

Stabilisasi Pada Sistem Pendulum-Kereta dengan Menggunakan Metode *Fuzzy-Sliding Mode Control*

Niora Fatimah Tanzania, Trihastuti Agustinah

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: niora.fatimah@gmail.com, trihastuti@elect-eng.its.ac.id

Abstrak—Sistem Pendulum-Kereta merupakan salah satu sistem nonlinear yang memiliki karakteristik sederhana namun sulit untuk dikontrol, sehingga sering digunakan untuk menguji berbagai metode kontrol. Pada Tugas Akhir ini membahas mengenai stabilisasi pada sistem pendulum-kereta dengan menggunakan metode *Fuzzy-Sliding Mode Control* agar sistem pendulum-kereta mampu mempertahankan batang pendulum dalam posisi terbaliknya dan tahan terhadap gangguan. Model nonlinear sistem pendulum-kereta akan direpresentasikan dalam model *fuzzy* Takagi-Sugeno untuk dua titik kerja. Dengan menggunakan model *fuzzy* Takagi-Sugeno tersebut, dipilih sebuah permukaan luncur. Terdapat dua sinyal kontrol pada *Sliding Mode Control* yaitu sinyal kontrol ekuivalen yang memaksa *state* menuju permukaan luncur dan sinyal kontrol natural yang mempertahankan *state* dipermukaan luncur serta memberikan kekokohan sistem terhadap ketidakpastian. *Gain* pada sinyal kontrol ekuivalen akan didesain dengan menggunakan *Ackermann's Formula*. Hasil simulasi dan implementasi menunjukkan bahwa batang pendulum dapat stabil pada posisi terbaliknya (0 radian) dan mampu mengkompensasi gangguan yang terjadi pada sistem.

Kata Kunci— Sistem Pendulum-Kereta, stabilisasi, *Fuzzy-Sliding Mode Control*, model *Fuzzy* Takagi-Sugeno, *Ackermann's Formula*

I. PENDAHULUAN

Sistem pendulum-kereta adalah salah satu sistem yang biasa dipelajari didalam sistem pengaturan. Sistem pendulum-kereta merupakan salah satu dari *plant* nonlinear yang memiliki karakteristik yang sederhana [3], namun sulit untuk dikontrol. Bagian utama dari sistem pendulum-kereta adalah kereta dan pendulum. Kereta dapat bergerak horizontal pada lintasan yang terbatas, sedangkan pendulum dapat berayun bebas terhadap porosnya. Sistem pendulum-kereta biasa digunakan untuk menguji suatu metode kontrol sehingga metode kontrol tersebut dapat diterapkan pada berbagai aplikasi dari sistem nonlinear yang lebih kompleks.

Terdapat tiga permasalahan kontrol pada sistem pendulum-kereta, yaitu *swing-up*, stabilisasi, dan *tracking*. *Swing-up* adalah usaha yang dilakukan untuk mengayunkan batang pendulum dari posisi menggantung ke posisi terbaliknya. Stabilisasi adalah usaha yang dilakukan untuk menjaga batang pendulum tetap stabil pada posisi terbaliknya. *Tracking* adalah usaha yang dilakukan untuk

memaksa sistem pendulum-kereta bergerak mengikuti sinyal referensi dengan tetap mempertahankan batang pendulum pada posisi terbaliknya. Suatu sistem nonlinear seperti sistem pendulum-kereta, apabila tidak dikontrol akan

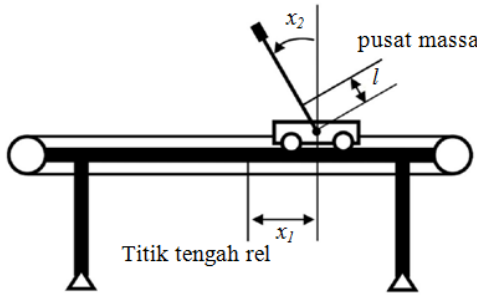
mempengaruhi kestabilan sistem. Oleh karena itu digunakan suatu metode kontrol yang bersifat *robust* untuk menjaga kestabilan sistem.

Pada tugas akhir ini digunakan gabungan metode kontrol *fuzzy* Takagi Sugeno [6], [7] dan metode *Sliding Mode Control* [3], [4], [5] untuk menstabilkan pendulum pada posisi terbaliknya (sudut 0 radian terhadap garis vertikal) dan posisi kereta berada pada titik tengah lintasan rel kereta. *Sliding Mode Control* adalah suatu metode kontrol yang mampu bekerja baik pada sistem linear maupun sistem nonlinear. Metode pengontrolan *sliding mode control* adalah dengan menggunakan kontrol penyaklaran berkecepatan tinggi untuk men-*drive* trayektori *state* dari *plant* menuju sebuah permukaan khusus yang ditentukan dalam ruang *state*, yang biasa disebut dengan permukaan luncur (proses ini disebut dengan *reaching mode*) dan kemudian mempertahankan trayektori *state* dari *plant* tetap berada sepanjang permukaan luncur (gerak tersebut disebut *sliding mode*). Metode *sliding mode control* akan didesain dengan menggunakan *ackermann's formula* [1] untuk memberikan kekokohan sistem, sehingga dihasilkan kinerja kontrol yang lebih baik.

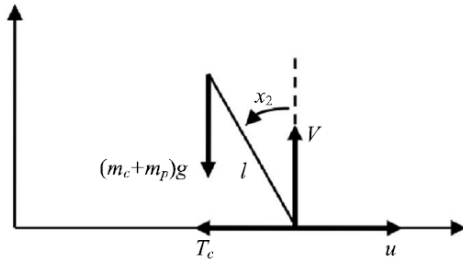
Metode kontrol *fuzzy* digunakan untuk menghasilkan sinyal kontrol pada setiap daerah kerja yang berbeda. Untuk merepresentasikan sistem nonlinear pada sistem pendulum-kereta digunakan model *fuzzy* Takagi-Sugeno (T-S). Dengan menggunakan model *fuzzy* Takagi-Sugeno, sistem pendulum-kereta dapat digambarkan sebagai beberapa model linear yang mewakili untuk setiap daerah operasi yang berbeda. Model keseluruhan sistem adalah gabungan dari model-model linear tersebut.

II. MODEL MATEMATIKA SISTEMPENDULUM-KERETA

Sistem pendulum-kereta terdiri dari kereta dan pendulum. Kereta dapat bergerak ke kiri dan ke kanan pada lintasan yang terbatas dan pendulum dapat berotasi terhadap sumbu rotasi yang terdapat pada sisi kereta. Diagram fisik sistem pendulum-kereta dapat dilihat pada Gambar 1 dan pada Gambar 2 dapat dilihat komponen gaya yang terdapat pada sistem pendulum-kereta.



Gambar 1 Diagram Fisik Sistem Pendulum-Kereta



Gambar 2 Komponen Gaya Sistem Pendulum-Kereta

Sistem pendulum-kereta memiliki empat elemen vektor *state* yang dinyatakan dalam \mathbf{x} . Keempat elemen vektor *state* tersebut adalah:

- x_1 : Posisi kereta (diukur dari titik tengah rel), x
- x_2 : Sudut pendulum terhadap garis vertikal, θ_p
- x_3 : Kecepatan kereta, v
- x_4 : Kecepatan sudut pendulum, ω_p

Dan jika ditulis dalam vektor \mathbf{x} sebagai berikut:

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T \tag{1}$$

Model matematika dalam bentuk persamaan *state* dapat dituliskan menjadi:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_3 \\ \dot{x}_2 &= x_4 \\ \dot{x}_3 &= \frac{a(u - T_c - \mu x_4^2 \sin x_2) + l \cos x_2 (\mu g \sin x_2 - f_p x_4)}{J + \mu l \sin^2 x_2} \\ \dot{x}_4 &= \frac{l \cos x_2 (u - T_c - \mu x_4^2 \sin x_2) + \mu g \sin x_2 - f_p x_4}{J + \mu l \sin^2 x_2} \end{aligned} \tag{2}$$

dengan:

$$\begin{aligned} a &= l^2 + \frac{J}{m_c + m_p} \\ \mu &= (m_c + m_p)l \end{aligned}$$

III. FUZZY-SLIDING MODE CONTROL

Suatu sistem:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u_{eq} \tag{1}$$

dengan

$$u_{eq} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \tag{2}$$

Persamaan (1) sistem dapat diubah menjadi

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x} \tag{3}$$

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K} \tag{4}$$

Persamaan karakteristik yang diinginkan adalah

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}| = |s\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{A}}|$$

$$\begin{aligned} &= (s - \mu_1)(s - \mu_2) \dots (s - \mu_n) \\ &= s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n \end{aligned} \tag{5}$$

Teorema Cayley-Hamilton menyatakan bahwa $\tilde{\mathbf{A}}$ memenuhi persamaan karakteristik sebagai berikut:

$$\phi(\tilde{\mathbf{A}}) = \tilde{\mathbf{A}}^n + \alpha_1 \tilde{\mathbf{A}}^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} \tilde{\mathbf{A}} + \alpha_n \mathbf{I} \tag{6}$$

Maka *Gain* kontrol \mathbf{K} dapat diperoleh dari persamaan *ackermann's formula*.

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= \mathbf{e}^T \phi(\mathbf{A}) \\ \mathbf{e}^T &= [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] [\mathbf{B} \ : \ \mathbf{A}\mathbf{B} \ : \ \dots \ : \ \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}]^{-1} \end{aligned} \tag{7}$$

Permukaan luncur dinyatakan sebagai berikut:

$$s = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \tag{8}$$

dengan

$$\mathbf{c}^T = \mathbf{e}^T (\mathbf{A} - \lambda_1 \mathbf{I})(\mathbf{A} - \lambda_2 \mathbf{I}) \dots (\mathbf{A} - \lambda_{n-1} \mathbf{I}) \tag{9}$$

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}$ merupakan eigen value dinamis didalam *plane* $s = \mathbf{c}^T \mathbf{x} = 0$.

Sedangkan untuk mendesain sinyal kontrol natural digunakan analisis kestabilan Liapunov. Sebuah fungsi definit positif dipilih sebagai kandidat Liapunov sebagai berikut:

$$V(t) = \frac{1}{2} s^2 \tag{10}$$

sehingga turunan fungsi Liapunov menjadi:

$$\dot{V}(t) = s \cdot \dot{s} \tag{11}$$

dengan

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \mathbf{c}^T (\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(u_n + u_{eq})) \\ \dot{s} &= (\mathbf{c}^T \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{c}^T \mathbf{B}u_n) + (\mathbf{c}^T \mathbf{B}u_{eq}) \\ &= \mathbf{c}^T \mathbf{B}u_n = u_n^* \end{aligned}$$

Mengacu pada syarat kestabilan Lyapunov, $\dot{V}(t) < 0$ maka

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &< 0 \\ s \cdot \dot{s} &< 0 \\ s \cdot u_n^* &< 0 \end{aligned}$$

Syarat ini akan terpenuhi jika:

- a) $s < 0$, maka $u_n^* > 0$
- b) $s > 0$, maka $u_n^* < 0$

Maka akan terjadi penyaklaran untuk mempertahankan trayektori *state* tetap berada pada permukaan luncur. Sinyal kontrol natural dirumuskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$u_n = -q \operatorname{sgn}(s) \tag{12}$$

Untuk mengurangi *chattering* yang timbul akibat fungsi penyaklaran, maka dilakukan perubahan sinyal kontrol, sehingga sinyal kontrol natural menjadi:

$$u_n = -q \text{ sat } (s) \tag{13}$$

Model *fuzzy* Takagi-Sugeno digunakan untuk merepresentasikan sistem nonlinear menjadi beberapa model linear. Berikut ini merupakan cara penulisan aturan **If-Then**:

Aturan *plant* ke-*i*:

If $z_1(t)$ is M_{i1} AND ... AND $z_j(t)$ is M_{ij} ,

Then $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i u(t)$
 $y(t) = \mathbf{C}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_i u(t)$
 $i = 1, 2, \dots, r \quad j = 1, 2, \dots, p$ (14)

dengan M_{ij} adalah himpunan *fuzzy*, r adalah jumlah aturan *fuzzy*, dan p adalah jumlah himpunan *fuzzy* dalam satu aturan, dengan vektor *state* $\mathbf{x}(t) \in R^n$, vektor kontrol masukan $u(t) \in R^m$, dan vektor keluaran sistem $y(t) \in R^q$, sedangkan variabel pada bagian premis yang dapat berupa fungsi dari variabel *state* adalah $z(t) \in R^j$, dan gangguan eksternal. Diasumsikan bahwa variabel pada bagian premis bukan fungsi dari variabel masukan $u(t)$. Model linear direpresentasikan dengan $\mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i u(t)$ yang disebut dengan *subsystem*.

Pada inferensi *fuzzy* yang menggunakan logika penghubung AND (operator *product*) dan metode fuzzifikasi *center (weighted) average*, maka model *fuzzy* Takagi-Sugeno secara keseluruhan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) [\mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i u(t)] \tag{15}$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) [\mathbf{C}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_i u(t)] \tag{16}$$

dengan

$$w_i(z(t)) = \frac{\mu_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))}; \mu_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t)) \tag{17}$$

Pembobot $w_i(z(t))$ dan derajat keanggotaan $\mu_i(z_i(t))$ memiliki sifat sebagai berikut:

$$w_i(z(t)) \geq 0; \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) = 1 \tag{18}$$

$$\mu_i(z(t)) \geq 0; \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) > 1 \tag{19}$$

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 $u(t) = -\mathbf{K}_i \mathbf{x}(t)$
 $i = 1, 2, \dots, r \quad j = 1, 2, \dots, p$ (20)

Secara keseluruhan, keluaran dari kontroler *fuzzy* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$u(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) [-\mathbf{K}_i \mathbf{x}(t)] \tag{21}$$

Maka model *fuzzy* Takagi-Sugeno dapat dituliskan menjadi sistem lup tertutup sebagai berikut:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r w_i(z(t)) w_j(z(t)) [(\mathbf{A}_i - \mathbf{B}_i \mathbf{K}_j) \mathbf{x}(t)] \tag{22}$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r w_i(z(t)) w_j(z(t)) [(\mathbf{C}_i - \mathbf{D}_i \mathbf{K}_j) \mathbf{x}(t)] \tag{23}$$

Dengan mengacu pada Persamaan (18) dan (19), maka model pada Persamaan (22) dan (23) disederhanakan menjadi:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A}_i - \mathbf{B}_i \mathbf{K}_j) \mathbf{x}(t) \tag{24}$$

$$y(t) = (\mathbf{C}_i - \mathbf{D}_i \mathbf{K}_j) \mathbf{x}(t) \tag{25}$$

$i = 1, 2, \dots, r \quad j = 1, 2, \dots, p$

IV. SIMULASI DAN IMPLEMENTASI PADA SISTEM PENDULUM-KERETA

Pada bagian ini dilakukan pengujian simulasi dan implementasi sistem kontrol yang telah dirancang. Sistem pendulum-kereta akan dilinearisasi pada dua titik kerja yaitu di titik kerja $x_2^* = 0$ radian dan $x_2^* = \pm 0,3$ radian.

Untuk titik kerja pertama, diperoleh:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1 \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 u \tag{26}$$

dengan

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0,25256 & 0 & -0,00013 \\ 0 & 15,04211 & 0 & -0,00791 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,82722 \\ 1,23699 \end{bmatrix} \tag{27}$$

Dan untuk titik kerja kedua, diperoleh:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{B}_2 u \tag{28}$$

dengan

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0,2069 & 0 & -0,0001 \\ 0 & 14,2737 & 0 & -0,0079 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,8254 \\ 1,1791 \end{bmatrix} \tag{29}$$

Model *fuzzy* Takagi-Sugeno yang digunakan memiliki dua aturan dan satu variabel premis, yaitu posisi sudut pendulum. Dari Persamaan (14), dengan menggunakan model linear pada Persamaan (27) dan (29), maka model *fuzzy* Takagi-Sugeno dibentuk dengan aturan sebagai berikut:

Aturan model *plant* ke-1:

If x_2 is M_1 (sekitar 0 radian)
Then $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1 \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 u$
 $y = \mathbf{C}_1 \mathbf{x}$ (30)

Aturan model *plant* ke-2:

If x_2 is M_2 (sekitar $\pm 0,3$ radian)
Then $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_2\mathbf{x} + \mathbf{B}_2u$
 $y = \mathbf{C}_2\mathbf{x}$ (31)

Sesuai dengan konsep PDC maka dapat disusun suatu aturan kontroler yang bersesuaian dengan aturan *plant* pada Persamaan (30) dan (31) yaitu:

Aturan kontroler *plant* ke-1:

If x_2 is M_1 (sekitar 0 radian)
Then $u_{eq} = -\mathbf{K}_1\mathbf{x}$
 $u_n = -q_1 \text{ sat } s_1$ (32)

Aturan kontroler *plant* ke-2:

If x_2 is M_2 (sekitar $\pm 0,3$ radian)
Then $u_{eq} = -\mathbf{K}_2\mathbf{x}$
 $u_n = -q_2 \text{ sat } s_2$ (33)

Dari model *fuzzy* Takagi-Sugeno tersebut maka diperoleh sinyal kontrol yang dituliskan sebagai berikut:

$$u_{eq} = \sum_{i=1}^2 M_i(x_2) [-\mathbf{K}_i\mathbf{x}] \quad (34)$$

$$u_n = \sum_{i=1}^2 M_i(x_2) [-q_i \text{ sat } s_i] \quad (35)$$

Fungsi keanggotaan M_1 yang digunakan adalah fungsi keanggotaan *gaussian* dan fungsi keanggotaan M_2 yang digunakan merupakan komplemen dari fungsi keanggotaan M_1 . Fungsi keanggotaan M_1 memiliki parameter dengan $c = 0$ dan $\sigma = 0,1$. Fungsi Keanggotaan M_1 dan M_2 dapat dilihat pada Gambar 3. Pada makalah ini akan digunakan inferensi *fuzzy* dengan metode defuzzifikasi yang digunakan adalah rerata berbobot.

Dari Persamaan (7) didapatkan nilai *gain* kontrol sebagai berikut:

$$\mathbf{K}_1 = [-65,65 \quad 254,85 \quad -58,46 \quad 61,72] \quad (36)$$

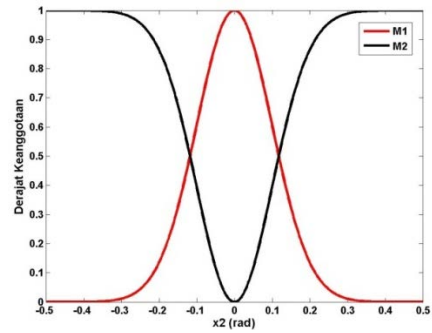
$$\mathbf{K}_2 = [-112,33 \quad 491,72 \quad -124,88 \quad 121,33] \quad (37)$$

dengan *closed loop pole* untuk titik kerja pertama memiliki karakteristik $t_s = 2$ sec dan rasio peredaman $\xi = 0,85$. Dan untuk titik kerja kedua memiliki karakteristik $t_s = 2$ sec dan rasio peredaman $\xi = 1$.

Sedangkan permukaan luncur didesain berdasarkan Persamaan (8), dengan parameter c^T yang didapatkan dari Persamaan (9) yaitu

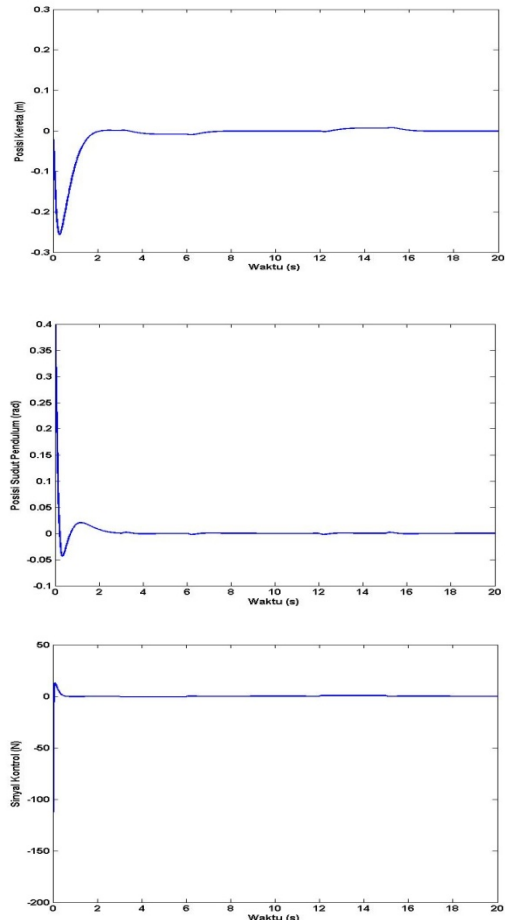
$$c_1^T = [-0,0103 \quad 1,4220 \quad -0,0721 \quad 0,8567] \quad (38)$$

$$c_2^T = [0,0108 \quad 1,4922 \quad -0,0758 \quad 0,9012] \quad (39)$$



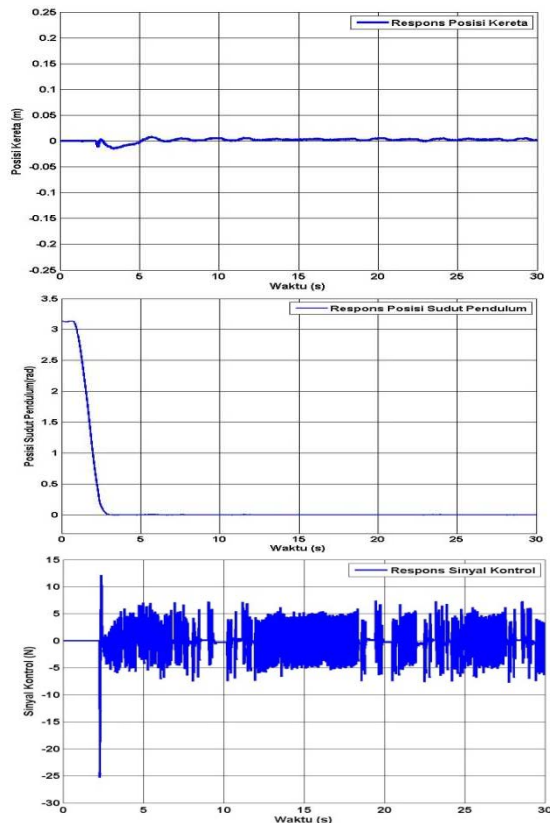
Gambar 3 Fungsi Keanggotaan M_1 dan M_2

Simulasi dilakukan dengan *initial condition* pada sudut pendulum sebesar 0,4 radian. Dan diberi gangguan sebesar 0,5 radian.

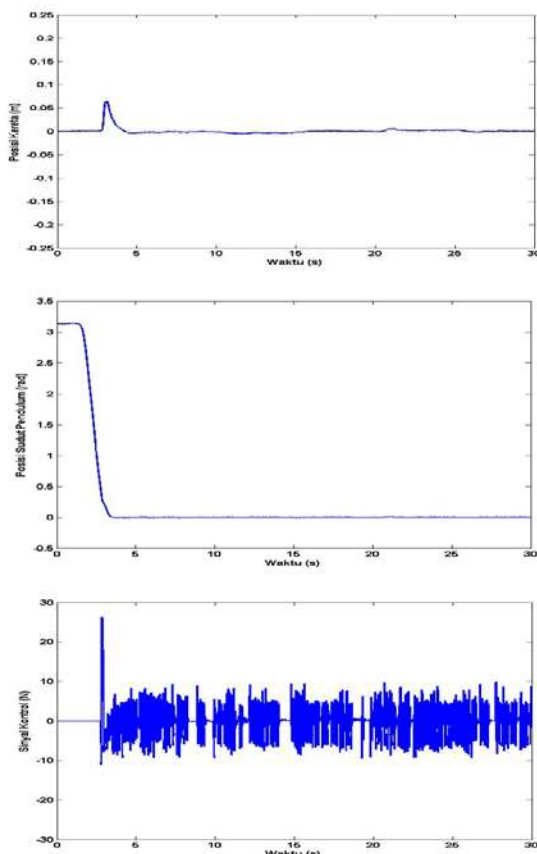


Gambar 4 Hasil Simulasi Respons Posisi Kereta, Posisi Sudut Pendulum, dan Sinyal Kontrol dengan diberi Gangguan $w(t)$

Pada Gambar 4 ditunjukkan respons posisi kereta yang telah diberi gangguan $w(t)$, pada detik ke-3 kereta akan bergerak kiri yang berarti sistem melawan gangguan yang diberikan sebesar 0,5 Newton dan pada saat detik ke-12 sistem bergerak ke kanan saat diberikan gangguan sebesar -0,5 Newton. Posisi kereta menyimpang tidak terlalu jauh dari titik tengah rel yaitu sebesar -0,008 m pada detik ke-3 dan 0,008 pada detik ke-12. Dan pada hasil respons posisi sudut pendulum, dapat dilihat sudut pendulum tidak terlalu bergeser dari sudut 0 radian yaitu sekitar $\pm 0,002$ radian. Sedangkan pada respon simulasi sinyal kontrol dapat dilihat bahwa pada detik ke-3 saat sistem diberi gangguan sebesar 0,5 N, sinyal kontrol bergeser sebesar -5 N, dan pada detik ke-12 saat sistem diberi gangguan sebesar -5N, sinyal



Gambar 5 Hasil Implementasi Respons Posisi Kereta, Posisi Sudut Pendulum, dan Sinyal Kontrol



Gambar 6 Hasil Implementasi Respons Posisi Kereta, Posisi Sudut Pendulum, dan Sinyal Kontrol dengan Gangguan

kontrol bergeser sebesar 5 N. Hal ini dapat disimpulkan bahwa sistem mampu stabil terhadap gangguan yang diberikan.

Implementasi dilakukan dengan menggunakan *plant* nyata

sistem pendulum-kereta “Digital pendulum Mechanical Unit 33-200” dengan menggunakan *software* MATLAB/Simulink 6.5.1. Batang pendulum akan diayunkan ke daerah stabilisasi dengan menggunakan tangan. Hasil implementasi tanpa gangguan dan dengan gangguan dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Gangguan diberikan pada sistem pendulum-kereta pada detik ke-10 sampai detik ke-15 dan pada detik ke-20 sampai detik ke-25.

Dari hasil implementasi pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa posisi kereta dapat berada di titik tengah rel dan posisi sudut pendulum berada pada sudut 0 radian. Dan pada saat sistem diberi gangguan sistem dapat tetap menjaga kestabilannya, yang dapat ditunjukkan pada Gambar 6, dapat dilihat posisi kereta hanya bergeser sebesar -0,005 pada detik ke-10 dan 0,005 pada detik ke-20. Sedangkan pada posisi sudut pendulum terjadi pergeseran yang sangat kecil.

V. KESIMPULAN

Dengan menggunakan kontroler *Fuzzy-Sliding Mode Control* sistem pendulum-kereta mampu menstabilkan batang pendulum pada posisi 0 radian dan kereta berada di titik tengah rel, serta pada saat diberi gangguan sistem pendulum kereta tahan terhadap gangguan.

Kontroler *Fuzzy-Sliding Mode* memberikan respon yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan kontroler *Sliding Mode*, yang ditunjukkan dengan hasil respon yang memiliki *undershoot* yang lebih kecil.

Untuk penelitian berikutnya kontroler *Fuzzy-Sliding Mode* diharapkan dapat digunakan pada *plant* lain yang bersifat nonlinear dan tidak stabil pada sistem MIMO (*Multi Input Multi Output*).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ogata, K., “*Modern Control Engineering* 3rd ed”, Prentice-Hall, New Jersey, 1997.
- [2] _____, “*Digital Pendulum Control in MATLAB Environment (MATLAB 6.5 Version)*”, Feedback Instrument Ltd., 2004.
- [3] Panya, S., T., Benjana, S., Nundrakwang, J., Ngamwiwit, dan N., Komine., “*Hybrid Controller for Inverted Pendulum System*”, *International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT) IEEE*, 2008.
- [4] Utkin, V., J., Guldner, dan J., Shi, “*Sliding Mode Control in Electromechanical System*”, Taylor & Francis, 1999
- [5] Slotine J., dan Li, W., “*Applied Nonlinear Control*”, Prentice-Hall, New Jersey, 1991.
- [6] Pasino, K., dan Yurkovich, S., “*Fuzzy Control*”, Addison Wesley Longman, California, 1998.
- [7] _____, “*Fuzzy Logic Toolbox For Use With Matlab*”, The Math Work Inc., 2002.