Kendali Sistem Magnetic Levitation Menggunakan Metode Feedback Linearization

Wira Fadlun, Adha I. Cahyadi, dan Oyas Wahyunggoro
Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Universitas Gadjah Mada
Yogyakarta, Indonesia

***Abstract*—The dynamics of a magnetic levitation system is usually unstable and nonlinear. Therefore, a good controller is needed to controlled this system. Input-state feedback linearization technique has been chosen in this paper to control magnetic levitation system where nonlinear dynamics of the system is transformed into linear form. In this paper, a servo control schematic with integrator to eliminate steady state error is proposed. The testing of system performance consists of two parts, namely testing without disturbance and with disturbance through simulation process using Matlab's Simulink. The simulation results for system without disturbance shows that the system are stable which indicated with no overshoot and steady-state error. The output position of the object can follow the reference signal properly. Moreover, the simulation results for system with disturbance showed control output stabilized even after being disturbed.**

***Keywords*—Feedback linearization, magnetic levitation, control system, and nonlinear system.**

***Intisari*—Dinamika dari sistem *magnetic levitation* (maglev) selalu tidak stabil dan nonlinier, sehingga dibutuhkan kendali yang tepat untuk mengendalikan sistem tersebut. Berdasarkan hal itu, pada paper ini dipilih salah satu teknik kendali nonlinier yaitu *input-state feedback linearization* untuk mengendalikan sistem maglev dimana dengan teknik ini dinamika sistem nonlinier diubah menjadi bentuk linier. Pada paper ini diajukan sebuah strategi dalam menghilangkan *steady-state error* pada sistem maglev dengan membangun sebuah blok kendali yang mengadaptasi sistem servo dengan penambahan integrator. Pengujian sistem terdiri atas dua bagian, yaitu pengujian tanpa gangguan dan dengan gangguan melalui proses simulasi menggunakan Matlab Simulink. Hasil simulasi sistem kendali tanpa gangguan menunjukkan sistem stabil yang diindikasikan dengan tidak terdapat *overshoot* dan *steady-state error*. Keluaran posisi objek dapat mengikuti sinyal referensi dengan baik. Hasil simulasi dengan gangguan menunjukkan keluaran kendali kembali stabil meskipun setelah mendapat gangguan.**

***Kata kunci*—*Feedback linearization*, *magnetic levitation*, sistem kendali, dan sistem nonlinier.**

I. PENDAHULUAN

Sistem maglev merupakan suatu sistem yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Kelebihan dari teknologi maglev adalah tak ada gesekan antara elemen yang bergerak dan bagian statis, memiliki pergerakan yang cepat dan efisiensi tinggi. Dengan kelebihan-kelebihan yang dimiliki tersebut membuat teknologi maglev banyak diaplikasikan di berbagai bidang yang sangat bermanfaat bagi manusia seperti pada transportasi kereta berkecepatan tinggi [1], robot mikro [2], peralatan biomedis [3], dan *magnetic bearing* [4]. Penelitian kendali maglev telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya dengan berbagai macam metode. Metode yang digunakan antara lain seperti *sliding mode control* [5], *gain scheduling* [6] dan *feedback linearization* [7] [8]. Penelitian yang dilakukan oleh [5] adalah mengendalikan objek maglev menggunakan metode *sliding mode control* dengan sinyal referensi yang berbeda-beda. Sinyal referensi berupa sinyal *random disturbance, sinusoidal disturbance, builder disturbance dan pulse generator*. Tanggapan output menunjukkan dapat mengikuti sinyal referensi dengan baik, namun masih terdapat sedikit *steady state error*, dan hasil kendali menunjukkan masih terdapat fenomena *chattering*. Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh [6], menggunakan pendekatan *gain scheduling* untuk kendali suspensi sistem maglev. Teknik ini sangat berguna untuk meningkatkan kinerja sistem meskipun mendapat gangguan yang berasal dari kekuatan aerodinamis dan memiliki ketahanan terhadap ketidakpastian beban. Penelitian lain yang dilakukan oleh [7] membandingkan performa metode *linear state-feedback control* dengan *feedback linearization* dalam mengendalikan sistem maglev. Hasil eksperimen menampilkan perbandingan efektifitas dari kedua kendali dalam hal tanggapan terhadap masukan fungsi *step* dan kemampuan trayektori tehadap sinyal sinusoidal dimana metode *feedback linearization* lebih superior dibandingkan dengan metode *linear state-feedback control*. Namun masih terdapat *tracking error* pada kedua metode tersebut. Penelitian yang dilakukan oleh [8] mengendalikan posisi bola feromagnetik menggunakan metode *input-output feedback linearization*. Nilai dari gaya elektromagnetik diestimasi menggunakan data hasil eksperimen secara *real-time*. Hasil pengujian kendali menunjukkan metode *input-output feedback linearization* lebih baik dalam mengikuti trayek sinyal sinusoidal (referensi) dibandingkan dengan kendali PID. Namun masih terdapat *tracking error* pada kedua metode tersebut. Besarnya *tracking error* pada kendali PID lebih besar dibandingkan dengan kendali *input-output feedback linearization*.

Pada paper ini, teknik *input-state feedback linearization* diterapkan untuk mempertahankan posisi bola feromagnetik (objek) tetap melayang di udara pada posisi tertentu dengan mengatur besarnya elektromagnet. Strategi penghilangan *steady-state error* dilakukan dengan membangun sebuah blok kendali yang mengadaptasi sistem servo dengan penambahan integrator (Gambar 2). *Feedback linearization* telah berhasil digunakan untuk mengatasi beberapa masalah kendali praktis seperti kendali helikopter, pesawat kinerja tinggi, robot indus-

tri, dan perangkat biomedis [9]. Ide sentral dari metode *feedback linearization* adalah untuk mengubah dinamika sistem nonlinier menjadi sepenuhnya atau sebagian linier, sehingga teknik kendali linier dapat diterapkan. Syarat yang harus dipenuhi untuk menerapkan metode *feedback linearization* pada suatu sistem adalah sistem tersebut harus *feedback linearizable* sesuai dengan Definisi 1 dan Teorema 1 [9].

Definisi 1 Sebuah sistem nonlinier dalam bentuk

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \tag{1}$$

dengan *f(x)* dan *g(x)* merupakan bidang *smooth vector* pada W, dikatakan *input-state linearizable* jika terdapat domain Ω pada R^n, sebuah *diffeomorphism* ϕ: $\Omega \rightarrow R^n$, dan *nonlinear feedback control law*

$$u = \alpha(x) + \beta(x)v \tag{2}$$

sehingga state variabel yang baru $z = \phi(x)$, dan input *v* yang baru memenuhi persamaan *linear time-invariant*

$$\dot{z} = Az + Bv. \tag{3}$$

Teorema 1*: Sebuah sistem nonlinier dalam bentuk (1) dengan f(x) dan g(x) merupakan bidang smooth vector, dikatakan input-state linearizable jika dan hanya jika terdapat domain* Ω *yang memenuhi kondisi sebagai berikut:*

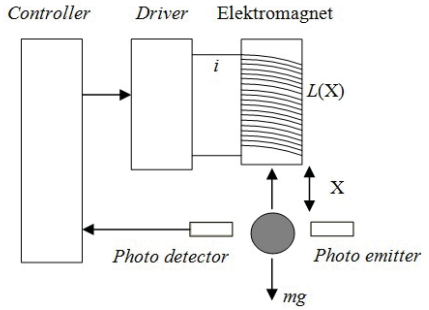
1) *Matriks* $\{g, ad_f g, \ldots, ad_f^{n-1} g\}$ *adalah linearly independent pada domain* Ω
2) *Matriks* $\{g, ad_f g, \ldots, ad_f^{n-2} g\}$ *adalah involutive pada domain* Ω.

Bukti*:* bisa dilihat pada [9].

Keterangan: f, g merupakan fungsi matriks sistem maglev, ad (*"adjoint"*) merupakan *tool* yang digunakan pada metode *Lie Bracket* [9], dan n merupakan *relative degree*.

II. Pemodelan sistem maglev

Sistem maglev tersusun atas *controller* atau kendali, objek (bola feromagnetik), sensor objek, *driver* dan elektromagnet seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Persamaan dinamika



Gambar 1. Diagram skematik sistem maglev

sistem maglev adalah

$$\frac{dx}{dt} = v \tag{4a}$$

$$Ri + \frac{dL(X)i}{dt} = e \tag{4b}$$

$$m\frac{dv}{dt} = mg - K(\frac{i}{x})^2 \tag{4c}$$

dimana x, v, i, e, L, g, K, dan m secara berturut-turut merupakan posisi objek maglev, kecepatan objek, arus koil pada elektromagnet, tegangan input, induktansi, gravitasi, *magnetic force constant*, dan massa objek [7]. Induktansi $L(x)$ pada persamaan (4b) diindikasikan sebagai fungsi nonlinier terhadap posisi objek (x). Sebuah pendekatan diperlukan dengan mengasumsikan bahwa besarnya perubahan induktansi berbanding terbalik terhadap posisi objek [10], sehingga

$$L(x) = L_1 + L_0 x_0 / x, \tag{5}$$

dimana x_0 merupakan posisi referensi dari induktansi. Dengan mensubstitusikan (5) ke (4b), diperoleh

$$e = Ri + L\ di/dt - (L_0 x_0 i/x^2)dx/dt. \tag{6}$$

Dengan mengkombinasikan (4), (5), dan (6), dengan $x_1 = x$, $x_2 = v$, $x_3 = i$, dan $u = e$, persamaan sistem dapat direpresentasikan dalam bentuk *state-space*

$$\dot{x}_1 = x_2 \tag{7a}$$

$$\dot{x}_2 = g - \frac{ax_3^2}{x_1^2} \tag{7b}$$

$$\dot{x}_3 = -bx_3 + \frac{2cx_2x_3}{x_1^2} + du, \tag{7c}$$

dimana $a = \frac{K}{m}$, $b = \frac{R}{L}$, $c = \frac{K}{L}$, dan $d = \frac{1}{L}$. Bentuk *state-space* tersebut selanjutnya dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan matriks

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ g - \frac{ax_3^2}{x_1^2} \\ -bx_3 + \frac{2cx_2x_3}{x_1^2} \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{bmatrix}.$$

III. Desain sistem kendali

Proses dalam mendesain sistem kendali maglev pada paper ini diorganisasikan sebagai berikut:

A. Mengidentifikasi apakah sistem maglev memenuhi syarat feedback linearizable berdasarkan Teorema 1

Syarat yang harus dipenuhi untuk menerapkan metode *feedback linearization* pada suatu sistem adalah sistem tersebut harus *feedback linearizable* sesuai dengan Teorema 1. Evaluasi terpenuhi atau tidaknya syarat tersebut dilakukan dengan menghitung nilai dari matriks $\{g, ad_f g, \ldots, ad_f^{n-1} g\}$ dan $\{g, ad_f g, \ldots, ad_f^{n-2} g\}$. Hasil penghitungan selanjutnya disesuaikan dengan Teorema 1. Metode yang digunakan dalam penghitungan nilai matriks menggunakan metode

Lie Bracket. Hasil penghitungan nilai dari g, $ad_f g$, $ad_f^2 g$, $[g, ad_f g, ad_f^2 g]$,dan $[g, ad_f g]$ secara berturut-turut yaitu

$$ad_f^0 g = g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{bmatrix}, \tag{8a}$$

$$ad_f g = [f, g] = \nabla g\ f - \nabla f\ g = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2adx_3}{x_1^2} \\ \frac{bd-2cdx_2}{x_1^2} \end{bmatrix}, \tag{8b}$$

$$ad_f^2 g = [f, ad_f g] = \begin{bmatrix} -\frac{2ax_3}{x_1^2} \\ \frac{2abdx_3-4acdx_2x_3}{x_1^4} \\ \frac{b^2d+4c^2dx_2^2-4acdx_3^2-4bcdx_2}{x_1^4} \end{bmatrix}, \tag{8c}$$

$$\left[g, ad_f g, ad_f^2 g\right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{2ax_3}{x_1^2} \\ 0 & \frac{2adx_3}{x_1^2} & \frac{2abdx_3-4acdx_2x_3}{x_1^4} \\ d & \frac{bd-2cdx_2}{x_1^2} & \frac{b^2d+4c^2dx_2^2-4acdx_3^2-4bcdx_2}{x_1^4} \end{bmatrix}, \tag{8d}$$

dan

$$\left[g, ad_f g\right] = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2ad^2}{x_1^2} \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{8e}$$

Hasil penghitungan menunjukkan bahwa matriks [g, $ad_f g$, $ad_f^2 g$] merupakan matriks *linearly independent* dan matriks [g, $ad_f g$] termasuk *involutive*. Dengan demikian sistem maglev memenuhi syarat *feedback linearizable* sehingga teknik *input-state feedback linearization* dapat diterapkan.

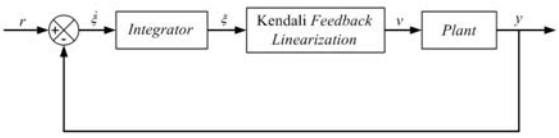
B. Proses linierisasi menggunakan teknik input-state feedback linearization

Tujuan dari proses linierisasi menggunakan teknik *feedback linearization* adalah untuk memperoleh bentuk linier (3) berdasarkan Definisi 1. Hal ini dilakukan dengan melakukan perubahan variabel seperti berikut

$$z_1 = x_1 \tag{9a}$$

$$z_2 = \nabla z_1 f = x_2 \tag{9b}$$

$$z_3 = \nabla z_2 f = g - \frac{ax_3^2}{x_1^2}. \tag{9c}$$



Gambar 2. Diagram blok kendali

Langkah selanjutnya adalah membentuk koordinat baru

$$\dot{z}_1 = z_2 \tag{10a}$$

$$\dot{z}_2 = z_3 \tag{10b}$$

$$\dot{z}_3 = -\frac{4acx_2x_3^2}{x_1^4} + \frac{2abx_3^2}{x_1^2} + \frac{2ax_2x_3^2}{x_1^3} - \frac{2adx_3}{x_1^2}u \tag{10c}$$

dimana

$$\alpha(x) = -\frac{4acx_2x_3^2}{x_1^4} + \frac{2abx_3^2}{x_1^2} + \frac{2ax_2x_3^2}{x_1^3}, \tag{11a}$$

$$\beta(x) = -\frac{2adx_3}{x_1^2}. \tag{11b}$$

Ketaklinieran dari sistem maglev direduksi menggunakan *state feedback control law*

$$u = \frac{v - \alpha(x)}{\beta(x)} \tag{12}$$

dimana v merupakan masukan baru yang didesain untuk sistem linier. Bentuk linier ekuivalen menjadi

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v. \tag{13}$$

C. Membangun blok sistem kendali

Sistem kendali didesain dengan tujuan menghilangkan *steady-state error* dengan mengadaptasi sistem servo dengan penambahan integrator (Gambar 2). Berdasarkan blok sistem kendali yang ditunjukkan pada Gambar 2, dapat dibentuk persamaan

$$\dot{z} = Az + Bv \tag{14a}$$

$$y = Cz \tag{14b}$$

$$v = -Kz + K_I\xi \tag{14c}$$

$$\dot{\xi} = r - y = r - Cz. \tag{14d}$$

Berdasarkan (14a)-(14d), dinamika sistem bisa direpresentasikan kedalam bentuk

$$\begin{bmatrix} \dot{z}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} v(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t). \tag{15}$$

Selanjutnya didesain sistem yang stabil asimptotik dimana $z(\infty)$,$\xi(\infty)$, dan $v(\infty)$ bernilai tetap (konstan). Pada saat *steady state*, $\dot{\xi}(\infty) = 0$, sehingga $y(\infty) = r$. Dinamika sistem pada saat *steady state* yaitu

$$\begin{bmatrix} \dot{z}(\infty) \\ \dot{\xi}(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(\infty) \\ \xi(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} v(\infty) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(\infty). \tag{16}$$

Dengan mengurangkan (15) dengan (16), diperoleh

$$\begin{bmatrix}\dot{z}(t)-\dot{z}(\infty)\\ \dot{\xi}(t)-\dot{\xi}(\infty)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A & 0\\ -C & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}z(t)-z(\infty)\\ \xi(t)-\xi(\infty)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}B\\ 0\end{bmatrix}v(t)-v(\infty). \quad (17)$$

Selanjutnya (17) disederhanakan menjadi

$$\begin{bmatrix}\dot{z_e}(t)\\ \dot{\xi_e}(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A & 0\\ -C & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}z_e(t)\\ \xi_e(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}B\\ 0\end{bmatrix}v_e(t) \quad (18)$$

dimana

$$z(t)-z(\infty)=z_e(t) \quad (19a)$$
$$\xi(t)-\xi(\infty)=\xi_e(t) \quad (19b)$$
$$v(t)-v(\infty)=v_e(t), \quad (19c)$$

dan

$$v_e(t)=-Kz_e(t)+k_I\xi_e(t). \quad (20)$$

Dengan mendefinisikan error ke-$(n+1)$ yang baru $e(t)$ yaitu

$$e(t) \;=\begin{bmatrix}z_e(t)\\ \xi_e(t)\end{bmatrix}=\; vektor(n+1), \quad (21)$$

maka (18) menjadi

$$\dot{e}=\hat{A}e+\hat{B}v_e \quad (22)$$

dimana

$$\hat{A} \;=\begin{bmatrix}A & 0\\ -C & 0\end{bmatrix},\;\hat{B} \;=\begin{bmatrix}B\\ 0\end{bmatrix},$$

dan (20) menjadi

$$v_e=-\hat{K}e \quad (23)$$

dimana

$$\hat{K}=[K|-k_I]. \quad (24)$$

Persamaan *state error*

$$\dot{e}=(\hat{A}-\hat{B}\hat{K})e \quad (25)$$

diperoleh dengan mensubstitusikan (23) ke (22). Jika *eigen values* dari matriks $\hat{A}-\hat{B}\hat{K}$ (yang juga merupakan *closed-loop poles*) dispesifikasikan sebagai $\mu_1,\mu_2,...,\mu_n+1$, maka *state-feedback gain* matriks K dan *integral gain constant* k_I dapat dihitung menggunakan teknik *pole-placement* [11].

Secara keseluruhan *state feedback control law* sistem adalah

$$u=-\frac{x_1^2}{2adx_3}(-k_1x_1-k_2x_2-k_3(\frac{g-ax_3^2}{x_1^2})+K_I\xi+ 4ac\frac{x_2x_3^2}{x_1^4}-2ab\frac{x_3^2}{x_1^2}-2a\frac{x_2x_3^2}{x_1^3}). \quad (26)$$

IV. Pengujian Sistem dan Hasil simulasi

Pengujian performa sistem kendali dilakukan melalui proses simulasi menggunakan Matlab Simulink. Keluaran sistem kendali maglev adalah posisi dari bola feromagnetik (x_1). Berdasarkan (14a)-(14d), sistem maglev direpresentasikan kedalam bentuk persamaan matriks

$$A=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\0&0&0\end{bmatrix},\; B=\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix},\; C=\begin{bmatrix}1&0&0\end{bmatrix}.$$

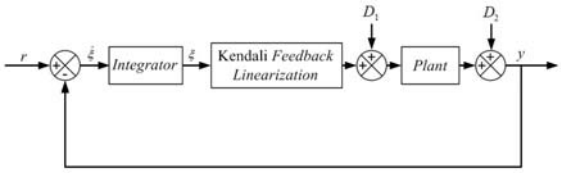
Selanjutnya dibentuk matriks $\hat{A}$, $\hat{B}$ dan *gain* $\hat{K}$

$$\hat{A}=\begin{bmatrix}0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&0\\-1&0&0&0\end{bmatrix},\; \hat{B}=\begin{bmatrix}0\\0\\1\\0\end{bmatrix},\; \hat{K}=[k_1k_2k_3|-k_I].$$

Nilai *poles* pada paper ini dipilih sebesar $s=-50$, $s=-60$, $s=-70$, dan $s=-90$. Setelah melalui proses penghitungan menggunakan metode *pole-placement*, diperoleh nilai

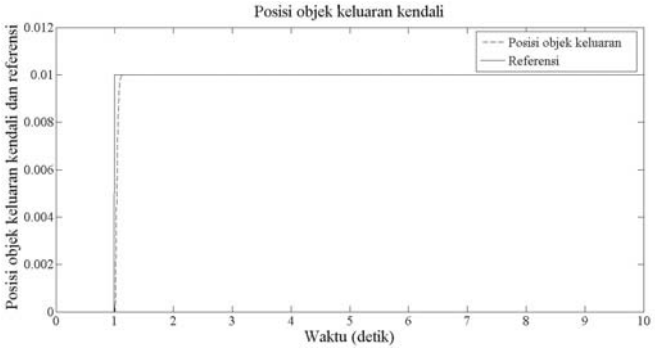
$$\hat{K}=[k_1k_2k_3|-k_I]=[1173000\;\;26900\;\;270|-18900000].$$

Nilai parameter-parameter dari sistem maglev ditentukan sebagai berikut: $m=0.025\ kg$, $X=0.01\ m$, $i=3.2\ A$, $g=9.81\ \frac{m}{s^2}$, $k=2.395\ \frac{Nm^2}{A^2}$, $R=4.2\ \Omega$, dan $L=0.02\ H$. Sebuah masukan sinyal referensi berupa *step function* diberikan untuk menguji kestabilan dan kemampuan trayektori dari sistem kendali. Disamping itu juga, sistem diberikan *disturbance* (gangguan) D_1 dan D_2 masing-masing berupa sinyal *step* dengan waktu *step* (*step time*) sebesar 3 detik untuk menguji ketahanan sistem terhadap gangguan seperti yang terlihat pada Gambar 3. Pengujian sistem terdiri atas dua

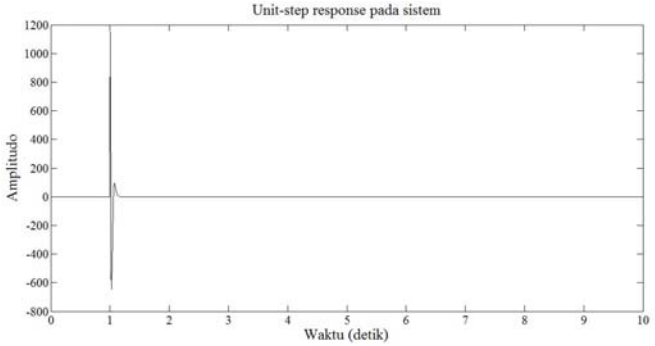


Gambar 3. Blok sistem kendali dengan gangguan

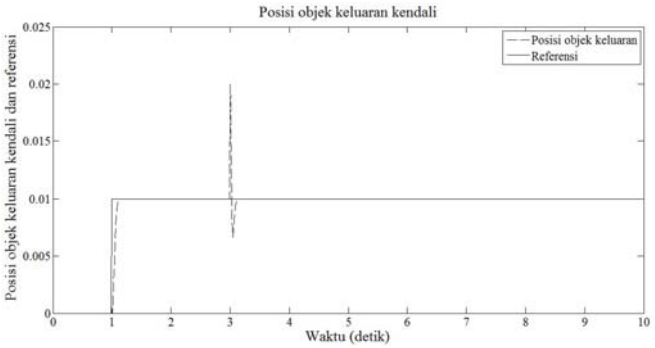
bagian, yaitu pengujian tanpa gangguan dan dengan gangguan. Hasil simulasi pada Gambar 4 menunjukkan hasil pengujian sistem tanpa gangguan. Pada gambar terlihat sistem stabil yang diindikasikan dengan tidak terdapat *overshoot* dan *steady-state error*. Keluaran posisi objek dapat mengikuti trayek sinyal referensi dengan baik. Hasil simulasi pengujian dengan gangguan D_1 ditunjukkan oleh Gambar 6 dan pengujian dengan gangguan D_2 ditunjukkan oleh Gambar 7. Hasil simulasi pada Gambar 6 menunjukkan keluaran kendali kembali stabil meskipun setelah mendapat gangguan. Begitu juga hasil simulasi pada Gambar 7 menunjukkan keluaran kendali kembali stabil meskipun setelah mendapat gangguan. Grafik *error* dari sistem tanpa diberikan gangguan ditunjukkan oleh Gambar 5. Pada gambar tersebut terlihat nilai *error* akan mencapai nilai nol setelah detik pertama dan *error* tetap bernilai nol untuk $t=\infty$.



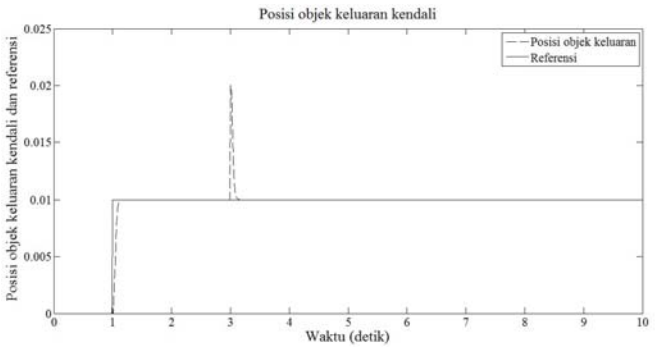
Gambar 4. Respon kendali terhadap *unit step input* tanpa gangguan



Gambar 5. Grafik *error* sistem tanpa gangguan



Gambar 6. Respon kendali terhadap *unit step input* dengan gangguan D_1



Gambar 7. Respon kendali terhadap *unit step input* dengan gangguan D_2

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Dinamika nonlinier sistem maglev diubah kedalam bentuk linier menggunakan teknik *input-state feedback linearization*. Blok sistem kendali didesain mengikuti sistem servo dengan penambahan integrator dengan tujuan untuk memastikan tidak terdapat *steady-state error* pada keluaran sistem. Pengujian sistem terdiri atas dua bagian, yaitu pengujian tanpa gangguan dan dengan gangguan melalui proses simulasi menggunakan Matlab Simulink. Hasil simulasi sistem kendali tanpa gangguan menunjukkan sistem stabil yang diindikasikan dengan tidak terdapat *overshoot* dan *steady-state error*. Keluaran posisi objek dapat mengikuti sinyal referensi dengan baik. Hasil simulasi dengan gangguan menunjukkan keluaran kendali kembali stabil meskipun setelah mendapat gangguan.

Penelitian dapat dikembangkan dengan penerapan pada *plant* maglev yang sesungguhnya dengan mempertimbangkan ketidak-pastian nilai parameter dan gangguan terhadap sistem. Metode nonlinier lain seperti *sliding mode control*, *adaptive control* dan *backstepping* dapat dikembangkan dalam merancang sistem kendali maglev yang *robust*.

DAFTAR PUSTAKA

[1] H. Nadashima, "The superconducting magnet for the maglev transport system," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, no. 6, pp. 1572–1578, 1994.
[2] M. B. Khamesee, N. Kato, Y. Nomura, and T. Nakamura, "Design and control of a micro robotic system using magnetic levitation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 7, pp. 1–14, Mar. 2002.
[3] K. Qian, Z. Xu, and H. Wang, "Investigation on applying passive magnetic bearings to impeller left ventricular assist devices (lvad)," *IEEE Biomedical Engineering and Informatics (BMEI)*, vol. 4, pp. 1526–1518, Okt. 2010.
[4] H. Bleuler, "A survey of magnetic levitation and magnetic bearing types," *JSME Int. J.*, vol. 35, pp. 335–342, Okt. 1992.
[5] Y. Khemissi, "Control using sliding mode of the magnetic suspension system," *International Journal of Electrical and Computer Sciences IJECS-IJENS*, vol. 10, no. 3, pp. 1–5, Juni 2010.
[6] Y. C. Kim and K. H. Kim, "Gain scheduled control of magnetic suspention system," *American Control Conference*, vol. 3, pp. 3127–3131, Juni 1994.
[7] W. Barie and J. Chiasson, "Linear and nonlinear state-space controllers for magnetic levitation," *International Journal of Systems Science*, vol. 27, no. 11, pp. 1153–1163, 1996.
[8] S. K. Pradhan and R. Singh, "Nonlinear control of a magnetic levitation system using feedback linearization," *IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, pp. 152–156, 8-10 Mei 2014.
[9] J.-J. E. Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control*. Englewood Cliffs (N.J.): Prentice Hall, 1991.
[10] T. Wong, "Design of a magnetic levitation system-an undergraduate project," *IEEE Transactions on Education*, vol. 29, pp. 196–200, 1986.
[11] K. Ogata, *Modern control engineering*, ser. Prentice-Hall electrical engineering series. Englewood Cliffs (N.J.): Prentice-Hall, 1970.