

PENGARUH JUMLAH INPUT DAN MEMBERSHIP FUNCTION FUZZY LOGIC CONTROL PADA ROBOT KESEIMBANGAN BERODA DUA

Indra Dwisaputra¹, Tareg Mahmoud², Meti Megayanti³, Irvan Budiawan⁴, Pranoto Hidaya R⁵

¹ Jurusan Teknik Elektro dan Informatika, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung,

^{2,3,4,5} Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung

Kawasan Industri Air Kantung Sungailiat – 33211

Telp. (0717) 93586, Fax. (0717) 93585

Sungailiat, Indonesia

dwisaputra.indra@gmail.com

Abstract

In this paper, a dynamic model of two-wheeled balancing robot has been created, and the two types of FLC has been designed. The Mamdani methods used on both FLC. The first FLC uses pendulum tilt angle θ as the input and it requires the motor torque to keep the robot remains balanced as the output. The second FLC uses two inputs, the first input is θ and the second input is the change in the value of θ which is the output torque of the motor. The second plant model and FLC built by using Matlab Simulink. The first case is one input using 5 membership functions (mf). The second case is two inputs using the 5 and 7 mf. The characteristics and effects of the changes in the input and mf have been simulated in the Simulink and compared. By expanding the number of the inputs can reduce motor specification required in balancing robot. Meanwhile, by increasing the number mf, it can improve the performance of the controller much faster to reach the settling time.

Keywords: Two wheels Balancing Robot, Fuzzy Logic Controller, Simulink, Membership Function (mf).

Abstrak

Pada paper ini model dinamik dari robot keseimbangan beroda dua telah dibuat, dan dua tipe FLC telah di desain. Metode mamdani digunakan pada kedua FLC. FLC yang pertama menggunakan sudut kemiringan pendulum teta (θ) sebagai input dan memerlukan torsi motor untuk menjaga robot tetap seimbang sebagai output. Fuzzy yang lainnya menggunakan dua input, input yang pertama adalah teta (θ) dan input yang kedua adalah perubahan nilai teta (θ) yang mana output adalah torsi motor. Model plant dan kedua FLC dibangun di Matlab menggunakan simulink. Untuk kasus 1 input menggunakan 5 membership function (mf). Sedangkan untuk kasus 2 input menggunakan 5 dan 7 mf. Karakteristik dan pengaruh perubahan input dan mf telah disimulasikan di simulink dan dibandingkan. Dengan memperbanyak jumlah input dapat mengurangi spesifikasi motor yang dibutuhkan dalam menjaga keseimbangan robot. Sedangkan dengan memperbanyak jumlah mf maka dapat meningkatkan performa controller sehingga lebih cepat untuk mencapai settling time.

Kata kunci: Robot Keseimbangan Beroda Dua, Fuzzy Logic Controller, Simulink, Membership Function (mf).

1. PENDAHULUAN

Robot keseimbangan beroda dua merupakan salah satu ide penemuan terbaru, dan telah menarik banyak konsumen karena kebutuhan yang berkembang dan fleksibilitas di lapangan keras dan lingkungan yang tidak terstruktur seperti rumput, pasir, bahkan jika ada *speed bump*. Beberapa studi terbaru, pada 2011 M. Muhammad dari Universiti Teknologi Malaysia mempublikasikan a two wheeled inverted pendulum (TWIP) adalah sebuah sistem mekanis digerakkan dari bawah, yang secara inheren loop terbuka tidak stabil dengan dinamika yang sangat nonlinear. Hasil simulasi menunjukkan bahwa robot jatuh segera ke arah sudut kemiringan ketika dilepaskan, maka sistem twip secara inheren tidak

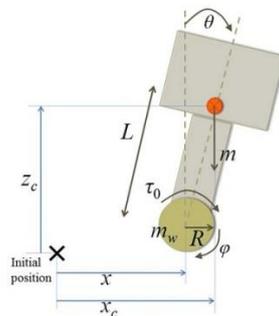
stabil. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa Kane adalah metode alternatif dalam pemodelan twip [4]. Pada tahun 2012, Gun-oo Jeong dan Jang-myung Lee dari Korea membuat controller untuk dua roda Inverted Pendulum Mobile Robot menggunakan jaringan saraf untuk menghasilkan faktor fungsi keanggotaan fuzzy kontrol kinerja lebih stabil ketika berat pengguna yang berubah-ubah. Dengan berat 8,1 kg controller robot dari kertas ini stabil sekitar sudut ketika 3,98 detik [5]. Pada tahun 2013 Wei An dan Yangmin Li dari Cina memperkenalkan konsep simulasi dan kontrol dari Robot Self-balancing roda dua. Dalam penelitian ini, mereka membandingkan Proportional-Integral-Derivative (PID) controller untuk regulator Linear-kuadrat (LQR) metode controller. Hasil penelitian menunjukkan bahwa LQR memiliki kinerja yang lebih baik daripada PID untuk kontrol subsistem self-balancing [1]. Pada 2015, Ashwani Kharola dari India menyajikan strategi kontrol logika fuzzy untuk kontrol dan stabilisasi Two-Wheels Inverted Pendulum Robot (TWIPR). Controller dapat mengontrol roda sistem dalam 9 detik, overshoot maksimum 2,5 -0,75 dan jumlah nol kesalahan steady state [3].

Tujuan dari penelitian saat ini adalah desain dan simulasi kontrol untuk Robot Keseimbangan Beroda Dua. Kami menggunakan metode kontrol fuzzy logic. Dalam penelitian ini, kami membuat pengamatan dan analisis yang berbeda. Kami menyajikan perilaku teta (θ) ketika kita menggunakan 1 input FLC dan 2 input FLC. Kami juga membuat pengamatan perilaku perbedaan bagi θ ketika kita menggunakan 5mf dan 7mf. Simulasi kontrol ini menggunakan software Matlab untuk menganalisis kinerja kontrol fuzzy. Fungsi keanggotaan fuzzy dirancang untuk melihat perubahan pengaruh output. *error* dan *de_error* diterapkan sebagai input fungsi keanggotaan.

2. MODEL DINAMIS DAN DESAIN KONTROLLER

2.1 Model Dinamis Mekanik

Dalam model mekanik yang dinamis ini, kami menggunakan model dari Ye Ding, Joshua Gafford, Mie Kunio dari Harvard University dan Massachusetts Institute of Technology [2]. Sistem robot ini dapat dipisahkan menjadi dua bagian: "wheels part" dan "body part". Perbedaan utama antara sistem ini dan pendulum terbalik adalah inersia dan centre of mass (COM) dari bagian tubuh. Gambar 1. menunjukkan skema keseimbangan robot.



Gambar 1. Skema robot keseimbangan dua roda dengan parameter pendukung [3].

Untuk menurunkan persamaan dinamis sistem. Dalam sistem ini, kita mengasumsikan robot bergerak horizontal tanpa ada slip diantara ground dan roda. Mereka menggunakan metoda Lagrange's untuk menurunkan persamaan dinamis sistem. Dalam model menggunakan $\varphi, \theta, \dot{\varphi}, \dot{\theta}$ sebagai variabel state. Input sistem adalah torsi τ_0 , dan output adalah jarak pergerakan robot secara horizontal (x) dan sudut rotasi dari bodi robot (ϑ). *State space* dari sistem robot dapat ditulis sebagai berikut:

$$x = R\varphi \quad (1), \quad x_c = R\varphi + L \sin \theta$$

(2)

$$z_c = R + L \cos \theta \quad (3), \quad \dot{x} = R\dot{\varphi} \quad (4)$$

$$\dot{x}_c = R\dot{\varphi} + L \dot{\theta} \cos \theta \quad (5), \quad \dot{z}_c = -L\dot{\theta} \sin \theta \quad (6)$$

Energy Potensial E_p dan Energy Kinetik E_k dapat ditulis sebagai berikut:

$$E_p = mg(R + L \cos \theta) - mg(R + L) = mgL(\cos \theta - 1)$$

(7)

$$E_k = \frac{1}{2}(I_w + m_w R^2 + m R^2)\dot{\varphi}^2 + m R L \cos \theta \dot{\varphi} \dot{\theta} + \frac{1}{2}(I + m L^2)\dot{\theta}^2$$

(8)

$$L = \frac{1}{2}(I_w + m_w R^2 + mR^2)\dot{\varphi}^2 + mRL \cos \theta \dot{\varphi} \dot{\theta} + \frac{1}{2}(I + mL^2)\dot{\theta}^2 - mgL(\cos \theta - 1) \tag{9}$$

Persamaan dinamis φ -coordinate

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \varphi} = (I_w + m_w R^2 + mR^2)\ddot{\varphi} + mRL \cos \theta \ddot{\theta} - mRL \sin \theta \dot{\theta}^2 = \mu \tag{10}$$

Persamaan dinamis ϑ -coordinate

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = (I + mL^2)\ddot{\theta} + mRL \cos \theta \ddot{\varphi} - mRL \sin \theta = \chi \tag{11}$$

Kemudian non-linier sistem dinamis dalam orde 2 dapat ditulis:

$$\begin{bmatrix} I_w + (m_w + m)R^2 & mRL \cos \theta \\ mRL \cos \theta & I + mL^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -mRL \sin \theta \dot{\theta} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -mgL \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu \\ \chi \end{bmatrix} \tag{12}$$

linierisasikan (i.e., $\theta = 0, \dot{\varphi} = 0, \dot{\theta} = 0$)

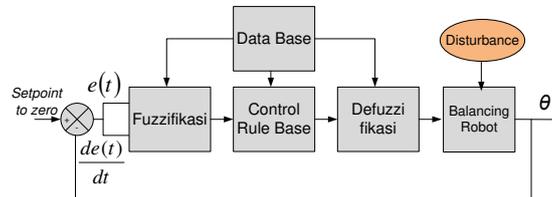
$$\begin{bmatrix} I_w + (m_w + m)R^2 & mRL \\ mRL & I + mL^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_\gamma + \beta_m & -\beta_m \\ -\beta_m & \beta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -mgL \end{bmatrix} \theta = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \tau_0 \tag{13}$$

$$E \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + F \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + G\theta = H\tau_0 \tag{14}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -E^{-1}G & -E^{-1}F & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -E^{-1}H \end{bmatrix} \tau_0, y = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \tag{15}$$

2.2 Blok Diagram Sistem

Diagram blok dari sistem kontrol keseluruhan ditunjukkan seperti pada Gambar 3. Untuk menjaga keseimbangan robot keseimbangan beroda dua, sudut rotasi dari bagian bodi (θ) yang digunakan sebagai parameter *setpoint* harus sama dengan nol (0). Gangguan diterapkan untuk θ dalam menunjukkan kinerja robot.



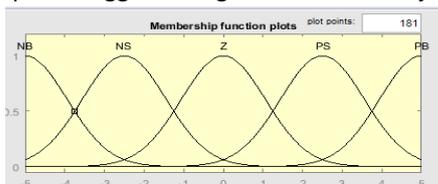
Gambar 2. Blok Diagram Control 2 inputs fuzzy

Ada 2 teknik dalam penelitian ini untuk menunjukkan desain terbaik dari kontroler logika fuzzy. Teknik pertama adalah dengan menerapkan 1 input fuzzy berupa *error* ($e(t)$). Teknik kedua adalah dengan menerapkan dua parameter masukan fuzzy yaitu $e(t)$ dan $d_error (\frac{de(t)}{dt})$.

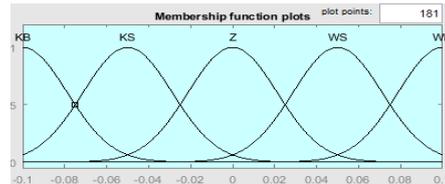
2.3 Fuzzy Logic Controller

2.3.1. FLC menggunakan 1 input (error)

Pengamatan pertama menggunakan FLC dengan 1 input dan 1 output dengan 5 *mf*. *Mf* input dan output menggunakan gaussian dan ditunjukkan pada gambar 3a dan 3b.



Gambar 3a. Membership Function input 1 (θ)

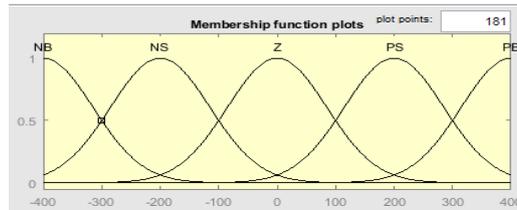


Gambar 3b. Membership Function Output

5 $mf \theta$ adalah NB (Negative Big), NS (Negative Small), Z (Zero), PS (Positive Small) dan PB (Positive Big). Mf output ditunjukkan pada gambar 6b. 5 mf output adalah KB (Counter Clock Wise Big), KS Counter (Clock Wish Small), Z (Zero), WS (Clock Wise Small) dan WB (Clock Wise Big). Metoda Mamdani digunakan untuk defuzzikasi. Adapun rules fuzzy mengadopsi metode "if-then rules". Ada terdapat 5 rules fuzzy yang digunakan yaitu: 1. If (teta is NB) then (tau is KB), 2. If (teta is NS) then (tau is KS), 3. If (teta is Z) then (tau is Z), 4. If (teta is PS) then (tau is WS), 5. If (teta is PB) then (tau is WB).

2.3.2 FLC menggunakan 2 input (error and d_error)

Pengamatan kedua adalah dengan menggunakan 2 input yaitu *error* dan *d_error*. Untuk mf *error* dan mf output sama dengan percobaan 1. Input mf *d_error* ditunjukkan pada gambar 7.

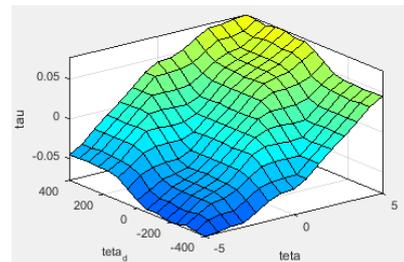


Gambar 7. Membership Function input 2 (teta_d)

Range nilai *d_error* adalah -400deg/s to +400deg/s. Penggunaan range yang besar ini dikarenakan dalam satuan deg/s dan juga untuk menjaga kondisi Robot Keseimbangan Beroda Dua tetap seimbang, jika terjadi gangguan dinamis yang besar. Terdapat 25 rules fuzzy yang digunakan. Rules ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Rules Fuzzy
teta

		teta				
		NB	NS	Z	PS	PB
teta_d	NB	KB	KB	KS	Z	WS
	NS	KB	KS	Z	Z	WS
	Z	KB	KS	Z	WS	WB
	PS	KS	Z	Z	WS	WB
	PB	KS	Z	WS	WB	WB

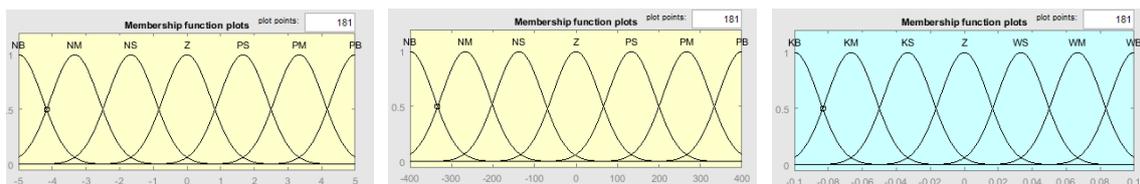


Gambar 9. Plot Surface for fuzzy 2 inputs

"if-then rules" metode digunakan untuk menentukan output. Terdapat 4 kondisi KB, 5 kondisi KS, 7 kondisi Z, 5 kondisi WS dan 4 kondisi WB. Metode Mamdani digunakan untuk proses defuzzifikasi. Plot hubungan 2 input dan 1 output ditunjukkan pada gambar 9.

2.3.3 FLC menggunakan 7mf

Percobaan ketiga menggunakan 2 input fuzzy dengan 7 mf . Range mf dibuat sama seperti 5 mf . Pembagian $mf \theta$ dan $\dot{\theta}$ ditunjukkan pada gambar 10a dan 10b.



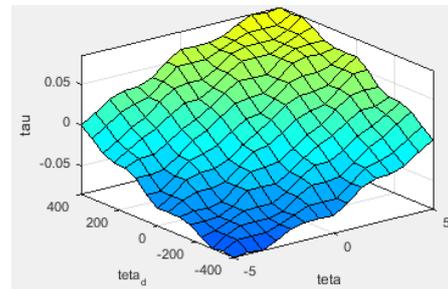
Gambar 10. Mf error, mf d_error dan mf output

NB, NS, Z, PS PB sama dengan percobaan kedua. NM adalah Negative Medium dan PM adalah Positive Medium. KB, KS, Z, WS, WB sama dengan percobaan kedua. KM berarti Counter Clock Wise

Medium dan WM adalah *Clock Wise Medium*. Terdapat 7 *mf* untuk setiap input dengan menggunakan metode “*if-then rules*” didapatkan 49 *rules* fuzzy. Dan ditunjukkan pada tabel 2.

Table. 2: Rules fuzzy with 7mf

		teta						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
teta _d	NB	KB	KB	KM	KM	KS	KS	Z
	NM	KB	KM	KM	KS	KS	Z	WS
	NS	KM	KM	KS	KS	Z	WS	WS
	Z	KM	KS	KS	Z	WS	WS	WM
	PS	KS	KS	Z	WS	WS	WM	WM
	PM	KS	Z	WS	WS	WM	WM	WB
	PB	Z	WS	WS	WM	WM	WB	WB

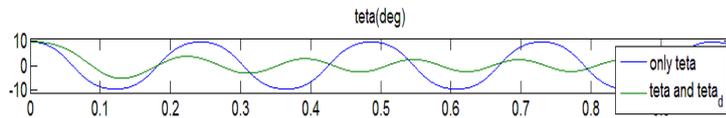


Gambar 11. plot surface 2 input fuzzy dengan 7 mf

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

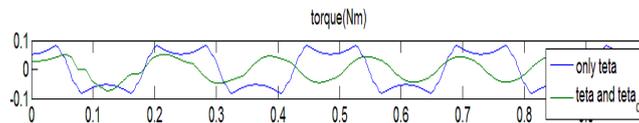
3.1. Perbandingan 1 input dan 2 input FLC

FLC menggunakan 5 *mf* dengan 1 input dan 2 input telah disimulasikan. Dengan memberikan nilai error 10° respon θ diamati. Perbandingan respon θ terhadap perubahan jumlah input *mf* dapat dilihat pada gambar 12. Dengan menerapkan 2 input fuzzy osilasi semakin berkurang dan menuju titik 0°.



Gambar 12. Respon θ 1 input dan 2 input FLC

Pengaruh lainnya yang diamati adalah torsi. Jika dilihat dari gambar 13 bahwa dengan menggunakan 2 input fuzzy *error* dan *d_error* dapat mengurangi torsi motor yang dibutuhkan robot untuk mencapai keseimbangan. Dengan berkurangnya nilai torsi berarti spesifikasi motor yang dibutuhkan untuk membuat robot keseimbangan beroda dua bisa lebih rendah hal ini tentu saja akan mengurangi *cost* dalam pembuatan.

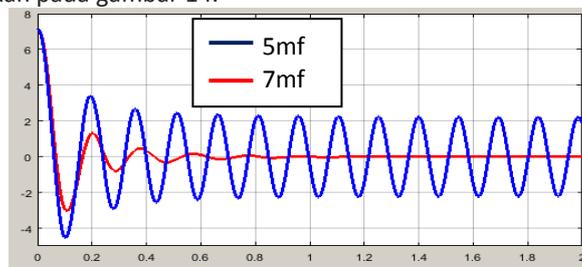


Gambar 13. Perbandingan torsi 1 input dan 2 input FLC

Dari kedua pengamatan diatas maka menggunakan 2 input fuzzy lebih baik dibandingkan dengan menggunakan 1 input fuzzy.

3.2. Perbandingan 5 mf dan 7 mf

Pengamatan berikutnya adalah dengan membandingkan dua input fuzzy menggunakan 5 *mf* dan 7 *mf*. Respon θ ditunjukkan pada gambar 14.



Gambar 14. Respon θ menggunakan 5mf dan 7mf

Disturbance yang diberikan sebesar 7° . Dengan menggunakan 5 *mf overshoot* mencapai $4,2^\circ$. Sedangkan respon sistem masih terdapat osilasi. Dengan menggunakan 7 *mf* θ dapat mencapai *settling time* pada saat 0.5 detik. *Overshoot* yang terjadi hanya 3° . Dari pengamatan respon output tersebut maka menggunakan 7 *mf* lebih baik dibandingkan 5 *mf* pada robot keseimbangan beroda dua.

4. SIMPULAN

Dari pengamatan hasil ujicoba di *simulink* dapat disimpulkan bahwa penggunaan 2 input fuzzy dapat mengurangi spesifikasi torsi motor yang dibutuhkan untuk menjaga Robot Keseimbangan Beroda Dua tetap seimbang. Dengan meningkatkan jumlah *mf* pada input dan output fuzzy maka *overshoot* dapat dikurangi dan pencapaian *settling time* lebih cepat. Juga saat menambah *mf* respon sistem memiliki rasio redaman yang lebih baik. Dari kedua hasil tersebut maka jumlah input pada fuzzy dan jumlah *mf* pada input dan output fuzzy mempengaruhi respon sistem Robot Keseimbangan Beroda Dua.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] An, W., Li, Y. 2013. Simulation and Control of a two-wheeled self-balancing robot. In *Proceeding of the IEEE Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. (Shenzen, Chins, Desember, 2013).
- [2] Ding, Y., Gafford, J., and Kunio, M., 2012. Modeling, Simulation, and Fabrication of a Balancing Robot. In *2.151: Advanced System Dynamics and Control*.
- [3] Kharola, Ashwani. 2015. The control of Two-wheeled Inverted Pendulum Robot (TWIPR) using fuzzy logic. In *IEEE Internasional Conference on Computational and Computing Research*
- [4] Muhammad, M., Buyamin, S., Ahmad, M. N., Nawawi, S. W. 2011. Dynamic Modeling and Analysis of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Robot. In *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Modelling & Simulation*.
- [5] Gun-oo Jeong, Jang-myung Lee. 2012. Design of a Fuzzy Control System for Two Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot. In *2012 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligent (URAI)*