

Desain Sistem Pengaturan Keseimbangan Posisi Bola pada Sistem *Ball and Beam* Menggunakan Metode Kendali *Root Locus* Berbasis MATLAB

Ega Pramudya Fadillah

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Surabaya
e-mail : ega.18061@mhs.unesa.ac.id

Endryansyah, Puput Wanarti Rusimamto, Muhammad Syariffuddin Zuhrie

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Surabaya
e-mail : endryansyah@unesa.ac.id, puputwanarti@unesa.ac.id, zuhrie@unesa.ac.id

Abstrak

Sistem *Ball and Beam* merupakan sebuah sistem dengan penggunaan servo sebagai aktuator yang juga terdiri dari sebuah bidang balok persegi panjang dan sebuah bola. Pada penelitian ini menggunakan metode kendali *Root Locus* yang diharapkan dapat mengatur sistem dengan efektif dibanding dengan metode kendali yang lainnya. Bila bola dalam keadaan bergerak, maka servo akan menggerakkan bidang balok agar bola pada posisi yang ditentukan. Tujuan dari sistem *ball and beam* adalah untuk menstabilkan bola ke posisi yang diinginkan pada bidang balok, dengan mengendalikan sudut kemiringan bidang balok. Skenario pengujian yang diterapkan adalah dengan menggunakan bola (*ball*) yang ditempatkan pada sebidang balok (*beam*) dan bola yang dapat berpindah naik atau turun sepanjang bidang balok. Berdasarkan hasil simulasi sistem *Ball and Beam* menggunakan metode kendali *Root Locus* pada *software* Matlab yang telah dilakukan, diperoleh hasil terbaik pada nilai *Gain* sebesar 20, *rise time* (T_r) 0.783 detik, persentase *overshoot* sebesar 1.531%, *settling time* sebesar 1.39 detik, dan *error steady state* (*Ess*) diperoleh sebesar 0.147%.

Kata Kunci: Metode *Root Locus*, Sistem Bola dan Balok, Matlab, Solidworks.

Abstract

The *Ball and Beam* system is a system using a servo as an actuator which also consists of a rectangular beam field and a ball. In this study using the *Root Locus* control method which is expected to be able to regulate the system effectively compared to other control methods. When the ball is in motion, the servo will move the plane of the block so that the ball is in the specified position. The purpose of ball and beam system is to stabilize the ball to the desired position on the plane of the block, by controlling the angle of inclination of the plane of the block. The test scenario applied is to use a ball placed on a beam and a ball that can move up or down along the plane of the beam. Based on the simulation results of the *Ball and Beam* system using the *Root Locus* control method on Matlab software that has been carried out, the best results are obtained at a *Gain* value of 20, a *rise time* (T_r) of 0.783 seconds, an *overshoot* percentage of 1.531%, a *settling time* of 1.39 seconds, and *error steady state* (*Ess*) was obtained by 0.147%.

Keyword: *Root Locus* Method, *Ball and Beam* System, Matlab, Solidworks.

PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan teknologi tumbuh semakin pesat seiring dengan perkembangan alat pada sistem kendalinya. Hal tersebut timbul dikarenakan pemikiran teori manusia yang semakin kritis sehingga mereka berharap untuk merealisasikan pemikirannya menjadi kenyataan. Kondisi ini berhubungan ketika manusia mempunyai permasalahan, maka manusia akan mencari solusi untuk menyelesaikan masalah tersebut dengan cepat dan efisien (Fikri. 2019).

Perkembangan teknologi dapat terjadi pada alat yang mempunyai fungsi penting dan bertujuan untuk menunjang manusia. Perkembangan tersebut dapat menggantikan alat sederhana menjadi teknologi yang terbaru, sehingga kegunaannya sangat efisien dan optimal.

Pada umumnya pengaplikasian sistem *ball and beam* digunakan sebagai suatu penyeimbang dalam industri pengiriman barang, pendaratan pesawat terbang, turbulensi pesawat, dan sistem kontrol posisi pesawat luar angkasa (Haidekker. 2013).

Terdapat beberapa teknologi kestabilan yang mirip dengan *ball and beam*, salah satunya adalah teknologi kestabilan pesawat secara statik. Kestabilan statik adalah kecenderungan suatu benda untuk kembali pada keadaan kesetimbangan setelah menerima gangguan. (Hanifan dan Dayanti. 2019). Kestabilan statik dapat dikatakan juga sebagai kecenderungan suatu pesawat terbang untuk membangkitkan gaya dan momen yang secara langsung melawan arah simpangan gerak pesawat terbang (Muhammad. 2017).

Konsep kestabilan *ball and beam* dapat diimplementasikan pada sistem kestabilan pesawat secara horizontal selama pendaratan dan dalam aliran turbulensi. Terdapat dua aspek yang dapat diimplementasikan dalam sistem kestabilan *ball and beam*. Salah satunya adalah bidang balok yang dapat berputar pada poros pusatnya, dan bola yang menggelinding ke arah atas atau ke arah bawah bidang balok. Salah satu aspek sistem *ball and beam* yang dapat diimplementasikan adalah ketika bola terus bergerak di atas bidang balok dan berakselerasi ketika bidang balok tidak dalam orientasi horizontal. Di mana dalam teknologi sistem kendali, *ball and beam system* dikenal juga sebagai sistem *open loop* (loop terbuka) yang tidak stabil, tetapi lebih tepat jika sistem *ball and beam* diterapkan pada sistem *closed loop* (loop tertutup). Dengan demikian, sistem kendali umpan balik (*feedback*) yang dimiliki sistem *closed loop* sangat dibutuhkan untuk mengendalikan bola pada posisi referensi yang diinginkan pada bidang balok secara akurat (Mehedi, dkk. 2019).

Tujuan utama sistem *ball and beam* adalah untuk mengendalikan kestabilan bola ke posisi yang diinginkan sepanjang bidang balok, dengan mengendalikan sudut kemiringan bidang balok. Maka dari itu, perancangan sistem kendali dengan Metode *Root Locus* digunakan untuk mengendalikan kestabilan posisi bola pada bidang balok (Mehedi, dkk. 2019). Dengan demikian, diharapkan sistem kendali metode *root locus* dapat mengendalikan keseimbangan posisi bola pada bidang balok dengan optimal.

Terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya adalah mengendalikan posisi bola pada sistem keseimbangan *Ball and Beam* menggunakan sistem kendali PID dengan pemrograman Matlab. Namun hasil terbaik sistem kendali yang diciptakan adalah pada *setpoint* 15 cm yang mempunyai *rise time* (T_r) sebesar 0.8 detik, *settling time* (t_s) sebesar 9.2 detik, *delay time* (T_d) sebesar 0,27 detik, dan *time constant* sebesar 0.44 detik (Hanifan dan Dayanti. 2019).

Penelitian selanjutnya yaitu menggunakan metode kendali logika *fuzzy* 5x3 yang menghasilkan nilai *error steady state* (Ess) pada *setpoint* 25 cm yaitu 0.079% sedangkan nilai Ess paling tinggi adalah ketika diberi *setpoint* 10 cm yaitu 8.973% (Dewi. 2018).

Berdasarkan latar belakang dan studi literatur referensi penelitian sebelumnya maka akan dilakukan pengembangan penelitian dengan mendesain metode *Root Locus* pada Matlab. Sehingga *setpoint* dan grafik respons sistem *Ball and Beam* dapat dikendalikan dan dipantau melalui simulink yang telah dirancang pada Matlab.

METODE

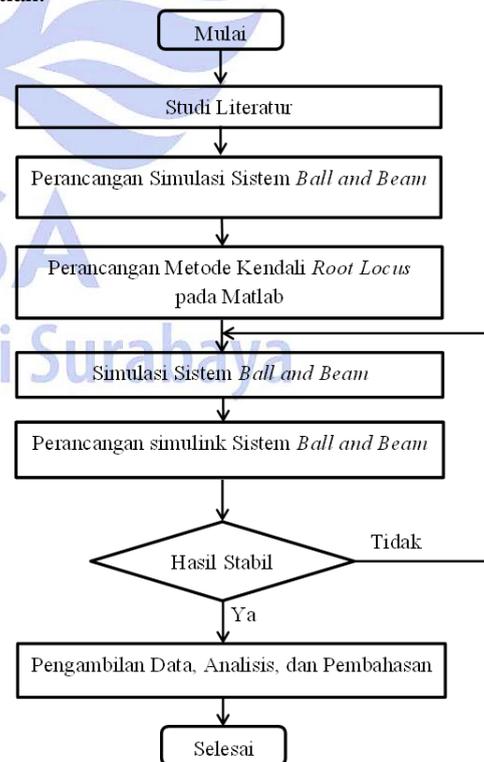
Pendekatan Penelitian

Pada penelitian ilmiah ini digunakan metode pendekatan penelitian eksperimen. Metode penelitian eksperimen adalah bentuk spesifik percobaan yang dipergunakan untuk menunjuk beberapa variabel apa saja serta bagaimana wujud korelasi antara satu dengan yang lainnya (Jaedun. 2011). Data yang dipergunakan di penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh berasal dari studi literatur seperti tesis, skripsi, dan beberapa jurnal.

Bentuk pengujian yang diterapkan adalah salah satunya menggunakan bola (*ball*) yang ditempatkan pada sebidang balok (*beam*) dan bola dapat berpindah naik atau turun sepanjang bidang balok. Sebuah lengan pengungkit (*level arm*) dihubungkan dengan bagian bidang balok pada satu sisi, dan dihubung dengan sebuah servo pada sisi yang lain. Ketika roda berputar dengan sudut θ , lengan pengungkit mengubah sudut bidang balok sebesar α . Bila sudut bidang balok berubah dari satu posisi ke yang lain, gaya gravitasi akan menyebabkan bola menggelinding sepanjang bidang balok. Maka dari itu, sebuah *controller* akan dirancang pada sistem *ball and beam* sehingga posisi bola dapat dikendalikan (Maharani dan Putri. 2019).

Rancangan Penelitian

Dapat ditampilkan bahwa diagram alir dari rancangan penelitian.

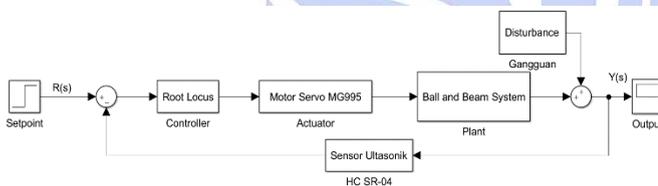


Gambar 1. Skema diagram alir rancangan penelitian

Berdasarkan Gambar 1, perancangan penelitian diawali dengan melakukan studi literatur terlebih dahulu dari berbagai referensi terkemuka seperti *e-book*, jurnal, skripsi, dan tesis. Untuk langkah selanjutnya yakni merancang diagram blok sistem *ball and beam* pada *simulink* di aplikasi perangkat lunak Matlab. Kemudian membuat sistem kendali *Root Locus* dan menjalankan simulasi ke sistem yang telah dirancang. Setelah itu dilaksanakan pengambilan data variabel dari setiap kemungkinan nilai input dan output dari *Root Locus*. Kemudian, dilakukan simulasi sistem kendali *Root Locus* terhadap sistem *ball and beam* yang telah dibuat di *simulink* pada aplikasi Matlab. Jika pada saat kegiatan simulasi mendapatkan hasil yang kurang maksimal, maka dilaksanakan perbaikan pada kendali *Root Locus*. Tetapi jika hasil dari simulasi telah menunjukkan hasil yang maksimal dan memenuhi data yang dibutuhkan, maka dilaksanakan pengambilan data, dan analisis data terhadap hasil simulasi.

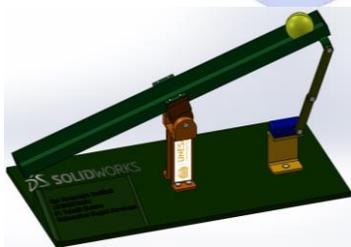
Desain Sistem

Terlihat Gambar 2 adalah uraian diagram blok sistem *Ball and Beam* menggunakan metode kendali *Root Locus*.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem *Ball and System*

Rancangan 3D Sistem *Ball and Beam*



Gambar 3. Desain 3D Sistem *Ball and Beam*

Berdasarkan tampilan Gambar 3 adalah desain 3D sistem *ball and beam* menggunakan aplikasi Solidworks 3D yang terdiri dari bidang balok dengan ukuran panjang 1 m, bola dengan massa 0.11 kg, dan *servo* motor untuk menggerakkan lengan keseimbangan bola pada bidang balok sesuai dengan perintah user. Desain 3D dapat disimulasikan dengan aplikasi Solidworks sebagai gambaran prinsip kerja dari sistem *Ball and Beam*. Dengan harapan desain 3D tersebut dapat direalisasikan dan dapat dijadikan acuan penelitian ke depan, demi mendapatkan hasil yang lebih akurat.

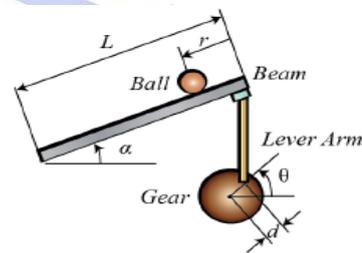
Pemodelan Sistematis *Ball and Beam*

Ball and Beam atau yang disebut menyeimbangkan bola pada bidang balok. Sebuah bola yang diletakkan pada sebidang balok persegi panjang. *Level arm* merekat pada bidang balok pada salah satu ujung dan gigi servo di ujung yang lainnya. Ketika gigi servo bergerak oleh sudut θ , *level arm* mengubah sudut bidang balok dengan α . Ketika sudut diubah dari posisi horizontal, gravitasi dapat mengakibatkan bola menggelinding pada bidang balok. Lalu kontroler dirancang untuk sistem ini sehingga posisi bola dapat diatur dan dikendalikan (Hanifan dan Dayanti. 2019).

Terdapat beberapa metode kontrol dan teori kontrol klasik yang telah berhasil diterapkan pada sistem *Ball and Beam*. Sistem *ball and beam* dapat membuat bola berhenti di tengah bidang balok dalam waktu yang sangat singkat. Namun, bola tidak dapat berhenti pada posisi bidang balok (Liqing dan Yongxin. 2016).

Sistem *Ball and Beam* termasuk sistem yang dapat memverifikasi berbagai algoritma kontrol di dalamnya. Sistem *ball and beam* masif digunakan karena strukturnya yang sederhana dan mudah dipahami (Yuanyuan dan Yongxin. 2015).

Sistem *ball and beam* dirancang untuk menerapkan nilai tegangan ke servo agar sistem dapat menentukan posisi bola pada bidang balok. Posisi bola didapatkan dengan mengukur tegangan pada batang dan nilai sudut diperoleh dari servo (Akhsya dan Fawwaz. 2021). Gambar 4 adalah tampilan dari kerangka sistematis dari sistem *Ball and Beam*.



Gambar 4. Kerangka Sistematis *Ball and Beam* (Sumber : Akhsya dan Fawwaz. 2021)

Model Matematika Plant *Ball and Beam*

Dapat dicermati dalam Gambar 4, persamaan sistem dimodelkan berdasarkan dari Mekanika pada bentuk Lagrangian. Persamaan (1) adalah persamaan pergerakan bola;

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \ddot{r} + mgsin\alpha - mr\dot{\alpha}^2 = 0 \quad (1)$$

Apabila sistem masih pada bentuk $\theta_a = 0$, maka terbentuklah persamaan (2) :

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \ddot{r} = -mga \quad (2)$$

Dari model sistem bisa diketahui bahwa persamaan (3) menjadi,

$$\alpha = \frac{d}{L}\theta \quad (3)$$

Lalu mensubstitusikan persamaan (3) ke persamaan (2), maka akan diperoleh

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right)\ddot{\theta} = -mg\frac{d}{L}\theta \quad (4)$$

Pengaplikasian Transformasi Laplace terhadap persamaan (4) di bawah ini akan diperoleh menjadi persamaan (5) :

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right)R(s)s^2 = -mg\frac{d}{L}\theta(s) \quad (5)$$

Dalam persamaan (5) dapat ditata ulang untuk mendapatkan fungsi transfer untuk posisi $R(s)$ dan $\theta(s)$ dan terbentuk persamaan (6) :

$$P(s) = \frac{R(s)}{\theta(s)} = -\frac{mgd}{L\left(\frac{J}{R^2} + m\right)s^2} \quad |m, rad^{-1}| \quad (6)$$

Parameter dan Kriteria Sistem :

- m = Massa bola (kg)
- R = Jari-jari bola (m)
- g = Percepatan gravitasi (m/s²)
- L = Panjang Balok (m)
- r = Koordinat posisi bola
- J = Momen inersia bola (kg.m²)
- θ = Sudut servo (Derajat)
- $\theta(s)$ = Sudut dalam domain waktu (Laplace)
- d = Offset balok (Derajat)
- α = Sudut kemiringan balok (Derajat)
- $\dot{\alpha}$ = *Differensial* Sudut balok (Derajat)
- \ddot{r} = Turunan kedua *derivative* Koordinat bola
- \dot{r} = Turunan pertama *derivative* Koordinat bola
- $P(s)$ = Transfer fungsi posisi $R(s)$ dan $\theta(s)$

Berlakunya parameter ini masih dibatasi pada kondisi antara bola dan bidang balok tidak terjadi gesekan sehingga bola menggelinding tanpa hambatan. Sehingga harapannya sistem berjalan dengan baik.

Tabel 1. Spesifikasi sistem *Ball and Beam*

No.	Alat	Spesifikasi	Satuan
1.	Massa bola (m)	0,11	Kg
2.	Jari-jari bola (R)	0,15	m
3.	Percepatan gravitasi (g)	9,8	m/s ²
4.	Panjang balok (L)	1	m
5.	Momen inersia bola (J)	$9,99 \times 10^{-6}$	Kg.m ²

(Akshya dan Fawwaz. 2021).

Metode Kendali *Root Locus*

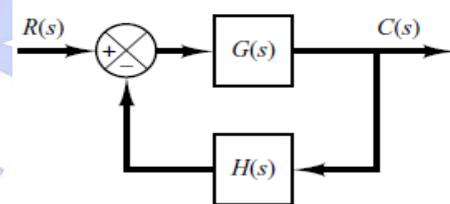
Metode kontrol *Root Locus* atau yang biasa disebut akar lokus merupakan metode grafis yang memberikan deskripsi kualitatif mengenai kinerja suatu sistem kontrol. *Root Locus* juga dapat digunakan untuk menilai stabilitas (Akhsya dan Fawwaz. 2021).

Metode ini memungkinkan peneliti untuk menganalisis sistem dengan mengamati posisi kutub pada nilai tertentu dari koefisien yang diamati. Hal itu memungkinkan peneliti untuk menarik kesimpulan mengenai stabilitas dan respons dinamis dari sistem. Ketika sebuah *pole* atau kutub yang diinginkan berada pada lokasi tertentu dari bidang- s , peneliti juga dapat menentukan nilai koefisiennya. (Hendawi dkk. 2017).

Metode ini adalah di mana akar-akar persamaan karakteristik diplot untuk semua nilai dari sebuah parameter sistem. Akar yang sesuai dengan nilai tertentu dari parameter ini kemudian dapat ditempatkan pada grafik yang dihasilkan. Dengan menggunakan metode *Root Locus*, perancang dapat memprediksi efek pada lokasi kutub *loop* tertutup dengan memvariasikan nilai gain atau menambahkan kutub *loop* terbuka dan nol *loop* terbuka (Ogata. 2010).

Perhatikan sistem umpan balik negatif yang ditampilkan berdasarkan Gambar 5. Terlihat persamaan fungsi alih *loop* tertutup adalah persamaan (7) :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (7)$$



Gambar 5. Sistem Kontrol *Root Locus* (Sumber: Ogata. 2010)

Persamaan karakteristik untuk setiap *loop* tertutup ini didapatkan dengan menetapkan penyebut ruas kanan dari Persamaan (8) sama dengan nol.

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (8)$$

Di sini kita mengasumsikan bahwa $G(s)H(s)$ adalah rasio polinomial dalam s . Dikarenakan $G(s)H(s)$ adalah kuantitas kompleks, dari Persamaan (8) dapat dibagi menjadi dua persamaan dengan menyamakan besar sudut dan besar kedua sisi masing-masing sehingga diperoleh kondisi sudut berdasarkan persamaan (9) dan kondisi magnitudo berdasarkan persamaan (10):

Kondisi sudut:

$$G(s)H(s) = \pm 180^\circ(2k + 1) \quad (9)$$

Kondisi magnitudo:

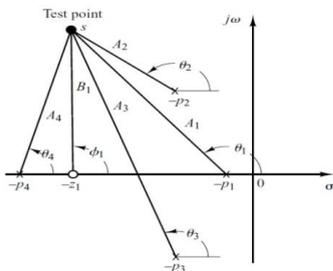
$$|G(s)H(s)| = 1 \quad (10)$$

Nilai s yang memenuhi syarat sudut dan besaran adalah akar-akar persamaan karakteristik, atau *closed loop poles*. Titik-titik *locus* pada bidang kompleks yang memenuhi syarat sudut saja adalah *root locus*. Karakteristik akar persamaan (*closed loop poles*) yang sesuai dengan nilai penguatan yang diberikan dapat ditentukan dari kondisi magnitudo. Dalam banyak persoalan, $G(s)H(s)$ melibatkan parameter *gain* K , dan persamaan karakteristik dapat ditulis menjadi persamaan (11) :

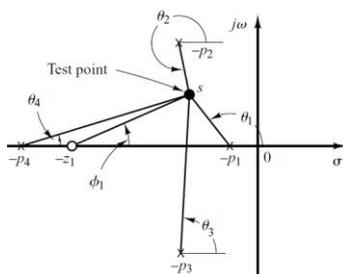
$$1 + \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} = 0 \quad (11)$$

Maka *root loci* untuk sistem adalah *locus poles loop* tertutup, karena *gain* K divariasikan dari nol hingga tak terhingga. Perhatikan bahwa untuk membuat sketsa suatu sistem *root loci* dengan metode *root locus*, kita harus mengetahui lokasi *poles* dan *zeros* $G(s)H(s)$. Dapat diingat bahwa sudut dari besaran kompleks yang berasal dari *poles loop* terbuka dan *loop* terbuka *zeros* ke titik uji s yang diukur berlawanan arah jarum jam terlihat persamaan (12).

$$G(s)H(s) = \frac{K(s+z_1)}{(s+p_1)(s+p_2)(s+p_3)(s+p_4)} \quad (12)$$



Gambar 6. Pengukuran Sudut Kutub *Open Loop* (Sumber : Ogata. 2010)



Gambar 7. Pengukuran Sudut Kutub *Open Loop Zero* (Sumber : Ogata. 2010)

Tampilan Gambar 6 adalah pengukuran sudut dari kutub *loop* terbuka (*open-loop poles*) dan Gambar 7 adalah *loop* terbuka nol (*open-loop zero*) ke titik uji point- s . Di mana $-p_2$ dan $-p_3$ adalah kutub kompleks-konjugasi, maka sudut $G(s)H(s)$ dapat ditulis menjadi persamaan (13) :

$$G(s)H(s) = \phi_1 - \theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 \quad (13)$$

Di mana $\phi_1, \theta_1, \theta_2, \theta_3$, dan θ_4 diukur berlawanan arah jarum jam yang ditampilkan berdasarkan Gambar 6 dan Gambar 7. Besarnya $G(s)H(s)$ untuk sistem dapat ditulis menjadi persamaan (14) :

$$|G(s)H(s)| = \frac{KB_1}{A_1A_2A_3A_4} \quad (14)$$

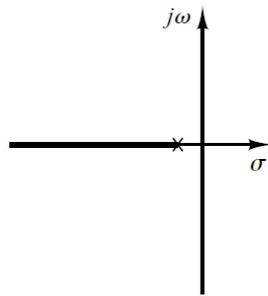
Di mana A_1, A_2, A_3, A_4 , dan B_1 adalah besaran kompleks yakni $s + p_1, s + p_2, s + p_3, s + p_4$, dan $s + z_1$, masing-masing, berdasarkan Gambar 7. Sehingga persamaan (14) adalah hasil dari besarnya sistem $G(s)H(s)$ (Ogata. 2010).

Penggunaan *Lead Compensator*

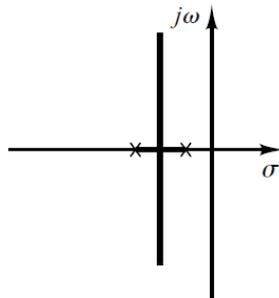
Mencakup perancangan sistem kontrol, selain diperlukan proses penguatan (atau penyesuaian parameter lainnya), perancang perlu membentuk *root locus* asli dengan menambahkan kompensator yang cocok. Sesuai pengaruh pada *root locus* dari penambahan *pole* dan/atau *zeros* sepenuhnya, kita dapat dengan mudah menentukan lokasi *pole* dan *zeros* dari kompensator yang akan membentuk kembali *root locus* serupa yang dibutuhkan. Simpulannya, dalam mendesain dengan metode *root locus*, akar lokus sistem dibangun ulang melewati penggunaan kompensator sehingga dua kutub *loop* tertutup yang dominan bisa menempati pada lokasi yang dibutuhkan.

Ketika ingin menggunakan rangkaian pasif, maka sistem kompensator fasa maju tidak hanya menambahkan zero saja. Akan tetapi terdapat polanya juga. Terdapat keuntungan jika menggunakan kompensator fasa maju, yaitu tidak perlu tambahan daya dari luar, dan noise yang terjadi pada proses diferensial dapat dikurangi (Susanto. 2017).

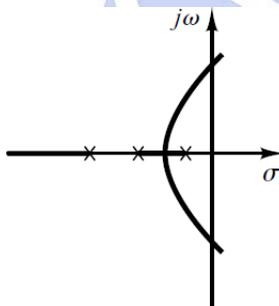
Jika input sinusoidal diterapkan ke input jaringan, dan *steady-state output* (yang juga sinusoidal) yang memiliki fasa, maka jaringan disebut (*lead network*) jaringan lead. (Jumlah sudut *phase lead* adalah fungsi dari frekuensi input.) Jika *steady-state output* memiliki *phase lag*, maka jaringan disebut (*lag network*) jaringan lag.



Gambar 8. *Root Locus Plot of a single pole system*
(Sumber : Ogata. 2010)



Gambar 9. *Root Locus Plot of a two pole system*
(Sumber : Ogata. 2010)



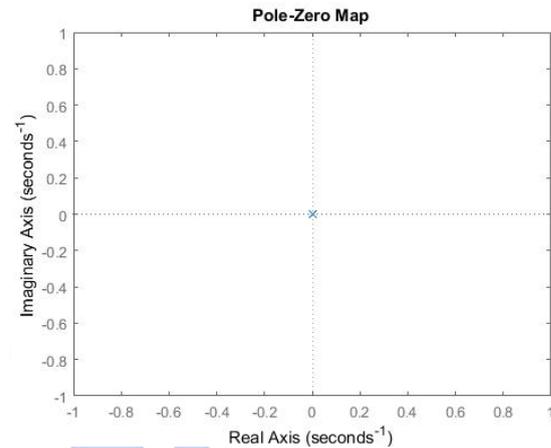
Gambar 10. *Root Locus Plot of a three pole system*
(Sumber : Ogata. 2010)

Pengaruh penambahan sebuah *pole* ke fungsi transfer *open loop* mempunyai efek menarik lokus akar ke kanan, cenderung mengurangi stabilitas relatif sistem dan mengurai waktu penyelesaian respons. (Meningat bahwa penambahan kontrol integral menambahkan *pole* di titik asal, sehingga membuat sistem kurang stabil.) Terlihat Gambar 8 adalah efek dari penambahan kutub ke sistem *single pole*, sedangkan Gambar 9 adalah efek dari penambahan kutub ke sistem *two pole*, dan Gambar 10 adalah efek penambahan kutub ke sistem *three pole* (Ogata. 2010).

Perancangan Sistem Kendali *Root Locus*

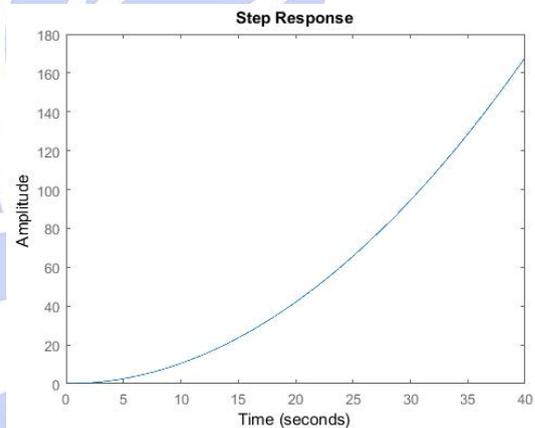
Dalam perancangan sistem kendali *Root Locus*, diperlukan rancangan terlebih dahulu sebelum dijadikan acuan beberapa *value* variabel parameter *input* dan *output*. Dalam penelitian ini, dirancangnya kendali *Root Locus* untuk mengetahui respons posisi dari plot *open loop step response* yang akan dikendalikan dengan sistem metode *Root Locus*. Sistem *Ball and Beam* adalah

sistem yang memiliki dua kutub pada titik asal, yang terlihat pada peta *pole/zero* yang telah terlihat berdasarkan Gambar 11.



Gambar 11. *Plot Open Loop Root Locus*

Karena kutub tidak berada pada setengah bidang kiri, sistem *loop* terbuka akan menjadi tidak stabil. Sehingga ditampilkan plot yang terlihat berdasarkan Gambar 12 yakni plot *Open Loop step response*.



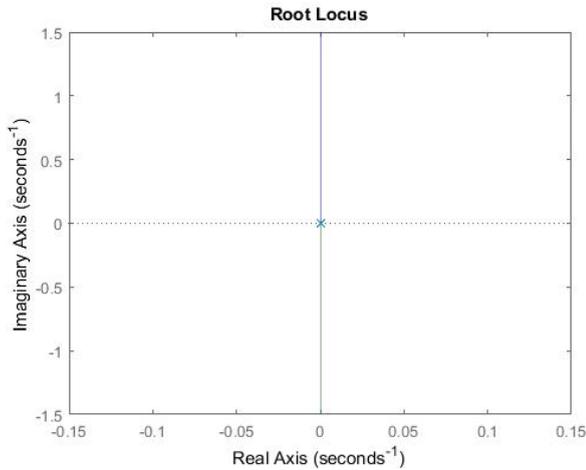
Gambar 12. *Plot Open Loop Step Response*

Berdasarkan tampilan Gambar 12, terlihat jelas bahwa sistem tidak stabil dalam *loop* terbuka menyebabkan bola menggelinding ke kanan dari ujung *beam* atau bidang balok. Oleh karena itu, diperlukan metode untuk mengontrol posisi bola dalam sistem ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan rancangan yang telah dibahas pada metode penelitian, langkah selanjutnya yakni merancang desain *root locus* terlebih dahulu untuk memprediksi respons *loop* tertutup dari plot *root locus loop* terbuka. (Sidqi. 2018). Dengan menambahkan nol atau kutub ke sistem asli (menambahkan *compensator*), *root locus*, dengan demikian respons *loop* tertutup akan dimodifikasi. Maka peneliti perlu menentukan plot dari *open loop root locus*.

Desain Sistem Pengaturan Keseimbangan Posisi Bola pada Sistem *Ball and Beam* Menggunakan Metode Kendali *Root Locus* Berbasis MATLAB



Gambar 13. *Open Loop Root Locus*

Dapat diperhatikan Gambar 13, *open loop plot* menghasilkan plot dalam bentuk imajiner dan nyata. Titik asal dari plot keduanya ada pada titik nol menuju ke titik tak hingga pada sumbu imajiner, dan sistem ini memiliki dua kutub pada titik asal yang menuju tak terhingga sepanjang sumbu imajiner.

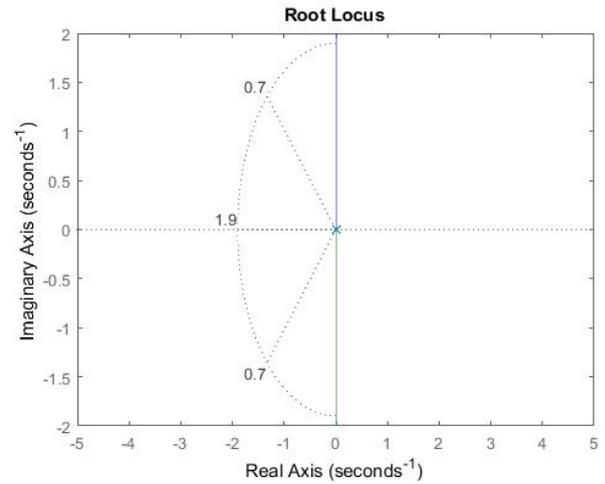
Kriteria sistem yang ingin diperoleh dapat di aplikasikan pada plot. Dalam kasus ini kriteria yang di harapkan adalah persentase *overshoot* sebesar $< 5\%$ dan *settling time* (T_s) sebesar $< 3 \text{ second}$. Kedua kriteria ini di aplikasikan dengan menggunakan variabel lain, yakni *damping ratio* (ζ) dan *natural frequency* (ω_n)

Kriteria desain : $M_p = 5\%$ dan $T_s = 3 \text{ detik}$

$$M_p = e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (15)$$

$$T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (16)$$

Dengan penataan kriteria desain persentase *overshoot* (M_p) persamaan (15) dan kriteria desain *settling time* (T_s) persamaan (16), maka akan diperoleh $\omega_n = 1.9$ dan $\zeta = 0.7$. Bila $M_p = 5\%$ dan $T_s = 3 \text{ detik}$. Area di antara dua titik diagonal melambangkan lokasi di mana persentase *overshoot* kurang dari 5% sedangkan area di luar garis lengkung adalah saat *settling time* kurang dari 3 detik. Untuk memperbaiki dan membawa *Root Locus* ke bidang kiri untuk stabilitas, maka peneliti mencoba untuk menambahkan *Lead Compensator* ke dalam sistem yang terlihat berdasarkan Gambar 14 :

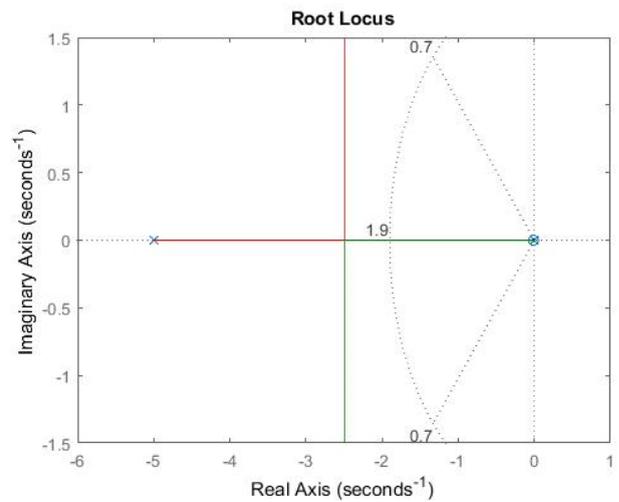


Gambar 14. Plot *Open Loop Root Locus* dengan Kriteria Sistem

Menambahkan Kontroler *Lead Compensator*

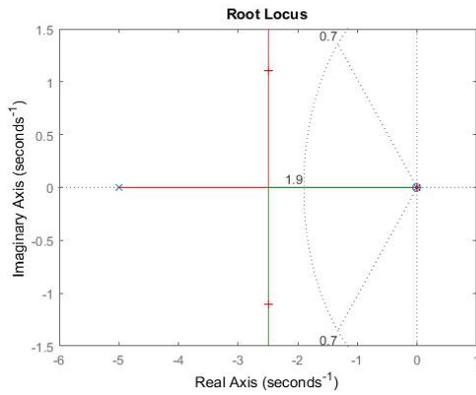
Aturan pertama dalam penambahan *lead compensator* adalah mengubah *root locus* ke dalam bidang kiri. Posisi titik nol ada di dekat titik asal agar menghilangkan salah satu kutubnya. Kutub dari kompensator akan diletakkan di kiri dan titik asal untuk menarik *root locus* lebih jauh ke sisi kiri bidang dengan persamaan (17).

$$C(s) = K_c \frac{(s+z_0)}{(s+p_0)} \quad (17)$$



Gambar 15. Plot *Root Locus* dengan Kompensator di Kiri

Terlihat Gambar 15 dapat diperoleh bidang kompensator di sebelah kiri dan titik asal yang memenuhi area dari kriteria yang diinginkan. Sehingga langkah selanjutnya adalah menentukan letak *Gain*.



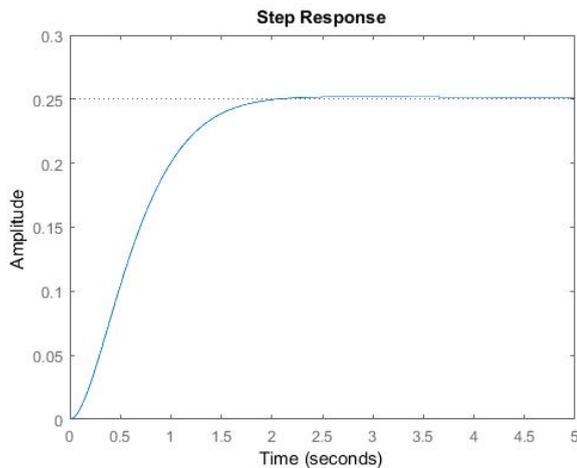
Gambar 16. Penentuan Letak Gain dalam Bidang Kiri

Sedangkan terlihat Gambar 16 adalah plot penentuan letak Gain pada bidang kiri pada aplikasi Matlab. Setelah diperlihatkan plot penentuan letak Gain didapatkan letak penentuan letak Gain dengan nilai $-2.4934 - 0.9975i$ dengan nilai $k = 24.8273$ dengan hasil sejumlah 3 titik poles yang bernilai $-2.4950 + 0.9975i$, $-2.4950 - 0.9975i$, dan $-0.0101 - 0.0000i$.

Plot Respons Closed Loop

Terlihat Gambar 17 menunjukkan bahwa kriteria sistem yang diinginkan berhasil didapatkan dan dikendalikan. Di mana tidak didapati adanya overshoot yang besar dan rise time (T_r) di bawah 3 detik, yaitu ada pada 1.109 detik.

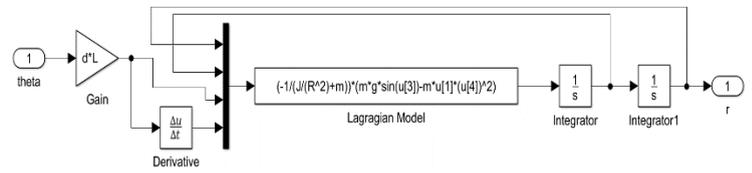
Grafik juga menampilkan kestabilan di mana tidak didapatkan adanya fluktuasi, dengan hasil steady state (ss) diperoleh pada nilai 0.25. Ketika step input diberikan ke dalam sistem ball and beam, kriteria desain settling time dan persentase overshoot terpenuhi.



Gambar 17. Respons Sistem dalam Closed Loop

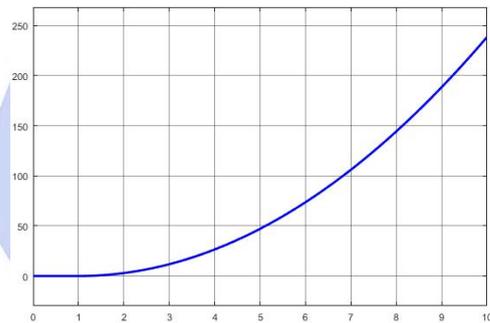
Pengujian Sistem Menggunakan Simulink Matlab

Pada tahap pengujian sistem ini dilakukan dengan aplikasi simulink pada aplikasi Matlab.



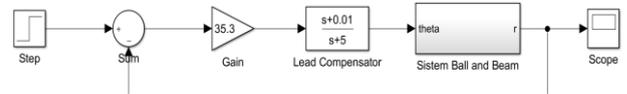
Gambar 18. Model Simulink Sistem Posisi Ball and Beam tanpa controller

Dapat dilihat berdasarkan Gambar 18 merupakan model simulink sistem kontrol posisi ball and beam yang telah di rancang menggunakan Matlab. Akan tetapi setelah di simulasikan, layar grafik scope menunjukkan ketidakstabilan pada posisi bola terlihat berdasarkan Gambar 19.



Gambar 19. Ketidakseimbangan Posisi pada Sistem Ball and Beam

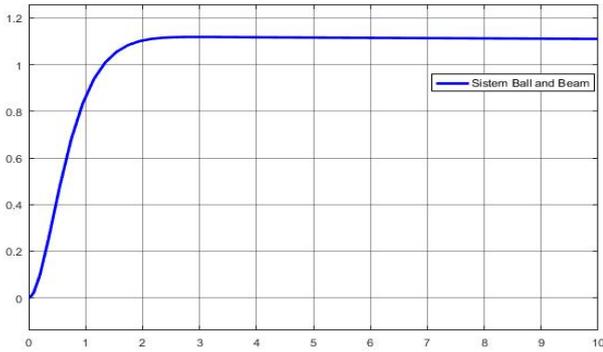
Maka dari itu, dirancangnya kontroler untuk menstabilkan posisi sistem Ball and Beam pada simulink dengan penggunaan Lead Compensator dan pemberian Gain sebesar 35.3 dengan harapan hasil yang terakurat. Dengan bantuan simulink, dan disambungnya Lead Compensator, akan menghasilkan grafik sistem Ball and Beam yang lebih stabil pada scope simulink dan terlihat berdasarkan Gambar 20.



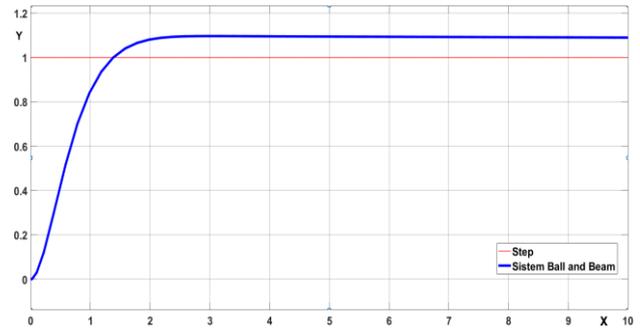
Gambar 20. Penggunaan Lead Compensator dan Gain pada Sistem Ball and Beam

Setelah ditambahkan Lead Compensator dan Gain pada sistem. Terlihat hasil output pada scope yang menggambarkan bahwa sistem posisi Ball and Beam dapat diseimbangkan dan stabil yang tertera berdasarkan Gambar 21.

Desain Sistem Pengaturan Keseimbangan Posisi Bola pada Sistem *Ball and Beam* Menggunakan Metode Kendali *Root Locus* Berbasis MATLAB



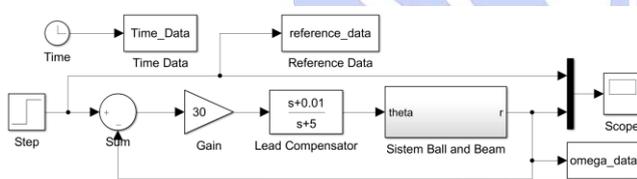
Gambar 21. Keseimbangan Posisi Sistem *Ball and Beam* pada Simulink



Gambar 24. Respons posisi pada nilai *Gain* 25

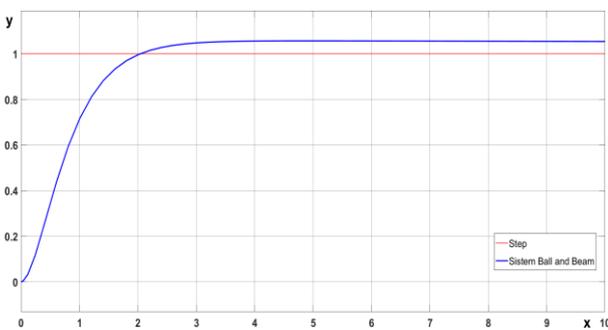
Pengujian dengan Posisi Tetap

Tujuan memahami hasil kinerja sistem kontrol *Root Locus* pada sistem *Ball and Beam* yang telah dibuat, dilaksanakan simulasi dengan rangkaian *simulink* pada aplikasi Matlab. Pada pengujian kedua ini, dilakukan dengan menambahkan nilai *Gain* tetap. Terlihat Gambar 22 adalah rangkaian *simulink* dan respons pengujian.

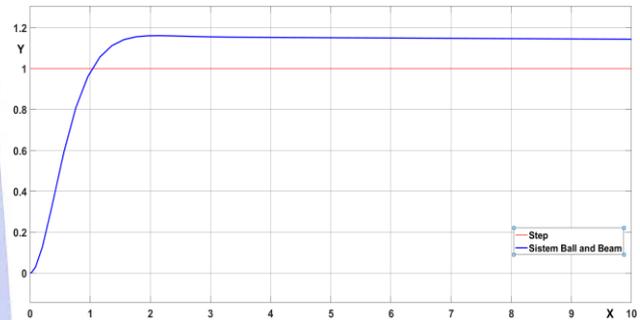


Gambar 22. Rangkaian *Simulink Root Locus* Sistem *Ball and Beam*

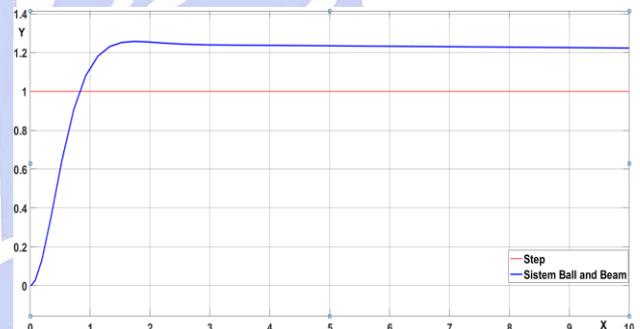
Setelah dirangkainya rangkaian *simulink* sistem kendali *Root Locus* pada sistem *Ball and Beam* dengan software Matlab, penulis melakukan pengujian dengan mengubah nilai *Gain* dengan nilai koefisien yang berbeda yaitu Pada *Gain* 20 terlihat posisi sistem lebih stabil dan seimbang, sedangkan pada posisi *Gain* 25 sistem sedikit mengalami *overshoot* sebesar 2,5%, lalu pada *Gain* 30 sistem mencapai puncak waktu sebesar 1,6 detik, sedangkan pada *Gain* 35 sistem sedikit mengalami penurunan waktu sebesar 0,1 detik, dan pada *Gain* 40 sistem mengalami kenaikan waktu sebesar 0,2 detik.



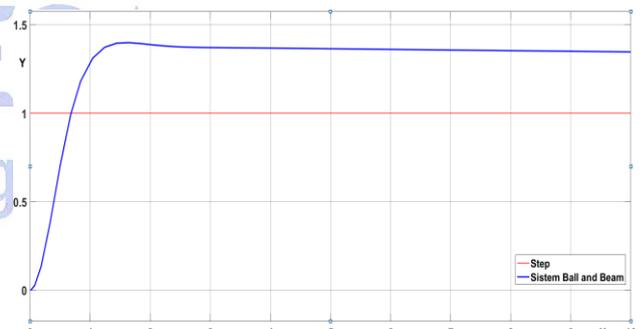
Gambar 23. Respons posisi pada nilai *Gain* 20



Gambar 25. Respons posisi pada nilai *Gain* 30



Gambar 26. Respons posisi pada nilai *Gain* 35



Gambar 27. Respons posisi pada nilai *Gain* 40

Berdasarkan simulasi pengujian yang telah terlaksanakan, diperoleh nilai-nilai respons percobaan yang terlihat Gambar 23 adalah grafik pada respons posisi yang bernilai *Gain* 20, lalu berdasarkan Gambar 24 adalah grafik pada respons posisi yang bernilai *Gain* 25, sedangkan terlihat Gambar 25 adalah grafik pada respons posisi yang bernilai *Gain* 30, lalu berdasarkan

Gambar 26 adalah grafik pada respons posisi yang bernilai *Gain* 35, dan terlihat Gambar 27 adalah grafik pada respons posisi yang bernilai *Gain* 40. Dengan analisa respons sistem berdasarkan Tabel 2 terlihat *Gain* 20 adalah posisi sistem yang paling stabil dibandingkan keempat posisi yang lainnya.

Tabel 2. Analisa Respons Sistem *Ball and Beam*

Setpoint (cm)	Tr(s)	Gain	Mp%	Ess%	Settling Time (s)
10	0,783	20	1,531	0,054	1,39
15	0,748	25	2,577	0,089	1,33
20	0,708	30	2,577	0,143	1,26
25	0,67	35	3,646	0,223	1,19
30	0,639	40	4,737	0,347	1,14

PENUTUP

Simpulan

Mengacu pada *value* hasil percobaan simulasi yang telah dilaksanakan, maka didapatkan simpulan bahwa sistem *Ball and Beam* menggunakan metode kendali *Root Locus* berhasil dirancang dan dapat mengontrol sistem keseimbangan posisi dengan baik. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, didapatkan hasil respons posisi yang mengacu pada Tabel 2 dan mengingat batas dari kriteria sistem, respons terbaik adalah pada *setpoint* 10, *gain* 20 dengan nilai *rise time* (T_r) 0.783 detik dengan nilai persentase *overshoot* bernilai 1.531%, *settling time* sebesar 1.39 detik, dan *error steady state* (*Ess*) diperoleh sebesar 0.147%. Dengan hasil pengujian yang disimpulkan, kriteria sistem penelitian ini telah terpenuhi.

Saran

Berdasarkan pada percobaan yang telah dilakukan, adapun saran dari penulis yang dapat dijadikan untuk perkembangan penelitian sistem kendali posisi pada *Ball and Beam*. Untuk penelitian ke depannya dapat menggunakan metode pengendalian yang lain seperti metode kendali ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*), ataupun dengan menggunakan sistem kontrol MPC (*Model Prediction Control*) untuk menciptakan tingkat kestabilan yang tepat dan lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

Akshya, Muhammad Farrel, dan Fawwaz. Primus Sukmasadewa. 2021. *Ball & Beam Control System*. Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Dewi, Nurma Orfa. 2018. *Perancangan Sistem Keseimbangan Ball and Beam Menggunakan*

Perangkat Lunak Labview Berbasis Fuzzy Logic Controller. Universitas Negeri Surabaya.

Fikri, Ahmadan Ainul. 2019. *Sistem Pengaturan PID Motor sebagai Penggerak Mini Conveyor Berbasis MATLAB*. Universitas Negeri Surabaya.

Haidekker, Mark A. 2013. *Chapter 12 – The Root Locus Method. The Essentials*, Inggris. Volume 2013 No. 175-191.

Hanifan, Haris Hunafa, dan Dayanti. Krysma. 2012. *Desain dan Implementasi Sistem Kendali Keseimbangan Posisi Bola pada Balok Menggunakan Metode Kendali PID*. Universitas Singaperbangsa.

Hendawi, Essam, Mahrous. A., dan Salem. Mahmoud M. 2017. *Theoretical Analysis and Real Time Implementation of a Classical Controller with Intelligent Properties*. Aswan University, Mesir.

Jaedun, Amat. 2011. *Metodologi Penelitian Eksperimen*. Fakultas Teknik. Universitas Negeri Yogyakarta.

Liqing, Gao, dan Yongxin. Liu. 2016. *Design of Back Propagation Neural Network Controller for Ball-Beam System*. Inner Mongolia University, China.

Maharani, Andin, dan Putri. Rahmanisya Fani Aisha. 2019. *Sistem Kontrol Ball and Beam*. Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Mehedi, Ibrahim Mustafa, Al-Saggaf. Ubaid Muhammad, Mansouri. Rachid, dan Bettayeb. Maamar. 2019. *Two Degrees of freedom Fractional Controller Design: Application to The Ball and Beam*. King Abdul Aziz University, Jeddah, Saudi Arabia.

Muhammad, Hindami. 2017. *Design and Implementation of PID Controller on Beam and Ball System*. Universitas Telkom.

Ogata, Katsuhiko. 2010. *Modern Control Engineering 5th Edition*. Pearson Education, Inc. New Jersey. Volume 2000 No. 270-272.

Sidqi, Rafi. 2018. *Rancang Bangun Stabilisasi Sistem Pendulum Terbalik Berbasis Pengendali PID*. Universitas Negeri Surabaya.

Susanto, Erwin. 2017. *Perancangan Metode Kendali*. Universitas Telkom.

Yuanyan, Wu, dan Yongxin. Liu. 2015. *Fuzzy PID Controller Design and Implementation in Ball-Beam System*. Inner Mongolia University, China.