



Implementasi Kendali Tuning *Proportional Integral Derivative* (PID) Pada *Magnetic Levitation Ball Hybrid Fuzzy-Takagi Sugeno*

Andhika Giyantara^{1*}, Dikanuari Erdi Astama², Himawan Wicaksono³

^{1*}Departement of Technology Industrial and Process, Electrical Engineering, Kalimantan Institute of Technology, Balikpapan. Corresponding email: dhika@lecturer.itk.ac.id

²Departement of Technology Industrial and Process, Electrical Engineering, Kalimantan Institute of Technology, Balikpapan. Email: dikanuariardi@gmail.com

²Departement of Technology Industrial and Process, Electrical Engineering, Kalimantan Institute of Technology, Balikpapan. Email: himawan@lecturer.itk.ac.id

Abstract

The application of magnetic levitation that is currently developing is on land transportation in the form of maglev trains. Magnetic levitation is a system that uses an electromagnetic field to work against the force of gravity. The common point in application the magnetic levitation is used is the lack of contact and thus no friction this increases efficiency and system life. Magnetic levitation technology is still developing today. The magnetic levitation ball requires a good control method to maintain the ball's position on the mat against the earth's surface. This research implements Hybrid Proportional Integral Derivative (PID) control with fuzzy as a control system on magnetic levitation ball. The research for magnetic levitation ball uses Auto Tuning PID and Fuzzy–Takagi Sugeno controls. In the PID system, an auto-tuning system is carried out on simulink MATLAB R2019, and in fuzzy the function is designed to store input in the form of error (e) and delta error (de) while the function displays output in the form of effective height distance. Then defuzzification on fuzzy uses the Center of Area (COA) method. In magnetic levitation research, objects can experience ideal service conditions at a distance of 0.006 m from the end of the solenoid. in the transfer function test to reach a steady state, the risetime is 0.007817 s, the overshoot is 157.051%. then the PID tuning test to reach a steady state obtained a risetime of 0.214371 s, an overshoot of 0.460%. and in the fuzzy-PID hybrid test to reach steady state, the risetime is 0.044902 s and the overshoot is -0.357%.

Keywords: Fuzzy-takagi sugeno, Magnetic levitation, Proportional Integral Derivative (PID)

Abstrak

Penerapan magnetic levitation yang saat ini berkembang yaitu pada transportasi darat berupa kereta maglev. Magnetic levitation ialah adalah sistem yang menggunakan medan elektromagnet untuk bekerja melawan gaya gravitasi. Titik umum dalam semua aplikasi mengapa magnetic levitation digunakan berupa kurangnya kontak dan dengan demikian tidak ada gesekan ini meningkatkan efesiensi dan umur sistem. Teknologi magnetic levitation masih berkembang hingga saat ini. Pada magnetic levitation ball dibutuhkan metode kendali yang baik untuk mempertahankan posisi bola dalam keadaan melayang terhadap permukaan bumi. Penelitian ini mengimplementasi kendali Hybrid Proportional Integral Derivative (PID) dengan fuzzy selaku sistem kendali pada magnetic levitation ball. Penyusunan penelitian magnetic levitation ball memakai kendali Auto Tuning Proportional Integral Derivative (PID) dan Fuzzy–Takagi sugeno. Pada sistem Proportional Integral Derivative (PID) dilakukan sistem auto tuning pada simulink MATLAB R2019, dan pada fuzzy didesain fungsi keanggotaan masukan berupa error(e) dan delta error(de) sedangkan fungsi keanggotaan keluaran berupa jarak ketinggian efektif. Lalu defuzzifikasi pada fuzzy digunakan metode Center of Area (COA). Dalam penelitian magnetic levitation, obyek dapat mengalami kondisi pelayangan ideal pada jarak 0.006 m dari ujung solenoid. pada pengujian transfer function untuk mencapai steady state didapatkan risetime 0.007817 s, overshoot 157.051%. lalu pengujian tuning PID untuk mencapai steady state didapatkan risetime 0.214371 s, overshoot 0.460%. dan

pada pengujian hybrid fuzzy-PID untuk mencapai steady state didapatkan risetime 0.044902 s dan overshoot - 0.357 %.

Kata Kunci: Fuzzy-takagi sugeno, Magnetic levitation, Proportional Integral Derivative (PID)

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi terutama pada sistem kendali semakin berkembang seiring kemajuan dari ilmu pengetahuan maupun teknologi. Salah satu teknologi yang sedang berkembang ialah *magnetic levitation*. Untuk contoh penerapannya pada kereta maglev (kereta yang telah menggunakan *magnetic levitation*). Definisi dari *magnetic levitation* adalah proses pengangkatan sebuah objek terhadap suatu acuan menggunakan medan magnet (Civelek, 2020). Sistem ini dapat digunakan untuk mengurangi suara bising serta gesekan yang ditimbulkan dari komponen yang melakukan kontak secara mekanis. Objek yang dilayangkan ditempatkan dibawah sebuah elektromagnet, dengan kekuatan magnet yang dihasilkan oleh elektromagnet yang dikendalikan akan membuat sistem bekerja melawan gaya gravitasi pada objek yang dilayangkan (Muthairi, 2004).

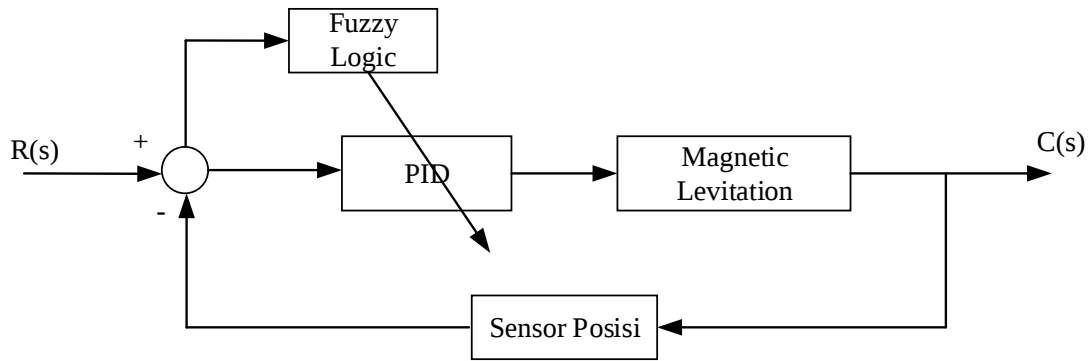
Kontroler yang paling banyak diterapkan salah satunya kontroler PID karena lebih mudah diaplikasikan (Ogata, 2010). Penelitian yang membahas tentang *Magnetic Levitation* yang telah dilakukan yaitu tentang *Magnetic Levitation Ball* dengan menggunakan PID *Gain Scheduling* (Mursyitah, 2018). Penggunaan *Gain Scheduling* untuk pengendalian titik kerja atau kondisi yang terjadi dikombinasikan dengan PID untuk mengendalikan sistem non-linear, jadi perubahan parameter yang cepat kendali PID masih dapat mengatasinya (Khadari, 2019). Tetapi dari peneltian ini penggunaan pengendalian PID masih belum cukup karena sifat sistem *Magnetic Levitation Ball* yang non-linier berubah secara cepat, memiliki gangguan yang tidak pasti, dan kondisi posisi melayang yang selalu berubah (Akkaya, 2010). Selain itu juga dapat digunakan PID *sliding mode* yang dapat mengendalikan sistem non linier (Priyanto, 2018).

Penelitian lain yang juga membahas tentang *magnetic levitation ball* dengan mendesain Fuzzy (Lim, 2017). Dari penelitian dan berdasarkan analisis struktur dan prinsip kerja dari *magnetic levitation* maka dibuat sistem untuk karakteristik *non-linear*, dari simulasi menunjukan bahwa pengontrolan menggunakan Fuzzy dapat menstabilkan bola baja dan memiliki kontrol yang lebih baik (Zhang dkk, 2020). Pada penelitian lain juga diketahu penerapan kontroler PID Fuzzy memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan dengan fuzzy (Faizal, 2019).

Oleh karena itu, pada penelitian ini ingin merancang *magnetic levitation ball* tetapi menggunakan kinerja dari kendali *Auto Tuning proportional integral derivative* (PID) dan digabungkan dengan logika *Fuzzy-Takagi Sugeno* untuk mengatur nilai posisi kestabilan pada *magnetic levitation ball* karena *Fuzzy logic* sendiri cocok untuk memodelkan sistem non-linear yang sangat kompleks.

2. Metode

Dalam penyusunan penelitian mengacu ke tahapan penelitian pada Gambar 2 dimana sistem yang digunakan merupakan sistem pengendalian *magnetic levitation*.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem

Sumber : Penulis,2023

2.1. Pemodelan Plant Magnetic Levitation

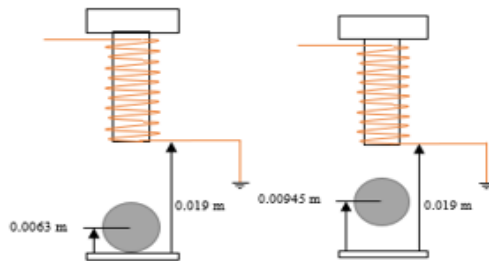
Tahap pertama dalam penelitian ini yaitu mengumpulkan data parameter sistem *magnetic levitation*. Pada penelitian ini parameter yang digunakan terlampir pada Tabel 1.

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

$$y = [k_x * K_{AD} \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

2.2. Perancangan Sistem Magnetic Levitation Ball

Dari model *state space magnetic levitation ball* dapat dibentuk persamaan *transfer function* untuk melihat respon sistem.



Gambar 2. Kondisi Sebelum dan Sesudah Pelayangan

Sumber : Penulis,2023

Tabel 1. Parameter Sistem Magnetic Levitation Ball

Variabel	Deskripsi	Satuan
D_k	Diameter Bola	0.0127 m
m_k	Massa Bola	0,0084 kg
T_d	Jarak Posisi Bola terhadap Solenoid	0.019 m
U_{DAm}	Max DAC Output	5 Volt
R_c	Hambatan Kumpan	3.5 Ohm
R_s	Hambatan Sensor	0.25 Ohm
L_c	Induksi Kumpan	$30 \times 10^{-3} H$
k_{fv}	Viscose Friction	0.02 N.s/m
k_F	Aggretd Coil Constant	$0.606 \times 10^{-6} N/V$
k_c	Coil Constant = $K_f/(K_i)^2$	$6.8823 \times 10^{-6} N/V$
g	Konstanta Gravitasi Bumi	$9,8 m/s^2$

Variabel	Deskripsi	Satuan
k_{AD}	ADC Gain	0.2
x_{LO}	Coil Bias	$8.26 \times 10^{-3} m$
k_x	Position Sensor Constant	797.4603 V/m
K_s	Current Sensor Gain	13.33
K_{am}	Power Amplifier Gain	100
I_{am}	Max Power Amplifier Output	1.2 A
T_a	Amplifier Time Constant	$1.8694 \times 10^{-5} s$
K_i	Amplifier gain	0.2967
k_{DA}	DAC gain	10
U_0	DAC offset	0 V
Y_0	ADC offset	0 V

Sumber : Penulis,2023

Dari gambar 1. dapat diketahui jarak bola melayang adalah $L = [T_d - D_k]$, jadi $L = [0.019 - 0.0127]$ maka $L = 0.0063$ m. Jika bola bergerak setengah dari jarak awal maka, jika $x_{1ss} = \frac{[0.0063]}{2} = 0.00315$ m. Lalu ketika substitusikan dari persamaan (1) maka didapatkan hasil berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 3839.53 & -2.381 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 104.12 \end{bmatrix} U_D$$

$$y = [159.49206 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dari persamaan (2) didapatkan hasil *closed-loop transfer function*.

$$TF = \frac{16606.653}{s^2 + 2.381s + 12767.123} \quad (3)$$

2.3. Pemodelan Logika Fuzzy

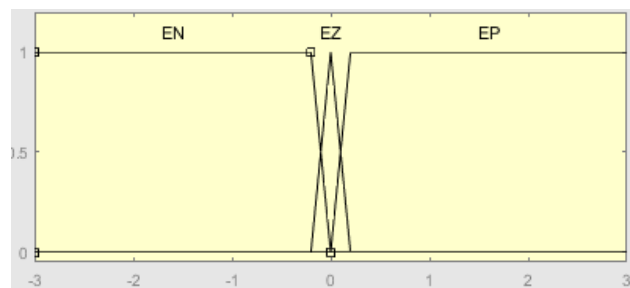
Pemodelan logika fuzzy didesain tanpa harus mengetahui model spesifik sistem melainkan hanya terdiri dari *input*, fase proses dan *output*.

Tabel 2. Rule Base Fuzzy

Error	EN	EZ	EP
dError			
dN	0	0.4	0.4
dZ	0.8	1	0.8
dP	1.6	1.6	2

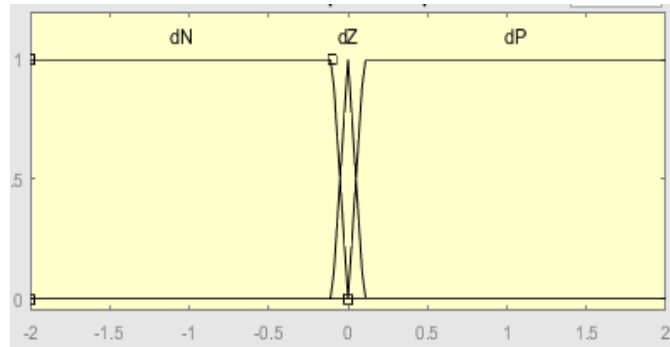
Sumber : Penulis,2023

Variabel input berupa *error* dan *delta error*, dimana akan bernilai negatif jika nilai posisi *magnetic levitation ball* berada diatas *setpoint* yang diinginkan dan akan bernilai positif juga berada dibawah *setpoint*. Output crisp dari fuzzy sugeno ditentukan melalui defuzzifikasi COA (*center of Area*).



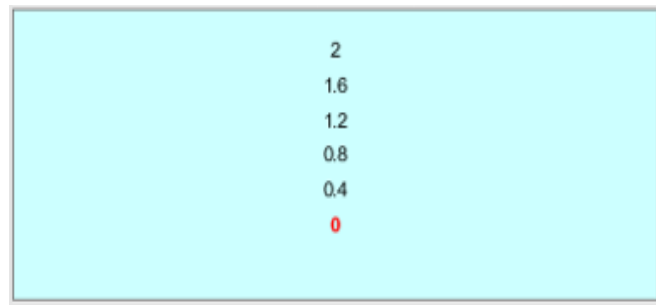
Gambar 3. Fungsi Keanggotaan Error

Sumber : Penulis,2023



Gambar 4. Fungsi Keanggotaan *Delta Error*

Sumber : Penulis,2023



Gambar 5. Fungsi Keanggotaan *Output Fuzzy*

Sumber : Penulis,2023

2.4. *Pemodelan Gaya Medan Magnetik*

Gaya magnetik yang dialami oleh objek dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu, bentuk dan kerapatan medan magnet yang dihasilkan elektromagnet, lalu letak objek saat berada pada medan magnet dan peletakan magnet yang berada dalam objek. Untuk persamaan nilai kerapatan medan magnet yang dihasilkan diperoleh persamaan (4) dan nilai gaya medan magnet diperoleh persamaan (5).

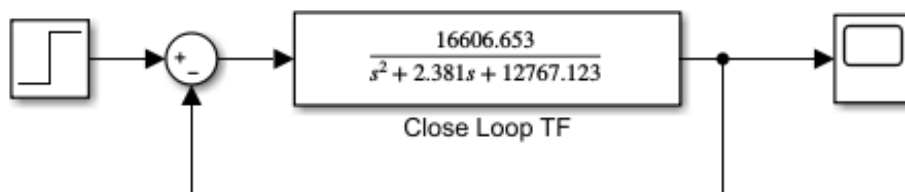
$$B = \frac{\mu_0 i N}{2\pi d} \quad (4)$$

$$F = (N \times i) \times \frac{\mu_0 i N}{2\pi d} \quad (5)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. *Pengujian Plant Magnetic Levitation Ball*

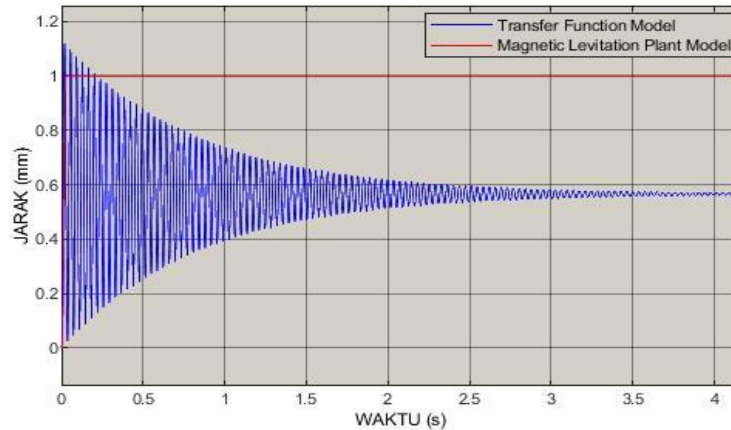
Pengujian plant ini dilakukan untuk melihat hasil perbandingan *transfer function* (fungsi alih) tanpa kendali yang telah didapat dengan model *magnetic levitation*. Dari persamaan (3) bisa kita dapatkan blok simulink *transfer function*. Blok simulink *close loop transfer function* dapat dilihat pada gambar 5. Dan hasil perbandingan sinyal step respon dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Blok Simulink *Transfer Function*

Sumber : Penulis,2023

Pada gambar 6. dapat dilihat hasil *step response* perbandingan dari sistem model *magnetic levitation* yang didapat dari MATLAB dengan *transfer function* tanpa kendali. Dimana sistem *transfer function* tanpa kendali mencapai *steady state* dengan nilai *overshoot* yang tinggi sebesar 157.051% dengan *risetime* 7.817 ms. Sedangkan sistem model *magnetic levitation* mencapai *steady state* dengan nilai *overshoot* sebesar 0.505% dengan *risetime* 4.331 ms. Hal ini dikarenakan pada pembentukan *transfer function* (fungsi alih) sistem belum menambahkan pengendali yang menyebabkan adanya perbedaan yang signifikan pada detik 0 hingga detik ke 4. Jika dilihat kembali gambar 4.4 grafik sinyal *step respon transfer function* (fungsi alih) dapat dikatakan sesuai dengan hasil model *magnetic levitation* karena sistem masih dapat stabil saat kondisi telah mencapai detik ke 4. Yang membedakan hanya dari lonjakan awal sistem karena pada model *magnetic levitation* sudah dilengkapi dengan pengendali.



Gambar 7. Perbandingan Model Maglev dengan Fungsi Alih

Sumber : Penulis,2023

3.2. Pengujian Medan Magnet

Pengujian medan magnet dilakukan untuk melihat kuat nya solenoid untuk mengangkat objek serta mempertahankan posisi pelayangan. Dimana banyaknya lilitan yang digunakan pada pembuatan solenoid sebanyak 237x lilitan dengan panjang kawat tembaga yang digunakan sepanjang 23 meter, lalu arus ideal yang digunakan sesuai keluaran power supply sebesar 1.2 A.

Tabel 3. Hasil Kerapatan Medan Magnet

Kerapatan Medan Magnet	
Jarak (m)	Hasil (Tesla)
0.001	0.5688
0.002	0.2844
0.003	0.1896
0.004	0.1422
0.005	0.11376
0.006	0.0948
0.007	0.081257143
0.008	0.0711
0.009	0.0632
0.01	0.05688
0.011	0.051709091
0.012	0.0474
0.013	0.043753846

Sumber : Penulis,2023

Dari penggunaan solenoid berikut bisa didapatkan nilai dari kerapatan medan magnet serta gaya magnet yang dihasilkan solenoid dengan menggunakan persamaan (4) dan persamaan (5), untuk kerapatan medan magnet didapatkan hasil:

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2\pi d} \quad (6)$$

$$B = \frac{(0.00001256) \times 1.2 \times 237}{2 \times 3.14 \times 0.001} \quad (7)$$

$$B = 0.5688 \text{ T} \quad (8)$$

Lalu nilai kerapatan medan magnet dari ketinggian 0.001 hingga 0.013 m dapat dilihat pada tabel 3. Dan besarnya gaya magnet pada kumparan menggunakan persamaan (5) didapatkan hasil:

$$F = (N \times i) \times \frac{\mu_0 i N}{2\pi d} \quad (9)$$

$$F = 237 \times \frac{0.002976772}{0.00628} \quad (10)$$

$$F = 161.76672 \text{ N} \quad (11)$$

Lalu nilai gaya medan magnet yang dihasilkan dari ketinggian 0.001 hingga 0.013 m didapatkan nilai pada tabel 4.

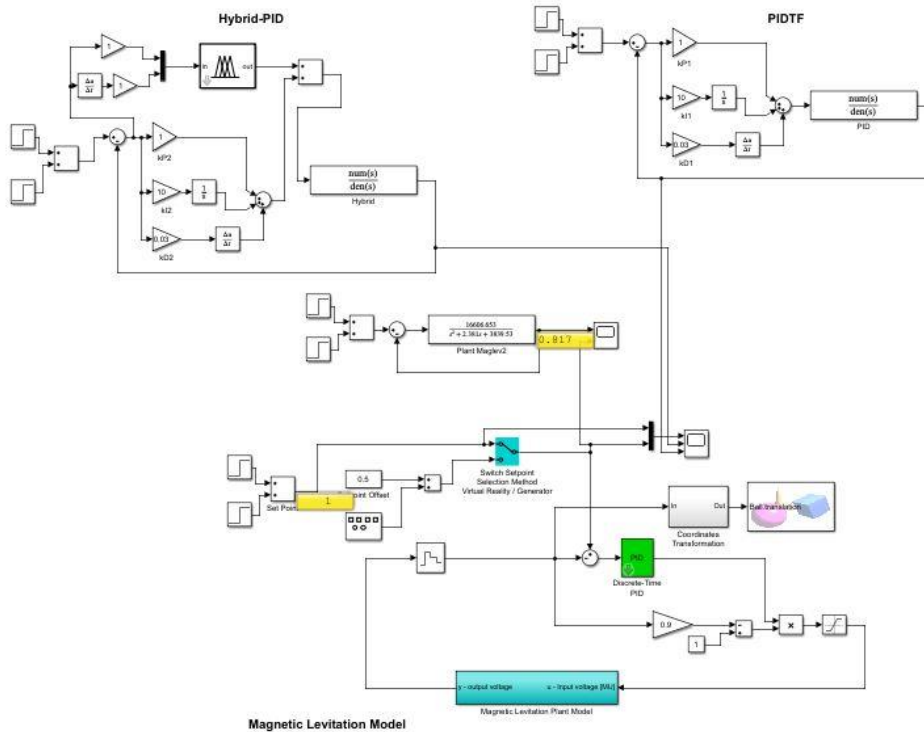
Tabel 4. Hasil Gaya Magnet pada Coil	
Gaya Magnet Pada Coil	
Jarak (m)	Hasil (Newton)
0.001	161.76672
0.002	80.88336
0.003	53.92224
0.004	40.44168
0.005	32.353344
0.006	26.96112
0.007	23.10953143
0.008	20.22084
0.009	17.97408
0.01	16.176672
0.011	14.70606545
0.012	13.48056
0.013	12.44359385

Sumber : Penulis, 2023

3.3. Pengujian Keseluruhan

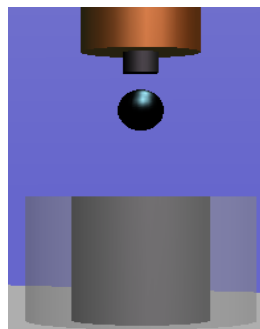
Setelah perancangan sistem dan perhitungan gaya medan magnet ideal dilakukan lalu dilanjutkan pengujian pada simulasi berdasarkan sistem yang telah dibuat di MATLAB. Dimana pengujian keseluruhan ini melingkupi pengujian pelayanan objek sesuai simulasi model *magnetic levitation* CE152, pengujian berupa merubah model *magnetic levitation* menjadi *transfer function* (fungsi alih) lalu pengujian dengan tuning PID, dan penambahan *hybrid fuzzy-PID*. Gambar 7. merupakan rangkaian sistem simulink pengujian berdasarkan plant model *magnetic levitation* yang telah dibuat.

Dari gambar 7. Didapatkan hasil visualisasi dari pengujian pelayangan *magnetic levitation ball*. kondisi pelayangan *magnetic levitation ball* dapat dilihat pada gambar 8. Dari hasil dari pengujian visualisasi model *magnetic levitation* didapatkan grafik perbandingan step respon dari model *magnetic levitation*, penerapan kontroler tuning PID, dan penerapan kontroler *hybrid fuzzy-PID*, yang diperlihatkan pada gambar 9. Jika dilihat dari gambar 9 dapat diketahui bahwa penggunaan kendali *hybrid fuzzy-PID* lebih baik dibandingkan PID tuning. Data dari perbandingan hasil grafik didapatkan pada tabel 5. yang berisi perbandingan *risetime* dan *overshoot* untuk mencapai kondisi *steady state*.

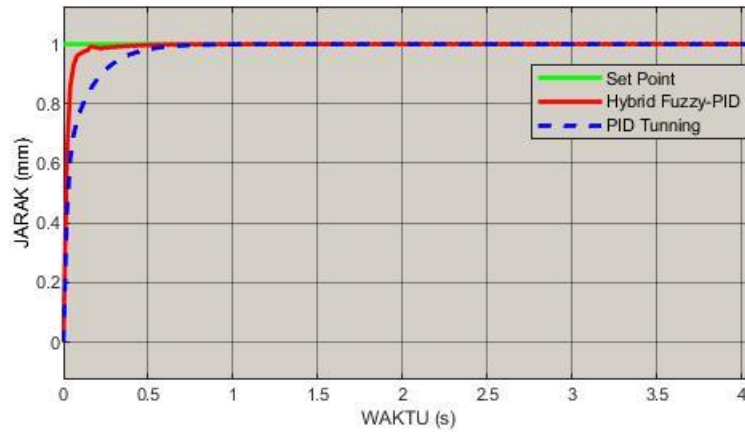


Gambar 8. Blok Sistem Visualisasi Magnetic Levitation
Sumber : Penulis,2023

Jika dilihat dari tabel 5 dari pengujian *transfer function* tanpa kendali dengan model *magnetic levitation* terdapat selisih *risetime* yang tidak terlalu signifikan akan tetapi pada *overshoot* terdapat selisih yang sangat tinggi dikarenakan model *magnetic levitation* CE152 yang digunakan pada *simulink* telah dilengkapi dengan sistem kontrol yang baik, hal ini yang menyebabkan sistem *transfer function* tanpa kendali membutuhkan kendali tambahan agar keluaran sistem lebih stabil. Ketika model *magnetic levitation* dibandingkan dengan sistem penambahan PID tuning maka dilihat dari tabel 4.3 bahwa nilai *overshoot* pada PID tuning mulai berkurang dari 157.051% sebelum dituning hingga menjadi 0.460% setelah dituning, nilai ini mendekati nilai *overshoot* pada model *magnetic levitation* yang bernilai 0.505%, hal ini dapat dikatakan bahwa nilai *overshoot* lebih baik sebesar 0.045% setelah dituning.



Gambar 9. Visualisasi Pengujian Pelayangan Magnetic Levitation Ball
Sumber : Penulis,2023



Gambar 10. Grafik Perbandingan Step Respon
Sumber : Penulis,2023

Tabel 5. Hasil Perbandingan Step Respon

Perbandingan Step Respon		
Type	Risetime (s)	Overshoot (%)
Tanpa Kendali	0.007817	157.051
Model Maglev	0.004331	0.505
PID Tuning	0.214371	0.46
Hybrid Fuzzy-PID	0.044902	-0.357

Sumber : Penulis,2023

Akan tetapi nilai *risetime* pada PID tuning cukup besar yang bernilai 0.214371 s untuk mencapai kondisi *steady state*. Dan ketika sistem penambahan PID tuning dibandingkan dengan penggunaan *hybrid fuzzy-PID* maka dilihat dari tabel 4.3 bahwa nilai *risetime* yang dihasilkan pada penggunaan *hybrid fuzzy-PID* sebesar 0.044902 s dibanding dengan PID tuning yang bernilai 0.214371 s yang artinya lebih cepat 0.169469 s, akan tetapi penggunaan *hybrid fuzzy-PID* mendapatkan nilai *overshoot* -0.357%, hal ini dikarenakan penggunaan *hybrid fuzzy-PID* membuat sistem respon menjadi lebih cepat untuk mencapai kondisi *steady state*. Oleh karena itu nilai *overshoot* pada penggunaan *hybrid fuzzy-PID* bernilai negatif.

4. Kesimpulan

Dari pengujian-pengujian yang dilakukan pada bab sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Gaya elektromagnetik yang dihasilkan oleh solenoida agar dapat mempertahankan kondisi pelayangan ideal ditinggikan 0.006 m sebesar 26.96112 Newton.
2. Respon sistem pada *transfer function* (fungsi alih) tanpa kendali untuk mencapai *steady state* didapatkan *risetime* 0.007817 s, *overshoot* 157.051%. lalu respon sistem pada PID tuning Matlab untuk mencapai *steady state* didapatkan *risetime* 0.214371 s, *overshoot* 0.460%. lalu respon sistem pada *hybrid fuzzy-PID* untuk mencapai *steady state* didapatkan *risetime* 0.04492 s dan *overshoot* -0.357%. Jadi, hasil dari perbandingan step respon *transfer function* tanpa kendali dengan penggunaan PID tuning dapat dikatakan bahwa penggunaan PID tuning dapat mengurangi nilai *overshoot* akan tetapi nilai dari *risetime* bertambah.
3. Hal ini dapat dikatakan sistem *magnetic levitation* dapat dikendalikan dengan menggunakan kontroler PID dengan metode Hybrid Fuzzy. Penggunaan *hybrid fuzzy-PID* dapat dikatakan memiliki nilai *risetime* yang cepat akan tetapi nilai *overshoot* akan bernilai negatif hal ini dikarenakan penggunaan *hybrid fuzzy-PID* dapat menyebabkan sistem merespon terlalu cepat untuk mencapai kondisi *steady state*.

Referensi

- Al-Muthairi, N.F and Zribi, M. (2004), 'Sliding Mode Control Of A Magnetic Levitation System', *Mathematical Problems in Engineering*, Vol 2 Hal. 93-107.
- Akky, Ali Volkan and Cetin, Saban. (2010), 'Simulation and hybrid fuzzy-PID control for positioning of a hydraulic system'. *Original Paper Nonlinear Dyn*, Vol 16, Hal. 465-476.
- Civelek, Zafer. (2020), 'Optimization of fuzzy logic (takagi-sugeno) blade pitch angle controller in wint turbines by genetic algorithm', *Engineering Science and technology, an international Journal*, No.23, Hal 1-9.
- Faizal, Ahmad., Mursyitah, Dian., dan Ismaredah, Ewi.(2019), 'Desain Pengendali Fuzzy – PID Untuk Mengendalikan Posisi Pada Sistem Magnetic Levitation Ball', *Jurnal ECOTIPE*, Vol 6, No.2, Hal. 61 – 66
- Lim, Michael Ponsa., Khoswanto, Handry., dan Saptono, Heri. (2017), 'Studi Magnetic Levitation dengan Kontrol Arduino', *Jurnal Teknik Elektro*, Vol. 10, No. 1, Hal. 11-16.
- Khadari, Iqlimah., Subiyanto., dan Prastiyanto, Dhidik.(2019), "Simulasi Kontroler PID Tuning Menggunakan Logika Fuzzy dan Algoritma Genetika Sebagai Pengendali Kecepatan Motor DC", *Jurnal Ilmiah Strum*, Vol 8, No.2, Hal. 186-196.
- Mursyitah, dian., Faizal, Ahmad., Vernandhez, Rechy., dan parmo. (2018), 'Pengendalian Posisi Sistem Magnetic Levitation Ball Menggunakan MRAC-PID', *Seminar Nasional Teknologi Informasi, Komunikasi dan industri (SNTIKI-10)*, Fakultas Sains dan Teknologi, Riau.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering (5th Edition ed.)*. New Jersey, United States of America: Prentice Hall.
- Priyanto, Agus. (2018), 'Sistem Kendali Posisi Magnetic Levitation Ball Menggunakan Metode Sliding Mode Control (SMC)', *Technology and Computing Science Journal*, Vol. 1, No. 1, Hal 39-51.
- Zhang, Jinggang., Wang, Xinyuan., and Xuejuan Shao. (2020). 'Design and Real-Time Implementation of Takagi-Sugeno Fuzzy Controller for Magnetic Levitation Ball System'. *e-Journal IEEEAccess: Digital Object Identifier* 10.1109/ACCESS. 2020.2971631