

ANALISIS PENGARUH *MOMENT GYROSCOPE* PADA KESEIMBANGAN PENDULUM CARTESSIAN

M. I. Nugraha¹, J. Hartati², W. Afridani³, Masdani⁴

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro dan Informatika, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Sungailiat, Bangka Belitung, Indonesia, 33211

⁴Jurusan Teknik Mesin - Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Kawasan Industri Air Kantung, Sungailiat-Bangka, 33211

Tel: 0717-93586, Fax: 0717-93585, iqbal@polman-babel.ac.id

Abstract

Crane is identical to the pendulum in term of its control mechanism. Based on modelling, these two devices are very similar and therefore, the pendulum can be used as a prototype for controlling a crane. This research aims to control the balance or to reduce the swing on the pendulum by utilizing the moment of gyroscope with a mass pendulum up to 1.5 kg. Gyroscope was designed and made in the form of a disc, in which dimensions and materials used were determined according to the desired moment force. The PID controller was used to control the speed of gyroscope based on the angle of the pendulum (θ). Based on the results of the experiment, it was obtained that the resulting settling time was 2.29 times faster than without control in average. The overshoot and rise time resulted by the system using gyroscope were very similar to the system which is without gyroscope. However, the steady state error was totally eliminated. It can be concluded that the moment of gyroscope is able to be used for controlling the pendulum or crane.

Keywords: crane, pendulum, moment, gyroscope, PID

Abstrak

Alat berat berupa *crane* memiliki karakteristik yang identik dengan pendulum dalam mekanisme pengontrolannya. Artinya secara model matematik, kedua perangkat ini sangat mirip dan oleh sebab itu, pendulum bisa dijadikan prototipe untuk pengontrolan sebuah *crane*. Penelitian ini bertujuan untuk mengontrol keseimbangan atau meredam ayunan pada pendulum dengan memanfaatkan gaya momen pada *gyroscope* dengan massa pendulum hingga 1,5 kg. *Gyroscope* dirancang dan dibuat dalam bentuk piringan, yang mana dimensi dan material yang digunakan dihitung berdasarkan gaya momen yang diinginkan. Kontroler PID digunakan untuk mengendalikan kecepatan putaran *gyroscope* berdasarkan sudut kemiringan pendulum (θ). Berdasarkan hasil uji coba, diperoleh *settling time* yang dihasilkan adalah rata-rata 2,29 kali lebih cepat dibandingkan tanpa kontrol. Untuk *overshoot* dan *rise time* tidak banyak berubah, sedangkan *steady state error* adalah nol. Dapat disimpulkan bahwa *moment gyroscope* bisa digunakan untuk mengontrol pendulum dan sangat memungkinkan dalam pengendalian *crane*.

Kata kunci : crane, pendulum, moment, gyroscope, PID

1. PENDAHULUAN

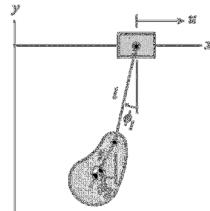
Perangkat pendulum dalam kehidupan nyata dapat dilihat dalam aplikasi berupa alat berat pemindah barang atau sering disebut juga dengan *crane*. Alat berat berupa *crane* memiliki karakteristik yang identik dengan pendulum dalam mekanisme pengontrolannya. Dalam praktiknya, *crane* digunakan secara luas untuk berbagai lapangan pekerjaan, seperti di pelabuhan, pabrik, kontruksi dan lainnya untuk menangani barang-barang[1]. Secara matematik, *gyroscope* dapat dimodelkan berdasarkan hukum energi kinetik dan perubahan momentum sudut[2]. Dalam beberapa kurun waktu, pendulum dapat menjalani berbagai perubahan di negara bagian, termasuk pada saat penelitian[3]. Teknik kontrol pendulum yang dilakukan selama ini, selalu mengasumsikan bahwa aktuator yang digunakan bisa mendukung untuk dilakukan pergerakan yang cepat dan akurat. Namun, dalam kenyataannya, aktuator yang digunakan pada *crane* tidak bisa digunakan untuk pergerakan yang cepat. Oleh karena itu, sistem kontrol yang handal tidak akan mampu diterapkan secara *real* ke sistem kontrol *crane*, jika tingkat

mobilitas dan fleksibilitas aktuator pada *plant* tersebut rendah. Berdasarkan permasalahan yang ada, penelitian ini mencoba merancang suatu alternatif baru dalam teknik pengontrolan alat yang bertipe pendulum dengan melibatkan atau memanfaatkan fenomena gaya momen pada *gyroscope*. *Gyroscope* yang dimaksud disini adalah aktuator tambahan yang digunakan sebagai media yang akan menghasilkan gaya yang berlawanan untuk meredam getaran atau ayunan pada objek atau barang yang akan dipindahkan. Ketika sebuah *gyroscope* diputar dengan kecepatan tertentu, maka ada gaya reaksi yang terjadi dengan arah tegak lurus terhadap arah putaran tersebut.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Sistem Kontrol Pendulum

Teknik sistem kontrol pendulum pada dasarnya bertujuan untuk memperpendek *settling time*, mereduksi *overshoot* dan mengeliminasi *steady state error* pada saat signal aktuasi diberikan ke pendulum. Untuk mencapai ini, teknik sistem kontrol berbasis *PID controller* bisa diterapkan dengan metode tuning yang baik [4]. Dengan mendapatkan konstanta yang sesuai pada masing-masing variabel kontroler, hasil yang diinginkan pada pengontrolan pendulum bisa dicapai. Sebuah pendulum (bandul) dianggap sebagai gerak berayun bebas dan periodik berdasarkan gesekan sebagai respon dari gaya gravitasi. Jika beban ditarik dari posisi seimbang dengan sudut simpangan tidak lebih dari 10, kemudian dilepaskan maka beban akan berayun pada bidang vertikal [5]. Sebuah sistem bandul matematik atau bandul sederhana terdiri atas sebuah benda bermassa m yang dimensinya kecil, sehingga dapat dianggap sebagai partikel berupa titik, digantungkan pada seutas tali membentuk ayunan seperti pada gambar 2.1.

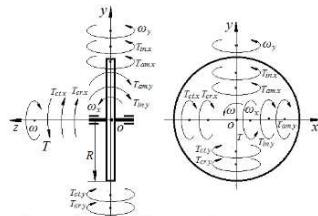


Gambar 2.1 Model Sistem Pendulum [6]

2.2 Gyroscope

Gyroscope adalah sebuah perangkat yang terdiri dari sebuah piringan atau roda yang bisa diputar dengan cepat pada suatu axis tertentu secara bebas [7]. Dengan adanya putaran tersebut, maka ada perubahan momen gaya yang ditimbulkan secara tegak lurus dengan arah putaran. Dalam dunia instrumentasi, *gyroscope* digunakan untuk mengukur orientasi berdasarkan prinsip momentum sudut. Sensor ini akan mengukur kecepatan sudut dari suatu rotasi yang satuananya adalah radian per detik. Mekanismenya adalah sebuah roda berputar dengan piringan didalamnya yang tetap stabil. Secara matematik, *gyroscope* dapat dimodelkan berdasarkan hukum energi kinetik dan perubahan momentum sudut [2].

Dengan pemodelan, reaksi dari pergerakan *gyroscope* bisa diobservasi. Efek gaya yang ditimbulkan pada sebuah *gyroscope* bisa dilihat pada gambar 2.2.



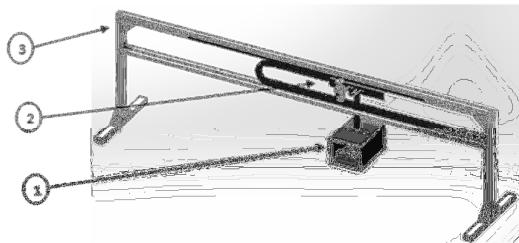
Gambar 2.2 Torsi dan Gaya Internal Gyroscope [2]

Gaya inersia yang ditimbulkan oleh *gyroscope* dimanfaatkan untuk memberikan reaksi pada sistem keseimbangan. Pada kecepatan yang tinggi lalu secara mendadak dilakukan pengereman, maka

gaya inersia yang ditimbulkan cukup untuk menggerakkan sebuah massa tertentu. Kecepatan putaran *gyroscope* menentukan besarnya gaya inersia yang dihasilkan, disamping massa dan diameter[8].

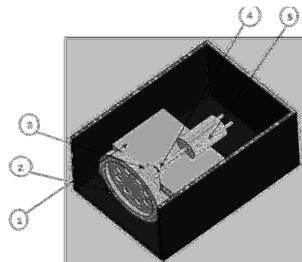
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Konstruksi Prototipe Crane



Gambar 3.1 Prototype Konstruksi Pendulum

Pada gambar 3.1 bagian-bagian konstruksi prototipe *crane* yang dibangun diantaranya adalah (1) *box* pendulum, di dalamnya sudah terpasang dengan *gyroscope*; (2) pembawa cartessian; dan (3) konstruksi rangka *crane* cartessian.

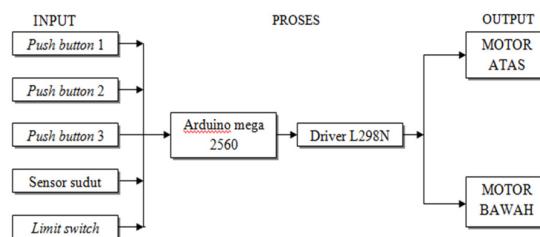


Gambar 3.2 Perangkat di dalam Box Pendulum

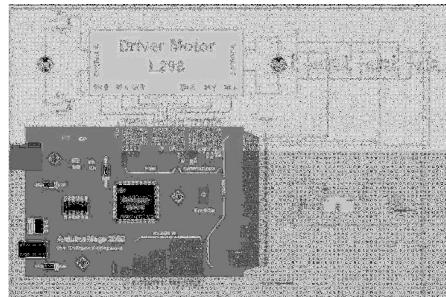
Perangkat yang terdapat pada *box* pendulum seperti yang terlihat pada gambar 3.2 meliputi: (1) Dudukan *gyroscope*; (2) Piringan *gyroscope*; (3) Hose bearing; (4) Coupler / penghubung poros; dan (5) Motor DC.

Konstruksi prototipe *crane* ini dilengkapi kerangka kontruksi berukuran 50 cm dan panjang 180 cm dengan jangkauan pergerakan bandul mencapai 150 cm. Massa *box* pendulum bisa ditambah dengan beban hingga 1,5 kg. *Box* pendulum menggantung pada rangka prototipe *crane* melalui sebuah pelat penyangga. Pelat penyangga tersebut terhubung dengan sebuah motor DC yang dapat begerak pada *rell sliding* sepanjang rangka prototipe *crane*. Pada bagian ujung *rell sliding* diletakkan sebuah *limit switch* (saklar pembatas) yang berfungsi sebagai sensor pembatas pergerakan pendulum. Pada bagian protipe ini juga terdapat komponen *hardware* berupa sensor sudut yang dipasang pada poros putar pendulum. Sensor sudut digunakan untuk membaca sudut kemiringan atau posisi ayunan pendulum.

3.2 Rancangan Sistem

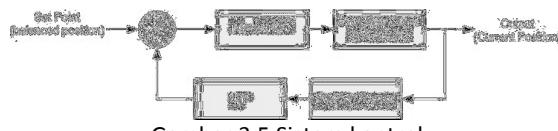


Gambar 3.3 Blok Diagram Hardware Elektrikal Pendulum



Gambar 3.4 Skematik Rangkaian Elektronika

Pada gambar 3.3 terlihat bahwa penelitian ini menggunakan dua buah motor DC, yakni motor atas (pembawa *crane*) dan motor bawah (penggerak *gyroscope*). Secara skematis, rangkaian elektronika dari sistem kontrol alat ini dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.5 Sistem kontrol

Motor pembawa *crane* dikontrol melalui tombol yang biasanya dioperasikan oleh para operator *crane* di industri. Dari sini, tidak ada yang berbeda dengan sistem kerja *crane* pada umumnya. Yang membedakannya adalah bahwa motor penggerak *gyroscope* akan aktif ketika sudut kemiringan pendulum tidak sama dengan nol, atau pendulum tersebut berayun. *Set pointnya* adalah posisi bandul harus selalu tegak lurus ketika *operator* menggerakkan motor pembawa *crane*.

Pada gambar 3.5 tampak sistem kontrol yang digunakan pada penelitian ini. Sistem kontrol PID digunakan untuk mengontrol kecepatan putaran *gyroscope* sebagai representasi gaya redaman ayunan. Sebuah *Low Pass Filter* (LPF) digunakan untuk mengeliminasi efek *noise* yang ditimbulkan oleh sensor saat pembacaan posisi pendulum. Untuk *cutoff frequency* (ω_c) sebesar 30 rad/s sudah cukup untuk menghilangkan *noise* yang muncul dari sensor.

3.3 Hasil Percobaan

3.3.1 Hasil Percobaan Pendulum Tanpa Gyroscope dan Dengan Gyroscope

Uji coba bertujuan untuk membandingkan berapa lama waktu yang diperlukan untuk meredam ayunan (*settling time*) tanpa *gyroscope* dan dengan menggunakan *gyroscope*. Adapun hasil uji coba dapat dilihat pada table 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Hasil percobaan pendulum tanpa *gyroscope* dan dengan *gyroscope*

Sudut gan	Waktu (s)			
	Tanpa Gyroscope		Dengan Gyroscope	
	Kd = 5 Kp = 5	Kd = 5, Kp = 20	Kd = 5 Kp = 5	Kd = 5 Kp = 20
60°	45	38	36	29
45°	31	28	22	19
30°	18	16	12	8
0°	0	0	0	0

Berdasarkan tabel 3.1, dapat dilihat bahwa besarnya sudut kemiringan menentukan lamanya pendulum tersebut akan mencapai kondisi stabil setelah berayun. Percobaan yang dilakukan adalah sebanyak empat kali, dimana dua kali tanpa kontrol *gyroscope* dan dua kali berikutnya dengan kontrol *gyroscope*. Untuk dua kali percobaan dengan kontrol *gyroscope* konstanta kontroler PID yang diberikan

berbeda-beda dengan metode tuning secara manual. Dari tabel 3.1, terlihat bahwa kontroler P memberikan efek yang cukup besar dalam meredam ayunan, yakni $\frac{1}{4}$ kali lebih cepat.

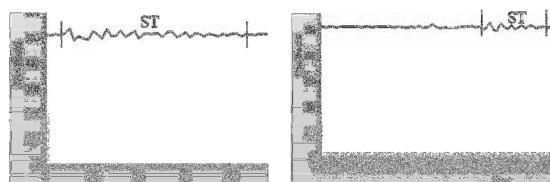
3.3.2 Data Hasil Pengujian Pendulum Secara Keseluruhan

Berikut ini hasil *settling time* pengujian pendulum secara keseluruhan tanpa menggunakan *gyroscope* dan dengan menggunakan *gyroscope*. Pengujian ini bertujuan untuk melihat berapa lama *settling time* yang dihasilkan oleh *gyroscope* dalam meredam ayunan ketika dioperasikan.

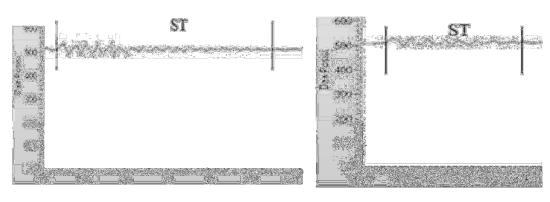
Table 3.2 Hasil Pengujian pendulum secara keseluruhan

No	Massa (kg)	Setting Time Tanpa Gyroscope	Setting Time Dengan Gyroscope	Nilai Rata-rata Setting Time
1	1,0 kg	39 s	19 s	2,05263 s
2	1,1 kg	49 s	22 s	2,22727 s
3	1,2 kg	57 s	23 s	2,47826 s
4	1,3 kg	68 s	25 s	2,72 s
5	1,4 kg	79 s	35 s	2,25714 s
6	1,5 kg	83 s	40 s	2,075 s

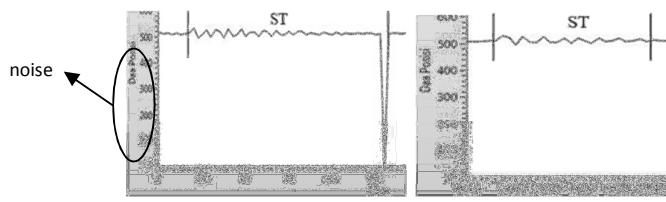
Berdasarkan hasil pengujian pendulum secara keseluruhan, diperoleh *settling time* yang dihasilkan adalah rata-rata 2,29 kali lebih cepat dibandingkan tanpa kontrol. Untuk *overshoot* dan *rise time* tidak banyak berubah, sedangkan *steady state error* adalah nol. Percobaan ini tidak menggunakan *filter* karena untuk mendapat waktu respon sebenarnya tanpa efek differensial ataupun integral untuk pengujian tanpa kontrol *gyroscope*. Oleh karena itu, pada gambar hasil ujicoba terdapat beberapa *noise* yang muncul.



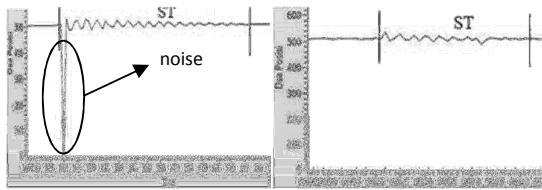
Gambar 3.6 Grafik perbandingan *settling time* dengan massa 1 kg



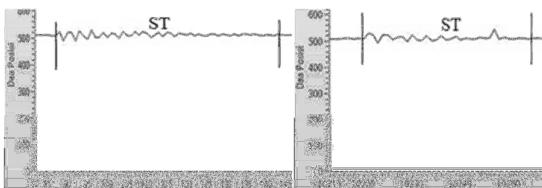
Gambar 3.7 Grafik perbandingan *settling time* dengan massa 1,1 kg



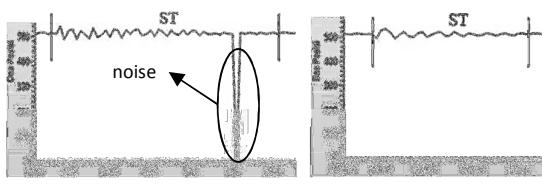
Gambar 3.8 Grafik perbandingan *settling time* dengan massa 1,2 kg



Gambar 3.9 Grafik perbandingan *settling time* dengan massa 1,3 kg



Gambar 3.10 Grafik perbandingan *settling time* dengan massa 1,4 kg



Gambar 3.11 Grafik perbandingan *settling time* dengan massa 1,5 kg

Dari hasil percobaan diatas dapat diketahui bahwa semakin berat massa yang digunakan maka semakin besar pula gaya yang terjadi pada pendulum dan waktu yang diperlukan semakin lama. Hal ini dikarenakan gaya yang diberikan tehadap suatu benda akan memberikan pengaruh terhadap benda tersebut dan berdasarkan hukum Newton III yaitu jika suatu benda memberikan gaya pada benda lain maka benda yang dikenai gaya akan memberikan gaya yang besarnya sama dengan gaya yang diterima dari benda pertama tetapi arahnya berlawanan.

Sebagai tambahan, setelah menggunakan LPF diperoleh bahwa *noise* yang ditimbulkan saat pembacaan posisi pendulum oleh sensor dapat dihilangkan.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Arah respon pendulum berlawanan dengan arah putaran *gyroscope*. Besarnya respon pendulum tergantung dari kecepatan putaran, massa, dan diameter *gyroscope*.
2. *Settling time* yang dihasilkan pada percobaan adalah rata-rata 2,29 kali lebih cepat menggunakan *gyroscope* dibandingkan tanpa kontrol, sedangkan untuk *overshoot* dan *rise time* tidak banyak berubah, serta nilai *steady state error* adalah nol.
3. Semakin berat massa pada pendulum maka *settling time* yang dihasilkan semakin lama.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Wojciech Blajer, Krzysztof Kolodziejczyk, "Motion Planning And Control Of Gantry Cranes In Cluttered Work Environment", *IET Control Theory & Applications*, vol. 5, no. 32 pp. 1370-1379, 2007.
- [2]. Ryspek Usabamatov, *Mathematical Model for Gyroscope's Gimbal Motions* [Online], diakses pada 16 Agustus 2017, Available : <http://dx.doi.org/10.15242/IIE.E1215033>.
- [3]. Felix Grasser, Aldo D'Arrigo, Silvio Colombi, Alfred C. Rufer, "JOE: a mobile, inverted pendulum", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 107-114, 2002.

- [4]. Sunil Kumar Mishra, Dinesh Chandra, Stabilization and Tracking Control of Inverted Pendulum Using Fractional Order PID Controllers [Online], diakses pada 16 Agustus 2017, Available : <https://www.hindawi.com/journals/je/2014/752918/>.
- [5]. Kintan Limiansih, Ign Edi Santosa, "Redaman pada Pendulum Sederhana", Jurusan Pendidikan Fisika, Universitas Sanata Dharma, Yogyakarta, 2013.
- [6]. Ziyad N. Masoud, Khaled A. Alhazza, "Frequency-Modulation Input Shaping Control of Double-Pendulum Overhead Cranes", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 136, no. 2, pp. 53-60, 2103.
- [7]. Jordan Meyer, Nathan Delson, Raymond A. de Callafon, "Design, Modeling and Stabilization of A Moment Exchange Based Inverted Pendulum", *Journal of Mechanical And Aerospace Engineering*, vol. 42, no. 10, pp. 462–467, 2009.
- [8]. Mohanarajah Gajamohan, Michael Merz, Igor Thommen, Raffaello D'Andrea, The Cubli: A Cube that can Jump Up and Balance [Online], Diakses pada 15 April 2107, Available : <http://citeseerx.ist.psu.edu/>.
- [9] Dorf. R. C, Bishop R. H. 2008. *Modern Control System Eleventh Edition*. Pearson International Edition: Prentice Hall.