

Pengendalian Posisi Sistem Magnetic Levitation Ball Menggunakan MRAC-PID

Dian Mursyitah¹, Ahmad Faizal², Rechy Vernandhez³, Parmo⁴

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN SUSKA RIAU^{1,2,3}
Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Ampel Surabaya⁴
Jl. HR. Soebrantas Km. 155 Pekanbaru - Riau
e-mail: dmursyitah@uin-suska.ac.id¹

Abstrak

Magnetic Levitation Ball memiliki prinsip kerja melayangkan bola baja dengan memanfaatkan medan elektromagnetik. Magnetic Levitation Ball merupakan sistem non linear yang sulit dikendalikan terutama saat diberi gangguan. Metode kendali Model Reference Adaptive Controller (MRAC) dipilih sebagai solusi karena kemampuannya yang baik dalam mengatasi gangguan. Prinsip kerjanya adalah mampu membuat respon keluaran sistem, mengikuti respon keluaran model referensi yang telah dirancang sebaik mungkin. Namun terdapat kelemahan pada respon waktu dan tidak mampu meredam osilasi, sehingga ditambahkan pengendali PID untuk mengatasi kelemahan MRAC tersebut. Hasil respon MRAC-PID tanpa gangguan memberikan respon yang bagus dengan, rise time pada 0.0196 detik, error = 0.0155, overshoot = 0.09 %. MRAC-PID juga memperlihatkan respon yang bagus saat diberi gangguan sinyal kendali dan sinyal masukan, dengan overshoot = 0.5 % dan error IAE = 0.01555

Kata Kunci: *Magnetic Levitation Ball, MRAC, MIT Rule PID.*

Abstract

Magnetic Levitation Ball has the working principle of casting steel balls using electromagnetic fields. Magnetic Levitation Ball is a non linear system that is difficult to control, especially when given disturbance. The working principle is to be able to make the system output response, following the reference model output response that has been designed as well as possible. However, there is a weakness in the response time and is unable to reduce oscillations, so that a PID controller is added to overcome the weaknesses of the MRAC. MRAC-PID response results without interruption provide a good response with, rise time at 0.0196 seconds, error = 0.0155, overshoot = 0.09%. MRAC-PID also shows a good response when given interference control signals and input signals, with overshoot = 0.5% and IAE error = 0.01555

Keyword : *Magnetic Levitation Ball, MRAC, MIT Rule PID.*

1. Pendahuluan

Magnetic Levitation Ball merupakan 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. 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 [1]. Masalah utamanya adalah Magnetic Levitation Ball adalah sistem yang non linear, sehingga menimbulkan fenomena respon yang tidak stabil. Posisi objek yang dilayangkan juga rentan terhadap gangguan, sehingga dibutuhkan pengendalian agar posisi objek tetap stabil dan mampu beradaptasi dari gangguan.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengendalikan posisi objek pada Magnetic Levitation Ball ini antara lain ; penelitian yang berjudul " Pemodelan dan Simulasi Sistem Control Magnetic Levitation Ball ". Pada penelitian ini dilakukan pengendalian posisi bola baja dari solenoid menggunakan pengendali Proportional Integral Derivative (PID) pada posisi bola 0.0032 m. Hasil penelitian menunjukkan kestabilan respon sistem pada pemberian Kp sebesar 1.5×10^{10} , Kd sebesar 495, dan Ki sebesar 9×10^7 . Kestabilan sistem dicapai pada waktu 3.5 detik. Namun adanya gangguan pada sistem menyebabkan respon kembali tidak stabil sehingga PID harus di tuning ulang [2].

Penelitian berikutnya berjudul "Pengendalian Posisi Sistem Magnetic Levitation Ball Menggunakan PID Gain Scheduling". Pada penelitian ini dilakukan pengendalian menggunakan PID Gain Scheduling pada posisi 0.01m, 0.0125m dan 0.015m. Hasil penelitian masih menunjukkan adanya kekurangan yaitu respon yang lambat, karena rise time yang didapat

adalah 4 detik dari 10 detik waktu simulasi. Penyebabnya adalah perubahan pada posisi pelayangan mempengaruhi nilai K_p , K_i dan K_d dari PID yang sudah dijadwalkan menggunakan gain scheduling, sehingga perlu di tuning ulang [3][4]

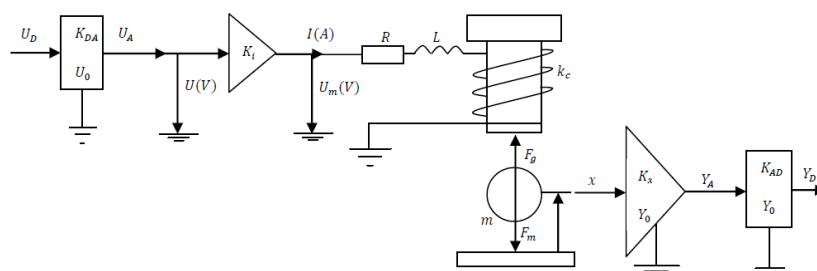
Beberapa penelitian menunjukkan respon yang kurang baik dengan error yang relative besar terutama saat diberi gangguan. Pengendali yang dibutuhkan adalah pengendali yang mampu beradaptasi terhadap gangguan. Penulis memilih Model Reference Adaptive Control (MRAC), karena prinsip kerjanya yang mampu membuat performansi keluaran sistem mengikuti performansi keluaran model referensi yang sudah ditetapkan. Pada MRAC, respon sistem dapat dibuat sebgus mungkin untuk dijadikan model referensi yang nantinya akan di ikuti oleh plant, MRAC juga dapat beradaptasi terhadap perubahan parameter yang dapat mengganggu keluaran, sehingga cukup baik untuk mengatasi gangguan. Untuk merancang pengendali MRAC, ada dua metode yang digunakan yaitu metode MIT Rule dan metode kestabilan lyapunov. Metode MIT Rule dipilih karena memiliki turunan matematis yang lebih sederhana dibandingkan metode kestabilan lyapunov.[7][8][9][10].

Setelah pengujian secara simulasi, pengendali MRAC ternyata memiliki kelemahan pada respon yang lambat, error yang besar, dan berosilasi. Hal ini besar kemungkinan disebabkan oleh sifat non linieritas sistem maglev ball. Untuk itu, pengendali MRAC akan dikombinasikan dengan PID. Diharapkan dengan adanya Proportional (P) respon sistem menjadi cepat, Integral (I) mengurangi error, dan Derivative (D) mengurangi overshoot dari respon keluaran plant, agar dapat mencapai respon kestabilan yang diinginkan.

2. Metode Penelitian

Metode Penelitian dimulai dengan studi literatur, validasi model matematis sistem maglev ball, kemudian dilanjutkan dengan perancangan pengendali MRAC, perancangan pengendali PID dan kombinasi kedua pengendali. Langkah selanjutnya adalah mensimulasikan model matematis sistem bersama hasil rancangan pengendali dan diberi gangguan, dan langkah terakhir adalah hasil pembahasan dan penarikan kesimpulan. Pengujian model matematis sistem maglev ball[1][2][5] Gambar 1 memperlihatkan model dan struktur pelayangan magnet pada bola baja (magnetic levitation ball). Adapun komponen dan struktur Magnetic Levitation Ball ini terdiri dari:

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. Dan bola baja yang berfungsi sebagai benda yang akan dilayangkan.
4. Sensor Posisi berfungsi untuk menentukan jarak benda dengan elektromagnet.
5. Analog to Digital Converter (ADC) berfungsi untuk mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital



Gambar 1. Sistem maglev ball[1][2][5]

Model Matematis Sistem Magnetic Levitation Ball diperoleh dengan cara menurunkan persamaan matematis masing-masing komponen sistem. Model matematis sistem ini perlu divalidasi agar pengendali dapat dirancang sesuai dengan model matematis yang telah divalidasi. Validasi model matematis dilakukan dengan cara menguji kembali model matematis yang telah diturunkan oleh peneliti sebelumnya. Jika hasil yang diperoleh sama maka dapat

dinyatakan model matematis telah valid, sehingga dapat dilanjutkan pada perancangan pengendali dengan metode yang berbeda. Berdasarkan hasil penurunan model matematis diperoleh bentuk state space equation sebagai berikut[1][2][5]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{2k_F u_{ss}^2}{m(x_{1ss} - x_{L0})^3} & -\frac{k_{fv}}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2k_F K_{DA} u_{ss}}{m(x_{1ss} - x_{L0})^2} \end{bmatrix} U_D$$

$$y = \begin{bmatrix} k_x * K_{AD} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$U_{ss} = \sqrt{\frac{mg}{k_F}} (x_{1ss} - x_{L0})$$

Dengan mensubstitusikan nilai model state space menjadi :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{2g}{m(x_{L0} - x_{1ss})^3} & -\frac{k_{fv}}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2\sqrt{\frac{k_F g}{m}} \frac{K_{DA}}{(x_{L0} - x_{1ss})} \end{bmatrix} U_D$$

$$y = \begin{bmatrix} k_x * K_{AD} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Tabel1 Nilai-nilai parameter dari magnetic ball levitation [1][2][5]

Parameter	Symbol	Nilai
Ball diameter	Dk	12.7e-3m
Ball mass	M	0.0084kg
Jarak dari dasar	Td	0.0019 m
Batas jarak = 0.0019 -Dk	L	0.0063 m
Viscose friction	Kfv	0.02 N.s/m
Gravity Acceleration constant	G	9.81m/s ²
Aggregated coil constant	kF	0.606x10 ⁻⁶ N/V
Converter gain	KDA	10
Coil bias	xL0	8.26x10 ⁻³ m
Position sensor constant	Kx	797.4603
Analog to digital converter gain	KAD	0.2
Maximum DA converter output voltage	UDam	5 V
Coil resistance	Rc	3.5 Ω
Coil inductance	Lc	30x10 ⁻³ H
Current sensor gain	Ks	13.33
Power amplifier gain	Kam	100

Setelah mensubstitusikan nilai-nilai parameter dari magnetic ball levitation dari Tabel1, state space (2) menjadi :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{19.62}{(0.00826 - x_{1ss})} & -2.381 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{0.53206}{(0.00826 - x_{1ss})} \end{bmatrix} U_D$$

$$y = \begin{bmatrix} 159.49206 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Kemudian diubah dalam bentuk transfer function sebagai berikut :

$$TF = \frac{16606.313}{s^2 + 2.381s + 12766.783} \quad (4)$$

Perancangan Pengendali MRAC[7][8][9]

Perancangan MRAC dimulai dengan mendapatkan turunan sensitivitas (θ), untuk mendapatkan turunan tersebut dapat dilakukn penurunan matematis berdasarkan formulasi MIT Rule seperti yang ditunjukkan pada persamaan (5).

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (5)$$

Kemudian di asumsikan bahwa pengendali memiliki umpan balik adaptif (θ_1) dan umpan balik adaptif (θ_2). Selanjutnya adalah menurunkan umpan balik adaptif (θ_1) dan umpan balik adaptif (θ_2) untuk mendapatkan sistem (y_{plant}). Namun, input u dapat ditulis ulang menggunakan kedua umpan balik, umpan balik ini bisa digunakan untuk mendapatkan persamaan (y_{plant}) [7][8][9].

$$u = \theta_1 u_c - \theta_2 y_{plant} \quad (6)$$

$$e = y_{plant} - y_{model} = G_p u - G_m u_c \quad (7)$$

$$y_{plant} = G_p u = \left(\frac{16606.653}{s^2 + 2.381s + 12767.123} \right) (\theta_1 u_c - \theta_2 y_{plant}) \quad (8)$$

$$y_{plant} = \left(\frac{16606.653\theta_1}{s^2 + 2.381s + 12767.123 + 16606.653\theta_2} \right) u_c \quad (9)$$

Selanjutnya adalah mencari nilai error dengan mengambil turunan parsial error dengan nilai (θ_1) dan (θ_2). Nilai u_c tidak termasuk parameter, oleh karena itu tidak penting saat mengevaluasi turunannya.

$$e = \left(\frac{16606.653\theta_1}{s^2 + 2.381s + 12767.123 + 16606.653\theta_2} \right) u_c - G_m u_c \quad (10)$$

$$\frac{\delta e}{\delta \theta_1} = \left(\frac{16606.653}{s^2 + 2.381s + 12767.123 + 16606.653\theta_2} \right) u_c \quad (11)$$

$$\frac{\delta e}{\delta \theta_2} = - \frac{16606.653^2 \theta_1}{(s^2 + 2.381s + 12767.123 + 16606.653\theta_2)^2} u_c \quad (12)$$

$$= - \frac{16606.653\theta_1}{s^2 + 2.381s + 12767.123 + 16606.653\theta_2} y_{plant} \quad (13)$$

Turunan sensitivitas yang diperoleh mengandung parameter dari plant. Jika modelnya mendekati plant aktual, karakteristik model dapat disesuaikan dengan karakteristik plant, sehingga memberikan turunan sensitivitas sebagai berikut:

$$s^2 + 2.381s + 12767.123 + 16606.653\theta_2 \approx s^2 + a_{1m}s + a_{0m}$$

Mengambil turunan dari umpan balik MRAC, maka didapatkan :

$$\frac{\delta e}{\delta \theta_1} = \frac{a_{1m}s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m}s + a_{0m}} u_c \quad (14)$$

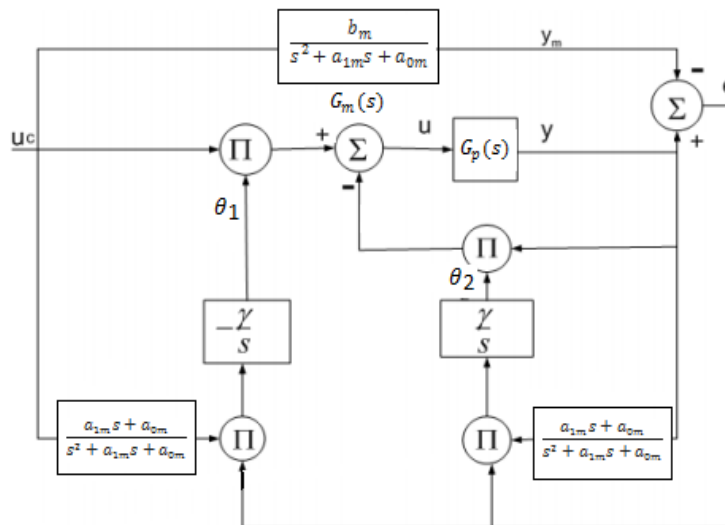
$$\frac{\delta e}{\delta \theta_2} = -\frac{a_{1m}s+a_{0m}}{s^2+a_{1m}s+a_{0m}} y_{plant} \quad (15)$$

Selanjutnya adalah menerapkan MIT Rule, aturan update parameter untuk masing-masing θ yang diturunkan. Sehingga untuk membentuk filter, nilai error dan γ menjadi :

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma \frac{\delta e}{\delta \theta_1} e = -\gamma \left(\frac{a_{1m}s+a_{0m}}{s^2+a_{1m}s+a_{0m}} u_c \right) e \quad (16)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma \frac{\delta e}{\delta \theta_2} e = \gamma \left(\frac{a_{1m}s+a_{0m}}{s^2+a_{1m}s+a_{0m}} y_{plant} \right) e \quad (17)$$

Persamaan yang telah diturunkan kemudian dibuat dalam bentuk skema standar dari pengendali MRAC yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema MRAC dengan Metode MIT Rule [7][8][9]

Model referensi diperoleh dengan mengikuti persamaan karakteristik orde dua karena sistem termasuk sistem berorde dua :

$$G_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (18)$$

Perancangan model referensi adalah dengan $\zeta = 1$, dan $t_s = 0.02$, didapatkan $\omega_n = 200$ yang didasarkan pada kriteria 2% untuk nilai settling time, maka fungsi alih model referensinya menjadi :

$$G_m(s) = \frac{40000}{s^2 + 400s + 40000} \quad (19)$$

Dengan nilai fungsi alih model referensi berdasarkan skema MRAC pada Gbr.7 adalah $b_m/(s^2 + a_{1m}s + a_{0m})$, setelah di substitusikan ke persamaan (25) maka nilai b_m akan sama dengan nilai a_{0m} . Selanjutnya adalah nilai filter θ_1 dan θ_2 dibuat menyerupai fungsi alih model referensi, karena filter harus menyaring keluaran y_{plant} agar mengikuti keluaran model referensi, sehingga nilai filter yang diberikan menjadi :

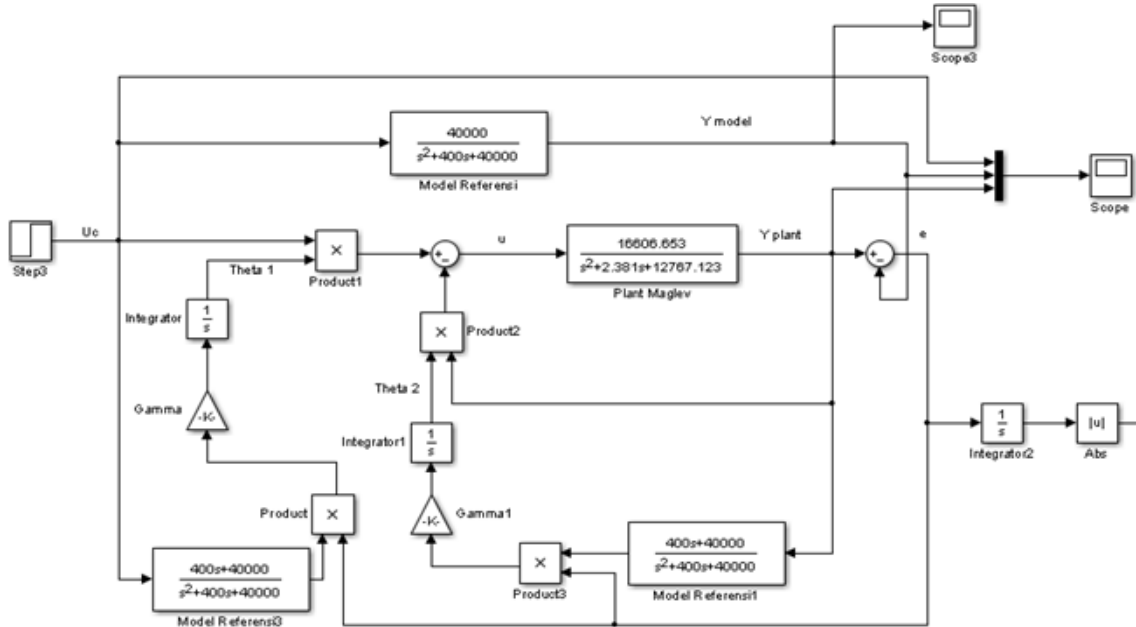
$$\frac{a_{1m}s+a_{0m}}{s^2+a_{1m}s+a_{0m}} = \frac{400s+40000}{s^2+400s+40000} \quad (20)$$

Perancangan Pengendali MRAC-PID

Berikut persamaan umum pengendali PID yang ingin dirancang :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) + K_d \frac{de}{dt} \quad (21)$$

Dengan persamaan PID di atas, maka disubstitusikan ke dalam Simulink dengan mengambil umpan balik keluaran plant MRAC, sehingga blok Simulink menjadi :

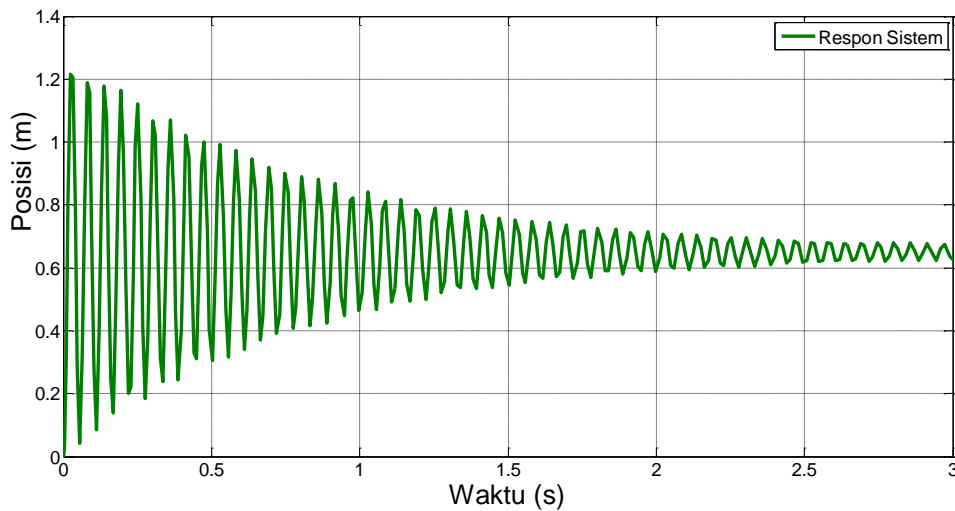


Gambar 3. Blok Simulink Pengendali MRAC-PID pada Magnetic Levitation Ball

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Simulasi Sistem Maglev Ball Secara Open Loop

Hasil simulasi sistem maglev ball secara open loop sesuai dengan model matematis sistem yang ditunjukkan pada persamaan (4), hasil respon sistem ditunjukkan pada Gambar 4).

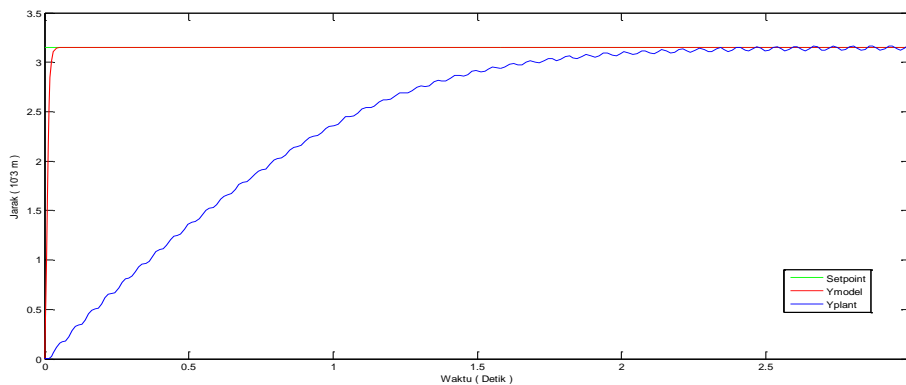


Gambar 4. Hasil Respon Sistem Maglev Ball Secara Open Loop

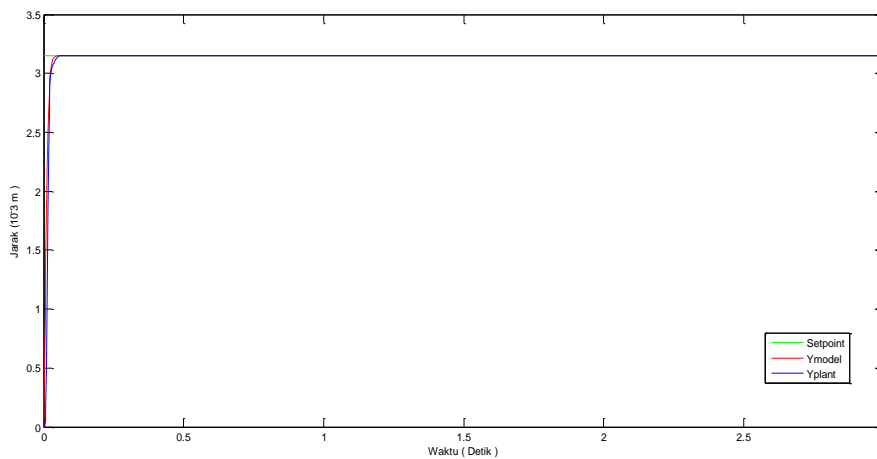
Gambar 4 menunjukkan sistem yang tidak stabil karena banyaknya terdapat osilasi, dan keluaran sistem tidak mampu mengikuti setpoint yaitu sebesar 0,5.

3.2 Hasil Simulasi Sistem Maglev Ball dengan Pengendali MRAC dan MRAC-PID

Program simulasi pengendali MRAC yang diterapkan pada sistem Maglev Ball ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Program Simulasi Pengendali MRAC pada Sistem Maglev



Gambar 6. Hasil Respon Sistem Maglev Ball Menggunakan Pengendali MRAC-PID

3.3. Hasil analisa respon ditunjukkan pada Tabel 2.

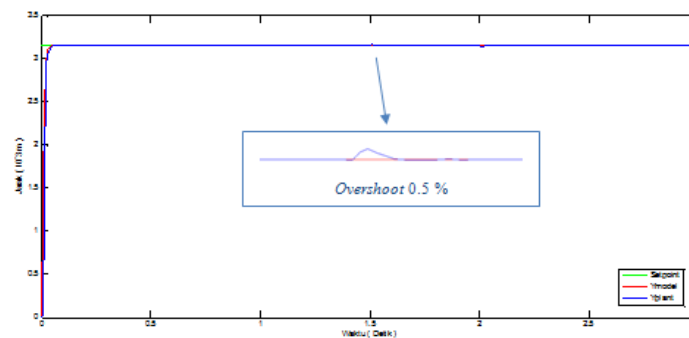
Tabel 2. Analisa Respon Sistem Maglev Ball Menggunakan Pengendali MRAC

Parameter	MRAC	MRAC-PID
Time Constant(τ)	0.7943 Detik	0.0150 Detik
Rise time (5%-95%)	1.6635 Detik	0.0196 Detik
Settling Time (+3%)	2.6382 Detik	0.0849 Detik
Delay Time (+3%)	0.5969 Detik	0.0150 Detik
IAE	2.153	0.0155
Maximum Overshoot	Osilasi	0.09 %
Peak Time	Osilasi	0.065 Detik

Berdasarkan perbandingan MRAC dan MRAC-PID pada Tabel.2, Nilai PID diperoleh dengan menggunakan metode heuristic dengan melihat error minimum dan hasil respon yang paling baik. Metode heuristic yang dilakukan mendapatkan $K_p = 2$, $K_i = 11$, dan $K_d = 0.0125$. Tabel 2 menunjukkan bahwa keluaran pengendali MRAC-PID memiliki performansi yang baik dibandingkan dengan pengendali MRAC. Penambahan pengendali PID mampu membuat Rise Time lebih cepat, error dan overshoot menjadi lebih kecil.

3.4 Hasil Simulasi Sistem Maglev Ball dengan Pengendali MRAC-PID dengan Gangguan

Hasil pengujian sistem maglev ball dan pengendali MRAC-PID dengan gangguan ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil Respon Sistem Maglev Ball dengan Gangguan

Berdasarkan pengujian dan analisa dari grafik respon yang dihasilkan, didapatkan overshoot sebesar 0.5% saat diberikan gangguan di detik 1.5 hingga detik ke 2 sebesar 10% dari set point. Walaupun masih terdapat error sebesar 0.01555, namun angka tersebut masih dapat diterima.

4 Kesimpulan

Efek penambahan PID pada MRAC adalah meredam osilasi, memperbaiki rise time yang menjadi lebih cepat, dan meminimalisir error. MRAC-PID juga berhasil mempertahankan respon saat diberi gangguan sinyal kendali dan sinyal masukan, dimana keluaran plant mampu mengikuti model referensinya walaupun ada overshoot sebesar 0.5 % dan error IAE sebesar 0.01555 saat diberi gangguan 10 % dari setpoint.

5 Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada mahasiswa : Rechy Vernandhez yang telah membantu melaksanakan penelitian ini

Daftar Pustaka

- [1] Williams, Lance. "Electromagnetic Levitation Thesis". 2005.
- [2] Wibowo, DwiBasuki. " Pemodelandan Simulasi Sistem Control Magnetic Lavitation Ball". Universitas Diponegoro, 2012.
- [3] Kurniawan, RahmatAndi. "Pengendalian Posisi Sistem Magnetic Lavitation Ball Menggunakan PID Gain Schedulling". JurusanTeknikElektro, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2016.
- [4] Fadlun, Wira. "Penerapan Metode Kendali Nonlinear Berbasis Sistem Servo pada Sistem Magnetic Levitation Ball". UniversitasTeknologi Yogyakarta. 2017.
- [5] Khaled, A. M. Ali. "Modeling and Parameters Identification of A Magnetic Levitation Model". The Islamic University of Gaza, 2009.
- [6] M.S.Abu. Nasr. "Fuzzy Gain Scheduling Control For Non-Linear Systems".The Islamic University of Gaza, 2013.
- [7] K. J. Astrom and B. Wittenmark. "Adaptive control". 2nd ed.. Dover Publications. New York. 2001.
- [8] Garikayi, T. " Model Reference Adaptive Control System for Moistre Regulation in Cotton Ginning " .Harare Institue of Technologi. Zimbabwe. 2013.
- [9] Sevcik, Keith. "Model Reference Adaptive Control". Drexel University. Philadelphia. 2014.
- [10] Application of MRAC techniques to the PID Controller for nonlinear Magnetic Levitation system using Kalman filter by Abhineshkumarkarosiya, ShailjaShukla, Control Theory and Informatics , Vol 2, No.3, 2012