

PERANCANGAN SISTEM KENDALI UNTUK KESTABILAN PENDULUM TERBALIK

*Design of Control System for Stability of Inverted Pendulum*Amelia Septiani Rizki¹, Porman Pangaribuan², Agung Surya Wibowo.,ST.,MT³^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom¹ameliasr@students.telkomuniversity.ac.id, ²porman@telkomuniversity.ac.id,³agungsw@telkomuniversity.ac.id**Abstrak**

Sistem pendulum terbalik saat ini banyak diaplikasikan dalam metode lepas landas dan mendarat pada pesawat terbang atau yang biasa dikenal dengan *Vertical Take-Off and Land* (VTOL). Prinsip sistem pendulum terbalik digunakan oleh pesawat terbang pada bagian sistem *tilt-rotor*. Namun, sistem pendulum terbalik memiliki stabilitas yang rendah dan bersifat nonlinear serta sangat sensitif terhadap gangguan baik gangguan dari luar (*noise*) atau gangguan pada sistem itu sendiri. Oleh sebab itu, dibutuhkan suatu teknik kendali untuk mengatasi agar pendulum terbalik dapat mempertahankan posisi kesetimbangannya. Pendulum terbalik pada dasarnya dapat dirancang dalam dua bentuk yaitu *Linear Inverted Pendulum* (Lintasan berbentuk transversal) dan *Rotary Inverted Pendulum* (lintasan berbentuk putaran).

Pada tugas akhir ini, sistem pendulum terbalik yang dirancang yaitu *linear inverted pendulum* dengan menggunakan metode *fuzzy logic controller* pada sistem kestabilan sudut batang pendulum dan metode gain constant untuk kestabilan posisi *cart*. Sistem pendulum terbalik yang dirancang juga dapat mempertahankan kestabilannya ketika diberi gangguan baik sinyal impuls maupun sinyal pulsa.

Hasil dari perancangan sistem pendulum terbalik dapat mempertahankan kestabilan batang pendulum baik dengan atau tanpa gangguan dengan nilai *max overshoot* 50 % untuk gangguan berupa sinyal impuls dan 89% untuk gangguan berupa sinyal pulsa. Namun, pada sistem kestabilan posisi *cart* terdapat *error steady state* setelah sistem diberi gangguan.

Kata Kunci : *fuzzy logic controller, linear inverted pendulum, V-TOL*

Abstract

The inverted pendulum system is currently widely applied in takeoff and landing methods on aircraft or commonly known as Vertical Take-Off and Land (VTOL). The principle of an inverted pendulum system is used by an aircraft on the tilt-rotor system. However, the inverted pendulum system has low stability and is nonlinear and is very sensitive to interference with either noise from outside or noise on the system itself. Therefore, a control technique is needed to overcome the inverted pendulum to maintain its equilibrium position. The inverted pendulum can basically be designed in two forms: Linear Inverted Pendulum (Transversal Transverse) and Rotary Inverted Pendulum (round-shaped path).

In this final project, the inverted pendulum using the fuzzy logic controller method on the pendulum system corner stability and the constant gain method for stability of the cart position. The inverted pendulum system that is designed can also maintain its stability when it is impaired both the impulse signal and the unit step signal.

The result of the inverted pendulum system is that the system can maintain the stability of the pendulum rod either with or without interference with max overshoot value is 50% for impulse signal disturbance and 89% for disturbance of pulse signal. However, in the stability of the cart system there is a steady state error after the system is interrupted.

Keyword : *fuzzy logic controller, linear inverted pendulum, V-TOL.*

1. Pendahuluan

Sistem pendulum terbalik saat ini banyak diaplikasikan dalam metode lepas landas dan mendarat pada pesawat terbang atau yang biasa dikenal dengan *Vertical Take-Off and Land* (VTOL)^[1]. Prinsip sistem pendulum

terbalik digunakan oleh pesawat terbang pada bagian sistem tilt-rotor, artinya dalam posisi lepas landas dan mendarat posisi baling-baling rotor diubah arahnya ke atas menjadikan pesawat terbang mempertahankan kestabilannya.

Pendulum terbalik meletakkan titik beratnya berada di atas titik tumpunya. Sehingga memiliki stabilitas rendah. Sistem ini merupakan salah satu alat yang sangat terpengaruh oleh fenomena-fenomena alam serta memiliki sifat nonlinear dan relatif sulit untuk stabil^[2]. Oleh sebab itu, dibutuhkan pengontrolan agar alat tersebut dapat mempertahankan kesetimbangan pada posisi setimbang dengan atau tanpa gangguan.

Pada tugas akhir ini, sistem pendulum terbalik yang dirancang yaitu *linear inverted pendulum* dengan menggunakan metode *fuzzy logic controller* pada sistem kestabilan sudut batang pendulum dan metode gain konstan untuk kestabilan posisi *cart*. Sistem pendulum terbalik yang dirancang juga dapat mempertahankan kestabilannya ketika diberi gangguan baik sinyal impuls maupun sinyal pulsa.

2. Dasar Teori

2.1. Sistem Kendali *Close-Loop*

Sistem kendali pada pendulum terbalik yaitu sistem kendali *closed-loop*. Dimana, pada sistem kendali ini dibutuhkan nilai *error* yang dihasilkan berdasarkan selisih nilai *input* dengan nilai pembacaan sensor (*feedback*). Nilai *error* sendiri didapat dari selisih antara sudut yang terbaca pada batang pendulum dengan sudut referensinya dimana nilai negatif menandakan batang pendulum berputar berlawanan jarum jam dan sebaliknya serta selisih antara posisi *cart* pada lintasan terhadap *setpoint* dimana nilai negatif menandakan posisi *cart* berada di sisi kanan dan sebaliknya (pada kasus pendulum terbalik sudut referensi = 0° dan posisi referensi = 0 cm).

2.2. Metode Kendali *Fuzzy Logic*

2.2.1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan langkah awal dalam proses kendali *fuzzy logic*. Pada proses ini, nilai yang terbaca dalam bentuk himpunan tegas (*crisp set*) yaitu nilai yang diukur oleh sensor (sudut) diubah ke dalam bentuk himpunan *fuzzy*. Dalam fuzzifikasi terdapat perhitungan derajat keanggotaan (*membership function*) yang memiliki interval antara 0 sampai 1.

2.2.2. Fuzzy Inference

Fuzzy Inference adalah proses pemetaan dari *input* yang sudah dalam bentuk himpunan *fuzzy* ke sebuah *output* dengan *fuzzy logic* sehingga membentuk *rules fuzzy*. Pada tugas akhir ini, logika *fuzzy* yang digunakan yaitu Sugeno Orde I. Metode Sugeno lebih sering digunakan pada pengaplikasian *fuzzy logic controller*. Pada tugas akhir ini *rules* yang digunakan seperti berikut.

Tabel 2.1 Rules Fuzzy

<i>E</i> / <i>dE</i>	NL2	N2	Z2	P2	PL2
NL	ONL	ONL	ONL	ON	OZ
N	ONL	ONL	ON	OZ	OP
Z	ONL	ON	OZ	OP	OPL
P	ON	OZ	OP	OPL	OPL
PL	OZ	OP	OPL	OPL	OPL

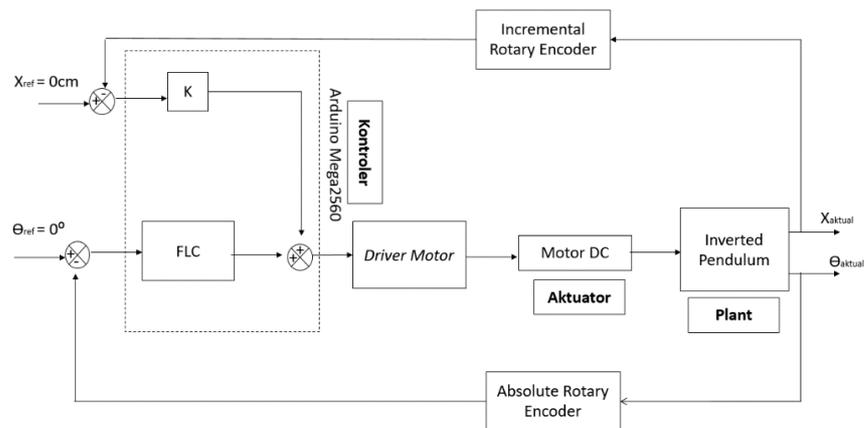
2.2.3. Defuzzifikasi

Metode *weighted average* merupakan metode defuzzifikasi yang digunakan pada *fuzzy inference* model sugeno. Persamaan untuk *weighted average* sebagai berikut:

$$Z = \frac{w_1 z_1 + w_2 z_2}{w_1 + w_2} \quad (1)$$

2.3. Blok Diagram Umum

Sistem pendulum terbalik yang dirancang bertujuan untuk menyeimbangkan batang pendulum dan posisi. Berikut gambar dari blok diagram sistem:

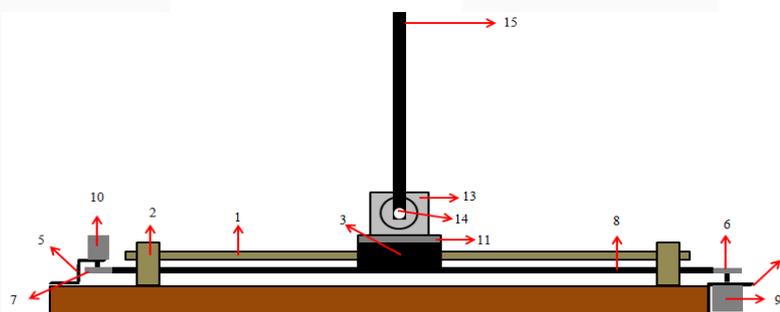


Gambar 1. Blok Diagram Umum

Gambar 1 sistem yang akan dirancang akan memiliki masukan berupa nilai sudut kemiringan yang diperoleh dari sensor *absolute rotary encoder* dan posisi *cart* yang diperoleh dari sensor *incremental rotary encoder*. Kedua sensor ini dapat membaca nilai sudut dan jarak karena adanya perubahan posisi pada porosnya yang dibaca dalam bentuk sinyal pulsa dan dikonversikan menjadi nilai yang dibutuhkan (sudut dan posisi).

2.4. Desain Perangkat Keras

Gambar 2 menunjukkan konstruksi komponen yang ada pada sistem.

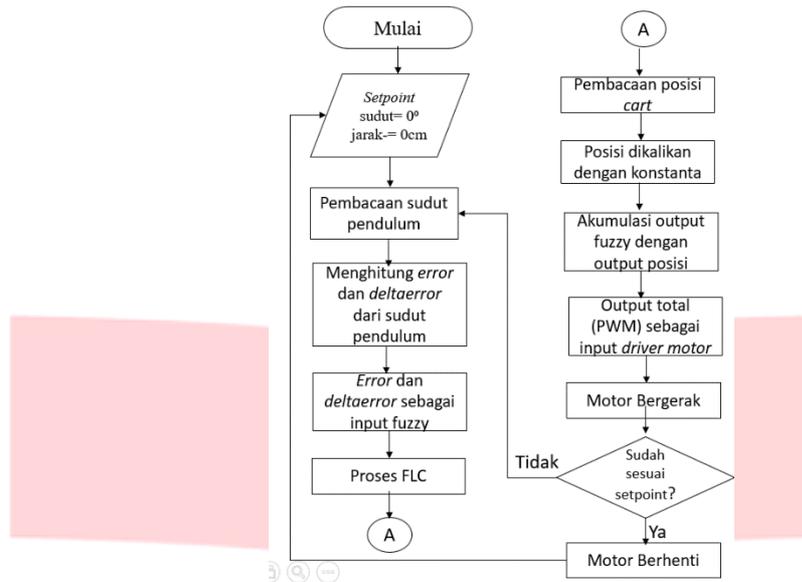


Gambar 2. Desain Mekanik

Perancangan mekanik pada sistem ini memperlihatkan konstruksi perangkat pada realisasi alat. Adapun bahan yang digunakan untuk membuat mekanik pendulum terbalik yaitu terdiri dari kayu, aluminium dan baja. Perancangan mekanik dibuat dari merancang sistem lintasan pendulum terbalik terlebih dahulu. Setelah itu pemasangan motor DC dan sensor *incremental rotary encoder*.

2.5. Diagram Alir

Diagram alir sistem kendali tugas akhir ini dapat digambarkan sesuai gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Sistem

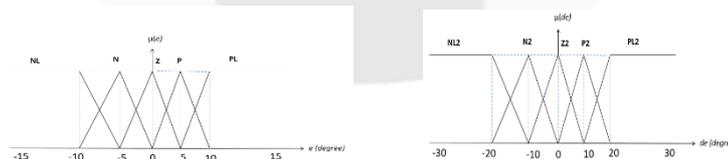
Gambar 3 menunjukkan diagram alir sistem kestabilan pendulum terbalik. Pertama program mengatur *setpoint* untuk sudut batang pendulum pada 0° dan posisi *cart* pada 0 cm. Kemudian sensor akan membaca nilai sudut terlebih dahulu melalui sensor *absolute rotary encoder* dan nilai ini kemudian dibandingkan dengan *setpoint* (0°) sehingga mendapatkan nilai *error* (e) dan *deltaerror* (Δe) dari selisih kedua nilai tersebut. Nilai (e) negatif menandakan sudut batang pendulum berada di sebelah kiri sumbu vertikal dan sebaliknya. Kemudian program akan melakukan proses fuzzyfikasi seperti yang telah dijelaskan pada Bab II. *Output* pada sistem fuzzy dijadikan sebagai nilai PWM ke-satu. Selanjutnya program menjalankan untuk pengendalian posisi *cart*. Posisi *cart* dideteksi dengan pembacaan sensor *incremental rotary encoder*. Hasil keluaran sensor tersebut dikonversikan ke dalam bentuk posisi. Dimana, ketika posisi bernilai negatif menandakan bahwa posisi *cart* berada di sisi kanan lintasan dan sebaliknya. Nilai posisi ini kemudian dikalikan dengan suatu nilai konstanta. Pada tugas akhir ini, konstanta bernilai 7. Nilai ini didapat dengan *hand tuning*. Hasil perkalian konstanta tersebut dengan posisi aktual *cart* dijadikan nilai PWM ke-2.

Selanjutnya hasil PWM pertama dan hasil PWM ke-dua dijumlahkan. Nilai inilah yang dikirimkan oleh mikrokontroler ke *driver* motor sehingga tegangan keluaran *driver* motor menjadi catu daya untuk pergerakan motor DC.

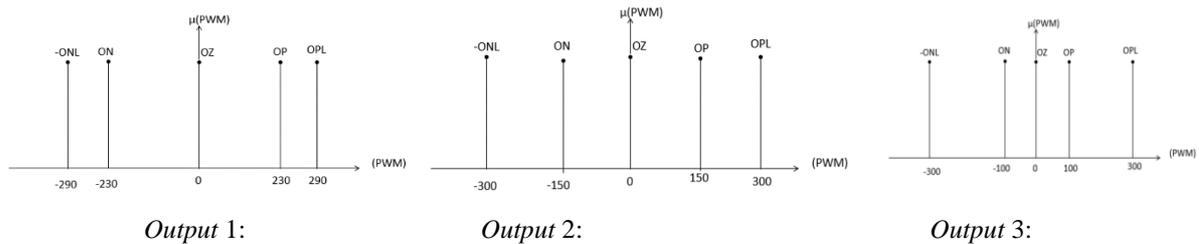
3. Hasil Percobaan dan Analisa

3.1. Pengujian Sistem dengan Mengubah *Output Fuzzy*

Tujuan dari pengujian sistem ini untuk menentukan perancangan *output fuzzy* dengan respon sistem terbaik dalam menstabilkan sudut batang pendulum. *Membership Function* yang digunakan pada sistem ini seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. *Membership Function Input Fuzzy*



Gambar 5. Output Fuzzy

Tabel 2. Hasil Percobaan Output Fuzzy

No.	Nilai Output	Maksimum Amplitude
1.	Output 1	-2.46°
2.	Output 2	-2.11°
3.	Output 3	-2.11°

Dari hasil pengujian yang didapat nilai maksimum *amplitude* sudut terkecil dihasilkan dari *output fuzzy* ke-2 dan ke-3. Sedangkan, kestabilan setiap *output* berbeda-beda. Dari grafik respon sistem diatas, dapat disimpulkan sistem yang lebih stabil pada perancangan *output fuzzy* ke-3.

3.2.Percobaan Sistem dengan Nilai Massa yang Berbeda

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh massa pada sistem Pendulum Terbalik. Respon sistem yang diperhatikan pada pengujian ini yaitu respon sudut aktual terhadap waktu karena pada pengujian ini yang diamati yaitu gerak rotasi pada batang pendulum

Tabel 3. Hasil Percobaan Dengan Berbagai Nilai Massa

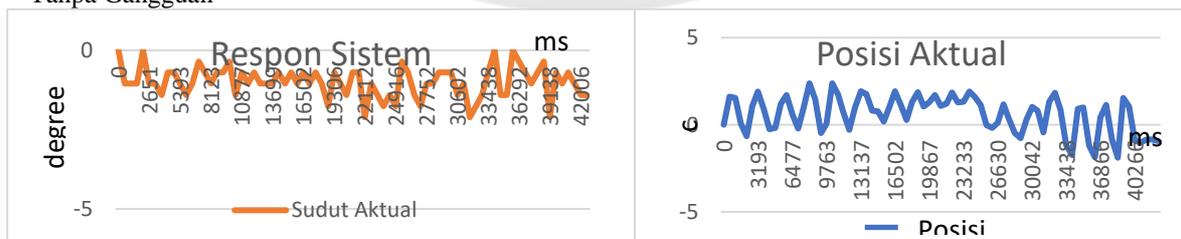
No	Nilai Beban	Maksimum Amplitude
1.	100 gram	1.5°
2.	200 gram	-2.11°
3.	300gram	-2.11°

Pada tabel di atas memperlihatkan hasil dari ketiga pengujian dengan berbagai macam nilai beban. Dari hasil yang didapat, selisih nilai maksimum *amplitude* dari berbagai nilai beban tidak terlalu besar. Namun pada beban ke-2 dan ke-3 nilai maksimum *amplitude* lebih besar dibandingkan dengan beban ke-1. Hal ini disebabkan massa atau pada gerak rotasi disebut dengan momen inersia dapat mempengaruhi model sistem.

3.3. Pengujian Sistem Tanpa Gangguan dan dengan Gangguan

Pada pengujian ini ada dua respon sistem yang diamati yaitu sudut aktual batang pendulum posisi *cart* aktual terhadap waktu sebelum diberi gangguan dan setelah diberi gangguan. Tujuan dari pengujian ini untuk melihat *robust* sistem terhadap pendulum terbalik yang dirancang.

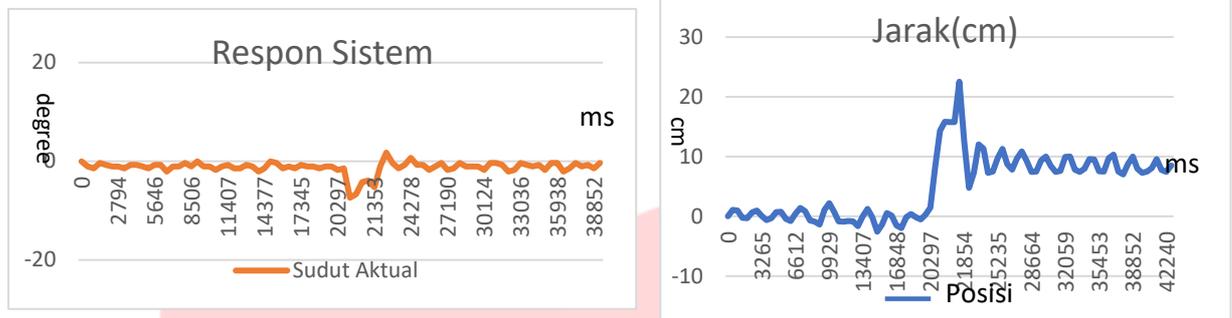
- Tanpa Gangguan



Gambar 6. Respon Sistem Tanpa Gangguan

Pada kedua grafik diatas dapat diketahui bahwa sistem dapat mempertahankan kestabilannya selama 42006ms (*millisecond*). Dengan maksimum *amplitude* pada sudut -2.11° serta maksimum *amplitude* pada posisi 2.38 cm.

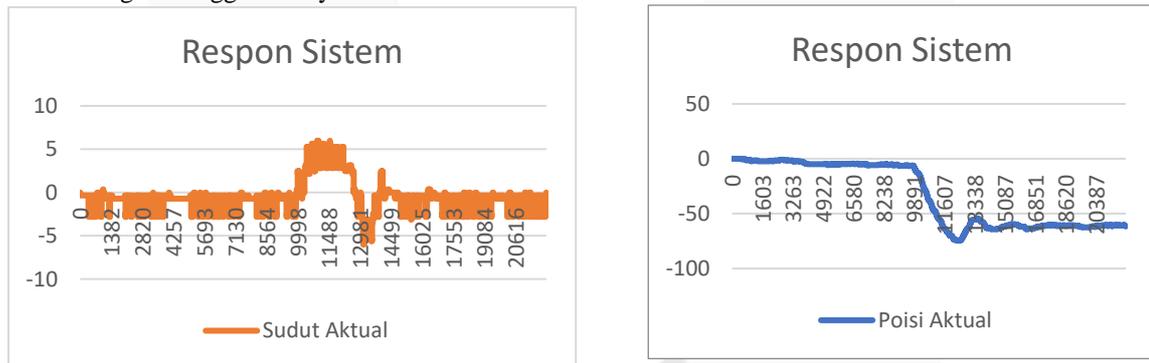
- Dengan Gangguan Sinyal Impuls



Gambar 7. Respon sistem saat diberi gangguan sinyal impuls

Grafik diatas menunjukkan sistem diberi gangguan yaitu sinyal impuls pada batang pendulum di detik ke-20. Adapun sudut simpangan yang terbaca yaitu -7.38° dan posisi bergeser sejauh 22.38 cm kearah kiri. Setelah itu sistem mulai berusaha untuk menyeimbangkan pendulum dan mengembalikan posisi cart pada setpoint (0 cm). Hal ini dapat diamati yaitu semakin kecilnya nilai *error* baik posisi maupun sudut pada sistem. Setelah diberi gangguan, sistem memiliki nilai max *overshoot* sebesar 23,84% untuk sudut dengan *peak time* selama 2 detik. Pada posisi terdapat *error steady state* yang cukup besar yaitu cart tidak kembali ke posisi awal (0 cm) dan cenderung bergerak pada posisi ± 10 cm. Dari kedua respon tersebut kondisi *settle* yang diperoleh setelah sistem diberi gangguan yaitu pada detik ke-25. Dapat disimpulkan bahwa sistem pendulum terbalik dapat mempertahankan kestabilannya pada sudut batang pendulum namun kestabilan posisi cart tidak dapat dipertahankan ketika adanya gangguan.

- Sistem Dengan Gangguan Sinyal Pulsa



Gambar 8. Respon sistem saat diberi gangguan sinyal pulsa.

Pada kondisi ini, sistem diberi gangguan yaitu sinyal pulsa pada batang pendulum dari detik ke-10 hingga detik ke-12. Adapun sudut simpangan yang terbaca yaitu sekitar -5° dan posisi bergeser sebesar 74 cm ke kiri (pengujian dilakukan dari lintasan paling pinggir). Setelah itu sistem mulai berusaha untuk menyeimbangkan pendulum dan mengembalikan posisi cart pada *setpoint* (0 cm). Hal ini dapat diamati yaitu semakin kecilnya nilai *error* baik posisi maupun sudut pada sistem. Pada saat sistem mempertahankan kestabilan setelah diberi gangguan sistem memiliki nilai max *overshoot* sebesar 87,8% untuk sudut. Pada posisi terdapat *error steady state* yang cukup besar dimana cart tidak kembali ke posisi awal (0 cm) dan cenderung bergerak pada posisi ± 60 cm. Dari kedua respon tersebut kondisi *settle* yang diperoleh setelah sistem diberi gangguan yaitu pada detik ke-15. Dapat disimpulkan bahwa sistem pendulum terbalik dapat mempertahankan kestabilannya pada sudut batang pendulum namun kestabilan posisi cart tidak dapat dipertahankan ketika adanya gangguan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis sistem yang dibuat penguji didapat beberapa kesimpulan antara lain sebagai berikut:

1. Metode *Fuzzy Logic Controller* terbukti dapat mengendalikan kesetimbangan sistem pendulum terbalik.
2. Nilai massa pada sistem pendulum terbalik berpengaruh dalam mempertahankan kestabilan sudut batang pendulum. Semakin besar massa-nya maka semakin sulit mencapai kestabilan sistem.
3. Ketika diberi gangguan sinyal impuls dan *unit step* sistem pendulum terbalik yang dirancang dapat mempertahankan kestabilan sudut namun pada kestabilan posisi cart terdapat *error steady state* ketika sistem

diberi gangguan. Pada saat gangguan berupa sinyal impuls *error steady state* posisi sekitar 10 cm dan pada saat gangguan berupa sinyal *unit step error steady state* bernilai 59 cm.

Daftar Pustaka

- [1] Vijayanand Kurdekar1, "Inverted Pendulum Control: A Brief Overview," *Ijmer*, vol. 3, no. 5, pp. 2924–2927, 2013.
- [2] S. Reza Dwi Imami, Aris Triwiyatno, "DESAIN KONTROL INVERTED PENDULUM DENGAN METODE," no.
- [3] P. . hindriyanto dwi purnomo, "Logika Fuzzy," p. 170, 2014.
- [4] E. Etanol, D. Waru, and G. Hibiscus, *PERANCANGAN SISTEM ROBOT PENGUKUR KONDISI JALAN BERBASIS FUZZY LOGIC*.2017.
- [5] Yulmaini Dj, "Penggunaan Metode Fuzzy Inference System (Fis) Mamdani Dalam Pemilihan Peminatan Mahasiswa Untuk Tugas Akhir," *J. Inform.*, vol. 15, no. 1, 2015.
- [6] M. M. Bachtiar, B. S. B. D, and A. R. A. Besari, "Sistem Kontrol Inverted Pendulum Pada Balancing Mobile Robot," vol. 2011, no. Ies, pp. 978–979, 2011.
- [7] A. Marzuki, "Pulse Width Modulation (PWM)," *Inst. Pertan. Bogor*, pp. 1–4, 2015.
- [8] D. W. JATI, *PEMODELAN DAN SIMULASI PENGARUH FREKUENSI PULSE WIDTH MODULATION (PWM) TERHADAP KECEPATAN MOTOR DC*. 2014.