

RANCANG BANGUN MAGNET LEVITATION BALL MENGGUNAKAN PID KONTROLER DAN ANALISIS ROBUST KONTROL BERBASIS ARDUINO UNO

DESIGN OF THE MAGNETIC LEVITATION BALL USING PID CONTROLLER AND ROBUST CONTROL ANALYSIS BASED ON ARDUINO UNO

Rezza Aji Saputra¹, Porman Pangaribuan², Ig. Prasetya Dwi Wibawa³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹rezzaajisaputra@students.telkomuniversity.ac.id, ²porpangrib@yahoo.com,

³prasdwiwibawa@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Perkembangan teknologi industri transportasi dewasa ini menuju penerapan teknologi magnetic levitation sistem, yaitu pengontrolan suatu objek logam (ferromagnetic) yang dilayangkan oleh gaya magnet.

Magnetic levitation ball adalah sebuah alat penerapan dari suspensi magnetik yang membahas tentang pengontrolan posisi pada tiga buah bola baja yang memiliki berat berbeda kemudian dilayangkan oleh gaya magnet dari sebuah koil.

Perubahan variasi massa bola baja menyebabkan sistem magnetic levitation ball terjadi kesalahan perhitungan dan gaya magnet. Bola baja yang digunakan bermassa 15gr, 22gr dan 30 gr. Kesalahan akibat variasi massa bola baja tersebut bisa dikurangi dengan metode pengontrolan PID dengan nilai Kp, Ki dan Kd secara berturut-turut sebesar 9000,0.0001 dan 1000. Dengan Mengimplementasikan nilai Kp, Ki dan Kd pada sistem didapatkan tegangan yang dibutuhkan untuk melayangkan benda bermassa 15 gr sebesar 3.38 volt, benda bermassa 22 gr sebesar 3,83 volt dan benda bermassa 30 gr sebesar 4.31. Untuk memperkuat sistem magnetic levitation ball digunakan analisis robust control sehingga didapatkan performansi sistem yang baik kurang dari 0 dB, pada benda bermassa 15 gr nilai performansi sistem sebesar -3.7dB, benda bermassa 22 gr nilai performansi sistem sebesar -10.2 dB dan benda bermassa 30 gr nilai performansi sistem sebesar -3.7dB. Prinsip kerja magnetic levitation ball menggunakan Arduino versi Uno sebagai mikrokontroler dan pembacaan posisi menggunakan hall effect sensor.

Kata kunci: Magnetic Levitation Ball, Arduino, Bola Baja, Sensor Infra Merah, PID Kontroller, dan Robust Kontrol.

Abstract

Technological developments transport industry today is towards the application of technology of magnetic levitation system, namely control of a metal object (ferromagnetic) floated by magnetic force.

Magnetic levitation ball is the application of a magnetic suspension that discusses controlling position on three steel balls that have different weight and then floated by the magnetic force of a coil.

Variation weight of steel balls cause magnetic levitation ball system error occurs calculations and magnetic force. Steel balls used mass 15gr, 22gr and 30 gr. Errors due to variations in load of steel balls can be reduced by PID control methods the value of Kp, Ki and Kd respectively for 9000,0.0001 and 1000. By Implementing value of Kp, Ki and Kd on the system voltage obtained for levitating a steel ball on a mass of 15 grams, 22 grams and 30 grams respectively is 3.38 volt, 3.83 volts and 4.31 volts. To strengthen the system of magnetic levitation ball robust control analysis was used to obtain a good performance of the system is less than 0 dB, the steel balls mass of 15 grams, and 30 grams 22gram system performance values obtained consecutively -3.7dB, -10.2 dB and -3.7dB. The working principle of magnetic levitation ball using version Arduino Uno as a microcontroller and a reading position using hall effect sensor.

Keywords: Magnetic Levitation Ball, Arduino, Steel Ball, Infrared Sensor, PID controller, and Robust Control.

1. Pendahuluan

Dalam era teknologi yang berkembang dewasa ini, telah diciptakan berbagai perangkat yang canggih. Salah satunya adalah suspensi pada kendaraan menggunakan gaya magnetic atau *Magnetic Levitation Suspense*,

selain untuk suspensi kendaraan teori tentang magnet levitation digunakan pada kereta super cepat maglev dengan memanfaatkan gaya magnet untuk menggerakkan kereta tersebut.

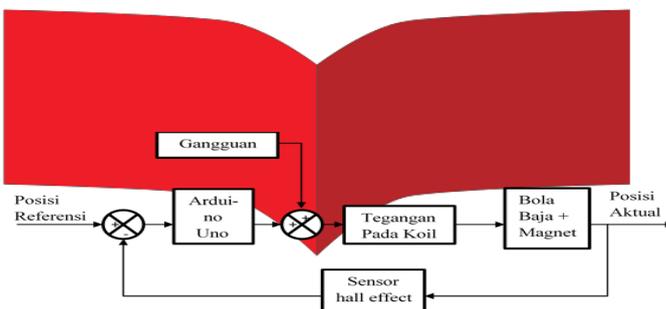
Magnetic Levitation adalah sebuah proses pengangkatan objek atau benda terhadap suatu acuan dengan menggunakan gaya tarik magnet. Gaya tarik magnet yang digunakan pada sistem *magnetic levitation* bertujuan untuk melawan gaya gravitasi yang bekerja pada objek yang akan dibuat melayang.

Untuk meneliti dan memahami lebih dalam mengenai teori *magnetic levitation* ini dibutuhkan salah satu perangkat keras *magnetic levitation ball*. Perangkat keras *magnetic levitation ball* adalah sebuah perangkat keras pengontrolan posisi tiga bola baja dengan berat berbeda menggunakan metode *magnet levitation*.

Pada tugas akhir ini penulis akan merancang sebuah perangkat keras sistem *magnetic levitation ball* menggunakan sensor infra merah untuk mengontrol posisi bola secara vertikal. Kontroler yang digunakan adalah Arduino dengan memakai PID Kontroler.

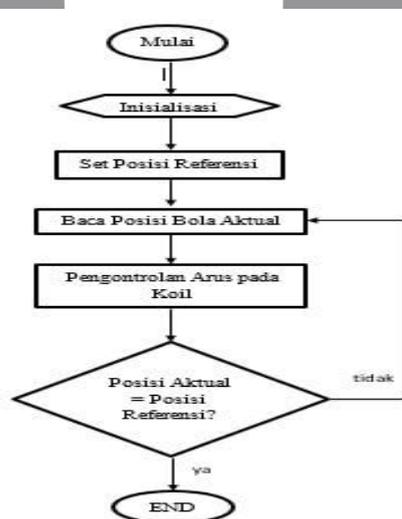
2. Dasar Teori dan Perancangan

2.1. Perancangan Sistem



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Sistem magnet levitation ball yang dirancang terdiri atas empat bagian utama, yaitu: (1) Arduino Uno sebagai kontroler sistem, (2) Solenoid (koil) yang digunakan untuk melayangkan benda baja, (3) Benda ferromagnetic dan magnet neodimium, sebagai benda yang akan dikontrol saat melayang. (4) *Hall Effect Sensor* sebagai sensor pendeteksi medan magnet.



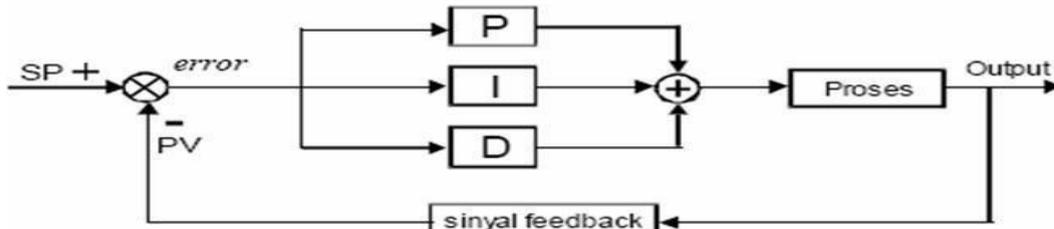
Gambar 2. Diagram Alir Sistem

Berdasarkan gambar 2 mula-mula sistem menginisialisasi apa saja parameter yang akan digunakan kemudian set nilai referensi set point berupa nilai ADC sensor, selanjutnya sensor mulai membaca adakah medan magnet terdeteksi. Jika ada Arduino akan mengirimkan nilai berupa PWM dan kemudian dikonversikan dalam tegangan dan arus yang dialirkan ke solenoid. Benda ferromagnetic mulai terangkat dan sensor mendeteksi apakah benda *ferromagnetic* sudah sesuai dengan *set point* atau belum, jika belum maka sistem akan kembali *looping* kembali.

2.2 Perancangan PID pada Sistem

Pada tugas akhir ini, Kontrol PID digunakan untuk mencapai nilai ADC sensor sesuai set point yang sudah ditentukan dengan menentukan parameter aksi kontrol PID pada sistem magnetic levitation ball. Proses ini dapat dilakukan dengan cara trial and error. Keunggulan cara ini tidak mengidentifikasi plant, tidak membuat model matematis plant, dan tidak menentukan parameter plant dengan grafis atau analitis. Cukup dengan cara coba-coba memberikan konstanta P-I-D, sehingga diperoleh hasil yang diinginkan, dengan mengacu pada karakteristik masing-masing Kontrol P-I-D.

Menggunakan kontrol P-I bertujuan untuk mengolah suatu sinyal kesalahan atau error, nilai error tersebut diolah dengan formula PID untuk dijadikan suatu sinyal kendali atau sinyal kontrol yang akan diteruskan ke aktuator. Agar lebih mudah dapat dilihat pada gambar diagram blok kontroler P-I-D dibawah ini..



Gambar 3 Diagram Blok PID Kontroler

Setelah memahami alur dari kontroler P-I-D, nilai error dapat dicari melalui penentuan set point terlebih dahulu. Nilai dari set point diatur dalam pemrograman Arduino, dan nilai set point berupa nilai ADC pembacaan hall effect sensor yaitu 400. Kondisi ideal dari bola besi terjadi saat sensor membaca medan magnet dari bola besi sama dengan set point yang sudah ditetapkan. Pada kondisi error inilah kontroler P-I-D menentukan hasil dari sinyal pengendaliannya. Berikut adalah penjelasan dari pengontrolan magnetic levitation ball menggunakan kontroler P-I-D.

Nilai konstanta perhitungan PID di tuning secara trial and error, proses ini dilakukan dengan metode mencoba-coba nilai Proporsional, Integratif, dan Derivatif pada persamaan PID hingga ditemukan hasil sistem yang stabil. Adapun cara untuk mentuning PID pada sistem magnetic levitation ball seperti berikut:

1. Langkah pertama, menggunakan kontrol Proporsional terlebih dahulu, nilai Integratif dan Derivatif diberikan nilai nol.
2. Menambah nilai konstanta proporsional maksimum hingga keadaan stabil namun bola besi masih naik turun.
3. Setelah mendapat nilai Kp yang sesuai lanjutkan dengan mengubah nilai Kd agar osilasi pada bola besi menjadi stabil.
4. Terakhir tentukan nilai Ki, setelah nilai Kp dan Kd sudah ditentukan, nilai Ki dapat ditentukan dengan cara mengubah nilai dari 0 sampai mencapai titik stabilitas, akibat dari nilai Ki yang terlalu tinggi mengakibatkan overshoot dan system akan kehilangan stabilitas.

2.3 Model Matematika Sistem

2.3.1 Model Matematik Sistem Elektrik

Dari persamaan (1) dapat diubah dalam bentuk u(t)

$$u = iR + L \frac{di}{dt} \tag{1}$$

$$L \frac{di}{dt} = u - iR \tag{2}$$

Dimana u(t), i, R, L secara berturut-turut tegangan masukan, arus pada solenoid, hambatan pada solenoid, induktansi pada solenoid.

2.3.1 Model Matematik Sistem Mekanik

Pada solenoid tersimpan energi dan dapat persamaan sebagai berikut;

$$P_e = \frac{1}{2} i^2 L \tag{3}$$

Agar bola dapat melayang nilai energy pada solenoid (P_e)= nilai energy pada sistem mekanik (P_m), dengan persamaan

$$P_e = P_m$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} i^2 L \right) = -f \frac{dx}{dt}$$

$$L i \frac{di}{dt} = -f \frac{dx}{dt} \tag{4}$$

Kemudian substitusikan persamaan (3) ke persamaan (4) maka didapatkan persamaan baru seperti berikut

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} i^2 L \right) = -f \frac{dx}{dt}$$

$$f = - \frac{d}{dx} (2 \dots i)$$

$$f_m = -\frac{1}{2} \mu_0^2 \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{x^2} \right) \quad (5)$$

Dengan nilai $\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{x^2} \right) = -\frac{2}{x^3}$, maka persamaan baru seperti berikut,

$$f_m = -\frac{1}{2} \mu_0^2 \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{x^2} \right) \quad (6)$$

Dari persamaan (3.6) k = konstanta gaya magnet ($6.53 \times 10^{-5} \text{ Nm}^2/\text{A}$), x = jarak antara solenoid dengan bola besi yang melayang. Jika f_m adalah nilai dari gaya magnet dari solenoid, f_g adalah gaya gravitasi yang dialami benda, dan f_{sp} adalah gaya yang dialami bola pada saat melayang maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut,

$$\sum F = 0$$

$$f_m + f_{sp} - f_g = 0$$

$$m \left(\frac{v^2}{r} \right) = -f_m + f_g \quad (7)$$

Dimana m = massa bola besi, v = kecepatan bola. Jika pada keadaan melayang maka nilai $f_{sp} = 0$, maka persamaan system menjadi

$$f_m = f_g \quad (8)$$

2.3.3 Model Non-Linier Sistem Magnetic Levitation Ball

Berdasarkan model matematik dari sistem mekanik dan kelistrikan, didapatkan sebuah persamaan non linier dengan bentuk differensial sebagai berikut,

$$u(t) = i + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{x^2} \right) \quad (9)$$

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) = -\frac{1}{2} \mu_0^2 \left(\frac{1}{x^2} \right) + f_g$$

2.3.4 Model Linier Sistem Magnetic Levitation Ball

Untuk merancang dan menganalisis sistem magnetic levitation ball, model matematik non linear harus diubah ke bentuk persamaan yang linear. Penentuan model linear ini harus pada kondisi kesetimbangan,

Nilai yang menyatakan sistem ini ada $f_m = f_g$ dan $x = x_0$. Pada kesetimbangan nilai $f_m = f_g$ mengakibatkan gaya yang dialami oleh bola besi saling tolak menolak dan bola besi menjadi melayang. Dengan memperhatikan arus yang mengalir pada solenoid, akibat tegangan masukan membuat bola besi pada titik kesetimbangan dimana $i = i_0 + \delta i$ dan $x = x_0 + \delta x$ maka persamaan menjadi,

$$f_m \approx f_m(x_0, i_0) + \left(\frac{\partial f_m}{\partial x} \right)_{x_0, i_0} \delta x + \left(\frac{\partial f_m}{\partial i} \right)_{x_0, i_0} \delta i \quad (11)$$

$$f_m \approx f_m - k_1 \delta x + k_2 \delta i \quad (12)$$

Berikutnya menentukan persamaan model linear sistem magnetic levitation ball sebagai berikut

$$f_m + f_{sp} + f_g = 0 \quad (13)$$

$$m \frac{d^2 \delta x}{dt^2} - k_1 \delta x + k_2 \delta i = 0 \quad (14)$$

$$\frac{d^2 \delta x}{dt^2} = \frac{k_1}{m} \delta x - \frac{k_2}{m} \delta i \quad (15)$$

Dari persamaan (3.13), (3.14) dan (3.15) dapat diubah dalam bentuk persamaan state space seperti berikut,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta x \\ \dot{\delta x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{k_1}{m} & -\frac{k_2}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \dot{\delta x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{k_2}{m} \end{bmatrix} \delta i \quad (16)$$

$$y = [0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \tag{17}$$

sehingga nilai A, B, C dan D terselesaikan,

Persamaan (16) dan (17) membentuk sebuah persamaan state space dengan model $\dot{x} = Ax + Bu$ dan $y = Cx + Du$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}; C = [0 \quad 0 \quad 1] \text{ dan } D = 0 \quad (18)$$

2.4 Robust Kontrol

K(s) adalah kontroler sistem dan G(s) adalah plant dari sistem. Matrik S dan T disebut juga dengan matriks sensitivitas dan matriks sensitivitas pelengkap dimana

$$S(s) = (1 - G(s)K(s))^{-1} \quad (19)$$

$$T(s) = 1 - S(s) \quad (20)$$

Sensitivitas matriks S ditentukan oleh keadaan umpan balik sistem yang steady state. Dengan menentukan batas atas nilai S(s), redaman gangguan dan spesifikasi steady-state dapat diatasi dengan cara sebagai berikut:

$$|\sigma(S(j\omega))| \leq |W1^{-1}(j\omega)|, \quad \forall \omega \quad (21)$$

Dimana $\sigma(S(j\omega))$ adalah nilai maksimum singular dari S(s) dan W1 adalah batas yang mencerminkan redaman gangguan yang diinginkan pada setiap frekuensi ω . Penolakan gangguan yang baik didapatkan dari daerah khusus frekuensi rendah dimana gangguan yang signifikan.

Jika fungsi transfer dari masukan r ke kontroler K(s) didapatkan $R(s) = K(s)S(s)$. Oleh karena itu batas pada kontroler u adalah W2 dengan persamaan sebagai berikut:

$$|\sigma(K(j\omega)S(j\omega))| \leq |W2^{-1}(j\omega)|, \quad \forall \omega \quad (22)$$

Batas atas pada $\|T(j\omega)\|_\infty$ dapat ditentukan sebagai berikut:

$$|\sigma(T(j\omega))| \leq |W3^{-1}(j\omega)|, \quad \forall \omega \quad (23)$$

Fungsi dari W3 digunakan untuk memastikan ketahanan yang baik dan penolakan gangguan, terutama pada daerah frekuensi tinggi sering terjadi gangguan dan kesalahan yang signifikan. Kemudian untuk menentukan performansi robust dimana nilai tersebut akan memberikan fungsi yang stabil secara internal melalui persamaan,

$$\sigma(W1 S) + \sigma(W3 T) < 1 \quad (24)$$

3. Hasil Pengujian dan Analisis

3.1 Pengujian PID pada Sistem Magnet Levitation Dengan Massa 15 gram, 22 gram dan 30 gram

Pada Tabel 1 nilai parameter Kp dan Kd tetap secara berturut-turut 9000 dan 1000, sedangkan nilai parameter Ki diubah dengan nilai 0.01 0.005 dan 0.0001. Sesuai data yang diperoleh pada Tabel 4.4 nilai Ki yang paling bagus bernilai 0.0001 dengan kondisi pada massa benda 15 gr benda melayang dengan stabil waktu pelayangan 17 menit 55 detik, benda bermassa 22 gr melayang stabil dengan waktu pelayangan 18 menit 12 detik dan benda bermassa 30 gr melayang stabil dengan waktu pelayangan 17 menit 43 detik.

Tabel 1. Pengujian Pengaruh Nilai Kp, Ki dan Kd

Kp	Ki	Kd	Massa 15 gr	Massa 22 gr	Massa 30 gr
9000	100	0.01	Melayang tapi tidak stabil dan kemudian jatuh dengan waktu pelayangan 4 menit 31 detik	Melayang tapi tidak stabil dan kemudian menempel pada koil dengan waktu pelayangan 3 menit 6 detik	Melayang stabil dengan waktu pelayangan 7 menit 36 detik
9000	500	0.005	Melayang tapi tidak stabil, kemudian menempel pada solenoid dengan waktu pelayangan 4 menit 10 detik	Melayang stabil dengan waktu pelayangan 11 menit 17 detik	Melayang tapi tidak stabil dengan waktu pelayangan 5 menit 52 detik
9000	1000	0.0001	Melayang stabil dengan waktu pelayangan 17 menit 55 detik	Melayang stabil dengan waktu pelayangan 18 menit 12 detik	Melayang stabil dengan waktu pelayangan 17 menit 43 detik

3.2 Pengujian Tegangan Solenoid Saat Melayangkan Benda 15 gram, 22 gram dan 30 gram



Gambar 4 Grafik Data Tegangan Solenoid Saat (a) beban 15 gram, (b) beban 22 gram dan (c) beban 30 gram

Pada hasil percobaan menggunakan tegangan 5.8 volt pada benda bermassa 15 gr, 22 gr dan 30 gr didapatkan nilai ADC sensor saat melayang secara berturut-turut yaitu sebesar 392 sampai 393, 362 sampai (c) an 334 sampai 335, nilai perubahan sensor mempengaruhi nilai tegangan pada saat pelayangan benda. Pada Gambar 4 (a), (b) dan (c) nilai tegangan yang dihasilkan secara berturut-turut sebesar 3.38, 3.83 dan 4.31 volt. Perubahan nilai tegangan juga sebanding dengan perubahan nilai arus (mA). Semakin dekat kecil pembacaan ADC pada sensor maka semakin kecil nilai tegangan dan arus yang mengalir pada solenoid.

3.3 Robust Analysis

Pada robust analisis akan diambil parameter sebagai berikut

Tabel 3. Parameter Pengujian Robust

Massa (m)	15 gr, 22gr,30gr
Resistansi solenoid (r)	25 Ω
Induktansi Solenoid (l)	44.4 Henry
Koefisien magnetic (k)	6.53 x 10 ⁻⁵ N m ² /A
Arus Saat pelayangan (i ₀)	0.1364 A,0.1532 A,0.1724A
Jarak saat pelayangan (x ₀)	0.012 m

Dari persamaan (18) dari data tersebut didapatkan nilai G (gain open loop) dnegan mengambil salah satu parameter yaitu 22 gr massa dan dengan arus 0.1532 A maka G yang didapatkan

$$G = \frac{-0.07112}{0.1532 + 0.5631 - 40.31 - 22.7}$$

Dengan persamaan (19) dan (20) didapat kan lah nilai S dan T sebelum menggunakan H_∞ untuk nilai S dan T, sehingga didapatkan,

$$S = \frac{0.5631 - 40.31 - 22.7}{0.5631 - 40.31 - 22.77}$$

$$T = \frac{-0.07112}{0.5631 - 40.31 - 22.77}$$

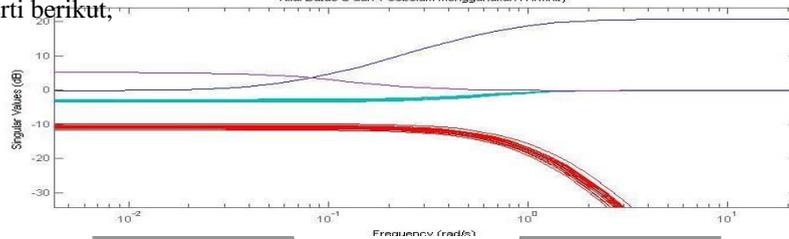
Untuk emapatkan nilai weighting function maka dilakukan tuning secara berkelanjutan dan didapatkan klah hasil weighting function seperti berikut

$$W = \frac{0.09 + 0.2229}{1 + 0.2229}$$

$$W = 10^{-11}$$

$$W = \frac{2.01 + 1.007}{1 + 2.013}$$

Maka menurut persamaan $L=G$, $S=1/(1+L)$ dan $T=1-S$ batas weighting function untuk kondisi sebelum pemberian H_∞ seperti berikut,



Gambar 5. Grafik Batas Nilai S dan T sebelum Menggunakan H_∞

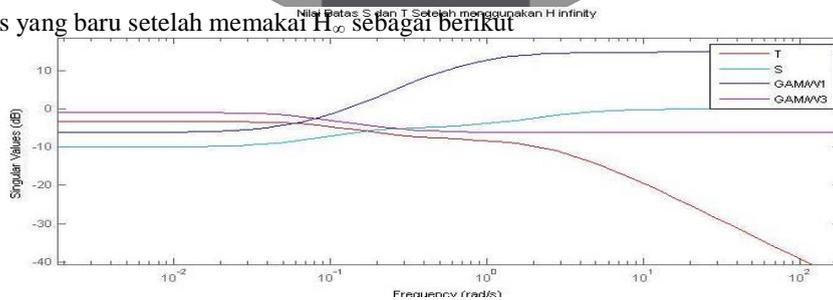
Untuk mencari nilai S, T dan Performansi sistem maka digunakan fungsi “mixsyn” pada software MATLAB seperti berikut,

$$[K,CL,GAM]=mixsyn(G,W1,W2,W3);$$

K adalah kontroler, CL adalah close loop sistem dan GAM harus dibawah 0.5 agar sistem stabil internal terhadap closed loop sistem. nilai GAM yang didapat 0.4962 dan fungsi K yang didapat sebagai berikut,

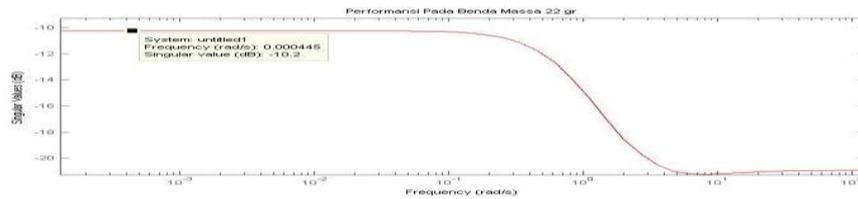
$$K = \frac{2.033 \times 10^{11} s^4 + 2.119 \times 10^{12} s^3 + 6.27 \times 10^{12} s^2 + 6.781 \times 10^{12} s + 2.188 \times 10^{12}}{s^4 + 4856 s^3 + 1.179 \times 10^7 s^2 + 1.431 \times 10^{10} s + 1.674 \times 10^{10} + 3.017 \times 10^9}$$

Maka grafik batas yang baru setelah memakai H_∞ sebagai berikut



Gambar 6. Grafik Batas S dan T setelah Menggunakan H_∞

Untuk menentukan performansi dari sistem menggunakan persamaan (24) dengan nilai kurang dari 1 artinya nilai singular dari sistem harus dibawah 0 dB, grafik performansi dari sistem sebagai berikut



Gambar 7. Grafik Performansi Sistem

Gambar tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki performansi yang bagus karena nilai tertinggi kurang dari 0 dB

4. Kesimpulan

1. Perubahan massa benda yang dilaungkan akan mempengaruhi besar tegangan dan arus yang mengalir pada solenoid, semakin besar massa benda semakin besar pula arus dan tegangan yang mengalir pada solenoid.
2. Metode PID berhasil diimplementasikan.
3. Tegangan sumber yang dialirkan pada sistem mempengaruhi kestabilan sistem. Jika tegangan yang dialirkan pada sistem bukan tegangan kerja (tegangan yang linier) maka sistem menjadi tidak stabil.
4. Pemilihan nilai weighting function yang tepat akan membuat performansi sistem magnetic levitation ball lebih bagus
5. Sistem Stabil pada setiap lup tertutup pada sistem magnet levitation.

Daftar Pustaka :

- [1] Magnetic Field. (n.d.). Retrieved Agustus 8, 2015, from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magfie.html#c>
- [2] Rahmat Purbaningrat. Perancangan dan Pembuatan Perangkat Keras Steel Ball Magnetic Levitation, Institut Teknologi Bandung, 2008.
- [3] Wibowo, B. D., & Sutomo, S. (2011). PEMODELAN DAN SIMULASI SISTEM CONTROL MAGNETIC LEVITATION BALL. ROTASI- Vol. 13, No. 2 , 1.
- [4] Hron, T. (n.d.). Model Of The Electromagnetic Levitation Device. 1-2.
- [5] Williams, M. (2011, Februari 16). Magnetic Levitation. Retrieved Agustus 9, 2015, from Universe Today: <http://www.universetoday.com/84145/magnetic-levitation/>
- [6] (n.d.). Retrieved Agustus 10, 2015, from Magnet: <http://ismush.com/magnet.html>
- [7] Darmawan, D. (2010). Bertanya Fisika Seri Listrik Magnet. In D. Darmawan, Bertanya Fisika Seri Listrik Magnet (p. 219-222).
- [8] Linier Solenoid Actuator. (n.d.). Retrieved Agustus 19, 2015, from http://www.electronicstutorials.ws/io/io_6.htm
- [9] Rumus Hitung. (2014, Januari 24). Retrieved Agustus 20, 2015, from <http://rumushitung.com/2015/01/24/medan-elektromagnet/>
- [10] Zhou, K., & Doyle, J. C. (1998). Essential Of Robust Control. In K. Zhou, & J. C. Doyle, Essential Of Robust Control (pp. 129-147). New Jersey: Tom Robbins.
- [11] Borsuk, R. (2014). Magnetic Levitation : Reid Borsuk. Retrieved from Reid Borsuk Website: <http://www.reidb.net>
- [12] CHOUDHARY, S. K. (2014). RobustFeedbackControlAnalysisofMagneticLevitationSystem. 285-291.
- [13] Hypiúsová, M., & Osuský, J. (2013). PID CONTROLLER DESIGN FOR MAGNETIC LEVITATION MODEL. 1-7.