

Analisis Sistem Kendali Hybrid Sliding Mode Control (SMC)-Fuzzy pada Inverted Pendulum

Ahmad Faizal, Markus Sitepu

Jurusan Teknik Elektro UIN Suska Riau

Jl. HR Soebrantas No. 155 Panam Pekanbaru (0761) 589026, fax Institusi

E-mail: ahmad.faizal@uin-suska.ac.id, markus.sitepu@students.uin-suska.ac.id

ABSTRAK

Sistem pendulum terbalik (*inverted pendulum*) adalah sistem yang mensimulasikan sebuah mekanisme kendali untuk mengatur permasalahan kestabilan, Pendulum terbalik merupakan salah satu *plant* yang dinamis dan nonlinier. *Inverted Pendulum* memiliki sifat karakter yang nonlinier, sehingga perlu dikendalikan. salah satu pengendali yang cocok untuk pengendalian system pendulum adalah *sliding mode control*. Keunggulan utama dari SMC adalah memiliki sifat yang kokoh terhadap variasi parameter, *external disturbance*, dan memiliki respon yang cepat dalam mencapai kestabilan. Tetapi, dalam pengendali SMC memiliki kekurangan yaitu terjadinyachattering yang terjadi pada pengendali *sliding mode*. Oleh karena itu dibutuhkan satu pengendali yang dapat mengatasi *chattering* pada pengendali SMC yaitu, logika *fuzzy* dikategorikan dalam kontrol cerdas (*intelligent control*). Unit logika *fuzzy* memiliki kemampuan menyelesaikan masalah perilaku sistem yang kompleks, yang tidak dimiliki oleh kontroler konvensional. Pada penelitian ini, SMC sebagai pengendali dan *fuzzy* untuk menghilangkan efek *chattering*. Dari hasil pengujian, pengendali hybrid SMC-*fuzzy* mampu menghilangkan efek *chattering* pada pengendali SMC dengan konstanta waktu 0,3812 detik, Rise Time 1,1224 detik, Settling Time 1,906 detik, Delay Time 0,947 detik, Error Steady State (Ess) -0,2188 rad, dan Overshoot 0%.

Kata kunci : *chattering*, *inverted pendulum*, pengendali SMC, pengendali logika *fuzzy*, pengendali SMC-*fuzzy*

ABSTRACT

The inverted pendulum system is a system that simulates a control mechanism to regulate the stability problem. The inverted pendulum is one of a dynamic and nonlinear plant. Inverted Pendulum has nonlinear character traits, so it needs to be controlled. one of the controllers that is suitable for pendulum system control is sliding mode control. The main advantage of SMC is that it has strong properties against parameter variations, external disturbance, and has a fast response in achieving stability. However, in the SMC controller has a deficiency that is the occurrence of chattering that occurs in the sliding mode controller. Therefore, one controller who can handle the chattering of the SMC controller is, fuzzy logic is categorized in intelligent control. Fuzzy logic units have the ability to solve complex system behavior problems, which are not owned by conventional controllers. In this research, SMC as the controller and fuzzy to eliminate the effect of chattering. From the test result, SMC-fuzzy hybrid controller able to eliminate the effect of chattering on SMC controller with time constant 0,3812 second, Rise Time 1,1224 sec, Timing Time 1.906 second, Delay Time 0,947 seconds, Error Steady State (Ess) -0.2188 rad, and 0% Overshoot.

Keywords: *chattering*, *fuzzy logic controller*, *hybrid SMC-fuzzy controller*, *inverted pendulum*, *SMC controller*

Corresponding Author:

Ahmad Faizal,

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi,

UIN Sultan Syarif Kasi Riau

Email: ahmad.faizal@uin-suska.ac.id

1. Pendahuluan

Sistem pendulum terbalik (*inverted pendulum*) adalah sistem yang mensimulasikan sebuah mekanisme kontrol untuk mengatur permasalahan kestabilan. Pendulum terbalik merupakan salah satu *plant* yang dinamis dan nonlinier, sehingga pengaturannya menjadi rumit apabila digunakan sistem kontrol yang konvensional [1]. Terdapat tiga permasalahan kontrol pada sistem pendulum, yaitu *swing-up*, *stabilisasi*, dan *tracking*. *Swing-up* adalah usaha yang dilakukan untuk mengayunkan batang pendulum dari posisi menggantung ke posisi terbaliknya. *Stabilisasi* adalah usaha yang dilakukan untuk menjaga batang pendulum tetap stabil pada posisi terbaliknya. *Tracking* adalah usaha yang dilakukan untuk memaksa sistem pendulum bergerak mengikuti sinyal referensi dengan tetap mempertahankan batang pendulum pada posisi terbaliknya [2]. Suatu sistem non-linear seperti sistem pendulum, apabila tidak di kendalikan akan mempengaruhi kestabilan sistem dan tidak memiliki keseimbangan yang pasti. Oleh karena, maka dibutuhkan suatu metode kontrol yang bersifat *robust* untuk menjaga kestabilan.

Inverted pendulum merupakan salah satu sistem *non-linear* yang menjelaskan tentang masalah kestabilan. *InvertedPendulum* memiliki sifat karakter yang sangat tidak stabil sehingga untuk dapat mengendalikannya diperlukan teknik kendali yang tidak mudah dibandingkan dengan teknik kendali pada sistem yang linier dan stabil, permasalahan yang diselesaikan dalam penelitian ini [3] adalah *tracking*, dan menghilangkan efek *chattering*.

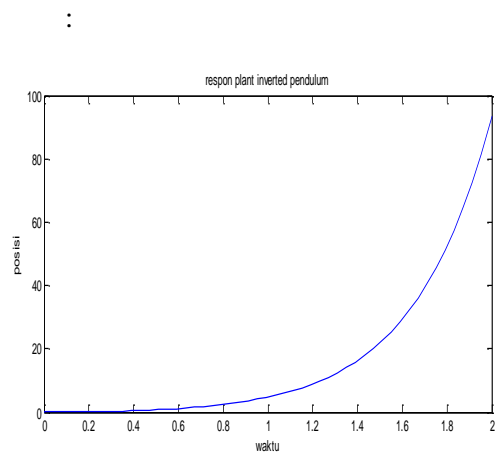
Pada pengendali SMC memiliki kekurangan yaitu terletak pada *chattering* yang tidak bisa dihilangkan sehingga mampu mengakibatkan terjadinya *overshoot*, salah satu pengendali yang mampu mengendali yang mampu menghilangkan *Chattering* adalah pengendali *fuzzy*. Pada penelitian ini metode yang digunakan metode *sugeno* dengan pengendali hybrid SMC-*fuzzy* diharapkan mampu mengatasi metode gangguan *chattering* pada pengendali SMC.

2. Metodologi Penelitian

Dalam penelitian ini ada beberapa tahapan yang penulis lakukan dalam analisis metode *sugeno* pada *inverted pendulum* dengan menggunakan pengendali *hybrid SMC* dan *fuzzy* yang dilakukan menggunakan aplikasi Matlab R2013a.

2.1 Pemodelan Inverted Pendulum [3]

Berdasarkan penelitian pada putranto hadi utomo . pendulum terbalik/kereta diuji secara *open loop* dan kemudian hasil dari respon *plant* yang terbaca oleh *software MATLAB* ditampilkan pada komputer dengan diberikan sinyal *step* berupa *set point* dan kemudian diberikan tanpa beban atau gangguan [9]. Dari penelitian yang dilakukan maka didapatkan hasil respon seperti gambar (3.2) berikut.



Gambar 2.1 hasil open loop inverted pendulum/terbalik

Dari hasil simulasi yang diatas adalah menggunakan rumus persamaan dibawah ini yaitu :

$$\begin{aligned} \frac{\theta(s)}{-U(s)} &= \frac{1}{Ml s^2 - (M+m)g} \\ &= \frac{1}{Ml \left(s + \sqrt{\frac{M+m}{Ml}} g \right) \left(s - \sqrt{\frac{M+m}{Ml}} g \right)} \\ &= \frac{1}{2.0,5 \left(s + \sqrt{\frac{2+0,1}{2.0,5}} 9,8 \right) \left(s - \sqrt{\frac{2+0,1}{2.0,5}} 9,8 \right)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{1 \left(s + \sqrt{\frac{2,1}{2,5}} 9,8 \right) \left(s - \sqrt{\frac{2,1}{2,5}} 9,8 \right)} \\
 &= \frac{1}{1 \left(s + \sqrt{0,84 \cdot 9,8} \right) \left(s - \sqrt{0,84 \cdot 9,8} \right)} \\
 &= \frac{1}{1 \left(s + \sqrt{8,232} \right) \left(s - \sqrt{8,232} \right)} \\
 &= \frac{1}{1 \left(s + \sqrt{8,232} \right) \left(s - \sqrt{8,232} \right)} \\
 &= \frac{1}{1 \left(s + 2,86914621447 \right) \left(s - \sqrt{2,86914621447} \right)} \\
 \frac{\theta(s)}{-U(s)} &= \frac{1}{s^2 - 8,232} \\
 (2.1)
 \end{aligned}$$

2.2 Desain pengendali SMC[4]

Untuk pengendali SMC. Fungsi transfer pada beban minimal akan dimisalkan menjadi variabel tetap agar lebih mudah dalam mendesain pengendali sehingga fungsi penghantar plant ditentukan dengan persamaan berikut:

$$G(S) \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{as^2 + bs + 1} \quad (2.2)$$

Dimana:

$$\begin{aligned}
 k &= 1 \\
 a &= 1 \\
 b &= 0 \\
 c &= -8,232
 \end{aligned}$$

Dari *transfer function* dapat dipresentasikan kedalam bentuk persamaan diferensial, dengan asumsi nilai awal adalah 0.

$$\begin{aligned}
 ax + bx + cy &= Ku \\
 ax &= -bx - cy + Ku
 \end{aligned}$$

Didefinisikan:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= y \rightarrow \dot{x}_1 = \dot{y} = x_2 \\
 x_2 &= \dot{y} \rightarrow \dot{x}_2 = \ddot{y} = \ddot{x}_2
 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Dan didapatkan:

$$\begin{aligned}
 \ddot{y} &= -\frac{b}{a}\dot{y} - \frac{c}{a}y + \frac{k}{a}u \\
 \ddot{y} &= -\frac{b}{a}x_2 - \frac{c}{a}x_1 + \frac{k}{a}u \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

Lalu diambil sinyal *error* sebagai variabel *state*

$$\begin{aligned}
 x_1 &= e \rightarrow \dot{x}_1 = \dot{e} \\
 x_2 &= \dot{x}_1 = \dot{e} \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

Persamaan pada sinyal *error* dinyatakan:
 $e = r - y$

(2.9)

Dan didapatkan

$$x_1 = e = r - y \rightarrow y = r - x_1 \quad (2.10)$$

Karena sistem bersifat regulator maka didapat:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 = \dot{r} - \dot{y} \rightarrow \dot{y} = \dot{x}_1 \\
 \ddot{x}_1 &= \ddot{x}_2 = \dot{r} - \ddot{y} \rightarrow \ddot{y} = \ddot{x}_1 \\
 \dot{x}_1 &
 \end{aligned}$$

(2.11)

Tabel 2.1 parameter sistem inverted pendulum terbalik yang di pakai adalah ;

Parameter	Simbol	Nilai
Massa kereta	M	2 kg
Massa pendulum	M	0.1 kg
Panjang pendulum	l	0,5 m
Gravitasi	g	9,8 m/s ²

Substitusikan persamaan (2.9) dan (2.10) pada persamaan (2.4), sehingga didapatkan:

$$\ddot{x}_2 = -\frac{b}{a}x_1 - \frac{c}{a}(r - x_1) + \frac{k}{a}u = -\frac{b}{a}x_2 - \frac{c}{a}x_1 + \frac{k}{a}u$$

Sehingga didapatkan persamaan *state-space*:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{c}{a} & -\frac{b}{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k}{a} \end{bmatrix} u. \quad (2.13)$$

Didefinisikan suatu permukaan luncur:

$$\begin{aligned}
 \dot{\sigma}_s &= 0 \\
 s(\alpha \dot{x}_2 + \dot{x}_2) &= 0
 \end{aligned}$$

Maka dapat dicari sinyal kendali *ekivalen* dengan asumsi $U_n = 0$:

$$\alpha x_2 + \left(-\frac{b}{a}x_2 - \frac{c}{a}x_1 + \frac{k}{a}U \right) = 0 \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned}
 -\frac{c}{a}x_1 + \left(\alpha - \frac{b}{a}\right)x_2 - \frac{k}{a}U_{eq} &= 0 \\
 \frac{k}{a}U_{eq} &= -\frac{c}{a}x_1 + \left(\alpha - \frac{b}{a}\right)x_2 \\
 U_{eq} &= \left(-\frac{c}{a}x_1 + \left(\alpha - \frac{b}{a}\right)x_2\right)\frac{a}{k} \\
 U_{eq} &= \frac{-cx_1 + (\alpha a - b)x_2}{k}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

Setelah ditemukan sinyal kendali ekivalen maka dapat dicari sinyal kendali natural:

$$\begin{aligned}
 \dot{\sigma}_s &= \alpha x_2 + \left(-\frac{b}{a}x_2 - \frac{c}{a}x_1 + \frac{k}{a}U\right) \\
 \dot{\sigma}_s &+ \left(-\frac{b}{a}x_2 - \frac{c}{a}x_1 + \frac{k}{a}(U_{eq} + U_n)\right) \\
 \dot{\sigma}_s &= \left(-\frac{c}{a}x_1 + \left(\alpha - \frac{b}{a}\right)x_2\right) - \left(\frac{k - cx_1 + (a - b)x}{a k}\right) \\
 \dot{\sigma}_s &= \left(-\frac{c}{a}x_1 + \left(\alpha - \frac{b}{a}\right)x_2\right) - \left(-\frac{c}{a}x_1 + \left(\alpha - \frac{b}{a}\right)x_2\right) \\
 \dot{\sigma}_s &= -\frac{k}{a}U_n
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Berdasarkan pada syarat kestabilan lyapunov pada persamaan 3.16 maka dipilih :

$$\begin{aligned}
 \dot{\sigma}_s &= -\frac{k}{a}U_n \\
 -\eta \cdot \text{sign}(\sigma) &= -\frac{k}{a}U_n \\
 U_n &= \frac{a}{k}\eta \cdot \text{sign}(\sigma)
 \end{aligned}$$

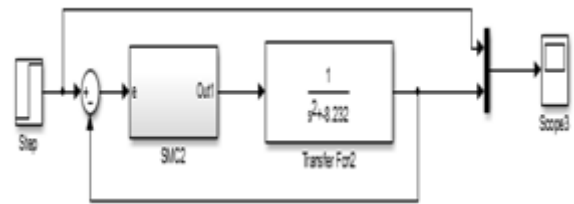
Dimana $\eta > 0$ (Kostanta positif).

Dengan demikian didapat sinyal kendali total U yaitu:

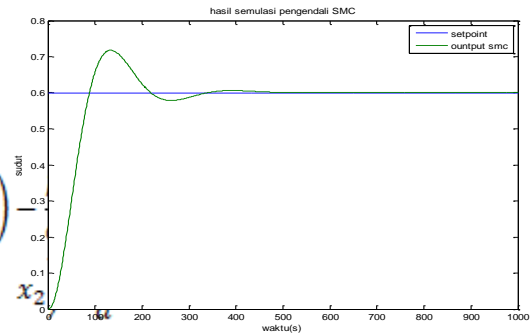
$$\begin{aligned}
 U &= U_{eq} + U_n \\
 U &= \frac{-cx_1 + (\alpha a - b)x_2}{k} + \frac{a}{k}\eta \cdot \text{sign}(\sigma) \\
 U &= \frac{1}{k}(-cx_1 + (\alpha a - b)x_2 + a \cdot \eta \cdot \text{sign}(\sigma))
 \end{aligned}$$

Pada *diskontinyu signum* diubah menjadi fungsi *kontinyu saturasi* dengan tujuan agar menghilangkan *chattering* pada pengendali *sliding mode*. Sehingga didapatkan persamaan:

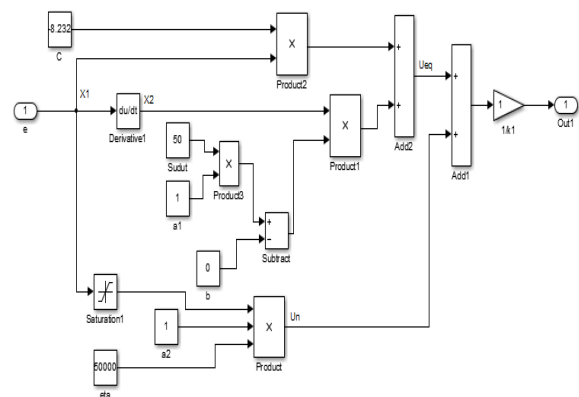
$$U = \frac{1}{k}(-cx_1 + (\alpha a - b)x_2 + a \cdot \eta \cdot \text{sat}(\sigma))$$



Gambar 2.2 Diagram blok kerja pengendali sliding mode control (SMC) pada plant.



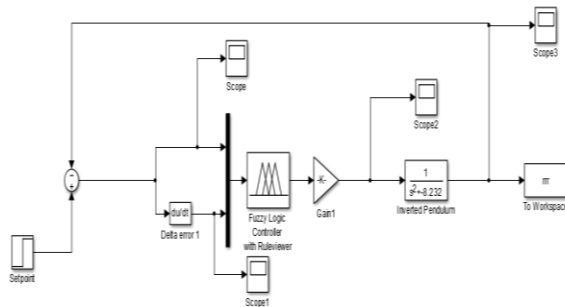
Gambar 2.3 Hasil Respon SMC Pada Plant Inverted Pendulum tanpa gangguan



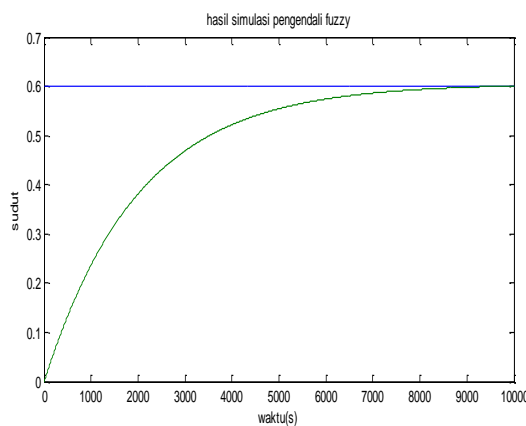
Gambar 2.4 Blok pengendali SMC (2.17) Pada Gambar 2.4 Merupakan hasil desain pemodelan pada kendali SMC menggunakan Simulink Matlab R2013a.

2.3 Desain pengendali fuzzy[5]

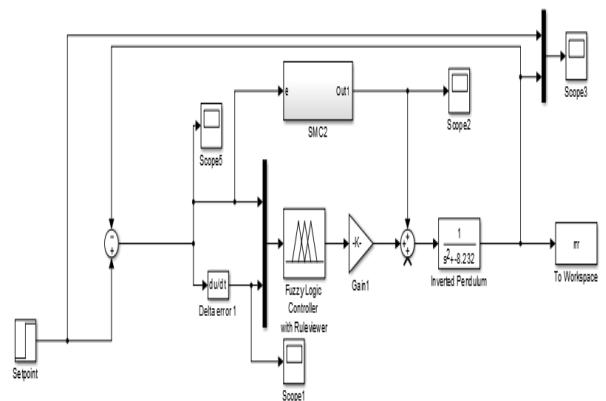
Pada gambar dibawah adalah desain pengendali fuzzy dalam mengatasi gangguan pada inverted pendulum, peran pengendali fuzzy dalam ini adalah untuk mengatasi pengendali sliding mode control (SMC) dimana pengendali (2.19) mempunyai kelemahan yaitu Chattering yang dapat mengganggu kestabilan sistem dan beresilainya sinyal kendali dengan kecepatan tinggi. Oleh sebab itu pengendali fuzzy di gunakan disini untuk mengatasi atau mengurangi gangguan Chattering.



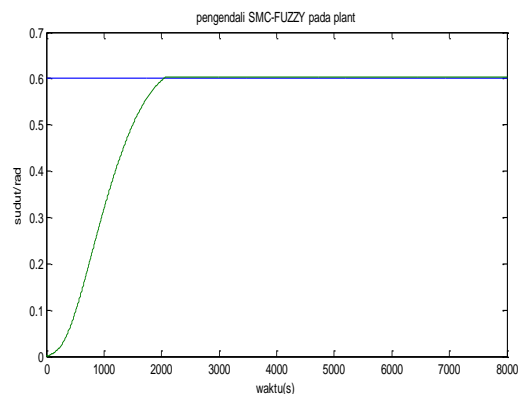
Gambar 2.5 Diagram blok kerja pengendali Fuzzy pada inverted pendulum
 Pada Gambar 2.5 Merupakan bentuk umum pemodelan pada kendali fuzzy yang dirubah menjadi blok-blok menggunakan SimulinkMatlab R2013a.



Gambar 2.6 Respon setpoint tracking 0.6 rad menggunakan pengendali fuzzy pada pendulum



Gambar 3.1 Blok diagram Simulink inverted pendulum menggunakan pengendali SMC-fuzzy



Gambar 3.2 Respon setpoint tracking 0.6 rad menggunakan pengendali SMC-fuzzy.

3. Hasil dan Analisa

Hasil dan analisa dilakukan berdasarkan hilangnya sinyal *chattering* pada pengendali SMC Berdasarkan Overshoot.

3.1 Analisis Pengendali SMC-Fuzzy pada Pengendalian Tracking dalam Pencapaian Setpoint (Setpoint Tracking) pada Inverted Pendulum.

Pengujian pengendali SMC-fuzzy dilakukan untuk melihat kemampuan pengendali SMC-fuzzy dalam mengendalikan tracking terhadap perubahan setpoint yang terjadi pada inverted pendulum.

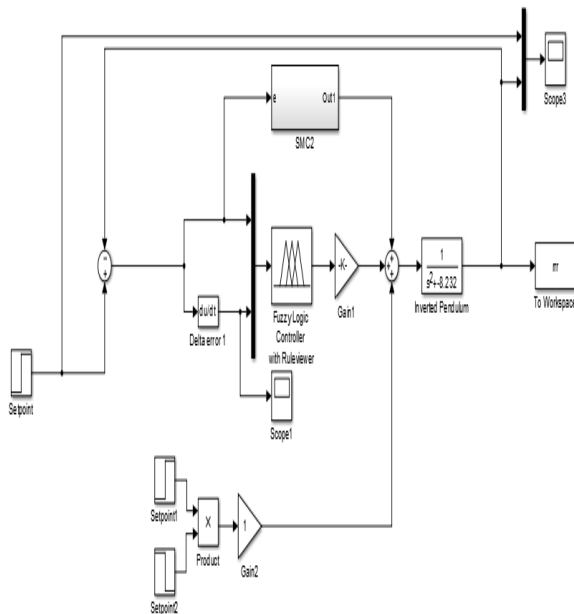
Gambar 3.2 merupakan hasil simulasi respon keluaran tracking menggunakan pengendali SMC-fuzzy dengan nilai setpoint yang diberikan yaitu 0.6 rad. Dari gambar tersebut dapat dianalisa bahwa respon keluaran tracking berdasarkan nilai parameter identifikasi sistem yang diperlihatkan pada tabel 3.1 dengan nilai setpoint 0.6 dari waktu 0 – 5 detik.

Tabel 3.1 Hasil analisa respon transien pengendali SMC-fuzzy

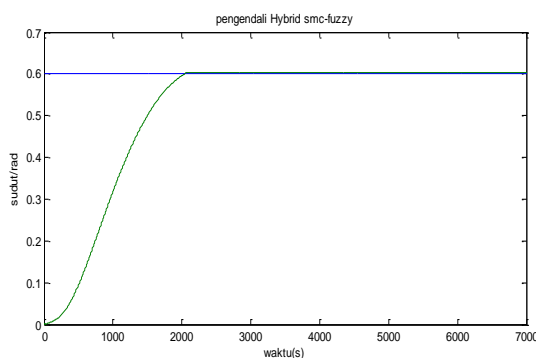
Parameter	SMC-Fuzzy
Time Constant (τ)	0,3812 detik
Rise Time (5%-95%)	1,1224 detik
Settling Time ($\pm 3\%$)	1.906 detik
Delay Time ($\pm 3\%$)	0,947 detik
Error Steady State (E_{ss})	-0,2188 rad
Overshoot	0%

3.2 Analisis Kekokohan Terhadap Gangguan (*Disturbance Rejection*) pada Sinyal Kendali *Tracking* Pengendali Hybrid SMC-Fuzzy

Pengujian pengendali SMC-fuzzy dilakukan untuk melihat kemampuan pengendali SMC-fuzzy dalam mengendalikan *tracking* dan mengatasi gangguan yang terjadi pada *inverted pendulum*. Nilai gangguan yang digunakan pada simulasi ini yaitu pada detik ke 2 dan ke 3



Gambar 3.3 Blok diagram Simulink *inverted pendulum* menggunakan pengendali SMC-fuzzy dengan gangguan.



Gambar 3.4 Respon *disturbance rejection* *inverted pendulum* menggunakan pengendali SMC-fuzzy dengan gangguan.

Gambar 3.4 merupakan hasil simulasi respon keluaran menggunakan pengendali

SMC-fuzzy dengan gangguan pada detik ke 1 dan 2. Dari gambar diatas, dapat dianalisa bahwa respon keluaran pengendali SMC-fuzzy tidak mengalami perubahan dan pengendali fuzzy mampu menghilangkan efek *chattering* yang terjadi pada respon keluaran SMC.

4. Kesimpulan.

Berdasarkan Analisa respon waktu didapatkan.

1. Dari ketiga pengendali, pengendali smc memiliki performansi yang lebih baik daripada pengendali *fuzzy* dan SMC-fuzzy pada respon transien. Tetapi pengendali smc memiliki overshoot yang besar dan terjadi *chattering*. Sementara itu, pengendali fuzzy tidak memiliki overshoot tapi lambat dalam respon transien dan tidak kokoh terhadap gangguan. Oleh karena itu, SMC-fuzzy merupakan pengendali yang paling baik karena respon transien yang cepat, overshoot yang tidak terlalu besar, tidak ada *chattering* dan kokoh terhadap gangguan.

2. Pengendali SMC-fuzzy berhasil mendapatkan performansi kendali yang baik menggunakan metode *sugeno* dengan rentang nilai yaitu $-1:x:1$ untuk input Error (E), $-1:x:1$ untuk input Change Error (CE), $[-2, -1, 0, 1, 2]$ untuk output sinyal kendali (u), dan $\eta = 3000$. Pengendali SMC-fuzzy memiliki performansi transien yang lebih baik dibandingkan pengendali *fuzzy* yaitu dengan konstanta waktu 0,3812 detik dan *error steady state* -0.2188 rad. Namun, pengendali SMC memiliki performansi transien yang lebih baik dibandingkan pengendali SMC-fuzzy yaitu dengan konstanta waktu 0,029 detik dan *error steady state* 0,001 rad.

Pengendali SMC-fuzzy memiliki performansi *steady state* yang lebih baik dan mampu mengatasi gangguan yang terjadi dibandingkan pengendali SMC dan *fuzzy*

Berdasarkan hasil dan analisa, maka didapatkan bahwa pengendali SMC cepat dalam mencapai *setpoint* pada *plant* *inverted pendulum*, tetapi pengendali SMC memiliki overshoot yang besar dan terjadi *chattering*. Sementara pengendali *fuzzy* mampu menghilangkan overshoot pada *plant* *inverted pendulum*, tetapi lambat dan tidak kokoh dalam menghadapi gangguan. Oleh karena itu, pengendali SMC-fuzzy

yang dirancang memiliki kemampuan dari kombinasi kedua pengendali yaitu cepat dalam mencapai *setpoint* dan mampu menghilangkan *chattering* pada output *plant inverted pendulum*.

Daftar Pustaka

- [1] Reza Dwi Imami “*Desain Kontrol Inverted Pendulum Dengan Metode Kontrol Robust Fuzzy*” Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.
- [2] .Niora Fatimah Tanzania, Trihastuti Agustinah,dkk. “*Stabilisasi Pada Sistem Pendulum-Kereta Dengan Menggunakan Metode Fuzzy-Sliding Mode Control*” JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 3, No. 1, ISSN: 2337-3539,2014.
- [3] Katsuhiko Ogata “*Modern Control Engineerring*” Edisi Kelima,2013.
- [4] Ahmad faizal,dkk.”*Perancangan Pengendali Kecepatan Motor DC SHUNT Menggunakan Metode Sliding Mode Control (SMC) Dan Proposional Integral Derivative(PID)*”Laporan penelitian, jurusan teknik elektro, universitas UIN, pekanbaru,2015
- [5] .Andri Ashfahani, Trihastuti Agustinah, Achmad Jazidie,dkk.”*Kontrol Tracking pada Sistem Pendulum Terbalik Berbasis Model Fuzzy Takagi-Sugeno Menggunakan Pendekatan BMI*” Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember,Surabaya,2012