

Perancangan Kontroler *Fuzzy* PD untuk Kontrol Toleransi Kesalahan Sensor

Moch Hafid, Trihastuti Agustinah

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: trihastuti@elect-eng.its.ac.id

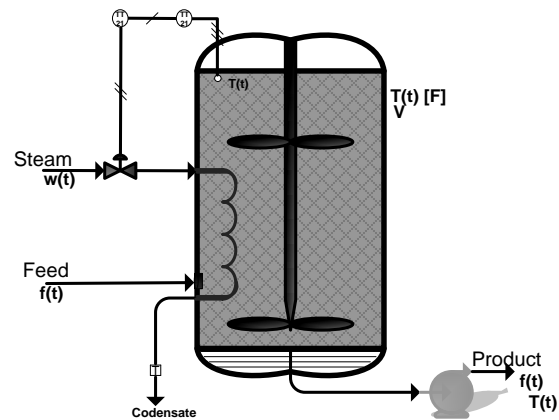
Abstrak—*Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)* merupakan suatu *plant* nonlinear yang banyak digunakan di industri-industri kimia sebagai pengaduk bahan-bahan kimia. Proses di dalam CSTR sangat dipengaruhi oleh suhu, di mana suhu tersebut didapat dari uap panas yang mengalir di dalam dinding tangki melalui pipa, sehingga suhu tersebut harus dijaga supaya tetap berada pada suhu kerja dengan merancang suatu kontroler. Suhu di dalam tangki dideteksi oleh suatu sensor dan dari informasi pengukuran, kontroler akan memberikan sinyal kontrol agar proses di dalam CSTR berjalan sesuai dengan yang diinginkan. Kesalahan pengukuran pada sensor dapat menyebabkan proses tidak berjalan dengan baik, bahkan dapat mengakibatkan berhentinya proses. *Fault Tolerant Control (FTC)*, kontrol toleransi kesalahan, dapat memberikan kompensasi sehingga proses dapat berjalan dengan baik meskipun terjadi kesalahan pengukuran pada sensor. Pada Tugas Akhir ini dilakukan perancangan kontroler *fuzzy* PD untuk menjaga suhu di dalam CSTR tetap pada suhu kerja. Kesalahan sensor yang terjadi pada sistem diidentifikasi dengan menggunakan *model-based fault diagnosis*. Dari hasil identifikasi, ditentukan kategori-kategori kesalahan sensor. Tiap kategori memiliki nilai-nilai kompensasi terhadap kesalahan yang terjadi. Dengan adanya kompensasi tersebut maka proses pada CSTR dapat beroperasi dengan baik meskipun terjadi kesalahan pengukuran pada sensor.

Kata Kunci— *Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)*, Kontroler *Fuzzy* PD, *Fault Tolerant Control*.

I. PENDAHULUAN

Continuous stirred tank reactor (CSTR) banyak digunakan di dalam industri-industri pencampuran kimia. Proses pencampuran di dalam CSTR sangat dipengaruhi oleh suhu, di mana suhu tersebut didapat dari uap panas yang mengalir di dalam dinding tangki melalui pipa sehingga suhu dalam tangki tersebut harus dijaga supaya tetap berada pada suhu kerja.

Kesalahan dari suatu pengukuran sensor dalam sistem kontrol proses dapat menyebabkan reaksi yang tidak diinginkan seperti berhentinya proses/*shutdown* dari suatu *plant*. Kontrol Toleransi Kesalahan (*Fault Tolerant Control*) merupakan suatu sistem kontrol yang dapat melanjutkan tugasnya dengan benar meskipun terjadi kegagalan pada perangkat keras (*hardware failure*) atau kesalahan pada perangkat lunak (*software error*). Deteksi kesalahan dapat memberikan indikasi bahwa ada sesuatu yang tidak benar sehingga didefinisikan sebagai suatu reaksi kesalahan yang terjadi pada sistem. Kesalahan sensor yang terjadi pada sistem diidentifikasi dengan menggunakan *model-based fault diagnosis*. Dari hasil identifikasi tersebut, selanjutnya akan



Gambar 1. Proses Pemanasan pada Continuous Stirred Tank Reactor ditentukan kategori-kategori untuk setiap kesalahan sensor yang terjadi.

Permasalahan yang muncul akibat kesalahan sensor yang terjadi pada proses pencampuran dalam tangki CSTR, yaitu dapat menyebabkan *error steady state* sistem yang cukup besar diluar *range* kerja suhu tangki sehingga dapat menyebabkan produk gagal. Perancangan kontroler *fuzzy* PD digunakan untuk menjaga suhu dalam tangki CSTR tetap dalam keadaan konstan. Serta penerapan struktur FTC dan skenario kontrol toleransi kesalahan sistem digunakan untuk mengkompensasi kesalahan sensor yang terjadi.

II. TEORI PENUNJANG

A. Continuous Stirred Tank Reactor [2]

Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) merupakan salah satu unit operasi yang paling penting di industri kimia yang memiliki perilaku nonlinear. CSTR berupa suatu tangki yang umumnya berbentuk silinder dengan diameter tertentu, dimana sekeliling reaktor bisa dibiarkan terbuka (terjadi konveksi bebas antar reaktor dengan udara sekelilingnya), atau juga diisolasi dengan bahan (isolator) tertentu. Sebagai salah satu reaktor kimia, didalam CSTR terjadi reaksi kimia pembentukan atau penguraian, dimana aliran masa masuk/keluar berlangsung secara terus-menerus.

Reaksi kimia yang terjadi didalam CSTR, baik secara eksotermis maupun endotermik, membutuhkan energi yang dapat dihilangkan atau ditambahkan ke dalam tangki reaktor untuk mempertahankan suhu agar tetap dalam keadaan konstan.

CSTR berbeda dengan reaktor lainnya, seperti PFR (*plug flow reactors*) dan PBR (*packed bed reactors*), karena adanya proses pengadukan (*stirred*) yang memungkinkan adanya distribusi sifat fisis dan kimiawi secara merata dari zat yang bereaksi di setiap tempat dalam reaktor. Penggunaan CSTR paling banyak memproduksi polimer, seperti polimerisasi styrene. Selain itu CSTR juga digunakan dalam pembentukan barium sulfat (BaSO₄), asam asetat, asam formiat dan penanganan limbah.

B. Proses Pengendalian Suhu CSTR [3]

Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) digunakan sebagai tangki pengaduk dan pencampuran sebuah produk dengan proses pemanasan. Suhu pemansan pada CSTR dijaga pada suhu kerja tertentu sehingga diperoleh campuran produk yang tercampur secara sempurna.

Dalam proses pembuatan Asam Formiat, suhu tangki CSTR dijaga konstan pada 176 °F karena pada suhu 176 °F didapatkan kualitas pencampuran produk yang maksimal. Suhu kerja proses yang diperbolehkan pada pembuatan Asam Formiat ini tidak melebihi *range* suhu kerja proses, yaitu 176-185 [°F].

Pengendalian suhu pada CSTR sangat penting dilakukan karena bila suhu didalam tangki reaktor terlalu tinggi atau suhu diatas kondisi *steady state* akan sangat berbahaya untuk dioperasikan atau juga dapat menguraikan produk menjadi komponen-komponen penyusunnya. Jika suhu terlalu rendah akan mengakibatkan produk tidak dapat tercampur dengan sempurna. Untuk mempertahankan suhu dalam tangki CSTR dapat dilakukan dengan mengalirkan steam yang dilewatkan pada sebuah koil/pipa yang terpasang didalam tangki tersebut atau dengan mensirkulasi condensate melalui alat penukar panas. Suatu kontroler dirancang untuk menjaga suhu dalam tangki CSTR dengan mengendalikan aliran/flow steam kedalam tangki, yaitu dengan mengatur bukaan *valve* sehingga mencapai nilai suhu kerja yang diinginkan.

C. Pemodelan *Continuous Stirred tank Reactor* [2]

Pemodelan pada *plant* CSTR dilakukan dengan cara menurunkan persamaan matematis, di mana persamaan tersebut menggambarkan dinamika pada tangki reaktor. Perhitungan untuk mendapatkan pemodelan fisis yang tepat dapat dilakukan dengan memakai pendekatan asumsi mengenai kondisi fisis dari CSTR. Hal ini bertujuan untuk menyederhanakan komplektifitas sistem yang dihasilkan dari dinamika *plant*. Karena diasumsikan bahwa berat jenis dan kapasitas panas memiliki harga konstan, berikut beberapa persamaan matematis pada proses pengendalian suhu dalam tangki CSTR.

Pertama, kesetimbangan energi pada *liquid* didalam tangki reaktor diperoleh dengan memberikan asumsi bahwa panas yang hilang diabaikan dan *liquid* tercampur dengan sempurna dan C_v sama dengan C_p . Dari asumsi tersebut maka akan dihasilkan sebuah persamaan seperti berikut,

$$V\rho C_v \frac{d(T(t))}{dt} = f(t)\rho C_p T_i + UA(T_s(t) - T(t)) - f(t)\rho C_p T(t) \quad (1)$$

Kedua, kesetimbangan energi pada koil/pipa diperoleh dengan asumsi bahwa koil/pipa memiliki suhu yang sama

Tabel 1. Pengukuran Parameter Fisik CSTR

No.	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1.	Heat Transfer Area	A	241,5	ft ²
2.	Heat Capacity of Coil	C _m	265,7	Btu/°F
3.	Kapasitas Panas steam	C _v	2,1	Btu/lb.°F
4.	Kapasitas Panas liquid	C _p	0,80	Btu/lb.°F
5.	Koef. Transfer Panas overall	U	2,1	Btu/lb.°F
6.	Transmitter time constant	τ _T	0,75	Min
7.	Valve time constant	τ _v	0,20	Min
8.	Penguatan aliran steam	K _w	1,905	°F/(ft ³ /min)
9.	Gain valve	K _v	1,652	(lb/min)/%CO
10.	Gain transmitter	K _T	1,0	%TO/°F

Tabel 2.

Klasifikasi Tingkat Keparahan Kegagalan		
Tingkat Kategori Kesalahan	Kategori	Keterangan
Kategori IV	<i>Negligible</i>	Terjadi kegagalan kecil: tidak berpengaruh terhadap kinerja sistem
Kategori III	<i>Marginal</i>	Sistem terdegradasi dengan beberapa penurunan terhadap performa sistem
Kategori II	<i>Critical</i>	Terjadi kegagalan sistem secara keseluruhan: kinerja sistem tidak dapat diterima
Kategori I	<i>Catastrophic/Bahaya</i>	Kegagalan sistem yang signifikan dan tidak dapat ditoleransi

dengan *steam* kondensat sehingga diperoleh bentuk persamaan seperti berikut,

$$C_M \frac{d(T_s(t))}{dt} = w(t)\lambda - UA(T_s(t) - T(t)) \quad (2)$$

- Dengan, A = luas transfer panas (ft²)
- T_s(t) = suhu *steam* kondensat (°F)
- w(t) = masa aliran *steam* (lb/min)
- C_M = kapasitas panas koil/pipa (Btu/°F)
- C_p = kapasitas panas *liquid* (Btu/lb.°F)

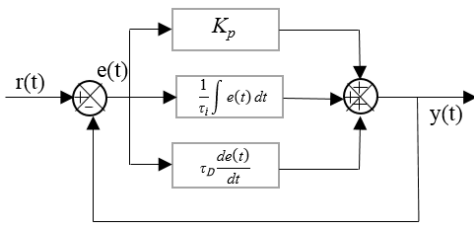
Ada beberapa parameter fisik hasil pengukuran yang digunakan dalam pemodelan CSTR seperti pada Tabel 1.

D. Kategori Kesalahan Sensor [4]

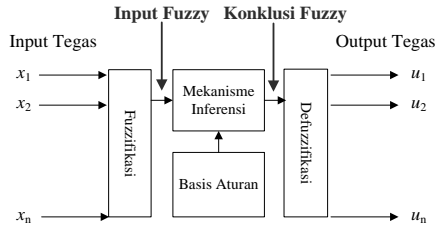
Sebuah kesalahan didefinisikan sebagai bentuk perilaku yang tidak dapat diterima. Oleh karena itu, kesalahan adalah sebuah *state* yang dapat menyebabkan kerusakan atau kegagalan pada suatu sistem.

Dampak dari setiap kegagalan/kesalahan pada setiap operasi atau proses produksi akan dilakukan suatu penilaian/pengukuran. Pengaruh kesalahan yang terjadi dimulai dari range kegagalan sistem secara keseluruhan atau degradasi parsial hingga kesalahan yang terjadi tidak berpengaruh terhadap performansi sistem.

Variasi dari tingkat keparahan kegagalan suatu sistem dapat dilakukan pengkategorian dengan melakukan suatu identifikasi untuk setiap dampak kesalahan yang terjadi. Klasifikasi tingkat keparahan ditentukan untuk setiap masing-masing mode kegagalan yang nantinya digunakan sebagai dasar untuk menentukan peringkat/urutan dalam memberikan tindakan korektif atau suatu kompensasi terhadap bentuk kesalahan yang terjadi. Salah satu klasifikasi mode kegagalan secara umum ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 2. Diagram Blok Kontroler PID



Gambar 3. Struktur Dasar Sistem Fuzzy

E. Kontrol PID [5]

Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing-masing kontroler Proporsional, Integral dan Diferensial dapat saling menutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi kontroler proporsional plus integral plus diferensial (kontroler PID). Elemen- elemen kontroler P,I dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal besar. Gambar 2 menunjukkan diagram blok kontroler PID.

Karakteristik kontroler PID sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P, I dan D. Pemilihan konstanta K_p, T_i , dan T_d akan mengakibatkan dominasi dari sifat masing-masing elemen. Konstanta yang dominan itulah yang akan memberikan kontribusi besar pada respons sistem secara keseluruhan.

Kontroler PID dengan konfigurasi seperti Persamaan 7 dan Gambar 3 disebut kontroler PID ideal.

$$U(s) = K_p(E(s) + \frac{1}{\tau_i} E(s) + \tau_d s E(s)) \tag{3}$$

F. Fuzzy Logic Control [6]

Sistem *fuzzy* berisikan empat bagian dasar yaitu meliputi *fuzzifikasi*, *fuzzy rule base*, *fuzzy inference engine* dan *defuzzifikasi*. Struktur dasar dari sistem *fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 3.

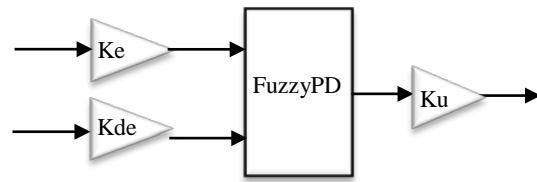
Fuzzifikasi adalah proses yang dilakukan untuk mengubah variabel nyata menjadi variabel *fuzzy*, ini ditujukan agar masukan kontroler *fuzzy* bisa dipetakan menuju jenis yang sesuai dengan himpunan *fuzzy*.

Fuzzy Rule Base merupakan kaidah dasar yang berisi aturan-aturan secara linguistik yang menunjukkan kepakaran terhadap *plant*.

Defuzzifikasi adalah proses yang digunakan untuk mengubah kembali variabel *fuzzy* menjadi variabel nyata.

Inferensi *fuzzy* adalah sebuah proses formulasi pemetaan masukan terhadap keluaran dengan menggunakan logika *fuzzy*. Proses dari inferensi *fuzzy* melibatkan fungsi keanggotaan operator logika *fuzzy*, dan aturan IF-THEN.

Tindakan Derivatif membantu untuk memprediksi



Gambar 4. Struktur Kontroler Fuzzy PD [7]

kesalahan dan kontroler proporsional-derivatif menggunakan aksi kontrol derivative untuk meningkatkan kestabilan pada kontrol *loop* tertutup.

Mekanisme struktur kontroler *fuzzy* PD ditunjukkan pada Gambar 4, di mana masukan *fuzzy* PD berupa *error* (e) dan *delta error* (de). Apabila terjadi perbedaan, kontroler *fuzzy* akan melakukan mekanisme penalaan *gain* pada sinyal kontrol (K_u) agar didapatkan sistem yang stabil. Keluaran kontroler pada kontrol *fuzzy* PD ditunjukkan pada Persamaan 4. [7]

$$u_n = f(K_e * e_n, K_d E * de) * K_u \tag{4}$$

III. PERANCANGAN SISTEM

Pada perancangan ini dilakukan tahapan linearisasi serta perancangan kontroler dengan skema FTC dan skenario kesalahan pada sensor.

A. Pemodelan CSTR dalam Bentuk *State Space*

Dari persamaan kesetimbangan energi pada Persamaan (1) dan Persamaan (2), jika diasumsikan $x_1 = T(t)$, $x_2 = T_s(t)$; $u_1 = f(t)$, $u_2 = w(t)$ maka Persamaan (1) dan (2) dapat dituliskan kembali dalam bentuk persamaan *state* seperti pada Persamaan (5) dan Persamaan (6).

- Kesetimbangan energi pada *liquid*:

$$\begin{aligned} V\rho C_v \frac{d(x_1)}{dt} &= u_1\rho C_p T_i + UA(x_2 - x_1) - u_1\rho C_p x_1 \\ V\rho C_v \dot{x}_1 &= u_1\rho C_p T_i + UA x_2 - UA x_1 - u_1\rho C_p x_1 \\ \dot{x}_1 &= \frac{u_1\rho C_p T_i + UA x_2 - UA x_1 - u_1\rho C_p x_1}{V\rho C_v} \end{aligned} \tag{5}$$

- Kesetimbangan energi pada koil/pipa:

$$\begin{aligned} C_M \frac{d(x_2)}{dt} &= u_2\lambda - UA(x_2 - x_1) \\ C_M \dot{x}_2 &= u_2\lambda - UA x_2 + UA x_1 \\ \dot{x}_2 &= \frac{u_2\lambda - UA x_2 + UA x_1}{C_M} \end{aligned} \tag{6}$$

Dengan memasukkan nilai-nilai dari parameter *plant* yang telah diberikan pada Tabel 1. kedalam Persamaan maka didapatkan nilai-nilai untuk model nonlinear *plant* dalam bentuk persamaan *state* seperti pada Persamaan (7) dan Persamaan (8).

$$\dot{x}_1 = -0,57795x_1 + 0,57795x_2 + 5,56u_1 - 0,0556x_1u_1 \tag{7}$$

$$\dot{x}_2 = 1,909x_1 - 1,909x_2 + 3,6357u_2 \tag{8}$$

B. Kontrol *Proportional Integral* (PI)

Formulasi kontrol PI secara umum ditunjukkan pada Persamaan (9)

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (9)$$

Dengan melakukan linearisasi pada Persamaan (1) dan (2), akan diperoleh bentuk fungsi alih *plant* orde-2 tanpa *delay* sehingga dapat ditentukan nilai-nilai parameter PI seperti berikut,

$$w_n = \sqrt{\frac{1}{1,227}} = 0,9028, \quad \zeta = \frac{2,44 * (0,9028)}{2} = 1,1014$$

$$\tau_i = \frac{2\zeta}{w_n} = \frac{2 * 1,1014}{0,9028} = 2,44$$

Dengan kriteria respons yang diharapkan pada pengendalian suhu CSTR adalah memiliki $Ts^*(\pm 0,5\%) = 2 dt$, Maka diperoleh nilai K_p sebagai berikut,

$$Ts^*(\pm 0,5\%) = 2 dt$$

$$5\tau^* = 2 \rightarrow \tau^* = 0,4$$

Dari nilai tersebut diperoleh nilai K_p seperti berikut,

$$K_p = \frac{\tau_i \tau^* (w_n)^2}{K}$$

$$K_p = \frac{0,79544}{0,78} = 1,0198$$

Sehingga didapatkan parameter kontrol PID *plant* adalah $K_p = 1,0198$; $\tau_i = 2,44$.

C. Kontroler *Fuzzy* PD

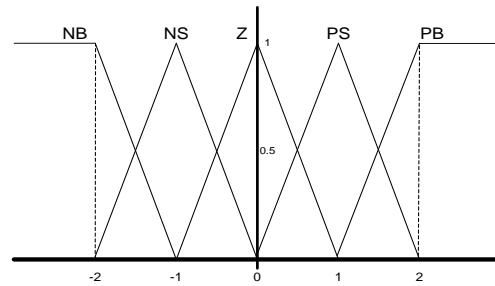
Awal mula dari perancangan kontrol *fuzz* adalah dengan memetakan *input* tegas (*crisp*) ke dalam himpunan *fuzzy* yang terdiri dari himpunan keanggotaan *error* dan *delta error* seperti pada Gambar 5. Dalam perancangan ini dibuat lima fungsi keanggotaan dengan bentuk segitiga ternormalisasi, yakni [-2, 1, 0, 1, 2].

Aturan/*rule base fuzzy* yang digunakan sebagai kompensasi untuk memberikan sinyal kontrol berdasarkan pada aturan yang didefinisikan dalam suatu tabel yaitu tabel *mac vicar wheelan*, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Inference yang digunakan adalah *inference* metode mamdani yang ditunjukkan pada Persamaan 10.

$$\mu_i(k) = \max[\min\{\mu_u(k), \mu_r(e(i), de(i))\}] \quad (10)$$

Setelah melalui proses *inference* dan berdasarkan *rulebase* yang ada kemudian μ_i masuk ke proses defuzifikasi untuk merubah bentuk nilai *fuzzy* ke dalam bentuk nilai tegas (*crisp*, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

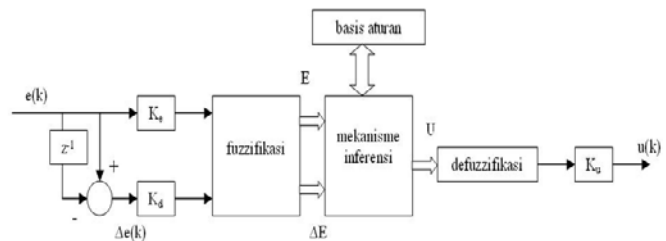


Gambar 5. Himpunan *Fuzzy error* dan *Delta error*

Tabel 3.

Basis Aturan *Fuzzy*

e,de/u	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	Z
NS	NB	NS	NS	Z	PS
Z	NS	NS	Z	PS	PS
PS	NS	Z	PS	PS	PB
PB	Z	PS	PS	PB	PB



Gambar 6. Blok Kontrol *Fuzzy* PD

D. Pengkategorian Kesalahan Sensor

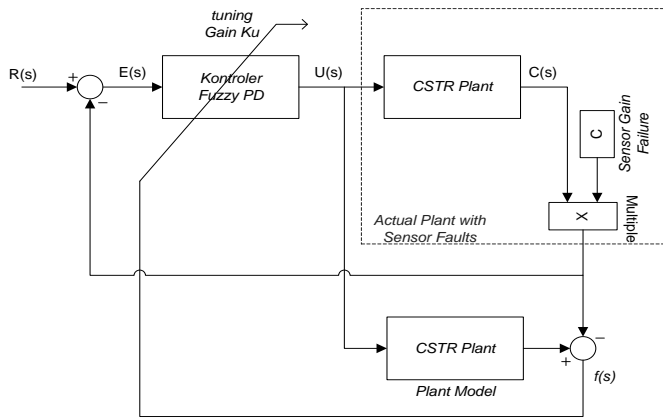
Kesalahan sensor yang terjadi diasumsikan merupakan kesalahan pengukuran/kalibrasi dari suatu sensor yang direpresentasikan sebagai perubahan penguatan dari *gain* sensor *feedback*, di mana penguatan nilai *gain feedback* sensor yang diberikan seperti berikut,

$$0 < K_T < 1 \quad (11)$$

Dengan, $K_T = 1$ berarti sensor dalam keadaan baik dan $K_T = 0$ berarti sensor rusak.

Struktur deteksi kesalahan sensor yang terjadi, seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Proses deteksi kesalahan ini dibuat dengan teknik *Model-Based Fault Diagnosis*, di mana G_p adalah *actual plant* dengan *gain* kesalahan pada sensor dan G_p' adalah *Model plant*. Prasyarat yang paling penting untuk pendekatan ini adalah *model plant* yang digunakan harus secara akurat menggambarkan *plant* yang sebenarnya, $G_p' = G_p$. *Model plant* dapat diperoleh secara analitis atau melalui pemodelan *black box*.

Pengkategorian kesalahan yang dibuat dalam perancangan ini didasarkan pada pengaruh perubahan *gain* sensor yang diberikan pada sistem terhadap pengaruh nilai *error steady state* sistem, seperti ditunjukkan pada Tabel 4.



Gambar 7. Struktur Deteksi Kesalahan Sensor

Tabel 4. Kategori Kesalahan Sensor

Tingkat Kesalahan	Error Steady State (% e_{ss})	Keterangan
Kategori IV	$e_{ss} < 1,25$	Negligible
Kategori III	$1,25 \leq e_{ss} < 2,5$	Marginal
Kategori II	$2,5 \leq e_{ss} < 5$	Critical
Kategori I	$e_{ss} \geq 5$	Cathastropic

Pengkategorian kesalahan yang dibuat dalam perancangan ini, seperti pada Tabel 4, didasarkan pada besar nilai kesalahan sensor yang terukur. Nilai kesalahan sensor tersebut berpengaruh terhadap performansi sistem, semakin besar nilai kesalahan sensor yang terdeteksi maka *error steady state* sistem juga semakin besar sehingga dapat menyebabkan kegagalan proses.

Dari pengkategorian kesalahan tersebut kemudian dilakukan perancangan suatu skenario terhadap kesalahan sensor untuk mengkompensasi kesalahan/error yang terjadi. Skenario kesalahan sensor tersebut digunakan untuk menentukan nilai penguatan dari *gain* sinyal kontrol pada kontroler *fuzzy PD*. Perancangan skenario *fault tolerant* ditunjukkan seperti pada Gambar 8.

Pengkategorian kesalahan yang dibuat dalam perancangan ini, seperti pada Tabel 4, didasarkan pada besar nilai kesalahan sensor yang terukur. Nilai kesalahan sensor tersebut berpengaruh terhadap performansi sistem, semakin besar nilai kesalahan sensor yang terdeteksi maka *error steady state* sistem juga semakin besar sehingga dapat menyebabkan kegagalan proses.

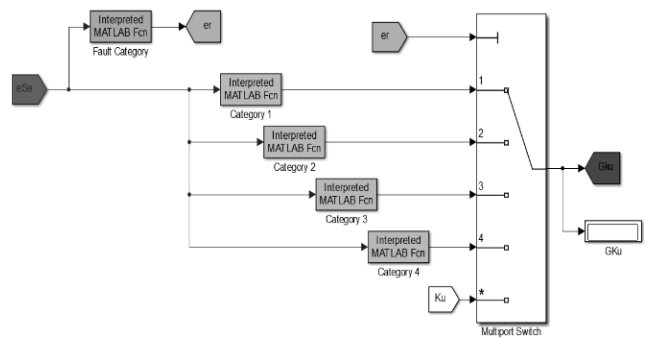
Dari pengkategorian kesalahan tersebut kemudian dilakukan perancangan suatu skenario terhadap kesalahan sensor untuk mengkompensasi kesalahan/error yang terjadi. Skenario kesalahan sensor tersebut digunakan untuk menentukan nilai penguatan dari *gain* sinyal kontrol pada kontroler *fuzzy PD*. Perancangan skenario *fault tolerant* ditunjukkan seperti pada Gambar 8.

IV. HASIL SIMULASI

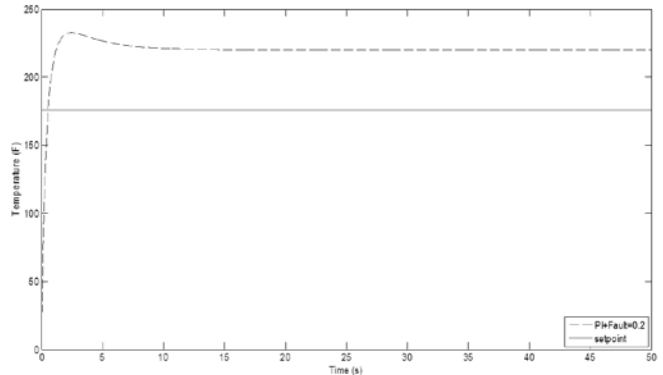
Pembahasan berikut ini merupakan hasil percobaan simulasi untuk kontrol toleransi kesalahan.

A. Simulasi Kontroler PI dengan Perubahan *Gain* Sensor

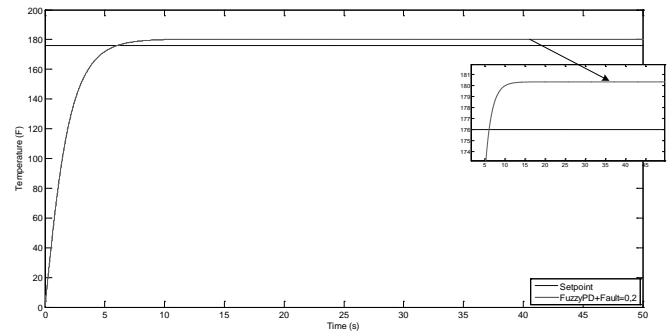
Pengaruh nilai *gain* sensor pada kontrol PI menyebabkan



Gambar 8. Fault Tolerant Scenario



Gambar 9. Pengaruh perubahan *Gain* Sensor Pada Kontrol PI



Gambar 10. Pengaruh perubahan *Gain* Sensor pada Kontrol *Fuzzy PD* sistem memiliki *error* yang besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.

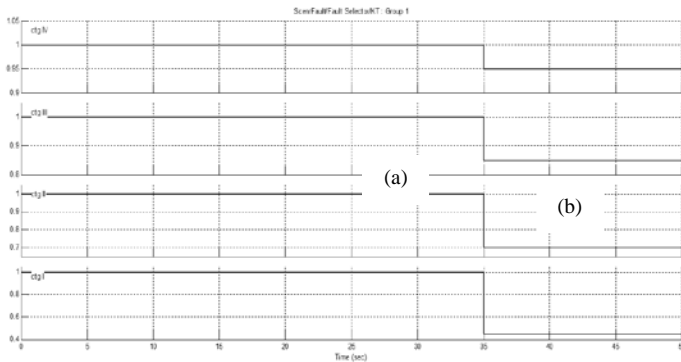
B. Simulasi Kontroler *Fuzzy PD* dengan Perubahan *Gain* Sensor

Perubahan nilai *gain* sensor terhadap keluaran sistem pada kontrol *Fuzzy PD* menunjukkan adanya kenaikan *error steady state* pada sistem, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.

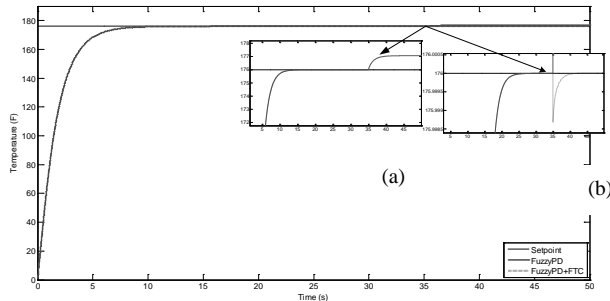
C. Simulasi Kontrol Toleransi Kesalahan Sensor

Pada kontrol PI sulit untuk dilakukan penerapan kontrol toleransi kesalahan pada sensor karena nilai umpan balik yang diberikan terpengaruh oleh *gain* kesalahan yang diberikan, karena adanya faktor *integral* dalam kontrol PI menyebabkan *error* sistem semakin besar dan mengakibatkan sistem tidak dapat mencapai nilai *setpoint* yang diinginkan. Oleh karena itu, dalam Tugas Akhir ini kontrol toleransi kesalahan sensor dilakukan dengan menerapkan kontrol *Fuzzy PD* dengan skema FTC pada sistem.

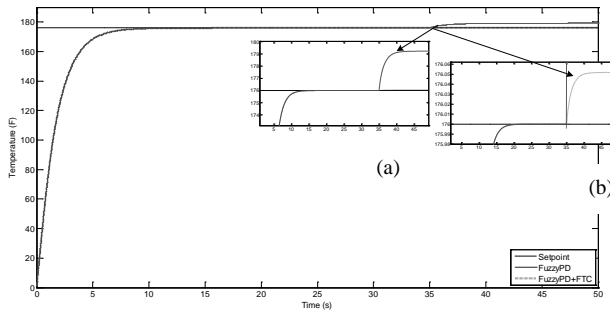
Perubahan nilai *gain* sensor yang diberikan pada sistem memiliki *range* nilai-nilai tertentu berdasarkan kategori



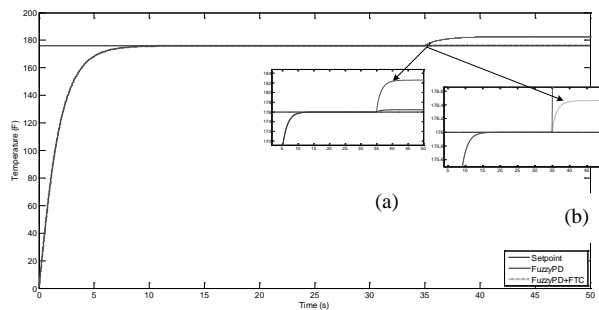
Gambar 11. Sinyal Gangguan untuk Gain Kesalahan Sensor



Gambar 12. Respons Sistem Kesalahan Sensor Kategori IV

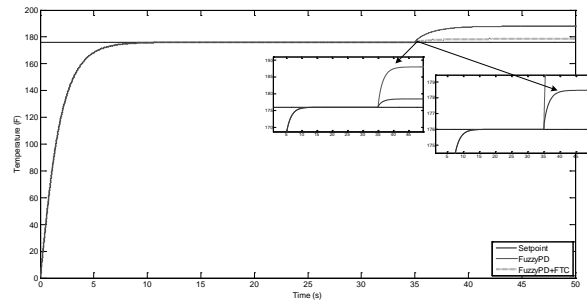


Gambar 13. Respons Sistem Kesalahan Sensor Kategori III



Gambar 14. Respons Sistem Kesalahan Sensor Kategori II kesalahan yang terukur, seperti yang telah ditunjukkan pada Tabel 3. Dalam pengujian kontrol toleransi kesalahan sensor, nilai-nilai dari perubahan gain sensor dibentuk oleh suatu *signal builder*, seperti ditunjukkan pada Gambar 11. Pada Gambar 12-15, menunjukkan pengaruh respons dari sistem terhadap kesalahan sensor yang ada. Pada pengujian ini, gain kesalahan pada sensor diberikan pada detik 35. Dampak dari faktor penguatan gain sensor tersebut mengakibatkan terjadinya kesalahan/error steady state pada sistem.

Dari Gambar 12, menunjukkan hasil perbandingan pengaruh kesalahan sensor untuk kategori IV terhadap performansi sistem menggunakan kontroler fuzzy PD tanpa



Gambar 15. Respons Sistem Kesalahan Sensor Kategori I
Tabel 5.

Tingkat Kesalahan	Kategori Kesalahan Sensor	
	Fuzzy PD tanpa FTC (% e_{ss})	Fuzzy PD + FTC (% e_{ss})
Kategori I	$e_{ss} = 6,82$	$e_{ss} = 1,41$
Kategori II	$e_{ss} = 3,73$	$e_{ss} = 0,26$
Kategori III	$e_{ss} = 1,83$	$e_{ss} = 0,03$
Kategori IV	$e_{ss} = 0,60$	$e_{ss} \approx 0$

FTC dan kontroler fuzzy PD dengan skema FTC pada grafik (a). Dengan menerapkan konsep FTC pada sistem menunjukkan adanya perbaikan terhadap performa/error steady state sistem seperti ditunjukkan pada grafik (b), dengan error steady state yang terukur sangat kecil hingga mendekati nol persen.

Secara keseluruhan hasil perbandingan pengaruh kesalahan sensor untuk kategori I-IV terhadap performansi sistem ditunjukkan pada Tabel 4.

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, hasil informasi kesalahan yang terdeteksi digunakan untuk menentukan kategori-kategori yang kemudian dijadikan dasar dalam perancangan suatu skenario kesalahan untuk mengkompensasi kesalahan sensor yang terjadi. Penerapan kontroler fuzzy PD dengan skema FTC dapat mengkompensasi kesalahan sensor dari setiap kategori kesalahan yang terjadi sehingga mampu memperbaiki performansi sistem. Kontrol fuzzy PD dengan skema FTC tersebut mampu memberikan perbaikan terhadap error steady state (e_{ss}) yang terjadi pada sistem, dimana untuk kategori I perbaikan error steady state mencapai 79,3%. Sedangkan untuk kategori II, III dan IV perbaikan error steady state pada sistem hingga diatas 90%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Chen, J., "Modified Feedback Configuration for Sensor Fault Tolerant Control", 2008 10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, pp. 2038-2043, December 2008.
- [2]. Corripio, Armando B. dan Smith, Carlosa A., Principle and Practice of Automatic Process Control, McGraw-Hill, New York 1997.
- [3]. Angraini, Dini, "Perancangan Pabrik Asam Formiat Dengan Proses Hidrolisa Metil Formiat Kapasitas 20.000 Ton/ Tahun", Tugas Akhir, Universitas Sebelas Maret Surakarta, 2005.
- [4]. Ebeling, Charles E., An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, MacGraw-Hill International Editions, University of Dayton 1997.
- [5]. Astrom, K.J and, T. Hagglund, PID Controllers: Theory, Design and Tuning 2nd Ed, Instrument Society of America, 1995.
- [6]. Pasino, K. M. and Yurkovich, S., Fuzzy Control, Addison Wesley Longman, California, 1998.
- [7]. Jan, Jantzen, "Tuning Of Fuzzy PID Controllers", Technical Automation Department of Denmark University, pp. 1-22, 30 September 1998.