

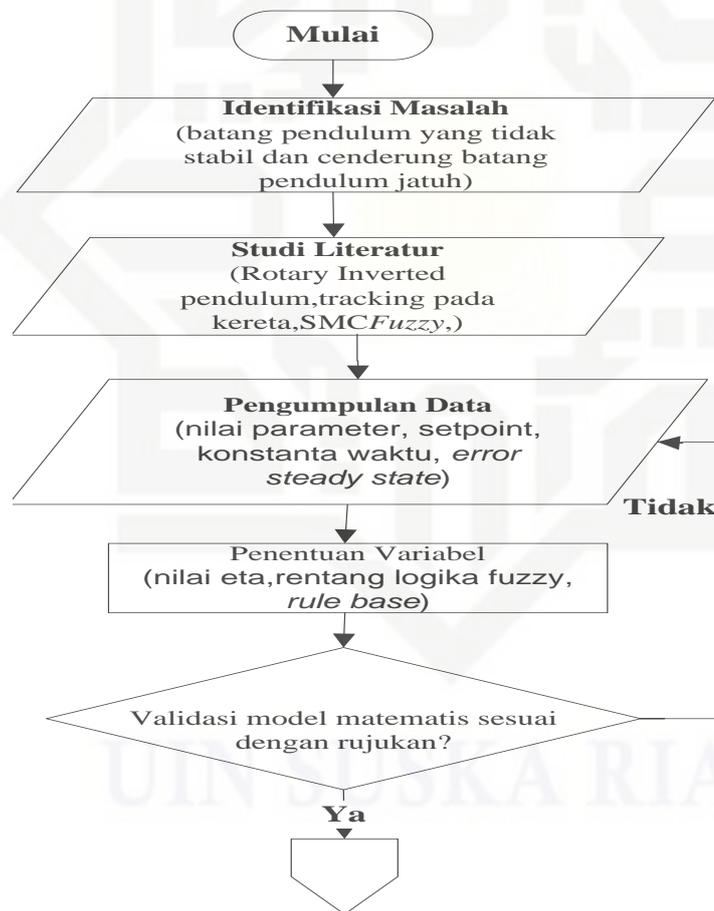
## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1. Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang akan digunakan adalah jenis simulasi. Penelitian ini akan menjelaskan tentang sistem dari *rotary inverted pendulum* yang menggunakan sistem kendali *Hybrid Fuzzy-SMC* untuk membuat pendulum tetap mempertahankan batang pendulum pada posisi terbalik. Sistem ini akan disimulasikan menggunakan simulasi pada Matlab R2013a.

#### 3.2. Tahapan Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian (lanjutan)

Agar dapat mencapai tujuan yang diharapkan, maka adapun tahapan yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi masalah

Adapun masalah yang diangkat untuk penelitian ini adalah kestabilan pada *rotary inverted pendulum* yang cenderung tidak stabil ketika diberi beban dan gangguan sinyal, maka dibutuhkanlah pengendali yang dapat mengendalikan kestabilannya. *Sliding Mode Control* (SMC) dipilih karena merupakan suatu metode kontrol yang mampu berkerja baik pada sistem linear maupun sistem non-linear. Metode pengontrolan *sliding mode control* adalah dengan menggunakan kontrol penyaklaran berkecepatan tinggi untuk men-*drive* trayektori *state* dari *plant* menuju sebuah permukaan khusus yang ditentukan dalam ruang *state*, yang biasa disebut dengan permukaan luncur (proses ini disebut dengan *reaching mode*) dan kemudian mempertahankan trayektori *state* dari *plant* tetap berada sepanjang permukaan luncur (gerak tersebut disebut *sliding mode*). pengendali LQR akan dikombinasikan dengan pengendali *Fuzzy*, kontrol

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Fuzzy digunakan untuk menghasilkan sinyal kontrol pada setiap daerah kerja yang berbeda. Untuk merepresentasikan sistem nonlinear pada sistem pendulum kereta atau pendulum terbalik.

## 2. Studi literatur

Setelah mendapatkan masalah yang akan diatasi maka dimulai tahapan studi literatur. Adapun studi literatur yang diperlukan adalah tentang rotary inverted pendulu pada permasalahan pada *stabilisasi* terhadap rotary (yang tidak stabil), metode respon sistem dengan pendekatan *smith* dan desain pengendali (SMC, pengendali *Fuzzy* dan pengendali *SMC-Fuzzy*). Studi literatur dalam penelitian ini berasal dari buku, skripsi, jurnal tugas akhir serta jurnal ilmiah nasional dan internasional.

## 3. Pengumpulan data

Tahapan pengumpulan data dilakukan dengan mengumpulkan data pra-disain yang diperlukan untuk ke tahapan selanjutnya. Data yang pra-disain yang diperlukan pada penelitian ini adalah nilai parameter untuk mengetahui nilai sebagai rujukan penelitian agar dapat tidak melencek dari nilai yang sudah diteliti dari jurnal maupun skripsi, untuk mencapai *set point* yang diinginkan. Nilai yang di gunakan pada awal adalah nilai panjang pendulum  $L = 0,337$  m dan nilai gravitasi  $g = 9,8$  m/s<sup>2</sup>.

## 4. Penentuan variabel

Data yang telah dikumpulkan pada tahapan pengumpulan data kemudian digunakan untuk menentukan variabel guna mendapatkan model matematis sistem inveted pendulum kereta atau pendulu terbali. Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah *set point* yang akan diinginkan.

## 5. Validasi model matematis

Setalah ditentukan nilai variable maka langkah selanjutnya adalah mendapatkan model matematis rotary inverted pendulum kereta atau pendulum terbalik pada permaasalahan tacking. Kemudian model matematis tersebut akan diubah ke bentuk bahasa program Simulink Matlab dan disimulasikan. Langkah selanjutnya adalah membandingkan hasil simulasi dengan rujukan yang diperoleh dari studi literatur, jika

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

sesuai dengan rujukan maka penelitian berlanjut menuju tahap berikutnya, jika belum sesuai maka kembali pada tahap pengumpulan data.

#### 6. Desain pengendali SMC-Fuzzy

Desain pengendali dimulai dengan merancang pengendali SMC dengan menentukan matriks pembobot umpan balik  $K$  yang terdiri dari matriks  $A$ ,  $B$  dan  $C$ . Kemudian merancang pengendali Fuzzy, lalu dilanjutkan dengan perancangan pengendali SMC dengan penambahan Fuzzy atau gabungan dari dua pengendali.

#### 7. Analisis hasil desain pengendali dan sistem

Setelah hasil rancangan berupa model matematis diperoleh, selanjutnya model matematis rancangan tersebut disimulasikan dengan *rotary inverted pendulum*, kemudian dianalisa dengan paramter pasca desain yang meliputi indeks performansi dan analisa respon sistem dengan parameter *rise time*, *settling time*, *time delay* dan *maximum overshoot*.

#### 8. Kesimpulan

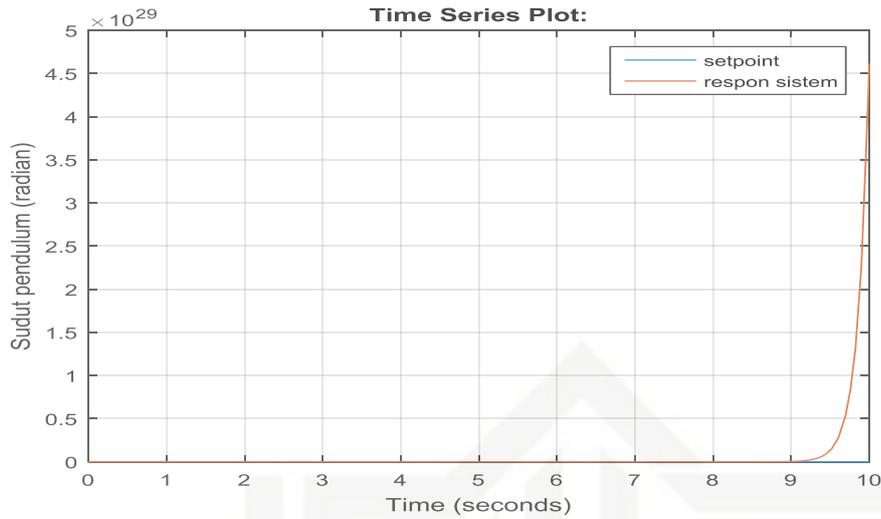
Setelah semua tahapan dilakukan maka ditarik kesimpulan dengan tujuan yang telah tercapai dan masalah terselesaikan.

#### 9. Selesai

Penelitian selesai dan dilanjutkan dengan penulisan laporan hasil penelitian.

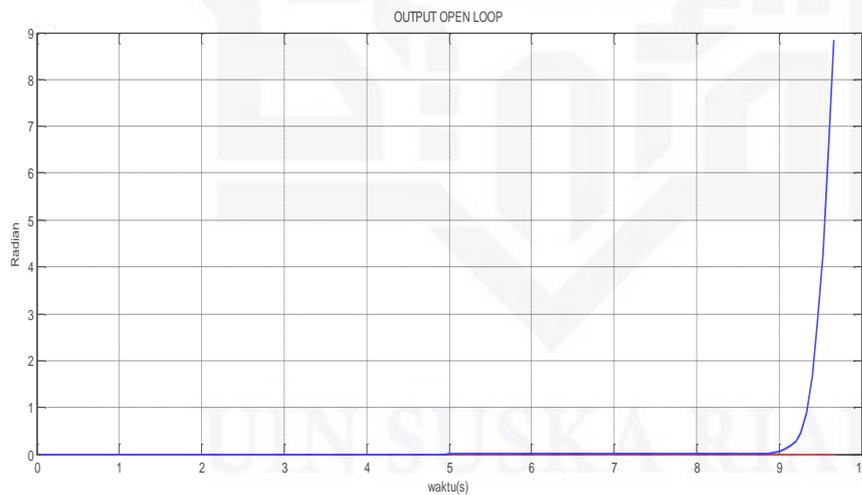
### 3.3 Pemodelan Matematis Rotary inverted pendulum

Berdasarkan penelitian pada khalis juniswan abidin, *rotary inverted pendulum* diuji secara *open loop* dan kemudian hasil dari respon *plant* yang terbaca oleh *software* Matlab ditampilkan pada komputer dengan diberikan sinyal *step* berupa *setpoint* dan kemudian diberikan tanpa beban atau gangguan [9]. Dari penelitian yang dilakukan maka didapatkan hasil respon seperti gambar (3.2) berikut.



Gambar 3.2 Grafik *Open Loop* Dari Sistem *Rotary inverted pendulum* Tanpa Gangguan

Dari rujukan tersebut maka penulis akhir mencoba respon *open loop* dengan nilai parameter yang sudah ada pada rujukan jurnal maupun dari *paper*. Maka dapat lah hasil *open loop rotary inverted pendulum*, pada gambar 3.3 di bawah ini:



Gambar 3.3 Hasil *Open Loop Rotary inverted pendulum*

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

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$A = \frac{1}{J_T} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{4} m_p^2 L_p^2 L_r g & -(J_p + \frac{1}{4} m_p L_p^2) B_r & -\frac{1}{2} m_p L_p L_r B_p \\ 0 & \frac{1}{2} m_p L_p g (J_r + m_p L_r^2) & -\frac{1}{2} m_p L_p L_r B_r & -(J_r + m_p L_r) B_p \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$B = \frac{1}{J_T} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_p + \frac{1}{4} m_p L_p^2 \\ \frac{1}{2} m_p L_p L_r \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$A = \frac{1}{J_T} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{4} \cdot 0.127^2 \times 0.337^2 \times 0.2159 \times 9.8 & -(0.0012 + \frac{1}{4} \cdot 0.127 \times 0.337^2) \cdot 0.11 & -\frac{1}{2} \cdot 0.127 \times 0.337 \times 0.2159 \times 0.0024 \\ 0 & \frac{1}{2} \cdot 0.127 \times 0.337 \times 9.8 (9.98 \times 10^{-4} + 0.127 \times 0.2159^2) & -\frac{1}{2} \cdot 0.127 \times 0.337 \times 0.2159 \times 0.11 & -(9.98 \times 10^{-4} + 0.127 \times 0.2159) \cdot 0.0024 \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{1}{J_T} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.0012 + \frac{1}{4} \cdot 0.127 \times 0.337^2 \\ \frac{1}{2} \cdot 0.127 \times 0.337 \times 0.2159 \end{bmatrix}$$

Sehingga didapatkan

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 80.3 & -45.8 & -0.930 \\ 0 & 122 & -44.1 & -1.40 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 83.4 \\ 80.3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (3.5)$$

$$D = 0 \quad (3.6)$$

### 3.4 Validasi model matematis

Untuk memvalidasi model matematis maka dilakukan perbandingan persamaan matematis rotary inverted pendulum yang ada pada jurnal rujukan.

Persamaan matematis untuk *rotary inverted pendulum* dari rujukan maka dapatlah perhitungan persamaan dari 3.1 yaitu []:

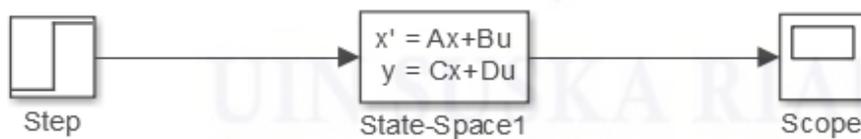
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 80.3 & -45.8 & -0.930 \\ 0 & 122 & -44.1 & -1.40 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 83.4 \\ 80.3 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

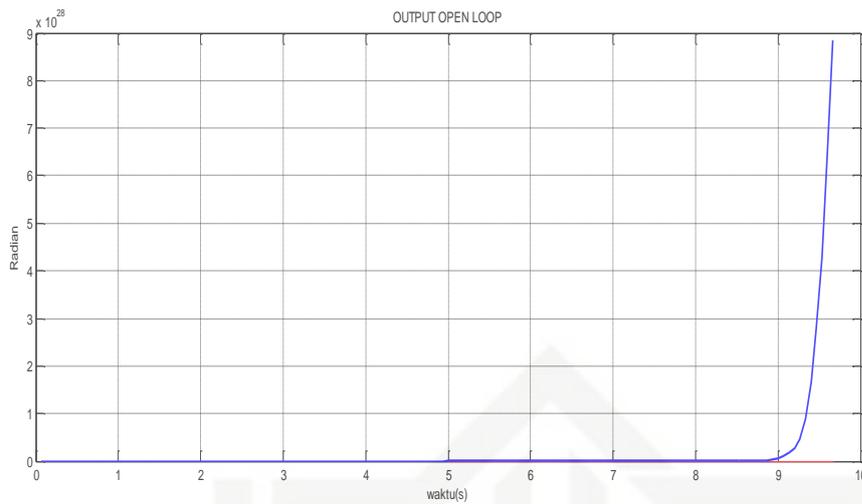
$$D = 0$$

Setelah mendapatkan model matematis *rotary inverted pendulum* langkah selanjutnya yang harus dilakukan yaitu melakukan simulasi menggunakan Matlab R2013a, adapun blok Simulink yang digunakan seperti pada gambar 3.4 dengan parameter yang telah didapatkan dari identifikasi respon *rotary inverted pendulum*.



Gambar 3.4 Blok diagram Simulink *open loop rotary inverted pendulum*.

Maka didapatkanlah grafik pemodelan *rotary inverted pendulum* dengan tanpa ada gangguan pada gambar 3.5.

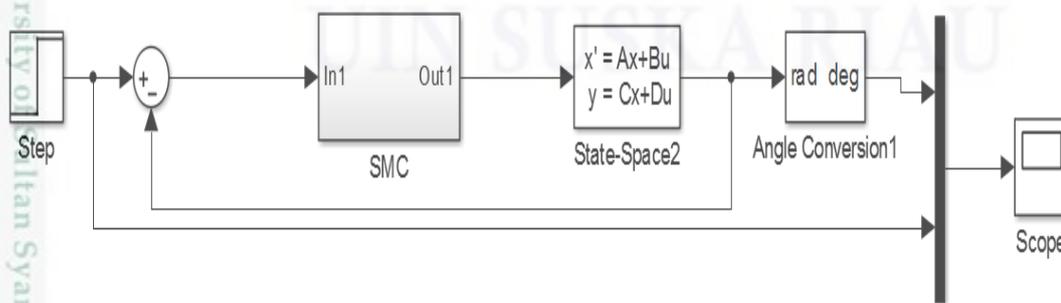


Gambar 3.5 Hasil Respon *Plant* Simulasi Tanpa Gangguan.

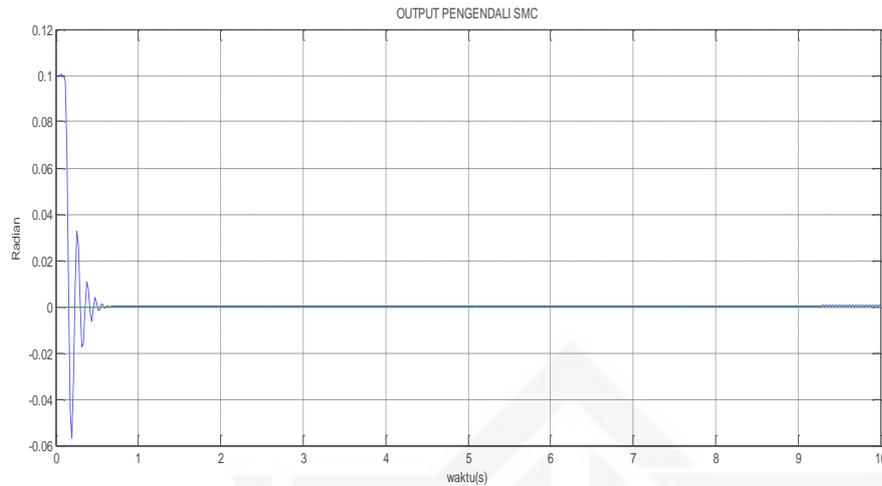
Dari hasil simulasi kita dapat melihat pada gambar 3.5 respon *rotary inverted pendulum* tanpa ada gangguan, gambar diatas adalah hasil apabila belum diberi pengendali. Dari gambar tersebut dapat dianalisa bahwa respon keluaran *open loop* sistem ketika diberi *setpoint*/posisi batang pendulum berada pada posisi  $0^\circ$ , sistem tidak mampu mempertahankan batang pendulum sehingga menghasilkan grafik eksponensial yang sangat tinggi atau dengan kata lain batang pendulum tetap berada pada posisi  $180^\circ$ .

### 3.5 Desain pengendali *Sliding Mode Control* (SMC)

Pada tugas akhir ini pengendali SMC untuk mempertahankan kestabilan pendulum yang cenderung jatuh.



Gambar 3.6 Diagram blok pengendali *sliding mode control* (SMC) pada *plant rotary inverted pendulum*.



Gambar 3.7 Hasil Respon SMC Pada *Plant Rotary inverted pendulum* Tanpa Gangguan.

Dari hasil respon di atas dapat disimpulkan bahwa kendali SMC dapat mencapai dan mempertahankan kestabilan dari *plant rotary inverted pendulum*, tetapi masih terdapat gangguan sinyal *chattering* pada *steady state* yang harus di atasi agar tidak mengganggu kereta dalam mestabilkan pendulum.

Fungsi transfer pada beban minimal, akan dimisalkan menjadi variabel tetap agar lebih mudah dalam mendesain pengendali. Sehingga fungsi penghantar plant ditentukan dengan persamaan berikut[15]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 80.3 & -44.8 & -0.930 \\ 0 & 122 & -44.1 & -1.40 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 83,4 \\ 80,3 \end{bmatrix} u$$

Pada *state space* didapatkan:

$$\dot{x}_1 = x_3$$

$$\dot{x}_2 = x_4$$

$$\dot{x}_3 = 80,3 x_2 - 45,8x_3 - 0,930x_4 + 83,4 u$$

$$\dot{x}_4 = 122 x_2 - 44,1x_3 - 1,40x_4 + 80,3 u$$

Didefinisikan suatu permukaan luncur:

$$\sigma_s = 0$$

$$S(\dot{x}_1 + \dot{x}_2 + \dot{x}_3 + \dot{x}_4) = 0$$

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

$$x_3 + x_4 + (80,3 x_2 - 45,8x_3 - 0,930x_4 + 83,4u) + (122 x_2 - 44,1x_3 - 1,40x_4 + 80,3u) = 0$$

$$202,3 x_2 - 88,9x_3 + 1,33x_4 - 163,7 u_{eq} = 0$$

$$163,7 u_{eq} = 202,3 x_2 - 88,9x_3 + 1,33x_4$$

$$u_{eq} = \frac{202,3 x_2 - 88,9x_3 + 1,33x_4}{163,7}$$

Setelah ditemukan sinyal kendali *equivalen* maka dapat dicari sinyal kendali *natural*:

$$\dot{\sigma}_s = x_3 + x_4 + (80,3 x_2 - 45,8x_3 - 0,930x_4 + 83,4u) + (122 x_2 - 44,1x_3 - 1,40x_4 + 80,3u)$$

$$\dot{\sigma}_s = 202,3 x_2 - 88,9x_3 + 1,33x_4 - 163,7 (u_{eq} + u_n)$$

$$\dot{\sigma}_s = 202,3 x_2 - 88,9x_3 + 1,33x_4 - \left(163,7 \frac{202,3 x_2 - 88,9x_3 + 1,33x_4}{163,7}\right) - 163,7 u_n$$

$$\dot{\sigma}_s = -163,7 u_n \quad (3.7)$$

Berdasarkan pada syarat kestabilan Lyapunov pada persamaan 3.7 maka dipilih

$$: \dot{\sigma}_s = -163,7 u_n - \eta \cdot \text{sign}(\sigma) = -163,7 u_n$$

$$U_n = \frac{1}{-163,7} \eta \cdot \text{sign}(\sigma) \quad (3.8)$$

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

Dengan demikian didapat sinyal kendali total  $U$  yaitu:

$$U = U_{eq} + U_n$$

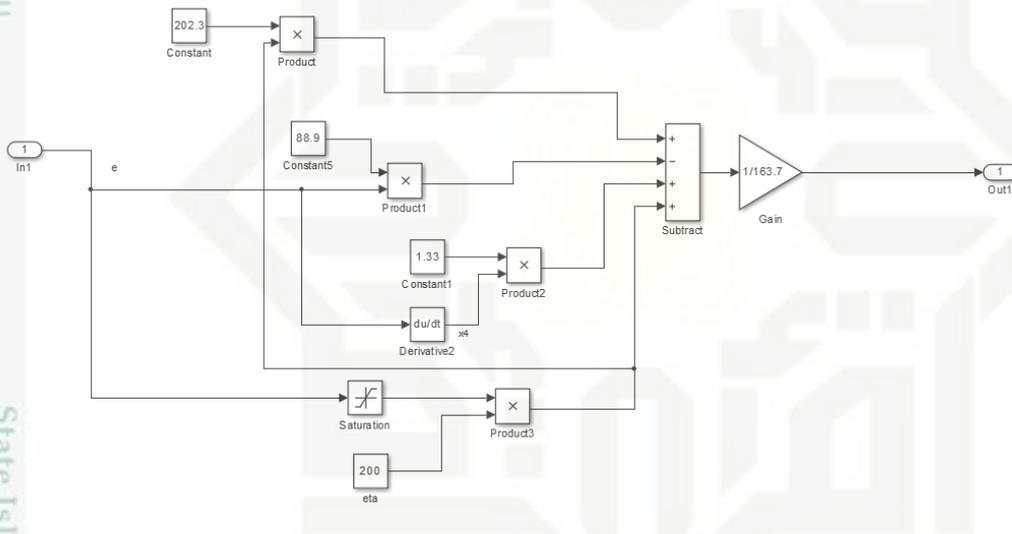
$$U = \frac{202,3 x_2 - 88,9x_3 + 1,33x_4}{163,7} + \frac{1}{-163,7} \eta \cdot \text{sign}(\sigma) \quad (3.9)$$

$$U = \frac{202,3 x_2 - 88,9x_3 + 1,33x_4 + \eta \cdot \text{sign}(\sigma)}{163,7} \quad (3.10)$$

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

$$U = \frac{202,3 x_2 - 88,9x_3 + 1,33x_4 + \eta \cdot \text{sat}(\sigma)}{163,7} \quad (3.11)$$

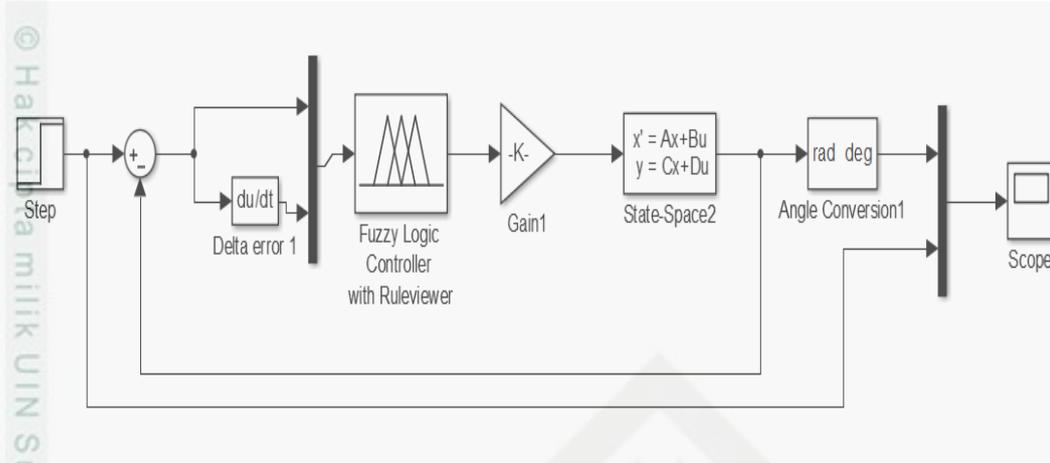
Dari persamaan 3.11, maka dirancang blok diagram Simulink pengendali SMC sebagai berikut :



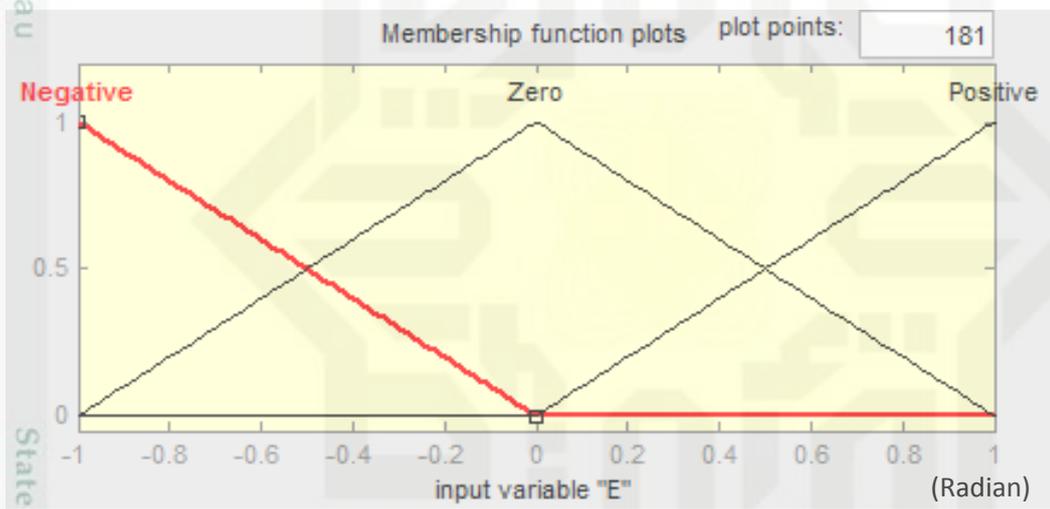
Gambar 3.8 Blok diagram Simulink pengendali SMC

### 3.6 Desain Pengendali Fuzzy

Pada gambar dibawah adalah desain pengendali Fuzzy dalam mengatasi gangguan pada *rotary inverted pendulum*, peran pengendali Fuzzy dalam ini adalah untuk mengatasi kelemahan pengendali *sliding mode control* (SMC) yaitu sinyal *chattering* yang dapat mengganggu kestabilan sistem dan beresilasinya sinyal kendali dengan kecepatan tinggi. Oleh sebab itu pengendali Fuzzy di gunakan untuk mengatasi gangguan sinyal *chattering*.



Gambar 3.9 Diagram Blok Kerja Pengendali Fuzzy Pada Rotary inverted pendulum

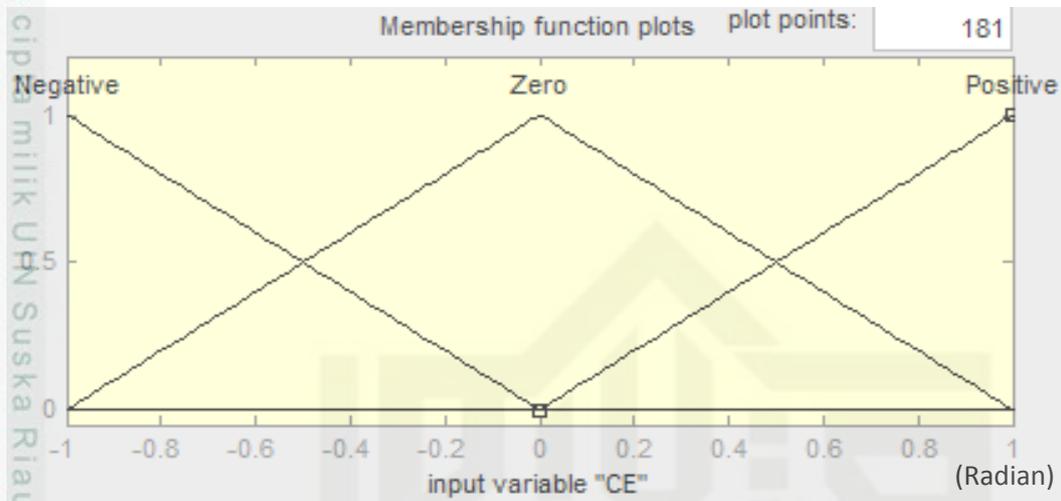


Gambar 3.10 Membership function error

Gambar 3.10 memperlihatkan fungsi keanggotaan input Error terdiri dari tiga himpunan Fuzzy yaitu Negative, Zero dan Positive dengan masing-masing berbentuk segitiga. Bentuk ini dipilih karena bentuk yang linier sehingga memudahkan perhitungan komputasi. Rentang untuk himpunan Fuzzy Negative yaitu  $-1 < x < 0$ , untuk himpunan Fuzzy Zero yaitu  $-1 < x < 1$  dan untuk himpunan Fuzzy Positive yaitu  $0 < x < 1$ . Rentang ini diperoleh berdasarkan penalaan secara *trial and error* dimana ketika rentang  $x$  lebih dari 1 dan kurang -1, maka selisih nilai error akan semakin besar sehingga menimbulkan *offset* pada *steady state*. Ketika rentang  $x$  kecil dari 1 dan besar dari 1, maka akan terjadi osilasi yang

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

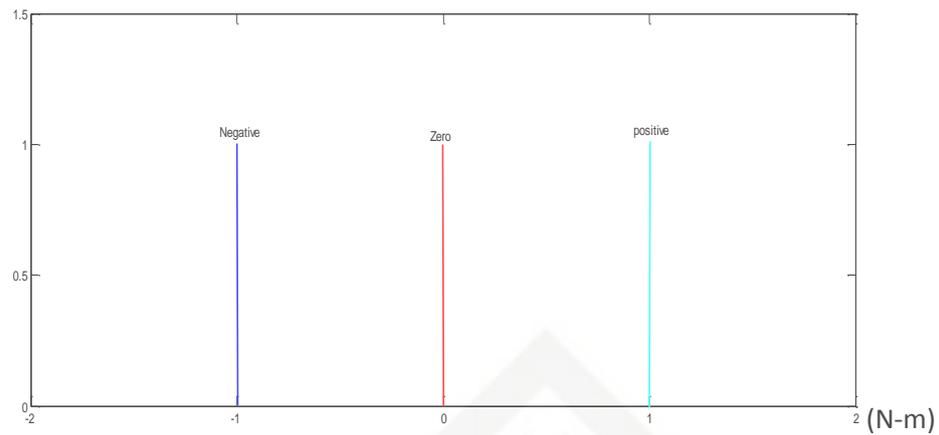
sangat besar pada awal respon keluaran. Oleh karena itu, dipilih rentang nilai  $x$  yaitu  $-1 < x < 1$ .



Gambar 3.11 *Membership function input Derror*

Gambar 3.11 memperlihatkan fungsi keanggotaan input Derror terdiri dari tiga himpunan Fuzzy yaitu Negative, Zero dan Positive dengan masing-masing berbentuk segitiga. Bentuk ini dipilih karena bentuk yang linier sehingga memudahkan perhitungan komputasi. Rentang untuk himpunan Fuzzy Negative yaitu  $-1 < x < 0$ , untuk himpunan Fuzzy Zero yaitu  $-1 < x < 1$  dan untuk himpunan Fuzzy Positive yaitu  $0 < x < 1$ . Rentang ini diperoleh berdasarkan penalaan secara *trial and error* dimana ketika rentang  $x$  lebih dari 1 dan kurang -1, maka respon transien pengendali akan semakin lambat. Ketika rentang  $x$  kecil dari 1 dan besar dari -1, maka akan terjadi osilasi yang sangat besar dan banyak pada respon keluaran. Oleh karena itu, dipilih rentang nilai  $x$  yaitu  $-1 < x < 1$ .

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.12 Membership function output  $U$

Rentang -1 dan 1 dipilih untuk menghasilkan kendali yang cepat dan lebih halus dalam pengendaliannya, referensi [16] pada halaman 459 dan halaman 153. Sinyal  $U$  merupakan nilai torsi motor yang didapatkan dari persamaan 2.21 dimana torsi adalah gaya yang bekerja pada lengan pendulum yang dikali dengan jarak titik tengah lengan pendulum. Gambar 3.12 memperlihatkan fungsi keanggotaan output Error terdiri dari lima himpunan Fuzzy yaitu LargeNegative, SmallNegative, Zero, SmallPositive dan LargePositive dengan masing-masing berbentuk *singleton*. Rentang untuk himpunan Fuzzy LargeNegative yaitu  $f(x) = -2$ , untuk himpunan Fuzzy SmallNegative yaitu  $f(x) = -1$ , untuk himpunan Fuzzy Zero yaitu  $f(x) = 0$ , untuk himpunan Fuzzy SmallPositive yaitu  $f(x) = 1$  dan untuk himpunan Fuzzy LargePositive yaitu  $f(x) = 2$ .

Rentang tersebut dipilih berdasarkan perhitungan nilai maksimum dan minimum setpoint. Ketika *setpoint* berada pada nilai 0% menuju 100%, maka output pengendali mengeluarkan nilai 1 dan ketika setpoint berada pada nilai 100% menuju 0%, maka output pengendali mengeluarkan nilai -1. Ketika *setpoint* berada pada nilai 100% ke -100%, maka output pengendali menghasilkan nilai -2, begitu juga sebaliknya. Oleh karena itu, dipilih nilai rentang output Sugeno [-2 -1 0 1 2].

*Rule base* dirancang dengan metode pengamatan dan asumsi bahwa  $x$  positif berada pada bidang bagian kanan sehingga disimpulkan bahwa :

1. Jika batang pendulum miring pada derajat kecil dari  $0^\circ$  atau miring ke di sebelah kiri, maka kereta harus bergerak ke arah kiri
2. Jika batang pendulum miring pada derajat besar dari  $0^\circ$  atau miring ke di sebelah kanan, maka kereta harus bergerak ke arah kanan
3. Jika batang pendulum berada pada derajat  $0^\circ$  atau tegak lurus terhadap kereta, maka kereta harus diam/berhenti

Berikut adalah *rule base* pengendali Fuzzy pada *rotary inverted pendulum*:

1. *If Error Negative and Derror Negative then u is LargeNegative*
2. *If Error Negative and Derror Zero then u is SmallNegative*
3. *If Error Negative and Derror Positive then u is Zero*
4. *If Error Zero and Derror Negative then u is SmallNegative*
5. *If Error Zero and Derror Zero then u is Zero*
6. *If Error Zero and Derror Positive then u is SmallPositive*
7. *If Error Positive and Derror Negative then u is Zero*
8. *If Error Positive and Derror Zero then u is SmallPositive*
9. *If Error Positive and Derror Positive then u is LargePositive*

Tabel 3.1 *Rule Base* untuk *Rotary inverted pendulum*

<i>Error</i> \ <i>Derror</i>	N	Z	P
N	LN	SN	ZE
Z	SN	ZE	SP
P	ZE	SP	LP

Keterangan :

N : Negative

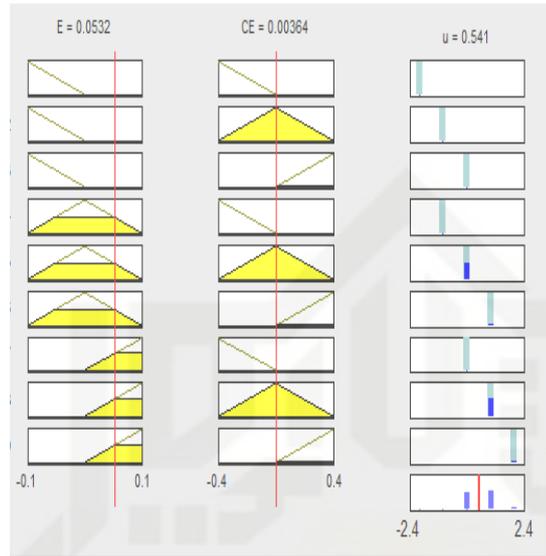
Z : Zero

P : Positive

LN : Large Negative

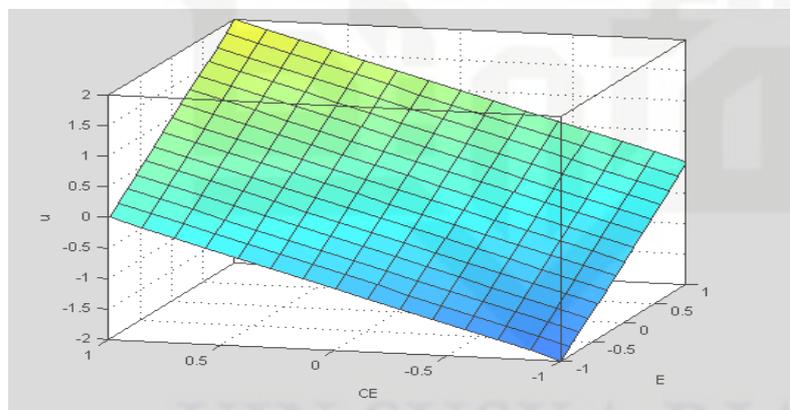
SN : Small Negative  
 ZE : Zero

SP : Small Positive  
 LP : Large Positive



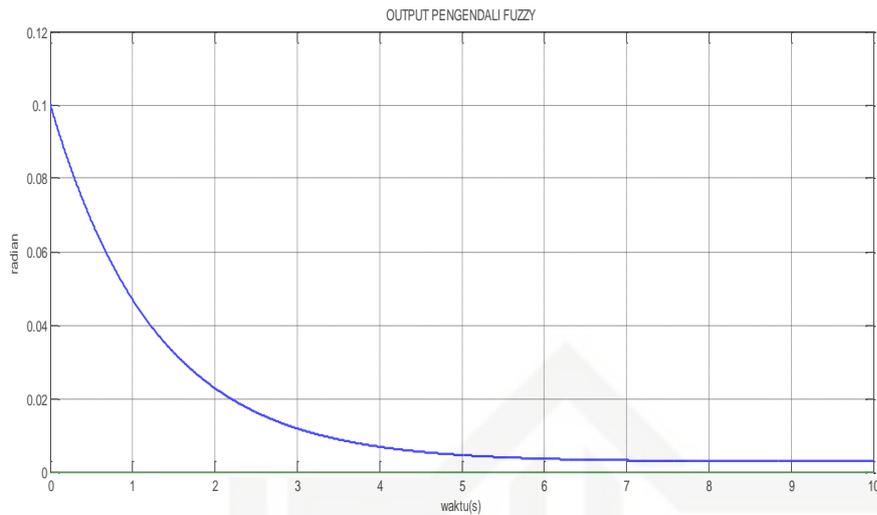
Gambar 3.13 Rule viewer pengendali Fuzzy

Dan gambar 3.14 menunjukkan surface dari Fuzzy rule



Gambar 3.14 Surface Fuzzy rule

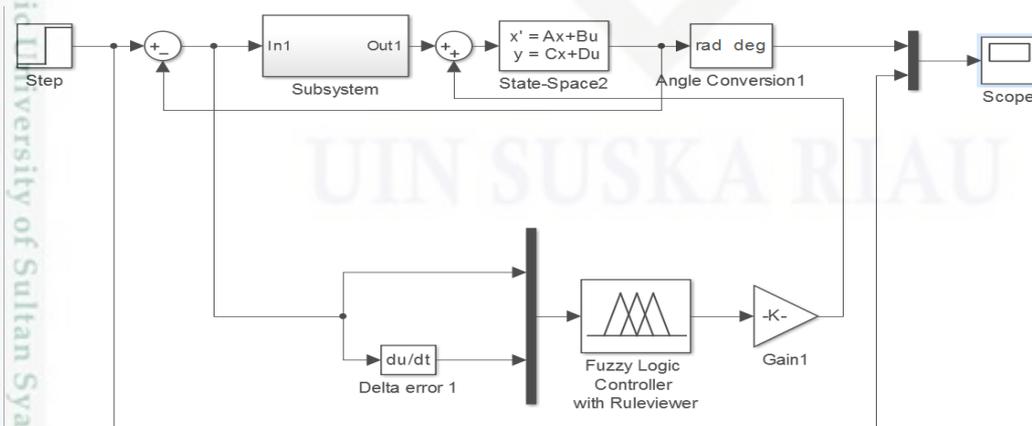
Dari gambar 3.14 dapat dilihat perubahan output Fuzzy sangat linear sehingga ketika ada perubahan besar maupun kecil, sensitivitas pengendali tetaplah sama. Pengendali Fuzzy yang dirancang tersebut memiliki sifat yang *balance* antara kecepatan respon dan kekokohan pengendali. Hal ini bertujuan agar *chattering* yang terjadi pada *steady state* dapat dihilangkan tanpa memperlambat kecepatan respon sistem secara signifikan.



Gambar 3.15 Respon *setpoint* 0 rad dan kondisi awal 0.1 rad menggunakan pengendali Fuzzy

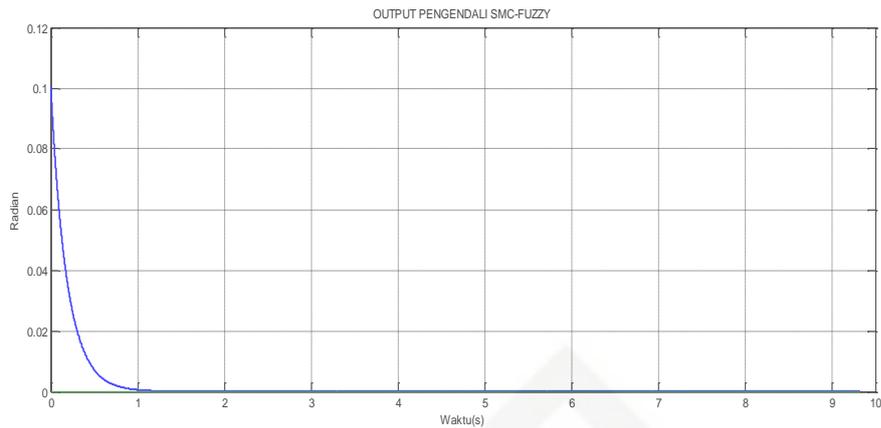
### 3.7 Desain Pengendali Hybrid SMC-Fuzzy

Desain pengendali SMC-Fuzzy dirancang untuk menghasilkan sistem yang kokoh yang dimiliki pengendali SMC dan pengendali Fuzzy untuk mengatasi kelemahan pengendali SMC yaitu sinyal *chattering* yang dapat mengganggu kestabilan sistem dan beresilasinya sinyal kendali dengan kecepatan tinggi. Berikut ini adalah blok diagram Simulink *rotary inverted pendulum* menggunakan pengendali SMC-Fuzzy.

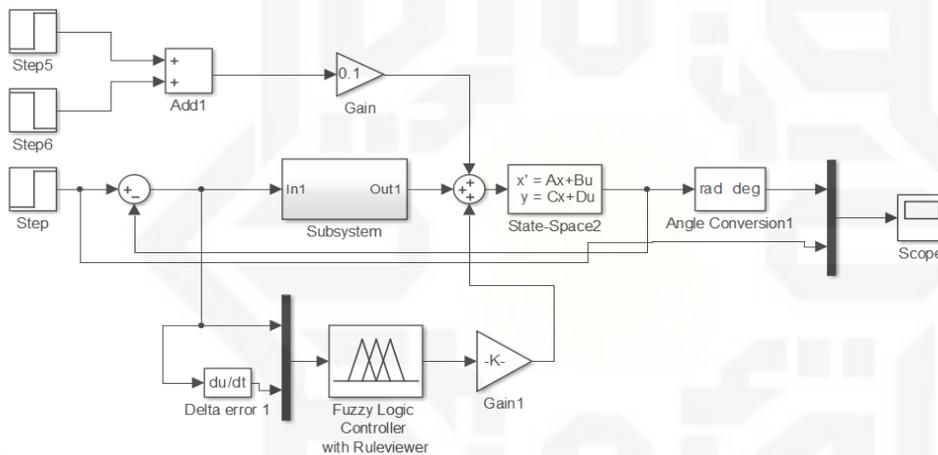


Gambar 3.16 Blok diagram Simulink *rotary inverted pendulum* menggunakan pengendali SMC-Fuzzy

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.17 Respon Keluaran Pengendali SMC-Fuzzy Dengan *Setpoint* 0 Rad Dan Kondisi Awal 0.1 Rad.



Gambar 3.18 Blok Diagram Simulink *Rotary inverted pendulum* Menggunakan Pengendali SMC-Fuzzy Dengan Gangguan.

Gambar 3.18 akan disimulasikan dengan waktu simulasi 10 detik dan setpoint 0.1 rad. Hasil simulasi blok diagram tersebut berupa grafik yang akan ditampilkan di BAB IV yaitu hasil analisa.