

Adaptif STR-PID Untuk Pengendalian Posisi Pada *Magnetic Levitation Ball*

Halim Mudia

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim
Jl. H.R. Soebrantas Km.15, Panam, Pekanbaru, Riau, Indonesia

email: halim.mudia@uin-suska.ac.id

Abstrak - *Magnetic Levitation Ball* merupakan suatu sistem yang terdiri atas bola baja bersifat ferromagnetik yaitu benda yang memiliki sifat kemagnetan yang kuat, dimana benda tersebut akan melayang diatas permukaan suatu medium udara atau di bawah sebuah elektromagnet. Permasalahan utama *Magnetic Levitation Ball* terletak pada sistemnya yang nonlinier, dimana perubahan *setpoint* tidak sebanding dengan perubahan *output*. Oleh karena itu diperlukan suatu kendali untuk mengendalikan posisi *Magnetic Levitation Ball* agar benda itu melayang sesuai dengan *setpoint* dan karakteristik sistem yang diinginkan, dalam hal ini kendali yang digunakan adalah Adaptif *Self-Tuning Regulator-Proportional Integral Derivative* (STR-PID). Dari hasil penelitian ini, terlihat STR-PID mampu mencapai *setpoint* yang diinginkan, dengan *error steady state*= 0 m, *overshoot*= 0%, dan mampu mengatasi gangguan yang terjadi, dalam ini dimisalkan angin.

Kata kunci: Adaptif, *Magnetic Levitation Ball*, PID, Posisi, *Self-Tuning Regulator*

Abstract - *Magnetic Levitation Ball* is a system consisting of ferromagnetic steel balls, which have strong magnetic properties, where the object will float on the surface of an air medium or under an electromagnet. The main problem of the *Magnetic Levitation Ball* lies in its nonlinear system, where the change in *setpoint* is not proportional to the change in output system. Therefore, we need a control to control the position of the *Magnetic Levitation Ball* so that the object hovers in accordance with the desired *setpoint* and system characteristics, in this case the control used is Adaptive *Self-Tuning Regulator-Proportional Integral Derivative* (STR-PID). From the results of this study, it seems that STR-PID was able to reach the desired *setpoint*, with *error steady state* = 0 m, *overshoot* = 0%, and able to solve the disturbance, in this example of the wind.

Keywords: Adaptive, *Magnetic Levitation Ball*, PID, Position, *Self-Tuning Regulator*

I. PENDAHULUAN

Transportasi merupakan sarana dan prasarana yang sering digunakan untuk menunjang kegiatan sehari-hari, Salah satu alat transportasi yang sering digunakan adalah kereta api. Kereta api merupakan alat transportasi darat yang digunakan untuk transportasi umum baik pengangkutan barang dan jasa dalam jumlah yang besar, sehingga banyak produsen yang melakukan pengembangan teknologi lebih lanjut pada kereta api agar menghasilkan kualitas yang canggih dan nyaman bagi konsumen. Namun pada pengembangan transportasi ini membutuhkan teknologi yang cocok sehingga pada penerapannya tidak banyak kendala seperti guncangan yang terjadi ketika kereta api dioperasikan [1]. Perkembangan kereta api masuk kedalam era baru semenjak Herman Kemper dari Jerman mematenkan temuannya tentang kereta api dengan sistem bantalan rel dengan teknologi gaya melayang magnet atau yang lebih dikenal dengan *Magnetic Levitation* (Maglev) pada tahun 1934 yang mana teknologi dari kereta maglev ini diadaptasi dari teknologi *Magnetic*

Levitation Ball. Kemudian di negara-negara maju seperti China, Jepang dan Jerman mulai mengembangkan Kereta Maglev ini untuk bisa dijadikan sebagai transportasi umum [2].

Magnetic Levitation Ball dapat didefinisikan sebagai suatu rangkaian sistem yang terdiri atas bola baja bersifat ferromagnetik (benda yang memiliki sifat kemagnetan yang kuat) dimana akan melayang diatas permukaan suatu medium udara. Objek yang akan dilayangkan ditempatkan di bawah sebuah elektromagnet. Dengan kekuatan medan magnet yang dihasilkan oleh elektromagnet akan melawan gaya gravitasi pada objek yang dilayangkan [3]. Permasalahan utama *Magnetic Levitation Ball* terletak pada sistemnya yang nonlinier sehingga menimbulkan respon *open loop* tidak sesuai dengan *setpoint*, tidak sesuai dengan karakteristik sistem yang diinginkan dan rentan terhadap gangguan dari luar yang bisa menyebabkan guncangan saat dioperasikan [4]. Itu juga disebabkan karena bola baja ferromagnetik yang melayang memiliki sifat yang sulit untuk dikendalikan posisinya.

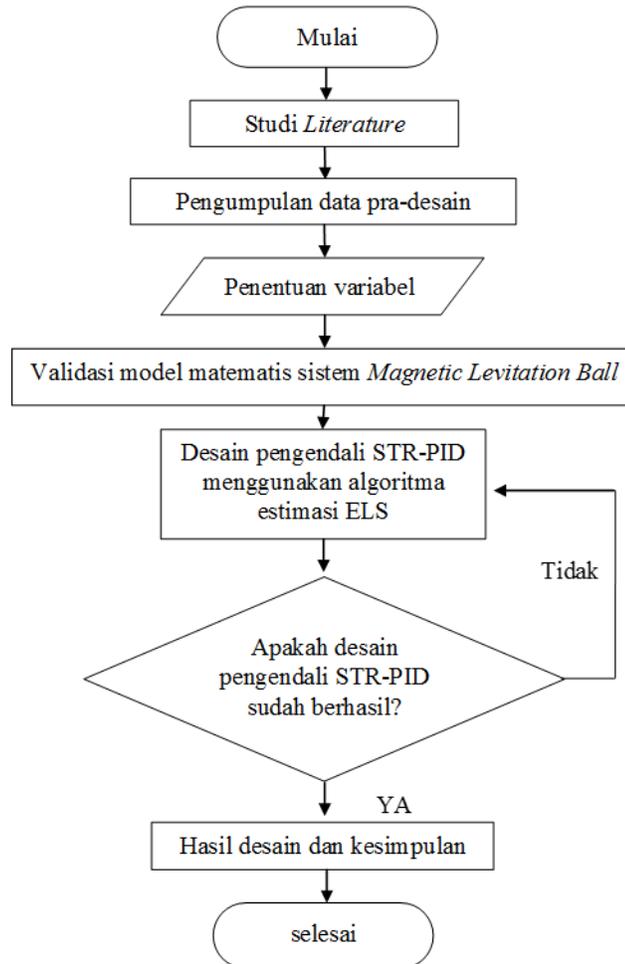
Pada respon *output Magnetic Levitation Ball* secara *open loop* mempunyai osilasi dan *error steady state* yang tinggi [5], sehingga dalam penelitian ini untuk mengatasinya PID dipilih sebagai pengendali pada *Magnetic Levitation Ball* karena memiliki keunggulan, yaitu *Proportional* (P) yang memiliki fungsi untuk mempercepat respon *output* sistem, *Integral* (I) digunakan untuk mengatasi *error steady state* dan *Derivative* (D) digunakan untuk meredam osilasi [6]. Meskipun PID adalah pengontrolan yang serbaguna untuk semua kasus namun PID Konvensional masih memiliki kelemahan, yaitu tidak dapat bekerja dengan baik terhadap sistem nonlinear dengan banyak ketidakpastian dan juga penentuan nilai parameter PID dilakukan secara manual dengan metode *trial and error*, sehingga membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mendapatkan nilai yang sesuai dan jika terjadi perubahan terhadap sistem maka nilai parameter PID harus dicari kembali, maka diusulkan kendali adaptif *Self-Tuning Regulator* yang bisa melakukan *tuning* secara otomatis terhadap nilai parameter PID secara tepat yang sesuai dengan kebutuhan sistem.

Oleh karena itu, untuk mengatasi permasalahan pada pengendalian posisi pada *Magnetic Levitation Ball* dan kendali PID dengan penentuan nilai parameter yang masih menggunakan metode *trial and error* diatas, maka dalam penelitian ini penulis mengangkat judul “Adaptif STR-PID Untuk Pengendalian Posisi Pada *Magnetic Levitation Ball*”.

II. METODE

Pada penelitian ini, telah ditelaah beberapa pustaka khususnya penelitian-penelitian yang terkait dengan topik yang akan diselesaikan. Uraian dari tiap-tiap pustaka yang disampaikan akan dikerucutkan untuk mendapatkan beberapa konsep yang digunakan dalam penelitian. Metode-metode yang mendasari penelitian ini meliputi, *Magnetic Levitation Ball*, *Self-Tuning Regulator*, *Extended Least Square*, Sistem Orde 2 dan *Proportional Derivative Integral*. Sedangkan alur penelitian dimulai dengan studi *literature*, pengumpulan data pra-disain, penentuan variabel berupa bentuk *transfer function* dari *Magnetic Levitation Ball*, validasi model matematis, merancang pengendali STR-PID, menganalisa dari hasil rancangan pengendali dan terakhir adalah menarik kesimpulan berdasarkan hasil penelitian.

A. Flowchart Penelitian

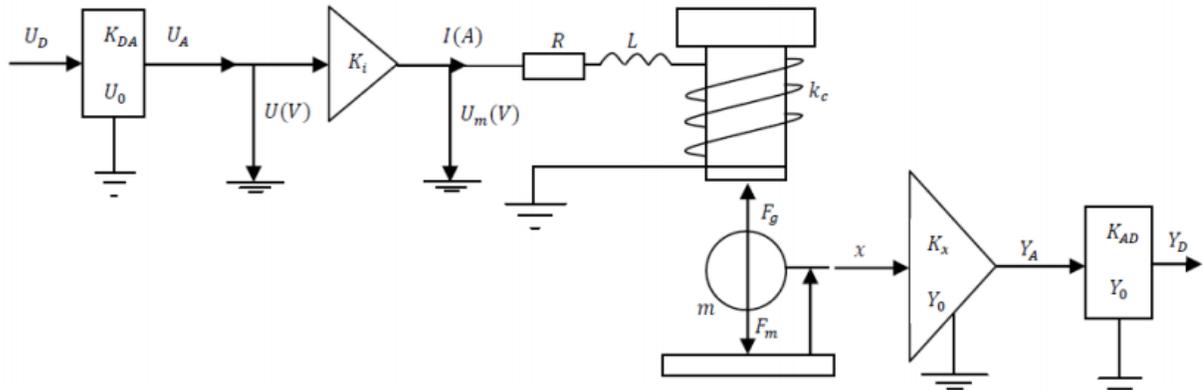


Gambar 1. Flowchart Penelitian

B. Model Matematika Magnetic Levitation Ball

Gambar 2 berikut ini memperlihatkan model dan struktur *Magnetic Levitation Ball*. Adapun komponen dan struktur *Magnetic Levitation Ball* ini terdiri dari [7] [8]:

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 2. *Magnetic Levitation Ball* [7]

Berdasarkan hasil penurunan model matematis diperoleh bentuk persamaan *state space* sebagai berikut [7] [8]:

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

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

TABEL 1. NILAI-NILAI PARAMETER DARI MAGNETIC LEVITATION BALL GAMBAR 2 [7][8]

Parameter	Symbol	Value
Ball diameter	D _k	0.0127 m
Ball mass	m	0.0084 kg
Posisi Bola	x	0.5m
Viscose friction	K _{fv}	0.02 N.s/m
Gravity acceleration constant	g	9.81 m/s ²
Aggregated coil constant	k _c	0.606x10 ⁻⁶ N/V
Power amplifire gain	K _i	0.2967 A/V
Converter gain	K _{DA}	10
Coil bias	x _{LO}	8.26x10 ⁻³ m
Position sensor constant	k _x	797.4603 V/m
Analog to digital converter gain	K _{AD}	0.2
Maximum DA converter output voltage	U _A	5 V
Coil resistance	R	3.5 Ω
Coil inductance	L	30 x 10 ⁻³ H
Current sensor gain	K _x	13.33

Setelah mensubtitusikan nilai-nilai parameter *Magnetic Ball Levitation* dari tabel 2 ke persamaan (1), maka didapatkan:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{19.62}{(0.00826-x_{1ss})} & -2.381 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{0.53206}{(0.00826-x_{1ss})} \end{bmatrix} U_D \tag{2}$$

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

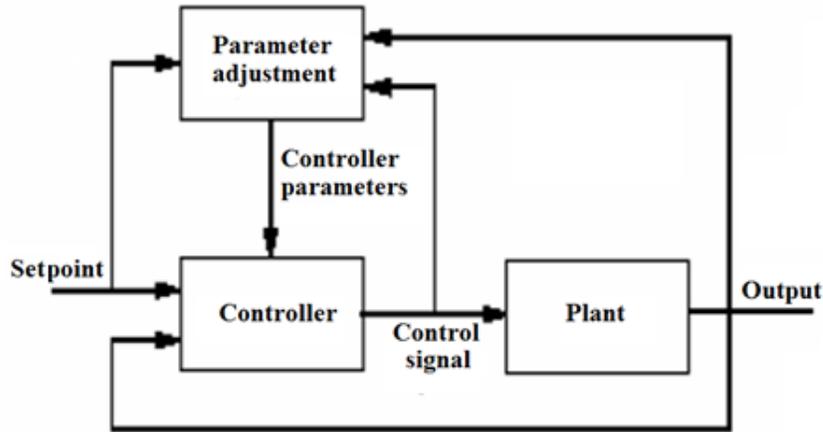
dan model matematis *Magnetic Ball Levitation* dalam bentuk persamaan *transfer function*:

$$TF = \frac{16606.653}{s^2+2.381s+12767.123} \tag{3}$$

C. Kendali Adaptif

Kendali adaptif adalah kendali pintar dengan *adjustable* parameter dan mekanisme untuk mengatur parameter atau dalam pengertian umumnya berarti mengubah tingkah laku atau

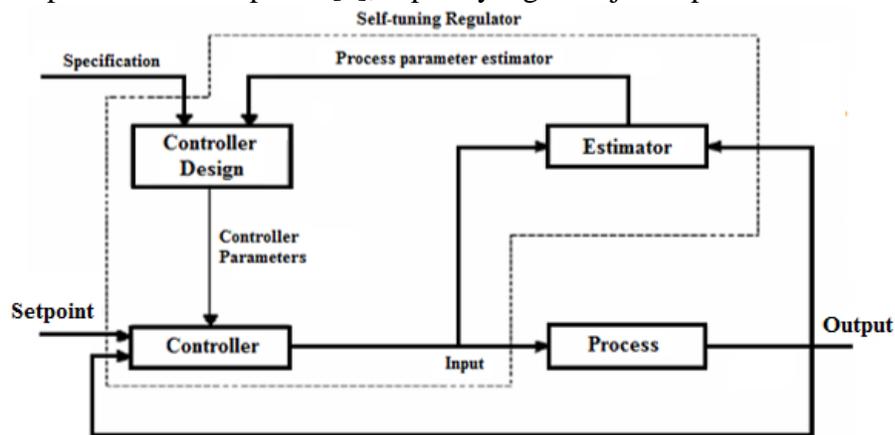
karakteristik untuk menyesuaikan diri terhadap keadaan yang baru atau tidak diketahui. Sistem kendali adaptif terdiri atas 2 loop tertutup, loop pertama adalah normal *feedback control* terhadap *plant* dan *controller* dan loop yang kedua adalah loop dengan parameter *adjustment loop* [9], seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Blok Kendali Adaptif [9]

1. *Self-Tuning Regulator*

Self-Tuning Regulator merupakan kendali adaptif yang terdiri dari beberapa bagian, yaitu: Blok *Estimator* yaitu merepresentasikan proses estimasi parameter secara langsung dengan menggunakan metode *Extended Least Square*. Blok *Controller Design* yaitu merepresentasikan penyelesaian langsung untuk desain proplem dari parameter yang telah diidentifikasi sebelumnya untuk menghasilkan parameter kendali terbaru sesuai kondisi objek pada saat itu. Terakhir pada blok *Controller* yaitu untuk menghitung aksi kendali yang akan diberikan kepada objek dengan parameter kendali yang telah dihitung pada blok sebelumnya. Sehingga sistem dapat dikatakan sebagai otomatisasi proses *modeling (estimation)* dan *design*. Yang mana model dari proses dan desain kendali diperbaharui setiap saat [9], seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Blok *Self-Tuning Regulator* [9]

2. *Extended Least Square*

Metode yang digunakan sebagai *estimator* nilai parameter *plant* pada penelitian ini adalah *Extended Least Square*, dengan persamaan [10]:

$$F(k) = \frac{1}{\lambda_1(k)} (F(k-1) - \frac{F(k-1)\phi^T(k-1)F(k-1)}{\lambda_1(k) / \lambda_2(k) + \phi^T(k-1)F(k-1)\phi(k-1)}) \tag{4}$$

Nilai parameter *Extended Least Square* akan diperoleh dengan beberapa cara:

- 1) *Constant forgetting factor*.
 - a. Dipilih nilai $0 < \lambda_1 < 1$, dan $\lambda_2 = 1$
 - b. Atau dipilih $\lambda_1 = 1$ dan $\lambda_2 > 1$
- 2) *Variable forgetting factor*
 Cara kedua ini dipilih $\lambda_1 = f(t)$, atau sebuah fungsi yang tergantung pada waktu ataupun iterasi, sedangkan nilai $\lambda_2 = 1$.
- 3) *Constant Trace*
 Metode ketiga adalah perbaikan matrik gain estimasi menggunakan *Constant Trace*. Metode ini didasarkan pada *TRACE* (hasil kali diagonal dari matrik gain estimasi). Nilai *TRACE* $F(k-1)$
 Pada penelitian ini digunakan metode yang pertama yaitu *Constant Forgetting Factor*.

D. Sistem Orde 2

Model matematika dari sistem orde kedua dapat dinyatakan dalam bentuk Persamaan berikut ini [11]:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{5}$$

Di mana:

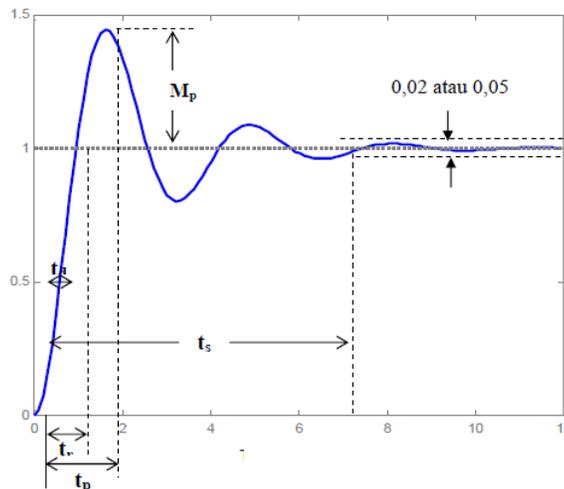
$K = \text{Gain overall}$

$\omega_n = \text{Frekuensi alami tak teredam}$

$\xi = \text{Rasio peredaman}$

Karakteristik respon transien sistem orde kedua pada Gambar 4, terdiri dari:

1. Spesifikasi teoritis:
 Frekuensi alami tak teredam (ω_n) dan rasio peredaman (ξ).
2. Spesifikasi praktis:
 Spesifikasi praktis diperoleh dengan asumsi respon sistem orde kedua dalam keadaan redaman kurang (*under damped*), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



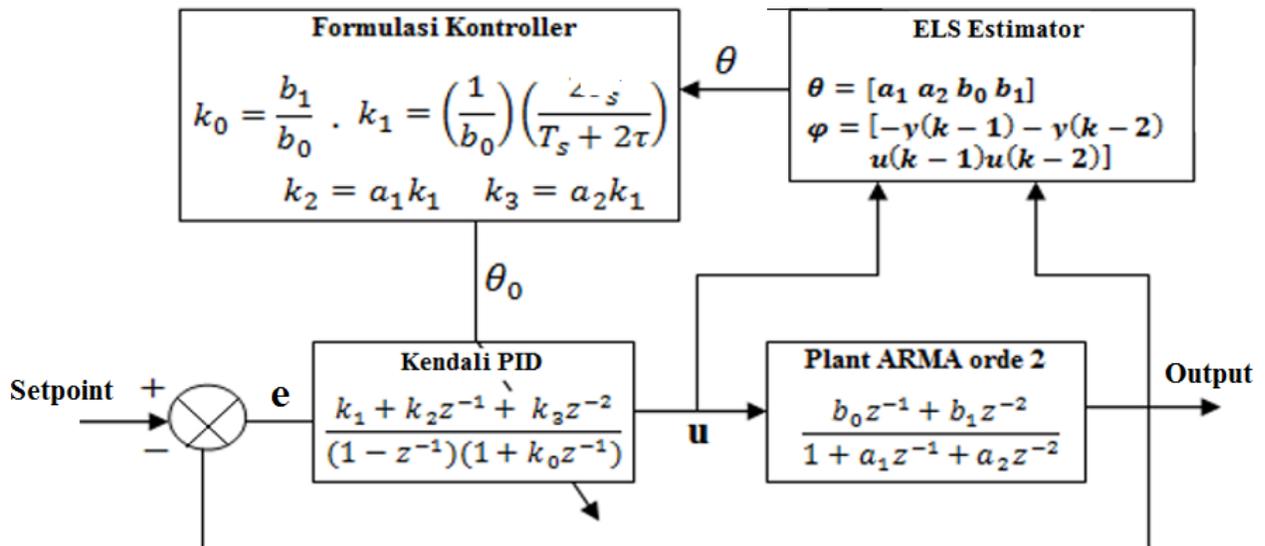
Gambar 5. Karakteristik Respon Waktu Sistem Orde 2 [11]

Di mana spesifikasi praktis terdiri dari:

1. Waktu tunda (*delay time*), t_d
Waktu tunda adalah waktu yang diperlukan oleh respon untuk mencapai setengah dari nilai respon *output* sistem yang *steady state* untuk waktu pertama.
2. Waktu naik (*rise time*), t_r
Waktu naik adalah waktu yang dibutuhkan oleh respon untuk naik dari 5% ke 95% atau 10% ke 90% dari nilai respon *output* sistem yang *steady state*.
3. Waktu puncak (*peak time*), t_p
Waktu puncak adalah waktu yang diperlukan respon *output* sistem untuk mencapai puncak pertama *overshoot*.
4. *Overshoot* maksimum, M_p
Overshoot maksimum adalah nilai puncak kurva respon diukur dari satuan persen (%)
5. Waktu tunak (*settling time*), t_s
Waktu tunak adalah waktu yang dibutuhkan respon *output* sistem untuk mencapai keadaan *steady state* atau dianggap stabil.

E. Proportional Integral Derivative (PID) Diskrit

PID diskrit memiliki 4 parameter (k_0, k_1, k_2, k_3). Karena dalam desain kendali STR-PID pada penelitian ini, parameter dari PID diskrit akan diadaptasi menggunakan kendali adaptif STR yang sesuai dengan kebutuhan sistem yang akan dikendalikan [10].



Gambar 6. Diagram Blok Adaptif STR-PID [10]

Sinyal kendali (u) yang akan diumpankan ke *plant* dalam bentuk persamaan yaitu sebagai berikut:

$$\frac{u}{e} = \frac{k_1 + k_2 z^{-1} + k_3 z^{-2}}{(1 - z^{-1})(1 + k_0 z^{-1})} \tag{6}$$

$$u(1 - z^{-1})(1 + k_0 z^{-1}) = e(k_1 + k_2 z^{-1} + k_3 z^{-2})$$

$$u(1 + k_0 z^{-1} - z^{-1} - k_0 z^{-2}) = e(k_1 + k_2 z^{-1} + k_3 z^{-2})$$

$$u(1 + (k_0 - 1)z^{-1} - k_0z^{-2}) = k_1e + k_2ez^{-1} + k_3ez^{-2}$$

$$u + (k_0 - 1)uz^{-1} - k_0uz^{-2} = k_1e + k_2ez^{-1} + k_3ez^{-2}$$

$$u(k) + (k_0 - 1)u(k - 1) - k_0u(k - 2) = k_1e + k_2e(k - 1) + k_3e(k - 2)$$

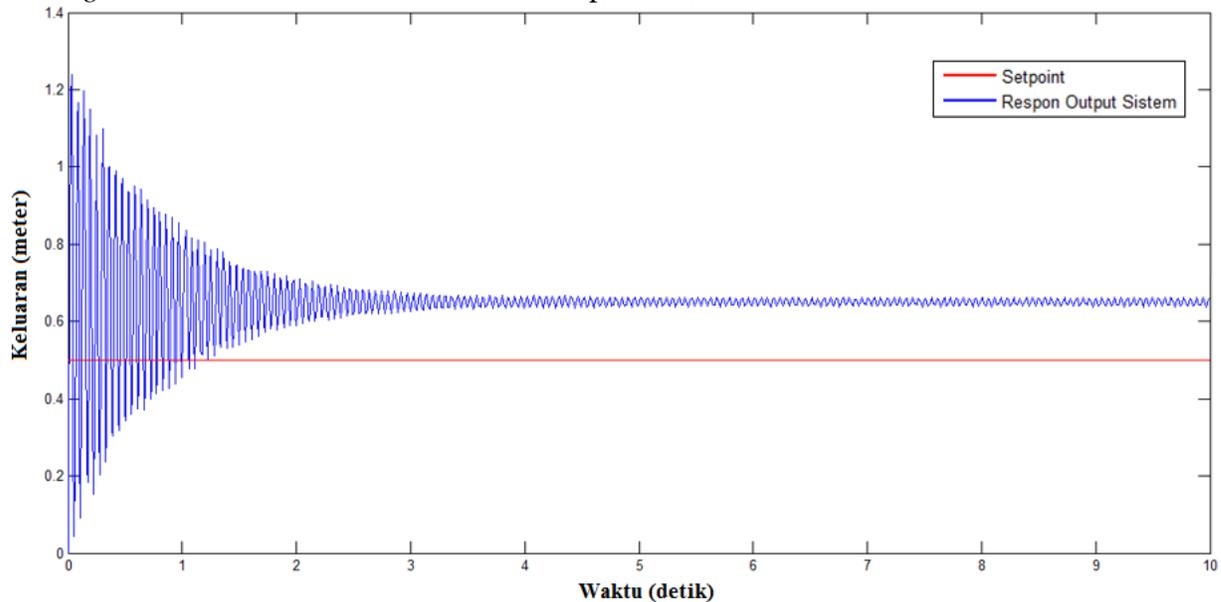
Sehingga didapat:

$$u(k) = -(k_0 - 1)u(k - 1) + k_0u(k - 2) + k_1e(k) + k_2e(k - 1) + k_3e(k - 2) \tag{7}$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai *setpoint* yang diberikan untuk pengendalian posisi pada *Magnetic Levitation Ball* ditentukan sesuai kebutuhan = 0.5m (meter) dan pengujian gangguan, dalam ini dimisalkan angina diberikan pada detik ke 7 yang mengurangi posisi ketinggian *ball* sebesar 0.1m (meter). Nilai-nilai inilah yang nantinya dijadikan acuan untuk nilai respon *output* sistem yang diinginkan untuk masing-masing pengendalian. Dalam penelitian ini yang akan dibahas yaitu: sistem *Magnetic Levitation Ball* untuk posisi tanpa kendali dan *Magnetic Levitation Ball* untuk pengendalian posisi dengan kendali Adaptif STR-PID.

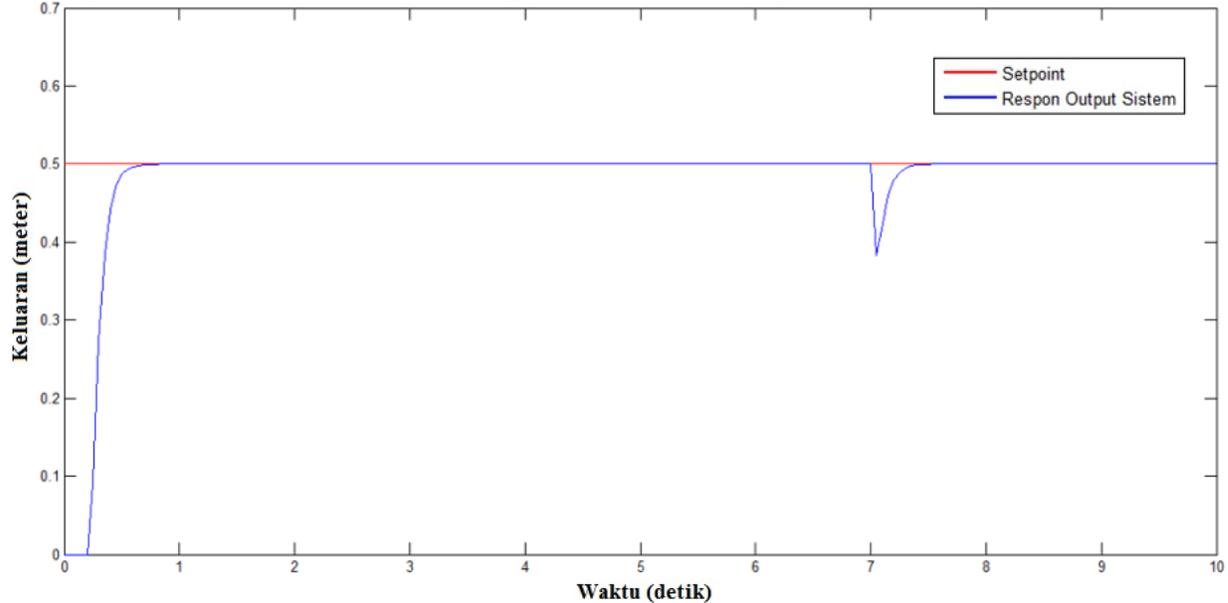
A. *Magnetic Levitation Ball* Untuk Posisi Tanpa Kendali



Gambar 7. Respon *Output* Sistem Tanpa Kendali Untuk Posisi

Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa respon *output* sistem tidak sesuai dengan *setpoint* yang diinginkan dan osilasi yang cukup besar, *error steady state* = 0.15m, dan *overshoot* = 148%, sehingga diperlukan suatu kendali untuk mengatasinya.

B. *Magnetic Levitation Ball* Untuk Pengendalian Posisi Dengan Kendali Adaptif STR-PID



Gambar 8. Respon *Output* Sistem Dengan Kendali Adaptif STR-PID Untuk Pengendalian Posisi

Dari Gambar 8 dapat dilihat bahwa respon *output* sistem sudah sesuai dengan *setpoint* yang diberikan sebesar 0.5m, $error\ steady\ state = 0^{\circ}C$ dan $overshoot = 0\%$. Sedangkan ketika diuji dengan diberi gangguan pada detik ke 7, respon *output* sistem bisa kembali lagi sesuai dengan *setpoint* yang diberikan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi dan analisa respon *output* sistem untuk pengendalian posisi pada *Magnetic Levitation Ball* menggunakan kendali STR-PID didapat hasil yaitu tidak lagi berosilasi dan bisa mengikuti *setpoint* yang diberikan sebesar 0.5m, $error\ steady\ state = 0^{\circ}C$, dan $overshoot = 0\%$.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih saya ucapkan kepada beberapa rekan yang telah membantu dalam menyelesaikan dan berkontribusi pada penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Kristanti, Desita Rini. "Revolusi Perkembangan Magnet Pada Sarana Transportasi Kereta Api Dengan Menggunakan Teknologi *MAGLEV*", Jurusan Pendidikan Guru, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, 2018
- [2] Hyung-Woo Lee, Ki-Chan Kim, and Ju Lee. "Review of Maglev Train Technologies", Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea, 2006.
- [3] Williams, Lance. "*Electromagnetic Levitation Thesis*", 2005.
- [4] Belikov, Juri, A. Gonzalez, Emmanuel, Tepljakov Alekse. Dkk. "Design of Retuning Fractional PID Controllers for a Closed-loop Magnetic Levitation Control System", Department of Computer Control, Tallinn University, Estonia, 2014.

- [5] Ahmad, Ishtiaq, Akram, Muhammad. “Nonlinear Model & Controller Design for Magnetic Levitation System”, Department of Civil Engineering, University of Engineering & Technology, Pakistan, 2011.
- [6] I. Setiawan. “Kontrol PID Untuk Proses Industri”. Alex Media Komputindo, 2008.
- [7] Wibowo, DwiBasuki. “ Pemodelan dan Simulasi Sistem Control Magnetic Lavitation Ball”. Universitas Diponegoro, 2012.
- [8] Khaled, A. M. Ali. “Modeling and Parameters Identification of A Magnetic Levitation Model”. The Islamic University of Gaza, 2009.
- [9] H.Mudia. “Perancangan dan Implementasi Kontroler PID Adaptif pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga fasa”.ITS, 2015.
- [10] E.Iskandar “Sistem Pengaturan Adaptif”. ITS, 2012.
- [11] N.Gamayanti. “Dasar Sistem Pengaturan”.ITS, 2012.