

Analisis Sistem Kendali *Hybrid Pid-Fuzzy* dalam Menjaga Keseimbangan Pendulum pada Sistem *Rotary Inverter Pendulum* Berdasarkan *Time Response*

Ahmad Faizal¹, Khalis Juniswan Abidin²

^{1,2}Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Suska Riau.28293
Jl. HR. Soebrantas No. 155 Simpang Baru, Panam, Pekanbaru, 28293
Email: ahmad.faizal@uin-suska.ac.id, khalis0194@gmail.com

(Received: 14 Juni 2016; Revised: 20 Juni 2016; Accepted: 20 Juni 2016)

ABSTRAK

Teknologi yang tepat diperlukan manusia agar dapat meningkatkan efisiensi kerja serta keselamatan sumber daya manusia itu sendiri. Kendali *PID* tidak dapat bekerja dengan baik apabila terjadi ketidakpastian dan ketidaklinieran pada sistem. *Rotary inverter pendulum* adalah sistem non linear orde tinggi, multivariabel dan sistem dinamik yang sangat tidak stabil. Untuk mengatasi kekurangan pada kendali *PID* maka kendali *PID* digabungkan dengan kendali *fuzzy* yang diterapkan pada sistem *rotary inverter pendulum*. Pada penelitian ini yang menjadi fokus bahasan adalah analisis kendali *hybrid PID-Fuzzy* dalam menjaga keseimbangan pendulum sehingga dapat tetap seimbang pada posisi atas. Berdasarkan hasil pengujian dengan memberikan sudut awal 0.1 *radian* pada pendulum, kendali *hybrid PID-Fuzzy* dapat menjaga pendulum tetap berada pada posisi seimbang dengan *settling time* sebesar 0.7 detik dan kendali *hybrid PID-Fuzzy* dapat meredam gangguan pada detik ke 3 sampai detik ke 5 serta gangguan pada detik ke 6 sampai ke 8 dengan *recovery time* yang baik.

Kata Kunci: *hybrid PID-Fuzzy, keseimbangan, rotary inverter pendulum*

ABSTRACT

The human needs right technology to improve efficiency and safety of itself. *PID* controller does not get good performance if there is uncertainty and nonlinearities in the system. *Rotary pendulum inverter* is non-linear system of higher order, multivariable dynamic system that is very unstable. The important feature of the proposed approach is that it combines the *PID* control method and the fuzzy control method to solve the control problem of *PID* and is applied to *rotary inverter pendulum*. This paper presents analysis of *Hybrid PID-Fuzzy* controller in balancing the pendulum so that it can remain balanced on the top position. The simulation results by initial angle of 0.1 radians on a pendulum, the *hybrid PID-Fuzzy* controller able to get balancing of pendulum at settling time of 0.7 seconds and *hybrid PID-Fuzzy* controller able to reduce disturbance on third second until fifth second and disturbance on sixth second to eighth second and have good recovery time.

Keywords: *balance, hybrid PID-Fuzzy, rotary inverter pendulum*

Corresponding Author:

Ahmad Faizal
Jurusan Teknik Elektro,
Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
Email: ahmad.faizal@uin-suska.ac.id

Pendahuluan

Teknologi pengendali yang tepat diperlukan manusia agar dapat meningkatkan efisiensi kerja serta menjaga keselamatan sumber

daya manusia itu sendiri. Pada saat ini berbagai jenis pengendali digunakan di dunia industri, diantaranya adalah pengendali *proportional-integral-derivative (PID)* dan pengendali *fuzzy*. Pengendali *PID* merupakan pengendali

konvensional yang telah lama digunakan pada industri. Namun kendali ini tidak dapat bekerja dengan baik apabila terjadi ketidakpastian dan ketidaklinieran pada sistem[1]. Selain pengendali *PID* terdapat juga pengendali *fuzzy* yang digunakan dalam sistem kendali. Kendali *fuzzy* merupakan kendali yang menerapkan kemampuan manusia untuk melakukan pengendalian dengan menggunakan *rule if – than*, yang mana sistem kendali logika *fuzzy* ini tidak memiliki ketergantungan pada variabel–variabel proses kendali. Kendali *fuzzy* mempunyai kelebihan untuk memperbaiki respon sistem dan *recovery time* terhadap gangguan yang menjadi kekurangan kendali *PID*[4]. Sehingga untuk mengatasi kekurangan yang terdapat pada kendali *PID* maka pada penelitian ini dilakukan penggabungan antara kendali *PID* dan kendali *Fuzzy*. Berbagai penelitian tentang kendali *Hybrid PID-Fuzzy* telah dilakukan, diantaranya adalah penelitian tentang Sistem Kendali *Hybrid PID - Logika Fuzzy* Pada Pengaturan Kecepatan Motor Dc[5]. Pada penelitian ini sistem kendali *hybrid* mampu menghasilkan respon dan *recovery time* yang lebih baik, ini terbukti dari hasil pengujian sistem, terjadinya *undershot* dan *overshot* dari pemberian beban dan pelepasan beban dapat di redam.

Rotary Inverter pendulum merupakan salah satu sistem non linier yang menjelaskan tentang masalah kesetabilan. Sistem *rotary inverter pendulum* memiliki sifat sangat tidak stabil sehingga untuk mengendalikannya diperlukan teknik kendali yang tidak mudah dibandingkan dengan teknik kendali pada sistem yang linier dan stabil. Sistem *rotary inverter pendulum* memiliki beberapa permasalahan kendali diantaranya *swing-up* yaitu mengubah posisi pendulum dari posisi bawah ke posisi atas, kemudian stabilisasi yaitu menyeimbangkan pendulum tetap berada pada posisi atas dan, *tracking* adalah menempatkan posisi lengan pendulum pada titik referensi tertentu bersamaan dengan keseimbangan pendulum. Namun pada penelitian ini yang akan dikendalikan adalah menyeimbangkan pendulum tetap berada pada posisi atas.

Bahan dan Metode

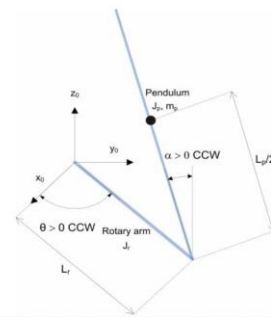
Rotary Inverter Pendulum

Sistem *rotary inverter pendulum* dikenal juga sebagai *plant* uji dalam masalah sistem kendali karena sifatnya yang non-linier dan sangat tidak stabil [6]. Sistem *rotary inverter pendulum* merupakan sistem yang familiar pada penerapan di kehidupan nyata hingga saat ini seperti kendali

pada kedirgantaraan, robotika, simulasi rocket atau rudal, dan berbagai penerapan pada berbagai bidang lainnya.

Komponen sistem *Rotary inverter pendulum* adalah *rotating arm* yang digerakkan oleh motor serta sebuah batang pendulum yang dipasang pada tepi *rotating arm*. Sistem *rotary inverter pendulum* terdiri dari *vertical pendulum* dan *horisontal arm*. Pusat *horisontal arm* terhubung dengan motor, sedangkan ujung dari *horisontal arm* terhubung dengan *vertikal pendulum*. Selain itu, pada sistem *rotary inverter pendulum* pusat massanya akan berada pada ujung dari lengan dari pendulum karena sebuah batang pendulum diletakkan pada ujung lengan *rotary inverter pendulum*

Model Matematika



Gambar 1. Free diagram dari *rotary inverter pendulum*[6]

Setelah lagrangian dari sistem ditemukan, maka beberapa penurunan perlu ditemukan didapatkan:

$$\left(m_p L_r^2 + \frac{1}{4} m_p L_p^2 \cos^2(\alpha) + J_r \right) \ddot{\theta} - \left(\frac{1}{2} m_p L_p L_r \cos(\alpha) \right) \ddot{\alpha} + \left(\frac{1}{2} m_p L_p^2 \sin(\alpha) \cos(\alpha) \right) \dot{\theta} \dot{\alpha} + \left(\frac{1}{2} m_p L_p L_r \sin(\alpha) \right) \dot{\alpha}^2 = \tau - B_r \dot{\theta} \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} m_p L_p L_r \cos(\alpha) \ddot{\theta} + \left(J_p + \frac{1}{4} m_p L_p^2 \right) \ddot{\alpha} - \frac{1}{4} m_p L_p^2 \cos(\alpha) \sin(\alpha) \theta^2 - \frac{1}{2} m_p L_p g \sin(\alpha) = -B_p \dot{\alpha} \quad (2)$$

Putaran yang diterapkan pada dasar rotary arm dihasilkan oleh motor servo yang mana dijelaskan oleh persamaan 3.

$$\tau = \frac{\eta_g K_g \eta_m K_t (V_m - K_g K_m - m \dot{\theta})}{R_m} \quad (3)$$

Untuk mengubahnya ke bentuk linier maka asumsikan $\theta = 0^\circ, \alpha = 0^\circ, \dot{\theta} = 0, \dot{\alpha} = 0$ sehingga didapatkan

$$A = \frac{1}{J_r} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{4}m_p^2L_p^2L_r g & -(J_p + \frac{1}{4}m_pL_p^2)B_r & -\frac{1}{2}m_pL_pL_rB_p \\ 0 & \frac{1}{2}m_pL_pg(J_r + m_pL_p^2) & -\frac{1}{2}m_pL_pL_rB_r & -(J_r + m_pL_p)B_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \frac{1}{J_r} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_p + \frac{1}{4}m_pL_p^2 \\ \frac{1}{2}m_pL_pL_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$D = 0 \quad (7)$$

Tabel 1 Parameter sistem rotary inverter pendulum[6]

Parameter	Simbol	Nilai
Massa lengan	m_r	0.257 kg
Panjang lengan	L_r	0.2159 m
Inersia lengan	J_r	9.98×10^{-4} kg.m ²
Koefisien viscous damping lengan	B_r	0.11 N.m.s/rad
Massa pendulum	m_p	0.127 kg
Panjang pendulum	L_p	0.337 m
Koefisien viscous damping pendulum	B_p	0.0024 N.m.s/rad
Inersia pendulum	J_p	0.0012 kg.m ²
Resistansi jangkar	R_m	2.6 Ω
Back-emf constant	K_m	0.0077 V-s/rad
Torque constant	K_t	0.0077 N-m/A
High gear total gear ratio	K_g	70
Gravitasi	g	9.8 kg.m/s ²
Gearbox efficiency	η_g	0.9
Motor efficiency	η_m	0.69

Dengan memasukkan parameter dari tabel 2.2 maka matrik A, B, C dan, D didapatkan :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 80.3 & -45.8 & -0.930 \\ 0 & 122 & -44.1 & -1.40 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 83.4 \\ 80.3 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

$$D = 0$$

Pengendali Proporsional Integral Derivative (PID)

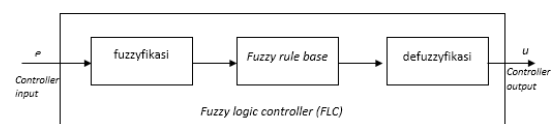
Pengendali PID merupakan pengendali otomatis yang merupakan gabungan dari pengendali *Proporsional*, *Integral*, dan *Derivatif*. Bentuk umum dari pengendali PID sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (8)$$

Fuzzy Logic Control (FLC)

Logika *fuzzy* merupakan suatu cara untuk memetakan ruang input kedalam suatu ruang output. Pada sistem yang rumit penggunaan logika *fuzzy* sangat bermanfaat dalam pemecahan masalah pada sistem tersebut. Kendali konvensional mempunyai kekurangan dalam mengatasi masalah sistem yang kompleks, karena sistem konvensional memiliki nilai keluaran yang tegas sesuai dengan input yang telah ditentukan. Berbeda dengan logika *fuzzy* yang *fleksibel* terhadap bentuk gangguan terhadap nilai masukan pada sistem.

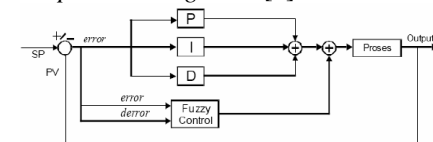
Dalam logika *fuzzy* terdapat beberapa proses yaitu *fuzzyfication*, sistem inferensi *fuzzy*, dan *defuzzyfication* [15]



Gambar 2. Struktur umum kendali logika fuzzy

Kendali Hybrid PID-Fuzzy

Sistem kendali *PID* – Logika *fuzzy* ini dikembangkan oleh *OMRON's Industrial Temperature Regulator*[5]

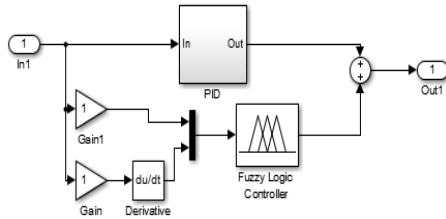


Gambar 3. Hybrid kendali PID-logika fuzzy[5]

Pada jenis kendali ini kendali utamanya adalah kendali *PID*, sedangkan kendali *fuzzy* berfungsi untuk memperbaiki respon sistem dan *recovery time* terhadap *disturbance* . Sehingga

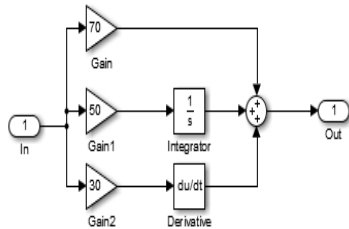
akan mendapat respon yang baik seperti yang kita inginkan.

Desain Pengendali Hybrid PID-Fuzzy



Gambar 4. Blok simulink hybrid PID-Fuzzy

Perancangan kendali PID pada penelitian ini menggunakan parameter *proposional*, *integral* dan, *derivative* dari jurnal penelitian[19]. Sehingga didapatkan $K_p = 516.35$, $K_i = 431.787$ dan, $K_d = 61.63$



Gambar 5. Blok simulink subsistem PID

Sedangkan perancangan kendali logika fuzzy pada penelitian ini menggunakan metode fuzzy Mamdani. Pada perancangan penelitian ini *input* dari kontrol logika fuzzy ini adalah *error* dan *derror*. Dimana nilai *error* sistem didapat dari persamaan dibawah ini.

$$Error = SP - PV \quad (9)$$

Dimana:

SP (setpoint) = nilai yang diinginkan

PV (Present value) = nilai aktual

Dan untuk mendapatkan nilai *derror* sistem mengikuti persamaan berikut

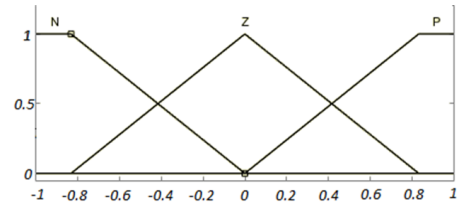
$$Derror = Error(n) - Error(n-1) \quad (10)$$

Dimana :

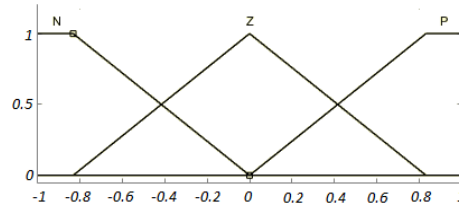
Error(n) = *error* saat ini

Error(n-1) = *error* sebelumnya

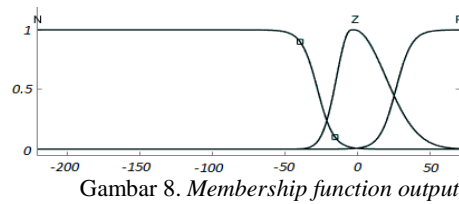
Untuk *membership function error* dan *derror* dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7 sedangkan *membership function output* dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 6. Membership function error



Gambar 7. Membership function input Derror



Gambar 8. Membership function output U

Pada penelitian ini komposisi aturan yang digunakan menggunakan metode *max* dan aturan fuzzy untuk sistem *rotary inverter pendulum* sesuai dengan tabel 2.

Tabel 2 Rule Base untuk Rotary Inverter Pendulum

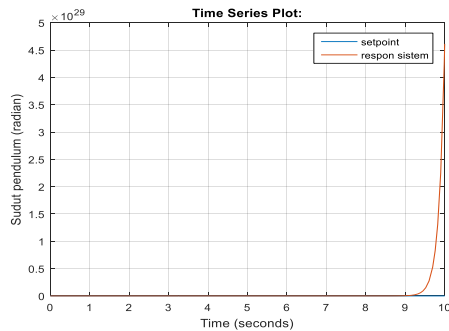
<i>Error Derror</i>	N	Z	P
N	NE	NE	ZE
Z	NE	ZE	PO
P	ZE	PO	PO

Selanjutnya proses defuzzyfikasi merupakan proses pemetaan himpunan fuzzy ke himpunan tegas (*crisp*). Proses ini merupakan kebalikan dari fuzzyfikasi. Pada fuzzy Mamdani terdapat berbagai metode defuzzyfikasi, namun pada penelitian ini metode yang digunakan adalah metode titik tengah (*Centroid Method*) yang lazim digunakan pada proses defuzzyfikasi.

Analisa dan Hasil

Analisa Simulasi *Open Loop*

Simulasi *open loop* pada sistem *rotary inverter pendulum* menghasilkan respon sudut pendulum sebagai berikut:

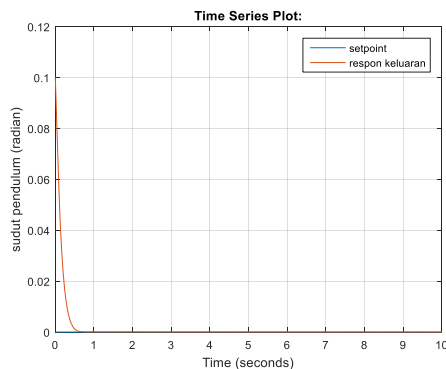


Gambar 9. Grafik *step respon* dari sistem *rotary inverter pendulum* tanpa pengendali

Dari grafik gambar 10 diatas dapat dijelaskan sistem tidak stabil sehingga pendulum tidak dapat mencapai keseimbangan pada posisi atas.

Analisa Pengendali *Hybrid PID-Fuzzy* Dalam Pencapaian Keseimbangan Pendulum Pada Sistem *Rotary Inverter Pendulum* Berdasarkan *Time Response*

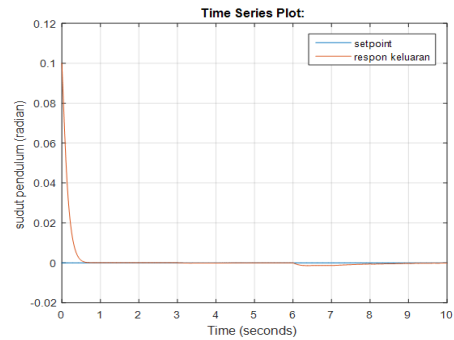
Setelah pengendali *Hybrid PID-Fuzzy* disimulasikan dengan *plant* sistem *rotary inverter pendulum* tanpa penambahan gangguan menggunakan sudut awal 0.1 *rad* maka akan dihasilkan grafik seperti pada gambar 11.



Gambar 10. Grafik sudut pendulum dengan pengendali *Hybrid PID-Fuzzy* tanpa gangguan

Dari Gambar 10 Terlihat bahwa *settling time* yang dibutuhkan pendulum dengan sudut awal 0.1 radian menjadi stabil disekitaran 0 radian berada pada detik ke 0.7 tanpa *undershoot*.

Setelah penambahan gangguan 1 V pada detik ke 3 sampai ke 5 dan detik 6 sampai detik ke 8 maka akan dihasilkan grafik seperti pada Gambar 11.

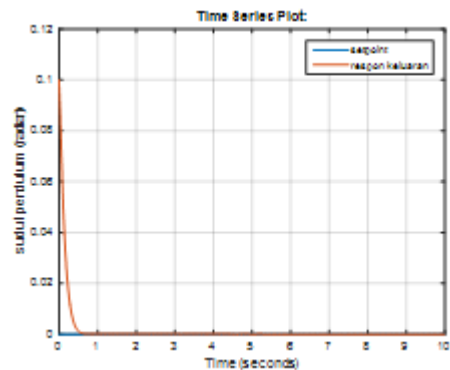


Gambar 11. Grafik sudut pendulum dengan penambahan gangguan 1 V

Dari gambar 11 dapat dilihat bahwa terdapat gangguan dengan sinyal *step* sebesar 1V pada detik ke 3 sampai detik ke 5 dan -1V pada detik ke 6 sampai detik ke 8.

Hasilnya sudut pendulum berubah sebesar -0.000182 *radian* dan akan kembali ke 0 *radian* saat diberi gangguan 1V sedangkan saat diberi gangguan sebesar -1V sudut pendulum berubah sebesar 0.0014 *radian* dan akan kembali ke 0 *radian*. Selama diberi gangguan, sistem mampu meredam gangguan yang terjadi ditandai dengan pendulum mampu kembali ke posisi semula (0 rad) ketika gangguan dilepaskan

Analisa Pengendali *Hybrid PID-Fuzzy* Berdasarkan *Respon Transien* Dan *Error Steady State* Dalam Pengendalian Keseimbangan Pendulum Pada Sistem *Rotary Inverter Pendulum*.



Gambar 12 Grafik sudut pendulum dengan pengendali *Hybrid PID-Fuzzy* tanpa gangguan

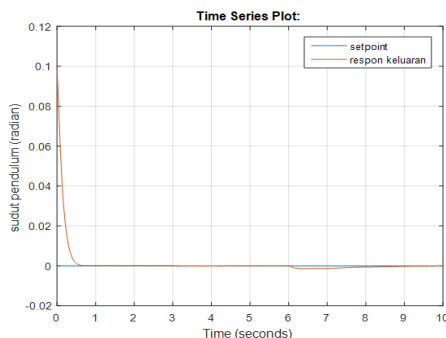
Dari Gambar 12 maka didapatkan respon transien untuk analisa sistem kendali *hybrid PID-Fuzzy* yang terdapat pada tabel 3:
 Tabel 3 Analisa respon sistem Pengendali *Hybrid PID-Fuzzy*

<i>Hybrid PID-Fuzzy</i>		Stabil
	Waktu (detik)	
t_d	0.107	
t_r	0.283	
t_s	0.7	
E_{ss}	0.000123	

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa respon sistem, pengendali *hybrid PID-Fuzzy* memiliki performansi yang baik dalam pencapaian kondisi stabil tanpa gangguan karena kendali *hybrid PID-Fuzzy* memiliki *settling time* yang cepat yaitu 0.7 detik. Sedangkan untuk karakteristik *undershoot* maksimum, kendali *Hybrid PID-Fuzzy* tidak memiliki *Undershoot*.

Analisa Pengendali Hybrid PID-Fuzzy Dengan Penambahan Gangguan Berdasarkan Perubahan Sudut dan Recovery Time.

Selanjutnya, dari penambahan gangguan sebesar 1V sudut pendulum mengalami perubahan seperti yang ditunjukkan gambar 13.



Gambar 13. Grafik sudut pendulum dengan penambahan gangguan 1 V

Dari Gambar 13 maka . dapat diketahui perubahan maksimal sudut pendulum terhadap gangguan saat $t =$ detik ke 3 – detik ke 5 terjadi perubahan sebesar -0.000182 radian pada detik ke 3.357. sedangkan saat $t =$ detik ke 6 – detik ke 8 terjadi perubahan sebesar 0.0014 radian pada detik ke 6.38.

Kemudian untuk *recovery time* setelah gangguan yang terjadi pada saat $t =$ detik ke 3 sampai detik ke 5 sudut pendulum kembali stabil pada detik ke 5.2 walaupun masih terdapat error yang sangat kecil sebesar 0.000002 radian.

Setelah gangguan yang terjadi pada saat $t =$ detik ke 6 sampai detik ke 8 sudut pendulum

kembali stabil pada detik ke 9.2 walaupun masih terdapat error yang sangat kecil sebesar 0.000242 radian.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian simulasi dan analisis pengendali *Hybrid PID-fuzzy* dalam pengendalian keseimbangan pendulum pada sistem *rotary inverter pendulum*, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa *Rotary inverter pendulum* merupakan sistem yang tidak stabil dilihat dari uji *open loop* sistem, sehingga dibutuhkan pengendali agar dapat menjaga keseimbangan pendulum tetap berada pada posisi atas. Kendali *Hybrid PID-Fuzzy* mampu menghasilkan respon dan *recovery time* yang lebih baik dan tahan terhadap gangguan, ini terbukti dari hasil pengujian sistem dengan memberikan sudut awal 0.1 radian, kendali *Hybrid PID-Fuzzy* dapat menjaga keseimbangan pendulum tetap berada pada posisi atas dimana menghasilkan *settling time* sebesar 0.7 detik dan *error steady state* sebesar 0.000123. Selanjutnya hasil pengujian sistem dengan pemberian gangguan, perubahan sudut maksimal dari pemberian gangguan terjadi sebesar 0.0014 radian dan *recovery time* pada keadaan *steady* untuk gangguan pada detik ke 3 sampai ke 5 sebesar 0.2 detik dan untuk gangguan pada detik ke 6 sampai ke 8 sebesar 1.2 detik.

Daftar Pustaka

[1] M.A. Johnson and M.H. Moradi."PID Control: New Identification and Design Methods". *Springer-Verlag London*. 2005. UK. ISBN: 13: 978-1-85233-702-5. [E-book].

[2] S.R.Vaishnav dan Z.J.Khan. "Design and Performance of PID and Fuzzy Logic Controller with Smaller Rule Set for Higher Order System". *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2007, WCECS 2007*, October 24-26, 2007, San Francisco, USA. [Online]. Tersedia : http://www.iaeng.org/publication/WCECS2007/WCECS2007_pp855-858.pdf. (Diakses 10 Februari 2016)

[3] A.I. Mohammed,. "Simplified Fuzzy Logic Controller Design for Higher Order Processes". *International Journal of Science and Research (IJSR)*, India Online ISSN: 2319-7064. Volume 2 Issue 6, June 2013. [Online]. Tersedia :

- <http://www.ijsr.net/archive/v2i6/IJSRON20131110.pdf>. (Diakses 24 Februari 2016).
- [4] A.Fattah."Design and Analysis of Speed Control Using Hybrid PID-Fuzzy Controller for Induction Motors". (2015). *Master's Theses*. Paper 595.
- [5] H.S Bachri M. "Sistem Kendali Hybrid Pid - Logika Fuzzy Pada Pengaturan Kecepatan Motor Dc". *MAKARA, TEKNOLOGI, VOL. 8, NO. 1, APRIL 2004: 25-34*. [Online]. Tersedia : <http://repository.ui.ac.id/contents/koleksi/2/5c914ce5202c0c651d5951f5811bec772347063a.pdf>. (Diakses 12 Februari 2016)
- [6] Nowab Md. Aminul Haq dan A.E. Rasul." Stabilizing and Balancing of Linear and Rotary Inverted Pendulum System".Februari 2016. [Online]. Tersedia : <https://www.overleaf.com/articles/bangladesh-university-of-engineering-and-technology-buet-thesis-template/hgspdxtdnjyp/viewer.pdf>. (Diakses 3 April 2016).
- [7] I.P. Adinata Mas Pratama, I.N. Suweden, I.A.B. Swamardika. "Sistem Kontrol Pergerakan Pada Robot Line Follower Berbasis Hybrid PID-Fuzzy Logic". *Prosiding Conference on Smart-Green Technology in Electrical and Information Systems Bali*, 14-15 November 2013. ISBN: 978-602-7776-72-2. [Online]. Tersedia : <http://ojs.unud.ac.id/index.php/prosidingcsgteis2013/article/download/7244/5493>. (Diakses 22 Februari 2016)
- [8] S.W. Jadmiko, S. Yahya, K. Wijayanto dan, H. Agung. "Aplikasi Kendali Hibrid Fuzzy-Pid Kecepatan Motor Induksi Untuk Purwarupa Pembangkit Listrik Pico Hidro Berbasis Plc". ISSN : 2407 – 1846 e-ISSN : 2460 – 8416. 2015. [Online]. Tersedia : <https://jurnal.ftumj.ac.id/index.php/semnas tek/article/download/429/395>. (Diakses 24 Februari 2016)
- [9] S. Rohmad dan S. S. Sukiswo Edie. 2015. "Desain Dan Analisis Kendali Sistem Suspensi Menggunakan Pid Dan Logika Fuzzy Dengan Simulink Matlab". *Unnes Physics Journal*, ISSN 2252-6978. (2015). [Online]. Tersedia : <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/upj/article/view/7028/4984>. (Diakses 28 Februari 2016)
- [10] M.B. Husin. "Modelling And Controller Design For Rotary Inverted Pendulum System". April 2010. [Online]. Tersedia : http://portal.fke.utm.my/libraryfke/files/583_MAZWANIBINTIHUSIN2010.pdf. (Diakses 2 Februari 2016)
- [11] Muntari dan H. Nurhadi. "Desain Sistem Kendali Rotary Pendulum Dengan Sliding-PID". *JURNAL TEKNIK POMITS*, Vol. 2, No. 2, (2013) ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print). [Online]. Tersedia : <http://ejournal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/4577/1075>. (Diakses 20 Februari 2016)
- [12] T.T. Fong, Z. Jamaludin dan, L. Abdullah." System Identification And Modelling Of Rotary Inverted Pendulum". *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, Jan. 2014. ISSN: 22311963. [Online].
- [13] A.G.A. Salman. 2012. "Pemodelan Dasar Sistem Fuzzy". 2 Maret 2012. [Online]. Tersedia: <http://socs.binus.ac.id/2012/03/02/pemodelan-dasar-sistem-fuzzy> (diakses pada 28 Februari 2016).
- [14] Sudrajat. "Modul Kuliah : Dasar-Dasar Fuzzy Logic". Bandung : Univ. Padjadjaran, 2008. [Ebook] Tersedia : https://www.academia.edu/7247080/Dasar_dasar_fuzzy_logic (diakses pada 1 Maret 2016)
- [15] G. Chen and T.T. Pham. *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*. Florida, United States Of America. CRC Press LLC. 2001. [E-book].
- [16] K.M. Passino, and S. Yurkovich. *Fuzzy Control*. Addison Wesley Longman, Inc. California. ISBN: 0-201-18074-X. [E-book].
- [17] R. Munir."Bahan Kuliah: Sistem Inferensi Fuzzy".Teknik Informatika-STEI ITB. [E-book].
- [18] Suyanto. *Artificial Intelligence*. Edisi kedua. Bandung:INFORMATIKA. 2011. ISBN:978-602-8758-20-8
- [19] A. Jose, C. Augustine, S. M. Malola, and K. Chacko, "Performance Study of PID Controller and LQR Technique for Inverted Pendulum," *World Journal of Engineering and Technology*, 3, 76-81, May 2015. [Online]. Tersedia : <http://www.scirp.org/journal/wjet> (diakses 1 juni 2016).