

SIDANG TUGAS AKHIR

Kompensasi Kesalahan Sensor Berbasis
Descriptor Dengan Performa H_{∞} pada
Winding Machine

Oleh : Hendra Antomy (22 11 100 130)
Dosen Pembimbing : Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT.



OUTLINE

1

PENDAHULUAN

2

PERANCANGAN KONTROL NOMINAL

3

PERANCANGAN ESTIMATOR

4

HASIL SIMULASI

5

KESIMPULAN DAN SARAN

PENDAHULUAN



PENDAHULUAN

LATAR BELAKANG

1

Sistem *Winding Machine* merupakan plant yang membutuhkan performa dan stabilitas yang tinggi.

2

Kesalahan yang terjadi pada sensor mengakibatkan kontroler menghasilkan perintah yang salah sehingga performa dan stabilitas sistem akan menurun.

3

Kesalahan yang terjadi pada sensor dapat dikompensasi apabila besarnya kesalahan sensor diketahui.

4

Untuk mengestimasi besarnya kesalahan sensor yang terjadi dapat menggunakan estimator kesalahan sensor berbasis sistem *descriptor*

RUMUSAN MASALAH

TUJUAN



Back to
Outline

PENDAHULUAN

LATAR
BELAKANG

1

Kesalahan yang terjadi pada sensor mengakibatkan *winding machine* mengalami penurunan performa dan stabilitas.

2

Gangguan yang terjadi pada sistem mengakibatkan estimator menghasilkan estimasi kesalahan sensor yang kurang tepat.

RUMUSAN
MASALAH

TUJUAN



Back to
Outline

PENDAHULUAN

LATAR
BELAKANG

RUMUSAN
MASALAH

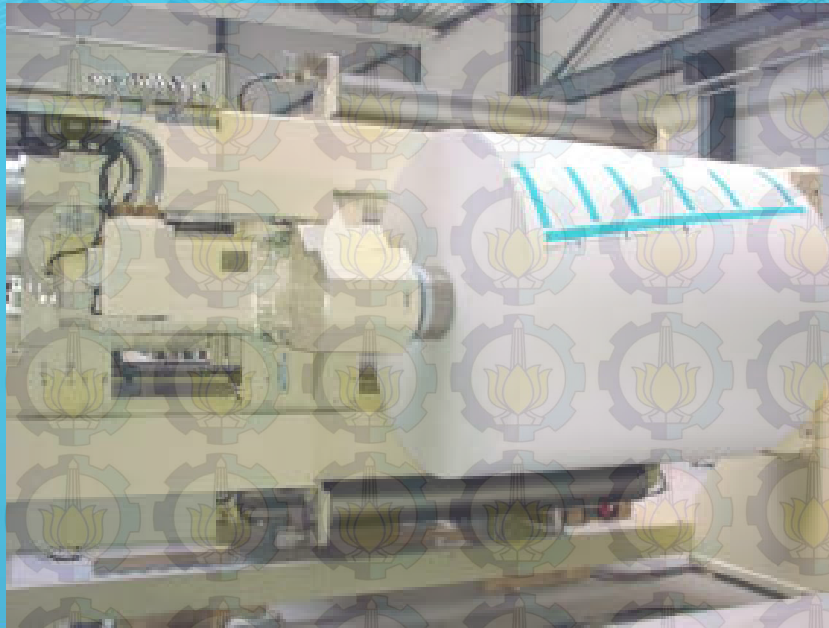
TUJUAN

Merancang estimator kesalahan sensor yang memenuhi performa H_∞ sehingga efek gangguan pada sistem dapat dilemahkan dibawah tingkat pelemahan yang ditentukan. Estimator ini diterapkan pada *winding machine* sehingga mampu menjaga performa dan stabilitas sistem pada keadaan nominal dan pada saat terjadi kesalahan sensor.



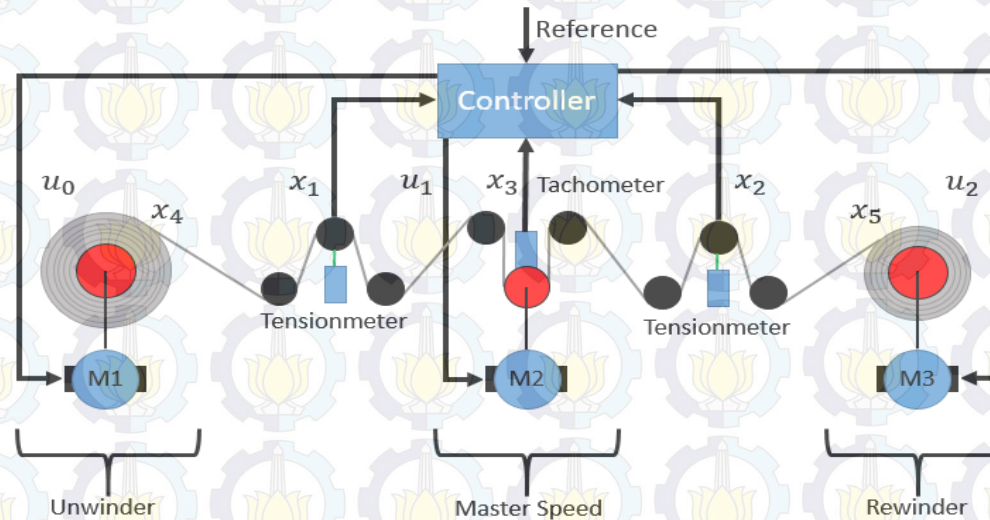
Back to
Outline

PERANCANGAN KONTROL NOMINAL



PERANCANGAN KONTROL NOMINAL

Model Fisik *Winding Machine*



Model Matematika *Winding Machine*

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{L_1} [x_3 x_1 + AE(x_3 - x_4)]$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{L_2} [x_5 x_2 - x_3 x_1 + AE(x_5 - x_3)]$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{\beta_{f1}}{J_1} x_3 + \frac{R_1}{J_1} u_1 + \frac{R_1^2}{J_1} (x_2 - x_1)$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{\beta_{f0}}{J_0} x_4 - \frac{R_0}{J_0} u_0 + \frac{1}{J_0} \left[R_0^2 x_1 - \frac{e_w}{2\pi} \left(\frac{J_0}{R_0^2} - 2\pi t_\rho t_w R_0^2 \right) x_4^2 \right]$$

$$\dot{x}_5 = -\frac{\beta_{f2}}{J_2} x_5 + \frac{R_2}{J_2} u_2 + \frac{1}{J_2} \left[-R_2^2 x_2 + \frac{e_w}{2\pi} \left(\frac{J_2}{R_2^2} - 2\pi t_\rho t_w R_2^2 \right) x_5^2 \right]$$

x_1 : Tegangan material pada unwinder roller
 x_2 : Tegangan material pada rewinder roller
 x_3 : Kecepatan transport material pada master speed roller
 x_4 : Kecepatan transport material pada unwinder roller
 x_5 : Kecepatan material pada rewinder roller

MODEL
PLANT

SEKTOR
NONLINEARITAS

MODEL
FUZZY

KONTROLER
SERVO TIPE 1



Back to
Outline

PERANCANGAN KONTROL NOMINAL

MODEL
PLANT

SEKTOR
NONLINEARITAS

MODEL
FUZZY

KONTROLER
SERVO TIPE 1

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} x_3 & 0 & \frac{AE}{L_1} & -\frac{AE}{L_1} & 0 \\ -\frac{1}{L_2} x_3 & \frac{1}{L_2} x_5 & -\frac{AE}{L_2} & 0 & \frac{AE}{L_2} \\ -\frac{R_1^2}{J_1} & \frac{R_1^2}{J_1} & -\frac{\beta_{f1}}{J_1} & 0 & 0 \\ \frac{R_0^2}{J_0} & 0 & 0 & -\frac{\beta_{f0}}{J_0} - \frac{e_w}{2\pi J_0} \left(\frac{J_0}{R_0^2} - 2\pi t_\rho t_w R_0^2 \right) x_4 & 0 \\ 0 & -\frac{R_2^2}{J_2} & 0 & 0 & -\frac{\beta_{f2}}{J_2} + \frac{e_w}{2\pi J_2} \left(\frac{J_2}{R_2^2} - 2\pi t_\rho t_w R_2^2 \right) x_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_1}{J_1} & 0 \\ -\frac{R_0}{J_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_2}{J_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{A}$

$\mathbf{B}$

$x_3 \approx x_4 \approx x_5$



Back to
Outline

PERANCANGAN KONTROL NOMINAL

MODEL
PLANT

SEKTOR
NONLINEARITAS

MODEL
FUZZY

KONTROLER
SERVO TIPE 1

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} x_3 & 0 & \frac{AE}{L_1} & -\frac{AE}{L_1} & 0 \\ -\frac{1}{L_2} x_3 & \frac{1}{L_2} x_3 & -\frac{AE}{L_2} & 0 & \frac{AE}{L_2} \\ -\frac{R_1^2}{J_1} & \frac{R_1^2}{J_1} & -\frac{\beta_{f1}}{J_1} & 0 & 0 \\ \frac{R_0^2}{J_0} & 0 & 0 & -\frac{\beta_{f0}}{J_0} - \frac{e_w}{2\pi J_0} \left(\frac{J_0}{R_0^2} - 2\pi t_\rho t_w R_0^2 \right) x_3 & 0 \\ 0 & -\frac{R_2^2}{J_2} & 0 & 0 & -\frac{\beta_{f2}}{J_2} + \frac{e_w}{2\pi J_2} \left(\frac{J_2}{R_2^2} - 2\pi t_\rho t_w R_2^2 \right) x_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_1}{J_1} & 0 \\ -\frac{R_0}{J_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_2}{J_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$$

A

B

$$x_3 \approx x_4 \approx x_5$$

Linearisasi lokal
pada 5 titik kerja

x_3 sebagai variabel
premis



Back to
Outline

PERANCANGAN KONTROL NOMINAL

MODEL
PLANT

SEKTOR
NONLINEARITAS

MODEL
FUZZY

KONTROLER
SERVO TIPE 1

Aturan Plant

If $x_3(t)$ is M_1 (sekitar 0 m/s)
Then $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{u}(t)$
 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_1\mathbf{u}(t)$

If $x_3(t)$ is M_3 (sekitar 2 m/s)
Then $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_3\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_3\mathbf{u}(t)$
 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_3\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_3\mathbf{u}(t)$

If $x_3(t)$ is M_5 (sekitar 4 m/s)
Then $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_5\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_5\mathbf{u}(t)$
 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_5\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_5\mathbf{u}(t)$

If $x_3(t)$ is M_2 (sekitar 1 m/s)
Then $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_2\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{u}(t)$
 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_2\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_2\mathbf{u}(t)$

If $x_3(t)$ is M_4 (sekitar 3 m/s)
Then $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_4\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_4\mathbf{u}(t)$
 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_4\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_4\mathbf{u}(t)$

dengan:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 800 & -800 & 0 \\ 0 & 0 & -800 & 0 & 800 \\ -0,83 & 0,83 & -1,87 & 0 & 0 \\ 2,04 & 0 & 0 & -1,50 & 0 \\ 0 & -2,04 & 0 & 0 & -1,50 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0,67 & 0 & 800 & -800 & 0 \\ -0,67 & 0,67 & -800 & 0 & 800 \\ -0,83 & 0,83 & -1,87 & 0 & 0 \\ 2,04 & 0 & 0 & 3,79 & 0 \\ 0 & -2,04 & 0 & 0 & -6,79 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0,33 & 0 & 800 & -800 & 0 \\ -0,33 & 0,33 & -800 & 0 & 800 \\ -0,83 & 0,83 & -1,87 & 0 & 0 \\ 2,04 & 0 & 0 & 1,15 & 0 \\ 0 & -2,04 & 0 & 0 & -4,15 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 800 & -800 & 0 \\ -1 & 1 & -800 & 0 & 800 \\ -0,83 & 0,83 & -1,87 & 0 & 0 \\ 2,04 & 0 & 0 & 6,44 & 0 \\ 0 & -2,04 & 0 & 0 & -9,44 \end{bmatrix}$$



Back to
Outline

PERANCANGAN KONTROL NOMINAL

MODEL
PLANT

$$\mathbf{A}_5 = \begin{bmatrix} 1,33 & 0 & 800 & -800 & 0 \\ -1,33 & 1,33 & -800 & 0 & 800 \\ -0,83 & 0,83 & -1,87 & 0 & 0 \\ 2,04 & 0 & 0 & 9,08 & 0 \\ 0 & -2,04 & 0 & 0 & -12,08 \end{bmatrix}$$

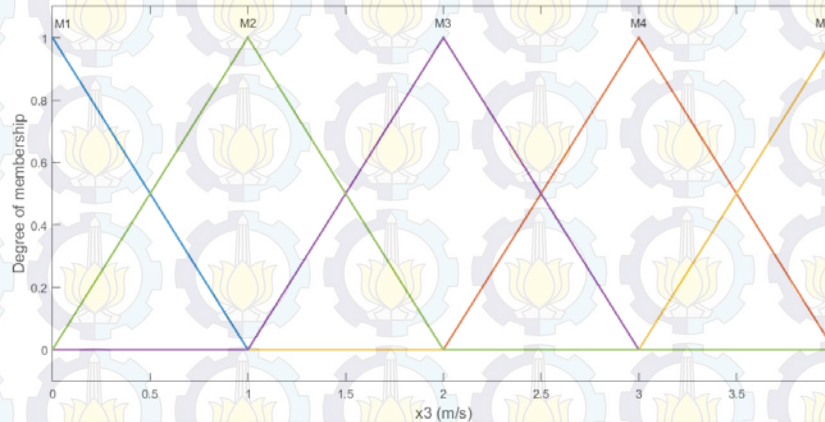
$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 = \dots = \mathbf{B}_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,83 & 0 \\ -1,17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,17 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{C}_2 = \dots = \mathbf{C}_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_1 = \mathbf{D}_2 = \dots = \mathbf{D}_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

SEKTOR
NONLINEARITAS

MODEL
FUZZY



$$\begin{aligned} M_1(x_3(t)) &= -x_3(t) + 1, & 0 \leq x_3(t) \leq 1 \\ M_2(x_3(t)) &= \begin{cases} x_3(t), & 0 \leq x_3(t) \leq 1 \\ -x_3(t) + 2, & 1 \leq x_3(t) \leq 2 \end{cases} \\ M_3(x_3(t)) &= \begin{cases} x_3(t) - 1, & 1 \leq x_3(t) \leq 2 \\ -x_3(t) + 3, & 2 \leq x_3(t) \leq 3 \end{cases} \\ M_4(x_3(t)) &= \begin{cases} x_3(t) - 2, & 2 \leq x_3(t) \leq 3 \\ -x_3(t) + 4, & 3 \leq x_3(t) \leq 4 \end{cases} \\ M_5(x_3(t)) &= x_3(t) - 3, & 3 \leq x_3(t) \leq 4 \end{aligned}$$

KONTROLER
SERVO TIPE 1

Sistem *fuzzy* T-S secara keseluruhan:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^5 h_i(x_3(t)) [\mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t)]$$

dengan:

$$\mathbf{y}(t) = \sum_{i=1}^5 h_i(x_3(t)) [\mathbf{C}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_i \mathbf{u}(t)]$$

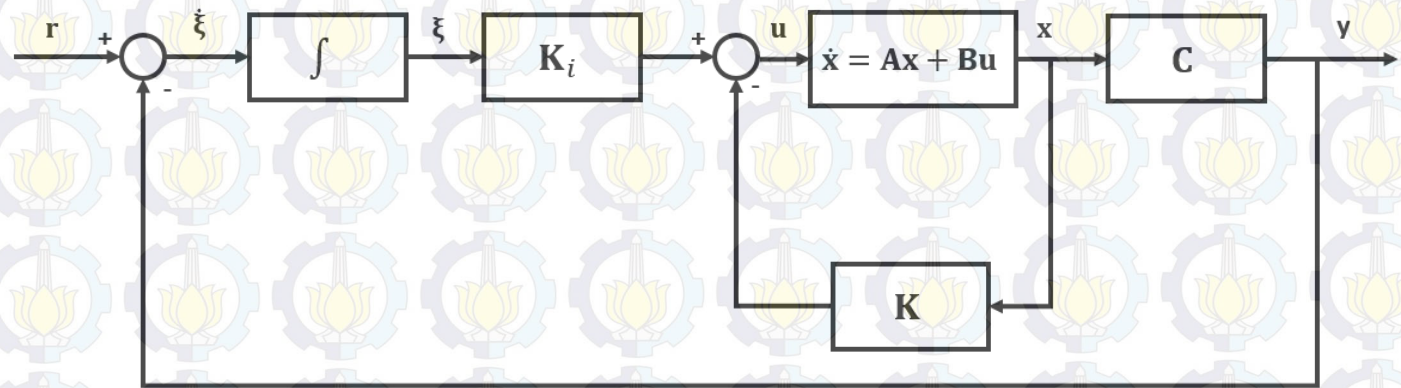
$$h_i(x_3(t)) \geq 0; \quad \sum_{i=1}^5 h_i(x_3(t)) = 1; \quad i = 1, 2, \dots, 5$$



Back to
Outline

PERANCANGAN KONTROL NOMINAL

Diagram Blok Kontroler Servo Tipe 1



Persamaan *State Space* Sistem Kontrol

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\boldsymbol{\xi}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \boldsymbol{\xi}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{r}(t)$$

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}(t) = -\mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{r}(t)$$

MODEL
PLANT

SEKTOR
NONLINEARITAS

MODEL
FUZZY

KONTROLER
SERVO TIPE 1



Back to
Outline

PERANCANGAN KONTROL NOMINAL

MODEL
PLANT

SEKTOR
NONLINEARITAS

MODEL
FUZZY

KONTROLER
SERVO TIPE 1



Back to
Outline

Penentuan *Gain* Kontroler

Dinamika sistem $t > 0$:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\boldsymbol{\xi}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \boldsymbol{\xi}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{r}$$

Dinamika sistem $t = \infty$:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(\infty) \\ \dot{\boldsymbol{\xi}}(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(\infty) \\ \boldsymbol{\xi}(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}(\infty) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{r}(\infty)$$

Substrack

$$\dot{\tilde{\mathbf{e}}}_c = \tilde{\mathbf{A}}_c \tilde{\mathbf{e}}_c + \tilde{\mathbf{B}}_c \mathbf{u}_e \quad \mathbf{r}(\infty) = \mathbf{r}$$

dengan:

$$\mathbf{u}_e = -\tilde{\mathbf{K}}\mathbf{e}, \quad \tilde{\mathbf{K}} = [\mathbf{K} \quad : \quad -\mathbf{K}_i]$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{B}}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}$$

1. Indeks Performa

$$J = \int_0^{\infty} (\tilde{\mathbf{e}}_c^T \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{e}}_c + \mathbf{u}_e^T \mathbf{R} \mathbf{u}_e) dt$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &\geq \mathbf{0}, & \mathbf{Q} &= \mathbf{Q}^T \\ \mathbf{R} &> \mathbf{0}, & \mathbf{R} &= \mathbf{R}^T \end{aligned}$$

2. Aljabar Riccati

$$\tilde{\mathbf{A}}_c^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \tilde{\mathbf{A}}_c + -\mathbf{P} \tilde{\mathbf{B}}_c \mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_c^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0$$

3. *Gain* Kontroler

$$\tilde{\mathbf{K}} = \mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_c^T \mathbf{P}$$

PERANCANGAN KONTROL NOMINAL

Aturan Kontroler

MODEL
PLANT

SEKTOR
NONLINEARITAS

MODEL
FUZZY

KONTROLER
SERVO TIPE 1

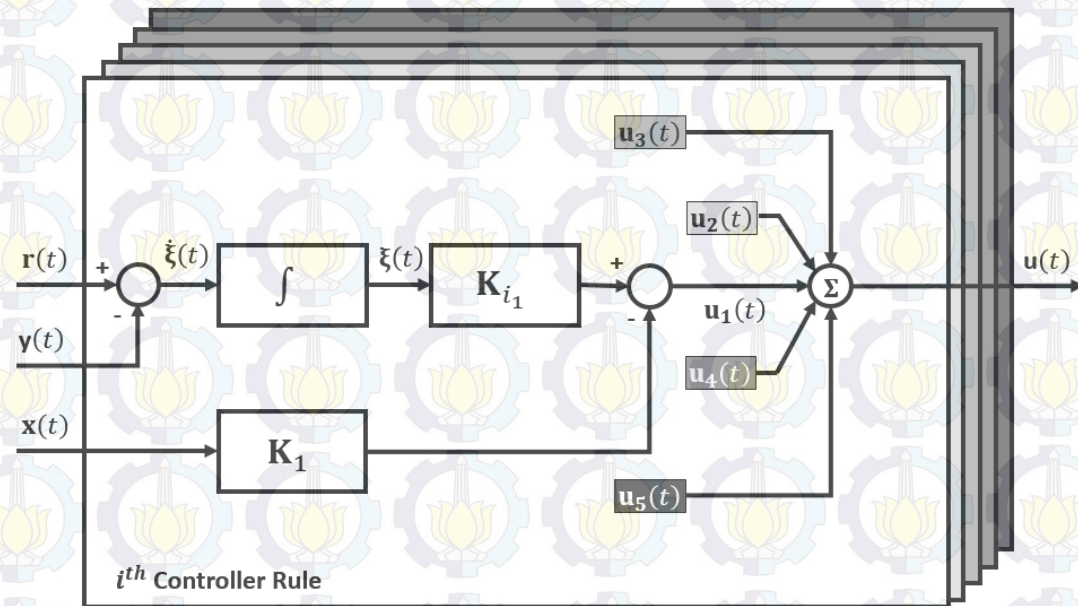
If $x_3(t)$ is M_1 (sekitar 0 m/s)
Then $u(t) = -K_1 x(t) + K_{i_1} \xi(t)$

If $x_3(t)$ is M_3 (sekitar 2 m/s)
Then $u(t) = -K_3 x(t) + K_{i_3} \xi(t)$

If $x_3(t)$ is M_5 (sekitar 4 m/s)
Then $u(t) = -K_5 x(t) + K_{i_5} \xi(t)$

If $x_3(t)$ is M_2 (sekitar 1 m/s)
Then $u(t) = -K_2 x(t) + K_{i_2} \xi(t)$

If $x_3(t)$ is M_4 (sekitar 3 m/s)
Then $u(t) = -K_4 x(t) + K_{i_4} \xi(t)$



Keluaran kontroler *fuzzy* secara keseluruhan: $u(t) = \sum_{j=1}^r h_j(x_3(t)) \left[-K_j x(t) + K_{i_j} \xi(t) \right]$



Back to
Outline

PERANCANGAN KONTROL NOMINAL

Gain Kontroler Hasil Perancangan

MODEL
PLANT

$$\mathbf{Q}_1 = \mathbf{Q}_2 = \dots = \mathbf{Q}_5 = 20 \times \mathbf{I}_8$$

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_2 = \dots = \mathbf{R}_5 = 0.1 \times \mathbf{I}_3$$

SEKTOR
NONLINEARITAS

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 10,60 & 2,06 & 70,25 & -106,48 & 24,78 \\ 6,17 & -6,17 & 116,34 & -50,18 & -50,18 \\ 2,06 & 10,60 & -70,25 & -24,78 & 106,48 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_{i_1} = \begin{bmatrix} 12,10 & 2,04 & -7,02 \\ 7,02 & -7,02 & 10,07 \\ 2,04 & 12,10 & 7,02 \end{bmatrix}$$

MODEL
FUZZY

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 10,63 & 2,06 & 70,50 & -108,81 & 24,73 \\ 6,23 & -6,19 & 116,72 & -50,36 & -50,24 \\ 2,04 & 10,66 & -70,34 & -24,73 & 104,57 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_{i_2} = \begin{bmatrix} 12,14 & 2,07 & -6,95 \\ 6,97 & -7,08 & 10,06 \\ 2,01 & 12,07 & 7,10 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} 10,65 & 2,06 & 70,66 & -111,22 & 24,64 \\ 6,29 & -6,20 & 117,24 & -50,47 & -50,24 \\ 2,03 & 10,71 & -70,33 & -24,64 & 102,74 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_{i_3} = \begin{bmatrix} 12,17 & 2,10 & -6,88 \\ 6,92 & -7,14 & 10,06 \\ 1,98 & 12,03 & 7,17 \end{bmatrix}$$

KONTROLER
SERVO TIPE 1

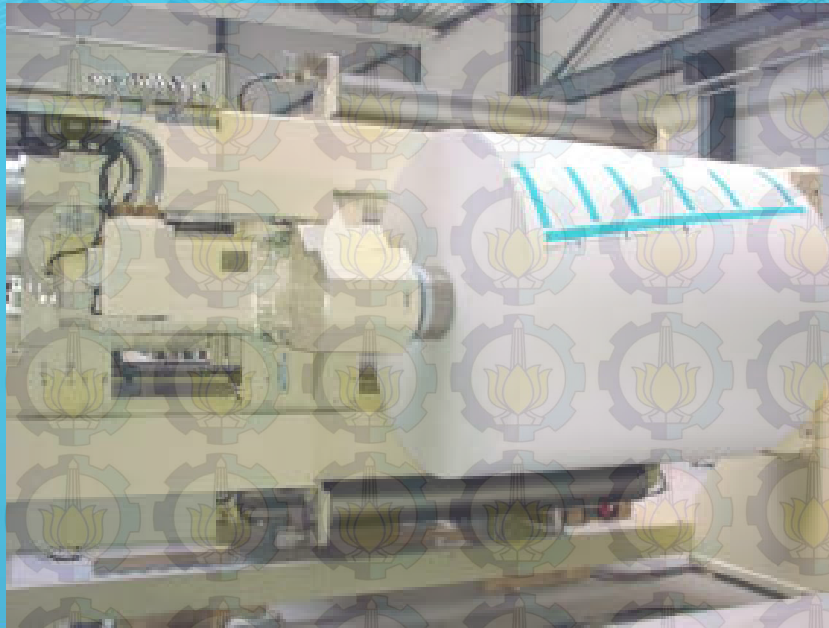
$$\mathbf{K}_4 = \begin{bmatrix} 10,66 & 2,06 & 70,74 & -113,70 & 24,52 \\ 6,36 & -6,22 & 117,90 & -50,53 & -50,18 \\ 2,02 & 10,76 & -70,25 & -24,52 & 100,98 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_{i_4} = \begin{bmatrix} 12,20 & 2,13 & -6,82 \\ 6,88 & -7,19 & 10,05 \\ 1,95 & 11,99 & 7,25 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_5 = \begin{bmatrix} 10,68 & 2,06 & 70,74 & -116,24 & 24,38 \\ 6,42 & -6,24 & 118,68 & -50,53 & -50,07 \\ 2,00 & 10,80 & -70,10 & -24,38 & 99,28 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_{i_5} = \begin{bmatrix} 12,23 & 2,17 & -6,77 \\ 6,84 & -7,25 & 10,03 \\ 1,93 & 11,95 & 7,31 \end{bmatrix}$$



Back to
Outline

PERANCANGAN ESTIMATOR KESALAHAN SENSOR



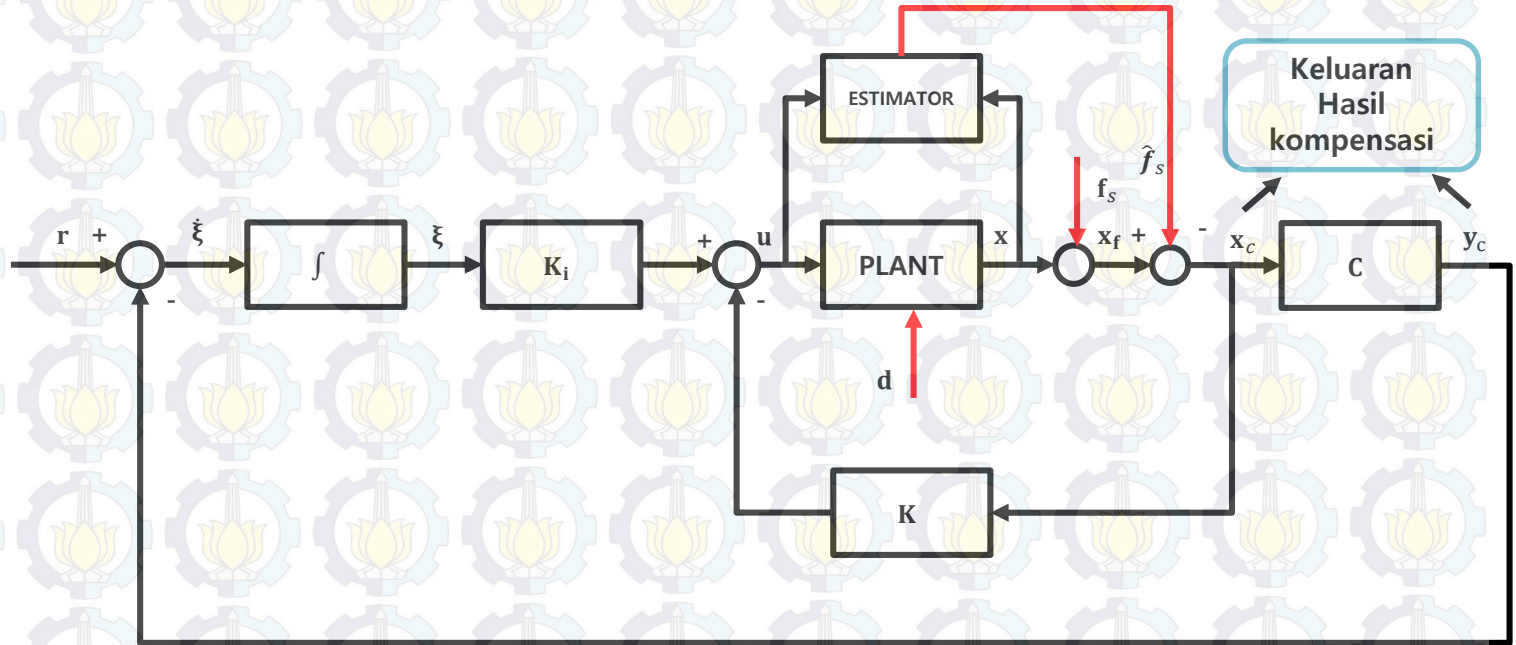
PERANCANGAN ESTIMATOR KESALAHAN SENSOR

Diagram Blok Sistem dengan Estimator Kesalahan Sensor

SKEMA
FTC

BENTUK
ESTIMATOR

PERHITUNGAN
GAIN ESTIMATOR



$$x_c = x_f - \hat{f}_s$$

$$y_c = Cx_c$$

Keluaran hasil kompensasi diharapkan bebas terhadap kesalahan sensor



Back to
Outline

PERANCANGAN ESTIMATOR KESALAHAN SENSOR

Sistem Nonlinear Lipschitz

SKEMA
FTC

BENTUK
ESTIMATOR

PERHITUNGAN
GAIN ESTIMATOR

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \boldsymbol{\Phi}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{B}_d \mathbf{d} \\ \mathbf{y}_f &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} + \mathbf{D}_s \mathbf{f}_s\end{aligned}$$

$\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \rightarrow$ vektor *state*

$\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m \rightarrow$ sinyal kontrol

$\mathbf{y}_f \in \mathbf{R}^p \rightarrow$ vektor keluaran + kesalahan sensor

$\boldsymbol{\Phi}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \in \mathbf{R}^n \rightarrow$ vektor fungsi nonlinear dengan konstanta Lipschitz θ

$\mathbf{f}_s \in \mathbf{R}^k \rightarrow$ vektor kesalahan sensor

$\mathbf{d} \in \mathbf{R}^l \rightarrow$ gangguan terbatas pada sistem

Sistem Descriptor

state dengan persamaan diferensial

$\mathbf{x}$



$\mathbf{E} \neq \mathbf{I}$

$$\begin{cases} \mathbf{E} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{D} \mathbf{u} \end{cases}$$

state tanpa persamaan diferensial

$\mathbf{f}_s$



Back to
Outline

PERANCANGAN ESTIMATOR KESALAHAN SENSOR

Sistem Descriptor dengan $\mathbf{x}$ dan $\mathbf{f}_s$ Sebagai Descriptor State

SKEMA
FTC

BENTUK
ESTIMATOR

PERHITUNGAN
GAIN ESTIMATOR

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{E}}\dot{\tilde{\mathbf{x}}} &= \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u} + \tilde{\Phi}(t, \tilde{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) + \tilde{\mathbf{B}}_d\mathbf{d} \\ \mathbf{y}_f &= \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{D}\mathbf{u}\end{aligned}$$

dengan:

$$\tilde{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Phi}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \Phi(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{C}} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{I}_p]$$

$$\tilde{\mathbf{B}}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_d \\ 0_{p \times l} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{f}_s \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{f}_s \end{bmatrix}$$

Descriptor
State

Diestimasi oleh
Estimator

Diperoleh $\hat{\mathbf{f}}_s$



Back to
Outline

PERANCANGAN ESTIMATOR KESALAHAN SENSOR

SKEMA
FTC

BENTUK
ESTIMATOR

PERHITUNGAN
GAIN ESTIMATOR

Bentuk State Space Sensor Fault Estimator

$$(\tilde{\mathbf{E}} + \tilde{\mathbf{L}}_d \tilde{\mathbf{C}}) \dot{\hat{\mathbf{x}}} = (\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{L}}_p \tilde{\mathbf{C}}) \hat{\mathbf{x}} + (\tilde{\mathbf{B}} - \tilde{\mathbf{L}}_p \mathbf{D}) \mathbf{u} + \hat{\Phi}(t, \hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) + \tilde{\mathbf{L}}_p \mathbf{y}_f + \tilde{\mathbf{L}}_d (\dot{\mathbf{y}}_f - \mathbf{D} \dot{\mathbf{u}})$$

$\dot{\hat{\mathbf{z}}}$

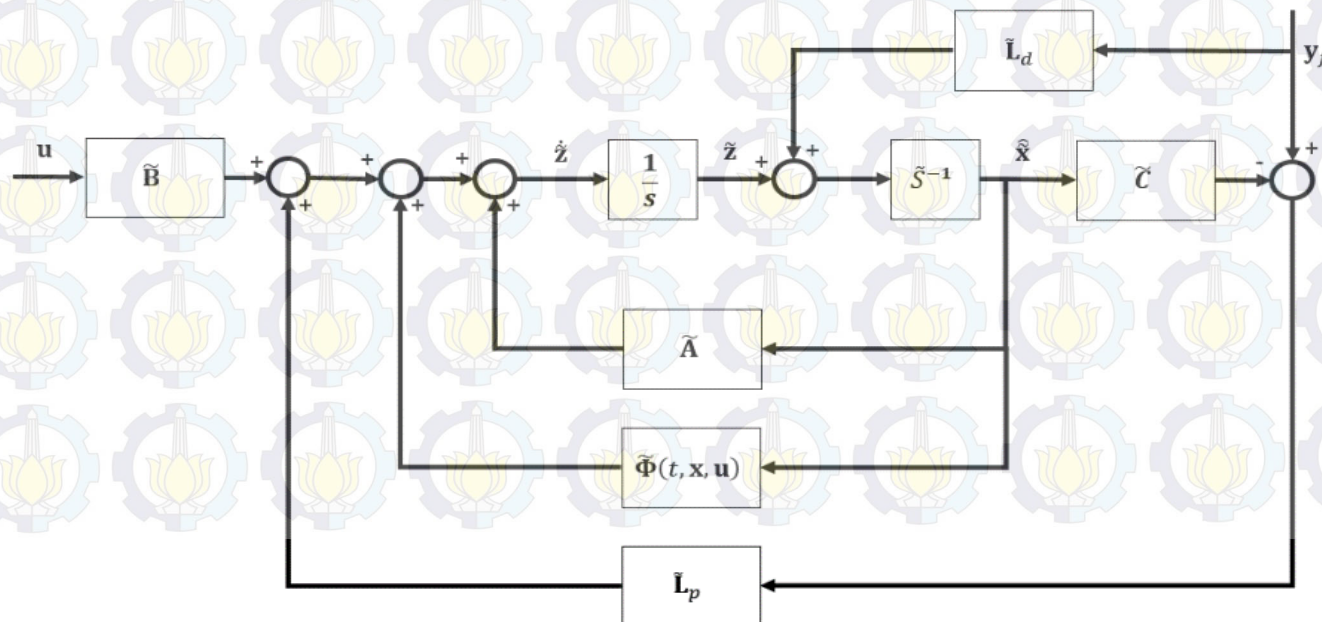
$$\dot{\hat{\mathbf{z}}} = (\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{L}}_p \tilde{\mathbf{C}}) \hat{\mathbf{x}} + (\tilde{\mathbf{B}} - \tilde{\mathbf{L}}_p \mathbf{D}) \mathbf{u} + \hat{\Phi}(t, \hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) + \tilde{\mathbf{L}}_p \mathbf{y}_f$$

$$\hat{\mathbf{x}} = (\tilde{\mathbf{E}} + \tilde{\mathbf{L}}_d \tilde{\mathbf{C}})^{-1} (\hat{\mathbf{z}} + \tilde{\mathbf{L}}_d \mathbf{y} - \tilde{\mathbf{L}}_d \mathbf{D} \mathbf{u})$$

$\tilde{\mathbf{L}}_p \rightarrow$ Gain proporsional

$\tilde{\mathbf{L}}_d \rightarrow$ Gain derivatif

Untuk D=0



Back to
Outline

PERANCANGAN ESTIMATOR KESALAHAN SENSOR

Performa H_∞

SKEMA
FTC

BENTUK
ESTIMATOR

PERHITUNGAN
GAIN ESTIMATOR

$\tilde{\mathbf{e}} = \hat{\tilde{\mathbf{x}}} - \tilde{\mathbf{x}} \rightarrow$ Stabil dengan performa H_∞

$$\frac{\|\tilde{\mathbf{E}}(s)\|_\infty}{\|\mathbf{D}(s)\|_\infty} = \sup_{\omega} \frac{|\tilde{\mathbf{E}}(j\omega)|}{|\mathbf{D}(j\omega)|} = \sup_{\|\mathbf{d}(t)\|_2 \neq 0} \frac{\|\tilde{\mathbf{e}}(t)\|_2}{\|\mathbf{d}(t)\|_2} = \gamma^* \leq \gamma$$

$$\frac{\|\tilde{\mathbf{e}}(t)\|_2}{\|\mathbf{d}(t)\|_2} = \frac{\sqrt{\int_0^{t_f} \{[\hat{\tilde{\mathbf{x}}}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)]^T [\hat{\tilde{\mathbf{x}}}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)]\} dt}}{\sqrt{\int_0^{t_f} \mathbf{d}^T(t) \mathbf{d}(t) dt}} \leq \gamma$$

$$\int_0^{t_f} \{[\hat{\tilde{\mathbf{x}}}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)]^T [\hat{\tilde{\mathbf{x}}}(t) - \tilde{\mathbf{x}}(t)]\} dt \leq \gamma^2 \int_0^{t_f} \mathbf{d}^T(t) \mathbf{d}(t) dt$$

Efek dari semua nilai $\mathbf{d}$ pada kesalahan estimasi $\hat{\tilde{\mathbf{x}}} - \tilde{\mathbf{x}}$ harus dilemahkan sampai di bawah tingkat pelemahan yang diinginkan $\rightarrow \gamma$



Back to
Outline

PERANCANGAN ESTIMATOR KESALAHAN SENSOR

SKEMA
FTC

BENTUK
ESTIMATOR

PERHITUNGAN
GAIN ESTIMATOR

Gain $\tilde{\mathbf{L}}_p$ dan $\tilde{\mathbf{L}}_d$ dapat ditentukan dengan cara menyelesaikan LMI berikut:

$$(1) \tilde{\mathbf{P}} > 0, \tilde{\mathbf{P}} = \tilde{\mathbf{P}}^T$$

$$(2) \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{S}}^{-T} \tilde{\mathbf{P}} + \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{S}}^{-1} \tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{C}}^T \tilde{\mathbf{Y}}^T - \tilde{\mathbf{Y}} \tilde{\mathbf{C}} + \theta^2 \mathbf{I} + \mathbf{I} & -\tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{S}}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_d & \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{S}}^{-1} \\ -\tilde{\mathbf{B}}_d^T \tilde{\mathbf{S}}^{-T} \tilde{\mathbf{P}} & -\gamma^2 \mathbf{I} & 0 \\ \tilde{\mathbf{S}}^{-T} \tilde{\mathbf{P}} & 0 & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < 0$$

dengan:

$$\tilde{\mathbf{Y}} \in \mathbb{R}^{(n+p) \times p}$$

$$\tilde{\mathbf{P}} \in \mathbb{R}^{(n+p) \times (n+p)}$$

$\gamma \rightarrow$ Tingkat Pelemahan yang diinginkan

$$\tilde{\mathbf{S}} = \tilde{\mathbf{E}} + \tilde{\mathbf{L}}_d \tilde{\mathbf{C}}$$

$$\tilde{\mathbf{L}}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times p} \\ \mathbf{M}_{p \times p} \end{bmatrix} \quad \mathbf{M}_{p \times p} \rightarrow \text{Matriks nonsingular}$$

$$\tilde{\mathbf{L}}_p = \tilde{\mathbf{S}} \mathbf{P}^{-1} \tilde{\mathbf{Y}}$$



Back to
Outline

PERANCANGAN ESTIMATOR KESALAHAN SENSOR

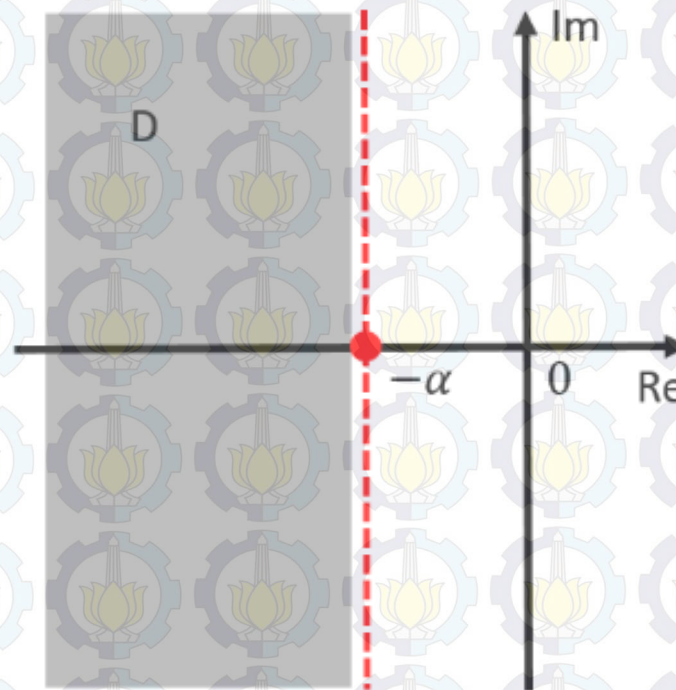
SKEMA
FTC

BENTUK
ESTIMATOR

PERHITUNGAN
GAIN ESTIMATOR

Syarat Pole Region

Untuk meletakkan pole estimator pada daerah yang diinginkan, maka ditambahkan syarat pole region



Half Plane Region

Ditambahkan LMI yang menyatakan syarat pole region sebagai berikut:

$$\tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{S}}^{-T} \tilde{\mathbf{P}} + \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{S}}^{-1} \tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{C}}^T \tilde{\mathbf{Y}}^T - \tilde{\mathbf{Y}} \tilde{\mathbf{C}} + \theta^2 \mathbf{I} + \mathbf{I} + 2\alpha \mathbf{P} < 0$$



Back to
Outline

PERANCANGAN ESTIMATOR KESALAHAN SENSOR

SKEMA
FTC

BENTUK
ESTIMATOR

PERHITUNGAN
GAIN ESTIMATOR

Pada perancangan estimator kesalahan sensor dipilih:

$$\gamma = 0,2$$

$$\alpha = 10$$

Dengan menyelesaikan LMI dan syarat pole region diperoleh:

$$\tilde{\mathbf{L}}_p = \begin{bmatrix} 6,22 & -5,07 & 407,59 & -420,76 & 0,18 \\ 4,91 & 6,94 & -390,28 & -21,83 & 383,34 \\ -14,62 & -5,07 & 5,60 & 4,62 & 165,57 \\ 28,09 & 21,08 & -4,67 & 5,80 & 45,74 \\ 1,00 & 6,89 & -165,27 & -45,49 & 6,03 \\ 13,47 & -9,55 & 28,92 & -55,14 & -1,98 \\ 9,55 & 13,47 & 11,19 & -42,92 & -16,07 \\ -28,95 & -11,21 & 13,57 & 9,36 & 336,86 \\ 55,18 & 42,95 & -9,24 & 13,50 & 92,70 \\ 1,97 & 16,07 & -336,88 & -92,80 & 13,36 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{L}}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{5 \times 5} \\ \mathbf{I}_5 \end{bmatrix}$$



Back to
Outline

HASIL SIMULASI



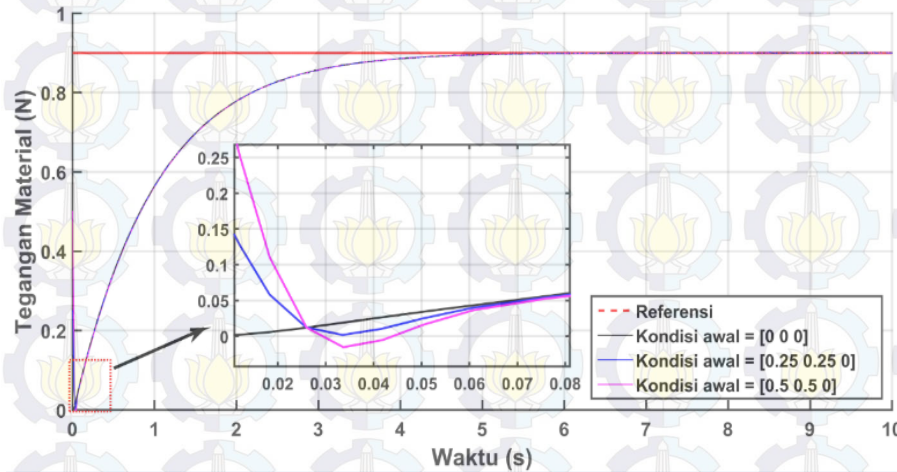
SIMULASI DAN ANALISA

KONDISI
NOMINAL

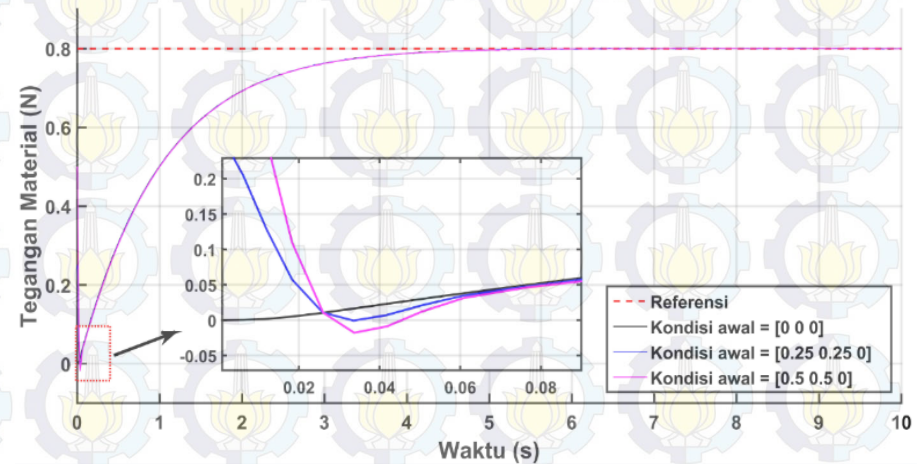
KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN

Step Response y_1



Step Response y_2



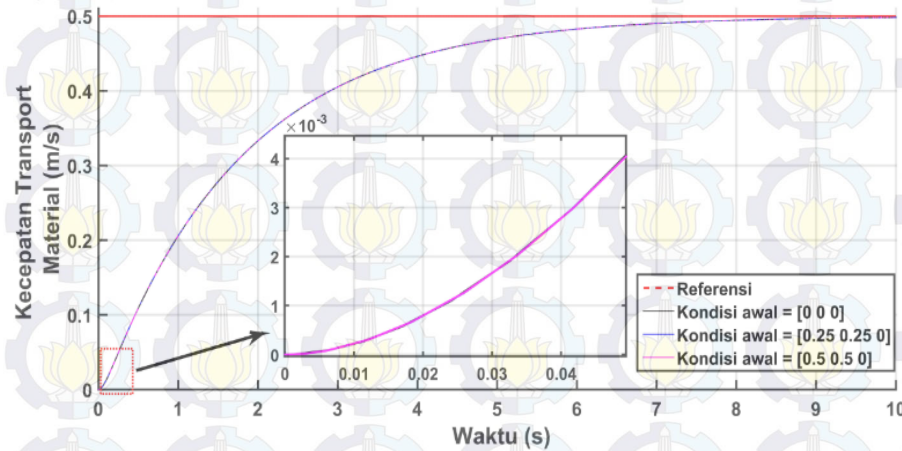
Back to
Outline

SIMULASI DAN ANALISA

KONDISI
NOMINAL

KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN



Step Response y_3

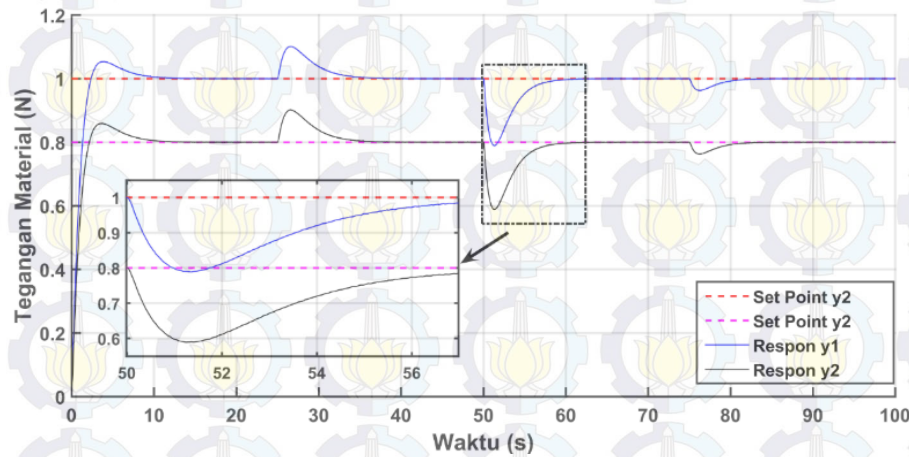
Keluaran	Kondisi awal	IAE	$t_s(5\%)$	<i>under shoot</i>
y_1	[0 0 0]	0,90	2,95	0
	[0,2 0,2 0]	0,89		0,1936
	[0,4 0,4 0]	0,89		0,4079
y_2	[0 0 0]	0,80	2,95	0
	[0,2 0,2 0]	0,79		0,1630
	[0,4 0,4 0]	0,79		0,4106
y_3	[0 0 0]	0,91	5,37	0
	[0,2 0,2 0]	0,91		0
	[0,4 0,4 0]	0,91		0



Back to
Outline

SIMULASI DAN ANALISA

KONDISI
NOMINAL

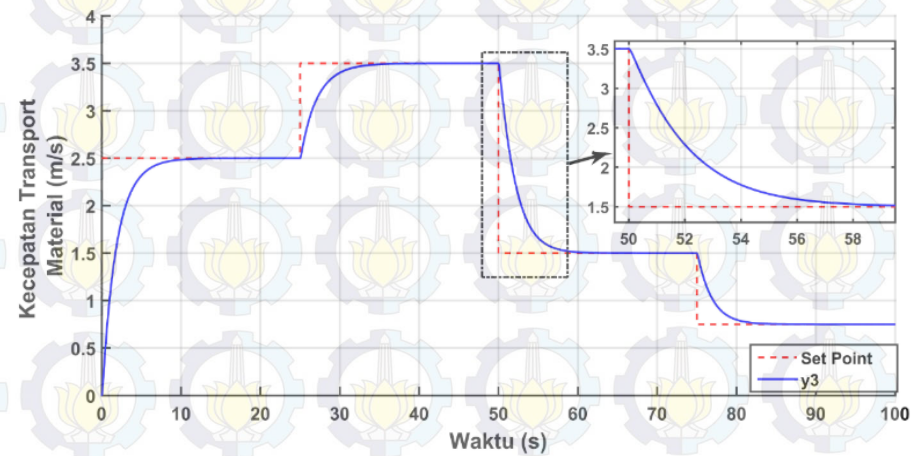


Respon y_1 dan y_2

KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN

Respon y_3



Back to
Outline

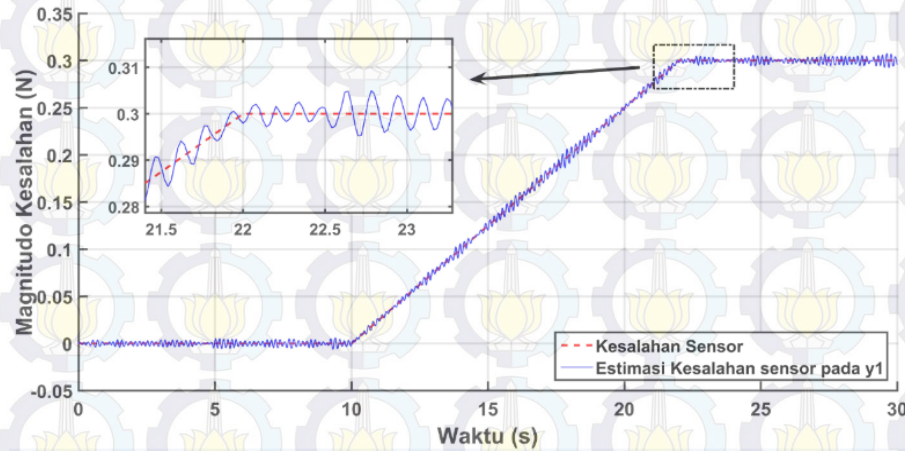
SIMULASI DAN ANALISA

Bias Fault

KONDISI
NOMINAL

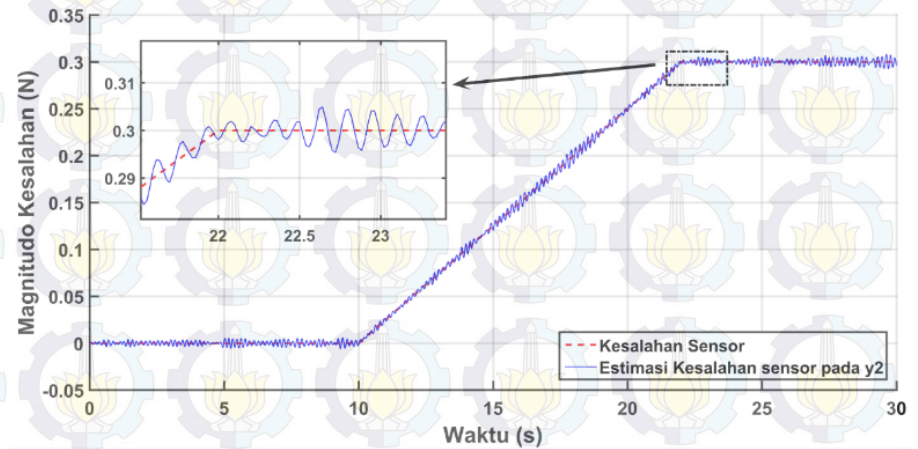
KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN



Estimasi $\hat{f}_s$ pada y_1

Estimasi $\hat{f}_s$ pada y_2



Back to
Outline

SIMULASI DAN ANALISA

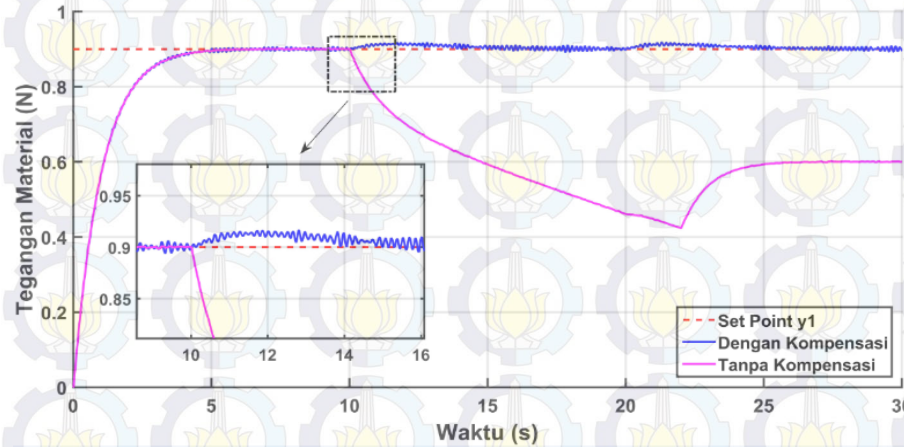
Respon Sistem Dengan dan Tanpa FTC Pada Pengujian Bias Fault

KONDISI
NOMINAL

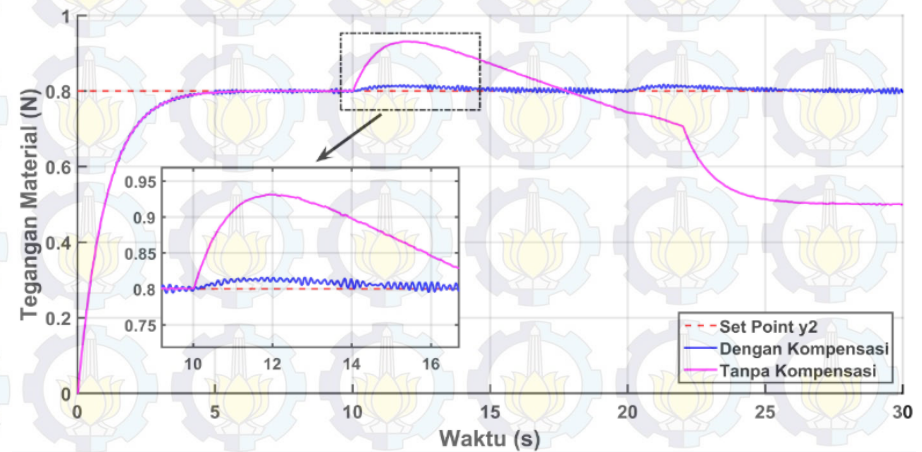
KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN

Respon y_1



Respon y_2



Back to
Outline

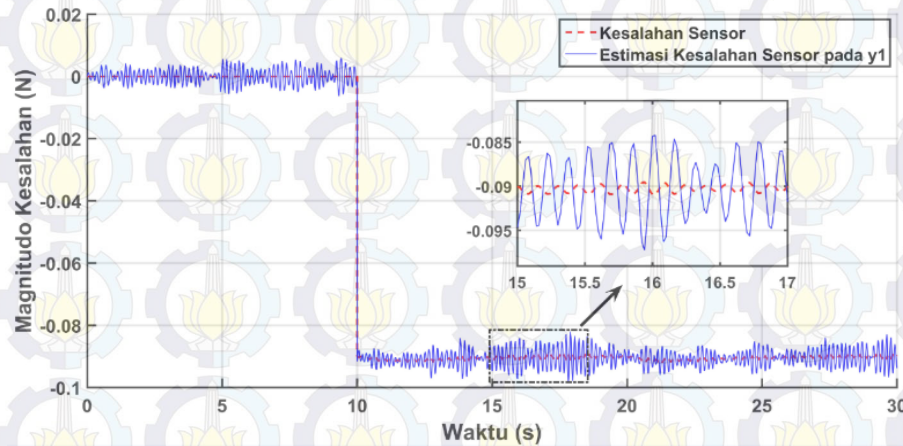
SIMULASI DAN ANALISA

Loss of Sensitivity

KONDISI
NOMINAL

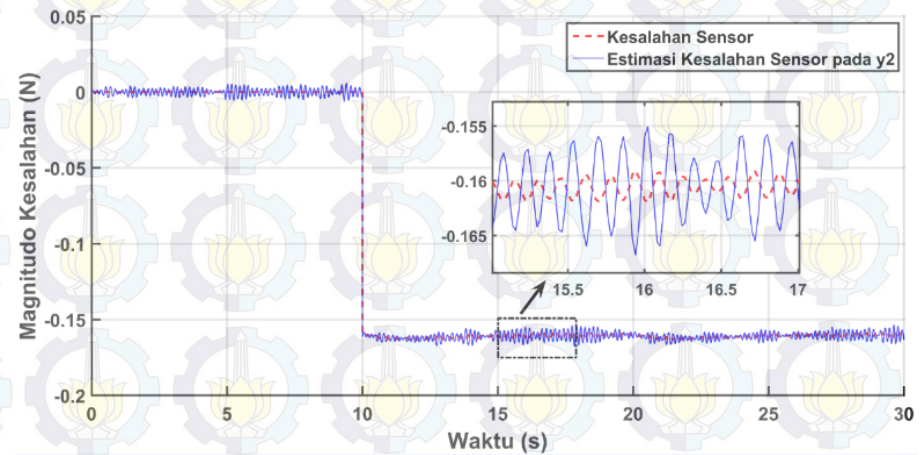
KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN



Estimasi $\hat{f}_s$ pada y_1

Estimasi $\hat{f}_s$ pada y_2



Back to
Outline

SIMULASI DAN ANALISA

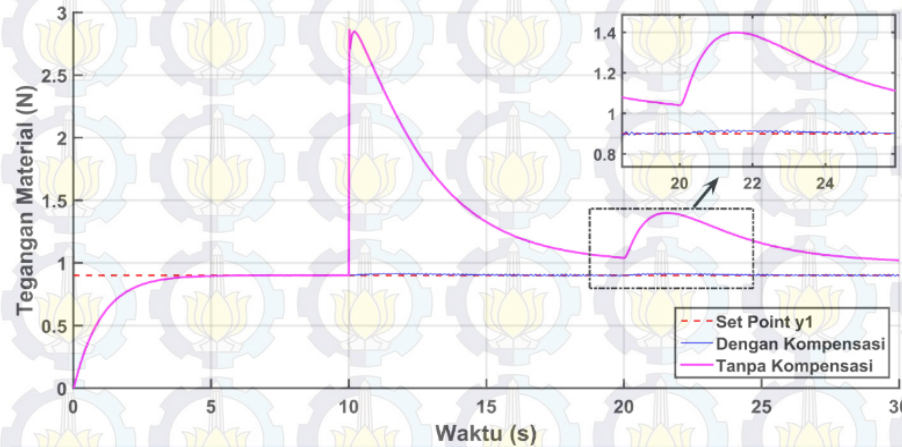
Respon Sistem Dengan dan Tanpa FTC Pada Pengujian Loss of Sensitivity

KONDISI
NOMINAL

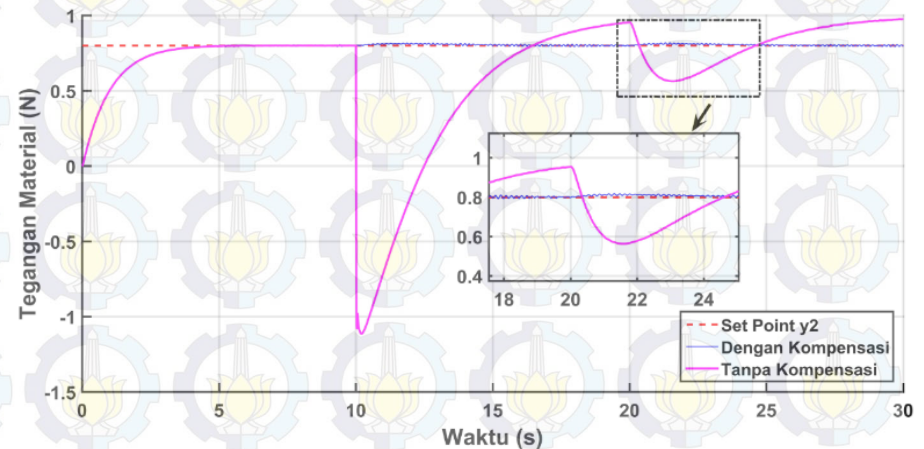
KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN

Respon y_1



Respon y_2



Back to
Outline

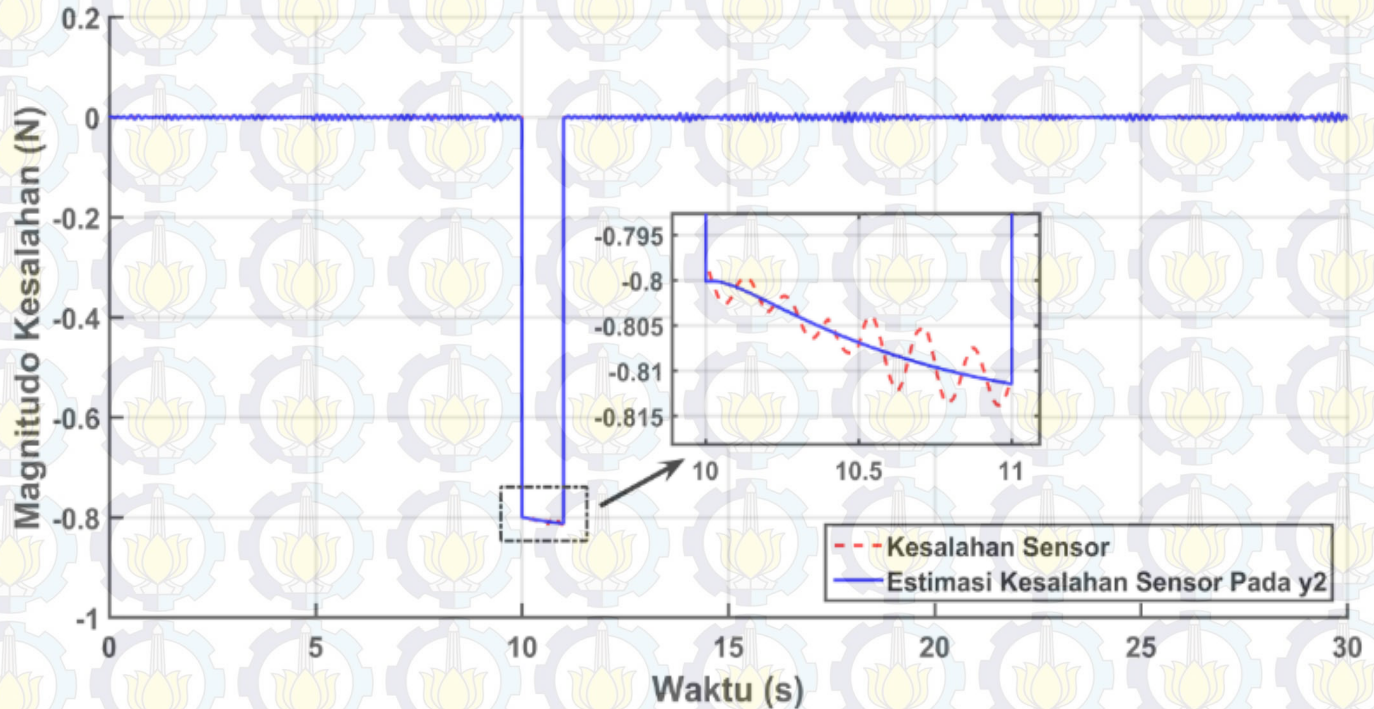
SIMULASI DAN ANALISA

Loss of Measurement

KONDISI
NOMINAL

KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN



Estimasi $\hat{f}_s$ pada y_1



Back to
Outline

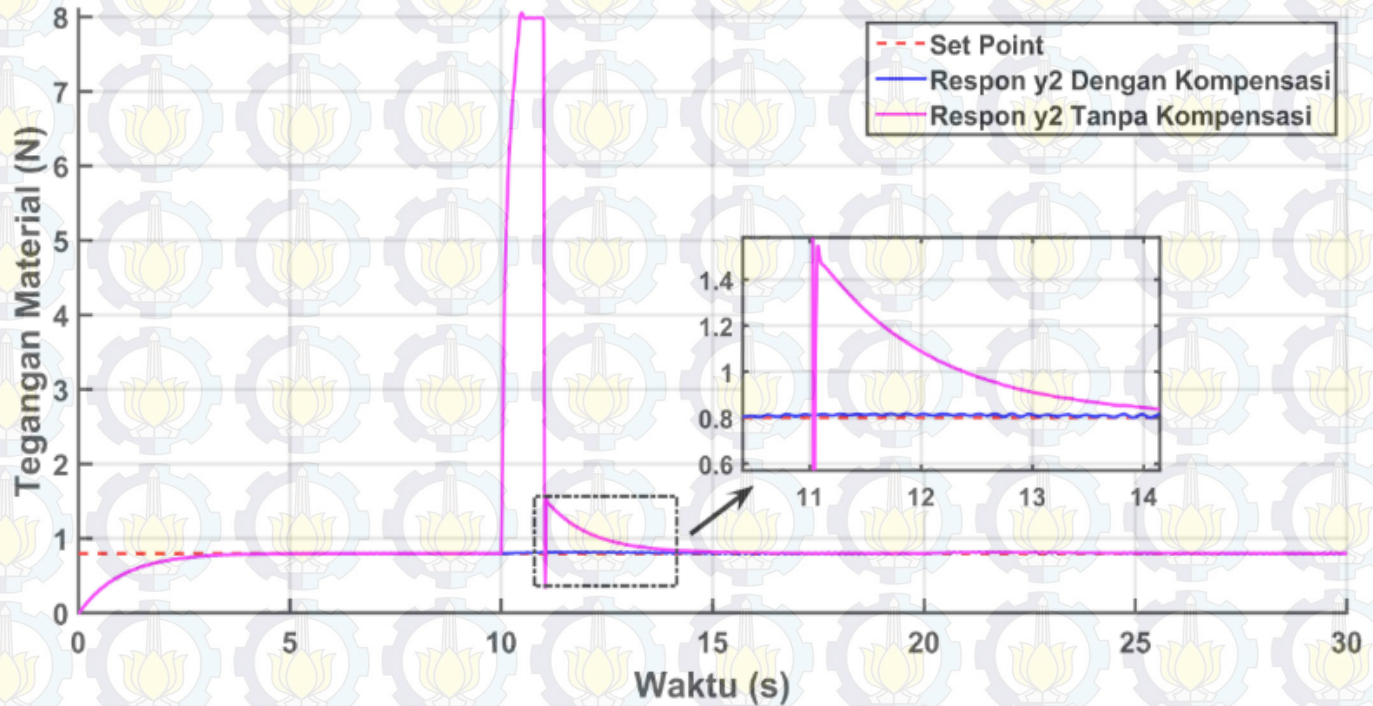
SIMULASI DAN ANALISA

Respon Sistem Dengan dan Tanpa FTC Pada Pengujian Loss of Measurement

KONDISI
NOMINAL

KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN



Estimasi $\hat{f}_s$ pada y_1



Back to
Outline

SIMULASI DAN ANALISA

KONDISI
NOMINAL

KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN

Bias Fault

Keluaran	IAE error estimasi	IAE pada keluaran sistem		IAE pada Hasil Kompensasi
		Dengan Kompensasi	Tanpa Kompensasi	
y_1	0,0706	1,0330	7,2590	1,0050
y_2	0,0703	0,9313	3,7880	0,9020
y_3	0,0003	2,4010	6,3290	2,4010

Loss of Sensitivity

Keluaran	IAE error estimasi	IAE pada keluaran sistem		IAE pada Hasil Kompensasi
		Dengan Kompensasi	Tanpa Kompensasi	
y_1	0,0706	1,0330	10,2500	1,0050
y_2	0,0726	0,9313	7,0080	0,9036
y_3	0,0003	2,4011	12,9000	2,4010

Loss of Measurement

Keluaran	IAE error estimasi	IAE pada keluaran sistem		IAE pada Hasil Kompensasi
		Dengan Kompensasi	Tanpa Kompensasi	
y_1	0,0706	1,0330	1,052	1,0050
y_2	0,0704	0,9313	7,978	0,9036
y_3	0,0003	2,4010	2,401	2,4010



Back to
Outline

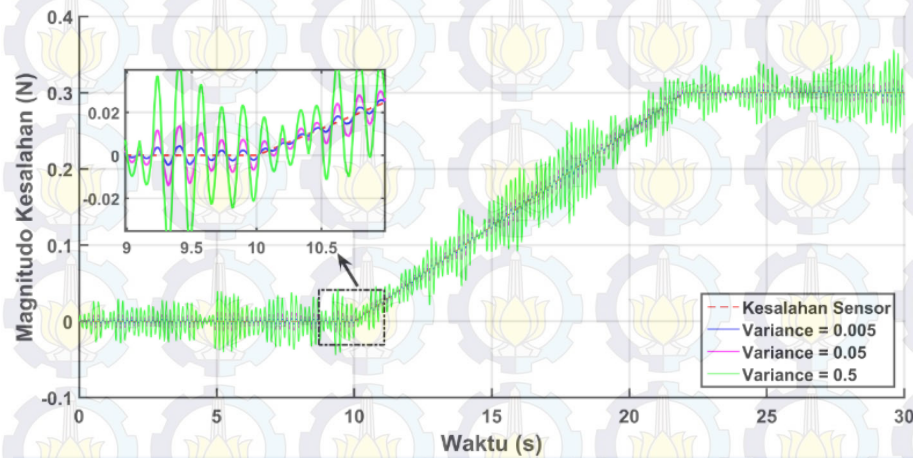
SIMULASI DAN ANALISA

Pengujian dengan Variasi Gangguan

KONDISI
NOMINAL

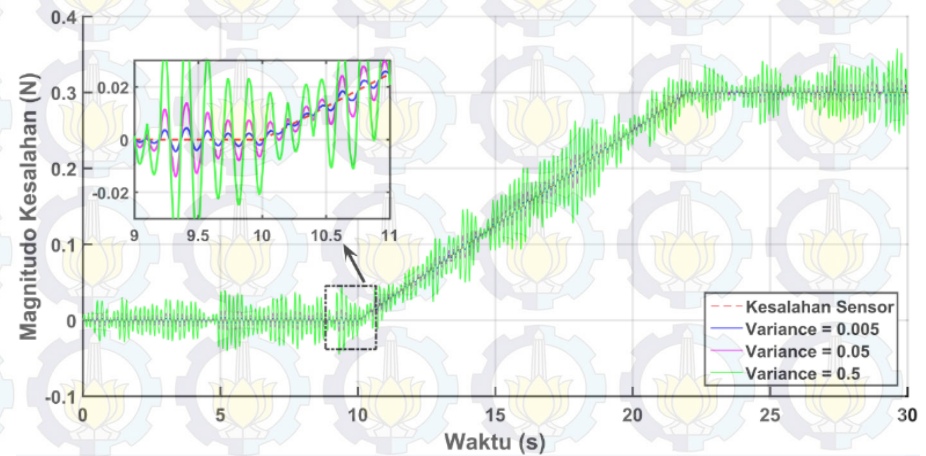
KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN



Estimasi $\hat{f}_s$ pada y_1

Estimasi $\hat{f}_s$ pada y_2



Back to
Outline

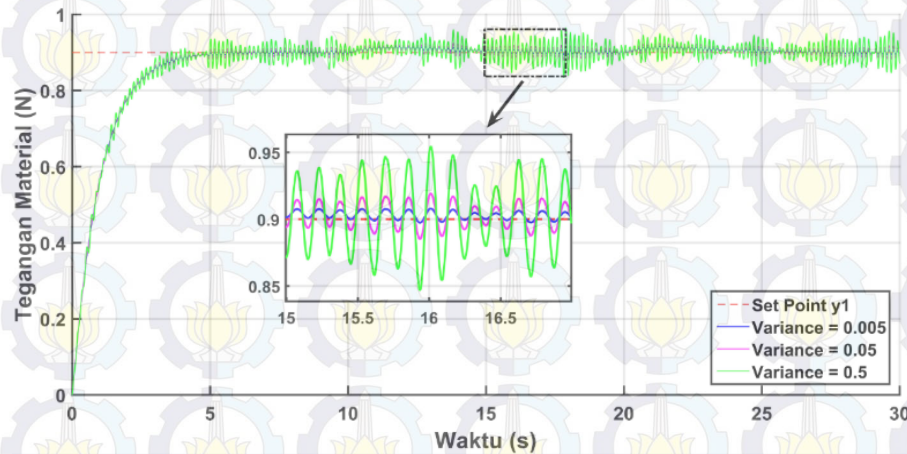
SIMULASI DAN ANALISA

Respon Sistem Dengan Pada Variasi Gangguan

KONDISI
NOMINAL

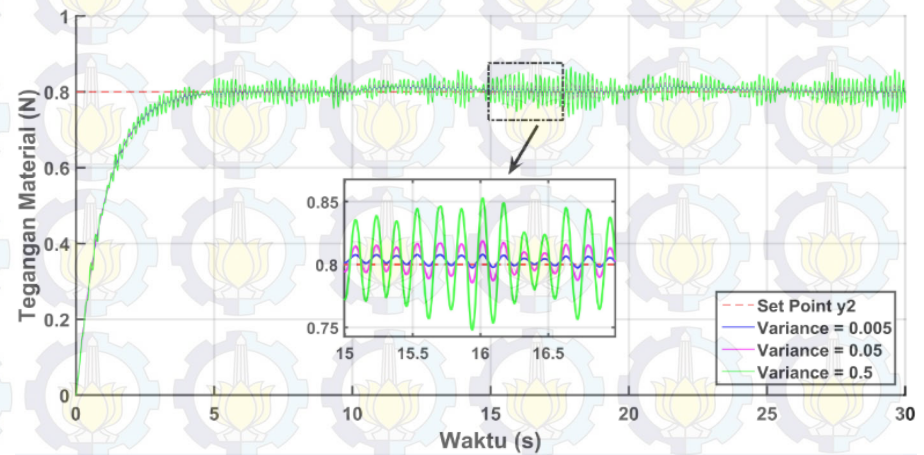
KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN



Respon y_1

Respon y_2



Back to
Outline

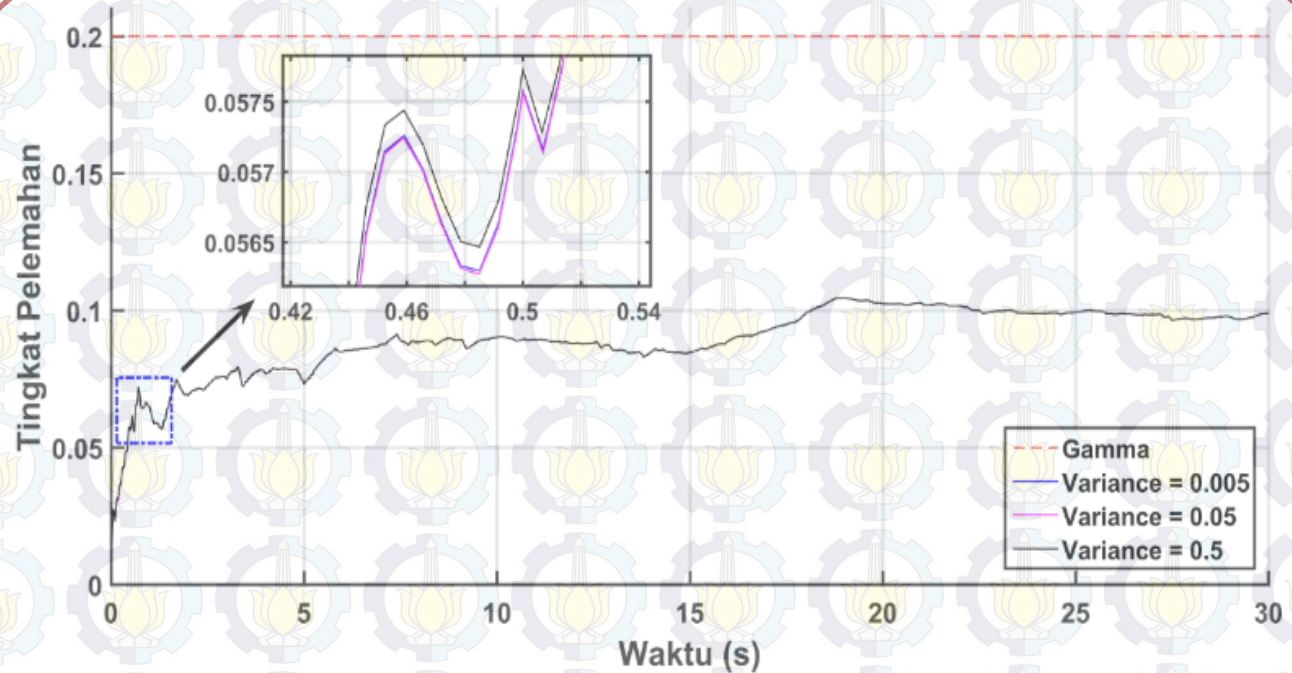
SIMULASI DAN ANALISA

Grafik L_2 -Gain Dengan Variasi Gangguan

KONDISI
NOMINAL

KESALAHAN
SENSOR

DENGAN
GANGGUAN



Pengujian	Variance	y_1	y_2
IAE error estimasi	0,005	0,0499	0,0497
	0,050	0,1580	0,1574
	0,500	0,4996	0,4977
IAE respon keluaran dengan kompensasi	0,005	1,0220	0,9204
	0,050	1,0880	0,9862
	0,500	1,3590	1,2580



Back to
Outline

KESIMPULAN DAN SARAN

Conclusion



KESIMPULAN DAN SARAN

KESIMPULAN

1

Estimator kesalahan sensor mampu mengestimasi besarnya kesalahan sensor yang terjadi dengan baik pada masing-masing pengujian yang telah dilakukan.

2

Dengan menambahkan hasil estimasi kesalahan sensor sebagai kompensasi kesalahan sensor, stabilitas dan performa sistem dapat terjaga baik pada saat kondisi nominal dan saat terjadi kesalahan sensor.

3

Estimator kokoh terhadap gangguan pada sistem. Hal ini dibuktikan dengan efek gangguan pada sistem yang berhasil dilemahkan hingga di bawah tingkat pelemahan yang diinginkan

SARAN



Back to
Outline

KESIMPULAN DAN SARAN

KESIMPULAN

Gangguan pada masukan sistem tidak dapat dihilangkan dengan metode FTC. Hal ini disebabkan karena metode pada Tugas Akhir ini hanya mengestimasi besarnya kesalahan pada sensor. Oleh karena itu, untuk menghilangkan efek dari gangguan pada masukan sistem, disarankan untuk menggunakan metode kontrol *robust* dalam perancangan kontroler.

SARAN



Back to
Outline

TERIMA KASIH

