

## Makalah Seminar Tugas Akhir

# PERANCANGAN PENGONTROL DAN ANALISIS RESPON PADA SISTEM INTERNAL MODEL CONTROL (IMC) (Studi Kasus Pada *Heat Exchanger*)

Asana Kusnadi<sup>1</sup>, Sumardi, ST. MT<sup>2</sup>, Iwan Setiawan, ST, MT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa dan <sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Sudarto, Tembalang, Semarang, Indonesia

### Abstrak

Tujuan keseluruhan dari operasi suatu plant adalah untuk mencapai keuntungan maksimum (performansi optimum plant) dengan adanya berbagai masalah seperti keamanan, faktor ekonomis, peraturan pemerintah, dan keterbatasan peralatan.

*Internal Model control (IMC)* adalah suatu metode untuk merancang suatu pengontrol umpan balik untuk membuat keluaran suatu proses yang stabil memberikan respon sesuai yang diinginkan terhadap perubahan setpoint, serta mengatasi pengaruh gangguan yang langsung masuk pada keluaran proses. Pengontrol  $q(s, \varepsilon)$  sistem IMC untuk model yang sempurna merupakan inverse dari model plant.

*Heat exchanger* adalah suatu alat yang memungkinkan terjadinya pertukaran panas, antara suatu fluida dengan fluida yang lain. Dalam industri digunakan bermacam-macam jenis *heat exchanger* seperti pemanas, pendingin, boiler, maupun kondensator. Pada tugas akhir ini, IMC digunakan untuk mengontrol plant *heat exchanger* agar beroperasi pada kondisi yang optimal.

IMC Orde 1 memberikan respon yang lebih cepat dan bagus dibandingkan dengan sistem umpan balik biasa dengan kontrol proporsional baik tanpa adanya gangguan maupun adanya gangguan yang masuk pada keluaran sistem. Sistem IMC orde 2 memberikan respon yang lebih baik dari IMC orde 1 jika ada gangguan melalui suatu proses yang masuk pada keluaran sistem.

Kata kunci : IMC orde 1, IMC orde 2, *heat exchanger*

## 1 PENDAHULUAN

### Latar Belakang Masalah

Sistem umpan balik biasa dengan pengontrol PID yang sering diterapkan pada kebanyakan sistem kontrol di industri saat ini, mempunyai kelemahan apabila ada gangguan yang tidak diduga sebelumnya masuk ke keluaran. Keluaran sistem menjadi tidak sesuai dengan setpoint atau lama dalam mencapai harga yang diinginkan.

*Internal Model Control (IMC)* adalah salah satu metode kontrol, yang menggunakan model dari plant yang ingin dikontrol. IMC merupakan suatu metode untuk merancang suatu pengontrol umpan balik untuk membuat keluaran suatu proses yang stabil untuk (1) memberikan respon sesuai yang diinginkan terhadap perubahan setpoint, dan (2) mengatasi pengaruh gangguan yang langsung masuk pada keluaran proses.

Pada penerapan industri di lapangan, sering didapatkan adanya transportasi lag atau dead time (waktu mati), merepresentasikan waktu mati pada suatu persamaan fungsi alih dapat dilakukan melalui pendekatan Pade, yakni suatu metode pendekatan waktu mati dengan menggunakan fungsi alih. Pendekatan Pade yang digunakan pada tugas akhir ini adalah pendekatan Pade orde 1, 2 dan 5.

*Heat exchanger* adalah suatu alat yang memungkinkan terjadinya pertukaran panas, antara suatu fluida dengan fluida yang lain. Dalam industri digunakan

bermacam-macam jenis *heat exchanger* seperti pemanas, pendingin, boiler, maupun kondensator. Pada tugas akhir ini jenis *heat exchanger* yang digunakan adalah pemanas air.

Merancang pengontrol IMC orde 1 dan IMC orde 2 pada *heat exchanger* secara matematis dan memberikan masukan step dan impulse pada fungsi alih masukan-keluaran dan gangguan-masukan memberikan karakteristik tanggapan terhadap masing-masing sistem kontrol tersebut dan dapat diketahui sistem kontrol mana yang lebih baik digunakan pada suatu kondisi operasi tertentu.

### Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada tugas akhir ini adalah:

1. Merancang pengontrol IMC orde 1 dan orde 2, pada *heat exchanger*.
2. Membandingkan respon sistem IMC orde 1 dengan sistem umpan balik biasa serta membandingkan respon sistem IMC orde 1 dengan IMC orde 2 terhadap gangguan yang masuk melalui suatu proses.

### Batasan Masalah

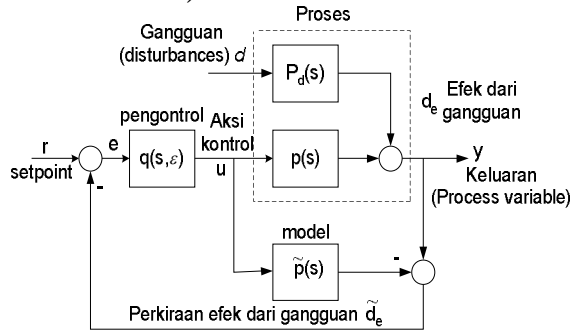
Permasalahan yang dibahas terbatas pada beberapa pembatasan masalah berikut ini:

1. Model matematika *plant* yang digunakan adalah *Heat exchanger*, yakni fungsi alih orde satu dengan waktu tunda (FOPDT), dengan harga  $R=1$ , dan  $C = 1$ .
2. Model adalah representasi sempurna dari proses yang sebenarnya (ideal).
3. Proses dianggap stabil.
4. Pendekatan pada terhadap waktu mati ( $T$ ) tidak digunakan pada sistem umpan balik, IMC orde 1, atau IMC orde 2 tanpa gangguan.
5. Tidak membahas respon umpan balik terhadap gangguan *step* maupun *impulse* yang melalui suatu proses.
6. Tidak membahas pengontrol IMC menggunakan PID.

## 2 DASAR TEORI

### 2.1 Internal Model Control (IMC)

#### 2.1.1 Internal model Control dengan 1 derajat kebebasan (*One Degree of Freedom Internal Model Control*)



Gambar 1 Diagram blok sistem *Internal Model Control*

Bagian ini memperkenalkan suatu metode untuk merancang suatu pengontrol umpan balik untuk membuat keluaran suatu proses yang stabil untuk (1) memberikan respon sesuai yang diinginkan terhadap perubahan *setpoint*, dan (2) mengatasi pengaruh gangguan yang langsung masuk pada keluaran proses. Pada pembahasan selanjutnya, diasumsikan :

- 1) Model matematis adalah representasi yang sempurna dari suatu proses (ideal).
- 2) Proses adalah linear.
- 3) Tidak ada batasan (*constraint*) pada aksi kontrol sehingga dapat bernilai berapa saja antara  $-\infty$  dan  $\infty$ .

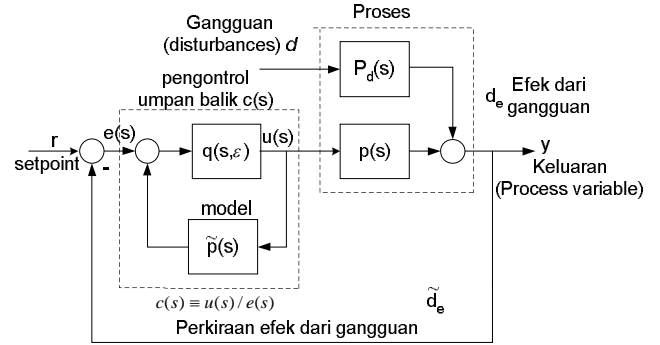
#### a. Komponen Internal Model Control (IMC)

##### 1) Fungsi Alih

Untuk pengontrol umpan balik  $c(s)$  pada gambar 2 berlaku:

$$c(s) \equiv \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{q(s)}{1 - q(s)p(s)} \quad (1)$$

tanda negatif pada denominator persamaan (1) timbul dari umpanbalik positif didekat  $q(s)$ .



Gambar 2 Konfigurasi alternatif dari IMC

Hubungan masukan-keluaran dari gambar 2 dapat diberikan sebagai berikut:

$$y(s) = \frac{p(s)q(s)r(s)}{1 + (p(s) - \tilde{p}(s))q(s)} \quad (1)$$

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \frac{p_d(s)}{1 + \frac{p(s)q(s)}{1 - q(s)p(s)}} = \frac{(1 - \tilde{p}(s)q(s))p_d(s)}{1 + (p(s) - \tilde{p}(s))q(s)} \quad (2)$$

$$\frac{u(s)}{r(s)} = \frac{q(s)}{1 - (\tilde{p}(s) - p(s))q(s)} \quad (3)$$

$$u(s) = -\frac{p_d(s)q(s)d(s)}{1 - \tilde{p}(s)q(s) + p(s)q(s)} \quad (4)$$

#### 2) IMC tidak mempunyai komponen *offset*

*Gain steady-state* semua fungsi alih yang stabil dapat diperoleh dengan mengganti variabel laplace  $s$  dengan nol. Untuk persamaan (1) maka :

$$c(s) = \frac{q(s)}{1 - q(s)\tilde{p}(s)} = \frac{q(0)}{1 - q(0)\tilde{p}(0)} \quad (5)$$

persamaan karakteristik dari persamaan (5) diatas adalah:

$$\begin{aligned} 1 - q(0)\tilde{p}(0) &= 0 \\ q(0)\tilde{p}(0) &= 1 \\ q(0) &= \tilde{p}^{-1}(0) \end{aligned} \quad (6)$$

Jika persamaan (1) dan (2) stabil, dan jika dipilih *gain steady-state* dari pengontrol  $q(0)$  adalah *inverse* dari model *gain* ( $\tilde{p}(0)q(0) = 1$ ) yang diperoleh dari persamaan (11), maka *gain* dari denominator persamaan (1) dan (2) adalah  $p(0)q(0)$ . Sehingga, *gain* antara *setpoint*  $r(s)$  dan  $y(s)$  adalah 1; *gain* antara gangguan  $d(s)$  dan  $y(s)$  adalah nol, dan tidak ada deviasi *steady-state* antara keluaran proses dan *setpoint*. Berikut adalah penurunan secara matematisnya: dari persamaan (1) (2.19)

$$\begin{aligned} y(0) &= \frac{p(0)q(0)r(0)}{1 + (p(0) - \tilde{p}(0))q(0)} \\ \frac{y(0)}{r(0)} &= 1 \longrightarrow y(0) = r(0) \end{aligned} \quad (7)$$

- dari persamaan (2)

$$\begin{aligned} \frac{y(0)}{d(0)} &= \frac{(1 - \tilde{p}(0)q(0))p_d(0)}{1 + p(0)q(0) - \tilde{p}(0)q(0)} \\ \frac{y(0)}{d(0)} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Suatu sistem kontrol yang ideal akan memaksa keluaran dari proses untuk mencapai *setpoint* secara langsung dan secara sempurna menekan semua gangguan sehingga tidak akan mempengaruhi keluarannya. Sehingga, suatu sistem kontrol yang sempurna akan memenuhi persamaan:

$$y(s) = r(s) \quad (9)$$

dan

$$\frac{y(s)}{d(s)} = 0 \quad (10)$$

Dari persamaan (1) dan (2) untuk mencapai keadaan seperti persamaan (9) dan (10) diatas dibutuhkan :

$$p(s)q(s) = 1 \text{ dan } \tilde{p}(s) = p(s) \quad (11)$$

Karena itu, untuk memperoleh pengontrolan yang sempurna pada IMC, dibutuhkan model yang sempurna(

$$q(s) = \tilde{p}^{-1}(s)$$

Namun, pada kenyataannya, tidak ada model yang benar-benar sempurna, dan jika suatu model adalah model dinamis, tidak ada pengontrol yang secara sempurna dapat menginverse model dari proses. Pengontrol tersebut hanya dapat mendekati sempurna dalam menginverse suatu model. Untuk selanjutnya, pada laporan ini diasumsikan bahwa model adalah representasi yang **sempurna** dari proses.

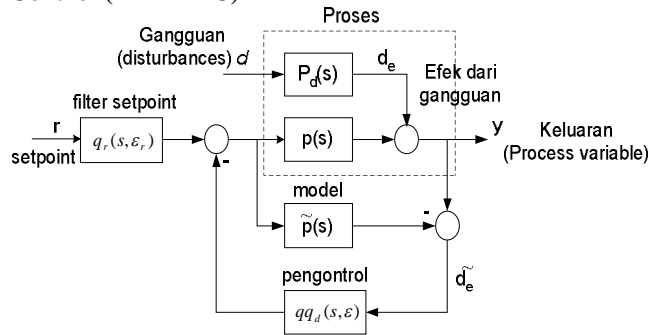
## 2.1.2 Internal Model Control dengan 2 derajat kebebasan (2DF IMC)

### a. Pendahuluan

Metode desain IMC yang diberikan oleh sub-bab yang sebelumnya mengasumsikan bahwa gangguan *step* masuk ke keluaran proses tanpa melalui suatu proses ( $p_d(s)=1$ ).

Dengan menganggap bahwa gangguan langsung masuk ke keluaran, membuat pengontrol dapat fokus pada pencapaian respon yang bagus atas perubahan *step* pada *setpoint*. Pengontrol semacam ini juga dapat menekan gangguan *step* karena sinyal yang masuk ke pengontrol adalah *setpoint* dikurangi perkiraan gangguan.

### b. Struktur 2 derajat kebebasan Internal Model Control (2DF IMC)



Gambar 3 struktur 2DF IMC

Pengontrol  $qq_d(s, \epsilon)$  pada gambar 3 didesain untuk menolak gangguan, sementara *setpoint* pengontrol  $q(s, \epsilon)$  didesain untuk menghasilkan respon sesuai perubahan *setpoint*. Untuk selanjutnya, yang dimaksud *setpoint* pengontrol adalah *setpoint* filter, untuk disesuaikan dengan istilah industri.

Model yang sempurna untuk keluaran dan aksi kontrol pada gambar 3 adalah :

$$y(s) = \frac{(1+p(s)qq_d(s, \epsilon))p_d(s)d(s)}{1-qq_d(s, \epsilon)p(s)+qq_d(s, \epsilon)p(s)} + \frac{r(s)q_r(s, \epsilon)p(s)}{1-qq_d(s, \epsilon)p(s)+qq_d(s, \epsilon)p(s)}$$

Untuk keadaan ideal  $\tilde{p}(s) = p(s)$  maka keluaran  $y(s)$  dapat dirumuskan:

$$y(s) = \tilde{p}(s)q_r(s, \epsilon)r(s) + (1 - \tilde{p}(s)qq_d(s, \epsilon))p_d(s)d(s) \quad (14)$$

$$\bullet u(s) = m(s) = r(s)q_r(s, \epsilon) - qq_d(s, \epsilon)(y(s) - m(s) - \tilde{p}(s)) \quad (15)$$

Untuk keadaan ideal  $\tilde{p}(s) = p(s)$  maka

persamaan diatas menjadi:

$$m(s) = q(s, \epsilon)r(s) + qq_d(s, \epsilon)p_d(s)d(s) \quad (16)$$

### c. Mendesain pengontrol umpanbalik $qq_d(s, \epsilon)$ untuk proses yang stabil

*Setpoint* filter  $q_r(s, \epsilon)$  pada gambar 3 didesain seperti pengontrol dengan 1 derajat kebebasan menggunakan metode sebelumnya. Namun, karena biasanya tidak ada gangguan pada *setpoint*, maka tidak ada batas penguatan *noise* pada  $\epsilon_r$ .

Fungsi alih antara keluaran dan gangguan pada gambar 4 untuk model sempurna adalah:

$$y(s) = (1 - \tilde{p}(s)qq_d(s, \epsilon))\tilde{p}_d(s)d(s) \quad (17)$$

Untuk mendesain  $qq_d(s, \epsilon)$  bagi model sempurna, dimisalkan  $qq_d(s, \epsilon)$  terdiri dari dua bagian yaitu  $q(s, \epsilon)$  dan  $q_d(s, \epsilon)$ . Prosedurnya adalah sebagai berikut:

1. Memilih  $q(s, \epsilon)$  seperti pada IMC orde 1 Yaitu,  $q(s, \epsilon)$  menginverse bagian dari model proses  $\tilde{p}(s)$ . Memilih filter pengontrol  $1/(\epsilon s + 1)^r$  dimana  $r$  adalah derajat relatif dari bagian model proses yang diinverse oleh  $q(s, \epsilon)$ .
2. memilih  $q_d(s, \epsilon)$  sebagai:

$$q_d(s, \epsilon, \alpha) = \frac{\sum_{i=0}^n \alpha_i s^i}{(\epsilon s + 1)^n}; \alpha_0 \equiv 1, \quad (18)$$

dengan  $n$  adalah jumlah *pole* pada  $\tilde{p}_d(s)$  yang akan dihilangkan oleh *zero* dari

$$y(s) = (1 - \tilde{p}(s)qq_d(s))$$

3. Memilih secara coba-coba harga konstanta filter waktu  $\epsilon$ .
4. Mencari harga  $\alpha_i$  dengan menghitung persamaan (19) untuk tiap  $n$  *pole* yang berbeda dari  $\tilde{p}_d(s)$  yang akan dihilangkan dari respon gangguan.

$$(1 - \tilde{p}(s)qq_d(s, \epsilon, \alpha))|_{s=-1/\tau_i} = 0; i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

dimana  $\tau_i$  adalah konstanta waktu yang diasosiasikan dengan *pole* ke  $i$  dari  $\tilde{p}_d(s)$

5. Menyesuaikan harga  $\epsilon$ , dan mengulangi langkah 4 hingga penguatan *noise* yang diinginkan diperoleh.

**2.2 Heat exchanger**

**2.2.1 Tahanan dan Kapasitansi Sistem Termal**

Tahanan termal R untuk perpindahan kalor antara dua zat dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$R = \frac{\text{perubahan .beda .temperatur } ,^{\circ} C}{\text{perubahanl .laju .alirankalo } r ,W} \quad (20)$$

Tahanan termal untuk perpindahan kalor konduksi atau konveksi diberikan sebagai

Sedangkan kapasitansi termal didefinisikan oleh

$$C = \frac{\text{perubahan .kalor .yang .tersimpan } ,J}{\text{perubahan .temperatur } ,^{\circ} C} \quad (21)$$

$$\text{atau } C = Wc_p \quad (22)$$

dimana :W = berat zat yang ditinjau, N  
 c<sub>p</sub> = kalor jenis zat, J<sup>o</sup>C-N

**2.2.2 Sistem Termal pada Plant Pengatur Suhu**

Gambar 8 merupakan sistem termal pada plant pengatur suhu dengan menganggap bahwa kotak plant terisolasi sehingga rugi (kehilangan) kalor ke udara sekeliling dapat diabaikan, maka dapat didefinisikan:

$\bar{\Theta}_i$  = Temperatur keadaan tunak air masuk, °C

$\bar{\Theta}_o$  = Temperatur keadaan tunak air keluar, °C

G = Laju aliran air melalui ruang pemanas, kg/det

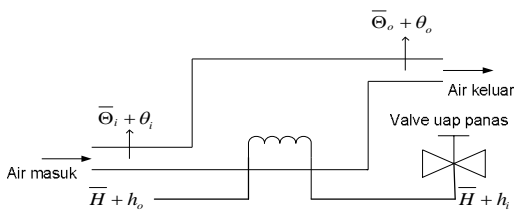
M = air yang ditampung dalam ruang pemanas, kg

c = kalor jenis air, J/kg °C

R = Tahanan termal, °C/W

C = Kapasitansi termal dari air dalam ruang pemanas = Mc, J<sup>o</sup>C

$\bar{H}$  = masukan kalor keadaan tunak, W = J/det = Btu/det



Gambar 4 Sistem termal pada plant pengatur suhu

Pada kasus tugas akhir ini dianggap bahwa masukan kalor tiba-tiba diubah dari  $\bar{H}$  menjadi  $\bar{H} + h$  dan temperatur air masukan tiba-tiba diubah dari  $\bar{\Theta}_i$  menjadi  $\bar{\Theta}_i + \theta_i$ . Akibatnya temperatur air keluar akan berubah dari  $\bar{\Theta}_o$  menjadi  $\bar{\Theta}_o + \theta_o$ .

Persamaan (41) dapat ditulis kembali sebagai berikut

$$RC \frac{d\theta_o}{dt} + \theta_o = Rh + \theta_i \quad (23)$$

Dengan mencari transformasi Laplace kedua ruas persamaan (43) dan dengan substitusi syarat awal bahwa  $\theta_o(0) = 0$ , dapat diperoleh

$$\Theta_o(s) = \frac{R}{RCs + 1} H(s) + \frac{1}{RCs + 1} \Theta_i(s) \quad (24)$$

RC merupakan konstanta waktu sistem.

$$\frac{\Theta_o(s)}{H(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (25)$$

dan fungsi alih yang merelasikan  $\theta_o$  dan  $\theta_i$  diberikan sebagai :

$$\frac{\Theta_o(s)}{\Theta_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (26)$$

Dari persamaan (26) di atas dapat dilihat bahwa plant pengatur suhu termasuk dalam plant orde satu. Persamaan (25) merupakan fungsi alih dari plant heat exchanger dan persamaan (26) merupakan fungsi alih dari gangguan.

**III PERANCANGAN PENGONTROL PADA IMC**

**3.1 Perancangan pengontrol pada sistem 1DF IMC**

**3.1.1 Perumusan pengontrol q(s)**

Untuk mempermudah perancangan dan simulasi yang akan diberikan pada bab-bab selanjutnya, harga R dan C dimisalkan sebesar 1 yang akan memberikan persamaan :

$$\frac{\Theta_o(s)}{H(s)} = \frac{1}{s + 1} e^{-Ts} \quad (27)$$

$$\frac{\Theta_o(s)}{\Theta_i(s)} = \frac{1}{s + 1} e^{-Ts} \quad (28)$$

dengan  $\bar{\Theta}_o$  = Temperatur keadaan tunak air keluar, °C

$\bar{\Theta}_o$  = Temperatur keadaan tunak air keluar, °C

H = laju panas yang masuk ke sistem

Pada perancangan pengontrol sistem IMC orde1, berlaku beberapa asumsi antara lain:

- 1) Besar tahanan termal (R) dan kapasitas termal (C) adalah masing-masing 1
- 2) Gangguan berupa lag P<sub>d</sub>(s) pada gambar 3.1 adalah 1.
- 3) Model adalah representasi sempurna dari sistem (ideal).
- 4) Variasi konstanta waktu yang digunakan adalah 0.2 dan 0.5.

Fungsi alih proses, yakni heat exchanger sebagai fungsi alih suhu keluaran dengan uap panas yang masuk ke sistem diberikan oleh persamaan (29)

$$p(s) = \frac{\Theta_o(s)}{H_i(s)} = \frac{1}{s + 1} e^{-Ts} \quad (29)$$

dan besarnya p<sub>d</sub>(s) = 1. Karena diasumsikan model adalah representasi yang sempurna dari proses sehingga :

$$p(s) = \tilde{p}(s) = \frac{1}{s + 1} e^{-Ts} \quad (30)$$

Untuk menghasilkan sistem kontrol yang sempurna, pengontrol harus secara sempurna merupakan kebalikan dari proses yang sempurna. Sehingga dengan membalik persamaan (30) dihasilkan persamaan :

$$p^{-1}(s) = \frac{\tau s + 1}{K} e^{\tau s} = \frac{s + 1}{1} e^{\tau s} \quad (31)$$

bagian dari persamaan (31) yang dapat direalisasikan secara fisik pada suatu pengontrol adalah proses gain K, dalam hal ini, K=1 dan  $\tau=1$ . Bagian  $e^{\tau s}$  mewakili prediksi dari keluaran yang belum diperoleh dan tidak mungkin direalisasikan. Hal itu dapat dijelaskan sebagai berikut: inverse transformasi laplace dari  $f(s)e^{\tau s}$  adalah  $f(t+T)$ . Pengontrol IMC pada gambar 1 beroperasi pada *setpoint* dikurangi dengan perkiraan gangguan. Karena itu, jika pengontrol mempunyai fungsi alih yang mengandung  $e^{\tau s}$ , implementasi dari pengontrol akan membutuhkan prediksi dari gangguan sebesar T unit waktu di masa depan, dan prediksi yang eksak tidak mungkin kecuali mempunyai informasi akan keluaran di masa depan terlebih dahulu. Karena itu, yang terbaik yang dapat dilakukan adalah untuk mengimplementasikan pengontrol  $q(s)$  pada proses yang diberikan adalah sebagai berikut:

$$q(s) = \frac{\tau s + 1}{K(\varepsilon s + 1)} \quad (32)$$

dari persamaan (32) maka persamaan pengontrol *plant heat exchanger* pada sistem IMC adalah:

$$q(s) = \frac{s + 1}{\varepsilon s + 1} \quad (33)$$

dengan  $\varepsilon$  = konstanta waktu filter (*filter time constant*) yang dipilih untuk menghindari penguatan derau yang terlalu besar dan untuk mengatasi kesalahan pada pemodelan.

### 3.1.2 Penentuan parameter $\varepsilon$

Untuk menghindari penguatan derau yang terlalu besar,  $\varepsilon$  dipilih sedemikian sehingga gain pengontrol pada frekuensi yang tinggi tidak lebih dari 20 kali besar gain pada frekuensi rendah. Untuk pengontrol yang fungsi alihnya merupakan rasio dari polinomial, kriteria ini dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\left| \frac{q(\infty)}{q(0)} \right| \leq 20 \quad (34)$$

kriteria yang diberikan oleh persamaan (34) diatas muncul dari praktik industri standar yang membatasi gain pada frekuensi tinggi pada pengontrol PID untuk tidak lebih dari 20 kali gain pada frekuensi rendah. Faktor pengali 5 dan 10 juga sering ditemui pada praktik industri di lapangan<sup>[1]</sup>.

Dengan mensubstitusikan persamaan (35) ke dalam persamaan (63) didapatkan:

$$\left| \frac{q(\infty)}{q(0)} \right| = \left| \frac{s + 1 / (\varepsilon s + 1)}{s + 1 / (\varepsilon s + 1)} \right| \leq 20 \quad (35)$$

Dari persamaan di atas, untuk  $s \cong \infty$  maka  $\varepsilon \geq 0.05$ .

Untuk proses yang sama, maka untuk faktor penguatan derau 5 dan 10 besar konstanta waktu filter berturut-turut adalah  $\varepsilon = 0,2$  dan  $\varepsilon = 0,1$ . Dengan diperoleh harga konstanta waktu filter  $\varepsilon$  maka persamaan (33) untuk pengontrol  $q(s)$  pada sistem IMC orde satu adalah:

$$q(s) = \frac{s + 1}{0,2s + 1} \text{ untuk faktor penguatan derau 5} \quad (36)$$

$$q(s) = \frac{s + 1}{0,1s + 1} \text{ untuk faktor penguatan derau 10} \quad (37)$$

$$q(s) = \frac{s + 1}{0,05s + 1} \text{ untuk faktor penguatan derau 20} \quad (38)$$

Setelah diperoleh fungsi alih pengontrol pada berbagai harga faktor penguatan derau, maka dapat dirumuskan keluaran sistem dengan mensubstitusikan fungsi alih proses dari persamaan (30) dan fungsi alih pengontrol dari persamaan (33) ke dalam persamaan (1) dan (2) sebagai fungsi alih keseluruhan sistem, untuk  $p_d(s) = 1$  menghasilkan persamaan berikut:

Untuk model sempurna  $\tilde{p}(s) = p(s)$  maka fungsi keseluruhan antara masukan-keluaran serta keluaran-gangguan adalah sebagai berikut:

$$y(s) = \frac{e^{-Ts}}{\varepsilon s + 1} r(s) + \left( 1 - \frac{e^{-Ts}}{\varepsilon s + 1} \right) d(s) \quad (39)$$

Fungsi alih masukan-keluaran pada berbagai harga konstanta waktu filter dirumuskan

$$1) y(s) = \frac{e^{-Ts}}{(0,2s + 1)} r(s) \text{ untuk faktor penguatan derau 5}$$

$$2) y(s) = \frac{e^{-Ts}}{(0,1s + 1)} r(s) \text{ untuk faktor penguatan derau 10}$$

$$3) y(s) = \frac{e^{-Ts}}{(0,05s + 1)} r(s) \text{ untuk faktor penguatan derau 20}$$

Mensubstitusikan persamaan (36) hingga (38) ke dalam persamaan fungsi alih keluaran  $y(s)$  dan gangguan  $d(s)$  pada persamaan (39) menghasilkan fungsi alih keluaran-gangguan pada berbagai harga konstanta waktu filter untuk  $P_d(s) = 1$  berikut:

$$1) \frac{y(s)}{d(s)} = \left( 1 - \frac{e^{-Ts}}{0,2s + 1} \right) \text{ untuk faktor penguatan derau 5}$$

$$2) \frac{y(s)}{d(s)} = \left( 1 - \frac{e^{-Ts}}{0,1s + 1} \right) \text{ untuk faktor penguatan derau 10}$$

$$3) \frac{y(s)}{d(s)} = \left( 1 - \frac{e^{-Ts}}{0,05s + 1} \right) \text{ untuk faktor penguatan derau 20}$$

Mensubstitusikan persamaan (36) hingga (38) ke dalam persamaan fungsi alih keluaran  $y(s)$  dan  $d(s)$  pada persamaan (39) menghasilkan fungsi alih keluaran-gangguan pada berbagai harga konstanta waktu filter untuk:

$$p(s) = \tilde{p}(s) = p_d(s) = \tilde{p}_d(s) = \frac{1}{s + 1} e^{-Ts} \quad (40)$$

menghasilkan :

$$1) \frac{y(s)}{d(s)} = \left( 1 - \frac{e^{-Ts}}{0,2s + 1} \right) \frac{e^{-Ts}}{s + 1} \text{ untuk faktor penguatan derau 5}$$

$$2) \frac{y(s)}{d(s)} = \left( 1 - \frac{e^{-Ts}}{0,1s + 1} \right) \frac{e^{-Ts}}{s + 1} \text{ untuk faktor penguatan}$$

derau 10

$$3) \frac{y(s)}{d(s)} = \left( 1 - \frac{e^{-Ts}}{0,05s + 1} \right) \frac{e^{-Ts}}{s + 1} \quad \text{untuk faktor penguatan derau 20} \quad (41)$$

Dari tiap-tiap persamaan diatas, dengan mensubstitusikan deret pada orde 1,2,dan 5 untuk masing-masing waktu mati akan diperoleh persamaan berorde tinggi. Untuk mengetahui respon sistem IMC pada plant *heat exchanger* dengan fungsi alih proses dan pengontrol yang diberikan akan dibahas pada bab selanjutnya.

### 3.2 Perancangan pengontrol pada sistem 2DF IMC

Struktur IMC orde 2 diberikan oleh gambar 7. Pada gambar ini terdapat 2 pengontrol yakni  $q_d(s, \varepsilon)$ , yang dirancang untuk mengatasi gangguan (*disturbance*), dan pengontrol *setpoint*  $q_r(s, \varepsilon)$  yang didesain untuk menghasilkan keluaran agar sesuai dengan *setpoint*. Namun untuk selanjutnya, pengontrol *setpoint* akan disebut filter *setpoint*.

#### 3.2.1 Merancang filter *setpoint* $q(s, \varepsilon_r)$

Filter *setpoint*  $q_r(s, \varepsilon_r)$  pada gambar 3 dirancang layaknya pengontrol IMC derajat 1 menggunakan metode yang telah dibahas sebelumnya. Pada tugas akhir ini, perhitungan  $\varepsilon_r$  dibatasi seperti harga  $\varepsilon$  pada IMC orde 1, yakni dengan menggunakan faktor penguatan derau pada harga 5, 10, dan 20.

Dengan fungsi alih *heat exchanger* yang diberikan,

$$p(s) = \frac{\Theta_o(s)}{H_i(s)} = \frac{1}{s + 1} e^{Ts} \quad (42)$$

maka fungsi alih  $q_r(s, \varepsilon_r)$  didapat dengan melakukan inverse dari model plant, yakni:

$$q(s) = \frac{s + 1}{\varepsilon s + 1} \quad (43)$$

Untuk faktor penguatan derau 5, 10 dan 20, maka fungsi alih pengontrol dengan harga  $\varepsilon$  masing-masing 0,2, 0,1, dan 0,05 adalah seperti pengontrol IMC orde 1 pada persamaan (36) hingga (38)

#### 3.2.2 Merancang pengontrol umpan balik $q_d(s, \varepsilon)$

Pada IMC orde 2 di gambar 3.2 gangguan yang masuk pada keluaran sistem melalui suatu proses, sehingga fungsi alihnya tidak 1, melainkan merupakan suatu fungsi alih.. Pada plant *heat exchanger*, gangguan dapat berupa masukan kalor yang berubah dari  $\bar{H}$  menjadi  $\bar{H} + h$ , sehingga fungsi alih gangguan adalah:

$$p_d(s) = \frac{\Theta_o(s)}{\Theta_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} e^{-Ts} \quad (44)$$

Untuk fungsi alih proses, telah diberikan sebelumnya yakni :

$$p(s) = \frac{\Theta_o(s)}{H_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} e^{-Ts} \quad (45)$$

dengan harga R dan C adalah 1, maka persamaan fungsi alih gangguan dan proses sama sebagai berikut:

$$p(s) = \tilde{p}(s) = p_d(s) = \tilde{p}_d(s) = \frac{1}{s + 1} e^{-Ts} \quad (46)$$

Fungsi alih antara keluaran, masukan dan gangguan pada gambar 3 untuk model yang sempurna adalah

$$y(s) = \tilde{p}(s)q_r(s, \varepsilon_r)r(s) + (1 - \tilde{p}(s)q_d(s, \varepsilon))p_d(s)d(s) \quad (47)$$

jika diambil fungsi alih antara keluaran dan gangguan saja, maka persamaan (47) menjadi:

$$y(s) = (1 - \tilde{p}(s)q_d(s, \varepsilon))p_d(s)d(s) \quad (48)$$

$q_d(s, \varepsilon)$  pada persamaan (48) untuk model yang sempurna, dianggap terdiri dari dua bagian, yakni  $q(s, \varepsilon)$  dan  $q_d(s, \varepsilon)$ . Prosesnya perancangannya sebagai berikut:

- 1) Memilih fungsi alih  $q(s, \varepsilon)$  seperti pada IMC

$$q(s) = \frac{s + 1}{0,2s + 1} \quad \text{untuk faktor penguatan derau 5}$$

$$q(s) = \frac{s + 1}{0,1s + 1} \quad \text{untuk faktor penguatan derau 10}$$

$$q(s) = \frac{s + 1}{0,05s + 1} \quad \text{untuk faktor penguatan derau 20}$$

- 2) Merancang  $q_d(s)$  sehingga

zero dari  $(1 - \tilde{p}(s)q_d(s, \varepsilon))$  dapat menghilangkan pole-pole dari  $p_d(s)$ . Karena  $p_d(s)$  mempunyai pole tunggal pada  $s=-1$ , maka kita memilih  $q_d(s)$  sebagai berikut:

$$q_d(s) = \frac{(\alpha s + 1)}{(\varepsilon s + 1)} \quad (49)$$

yang diperoleh dari persamaan

$$q_d(s, \varepsilon, \alpha) = \frac{\sum_{i=0}^n \alpha_i s^i}{(\varepsilon s + 1)^n}; \alpha_0 \equiv 1, \quad (50)$$

dengan n adalah jumlah pole dari  $\tilde{p}_d(s)$  yang akan dihilangkan oleh zero dari  $(1 - \tilde{p}(s)q_d(s, \varepsilon))$

- 3) Memilih konstanta waktu filter, dalam hal ini  $\varepsilon$  dipilih untuk faktor penguatan derau 5, 10, dan 20 yakni 0,05, 0,2, dan 0,1.

- 4) Konstanta  $\alpha$  dipilih sedemikian sehingga  $(1 - \tilde{p}(s)q_d(s, \varepsilon))$  mempunyai zero pada  $s=-1$  yakni:

$$(1 - \tilde{p}(s)q_d(s, \varepsilon, \alpha))|_{s=-1} = 0$$

$$\left( 1 - \frac{e^{-Ts}}{s + 1} \cdot \frac{s + 1}{0,05s + 1} \cdot \frac{\alpha s + 1}{\varepsilon s + 1} \right)_{s=-1} = 0$$

$$\left( 1 - \frac{(-\alpha + 1)e^T}{0,95(\varepsilon s + 1)} \right) = 0$$

dengan harga  $\varepsilon = 0,05$  dan  $T = 0,2$  memberikan  $\alpha = 0,261$ . sehingga persamaan  $q_d(s)$  adalah:

$$q_d(s) = \frac{(0,668s + 1)}{(0,05s + 1)}$$

Dari perhitungan di atas diperoleh fungsi alih  $q_d(s)$  pada berbagai harga  $\varepsilon$  dan waktu tunda, T.

$$1) \quad \text{Untuk } \varepsilon = 0,05 \text{ dan } T = 0,2 \quad (3,39) \\ \dots \dots (0,261s + 1) \\ q_d(s) = \frac{\dots \dots (0,261s + 1)}{(0,05s + 1)} \quad (51)$$

- 2) Untuk  $\varepsilon = 0,05$  dan  $T = 0,5$

$$q_d(s) = \frac{(0,4526 s + 1)}{(0,05 s + 1)} \quad (52)$$

3) Untuk  $\varepsilon = 0,1$  dan  $T = 0,2$

$$q_d(s) = \frac{(0,337 s + 1)}{(0,1 s + 1)} \quad (53)$$

4) Untuk  $\varepsilon = 0,1$  dan  $T = 0,5$

$$q_d(s) = \frac{(0,5087 s + 1)}{(0,1 s + 1)} \quad (54)$$

5) Untuk  $\varepsilon = 0,2$  dan  $T = 0,2$

$$q_d(s) = \frac{(0,476 s + 1)}{(0,2 s + 1)} \quad (55)$$

6) Untuk  $\varepsilon = 0,2$  dan  $T = 0,2$

$$q_d(s) = \frac{(0,6118 s + 1)}{(0,2 s + 1)} \quad (56)$$

Setelah dirancang fungsi alih pengontrol pada IMC orde 2, selanjutnya dihitung fungsi alih antara keluaran dan gangguan  $d(s)$ . Fungsi alih keluaran-gangguan yang telah diberikan sebelumnya dirumuskan sebagai berikut:

$$y(s) = (1 - \tilde{p}(s)q_d(s,\varepsilon))p_d(s)d(s)$$

Untuk  $p(s) = \tilde{p}(s) = p_d(s) = \tilde{p}_d(s) = \frac{1}{s+1} e^{-Ts}$  maka dapat dihitung fungsi alih  $y(s)/d(s)$  pada berbagai harga  $\varepsilon$  dan  $T$ . Untuk harga  $\varepsilon = 0,05$ ,  $T = 0,2$  maka

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \frac{e^{-0,2s}}{s+1} - \frac{e^{-0,4s}(0,261s+1)}{(s+1)(0,05s+1)^2} \quad (57)$$

Dengan menggunakan pendekatan pada orde pertama dan kedua untuk waktu tunda pada persamaan (57), fungsi alih keluaran-gangguan sistem IMC orde 2 pada berbagai harga  $\varepsilon$  dan  $T$  dapat dirumuskan sebagai berikut:

1) untuk  $\varepsilon = 0,05$  dan  $T = 0,2$ :

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \left(1 - \frac{e^{-0,2s}(0,261s+1)}{(0,05s+1)^2}\right) \frac{e^{-0,2s}}{s+1} \quad (58)$$

2) untuk  $\varepsilon = 0,05$  dan  $T = 0,5$

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \left(1 - \frac{e^{-0,5s}(0,4526s+1)}{(0,05s+1)^2}\right) \frac{e^{-0,5s}}{s+1} \quad (59)$$

3) untuk  $\varepsilon = 0,1$  dan  $T = 0,2$ :

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \left(1 - \frac{e^{-0,2s}(0,337s+1)}{(0,1s+1)^2}\right) \frac{e^{-0,2s}}{s+1} \quad (60)$$

4) untuk  $\varepsilon = 0,1$  dan  $T = 0,5$

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \left(1 - \frac{e^{-0,5s}(0,5087s+1)}{(0,1s+1)^2}\right) \frac{e^{-0,5s}}{s+1} \quad (61)$$

5) untuk  $\varepsilon = 0,2$  dan  $T = 0,2$

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \left(1 - \frac{e^{-0,2s}(0,476s+1)}{(0,2s+1)^2}\right) \frac{e^{-0,2s}}{s+1} \quad (62)$$

6) untuk  $\varepsilon = 0,2$  dan  $T = 0,5$

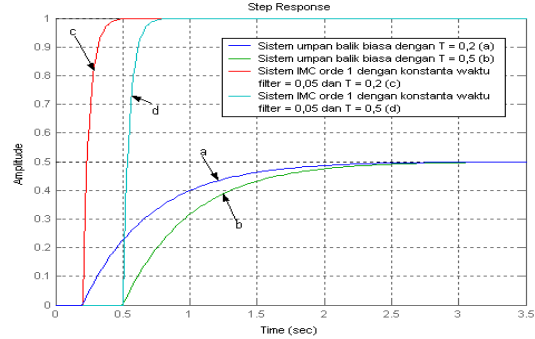
$$\frac{y(s)}{d(s)} = \left(1 - \frac{e^{-0,5s}(0,6118s+1)}{(0,2s+1)^2}\right) \frac{e^{-0,5s}}{s+1} \quad (63)$$

## IV. PENGUJIAN DAN ANALISA

### 4.1 Pengujian dan Analisa pada IMC orde 1

Pada pengujian persamaan yang telah diperoleh pada perancangan disimulasikan menggunakan perangkat lunak Matlab 6.5 .

Berikut adalah grafik perbandingan antara respons sistem IMC orde 1 dan sistem umpan balik tanpa adanya gangguan yang masuk pada keluaran. Terbukti bahwa sistem IMC memberikan respon yang paling cepat daripada sistem umpan balik biasa

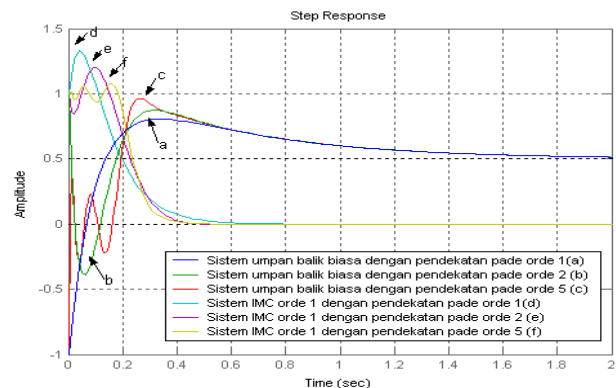


Gambar 5 Perbandingan respon sistem IMC orde 1 dengan  $\varepsilon = 0,05$ ,  $T = 0,5$  dengan sistem umpan balik biasa terhadap gangguan step

Karakteristik respon antara IMC orde 1 dan sistem umpan balik dapat diamati pada tabel 1

Tabel 1 Perbandingan karakteristik respon IMC orde 1 dan sistem umpan balik

Karakteristik Respon	Sistem Umpan Balik biasa		IMC orde 1 dengan $\varepsilon=0,05$	
	T = 0,2	T = 0,5	T = 0,2	T = 0,5
Settling time	2,16	2,46	0,396	0,696
Rise time	1,1	1,1	0,11	0,11
Harga akhir	0,5	0,5	1	1



Gambar 6 Perbandingan respon sistem IMC orde 1 dengan  $\varepsilon = 0,05$ ,  $T = 0,2$  dengan sistem umpan balik biasa terhadap gangguan step.

Dengan memberikan gangguan step pada sistem umpan balik biasa dapat dibuat perbandingan karakteristik respon sistem IMC orde 1 dan sistem umpan balik

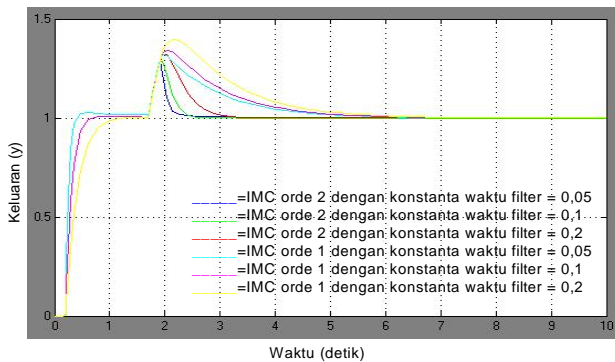
Secara umum, *settling time* sistem IMC orde 1 terhadap gangguan *step* pada variasi harga  $\varepsilon$  lebih cepat daripada sistem umpan balik biasa. Ini menunjukkan sistem IMC orde 1 memberikan respon yang lebih baik daripada sistem umpan balik.

Tabel 2 Pebandingan karakteristik respon IMC orde 1 dan sistem umpan balik terhadap gangguan *step*.

Karakteristik	Orde pada	Sistem IMC orde 1						Sistem umpan Balik	
		e=0,05		e=0,1		e=0,2		T=0,2	T=0,5
		T=0,2	T=0,5	T=0,2	T=0,5	T=0,2	T=0,5		
Peak Response	1	1,33	1,52	1,21	1,38	1,12	1,25	-1	-1
	2	1,2	1,32	1,12	1,23	1,07	1,14	1	1
	5	1,08	1,15	1,04	1,09	1,02	1,05	-1	-1
Waktu peak response (detik)	1	0,0387	0,069	0,0512	0,096	0,055	0,124	0	0
	2	0,0973	0,202	0,105	0,23	0,11	0,254	0	0
	5	0,157	0,379	0,161	0,392	0,159	0,398	0	0
Settling time (detik)	1	0,501	1,1	0,634	1,2	0,978	1,44	1,61	1,93
	2	0,405	0,846	0,576	0,948	0,969	1,25	1,87	2,16
	5	0,394	0,686	0,588	0,876	0,978	1,27	1,61	1,91
Rise time (detik)	1	0,242	0,552	0,315	0,58	0,5	0,707	0,102	0,25
	2	0,33	0,713	0,251	0,785	0,455	0,95	0,0085	0,018
	5	0,117	0,593	0,226	0,246	0,44	0,45	0,0095	0,024

**Pengujian pada IMC orde 1 dan 2 menggunakan simulink**

Pengujian ini dilakukan menggunakan fasilitas simulink yang terdapat pada perangkat lunak Matlab 6.5. Sedang pengujian sebelumnya menggunakan perintah-perintah yang diketik melalui *command window* Matlab 6.5



Gambar 7 Respon sistem IMC orde 2 dengan T=0,5 detik dengan gangguan *step* yang masuk melalui suatu proses  
Tabel 3 Pebandingan karakteristik respon IMC orde 1 dan IMC orde 2 terhadap gangguan yang masuk melalui suatu proses.

Sistem IMC	Waktu mati (T),	Orde pada	Karakteristik Respon		
			Peak response	Waktu Peak response	Settling time

IMC Orde	Filter Constant	Order	Response Characteristics				
			Peak Response	Waktu Peak Response	Settling Time	Other	
IMC Orde 1	0,05	0,2	1	0,183	0,521	4,56	
			2	0,2	0,5	4,47	
		0,5	1	0,32	0,98	5,28	
			2	0,369	1,05	5,11	
		0,1	0,2	1	0,212	0,608	4,64
				2	0,225	0,558	4,58
	0,5		1	0,343	1,02	5,33	
			2	0,391	1,1	5,17	
	0,2		0,2	1	0,257	0,681	4,83
				2	0,264	0,674	4,8
		0,5	1	0,385	1,12	5,46	
			2	0,423	1,19	5,33	
IMC orde 2		0,05	0,2	1	0,132	0,27	0,911
				2	0,161	0,358	0,747
	0,5		1	0,239	0,502	2,12	
			2	0,314	0,767	1,52	
	0,1		0,2	1	0,156	0,346	1,14
				2	0,179	0,42	1,02
		0,5	1	0,275	0,618	2,24	
			2	0,344	0,858	1,69	
		0,2	0,2	1	0,194	0,475	1,72
				2	0,21	0,497	1,67
	0,5		1	0,32	0,801	2,61	
			2	0,374	0,983	2,23	

Gambar 7 adalah grafik perbandingan respon antara sistem IMC orde 1 dan 2 terhadap gangguan *step* yang masuk melalui suatu proses. Terlihat bahwa sistem IMC orde 2 memberikan respon yang lebih baik daripada sistem IMC orde 1, dan sistem IMC orde 2 dengan konstanta waktu filter 0,05 memberikan respon yang paling cepat daripada dengan konstanta waktu filter 0,1 dan 0,2.

Keseluruhan percobaan baik melalui *command window* biasa maupun simulink memberikan hasil yang sama untuk tiap-tiap sub percobaan. Sistem IMC orde 2 memberikan hasil yang jauh lebih baik daripada sistem IMC orde 1 saat ada gangguan masuk melalui suatu proses.

**V. PENUTUP**

**5.1 Kesimpulan**

Dari hasil pengujian dan analisa terhadap sistem IMC orde 1, sistem IMC orde 2 dan sistem umpan balik biasa terhadap masukan *step*, *impulse*, gangguan *step*, gangguan *impulse*, gangguan *step* yang melalui proses, dan gangguan *impulse* yang melalui proses pada berbagai harga waktu mati dan pendekatan pada dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil pengujian dengan memberikan masukan *step* pada fungsi alih sistem umpan balik biasa dan sistem IMC orde 1 menunjukkan bahwa:

- a. Sistem IMC orde 1 memberikan respon yang lebih cepat daripada sistem umpan balik biasa untuk masukan *step* maupun *impulse*. Ini ditunjukkan dengan kecilnya harga *settling time* dan *rise time*.
- b. Semakin besar waktu mati, maka semakin lama sistem mencapai harga akhir yang diinginkan.
2. Hasil pengujian dengan memberikan gangguan *step* dan *impulse* pada fungsi alih gangguan-keluaran sistem umpan balik biasa dan sistem IMC orde 1 dengan menggunakan pendekatan pada orde 1, 2 dan 5 untuk waktu mati menunjukkan bahwa:
  - a. Untuk gangguan *step*, IMC orde 1 memberikan respon yang lebih cepat dibandingkan dengan sistem umpan balik biasa dengan kecilnya harga *settling time*.
  - b. Besarnya *rise time* untuk gangguan *step* pada sistem umpan balik semakin kecil (cepat) dengan bertambahnya orde pendekatan pada yang digunakan.
  - c. Sistem umpan balik dengan gangguan *impulse* memberikan respon yang lebih baik daripada sistem IMC orde 1, dengan besarnya *settling time* lebih kecil daripada *settling time* sistem IMC orde 1, dan semakin cepat untuk orde pendekatan pada yang semakin tinggi.
  - d. Semakin besar orde pendekatan, semakin kecil harga *settling time* dan *rise time*, namun semakin besar waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *peak response*.
3. Hasil pengujian dengan memberikan gangguan *step* dan *impulse* yang melalui suatu proses pada fungsi alih gangguan-keluaran sistem IMC orde 1 dan 2 dengan menggunakan pendekatan pada orde 1, 2 dan 5 untuk waktu mati menunjukkan bahwa respon sistem IMC orde 2 terhadap gangguan yang melalui suatu proses lebih cepat dibandingkan dengan sistem IMC orde 1 baik untuk gangguan *step* maupun gangguan *impulse* yang masuk melalui suatu proses.
4. Secara umum, pada IMC orde 1 dan IMC orde 2, dengan harga konstanta waktu filter 0,05 (faktor penguatan derau 20) sistem memberikan hasil yang paling baik untuk semua masukan dibandingkan dengan digunakannya konstanta waktu filter 0,1 dan 0,2.
5. Semakin besar waktu mati semakin lama sistem mencapai harga yang diinginkan.

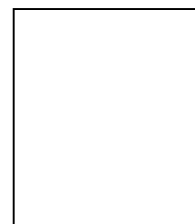
## 5.2 Saran

1. Kebanyakan komponen kontrol seperti valve, pompa, dan lainnya mempunyai batas (*constraints*) yang tidak dapat dilewati. Hal ini dapat mengurangi kecepatan respon suatu sistem pengontrol. Untuk mengatasi hal ini dapat digunakan implementasi dari Model State Feedback (MSF) terhadap sistem IMC orde 1 dan 2.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Brosilow, Coleman, Babu Joseph, *Techniques of Model Based Control*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 2002
- [2] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik*, Diterjemahkan oleh Edi Leksono, Jilid 1, Edisi kedua, Erlangga, Jakarta, 1996.
- [3] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)*, Diterjemahkan oleh Edi Leksono, Jilid 2, Erlangga, Jakarta, 1993.
- [4] Hartanto, Thomas Wahyu Dwi, Y. Wahyu Agung Prasetyo, *Analisis dan Desain Sistem Kontrol dengan MATLAB*, ANDI, Yogyakarta, 2003.
- [5] Bequette, B. Wayne, *Process Control : Modelling, Design and Simulation*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 1998.
- [6] Emmanuel, Pericles, Edward Leff, *Introduction to Feedback Control Systems*, McGraw-Hill Kogakusha, LTD., Tokyo, 1976.
- [7] Lewin, Daniel R., *Lecture 3: IMC Design Principles*, Department of Chemical Engineering Technion, Israel.
- [8] Coughanowr, Donald R, *Process Systems Analysis and Control*, 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill, New York, 1991.
- [9] Holman, J.P, *Perpindahan Kalor*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1997.

## BIODATA MAHASISWA



**Asana Kusnadi**

(L2F 002 560)

Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang, dengan pilihan konsentrasi Kontrol.

Mengetahui/Mengesahkan,

Pembimbing I

Pembimbing II

**Sumardi, ST. MT.**  
NIP. 132 125 670

**Iwan Setiawan, ST. MT.**  
NIP. 132 283 18