$  AND ... AND  $z_j(t)$  is  $M_{ij}$   
**Then**  $\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t)$   
 $i = 1, 2, \dots, r; j = 1, 2, \dots, p$  (2)

dengan  $r$  sebagai jumlah aturan fuzzy, dan  $p$  adalah jumlah himpunan fuzzy dalam satu aturan, dan  $F$  sebagai himpunan fuzzy, dengan vektor state  $x(t) \in R^n$ , vektor kontrol masukan  $u(t) \in R^m$ , dan vektor keluaran sistem  $y(t) \in R^q$ , sedangkan  $z(t) \in R^l$  merupakan variabel pada bagian premis.

Model fuzzy T-S secara keseluruhan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \alpha_i(z(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)]$$
 (3)

dengan:

$$\alpha_i(z(t)) = \frac{\mu_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))} \text{ dan } \mu_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t))$$

Bentuk  $(M_{ij} z_j(t))$  merupakan tingkat keanggotaan dari  $z_j(t)$  pada  $M_{ij}$  dengan asumsi:

$$\mu_i(z(t)) \geq 0; \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) > 0$$

$$\alpha_i(z(t)) \geq 0; \sum_{i=1}^r \alpha_i(z(t)) = 1$$
 (4)

Kontroler state feedback dapat disusun dengan konsep Parallel Distributed Compensation (P

DC). Dalam konsep PDC, tiap aturan kontroler dirancang berdasarkan aturan model plant linear yang bersesuaian dengan menggunakan himpunan fuzzy yang sama dengan aturan plant. Untuk setiap aturan, gain kontroler dapat diperoleh dengan menggunakan teknik desain kontrol linear.

Dari aturan plant yang ada, dapat disusun aturan kontroler fuzzy dengan konsep PDC sebagai berikut.

Aturan kontroler ke-*i* :

**If**  $z_1(t)$  is  $M_{i1}$  AND ... AND  $z_j(t)$  is  $M_{ij}$   
**Then**  $u(t) = -K_i x(t)$   
 $i = 1, 2, \dots, r; j = 1, 2, \dots, p$  (5)

Keluaran dari kontroler fuzzy pada Persamaan (5) secara keseluruhan dapat dinyatakan dengan:

$$u(t) = - \sum_{j=1}^r \alpha_j(z(t)) [K_j x(t)]$$
 (6)

Substitusi Persamaan (5) ke Persamaan (6) maka akan diperoleh sistem loop tertutup:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \alpha_i(z(t)) \alpha_j(z(t)) [(A_i - B_i K_j) x(t)]$$
 (7)

Sesuai dengan sifat pembobot  $\alpha_i(z(t))$  pada Persamaan (4), maka Persamaan (7) dapat disederhanakan seperti pada Persamaan berikut:

$$\dot{x}(t) = (A_i - B_i K_j) x(t)$$

$$i = 1, 2, \dots, r; j = 1, 2, \dots, r$$
 (8)

IV. DESAIN SISTEM SERVO TIPE 1

Sistem kontrol tracking berbasis servo tipe 1 dirancang untuk mengontrol posisi kereta dari sistem Sistem Pendulum-Kereta sehingga dapat mengikuti sinyal referensi yang diberikan sekaligus menjaga keseimbangan batang pendulum dari sistem tersebut supaya tetap pada posisi terbalik. Aturan kontroler disusun dengan konsep PDC. Pencarian matrik gain kontrol (state feedback)  $K$  dan integrator  $k_I$  dapat dilakukan dengan teknik pole placement.

Sistem Pendulum-Kereta merupakan sistem tanpa integral. Prinsip dari sistem tipe 1 adalah adanya integral pada seperti yang diperlihatkan oleh diagram blok pada Gambar 2. Pada diagram blok digambarkan bahwa sinyal error merupakan masukan integrator yang kemudian dikali dengan gain integrator. Variabel state dari sistem dikalikan dengan gain state-feedback. Sinyal dari blok gain state-feedback dan gain integral dijumlahkan dan digunakan sebagai sinyal kontrol untuk stabilisasi maupun tracking.

Dari diagram tersebut, diketahui suatu sistem mempunyai persamaan:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$
 (9)

Persamaan sinyal *input* kontrol dan *error* masing-masing dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$u = -Kx + k_i \xi \quad (10)$$

$$\dot{\xi} = r - y = r - Cx \quad (11)$$

dengan:

$x$  = *state* vektor pada *plant*

$u$  = sinyal kontrol

$y$  = sinyal *output*

$\xi$  = *output* integrator

$r$  = sinyal referensi

### V. PEMBAHASAN DAN PERANCANGAN

Model matematika pada Persamaan (1) merupakan persamaan nonlinear, sehingga untuk mendapatkan matrik *state space* yang digunakan untuk kontrol pendulum dilakukan linearisasi pada beberapa titik kerja. Titik kerja yang dipakai pada sudut pendulum adalah 0 rad, 0,25 rad dan 0,5 rad.

Persamaan model linear adalah sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

dengan:

$$A = \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x=x^*} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_2} & \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_3} & \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_2} & \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_3} & \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_1} & \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_2} & \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_3} & \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial \dot{x}_4}{\partial x_1} & \frac{\partial \dot{x}_4}{\partial x_2} & \frac{\partial \dot{x}_4}{\partial x_3} & \frac{\partial \dot{x}_4}{\partial x_4} \end{bmatrix}$$

$$B = \left. \frac{\partial h(x, u)}{\partial u} \right|_{\substack{x=x^* \\ u=u^*}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial u} \\ \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial u} \\ \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial u} \\ \frac{\partial \dot{x}_4}{\partial u} \end{bmatrix}$$

Hasil linearisasi pada sudut 0 radian (0 derajat)

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0,2525 & 0 & -0,00013 \\ 0 & 15,0421 & 0 & -0,0079 \end{bmatrix}; B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,8272 \\ 1,2369 \end{bmatrix}$$

Hasil linearisasi pada sudut 0,25 radian (14,3 derajat)

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0,2205 & 0 & -0,00013 \\ 0 & 14,5058 & 0 & -0,0079 \end{bmatrix}; B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,8259 \\ 1,1966 \end{bmatrix}$$

Hasil linearisasi pada sudut 0,5 radian (28,6 derajat)

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0,1334 & 0 & -0,0001 \\ 0 & 12,9686 & 0 & -0,0079 \end{bmatrix}; B_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,8244 \\ 1,079 \end{bmatrix}$$

Matriks keluaran untuk titik kerja tersebut adalah:

$$C_1 = C_2 = C_3 = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (12)$$

Dengan menggunakan konsep *fuzzy* Takagi-Sugeno pada persamaan (2) hingga (8), maka aturan *plant* dapat disusun sebagai berikut:

aturan 1 untuk *plant*:

**If**  $x_2$  adalah  $M_1$  (sekitar 0 radian)

**Then**  $\dot{x}(t) = A_1x(t) + B_1u(t)$

$y = C_1x(t)$  (13)

aturan 2 untuk *plant*:

**If**  $x_2$  adalah  $M_2$  (sekitar  $\pm 0,25$  radian)

**Then**  $\dot{x}(t) = A_2x(t) + B_2u(t)$

$y = C_2x(t)$  (14)

aturan 3 untuk *plant*:

**If**  $x_2$  adalah  $M_3$  (sekitar  $\pm 0,5$  radian)

**Then**  $\dot{x}(t) = A_3x(t) + B_3u(t)$

$y = C_3x(t)$  (15)

Dengan menggunakan konsep PDC, dapat disusun aturan kontroler *fuzzy* yang bersesuaian dengan aturan *plant* sebagai berikut:

aturan 1 untuk kontroler:

**If**  $x_2$  adalah  $M_1$  (sekitar 0 radian)

**Then**  $u(t) = -K_1x(t) + k_{i1}\xi(t)$  (16)

aturan 2 untuk kontroler:

**If**  $x_2$  adalah  $M_2$  (sekitar  $\pm 0,25$  radian)

**Then**  $u(t) = -K_2x(t) + k_{i2}\xi(t)$  (17)

aturan 3 untuk kontroler:

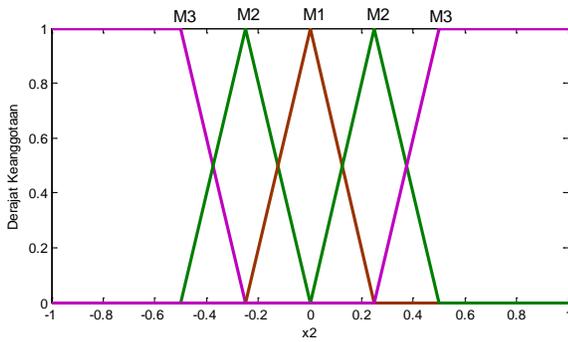
**If**  $x_2$  adalah  $M_3$  (sekitar  $\pm 0,5$  radian)

**Then**  $u(t) = -K_3x(t) + k_{i3}\xi(t)$  (18)

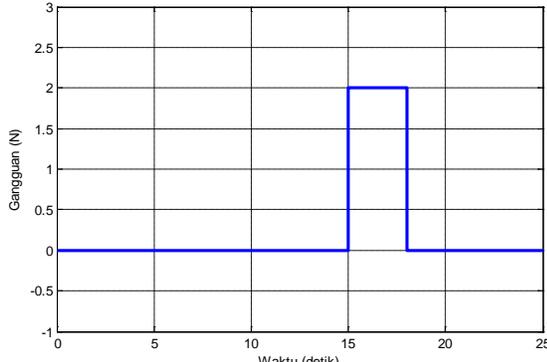
Setelah memperoleh hasil linearisasi berupa *state space*, gain state-feedback  $K$  dan gain integral  $k_i$  untuk masing-masing model linear diperoleh dengan menggunakan metode *pole placement*. Matrik gain kontrol  $K$  dan integrator  $k_i$  dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} A_i & 0 \\ -C_i & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_i \\ 0 \end{bmatrix} [K \ k_i] \quad (19)$$

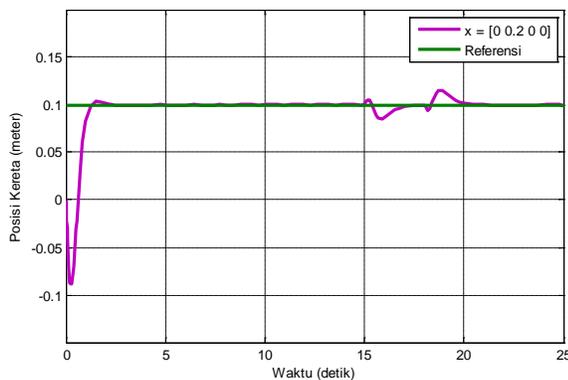
Nilai *pole-pole* yang digunakan untuk memperoleh gain state-feedback dan gain integral menurut daerah titik kerjanya adalah sebagai berikut:



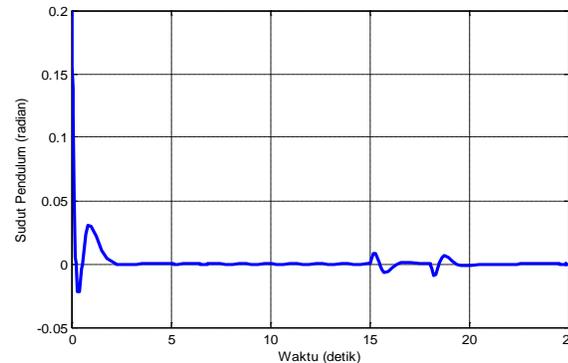
Gambar. 3. Fungsi keanggotaan  $M_1$ ,  $M_2$  dan  $M_3$ .



Gambar. 4. Gangguan Step pada Sinyal Kontrol.



Gambar. 5. Hasil Simulasi Posisi Kereta Menggunakan Sinyal Referensi Step dengan Gangguan.



Gambar. 6. Hasil Simulasi Sudut Pendulum Menggunakan Sinyal Referensi Step dengan Gangguan.

Dengan menggunakan program Matlab, maka diperoleh nilai gain state-feedback dan gain integral yaitu:

$$K_1 = [-136,6589 \ 257,0988 \ -73,5903 \ 66,9912]$$

$$K_{I1} = [-111,3173]$$

$$K_2 = [-141,4907 \ 268,5187 \ -76,4585 \ 71,1492]$$

$$K_{I2} = [-115,2514]$$

$$K_3 = [-157,5809 \ 308,1731 \ -86,1435 \ 86,0218]$$

$$K_{I3} = [-128,3515]$$

VI. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pada bab ini akan membahas mengenai hasil-hasil yang didapatkan dari simulasi yang dilakukan menggunakan *software* Matlab/Simulink maupun implementasi pada *plant* Sistem Pendulum. Simulasi dilakukan dengan linearisasi *plant* Sistem Pendulum-Kereta dengan titik kerja 0 radian, 0,25 radian dan 0,5 radian. Kemudian hasil dari simulasi yang telah dilakukan pada *software* ini akan digunakan sebagai acuan untuk implementasi sistem kontrol pada *plant* Sistem Pendulum-Kereta “*Digital Pendulum Mechanical Unit 33-200*” dari *Feedback Instrument Ltd*.

A. Simulasi

Simulasi menggunakan gangguan dilakukan pada sinyal step, dengan memberikan gangguan pada sinyal kontrol. Gangguan diberikan pada interval 15-18 detik.

Respon sistem diperlihatkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Pada Gambar 5 memperlihatkan posisi kereta saat sistem berjalan dengan diberikan gangguan. Ketika gangguan diberikan, terjadi penyimpangan sebesar 0,02 meter dan penyimpangan kembali terjadi setelah gangguan selesai. Selanjutnya sistem mampu mengatasi gangguan dan kembali mengikuti sinyal referensi setelah 2 detik. Gambar 5 menunjukkan respon posisi sudut pendulum saat diberi gangguan. sudut pendulum mengalami penyimpangan sebesar 0,01 radian saat  $t=15$  detik dan ketika gangguan dihilangkan, sudut pendulum mengalami penyimpangan sebesar senilai 0,01 radian saat  $t=18$  detik.

Simulasi selanjutnya dilakukan dengan memberikan gangguan pada masukan step dari sinyal *square wave*. Gangguan diberikan pada interval 12-15 detik dan 30-33detik sebesar 2 Newton. Setelah diberi gangguan pada sinyal kontrol, dapat diamati pada Gambar 8 bahwa respon posisi kereta dapat mengatasi gangguan yang diberikan walaupun terjadi penyimpangan posisi sejauh 0,01 meter pada detik ke-12 maupun pada detik ke-30. Penyimpangan kembali terjadi sejauh 0,014 meter pada detik ke-15 dan sejauh 0,015 meter pada detik ke-33. Setelah terjadi penyimpangan umumnya posisi kereta dapat kembali dalam waktu 2 detik.

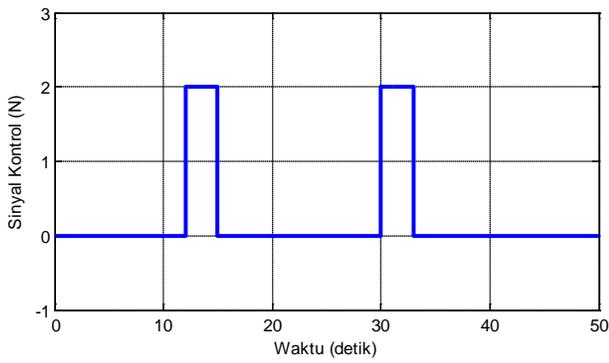
Pada posisi sudut pendulum saat diberi gangguan. sudut pendulum mengalami penyimpangan sebesar 0,013 radian pada detik ke-12 dan detik ke-30 dan ketika gangguan dihilangkan, sudut pendulum mengalami penyimpangan sebesar 0,012 radian pada detik ke-15 dan detik ke-33.

Dapat disimpulkan bahwa kontroler *fuzzy* Takagi-Sugeno berbasis Sistem Servo Tipe 1 dengan sistem tanpa Integral mampu mengatasi adanya gangguan yang diberikan pada sinyal kontrol untuk masukan dari sinyal step maupun sinyal *square wave*.

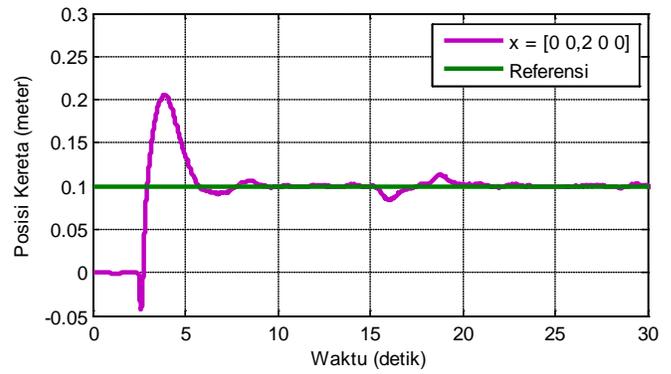
$$P_1 = [-6,0 \ -5,1 \ -4,3 \ -4,1 \ -3,2]$$

$$P_2 = [-6,1 \ -5,3 \ -4,5 \ -4,3 \ -3,4]$$

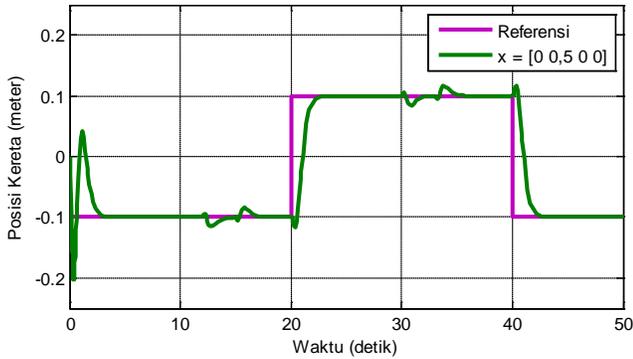
$$P_3 = [-6,2 \ -5,5 \ -4,7 \ -4,5 \ -3,6]$$



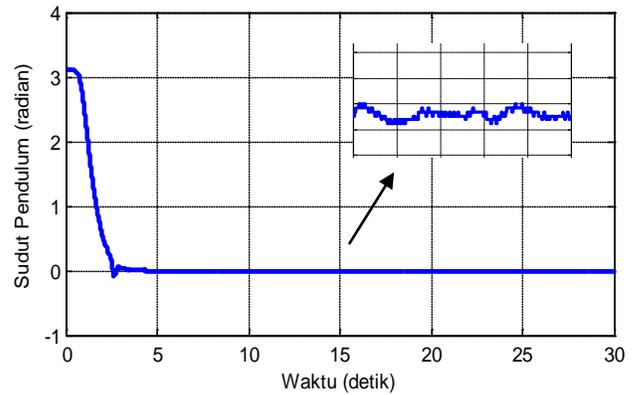
Gambar. 7. Gangguan Step pada Sinyal Kontrol.



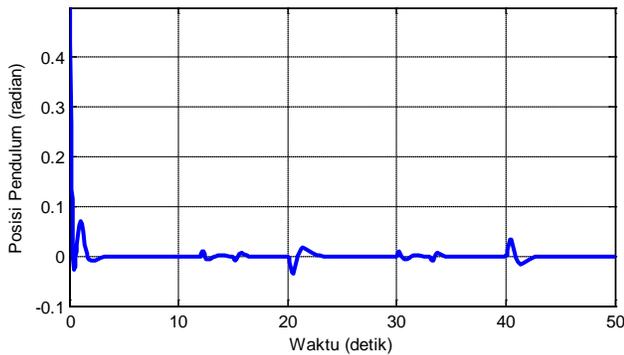
Gambar. 10. Respon Posisi Kereta Menggunakan Sinyal Referensi Step dengan Gangguan .



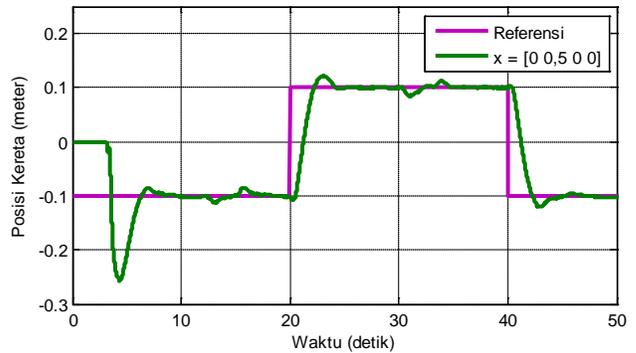
Gambar. 8. Hasil Simulasi Posisi Kereta Menggunakan Sinyal Referensi Square Wave dengan Gangguan.



Gambar. 11. Respon Sudut Pendulum Menggunakan Sinyal Referensi Step dengan Gangguan.



Gambar. 9. Hasil Simulasi Sudut Menggunakan Sinyal Referensi Square Wave Pendulum dengan Gangguan.

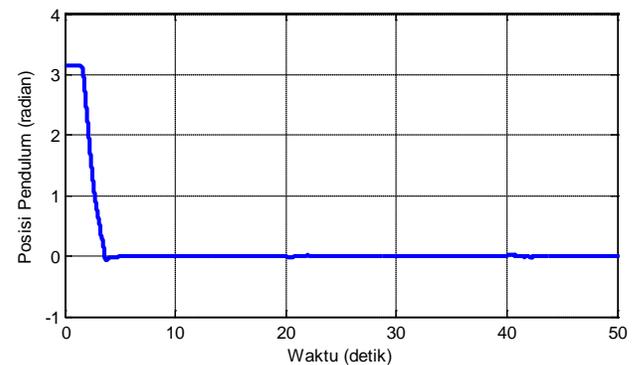


Gambar. 12. Respon Posisi Kereta Menggunakan Sinyal Referensi Square Wave dengan Gangguan.

**B. Implementasi**

Pada Implementasi ini sistem dijalankan dengan memberikan gangguan step sebesar 2 Nm pada sinyal kontrol. Kereta diberi inialisasi awal sebesar 0,2 radian, sedangkan *state* yang lain diberi kondisi awal 0. Gangguan diberikan pada interval 15-18 detik untuk sinyal referensi step. Pada sinyal referensi *square wave* gangguan diberikan dengan interval waktu 12-15 detik dan 30-33detik.

Gambar 10 menunjukkan respon posisi kereta setelah diberi gangguan pada sinyal kontrol. Dari gambar tersebut dapat diamati bahwa respon posisi kereta dapat mengatasi gangguan yang diberikan walaupun terjadi penyimpangan posisi sejauh 0,85 meter pada detik ke-15. Penyimpangan kembali terjadi pada detik ke-18 sejauh 0,11 meter. Hal ini menandakan bahwa sistem melawan gangguan 2 Nm yang diberikan. Setelah detik ke-20 kereta kembali menuju ke titik asal yaitu 0,1 meter.



Gambar. 13. Posisi Sudut Pendulum Menggunakan Sinyal Referensi Square Wave dengan Gangguan.

Posisi sudut pendulum saat diberi gangguan dapat diamati. pada Gambar 11. Pada gambar dapat dilihat bahwa sudut pendulum mengalami penyimpangan sebesar 0,1 radian pada detik ke-15 dan ketika gangguan dihilangkan, sudut pendulum kembali mengalami penyimpangan sebesar 0,1 radian pada detik ke-18. Setelah detik ke-20 posisi sudut pendulum kembali menuju 0 radian.

Gangguan pada implementasi dilakukan pada masukan dari sinyal *square wave* dengan amplitudo 0,1 dan frekuensi 0,025. Gangguan diberikan pada interval waktu 12-15 detik dan 30-33 detik. Pada Gambar 12 dapat diamati bahwa kereta mengalami *underhoot* sejauh 0,25 meter. Setelah diberi gangguan pada detik ke-12 dan detik ke-30 terjadi penyimpangan kereta sejauh sejauh 0,01 meter dan 0,008 meter. Penyimpangan kembali terjadi sejauh 0,016 meter dan 0,01 meter ketika gangguan dihilangkan yaitu pada detik ke-15 dan detik ke-33. Kemudian kereta kembali bergerak mengikuti sinyal referensi.

Pada Gambar 13 dapat dilihat respon sudut pendulum yang telah diberi gangguan. Dari gambar dapat dilihat ketika diberi gangguan tidak terjadi penyimpangan pada detik ke-12 maupun detik ke-30.

Hasil yang diperoleh pada implementasi memiliki bentuk yang sesuai dengan hasil dari simulasi. Dapat disimpulkan bahwa implementasi pada Sistem Pendulum-Kereta dengan kontroler *fuzzy* Takagi-Sugeno berbasis Sistem Servo Tipe 1 tanpa Integral dapat mengatasi adanya gangguan yang diberikan pada sinyal kontrol.

## VII. KESIMPULAN

Setelah melakukan pengujian pada Makalah ini menggunakan sistem kontrol *fuzzy* Takagi-Sugeno dengan struktur Sistem Servo Tipe 1 dengan *plant* tanpa Integral yang

telah dirancang, baik dengan simulasi maupun implementasi dapat diambil kesimpulan sebagai berikut

1. Hasil simulasi dari sistem kontrol *fuzzy* Takagi-Sugeno yang telah dibuat menunjukkan bahwa posisi kereta dapat mengikuti masukan berupa referensi step dan referensi *square wave* serta batang pendulum dapat distabilkan pada titik di sekitar nol radian.
2. Hasil implementasi menunjukkan bahwa posisi kereta dapat mengikuti masukan berupa referensi step dan referensi *square wave* yang diberikan serta batang pendulum dapat distabilkan pada titik di sekitar nol radian.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ashfahani, A., "Kontrol Tracking Pada Sistem Pendulum Terbalik Berbasis Model *fuzzy* Takagi-Sugeno Menggunakan Pendekatan BMI" Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2010.
- [2] \_\_\_\_\_, Book "Control in Digital Pendulum environment". Feedback Instruments Ltd., Crowborough England, 2003.
- [3] Agustinah, T., Bahrudin, A., dan Jazidie, A. , "Implementasi Kontrol Tracking *fuzzy* Menggunakan Sistem Servo Tipe Integral Berbasis Observer *fuzzy* Takagi-Sugeno pada Inverted Pendulum", Proceeding Seminar Nasional Electrical, Informatics, and It's Education, Malang, 2009.
- [4] Raharja, K., "Perancangan kontroler *fuzzy* T-S berbasis performansi LQR melalui pendekatan LMI untuk plant pendulum" Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2010.
- [5] Ma, Xion-Jun, Zhang, S., " Output Tracking and Regulation of Nonlinear System Based on Takagi-Sugeno *fuzzy* Model", IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics, vol. 30, No. 1. 2000.
- [6] Wang H.O., K. Tanaka K, and Griffin M.F., "An approach to *fuzzy* control of nonlinear systems: stability and design issues" IEEE Trans. *fuzzy* Systems, vol. 4, N°1, pp. 14-23, 1996.
- [7] Tanaka, K., Wang,, Hua O., " *fuzzy* Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach", John Wiley & Sons, Inc., Ch.2, 2001.
- [8] Martania, A. D. , "Implementasi Nonlinear Quadratic Tracking dengan Regresi Kuadratik untuk Inverted Pendulum", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2007.