

PEMODELAN DAN SIMULASI SISTEM *CONTROL MAGNETIC LEVITATION BALL*

Dwi Basuki Wibowo*, Sindu Sutomo

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

*Email: dwibasuki@yahoo.com

ABSTRAK

Sudah sejak lama studi dan penelitian tentang magnet telah menghasilkan berbagai produk yang bermanfaat bagi umat manusia. Metode pelayangan magnet adalah termasuk hal baru yang hasil penelitiannya banyak diterapkan di sektor industri dan transportasi karena dapat mengurangi gesekan mekanis secara berarti. Meski penelitian-penelitian tersebut masih terus dilakukan dan terbukti sukses diterapkan pada kereta api cepat *Magnetic Levitation (maglev)* serta pengembangan bantalan magnet tak berfriksi, prinsip dasar pelayangan magnet dengan magnet elektrik ini masih terus dipelajari di banyak perguruan tinggi di dunia. Tujuannya terutama adalah melihat fenomena pelayangan benda melalui pengontrolan kuat medan magnet elektrik serta rentang kestabilan tinggi benda yang dilayangkan.

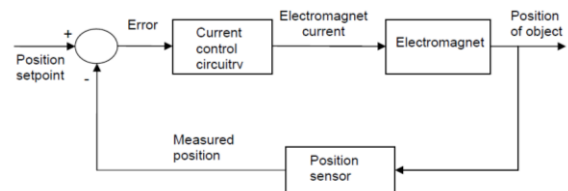
Sistem *Magnetic Levitation (Maglev)* ini bekerja pada gaya tarik antara gaya elektromagnetik dan benda. Selain itu objek yang akan dilayangkan adalah bola baja biasa. Untuk mencegah bola baja menempel pada electromagnet maka posisi benda harus bisa diperhitungkan dengan menggunakan sensor infra merah. Informasi dari sensor akan masuk pada rangkaian kontrol yang akan mengatur arus dalam elektromagnet.

Kata Kunci: *Magnetic Levitation (maglev)*, electromagnet, bola baja

PENDAHULUAN

Magnetic levitation ball adalah proses pelayangan sebuah benda dengan memanfaatkan medan magnet. Gaya elektromagnetik digunakan untuk melawan efek dari gaya gravitasi. *Magnetic levitation ball* dapat didefinisikan sebagai proses melayangkan benda di ruang bebas dengan menangkal gaya gravitasi yang bekerja padanya. Secara sederhana ini dapat disebut sebagai suspensi stabil melawan gravitasi dari suatu obyek[1].

Cara termudah untuk melayangkan objek elektromagnetik dilihat dari sistem kontrol adalah magnetik suspensi. Obyek yang akan dilayangkan ditempatkan di bawah sebuah elektromagnet. Dengan kekuatan medan magnet yang dihasilkan oleh elektromagnet yang dikendalikan dengan tepat akan melawan gaya gravitasi pada objek yang dilayangkan. Metode ini disebut teorema *circumvents Earnshaw* dengan menggunakan kontrol umpan balik. Dengan demikian sistem hanya akan melawan gaya gravitasi, sistem ini bekerja pada gaya tarik antara gaya elektromagnetik dan benda. Selain itu objek yang akan dilayangkan adalah bola baja biasa. Untuk mencegah bola baja menempel pada electromagnet maka posisi benda harus bisa diperhitungkan dengan menggunakan sensor infra merah. Informasi dari sensor akan masuk pada rangkaian kontrol yang akan mengatur arus dalam elektromagnet. Jika benda terlalu dekat dengan elektromagnet maka benda akan menempel maka arus yang masuk di electromagnet harus dikurangi, tetapi jika objek terlalu jauh maka arus pada electromagnet harus ditambah^[1]. Hal ini menghasilkan sistem umpan balik dasar yang digambarkan dibawah ini:



Gambar 1. Sistem umpan balik [1].

DASAR TEORI

Menurut tujuan dan kondisi operasi, sebuah pemodelan sangat penting untuk menemukan keseimbangan antara kesederhanaan dan kerumitan model, namun harus mempertimbangkan relevansi sub-proses dalam sistem. Dalam pemodelan sistem dinamis biasanya banyak perhitungan yang harus dilakukan sebelum model tersebut diperoleh, oleh karena itu diperlukan pendekatan lain yang dipertimbangkan dan beberapa bagian harus diasumsikan [2]. Pada bagian berikut, prosedur pemodelan akan dijelaskan.

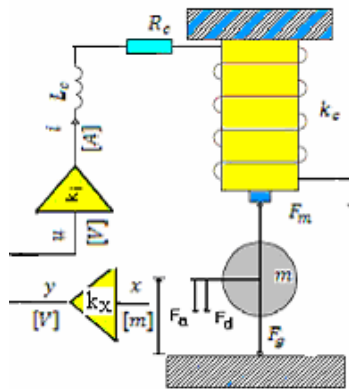
Gambar 2 berikut ini memperlihatkan model dan struktur pelayangan magnet pada bola baja (*magnetic levitation ball*). Adapun komponen dan struktur *Magnetic Levitation Ball* ini terdiri dari^[2]:

1. *Digital to Analog Converter (DAC)* yang berfungsi sebagai pengubah sinyal digital menjadi sinyal analog.
2. *Power amplifier* berfungsi sebagai sumber arus yang konstan.
3. Solenoida berfungsi sebagai magnet untuk melawan gaya gravitasi.
4. Bola baja yang berfungsi sebagai benda yang akan dilayangkan.
5. Sensor Posisi berfungsi untuk menentukan jarak benda dengan elektromagnet.

6. *Analog to Digital Converter* (ADC) berfungsi untuk mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital.

Model Matematika

Model ini dapat diturunkan menggunakan metode lagrange, selain itu gaya electromagnet ditentukan dari energi yang ada pada induktor. Penurunan metode ini didasarkan pada asumsi bahwa distribusi medan magnet sangat ideal dan induktansi kumparan bervariasi secara linear dengan jarak antara bola dengan solenoidnya. Sebuah distribusi medan magnet yang ideal ditandai oleh medan magnet yang seragam di atas objek pelayangan, kepadatan fluks magnet merupakan fungsi dari jarak pada arus tetap [3]. Hubungan antara gaya elektromagnetik, arus dan jarak dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2. Sistem magnetic levitation ball [3]

$$F_a = F_m - F_g - F_d \tag{1}$$

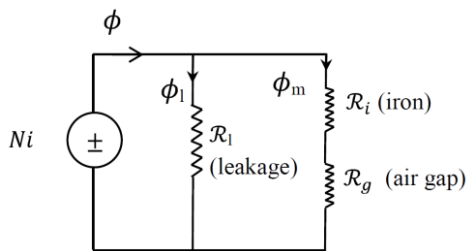
dimana:

- F_a = gaya percepatan (N)
- F_m = gaya elektromagnetik (N)
- F_g = gaya gravitasi (N)
- F_d = gaya peredam (N)

Untuk memudahkan pemodelan matematik, sistem *magnetic levitation ball* ini dibuat menjadi kedalam 3 komponen yaitu sistem magnetik, sistem elektrikal dan sistem mekanik[4].

a. Sistem magnetik

Pemodelan skema kerja kerja dalam selenoid dapat ditunjukkan pada gambar (3). hal ini menunjukan hubungan antara lilitan N , fluks Φ dan reluktansi \mathcal{R} [4].



Gambar 3. Skema kerja elektromagnetik

Untuk mengetahui total reluktansi dari gambar diatas dapat diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_m x &= \mathcal{R}_i + \mathcal{R}_g \\ &= \frac{l_i}{\mu_r \mu_0 A_i} + \frac{l_i}{\mu_0 A_i} \\ \mathcal{R}_m x &= \frac{1}{\mu_0 A_i} \frac{l_i}{\mu_r} + 2x \end{aligned} \tag{2}$$

dimana:

- Φ_m =magnetic fluks (wb)
- \mathcal{R}_i = reluktansi pada besi
- \mathcal{R}_g = reluktansi *air gap*
- l_i = panjang inti besi (m)
- A_i = luas permukaan inti besi (m²)
- N = lilitan koil
- i = arus listrik (ampere)
- μ_0 = permeabilitas ruang hampa
- μ_r = permeabilitas baja

b. Sistem Elektrikal

Persamaan elektrik dari magnetic levitation diasumsikan bahwa elektromagnetic coil merupakan model dari rangkaian seri antara resistor-induktor. Sistem elektrik ditunjukkan oleh gambar dibawah. Dengan menggunakan KVL (Kirchhoff's Voltage Law) maka untuk hubungan tegangan dan arus listrik dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_t = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \tag{3}$$

dimana: V_t = tegangan

R = hambatan

i = arus

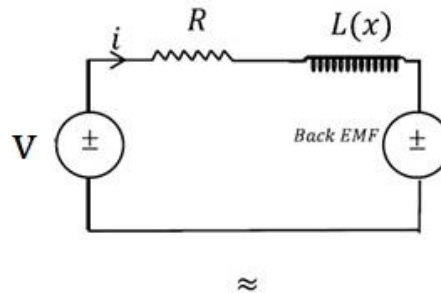
$\lambda = N\Phi$

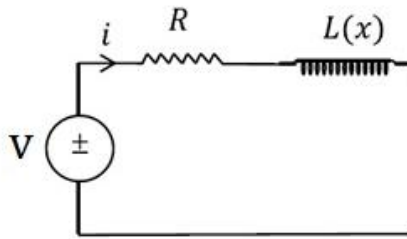
$$\lambda = N \frac{Ni}{\mathcal{R}_i} + \frac{Ni}{\mathcal{R}_m x}$$

$$\lambda = \frac{N^2}{\mathcal{R}_i} + \frac{N^2}{\mathcal{R}_m x} i = L_l + L_m(x) i \tag{4}$$

$L x$ adalah induktansi elektromagnetic coil jika L_l adalah induktansi tanpa bola, $L_m(x)$ adalah peningkatan induktansi dengan adanya bola. Maka induktansi elektromagnetic coil adalah

$$L x = L_l + L_m(x) \tag{5}$$





Gambar 4. Sistem elektrik

Dari persamaan (4) dan (5) akan didapat persamaan dibawah ini

$$L_m x = \frac{N^2}{\mathcal{R}_m x}$$

$$L_m x = \frac{\frac{N^2 \mu_0 A_i}{2}}{\frac{l_i}{\mu_r} + x}$$

$$L_m x = \frac{c}{k_0 + x} \approx \frac{c}{x} \text{ karena } x \gg k_0$$

dimana, $c = \frac{N^2 \mu_0 A_i}{2}$ dan $k_0 = \frac{l_i}{2\mu_r}$

Dengan menggunakan persamaan (3) dan (5) akan didapat persamaan sebagai berikut:

$$V_t = Ri + L x \frac{di}{dt} + \frac{\partial L x}{\partial x} i \frac{dx}{dt} \tag{6}$$

dimana $\frac{\partial L x}{\partial x} i \frac{dx}{dt}$ adalah *counter electromotive force* atau *back emf* yang dihasilkan dari perubahan gaya *elektromotive*. Karena fluks leakage dalam kasus ini sangat kecil, maka *back emf* dapat abaikan^[4]. Sehingga persamaan (6) dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_t = Ri + L x \frac{di}{dt} \tag{7}$$

c. Sistem Mekanik

Gaya elektromagnetik pada objek pelayangan ditentukan menggunakan konsep coenergi untuk menghasilkan posisi objek pelayangan sebagai fungsi dari arus sebagai masukan^[5]. Gaya elektromagnet itu sendiri didefinisikan dari *electrical input* dikurangi *coenergi*. Coenergi didefinisikan sebagai berikut:

$$W_{fl} = \frac{1}{2} L x i^2 \tag{8}$$

$$F_m dx = dW_e - dW_{fl}$$

$$F_m = \frac{dW_e}{dx} - \frac{dW_{fl}}{dx} \tag{9}$$

Dimana dW_e adalah perubahan *electrical input* dan dW_{fl} adalah perubahan *stored energy (coenergy)*.

Dalam sistem linear, dW_e diasumsikan nol sehingga dari persamaan (9) didapat [3]:

$$F_m = - \frac{dW_{fl}}{dx} \tag{10}$$

Substitusikan persamaan (8) dan (10)

$$\begin{aligned} F_m &= - \frac{1}{2} L x i^2 \frac{d}{dx} \\ &= - \frac{1}{2} (L_l + L_m(x)) i^2 \frac{d}{dx} \\ &= \frac{1}{2} c \frac{i^2}{x} \end{aligned} \tag{11}$$

Karena $\frac{1}{2} c$ adalah konstanta maka dapat dimisalkan sebagai k menjadi persamaan dibawah ini:

$$F_m = k \frac{i^2}{x} \tag{12}$$

Hubungan antara gaya elektromagnetik, arus dan jarak dari persamaan (1) dapat digambarkan sebagai berikut:

$$mx = k \frac{i^2}{x} - mg - F_d \tag{13}$$

Seperti yang sudah dijelaskan dalam sub bab sebelumnya, hubungan antara massa, arus, lilitan dan posisi bola dapat diketahui dari ketiga sistem diatas yaitu sistem magnetik, sistem elektrik dan sistem mekanik. Maka akan didapat persamaan sebagai berikut:

$$\frac{N^2 \mu_0 A_i I^2}{4 x^2} = m g \tag{14}$$

dimana: N = lilitan

- μ_0 = permeabilitas ruang hampa
- A_i = luas permukaan inti besi (m²)
- I = arus listrik (A)
- x = posisi bola (m)
- m = massa bola (kg)
- g = percepatan gravitasi (m s²)

Linearisasi

Persamaan diatas merupakan persamaan gerak nonlinear. Model persamaan diatas dalam kasus ini keseimbangan antara gaya elektromagnetik tidak stabil, oleh karena itu untuk memudahkan sistem pengontrolan maka persamaan ini harus dilinearkan. Untuk memperoleh model matematika yang linear dari suatu sistem nonlinear, kita anggap bahwa variabel hanya mengalami deviasi yang kecil dari titik kerjanya. Dengan menggunakan bantuan deret *taylor* kita dapat menyatakan suatu persamaan nonlinear kedalam bentuk deret[6].

$$\begin{aligned}
 y = f(x_1, x_2) &+ \frac{\partial f}{\partial x_1} x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} x_2 \\
 &+ \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} x_1^2 \\
 &+ 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} x_1 x_2 \\
 &+ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} x_2^2 + \dots
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

dengan turunan parsial dihitung pada $x_1 = x_1, x_2 = x_2$. Di dekat titik kerja normal, bentuk-bentuk orde tinggi diabaikan. Model matematika linier dari sistem nonlinier ini di sekitar kondisi kerja normal selanjutnya diberikan oleh:

$$y - y_0 = K_1 x_1 + K_2 x_2 \tag{16}$$

dengan

$$\begin{aligned}
 y &= f(x_1, x_2) \\
 K_1 &= \frac{\partial f}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1, x_2=x_2} \\
 K_2 &= \frac{\partial f}{\partial x_2} \Big|_{x_1=x_1, x_2=x_2}
 \end{aligned}$$

Untuk sistem persamaan (16) kita ambil titik kerja pada $x_1 = i_0 ; x_2 = x_0$. Dengan memperhatikan diagram benda bebas massa dan koil magnet maka kondisi awal operasi massa yaitu pada $\dot{i}_0 = i_0 ; x_0 = 0$. Dengan mensubstitusikan kondisi awal pada persamaan gaya magnet yang dideretkan seperti persamaan (12) maka:

$$\begin{aligned}
 F_m \approx F(i_0, x_0) &+ \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{i_0, x_0} (x - x_0) \\
 &+ \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{i_0, x_0} (i - i_0) \\
 F_0 = F(i_0, x_0) &= k \frac{i_0^2}{x_0}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

$$K_1 = \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{i_0, x_0} = -2k \frac{i_0^2}{x_0^3} \tag{18}$$

$$K_2 = \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{i_0, x_0} = 2k \frac{i_0}{x_0^3} \tag{19}$$

Maka persamaan gaya magnet linear adalah:

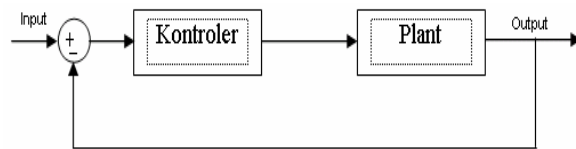
$$\begin{aligned}
 F_m &\approx F_0 + K_1 x + K_2 i \\
 F_m &= k \frac{i_0^2}{x_0} - 2k \frac{i_0^2}{x_0^3} x + 2k \frac{i_0}{x_0^3} i
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Pada saat keadaan setimbang statik akselerasi sama dengan nol

$$\begin{aligned}
 mx &= F_m - mg \\
 mx &= k \frac{i_0^2}{x_0} - 2k \frac{i_0^2}{x_0^3} x + 2k \frac{i_0}{x_0^3} i - m \\
 mg &= k \frac{i_0^2}{x_0} = F_0
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Kontrol

Kontroler otomatis membandingkan nilai sebenarnya dari keluaran sistem secara keseluruhan (*Plant*) dengan mengacu pada masukan, menentukan penyimpangan, dan menghasilkan sinyal kontrol yang akan mengurangi penyimpangan menjadi nol atau nilai yang kecil^[9]. Sistem kontrol PID yang sering digunakan dan banyak diberikan dalam materi sistem kontrol di perguruan tinggi. Hal ini disebabkan karena sistem ini merupakan sistem kontrol loop tertutup yang cukup sederhana dan kompatibel dengan sistem kontrol lainnya sehingga dapat dikombinasikan dengan sistem kontrol lain seperti *Fuzzy control*, *Adaptif control* dan *Robus control*.



Gambar 5. Diagram blok sistem kontrol

State Equations

State-space adalah suatu model matematik yang menyatakan hubungan antara satu tingkat keadaan (*state*) sistem dengan tingkat keadaan lain dengan bilangan *differential* orde pertama yang dinyatakan dalam bentuk matriks. Analisa *state-space* memiliki tiga jenis variabel yang terlibat dalam model sistem dinamika yaitu variabel masukan, variabel keluaran dan variabel kedudukan^[9]. Sebuah *state-space* digunakan untuk sistem *linear time-invariant* yang secara umum ditunjukkan oleh persamaan (22)

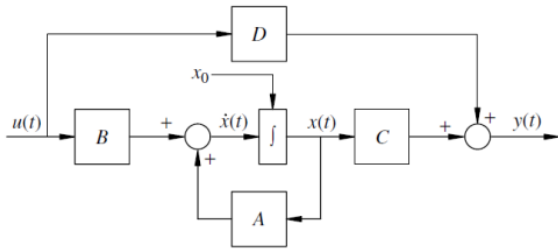
$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= Ax + Bu \\
 y &= Cx + Du
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

dimana:

$$\begin{aligned}
 x &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, \\
 B &= \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix}, \\
 y &= \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} \end{bmatrix}, \\
 D &= \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

Matriks **A**, **B**, **C**, dan **D** disebut *state* matriks, *input* matriks, *output* matriks, dan *direct transmission* matrik. Vektor **x**, **u**, dan **y** adalah *state* vektor, *input* vektor, dan *output* vektor.

Perubahan state (tingkat keadaan) dan hubungan antara matriks penyusun pada sebuah sistem mekanik dalam representasi state-space dapat dilihat pada gambar (6) berikut:



Gambar 6. Diagram blok sistem kendali dalam state-space

Persamaan utama untuk menentukan sistem pelayangan bola baja, ditunjukkan dari persamaan (3.1), (3.2), (3.19), dimana state variabel $x_1 = x$, $x_2 = dx/dt$, $x_3 = i$, dan $u = u_m$ ditunjukkan dalam model sistem state-space menjadi:

$$\begin{aligned}
 x &= v \\
 v &= -\frac{k_{FV}}{m}v - g + \frac{k_c i^2}{m(x)^2} \\
 i &= \frac{k_i k_{DA} u_m}{T_a} - \frac{i}{T_a} \\
 y_m &= k_x k_{AD} x
 \end{aligned} \tag{24}$$

dimana x adalah posisi bola, i arus yang mengalir pada lilitan, u_m adalah model input voltage dan y_m merupakan A/D converter output. Sistem model di atas merupakan sistem nonlinear oleh karena itu untuk memperoleh model matematika yang linear dari suatu sistem nonlinear, kita anggap bahwa variabel hanya mengalami deviasi yang kecil dari titik kerjanya. Dengan menggunakan bantuan deret Taylor kita dapat menyatakan suatu persamaan nonlinear kedalam bentuk sistem linear.

$$\begin{aligned}
 x_\delta &= v_\delta \\
 v_\delta &= \frac{-2i_0^2 k}{m x_0^3} x_\delta - \frac{k_{FV}}{m} v_\delta + \frac{2i_0 k}{m(x_0)^2} i_\delta \\
 i &= \frac{k_i k_{DA} u_\delta}{T_a} - \frac{i_\delta}{T_a} \\
 y_m &= k_x k_{AD} x_\delta
 \end{aligned} \tag{25}$$

Dari persamaan diatas akan didapat model matriks dari model state-space

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{2i_0^2 k}{m x_0^3} & -\frac{k_{FV}}{m} & \frac{2i_0 k}{m(x_0)^2} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_a} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_i k_{DA}}{T_a} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 C &= k_x k_{AD} \quad 0 \quad 0 \\
 D &= 0
 \end{aligned} \tag{26}$$

Kontrol PID

Fungsi alih H(s) pada sistem kontrol PID merupakan besaran yang nilainya tergantung pada nilai konstanta dari sistem P, I dan D

$$H(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{27}$$

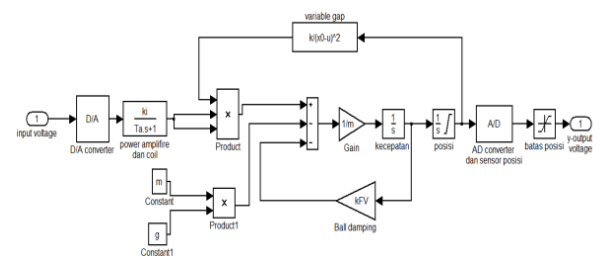
Sistem kontrol PID terdiri dari tiga buah cara pengaturan yaitu kontrol P (*Proportional*), D (*Derivative*) dan I (*Integral*), dengan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Dalam implementasinya masing-masing cara dapat bekerja sendiri maupun gabungan diantaranya. Dalam perancangan sistem kontrol PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter P, I atau D agar tanggapan sinyal keluaran sistem terhadap masukan tertentu sebagaimana yang diinginkan.

Tabel 1. Tanggapan sistem kontrol PID terhadap perubahan parameter

Tanggapan Loop Tertutup	Raise time	Overshoot	Settling time	s.s error
Proporsional (K_p)	Menurun	Meningkat	Perubahan kecil	Menurun
Integral (K_i)	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
Derivative (K_d)	Perubahan kecil	Menurun	Menurun	Perubahan kecil

Untuk merancang sistem kontrol PID, kebanyakan dilakukan dengan dengan metoda cobacoba atau (*trial & error*). Hal ini disebabkan karena parameter K_p , K_i dan K_d tidak *independent*. Untuk mendapatkan aksi kontrol yang baik diperlukan langkah coba-coba dengan kombinasi antara P, I dan D sampai ditemukan nilai K_p , K_i dan K_d seperti yang diinginkan.^[7]

Sistem pelayangan bola baja



Gambar 7. Sistem pelayangan bola baja non-linear Parameter sistem pelayangan bola baja

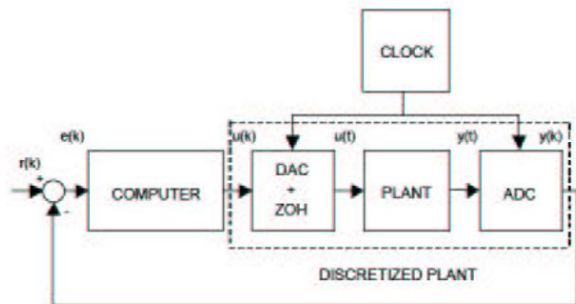
Tabel 2. parameter-parameter pelayangan bola baja

Masa bola	m	$18.4 \times 10^{-3} \text{ kg}$
Posisi bola	x	0.0032 m
Percepatan gravitasi	g	9.81 m/s^2
Coil offset	x_0	0.0083 m

Konstanta magnet	k	9,5814x10 ⁻⁶ Nm ² /A ²
Damping constant	k _{FV}	0,02 N.s/m
Power amplifire gain	k _i	0,2967A/V
Power amplifire time constant	T _a	8,9021x10 ⁻⁵ s
D/A converter gain	k _{DA}	5 V
D/A converter offset	u ₀	0
A/D converter gain	k _{AD}	0,2 V
A/D converter offset	U _{MU0}	0
posisi sensor gain	k _x	612,3 V/m
Posisi sensor offset	y ₀	0
arus	i	0,7 A

Discrete PID kontrol

Kontrol PID biasa dapat diubah menjadi discrete dengan menggunakan metode ZOH. Pendekatan Zero-Order-Hold merupakan teknik yang banyak digunakan untuk mengubah fungsi kontinyu menjadi fungsi discrete. Dengan melibatkan derivatif, transfer fungsi z untuk sistem kontinyu diberikan oleh ZOH.



Gambar 8. Sistem kontrol digital

untuk menghasilkan fungsi discrete maka fungsi s diubah menjadi fungsi z. Dimana:

$$s = \frac{z - 1}{zT_s}$$

Dimana T_s=sampling period [s]

Dengan mengubah sistem PID menjadi bentuk discrete maka:

$$H s = K_p + K_i \frac{zT_s}{(z - 1)} + K_d \frac{z - 1}{zT_s}$$

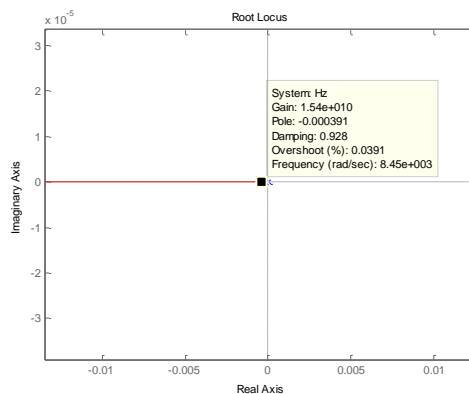
$$H s = \frac{K_p z^2 - 1 + K_i zT_s + K_d T_s(z - 1)^2}{z(z - 1)}$$

Kontrol digital menggunakan PID discrete

$$H z = 1 - z^{-1} ZL^{-1} \frac{H s}{s}$$

Pen-discrete-an pada plant sistem H(s) dari persamaan 3.42 dengan menggunakan matlab didapat:

$$H z = \frac{1,01 \times 10^{-12} z^2 + 1,382 \times 10^{-12} z + 1,875 \times 10^{-14}}{z^3 - 1,999 z^2 - 1,321 \times 10^{-5}}$$

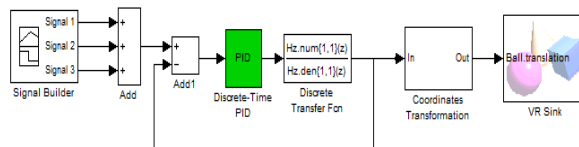


Gambar 9. Root locus fungsi transfer discrete Hz

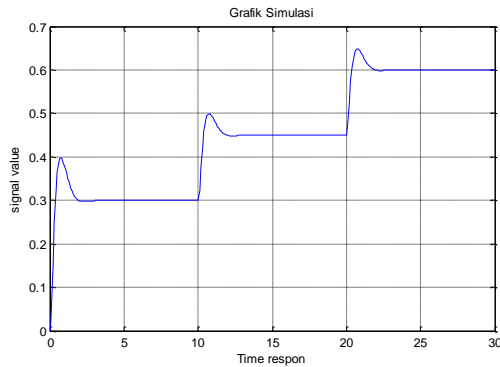
Sesuai dengan grafik root locus di atas, untuk mendapatkan sistem yang stabil diperlukan gain sekitar 4,6x10¹⁴, hal ini dikarenakan respon dari plant pelayangan bola baja ini sangat kecil sehingga dibutuhkan gain yang bernilai besar.

Simulasi simulink

Simulasi pelayangan bola baja menggabungkan antara plant atau system yang akan dikontrol dengan system control itu sendiri. Pada pelayangn bola baja ini metode control yang digunakan yaitu metode PID atau Proporsional Integral Derivative. Selain itu untuk visualisasi digunakan pula tool yang ada pada matlab yaitu virtual reality. Virtual reality merupakan tool bawaan matlab yang berguna untuk memvisualisasikan system yang telah disimulasikan dengan simulink sehingga hasil simulasi terlihat lebih bagus dan terkesan nyata. Gambar 4. Di bawah ini merupakan gambar blok simulasi simulink untuk pelayangan bola baja.



Gambar 10. Gambar sistem pelayangan bola baja



Gambar 11. Grafik hasil simulasi

Dilihat dari grafik di atas sistem pelayangan bola baja ini akan stabil pada saat 17 s. Kontrol yang dipakai pada simulasi ini menggunakan kontrol PID, untuk mendapatkan sistem yang stabil maka diperlukan nilai kontrol K_p sebesar $1,5 \times 10^{10}$, K_i sebesar 495 dan K_d sebesar 9×10^7 . Besarnya nilai kontrol dari PID ini digunakan metode *trial error*.

KESIMPULAN

1. Hubungan antara masa bola baja dan arus listrik berbanding lurus, semakin besar masa bola, semakin besar pula arus yang dibutuhkan.
2. Untuk mempertahankan posisi/jarak bola baja dari solenoid dengan berbagai ukuran masa bola baja dibutuhkan arus yang bervariasi.
3. Nilai Gain yang didapatkan dengan menggunakan root locus sebesar 1.5×10^{10}
4. Sistem akan stabil jika memiliki nilai K_p sebesar $1,5 \times 10^{10}$, K_i sebesar 495 dan K_d sebesar 9×10^7 .
5. Waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kondisi stabil sebesar 3,5 detik.

REFERENSI

1. Lance Williams. *Electromagnetic Levitation Thesis*, 2005.
2. Khaled A. M. Ali. *Modeling and Parameters Identification of A Magnetic Levitation Model*, The Islamic University of Gaza, 2009.
3. Eng. Khalid Abdelhafiz Ali. *Modelling, Identification of Amagnetic Levitation CE152*, Al-Aqsa University, 2010.
4. Shafayet Hossain. *Design of a Robust Controller for a Magnetic Levitation System*, Wichita State University.
5. Stephen C. Paschall II. *Design, Fabrication, and Control of A Single Actuator Magnetic Levitation System*, Texas A&M University, 2002.
6. Katsuhiko Ogata. *Teknik Kontrol Automatik*, jilid I, Edisi kedua, Erlangga.
7. Muhamad Ali. *Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol Pid Dengan Software Matlab*, Universitas Negeri Yogyakarta, Jurnal Edukasi@Elektro Vol. 1, No. 1, Oktober 2004, hlm. 1–8.