

Sistem Kendali Posisi Magnetic Levitation Ball Menggunakan Metode Sliding Mode Control (SMC)

Agus Priyanto

Jurusan Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Kampus ITS Keputih Sukolilo Surabaya,
Indonesia

E-mail: a.priyanto0502@gmail.com

Abstrak

Sistem Magnetic Levitation Ball memiliki peranan yang penting dalam dunia industri diantaranya sebagai sistem yang diaplikasikan pada kereta api yang bergerak melayang diatas rel dengan kecepatan tinggi (kereta MAGLEV),serta model sistem torowongan angin yang melayang . Permasalahan umum yang sering dihadapi sistem pengendali Magnetic Levitation Ball adalah munculnya gangguan tak pasti yang berasal dari dalam maupun luar sistem. Sliding Mode Control (SMC) merupakan salah satu metode kontrol yang bersifat sangat robust, sehingga mampu bekerja dengan baik pada sistem yang mempunyai ketidakpastian model atau parameter. Dari hasil diperoleh kesimpulan bahwa rancangan sistem pengendali dynamic SMC pada Magnetic Levitation Ball telah dapat diterapkan untuk mengendalikan posisi bola agar tetap stabil, secara umum pengendali dynamic SMC robust terhadap gangguan eksternal baik bernilai kecil maupun besar, serta terhadap gangguan internal baik dalam pengurangan maupun penambahan parameter dibanding dengan static SMC. Demikian pula pada pengendali dynamic SMC tidak memiliki osilasi yang berlebihan serta memiliki waktu respon yang cepat sehingga dapat memaksimalkan kinerja dari sistem posisi Magnetic Levitation Ball. Namun selain memiliki kelebihan, terdapat pula kekurangan pada metode ini, yaitu tidak dapat diterapkan pada jenis gangguan impulse besar.

Kata Kunci: Sistem Pengendali, *Magnetic Levitation Ball*, *Static* dan *Dynamic SMC*

1. PENDAHULUAN

Sistem pengendali pada suatu sistem semakin berkembang seiring dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi. Hal ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan masyarakat dan industri terhadap performansi terbaik suatu sistem. Sistem merupakan kombinasi beberapa komponen yang bekerja bersamaan dan melakukan suatu sasaran tertentu [Ogata,1996]. Pada umumnya, suatu sistem terdiri dari rangkaian plant dan sistem pengendali di dalamnya. Plant merupakan seperangkat peralatan (obyek fisik) yang digunakan untuk melakukan suatu operasi tertentu [Ogata, 1996].

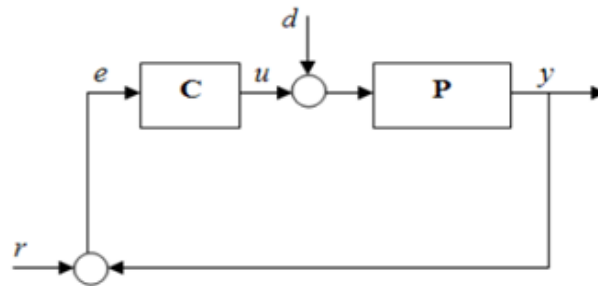
Bentuk aplikasi dari sistem pengendali sendiri dapat ditemukan pada Sistem Magnetic Levitation Ball. Dimana sistem ini memiliki peranan yang penting dalam dunia industri diantaranya sebagai sistem yang diaplikasikan pada kereta api yang bergerak melayang diatas rel dengan kecepatan tinggi (kereta MAGLEV),serta model sistem torowongan angin yang melayang. Magnetic Levitation Ball sendiri adalah suatu rangkaian sistem yang terdiri atas bola baja padat yang bersifat ferromagnetic (benda yang memiliki sifat kemagnetan yang paling kuat dan tahan lama) dimana akan melayang diatas permukaan suatu medium udara apabila diberi tenaga elektromagnet yang berasal dari kumparan elektromagnet. Karena bola baja ferromagnetic yang melayang,terkadang memiliki sifat yaitu sulit untuk dikendalikan posisinya . Maka diperlukan suatu pengendali yang dapat mengendalikan posisi bola baja terhadap tenaga elektromagnet yang diberikan pada bola baja tersebut.

Ada berbagai macam sistem pengendali diantaranya Proportional Integral Derrivative (PID), Sliding Mode Control (SMC), dan sebagainya. Hampir disetiap pengendali yang digunakan saat ini adalah pengendali PID (Passino,1998). Pada umumnya pengendali ini tidak dirancang untuk sistem nonlinear dengan banyak ketidakpastian (uncertainties). Dalam pengendalian sistem modern, dibutuhkan pengendali yang bekerja dengan baik (robust) pada kondisi dengan ketidakpastian yang besar (Perruquetti,2002). Ketidakpastian ini merupakan gangguan bagi sistem.

2. STUDI LITERATUR

a. Sistem Pengendali

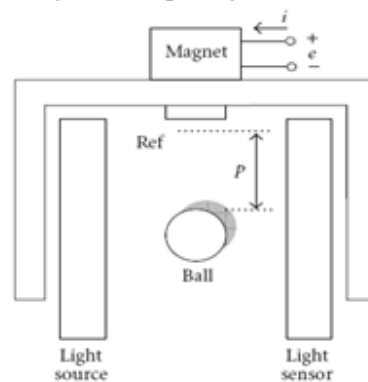
Secara umum, suatu sistem pengendalian dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram blok sederhana dari sistem lup tertutup

dengan r adalah reference point atau nilai yang diinginkan, d gangguan bagi sistem, e sinyal error, u control input, y keluaran sistem, C sistem pengendali, dan P adalah plant.

Magnetic levitation Ball adalah sebuah sistem yang terdiri atas bola baja ferromagnetic yang disuspensi dalam sebuah medan magnet oleh tegangan listrik dengan cara mengendalikan arus pada saat mengalir pada kumparan elektromagnet yang terdiri dari sejumlah lilitan tembaga dan posisi kumparan tepat berada diatas bola baja (Herlambang,2017). Pada sistem ini bola baja diasumsikan bergerak secara vertikal yaitu naik-turun dan berhenti tepat pada posisi melayang dari posisi bola saat diletakkan dalam kondisi awal. Gambar rancangan sistem *Magnetic Levitation Ball* dapat ditunjukkan seperti gambar berikut:



Gambar 2. Skema Magnetic Levitation Ball

Bagian-bagian dari Magnetic Levitation, yakni:

- Bola baja : Bagian yang dikontrol posisinya
- Kumparan elektromagnet : Bagian yang menghasilkan medan magnet
- Sumber tegangan magnet : Bagian yang menghasilkan arus listrik

- Sensor cahaya (*Light Sensor*) : Bagian yang mengukur ketinggian bola

b. *Sliding Mode Control* (SMC)

Df Pandang suatu sistem dinamis:

$$\dot{x}^{(n)} = f(x) + b(x)u \quad (1)$$

dimana u control input, $x = [x \ \dot{x} \ \dots \ x^{(n-1)}]^T$ merupakan vektor keadaan, $f(x)$ dan $b(x)$ merupakan fungsi terbatas. Jika x_d merupakan x yang diinginkan, maka *tracking error*-nya adalah

$$\tilde{x} = x - x_d \quad (2)$$

Fungsi *Switching* yaitu permukaan $S(t)$ di dalam ruang keadaan R^n , menurut [13] memenuhi persamaan:

$$S(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{x} = \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n-1}{k} \lambda^k \tilde{x}^{n-1-k} \quad (3)$$

dengan λ berupa konstanta positif. Dimana fungsi *switching* ini digunakan untuk menentukan besarnya nilai u agar memenuhi kondisi *sliding*.

Permukaan *sliding* (*sliding surface*) merupakan persamaan yang memenuhi (Herlambang and Nurhadi, 2017):

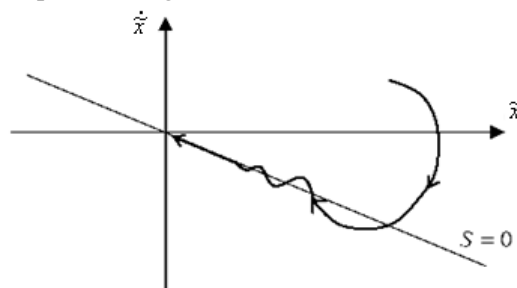
$$S(x, t) = 0 \quad (4)$$

Besar nilai *control input* pada SMC bergantung pada nilai S , sehingga memenuhi pertidaksamaan yang disebut kondisi *sliding*. Kondisi tersebut ditulis dalam bentuk sebagai berikut

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (5)$$

untuk suatu η konstanta positif mendekati nol.

Sliding mode berarti bahwa sekali trayektori keadaan \tilde{x} mencapai permukaan *sliding*, maka trayektori sistem akan bertahan di sana sambil meluncur ke titik asal bidang $\tilde{x}\tilde{x}$ secara independen dengan semua ketidakpastian. Gambar 3 menginterpretasikan kondisi *sliding* dari metode pengendalian SMC pada bidang $\tilde{x}\tilde{x}$.



Gambar 3. Kondisi *sliding*

Control Law yang digunakan pada SMC adalah persamaan :

$$u = \hat{u} - K \operatorname{sgn}(S) \quad (6)$$

c. Model Dinamika Magnetic Levitation

Dsf Model dinamika *Magnetic Levitation* diberikan sebagai berikut :

(Al-Muthairi,2004)

$$\frac{dp}{dt} = v \quad (7)$$

$$Ri + \frac{d(L(p)i)}{dt} = V \quad (8)$$

$$m \frac{dv}{dt} = mg - C \left(\frac{i}{p} \right)^2 \quad (9)$$

Kemudian dimisalkan beberapa variabel yang ada pada model *Magnetic Levitation Ball* yaitu variabel $x_1 = p, x_2 = v, x_3 = i, u = V$, serta $X = (x_1 \ x_2 \ x_3)^T$ adalah vektor keadaan, Sehingga model persamaan dari sistem *Magnetic Levitation Ball* dapat ditulis sebagai :

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (10)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = g - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \quad (11)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{R}{L} x_3 + \frac{2C}{L} \left(\frac{x_2 x_3}{x_1^2} \right) + \frac{1}{L} u \quad (12)$$

Persamaan (11) diturunkan kembali menjadi:

$$\begin{aligned} y^{(3)} = \ddot{x}_2 &= -\frac{2C}{m} \left(\frac{x_1^2 x_3 \dot{x}_3}{x_1^4} - \frac{x_1 \dot{x}_1 x_3^2}{x_1^4} \right) \\ &= -\frac{2C}{m} \left(\frac{x_3 \dot{x}_3}{x_1^2} - \frac{\dot{x}_1 x_3^2}{x_1^3} \right) = \\ &= -\frac{2C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1^2} \left(-\frac{R}{L} x_3 + \frac{2C}{L} \left(\frac{x_2 x_3}{x_1^2} \right) + \frac{1}{L} U \right) - \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} \right) \\ &= \frac{2C}{m} \left(\left(1 - \frac{2C}{L x_1} \right) \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R x_3^2}{L x_1^2} \right) - \frac{2C}{mL} \frac{x_3}{x_1^2} U \\ &= \frac{2C}{m} \left(\frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} - \frac{2C}{L} \frac{x_2 x_3^2}{x_1^4} + \frac{R x_3^2}{L x_1^2} \right) - \frac{2C}{mL} \frac{x_3}{x_1^2} U \end{aligned} \quad (13)$$

Persamaan (13) ini akan digunakan dalam merancang desain dari SMC. Sehingga nantinya dapat diperoleh bentuk pengendali posisi dari *Magnetic levitation*. Pemberian kontrol masukan (u(t)) diperoleh dari rancangan pengendali yang sudah terbentuk yaitu pengendali *static* dan *dynamic* SMC.

3. METODOLOGI

Metode yang digunakan pada Tugas Akhir dalam menyelesaikan permasalahan adalah

1. Studi Literatur
2. Pemodelan Sistem Magnetic Levitation Ball

3. Perancangan Pengendali Sistem posisi Magnetic Levitation Ball
4. Simulasi Hasil Perancangan
5. Analisis Hasil Simulasi
6. Penyimpulan Hasil Simulasi dan Pemberian Saran

4. PERANCANANGAN STATIC DAN DYNAMIC SMC

a. Perancangan pengendali static SMC

Perancangan pengendali *static* SMC dimulai dengan pembentukan fungsi *switching* S sebagai berikut dengan mengambil nilai $n=3$:

$$\begin{aligned}
 S(x, t) &= \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{(n-1)} e \\
 &= \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{(3-1)} e \\
 &= \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^2 e \\
 &= \frac{d^2 e}{dt^2} + 2\lambda \frac{de}{dt} + \lambda^2 e \\
 &= \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\lambda \frac{dy}{dt} + \lambda^2 y \\
 &= \ddot{y} + 2\lambda \dot{y} + \lambda^2 y
 \end{aligned}$$

Dengan memisalkan:

$$\lambda_1 = 2\lambda \text{ dan } \lambda_2 = \lambda^2$$

Sehingga fungsi *switching* menjadi:

$$S = \ddot{y} + \lambda_1 \dot{y} + \lambda_2 y \quad (14)$$

Permukaan *sliding*nya ($\dot{S} = 0$) adalah:

$$y^{(3)} + \lambda_1 \ddot{y} + \lambda_2 \dot{y} = 0 \quad (15)$$

Berdasarkan *control law* pada persamaan (6) yang memenuhi kondisi *sliding*, yaitu:

$$u = \hat{u} - K \operatorname{sgn}(S)$$

maka didapatkan *control input*

$$\hat{U} = -\frac{1}{g_1} \left(\hat{f}_1 + \lambda_1 \left(g_c - \frac{C}{m} \left(\frac{\hat{x}_3}{\hat{x}_1} \right)^2 \right) + \lambda_2 \hat{x}_2 \right) \quad (16)$$

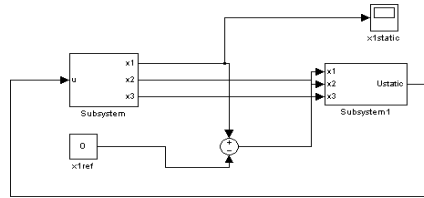
Nilai g_1 dan \hat{f}_1 adalah

$$\begin{aligned}
 \hat{f}_1(x) &= \frac{2C}{m} \left(\left(1 - \frac{2C}{Lx_1} \right) \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R x_3^2}{L x_1^2} \right) \\
 g_1(x) &= -\frac{2C x_3}{mL x_1^2}
 \end{aligned}$$

dan nilai K yang dirancang agar memenuhi persamaan (5) sebagai berikut:

$$K = \left[\max \left| \frac{\eta}{g_1} \right| \right] \quad (17)$$

Hasil perancangan *static* SMC pada Simulink berupa diagram blok ditunjukkan oleh gambar sistem lup tertutup dengan umpan balik adalah sebagai berikut:



Gambar 4. Diagram Blok Dinamika *Magnetic Levitation Ball* dengan Pengendali *Static* SMC.

b. Perancangan pengendali dynamic SMC

Dengan langkah yang sama pada pengendali *static* SMC dimulai dengan pembentukan fungsi *switching* S sebagai berikut serta mengambil nilai orde $n=4$

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \cdot e$$

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{4-1} \cdot e$$

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^3 \cdot e$$

$$S = \left(\frac{d^3}{dt^3} + 3\lambda \frac{d^2}{dt^2} + 3\lambda^2 \frac{d}{dt} + \lambda^3 \right) \cdot e$$

$$S = \frac{d^3 y}{dt^3} + 3\lambda \frac{d^2 y}{dt^2} + 3\lambda^2 \frac{dy}{dt} + \lambda^3 y$$

Sehingga fungsi *switching* menjadi:

$$S = y^{(3)} + 3\lambda \ddot{y} + 3\lambda^2 \dot{y} + \lambda^3 y \quad (18)$$

Dimana : $y^{(3)} = f_1(x) + g_1(x)U$,

Sehingga permukaan *slidingnya* ($\dot{S} = 0$) adalah:

$$\begin{aligned} \dot{f}_1(x) + \dot{g}_1(x)U + g_1(x)\dot{U} + b_1 y^{(3)} + b_2 \ddot{y} + b_3 \dot{y} &= 0 \\ \dot{f}_1 + \dot{g}_1 U + g_1 \dot{U} + b_1 (f_1 + g_1 U) + b_2 \ddot{y} + b_3 \dot{y} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

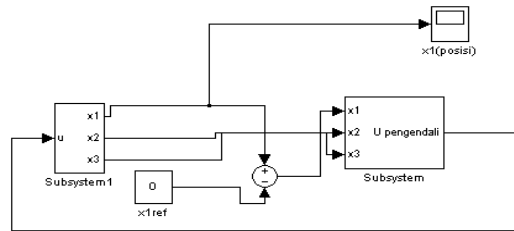
Berdasarkan *control law* pada persamaan (6) yang memenuhi kondisi *sliding*, didapat control input sebagai berikut:

$$U = -\frac{1}{(b_1 g_1 + \dot{g}_1)} (\dot{f}_1 + b_1 f_1 + b_2 \ddot{y} + b_3 \dot{y} + g_1 \dot{U}) \quad (20)$$

dan nilai K yang dirancang agar memenuhi persamaan (5) sebagai berikut:

$$K \geq \left[\max \left| \frac{\eta}{b_1 g_1 + \dot{g}_1} \right| \right] \quad (21)$$

Hasil perancangan *dynamic SMC* pada Simulink berupa diagram blok ditunjukkan oleh gambar sistem lup tertutup dengan umpan balik adalah sebagai berikut:



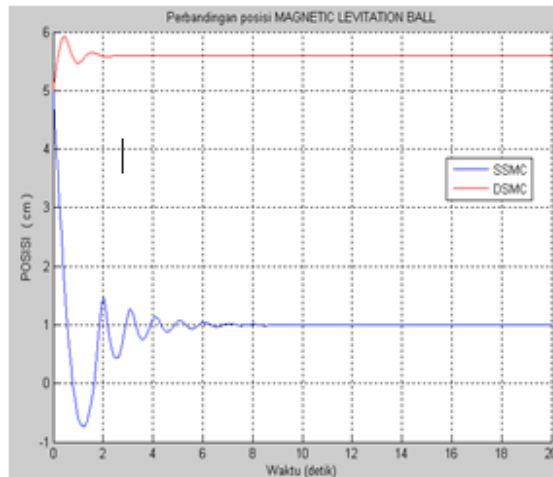
Gambar 5. Diagram Blok Dinamika *Magnetic Levitation Ball* dengan Pengendali *Dynamic SMC*

5. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dilakukan tiga macam simulasi, yaitu tanpa gangguan, dengan gangguan eksternal, dan gangguan internal. Hal ini untuk menguji sifat robust sistem pengendali yang telah dirancang terhadap ketidakpastian system

a. Simulasi tanpa gangguan

Pada simulasi ini diberikan nilai awal posisi bola yaitu 5 cm dari permukaan bidang datar yang diasumsikan sebagai permukaan meja, Parameter yang digunakan adalah massa bola=11,87 gram, $R= 28,7 \text{ Ohm}$, $L= 0,65 \text{ H}$, Konstanta Gravitasi(g)= 9.81 m/s^2 . Dari data tersebut diperoleh respon sistem sebagai berikut:



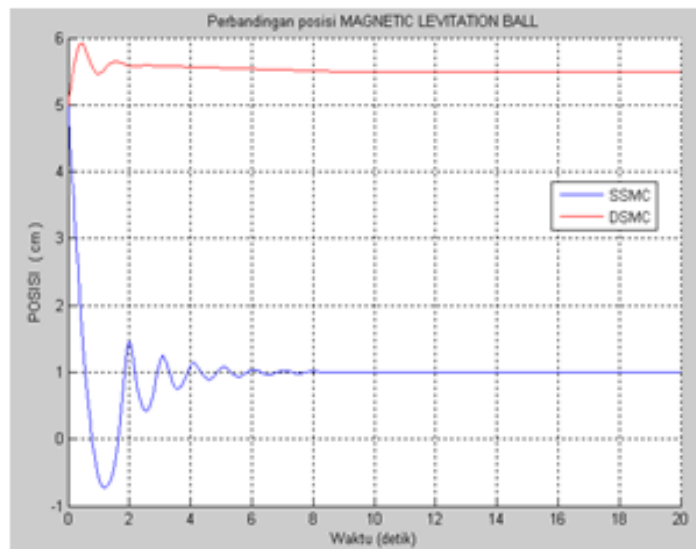
Gambar 6. Grafik Respon Posisi *Magnetic Levitation Ball* Tanpa Gangguan

Dengan posisi yang awal adalah 5 cm, terlihat bahwa posisi bola mulai stabil pada posisi sekitar 5,9 cm pada saat 3 detik dengan menggunakan pengendali *dynamic SMC*, sedangkan pengendali *static SMC* turun secara drastis dari posisi awal dengan beresilasi terlebih dahulu menuju ke posisi 1 cm diatas permukaan meja, baru kemudian pada detik ke-7 bola dapat stabil

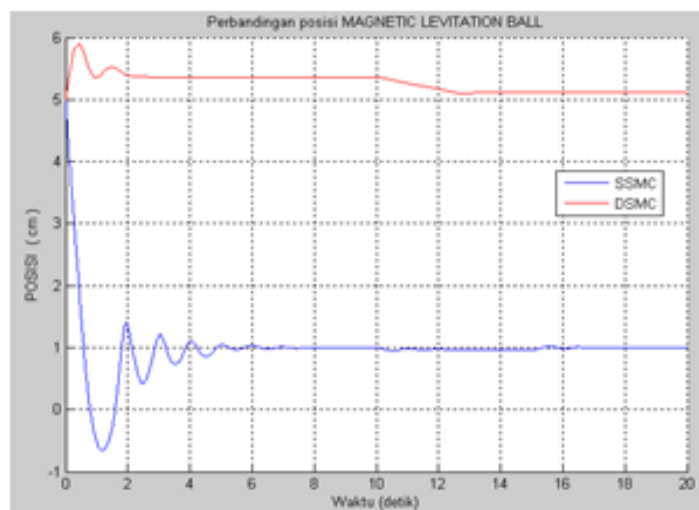
b. Simulasi dengan Gangguan Eksternal

Simulasi ini dilakukan dengan menambahkan suatu sinyal yang dianggap sebagai gangguan yang berasal dari luar sistem. Dalam simulasi ini akan digunakan sinyal impulse dan square serta fungsi sinus. Sinyal impulse bersifat sementara dan sinyal square bersifat kontinyu

pada selang tertentu, sementara fungsi sinus sebagai representasi gelombang arus listrik. Nilai awal yang digunakan adalah massa bola=11,87, $R= 28.7$ ohm $L= 0.65$ H, konstanta gravitasi(g)= 9.81 m/s². Dan posisi awal sebesar 5 cm. Dari data tersebut diperoleh respon sistem sebagai berikut:

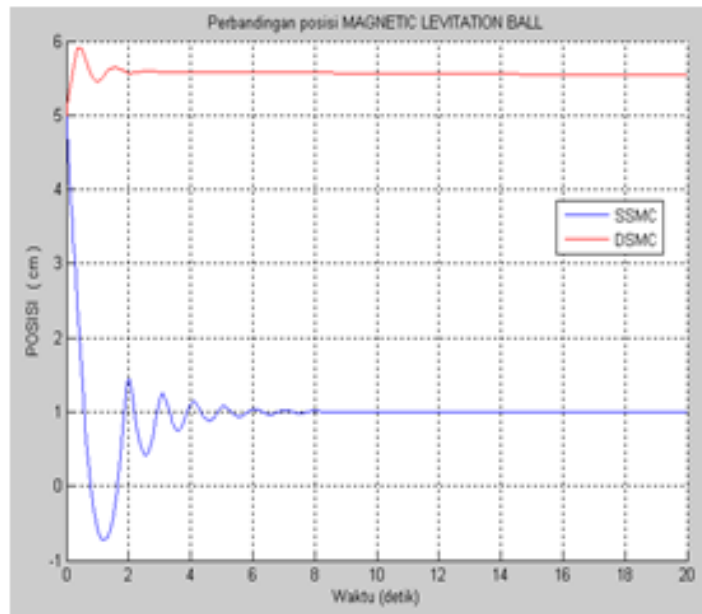


Gambar 7. Grafik Respon Posisi dengan Sinyal Impulse Kecil

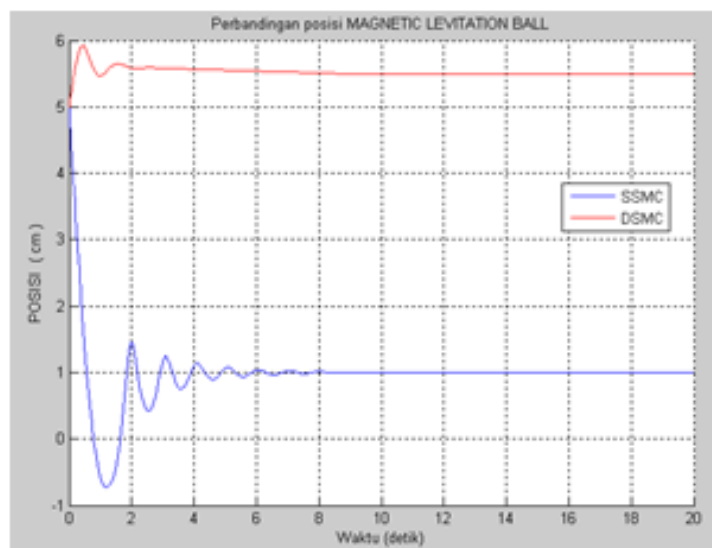


Gambar 8. Grafik Respon Posisi dengan Sinyal Impulse Besar

Gangguan eksternal berupa sinyal impulse kecil dengan Amplitudo 50 sekon tidak merubah posisi kestabilan bola dengan menggunakan dynamic dan static SMC (gambar 5.b). Sedangkan impulse besar dengan Amplitudo 100 sekon mulai berpengaruh pada posisi bola. Bola mulai tidak stabil turun pada posisi 5,2 cm dengan menggunakan pengendali dynamic SMC seperti pada Gambar 5.c begitu pula yang terjadi pada pengendali static SMC ada lonjakan. Hal ini berarti metode dynamic dan static SMC yang diterapkan pada sistem Magnetic Levitation Ball tidak dapat mengatasi adanya gangguan berupa sinyal impulse bernilai besar.

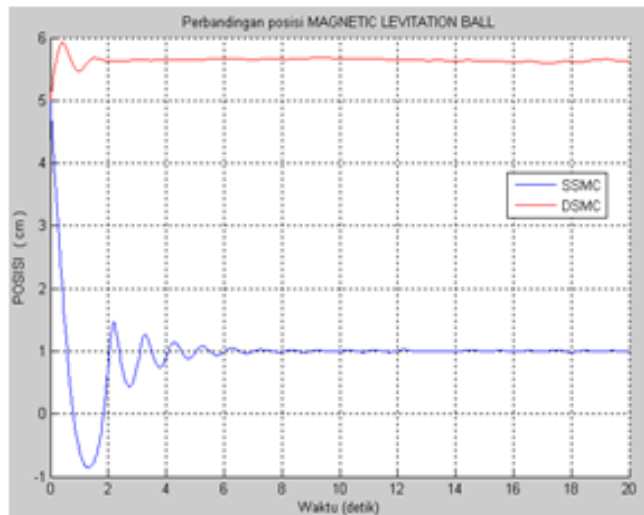


Gambar 9. Grafik Respon Posisi dengan Sinyal Square Kecil

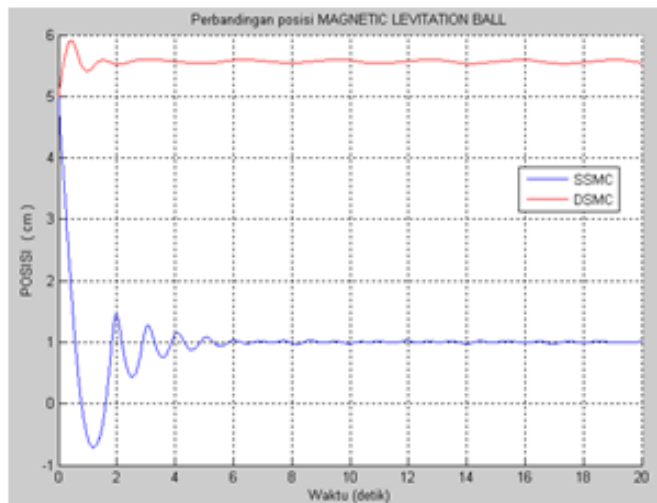


Gambar 10. Grafik Respon Posisi dengan Sinyal Square Besar

Gangguan eksternal berupa sinyal square kecil dan besar pada gambar 5.d dan 5.e tidak terlalu berpengaruh pada pencapaian posisi bola. Bola masih bisa mencapai posisi yang stabil sekitar 5,7 cm diatas permukaan meja dengan pengendali dynamic SMC. Sedangkan pengendali static SMC tetap pada posisi 1 cm diatas permukaan meja masih belum mampu untuk mengendalikan posisi bola yang dibuktikan oleh adanya osilasi. Hal ini berarti metode dynamic SMC yang diterapkan pada sistem Magnetic Levitation Ball dapat mengatasi adanya gangguan berupa sinyal square bernilai kecil dan besar.



Gambar 11. Grafik Respon Posisi dengan Fungsi Sinus Kecil

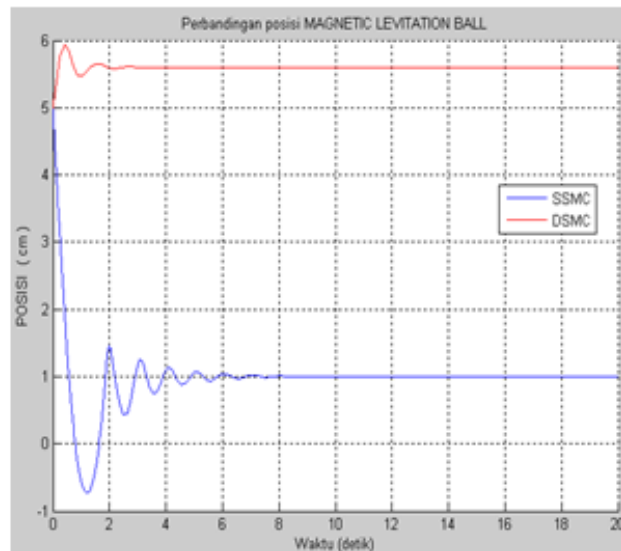


Gambar 12. Grafik Respon Posisi dengan Fungsi Sinus Besar

Pada gambar 5.f dan 5.g posisi bola menempati posisi stabil pada ketinggian sekitar 5,7 cm. Dan bentuk kestabilan bola direpresentasikan menyerupai bentuk gelombang sinus. Hal ini berarti metode dynamic SMC yang diterapkan pada sistem Magnetic Levitation Ball dapat mengatasi adanya gangguan berupa fungsi sinus baik bernilai besar maupun bernilai kecil. Sedangkan metode static SMC masih belum bisa mengatasi adanya gangguan fungsi sinus ini dengan masih muncul osilasi.

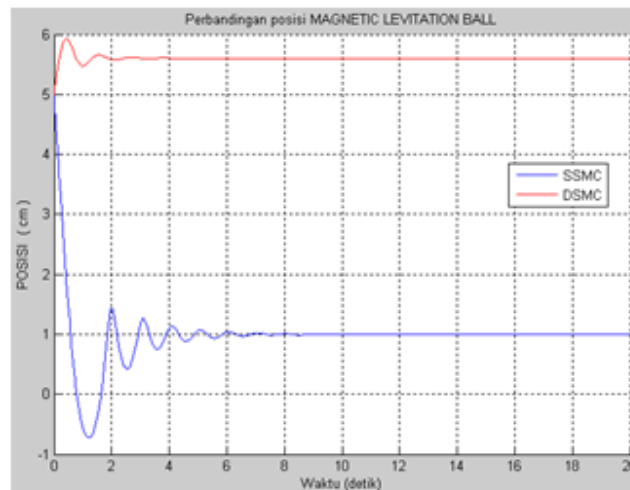
c. Simulasi dengan gangguan internal

Simulasi ini dilakukan dengan mengubah nilai parameter pada sistem Magnetic Levitation Ball untuk menguji sensitifitas sistem terhadap ketidakpastian dari dalam sistem. Parameter yang diberikan adalah $m=6.5\text{gram}$, $R=7,54\text{ Ohm}$, $L=0,226\text{ H}$ dari nilai parameter awal ($m=11,87$). Pengujian sistem pengendali terhadap gangguan internal ini dilakukan dengan memperbesar atau memperkecil parameter sesuai batasan yang diberikan.



Gambar 13. Grafik Respon Posisi dengan Parameter Diperkecil

Perubahan nilai parameter yang diperkecil, dapat mempengaruhi posisi bola yaitu berada pada ketinggian sekitar 5,7 cm turun 0.2 cm dari 5,9 cm (posisi dengan parameter awal) pada detik ke-3 dengan menggunakan dynamic SMC. Sedangkan static SMC tetap beresilasi di posisi 1 cm



Gambar 14. Grafik Respon Posisi dengan Parameter Diperbesar

Simulasi ini dilakukan dengan memperbesar nilai parameter dari nilai semula yaitu $m=35$ gram, $R=17$ Ohm, $L=0,87$ H. Perubahan nilai parameter yang diperbesar, posisi bola yaitu berada pada ketinggian yaitu 5,7 cm pada detik ke-4 dan tetap stabil, hal ini dapat dicapai dengan menggunakan pengendali dynamic SMC sedangkan pengendali static SMC belum dapat menunjukkan posisi kestabilan bola tetapi masih dijumpai adanya osilasi yang tinggi.

Kedua hal tersebut di atas dapat menunjukkan bahwa metode dynamic SMC yang diterapkan pada sistem Magnetic Levitation Ball dapat mengatasi gangguan internal berupa perubahan parameter yakni terlihat dari tidak adanya osilasi berlebihan yang biasanya terjadi pada sistem dengan pengendali konvensional dibanding pengendali static SMC yang tetap beresilasi.

6. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini diberikan kesimpulan dari analisis dan pembahasan yang telah dilakukan terhadap sistem pengendali static dan dynamic SMC yang digunakan pada Magnetic Levitation Ball. Selain itu, diberikan pula saran yang dapat dilakukan sebagai kelanjutan dari Tugas Akhir ini:

Kesimpulan

Dari analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada sistem pengendali posisi Magnetic Levitation Ball dengan metode dynamic dan static SMC diperoleh kesimpulan bahwa:

- a. Rancangan sistem pengendali dynamic SMC pada Magnetic Levitation Ball telah dapat diterapkan pada proses pengendalian bola saat berhenti pada posisi melayang dibandingkan dengan metode static SMC
- b. Untuk menyelesaikan dan merancang dynamic dan static SMC harus memenuhi kondisi sliding $\dot{S} \leq -\eta|S|$.
- c. Performansi sistem pengendali Magnetic Levitation Ball dengan SMC menghasilkan:
 - Secara umum pengendali dynamic SMC robust terhadap gangguan eksternal baik bersifat kecil maupun besar dibanding static SMC.
 - Pengendali dynamic SMC juga robust terhadap gangguan internal baik dalam pengurangan maupun penambahan parameter dibanding static SMC yang masih ada osilasi.
 - Tidak memiliki osilasi yang berlebihan serta memiliki waktu respon yang cepat sehingga dapat memaksimalkan kinerja dari sistem Magnetic Levitation Ball.

Selain itu dynamic SMC memiliki kekurangan yaitu:

- a. Diperlukan ketelitian dalam merancanginya.
- b. Tidak dapat menstabilkan posisi bola pada respon dengan gangguan berupa sinyal Impulse besar.
- c. Untuk sistem dinamis Magnetic Levitation Ball, masih memerlukan penyesuaian parameter dalam pelaksanaan pada kondisi sesungguhnya

Saran

Adapun saran dari penelitian ini untuk penelitian selanjutnya adalah diharapkan pada penelitian berikutnya agar diperoleh performansi yang lebih baik, dan dapat menggunakan metode lain seperti Fuzzy Logic Control (FLC) maupun kombinasi antara metode FLC dan SMC yang dikenal dengan Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC).

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] N.F. Al-Muthairi dan M. Zribi. Sliding Mode Control Of A Magnetic Levitation System. *Journal of Mathematical Problem in Engineering*. 2004; 2004(2): 93-107.
- [2] W. Barie dan J Chiasson. Linear and Nonlinear State-Space Controllers for Magnetic Levitation. *International Journal of System Science*. 2001; 27(11): 1153-1163.
- [3] Dolga Valer dan Lia. Modelling and Simulation Of A Magnetic Levitation System. *Fascicle of Management and Technological Engineering*. 2007; VI (XVI).
- [4] T. Herlambang. 2017. Estimasi Posisi Magnetic Levitation Ball Menggunakan Metode Akar Kuadrat Ensemble Kalman Filter (AK-EnKF). *Rekayasa, Energi, Manufaktur Jurnal*. 2017; 2 (1). ISSN: 2528-3723

- [5] T. Herlambang. 2017. Desain Sistem Kendali Gerak Surge, Sway dan Yaw pada Autonomous Underwater Vehicle dengan Metode Sliding Mode Control (SMC). *Journal Of Mathematics and Its Applications (LIMITS)*. 2017; 14(1): 53-60.
- [6] T. Herlambang and H. Nurhadi. Design of a Sliding PID Controller for The Surge and Roll Motion Control of UNUSAITS AUV. *International Journal of Computing Science and Applied Mathematics*. 2017; 3(2). E-ISSN:2477-5401.
- [7] K. Ogata. Teknik Kontrol Otomatik: Sistem Pengaturan Jilid II. Jakarta: Penerbit Erlangga. 1985.
- [8] K. Ogata. Teknik Kontrol Automatik Jilid 1 edisi kedua. Jakarta: Penerbit Erlangga. 1996.
- [9] S. Pakpahan. Kontrol Otomatik: Teori dan Penerapan. Jakarta: Penerbit Erlangga. 1987.
- [10] W. Perruquetti dan J.P. Barbot. Sliding Mode Control in Engineering. New York: Marcel Dekker, Inc. 2002.
- [11] R. Rizan. Analisis dan Perancangan Sistem pengendali Pada Inverted Pendulum Menggunakan Metode Fuzzy Sliding Mode Control. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Matematika, ITS. 2008.