

# Perancangan Full Order Observer Pada Sistem Sliding Mode Control Untuk Mengatasi Anti-Windup Berbasis LMI

Mirza Zoni<sup>1</sup>, Arnita, Arzul<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Teknik Elektro Universitas Bung Hatta Padang

Kampus III. Universitas Bung Hatta Jl. Gajah Mada No. 19 Gunung Pangilun Padang

telp/fax : 0751 7054257/7051341

mirzazoni\_ubh@yahoo.com<sup>1</sup>

**Abstrak** –Pada banyak sistem kendali tidak semua state mampu didapatkan dari sensor. Selain mahal, penggunaan banyak sensor akan menimbulkan noise dan penurunan kinerja sistem. Untuk mengatasi fenomena itu secara matematis dibuat estimasi state yang mengikuti dinamika plant yang ada. Estimasi state itu biasanya disebut state observer atau observer. Observer dimungkinkan selain untuk mengestimasi state yang tidak diketahui state observer juga akan memperbaiki performance dengan mengecilkan error sistem secara umum. Sementara itu windup adalah suatu keadaan di mana aktuator mencapai titik saturasinya sehingga sinyal kendali yang dihasilkan tidak akan pernah lebih besar dari batas saturasi tersebut. Sedangkan setiap aktuator pada kenyataannya pasti memiliki batasan saturasi masing-masing. Akibat efek ini akan memutus lup umpan balik sehingga sistem akan bekerja persis seperti sistem lup terbuka. Windup dimaksudkan juga sebagai tidak konsistennya masukan kendalian dengan state pengendali ketika terjadi saturasi pada sinyal kendali itu. Namun selain disebabkan oleh pengendali, perilaku windup juga disebabkan oleh dinamika plant yang terlalu cepat sedangkan sinyal kendali mengalami saturasi. Untuk mengatasi efek Windup dibutuhkan algoritma yang mampu mengatasi efek Windup ini. Algoritma yang itu dinamakan Anti-Windup. Penelitian ini merancang sebuah observer pada sistem Anti-Windup dengan sebuah pengendali Sliding Mode Control. Perancangan Anti Windup dan pengendali Sliding Mode Control dan observer menggunakan Linear Matrix Inequality dengan jaminan kestabilan memakai batas kestabilan Lyapunov. Hasil perancangan akan disimulasikan menggunakan Simulink Matlab.

**Kata kunci** : observer, anti-windup, sliding mode control, linear matrix inequality

## 1. Pendahuluan

Pada kenyataannya dalam sistem kendali tidak semua state dapat disediakan oleh sensornya. Selain faktor ekonomis juga penggunaan banyak sensor akan menimbulkan noise akibat tidak akuratnya sinyal dari sensor. Bagaimana cara mengatasi jika tidak semua state tersedia pada suatu sistem kendali lup tertutup menjadi suatu bahan penting untuk dikaji. Secara matematis untuk mengakomodir state yang tidak didapatkan dari keluaran maka dibuat estimasi state yang mengikuti dinamika plant yang ada. Estimasi state itu biasanya disebut *state observer* atau *observer*.

Observer seperti yang dikemukakan oleh Luenberger (1966) telah membuktikan tidak hanya untuk monitoring dan regulasi tapi juga untuk mendeteksi kesalahan indentifikasi pada dinamika sistem [7]. Observer dibuat berdasarkan pada model matematik plant, kehadiran gangguan, dinamika ketidakpastian (*uncertainties*) dan peristiwa nonlinieritas pada berbagai aplikasi sistem kendali [7],[16].

Selain untuk mengestimasi state yang tidak diketahui state observer juga akan memperbaiki kinerja sistem secara keseluruhan karena akan mengecilkan error sistem secara umum [19]. Bila tidak semua state dapat diukur dalam banyak kasus sistem perancangan kendali maka dirancang sebuah observer untuk meng-estimasi state yang tidak dapat diukur tersebut.

Seperti yang juga dibahas pada rujukan [20] bahwa pada *network on chip* (NoC) tidak mungkin mengukur aliran data pada setiap *chip* dan juga antar *chip*. Maka dirancanglah sebuah model *state observer NoC*, state yang tidak terukur dapat dikendalikan dengan penempatan kutub sedemikian sehingga aliran data yang masuk dan keluar chip dapat dikendalikan.

Sementara itu *Windup* adalah suatu keadaan di mana aktuator mencapai titik saturasinya sehingga sinyal kendali yang dihasilkan tidak akan pernah lebih besar dari batas saturasi tersebut. Sedangkan setiap aktuator pada kenyataannya pasti memiliki batasan saturasi masing-masing. Akibat efek ini akan memutus lup umpan balik sehingga sistem akan bekerja persis seperti sistem lup terbuka.

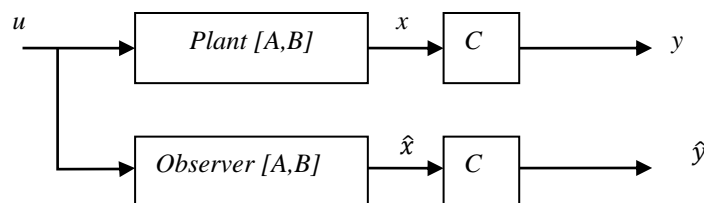
Seperti yang dijelaskan pada rujukan [3] *Windup* dimaksudkan juga sebagai tidak konsistennya masukan kendalian dengan state dari pengendali ketika terjadi saturasi pada sinyal kendali itu. Namun selain disebabkan oleh pengendali, perilaku *Windup* juga disebabkan oleh dinamika plant yang terlalu cepat sedangkan sinyal kendali mengalami saturasi. Untuk mengatasi efek *Windup* dibutuhkan algoritma yang mampu mengatasi efek *Windup* ini. Algoritma yang itu dinamakan *Anti-Windup*.

Penelitian ini akan merancang sebuah observer pada sistem *anti-windup* dengan sebuah pengendali Sliding SMC. Kompensator *Anti Windup* dan SMC yang digunakan mengikuti prosedur yang dikerjakan pada rujukan [12, 13], dan kemudian merancang sebuah *full order observer* yang bekerja pada sistem SMC dan anti windup tersebut. Pengendali SMC, kompensator anti-windup dan gain observer, akan dihitung menggunakan formula *Linear Matrix Inequality* (LMI) dan disimulasikan menggunakan Simulink Matlab.

## 2. Metodologi Penelitian

Disain sistem kontrol dengan *pole-placement* semua variabel state didapatkan dari *feedback*. Tapi pada kenyataannya tidak semua variable state didapat diukur. Biasanya karena biaya untuk membuat sensor yang tinggi atau secara fisik tidak mungkin untuk mengukur semua state variable seperti yang ada pada *power plant* nuklir. Sehingga diperlukan sejumlah *estimator variable state*. Estimator dari *variabel state* yang tidak terukur disebut dengan observasi, dan perancangan persamaan estimasi variabel state dinamakan *state observer* atau *observer*. State observer dapat dirancang pada suatu sistem mempunyai dua syarat penting yaitu plant harus dapat dikendalikan (*controllable*) dan juga dapat diamati (*observable*).

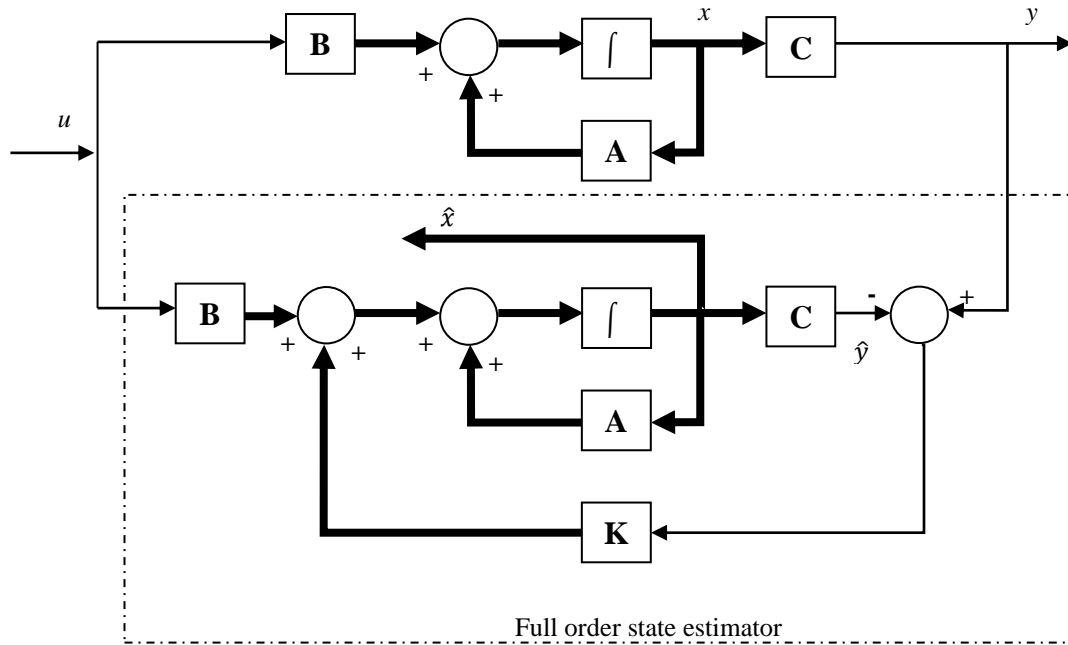
Jika semua variabel state diambil dari *state observer* tanpa memperhatikan apakah ada beberapa variable state didapat langsung dari alat ukur (*measurement*) disebut dengan *full order state observer*. Bila diperlukan hanya variable state yang tidak terukur saja yang diobserver dan output variable terhubung secara linear dengan state variabel, observer ini disebut *reduced-order state observer*. Gambar 2.1 memperlihatkan open loop observer, dengan  $u$  sinyal kendali,  $y$  output sistem,  $\hat{y}$  output observer, matriks sistem adalah  $A$ ,  $B$  dan  $C$ ,  $x$  adalah state sistem dan  $\hat{x}$  state observer.



Gambar 2.1. Open loop observer

**3.1. Full Order State Observer**

Sistem *full order state observer* dan *plant linear* dapat digambarkan seperti pada gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2. Full order observer

Observer merupakan duplikasi dari plant yang sebenarnya, dengan sinyal input  $u$  yang sama dan persamaan diferensial yang sama. Jika output aktual terukur adalah  $y$  maka output observer adalah  $\hat{y}$ , dan state aktual adalah  $\hat{x}$  maka state observer adalah  $\hat{x}$ . Persamaan plant dan output sistem seperti (1) dan (2).

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{1}$$

$$y = Cx + Du \tag{2}$$

Dimana  $x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^n$  dan  $y \in \mathbb{R}^n$  adalah matriks kolom masing-masing adalah state, input dan output. Matrik  $A, B, C$  dan  $D$  adalah matriks riil dari plant dengan dimensi yang sesuai. Persamaan state observer dinyatakan dengan persamaan (3).

$$\dot{\hat{x}} = Ax + Bu + K(y - \hat{y}) \tag{3}$$

Berdasarkan gambar 2.2 untuk  $D=0, y = Cx$  dan  $\hat{y} = C\hat{x}$  maka persamaan (3) dapat dinyatakan dengan persamaan (4).

$$\dot{\hat{x}} = (A - KC)\hat{x} + Bu + KCx \tag{4}$$

Dinamika  $K$  adalah matrik gain observer dengan dimensi bersesuaian. Masalah *full order estimator* adalah bagaimana mendapatkan  $K$  sehingga error state menuju nol pada waktu tak terhingga,  $\hat{x} - x \rightarrow 0$ . Dengan  $\hat{x} - x$  adalah dinamika error sistem. Matriks  $K$  sesungguhnya juga matriks bobot yang didalamnya merupakan koreksi terhadap perbedaan pengukuran  $y$  dan estimasi output  $\hat{y}$ .

Dinamika error dapat dicari dengan mengurangkan state sebenarnya  $\hat{x}$  dengan state observer  $x$  seperti pada persamaan (5) :

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax - A\hat{x} - K(Cx - C\hat{y}) = (A - KC)(x - \hat{x}) \quad (5)$$

Jika error sebenarnya adalah  $e$  dan error observer adalah  $\dot{e}$  maka dinamika error dapat dinyatakan dengan persamaan (6).

$$\dot{e} = (A - KC)e \quad (6)$$

Persamaan (6) merupakan karakteristik dinamika error dengan menghitung nilai eigen dari matrik  $A - KC$ . Jika matriks  $A - KC$  stabil maka error akan konvergen menuju nol untuk setiap nilai awal error  $e(0)$ . Artinya  $\hat{x}(t)$  akan konvergen ke  $x(t)$  untuk setiap nilai  $x(0)$  dan  $\hat{x}(0)$ . Jika nilai eigen  $A - KC$  yang dipilih dari dinamika error menghasilkan sistem yang *asymptotically stable* dan responya cukup cepat, maka vektor error akan menuju nol dengan cukup cepat juga.

Jika sistem observabel maka persamaan karakteristik observer diberikan seperti persamaan (7) dan persamaan karakteristik observer  $\alpha(s)$  seperti persamaan (8) :

$$\det[sI - (A - KC)] = 0 \quad (7)$$

$$\alpha(s) = (s - \beta_1)(s - \beta_2) \dots (s - \beta_n) \quad (8)$$

Dimana  $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$  merupakan *pole closed loop* atau nilai eigen yang diinginkan. Misalkan  $a_i$  adalah koefisien karakteristik polynomial dari (7) dapat dituliskan seperti persamaan (9).

$$|sI - (A - KC)| = s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n \quad (9)$$

Sehingga  $K$  dapat dihitung dengan persamaan (10) berikut :

$$K = (W\mathcal{O})^{-1} \begin{bmatrix} \beta_n - a_n \\ \beta_{n-1} - a_{n-1} \\ \vdots \\ \beta_1 - a_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Dengan  $W$  dan  $\mathcal{O}$  masing-masing seperti pada persamaan (11) dan (12),

$$W = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_1 & 1 \\ a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathcal{O} = [C \quad AC \quad \dots \quad A^{n-1}C]^T \quad (12)$$

### 3.2. Keterkendalian (*Controllable*) dan Keteramatan (*Observable*)

Suatu sistem dikatakan *controllable* jika pada saat  $t = t_0$  sinyal kendali tertentu dapat membawa state awal  $x_0$  ke state manapun dalam selang waktu tertentu  $t_0 \leq t \leq t_1$ . Artinya setiap statenya dapat dipengaruhi oleh input. Perhatikan sistem kontiniu (13) berikut :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (13)$$

Solusi persamaan (13) dapat diuraikan dengan persamaan (14)-(16) :

$$x(t) = e^{At}x(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)} Bu(\tau)d\tau = 0 \quad (14)$$

$$x(t_1) = 0 = e^{At_1}x(0) + \int_0^{t_1} e^{A(t_1-\tau)} Bu(\tau)d\tau \quad (15)$$

$$x(0) = - \int_0^{t_1} e^{-A\tau} Bu(\tau)d\tau \quad (16)$$

Dengan mendefinisikan  $e^{-A\tau} = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k(\tau)A^k$  kemudian substitusikan ke persamaan (15) didapatkan persamaan (17)

$$x(0) = -\sum_{k=0}^{n-1} A^k B \int_0^{t_1} \alpha_k(\tau) u(\tau) d\tau \tag{17}$$

Jika  $\int_0^{t_1} \alpha_k(\tau) u(\tau) d\tau = \beta_k$  maka persamaan (2.17) dapat dituliskan seperti persamaan (18)

$$x(0) = - [B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B] \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_{n-1} \end{bmatrix} \tag{18}$$

Agar persamaan (18) terpenuhi maka matriks  $C$  yang didefinisikan seperti persamaan (19) juga harus terpenuhi pula. Dimana matriks  $C$  n x n memiliki rank  $n$

$$C = [B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B] \tag{19}$$

Sistem (1) dikatakan controllable jika dan hanya jika matriks n x n dari matriks  $[B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B]$  bebas linier atau matriks  $C$  persamaan (19) memiliki rank n yang disebut juga dengan full rank. Sedangkan *observable* adalah jika pada saat  $t = t_0$  dengan state  $x(t_0)$  dapat dihitung dari observasi output pada selang waktu tertentu  $t_0 \leq t \leq t_1$ . Artinya state sekarang dapat diketahui dengan mengetahui output sebelumnya dan state awalnya. Dan bila salah satu atau lebih state  $x$  tidak dapat ditentukan dari output  $y$  maka sistem tidak *observable*. Perhatikan sistem (20):

$$\dot{x}(t) = Ax(t); \quad y(t) = Cx(t) \tag{20}$$

Dimana  $x \in \mathcal{R}^n$  adalah vector state,  $y \in \mathcal{R}^m$  adalah vektor output,  $A$  dan  $C$  matriks dengan dimensi bersesuaian. Persamaan  $\dot{x} = Ax$  dapat dituliskan lagi seperti persamaan (21) dan  $y = Cx$  seperti persamaan (22)

$$x(t) = Ce^{At}x(0) \tag{21}$$

$$y^{n-1}(t) = Cx^{n-1}(t) = CA^{n-1}x(t) \tag{22}$$

Sehingga :

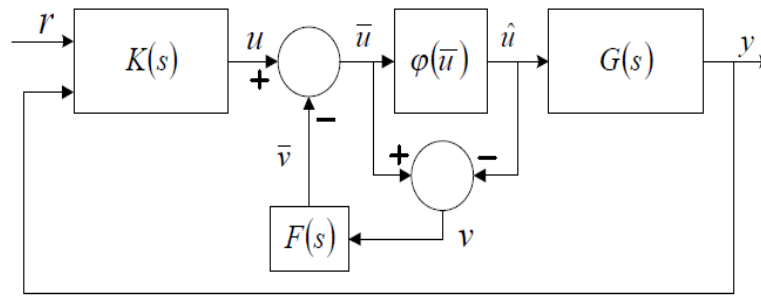
$$Y(t) = \begin{bmatrix} \dot{y}(t) \\ \ddot{y}(t) \\ \vdots \\ y^{n-1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} x(t) = O^T x(t) \tag{23}$$

$$O = [C \quad AC \quad \dots \quad A^{n-1}C]^T \tag{24}$$

Dengan  $O$  matriks *observability* persamaan (24), maka sistem yang *observability* adalah sistem yang direpresentasikan seperti persamaan (20) dikatakan *observability* jika dan hanya jika matriks  $O$  seperti persamaan (24) dimensi nxm mempunyai rank n, atau mempunyai n persamaan yang bebas linier

### 3.3. Perancangan Anti-Windup

Perancangan Anti Windup dilakukan dengan dua tahap perancangan yaitu, pertama, perancangan pengendali  $K(s)$  yang dapat menstabilkan dan memberi kinerja baik pada sistem linier  $G(s)$ . Tahap ini dilakukan dengan mengabaikan adanya elemen saturasi  $\varphi(.)$  Kedua, perancangan kompensator *anti-windup*  $F(s)$  yang hanya aktif ketika saturasi terjadi sehingga sistem dapat stabil dan dampak buruk kinerja dapat diminimalisir. Asumsi perancangan kompensator *anti-windup* yaitu model saturasi yang digunakan identik dengan saturasi plant. Skema Anti Windup seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Anti Windup

SMC pada sistem linier MIMO bertujuan untuk mendapatkan kompensator untuk mengatasi efek direksionalitas akibat windup. Perancangan SMC terdiri dari dua bagian, yaitu perancangan *sliding surface* dan perancangan sinyal kendali.

*Pertama*, perancangan *sliding surface* atau permukaan luncur linier  $\sigma(x) = Se = 0$ , dengan  $S$  adalah matriks ril tak nol yang dimensinya  $m \times p$  dan  $r$  adalah set point kostan berupa matriks kolom berdimensi  $p$ . Persamaan *sliding surface* seperti ditunjukkan pada persamaan (25).

$$\sigma(x) = Se = S(y - r) = S(Cx - r) = 0 \tag{25}$$

*Kedua*, perancangan sinyal kendali seperti ditunjukkan persamaan (26)

$$u = u_{eq} + u_N \tag{26}$$

Jika *sliding mode* terjadi maka sinyal kendali  $u_N = 0$  dan sinyal kendali  $u_{eq}$  akan bekerja untuk mempertahankan trayektori sistem tetap berada di *sliding surface* pada kondisi ini  $\dot{\sigma}(x) = 0$ . Akibatnya  $u_{eq}$  didapatkan dari solusi persamaan (27).

$$\dot{\sigma}(x) = SC\dot{x} = SC(Ax + Bu_{eq}) = 0 \tag{27}$$

Penyelesaian persamaan (27) dengan asumsi nantinya akan bekerja juga observer, sehingga  $u_{eq}$  didapatkan seperti pada persamaan (29) berikut :

$$u_{eq} = -(SCB)^{-1}SCAx \tag{29}$$

Dimana  $SCB$  adalah matrik non-singular

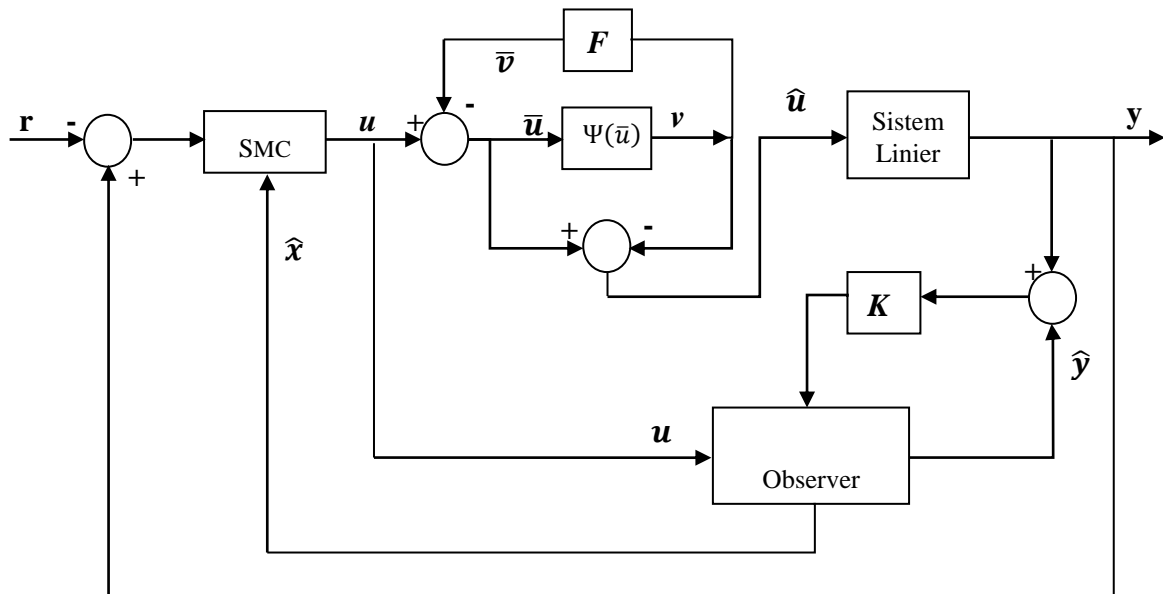
Pada kondisi ketika sistem tidak berada pada permukaan luncur, maka  $u_N$  merupakan sinyal kendali yang membawa trayektori ke *sliding surface* dan  $u_N = 0$  ketika berada di dalam *sliding surface*. Syarat agar mode luncur terjadi maka  $u_N$  memenuhi syarat :  $\sigma(x)^T \dot{\sigma}(x) < 0$ , ketika  $\sigma(x) \neq 0$ . Pada penelitian ini struktur umpan balik linear dengan  $u_N$  yang digunakan seperti ditunjukkan pada rujukan [14] seperti pada persamaan (30):

$$u_N = -(SCB)^{-1}L\sigma(x) = -(SCB)^{-1}LS(Cx - r), \text{ dengan } L > 0 \tag{30}$$

Untuk  $r = 0$ , dan dengan mensubstitusikan  $u_{eq}$  persamaan (29) dan  $u_N$  persamaan (30) kepersamaan (8) maka didapatkan persamaan sinyal kendali pada SMC seperti persamaan (31)

$$u = -(SCB)^{-1}(LSA + LSC)x \tag{31}$$

Seperti pada Gambar 3, rancangan sistem observer dengan SMC untuk mengatasi efek Windup (Anti Windup) pada plant linier. Dengan menggunakan LMI maka didapatkan matriks L, S, F dan K melalui tahap berikut.



Gambar 3. Perancangan Sistem Keseluruhan

Tahap pertama : pilih sembarang  $\xi > 0$ , lalu hitung matriks-matriks  $L, S, R$  dan  $P$  yang meminimumkan  $\lambda$  melalui sejumlah LMI dan  $\epsilon_1 I, \epsilon_2 I, \epsilon_3 I, \epsilon_4 I, \epsilon_5 I, \epsilon_6 I, \epsilon_7 I > 0$

Tahap kedua : dengan menggunakan  $L$  dan  $S$  hitung  $P_1 > 0$  pertaksamaan (29) yang memenuhi pertaksamaan (301). Cari lain adalah memastikan seluruh nilai eigen dari  $[A - B(SCB)^{-1}(X + Y)]$  adalah negative, dengan  $X$  dan  $Y$ . Apabila langkah kedua terpenuhi maka rancangan SMC linier MIMO telah berhasil sehingga Gambar (3) stabil asimptotik global pada titik originnya. Namun bila belum terpenuhi maka pilih  $\xi > 0$  yang lain lalu kembali ke langkah pertama.

Tahap ketiga : dengan menggunakan  $L$  dan  $S$  yang diperoleh pada Solusi 1, hitung  $P_t > 0$  yang meminimumkan  $\lambda > 0$  dan memenuhi LMI. Apabila terpenuhi maka sistem Gambar 3 dijamin stabil pada set point  $r \neq 0$  dengan kinerja  $\mathcal{L}_2$  - gain.

Tahap empat : dengan menggunakan  $L$  dan  $S$  yang sudah diperoleh pada solusi 1, hitung  $Q, R$ , dan  $U$  yang meminimumkan  $\gamma > 0$  dimana  $Q > 0, Z > 0$ . Kompensator anti windup  $F$  diperoleh melalui  $F = UR^{-1}$ . Sehingga untuk sistem tracking  $r \neq 0$  sistem anti windup memiliki jaminan kestabilan dan kinerja  $\mathcal{L}_2$  - gain telah berhasil dirancang. Sedangkan untuk sistem  $r = 0$  bila matrik  $(A_G, B_G)$  controllable dan  $(A_G, C_G)$  observable maka sistem antiwindup juga stabil absolute.

Tahap lima : dengan sistem pada Gambar 3 dan dengan menggunakan matriks konstan  $L$  dan  $S$ , maka prolem perancangan gain observer untuk sistem regulator adalah menentukan matrik konstan  $K$  dan  $P$ .

### 3. Hasil dan Analisa

Simulasi hasil perancangan observer digunakan plant *benchmark* seperti (31) dalam rujukan [2, 3, 13, dan 14]

$$A = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 0.4 & -0.5 \\ -0.3 & 0.4 \end{bmatrix}; D = 0 \quad (31)$$

Hasil perhitungan LMI didapatkan matriks  $L, S, P_1$  dan  $P_t$  dengan minimum lamda  $\gamma$  untuk  $\xi = 0.1, \xi = 0.5$  dan  $\xi = 1.0$  untuk *plant 1* seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil perhitungan **L, S, P1** dan **Pt**

<b><math>\xi = 0.1</math></b>	
<b>L</b>	$\begin{bmatrix} 1.0001e - 001 & -1.3685e - 021 \\ -1.3685e - 021 & 1.0001e - 001 \end{bmatrix}$
<b>S</b>	$\begin{bmatrix} 2.5736e - 004 & 3.2170e - 004 \\ 1.9302e - 004 & 2.5736e - 004 \end{bmatrix}$
<b>P<sub>1</sub></b>	$\begin{bmatrix} 4.9254e - 006 & 3.4531e - 020 \\ 3.4531e - 020 & 4.9254e - 006 \end{bmatrix}$
<b>P<sub>t</sub></b>	$\begin{bmatrix} 2.3799e + 000 & -1.7532e - 016 \\ -1.7532e - 16 & 2.3799e + 000 \end{bmatrix}$
<b><math>\gamma</math></b>	2.0060e-002
<b><math>\xi = 0.5</math></b>	
<b>L</b>	$\begin{bmatrix} 5.0009e - 001 & -2.3773e - 019 \\ -2.3773e - 019 & 5.0009e - 001 \end{bmatrix}$
<b>S</b>	$\begin{bmatrix} 3.3234e - 002 & 4.1542e - 002 \\ 2.4925e - 002 & 3.3234e - 002 \end{bmatrix}$
<b>P<sub>1</sub></b>	$\begin{bmatrix} 3.7591e - 004 & 5.9455e - 019 \\ 5.9455e - 019 & 3.7591e - 004 \end{bmatrix}$
<b>P<sub>t</sub></b>	$\begin{bmatrix} 3.2426e + 005 & 1.7089e - 010 \\ 1.7089e - 010 & 3.2426e + 005 \end{bmatrix}$
<b><math>\gamma</math></b>	5.0410e-001
<b><math>\xi = 1.0</math></b>	
<b>L</b>	$\begin{bmatrix} 1.0001e + 000 & 9.8338e - 019 \\ 9.8338e - 019 & 1.0001e + 000 \end{bmatrix}$
<b>S</b>	$\begin{bmatrix} 1.0080e - 001 & 1.2600e - 001 \\ 7.5600e - 002 & 1.0080e - 001 \end{bmatrix}$
<b>P<sub>1</sub></b>	$\begin{bmatrix} 1.1568e - 003 & -7.5354e - 018 \\ -7.5354e - 018 & 1.1568e - 003 \end{bmatrix}$
<b>P<sub>t</sub></b>	$\begin{bmatrix} 4.6054e - 006 & 9.20881e - 020 \\ 9.2088e - 020 & 4.6180e - 006 \end{bmatrix}$
<b><math>\gamma</math></b>	2.0122e+000

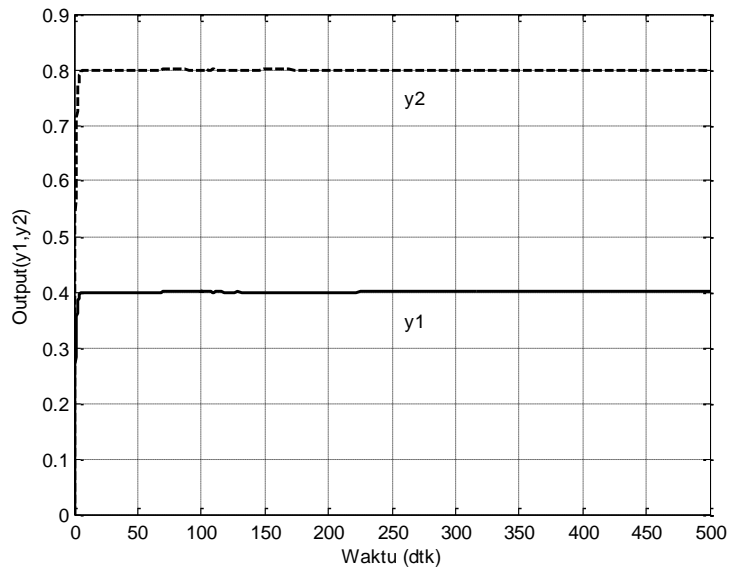
Perhitungan kompensator Anti Windup dan gain observer masing-masing matrik F dan matrik K untuk nilai  $\xi = 0.1$ ,  $\xi = 0.5$  dan  $\xi = 1.0$  seperti pada Tabel 2.

Table 4.3. Hasil perhitungan **K** dan **F**

<b><math>\xi = 0.1</math></b>	
<b>K</b>	$\begin{bmatrix} 6.3158e + 001 & 7.9461e + 001 \\ 9.8318e + 001 & 1.2855e + 002 \end{bmatrix}$
<b>F</b>	$\begin{bmatrix} 3.2820e + 003 & 4.2038e + 003 \\ 2.5627e + 003 & 3.2820e + 003 \end{bmatrix}$
<b><math>\xi = 0.5</math></b>	
<b>K</b>	$\begin{bmatrix} -1.6342e + 002 & -2.0241e + 002 \\ -1.7418e + 002 & -2.2985e + 002 \end{bmatrix}$
<b>F</b>	$\begin{bmatrix} 3.5543e + 003 & 4.5525e + 003 \\ 2.7755e + 003 & 3.5544e + 003 \end{bmatrix}$
<b><math>\xi = 1.0</math></b>	
<b>K</b>	$\begin{bmatrix} -2.0451e + 002 & -2.5350e + 002 \\ -2.2664e + 002 & -2.9919e + 002 \end{bmatrix}$
<b>F</b>	$\begin{bmatrix} 2.9987e + 003 & 3.8410e + 003 \\ 2.3416e + 003 & 2.9988e + 003 \end{bmatrix}$

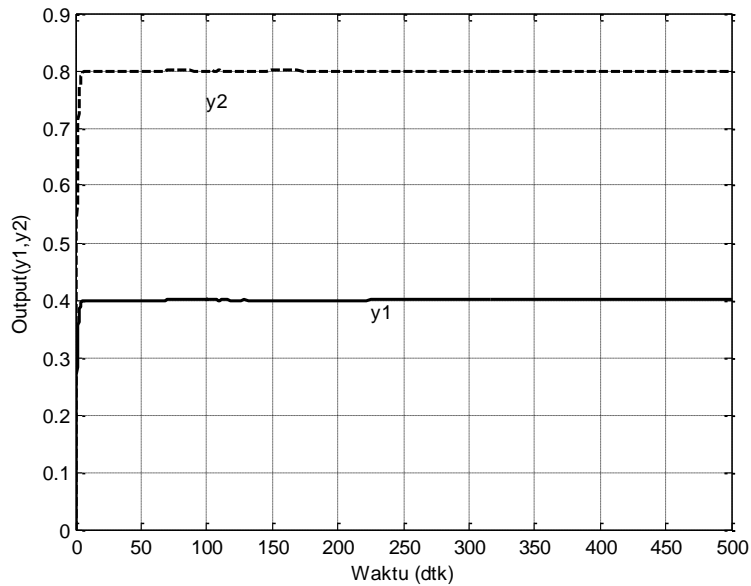


Simulasi output  $y_1$  dan  $y_2$  dengan nilai  $\xi = 1.0$  seperti pada Gambar 4, yaitu output sistem linier dengan pengendali SMC.

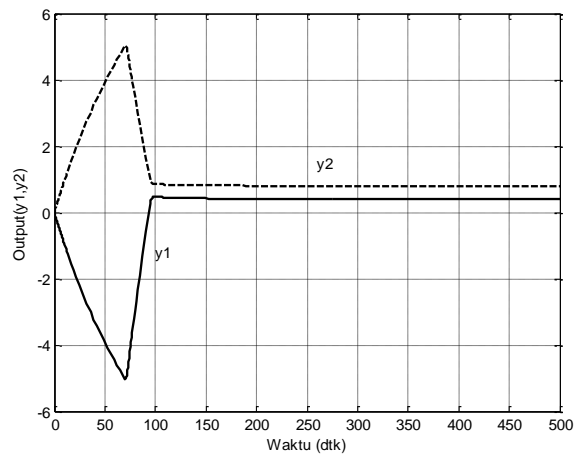


Gambar 4. Output Sistem Linier dengan SMC

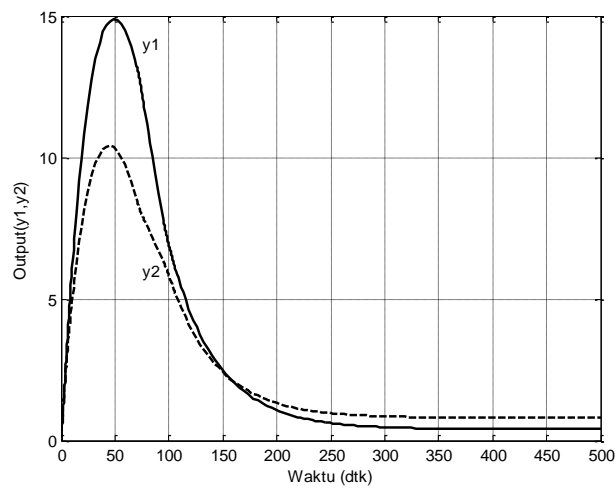
Gambar 5, adalah output sistem linier pengendali SMC dengan observernya. Gambar 6. adalah sistem linier SMC dengan sinyal kendali tersaturasi, dan Gambar 7 adalah sistem linier SMC dengan sinyal kendali tersaturasi dengan dengan observer. Gambar 8. sistem sinyal input tersaturasi dengan dengan observer.



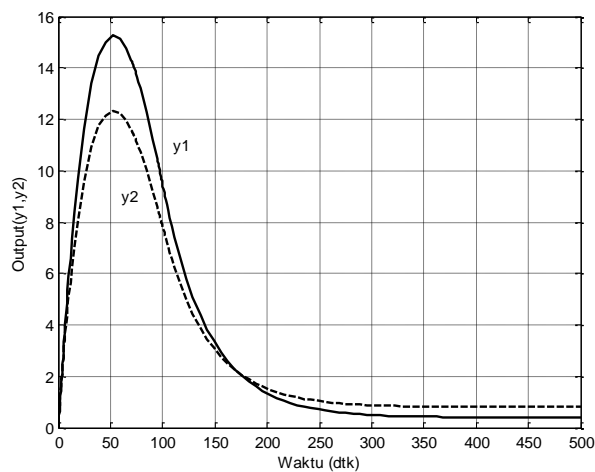
Gambar 5. Output Sistem Linier SMC dan Observer



Gambar 6. Sistem Linier SMC dan Sinyal Kendali Tersaturasi



Gambar 7. Sistem Linier SMC dan Sinyal Kendali Tersaturasi dengan Observer.



Gambar 8. Sistem Sinyal Input Tersaturasi dengan Observer.

Dapat diamati dari Gambar 4. dan Gambar 5 output sistem sistem linier dan sistem linier dan observer telah dapat mengikuti set point  $[r = 0,4 ; 0,8]$  ini berarti observer yang dirancang

sudah dapat memenuhi criteria perancangan. Sementara ketika terjadi fenomena wind up dengan adanya sinyal kendali mengalami saturasi. Adanya anti wind up dapat mengatasi efek wind up seperti Gambar 6. Untuk Gambar 7 dan 8. output sistem linier sama dengan output observernya dengan sebuah pengendali SMC yang disertai dengan Anti Windup.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil merancang sebuah gain observer yang kemudian dinyatakan dalam bentuk LMI. Hasil perhitungan untuk gain observer dinyatakan dengan matriks K dan F diperlihatkan pada Tabel 2.

Simulasi output sistem plant linier dengan pengendali SMC, output untuk plant linier dengan pengendali SMC sinyal input mengalami saturasi dan output untuk plant linier pengendali SMC dengan adanya anti-windup dan sistem disertai dengan observer. Simulasi simulasi berhasil memperlihatkan anti windup mampu memperbaiki kinerja sistem yang sinyal inputnya mengalami saturasi. Sedangkan simulasi untuk state juga dibagi tiga yaitu state plant linier dengan SMC.

#### Daftar Pustaka

- [1] A. Syaichu Rohman, *A Multivariable Nonlinear Algebraic Loop and Its Geometric Interpretation*, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics, ITB, Indonesia, June 17, 2007
- [2] A. Syaichu Rohman, R.H. Middleton, *An Explicit Static Anti Windup Design for A Class of Two Input Two Output Plants*, The University of Newcastle, Callaghan NSW, Australia
- [3] A. Zheng, M.V. Kothare dan M. Morari, *Anti Windup Design for Internal Model Control*, Technical Memorandum No. CIT-CDS 93-007, May 6, 1993
- [4] Ai-Guo Wu dan Guang-Ren Duan, *Design of PI Observer for Continuous-Time Descriptor Linear Systems*, IEEE, Vol. 36, No. 6, December 2006
- [5] B.C. Chang dan Ajmal Yousuff, *Pole Placement and the Observer-Based Controller Parameterization*, IEEE, Vol. 35, No. 6, 1990
- [6] Brandon Hancey, Andrew Alleyne, *An Anti-Windup Techniquis for LMI Regions with Aplications to a Fluid Power System*, IEEE, American Control Conference, June 11-13, 2008
- [7] Chi-Thong Chen, *Linear SistemTheory and Design*, Thrird Edition, 1999
- [8] D. Horla, *On Directional Change Anti-Windup Compensation in Multivariable Control System*, Int. J. Appl. Math. Comput. Sci, 2009, 19, No. 2, 281-289, 2009
- [9] Eric F. Muder, Mayurech V. Kothare, Manfred Morari, *Multivariable Anti-Windup Controller Synthesis Using Linear Matrix Inequality*, Automatica, 37,1407-1416,2001
- [10] G. Hermann, M.C. Turner dan I. Postlethwaite, *Linear Matrix Inequality in Control, Mathematical Methods for Robust and Nonlinear Control*, EPSRC Summer School, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [11] H. Sira-Ramirez, R. Marquez-Contreras dan M. Fliess, *Sliding Mode Control of DC-to-DC Power Converter Using Integral Reconstructors*, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 12, Issue 13, Pages 1173-1186, Wiley Interscience, 2002
- [12] Harry Septanto, A. Syaichu Rohman dan Dimitri Mahayana, *Static Anti-Windup Compensator Design of Linear Sliding Mode Control For Input Saturation Systems*, International Conference on Electrical Engineering an Informatics, Bandung, July 17-19, 2011
- [13] Harry Septanto, *Perancangan Sistem Anti-Windup Statik pada Pengendali Sliding Mode Linier Multivariabel Melalui Sejumlah Linear Matrix Inequality*, Tesis S2, ITB, 2010
- [14] J. C. Doyle, R.S. Smith dan D.F. Enns, *Control of Plant Input Saturation Nonlinearities*, Proceeding of the 1987 American Control Conference, 10341039, 1987
- [15] J. E. Slotin dan W. Li, *Aplied Nonlinear Control*, Prentice-Hall International, USA, 1991
- [16] J. Ohr, *Anti-Windup and Control Sistemwith Multiple Input Saturation: Tools, Solution and Case Studies*, Tesis PhD, Uppsala University, Uppsala, 2003

- [17] M. Homayounzade, M. Keshmiri, M. Danesh, *An Observer-Based State Feedback Controller Design for Robot Manipulators Considering Actuators Dynamic*, IEEE, 978-1-4244-7827-9, 2010
- [18] N. Gonzalez Fonseca, J de Leon Morales dan J. Leyva Ramos, *Observer-Based Controller for Swith-Mode DC-DC Converters*, Conference on Decision and Control, IEEE, No. 0-7803-9568-9/05, 2005
- [19] Nobutaka Wada dan Masami Saeki, *Design of A Staric Anti-Windup Compensator that Optimizes L2 Performance : An LMI Based Approach*, Proceeding IEEE, 2003
- [20] P. Hippe, *Windup In Control Its Effects and Their Prevention*, Springer-Verlag London Limited, 2006
- [21] R.A. Decarlo, S.H. Zak dan G.P. Matthews, *Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systema : A Tutorial*, Proceedings of IEEE, Vol. 76, No. 3, March, 2009
- [22] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, dan V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in Sistemand Control Theory*, Studies in Applied Mathematics, Philadelphia, 15, PA:SIAM, 1994
- [23] Shunsuke Takamatsu, Unggul Wasiwitono, Masami Saeki dan Nobutada Wada, *Anti-Windup Compensator Design Considering Bahavior of Controller State*, International Conference on Control Applications, IEEE, 978-14244-5363-4/10, 2010
- [24] Stefen Hui, Stanislaw H. Zak, *Observer Design for Sistemwith Unknown Inputs*, Internotional Jurnal Appl. Math. Compt. Sci, Vol. 15, No. 4, 341-446/10, 2005
- [25] Vivek Kumar Sehgal, Durg Singh Chauhan, *State Observer Controller Design for Packets Flow Control in Netmork-on-Chip*, Springer Science, 2009
- [26] Weiwen Wang dan Zhiqiang Gao, *A Comparison Study of Advenced State Observer Design Techniques*, Cheveland State University, Cheveland
- [27] Wibie R.R., *Perancangan Anti Windup Berbasis Pertidaksamaan Linier untuk Internal Model Control*, Tesis S2, ITB, 2007