

PENERAPAN KENDALI *FULL STATE FEEDBACK* PADA SISTEM HIL (*HARDWARE IN-THE-LOOP*) BALL AND BEAM

FAKIH IRSYADI^{1*}, MUHAMMAD ZAKIYULLAH ROMDLONY², DIEN RAHMAWATI³, AGNI FIRDAUS⁴

Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom^{1,2,3,4}

*e-mail: fakihirsyadi@telkomuniversity.ac.id.

ABSTRAK

Tulisan ini membahas mengenai penerapan kendali full state feedback untuk stabilisasi posisi bola pada sistem ball and beam. Pengujian dilakukan dengan tiga skema yaitu simulasi pada software, hardware-in-the-Loop (HIL) dimana pengendali, mikrokontroler, digunakan untuk mengendalikan virtual plant yang berupa model matematis kendalian yang dijalankan pada software simulasi, serta implementasi pada real plant yang berupa set-up sistem ball and beam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ketiga skema pengujian menghasilkan dinamika yang serupa dalam menstabilkan sistem ball and beam dengan steady state error terbesar 0,19 cm pada skema real plant. Kesesuaian hasil pada skema HIL menunjukkan potensinya untuk digunakan dalam pengujian dan pengembangan suatu algoritma kendali.

Kata Kunci: Ball and Beam, Full State Feedback, Hardware in The Loop (HIL).

I. PENDAHULUAN

Sistem *ball and beam* merupakan prototipe sederhana yang dapat digunakan untuk merepresentasikan masalah-masalah yang berhubungan dengan kendali kesetimbangan atau stabilisasi suatu sistem. sebagai contoh, kesetimbangan horizontal pesawat pada saat mendarat. Sistem *ball and beam* terdiri dari konfigurasi motor dan gear yang dihubungkan dengan batang yang kemiringannya akan berubah ketika motor bergerak. Tujuan dari sistem ini adalah mengendalikan bola yang bergerak bebas di permukaan batang agar tetap berada pada posisi tertentu meskipun ada gangguan yang diberikan pada sistem.

Hingga saat ini, telah banyak dilakukan penelitian, mulai dari kontrol klasik, non linear, hingga kendali berbasis kecerdasan buatan, mengenai pengembangan algoritma

untuk menangani masalah stabilisasi pada sistem *ball and beam*. Sebagai contoh, pada (Mustafa, 2017) membahas mengenai pengendalian sistem *ball and beam* menggunakan PID berbasis mikrokontroler dan (Basci, 2017) membahas mengenai penggunaan metode sliding mode sebagai pengendali sistem *ball and beam*. Juga metode lainnya diterapkan seperti pada (Mehedi, 2019). Pada penelitian ini dilakukan perancangan dan implementasi kendali *full state feedback* pada Hardware in the loop (HIL) simulator sistem *ball and beam*. Pengendali *full state feedback* dengan metode *pole placement* dipilih dengan alasan kemudahan dalam perancangan kendali yang didasarkan pada performansi yang diinginkan. Hal ini dikarenakan metode ini menggunakan pendekatan pemodelan *state-space* sehingga sistem dinamika orde berapapun dapat ditinjau menjadi persamaan diferensial orde satu (Franklin, 2010), (William, 2007). Contoh penerapan metode ini terdapat pada (Magaji, 2013), (Shamshiri, 2012).

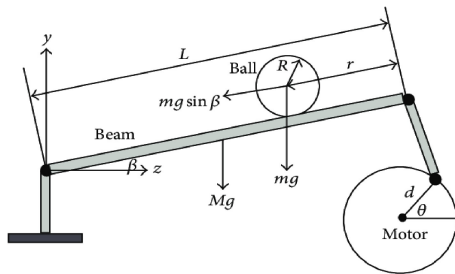
Pertimbangan utama penggunaan HIL simulator adalah untuk meminimalisir kerusakan sistem yang disebabkan proses pengujian yang berulang. Selain itu, proses pengembangan algoritma, pada sistem HIL, yang dilakukan secara langsung pada *Electric Control Unit (ECU)* menjadikan hasil perancangan kendali dapat langsung diimplementasikan pada sistem riil tanpa perlu banyak perubahan. Contoh penerapan metode ini terdapat pada (Mulka, 2016), (Munoz-Hernandez, 2013), (Kuusisto, 2018).

II.METODE PENELITIAN

Bagian ini membahas mengenai metode penelitian yang terdiri dari lima langkah yang digunakan dalam menyusun penelitian.

2.1 Pemodelan Sistem *Ball and Beam*

Sistem *ball and beam* merupakan suatu alat peraga yang terdiri dari sebuah balok panjang yang kemiringannya dapat diatur oleh motor elektrik, dan bola yang dapat bergerak mengikuti kemiringan balok.



Keterangan:
d: panjang tangan offset (m).
r: jarak bola (m)
L: panjang beam (m)
J_b: Momen inersia bola (kg.m²)
β: sudut beam (°)
θ: sudut motor servo (°)

Gambar 1. Rancangan sistem ball and beam

Dengan menggunakan metode Lagrange, didapatkan persamaan berikut:

$$0 = \left(\frac{J_b}{R^2} + m\right) \ddot{r} + mg \sin \beta - mr \dot{\beta}^2 \dots (6)$$

Linearisasi persamaan di atas pada β=0, sehingga:

$$\left(\frac{J_b}{R^2} + m\right) \ddot{r} = -mg\beta \dots (7)$$

Hubungan antara sudut beam dengan sudut motor servo:

$$\beta = \frac{d}{L} \theta \dots (8)$$

Kemudian substitusi persamaan (7) ke persamaan (8) menghasilkan:

$$\left(\frac{J_b}{R^2} + m\right) \ddot{r} = -mg \frac{d}{L} \theta \dots (9)$$

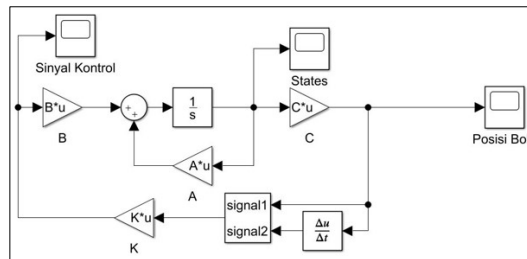
Persamaan diatas ditransformasi ke bentuk laplace sehingga didapat fungsi alih sistem ball and beam yaitu:

$$\frac{R(s)}{\theta(s)} = \frac{mgd}{L\left(\frac{J_b}{R^2} + m\right)} \frac{1}{s^2} \left[\frac{m}{rad} \right] \dots (10)$$

Berdasarkan mekanika sistem ball and beam, dengan nilai-nilai parameter pemodelan g = 9.676 m/s², d = 0.1 m dan L = 0.32 m serta bola dianggap sebagai bola berongga, maka pemodelan state space sistem ball and beam sebagai berikut,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1,81425 \end{bmatrix}; \quad C = [1 \quad 0]; \quad D = 0$$

Berikut representasi kendalian (virtual plant) yang simulasikan pada software Simulink



Gambar 2. Pemodelan virtual plant pada software Simulink

2.2 Perancangan Kendali Full State Feedback

Full state feedback adalah metode yang digunakan dalam teori sistem kontrol. Pengerjaan metode full state feedback adalah berdasarkan pada metode desain state space. Tujuan dari metode full state feedback adalah memungkinkan untuk menetapkan satu set pole untuk sistem closed loop yang akan sesuai dengan respon dinamis yang memuaskan. Pada dasarnya, full state feedback akan mengasumsikan semua variabel untuk menjadi feedback. Akan tetapi, ketika ada salah satu variabel yang tidak tersedia, maka yang harus dilakukan adalah merancang state estimator. Fungsi state estimator adalah untuk memperkirakan nilai dari variabel yang tidak tersedia tersebut berdasarkan nilai pengukuran sensor dari output sistem kontrol (Franklin, 2010), (William, 2007).

Pada saat akan merancang metode full state feedback terlebih dahulu harus mengetahui input, output, dan state melalui perhitungan state space yaitu dengan membuat pemodelan matematikanya dan kemudian akan dinyatakan dalam bentuk vektor.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \dots \dots \dots (11)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \dots \dots \dots (12)$$

$$u(t) = -Kx(t) \dots \dots \dots (13)$$

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) \dots \dots \dots (14)$$

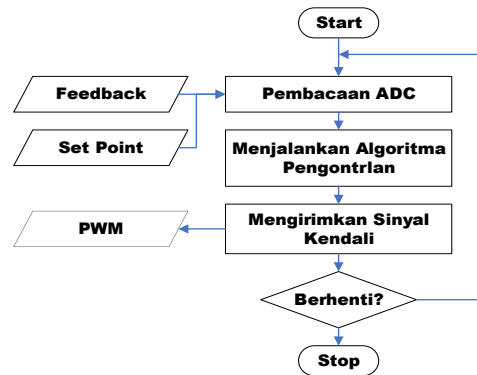
Berdasarkan persamaan diatas, $\dot{x}(t)$ merupakan state, $u(t)$ merupakan input dan $y(t)$ merupakan output. Sedangkan K merupakan gain state feedback. Sebelum mencari nilai K harus diperiksa terlebih dahulu keterkendalian dari keseluruhan sistem yaitu membuktikan jumlah orde dari sistem dan rank pada sistem jumlahnya sama (Franklin,

2010), (William, 2007). Berdasarkan persamaan *Ackerman*, berikut adalah persamaan untuk mencari nilai K :

$$K = [0 \ 1] M c^{-1} \phi_d (A) \dots \dots \dots (15)$$

dimana M matriks keterkendalian dan ϕ_d merupakan persamaan karakteristik *closed-loop* yang diinginkan.

Berikut mekanisme proses kerja pengendali yang dilakukan oleh pengendali digital (Arduino).



Gambar 3. Diagram Alir proses pengendalian

Proses pengendalian diawali dengan pembacaan nilai referensi (*set point*) dan sinyal umpan balik (*feedback*) melalui pin ADC. Proses selanjutnya adalah menjalankan algoritma kendali. Pada tahap ini, nilai *set point* dan *feedback* digunakan untuk menghitung sinyal kendali yang nantinya dikirimkan untuk mengatur kinerja *virtual plant*/kendalian riil.

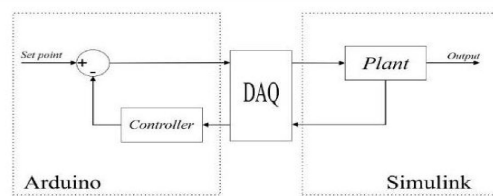
2.3 Simulasi HIL

HIL adalah teknik yang memungkinkan digunakan untuk pengembangan dan pengujian sistem kontrol yang rumit. Sistem yang dirancang terlebih dahulu dilakukan simulasi sebelum diterapkan pada sistem sesungguhnya untuk menghindari error yang dapat mengakibatkan kerusakan pada sistem sesungguhnya. HIL sangat berguna di bidang akademik dan industri. HIL dapat membantu merancang sistem agar stabil dengan hasil yang akurat dan presisi. Simulasi ini bersifat *real-time* dengan membutuhkan pemodelan matematis dari plant aslinya tanpa membutuhkan wujud asli dari kendalian, selain itu HIL juga dapat digunakan untuk menguji keseluruhan

hardware pada simulator sebelum diaplikasikan pada sistem yang asli (Munoz-Hernandez, 2013).

Penggunaan HIL dapat meningkatkan parameter keselamatan dan menurunkan risiko kerusakan sistem karena semua tes dilakukan secara virtual yang dapat berpengaruh pada berbagai hal seperti biaya, efisiensi, dan waktu pengembangan produk yang diuji.

Gambar 4 merupakan konfigurasi sistem HIL yang akan dirancang. Dalam sistem ini kontroler yang digunakan adalah Arduino dan *plant* yang digunakan merupakan *virtual plant* yang dijalankan pada *software* Simulink Matlab.



Gambar 4. Diagram blok sistem HIL

2.4 Uji Kendali secara Simulasi

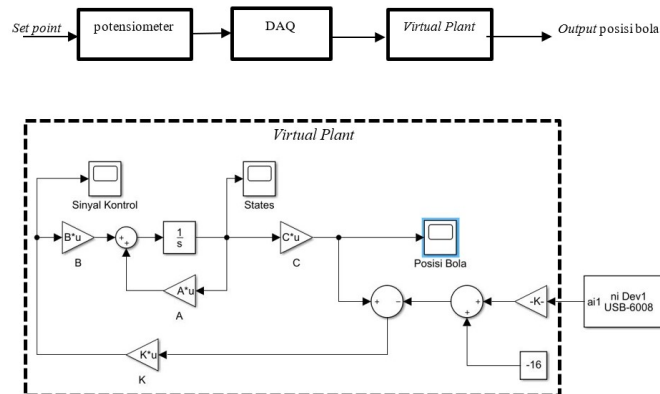
Pada bagian ini, pengujian sistem dilakukan secara simulasi. Referensi posisi *steady state* bola diatur dengan potensiometer. Hasil pengujian selanjutnya menjadi parameter kesesuaian perancangan kendali karena pengujian dilakukan ada ruang kerja yang ideal. Skema pengujian secara simulasi dapat dilihat pada Gambar 5.

2.5 Uji Kendali *Hardware-in-the-loop* (HIL)

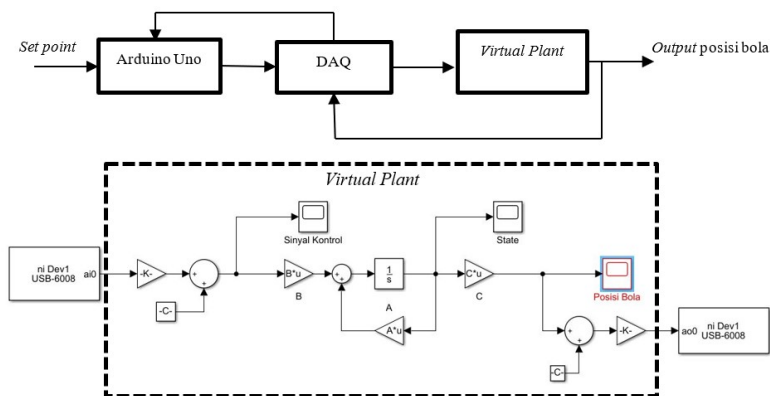
Pengujian yang kedua menggunakan skema simulasi HIL. Pada skema simulasi HIL, Arduino digunakan untuk menjalankan algoritma kendali untuk mengendalikan *virtual plant* yang dijalankan pada *software* simulasi. Skema pengujian dengan menggunakan skema simulasi HIL dapat dilihat pada Gambar 6.

2.6 Uji Kendali pada *Real Plant*

Pengujian yang terakhir dilakukan menggunakan skema *real plant*. Pada skema pengujian ini, Arduino digunakan untuk menjalankan algoritma kendali untuk mengendalikan *real plant* yang telah dirancang. Skema pengujian dengan menggunakan *real plant* dapat dilihat pada Gambar 7.



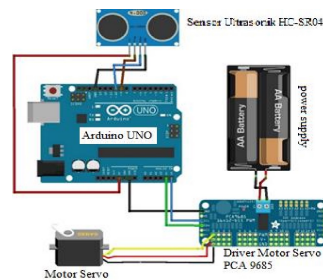
Gambar 5. Skema pengujian kendali secara simulasi



Gambar 6. Skema pengujian kendali secara HIL



(a)



Gambar 7. (a) Realisasi sistem ball and beam, (b) Skema pengujian kendali secara real plant

III.HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pendekatan performansi sistem orde dua serta performansi hasil pengendalian yang diinginkan adalah sistem mempunyai redaman *underdamped* dengan

maksimum *overshoot* 10% dan *settling time* 3 detik, maka didapat nilai konstanta pengendali sebagai berikut:

$$K = [-2.7988 \quad -1.4662]$$

3.1. Pengujian Kendali *Full State Feedback* pada Sistem *Ball and Beam*

Pada bagian ini akan ditampilkan sinyal hasil pengujian untuk setiap mekanisme simulasi. Sinyal keluaran sistem yang diamati adalah sinyal posisi dan kecepatan bola.

Tabel 1. Grafik hasil pengujian ketiga skema simulasi

Simulasi	
HIL	
Real Plant	

3.1. Pembahasan Hasil Pengujian

Sinyal keluaran dari ketiga skema pengujian menunjukkan bahwa *trend* dari ketiganya serupa. Hal ini mengindikasikan bahwa model matematis yang didapatkan valid atau berhasil merepresentasikan dinamika kendalian riil. Selanjutnya akan dilakukan pengamatan performansi sistem hasil pengendalian. Berikut merupakan tabel perbandingan simulasi, HIL, *real plant* secara *closed loop*:

Tabel 2. Data hasil pengukuran parameter *respons* sistem pada setiap kondisi awal

Parameter	Kondisi awal	Simulasi	HIL	<i>Real plant</i>
<i>Steady state</i>	11 cm	0,04 cm	-0,136 cm	0,132 cm
<i>Overshoot</i>		7,18 %	35,20 %	25,03 %
<i>Settling time</i>		2,15 s	3,721 s	2,319 s
<i>Steady state</i>	8 cm	0,03 cm	-0,276 cm	0,147 cm
<i>Overshoot</i>		7,23 %	38,18 %	23,65 %
<i>Settling time</i>		2,06 s	3,591 s	1,781 s

<i>Steady state</i>	-8 cm	-0,03 cm	-0,175 cm	-0,347 cm
<i>Overshoot</i>		7,21 %	30,29 %	34,84 %
<i>Settling time</i>		2,09 s	3,923 s	2,721 s
<i>Steady state</i>	-14 cm	-0,05 cm	-0,078 cm	-0,134 cm
<i>Overshoot</i>		5,11 %	31,32 %	4,69 %
<i>Settling time</i>		2,12 s	3,841 s	2,318 s

Untuk mempermudah analisis hasil percobaan, seluruh data hasil percobaan ditampilkan dalam bentuk rata-rata untuk setiap parameter performansi.

Tabel 3. Resume performansi sistem pada setiap skema pengujian

Parameter	Sarana Pengujian		
	Simulasi	HIL	<i>Real plant</i>
<i>Error Steady state</i>	0,0375 cm	0,1662 cm	0,19 cm
<i>Maximum Overshoot</i>	6,68%	33,75%	22,05%
<i>Settling time</i>	2,105s	3,769s	2,28s

Hasil percobaan menunjukkan bahwa seluruh performansi pada skema HIL dan *real hardware* lebih rendah dibandingkan dengan skema simulasi. Salah satu faktor yang diduga menjadi penyebabnya adalah adanya batasan mekanik dan kendala teknis pada perancangan *real plant* yang menyebabkan kendalian tidak bekerja seperti semestinya. Faktor lain yang mungkin terjadi adalah penggunaan *low cost* ECU yang menyebabkan adanya penundaan (*delay*) akibat waktu pemrosesan data dan proses transfer data menyebabkan penurunan performansi sistem khususnya *settling time* pada skema simulasi HIL.

IV.KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kendali *full state feedback* menghasilkan respon yang serupa dalam menstabilkan sistem *ball and beam* pada seluruh skema pengujian yang dilakukan dengan nilai *error steady state* terbesar 0,19 cm pada skema simulasi *real plant*.

2. Skema simulasi (*software*) menghasilkan performansi yang paling baik. Hal ini disebabkan karena pada skema simulasi, sistem bekerja pada kondisi ideal dan linear sehingga tidak terpengaruh oleh kendala-kendala teknis yang mungkin terjadi.
3. Kesesuaian hasil pengendalian pada skema HIL menunjukkan potensi yang harus terus dikembangkan untuk menunjang penggunaannya dalam proses pengembangan dan pengujian algoritma kendali dengan segala kelebihan yang tidak didapatkan pada skema lain.

DAFTAR PUSTAKA

Can, Kaan, Basci, Abdullah. 2017. Position Control of a Ball Beam Experimental Setup Based on Sliding Mode Controller. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers*. Special Issue. 29-35.

Franklin, Gene F. Powell, J.David, Naeni Abbas Emami. 2010. Feedback Control of Dinamis Systems, Canada.

Kuusisto, Aki. 2018. *Hardware in The Loop Test Setup for Battery Management Systems*, Finlandia: Tampere University.

Magaji, N, A. Dan-Isa, A U Lawan. 2013. *Desain of Full State Feedback Controller for Inverted pendulum*, Nigercon. Nigeria: Bayero University.

M. Mehedi, U. M. Al-Saggaf, R. Mansouri, M. Bettayeb. 2019. *Two degrees of freedom fractional controller design: Application to the ball and beam system*, Meas. J. Int. Meas. Confed.

Mulka, Viplav. 2016. *Hardware in The Loop Architecture for a DC Motor*, Inggris: University of Huddersfield.

G. A. Munoz-Hernandez, S. P. Mansoor, D. I, 2013. *Jones Hardware-in-the-Loop Simulation in Modelling and Controlling Hydropower Plants*, London: Springer.

Mustafa Saad , Mohammed Khalfallah. 2017. "Design and Implementation of an Embedded Ball-beam Controller Using PID Algorithm." *Universal Journal of Control and Automation* 5.4 (2017) 63 - 70. Doi: 10.13189/ujca.2017.050402.

Shamshiri, Ramin, Wan Ishak Wan Ismail, Mona Moradi. 2012. *Full State Feedback Controller for A Tractor Active Suspension*, International Conference on Agricultural and Food Engineering, Malaysia.

Williams, Robert L, Douglas, A. Lawrence. 2007. *Linear state-space control systems*, Canada.