

# ANALISA RESPON PENGENDALI FEEDFORWARD DAN PID PADA PENGENDALIAN TEMPERATUR HEAT EXCHANGER

Djulil Amri<sup>1\*</sup>, Bhakti Yudho Suprpto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro Universitas Sriwijaya

\*E-mail : amfz\_07@yahoo.co.id

**Abstrak** - Penentuan fungsi transfer bagi suatu proses seperti Heat Exchanger adalah merupakan suatu hal yang mutlak diperlukan. Hal ini dikarenakan melalui fungsi transfer tersebut dinamika suatu proses akan dapat terlihat dengan jelas. Ketepatan penurunan fungsi transfer akan sangat mempengaruhi pemodelan yang akan dibuat dan sistem pengendalian yang akan digunakan pada pemrosesan tersebut. Pada sistem Heat Exchanger, pemodelan yang digunakan adalah pemodelan orde satu dengan waktu tunda. Sedangkan pengendali yang digunakan adalah pengendali PID dan pengendali Feedforward. Pengendali PID adalah pengendali digunakan untuk menjaga stabilitas sistem terhadap perubahan masukan yang terjadi dan pengendali feedforward digunakan mengantisipasi gangguan yang masuk, sehingga response keluaran dari proses Heat Exchanger tetap terjaga dengan baik.

**Kata kunci:** Feedforward, Heat Exchanger, PID

**Abstract**— Determination of the transfer function for a process like Heat Exchangers is a thing that is absolutely necessary. This is because the transfer function through the dynamics of the process can be seen clearly. The accuracy of the transfer function decline will greatly affect the modeling and control system will be created that will be used in the processing. In Heat Exchanger system, modeling is modeling the use of first order with time delay. While the controller is used Feedforward PID controllers and controllers. PID controller is used to maintain the stability control system to changes that occur input and feedforward controllers are used to anticipate the incoming disturbance, so that the output response of the heat exchanger is well maintained.

**Keywords.** Feedforward, Heat Exchanger, PID

## I. PENDAHULUAN

Heat Exchanger yang merupakan suatu peralatan proses yang cukup vital, yang banyak digunakan di dunia industri, tidak akan dapat menghasilkan response keluaran yang sesuai dengan nilai yang ditetapkan, terhadap masukan yang terjadi, jika tidak dilengkapi dengan komponen pengendali.

Hal ini disebabkan karena didalam sebuah proses seperti Heat Exchanger tersebut, terdapat variabel – variabel dari parameter internal sistem yang dapat berubah, sehingga menyebabkan response keluaran terdeviasi dari nilai yang diinginkan.[2]

Untuk membuat suatu komponen pengendali yang baik bagi suatu sistem proses seperti Heat Exchanger tersebut, maka pertama kali harus diketahui terlebih dahulu karakteristik proses dari sistem yang bersangkutan.

Yang dimaksud dengan karakteristik proses disini adalah fungsi alih dari sistem. Fungsi Alih berguna untuk melakukan analisa dinamik dan perancangan sistem pengendali[1]

Ada beberapa cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan fungsi alih dari sebuah sistem atau proses, diantaranya :[3]

- Secara teoritikal, dimana fungsi alih diturunkan dari prinsip prinsip dasar kimia dan fisika.
- Secara empiris, dimana fungsi alih diturunkan berdasarkan pengujian dinamik dari proses sistem yang bersangkutan.
- Secara semiempiris, dimana fungsi tranfer diturunkan menggunakan kompromi dari dua pendekatan tersebut diatas.

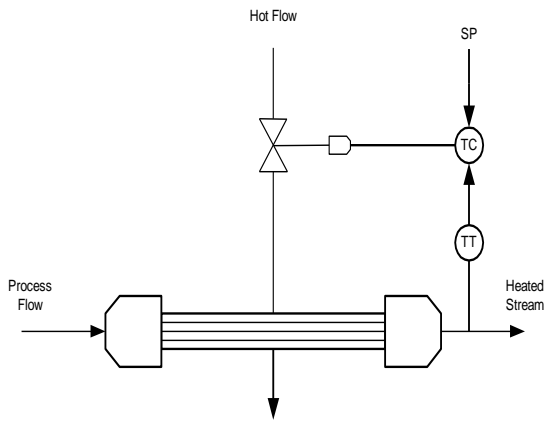
Setelah didapatkan fungsi alih dari proses yang ada, maka langkah selanjutnya adalah menentukan model dari proses tersebut. Pemodelan dari proses adalah merupakan langkah berikutnya yang cukup penting, karena berdasarkan parameter – parameter dari model yang diperoleh, maka dapat ditetapkan parameter – parameter pengendalian, dimana sebelumnya sudah ditetapkan terlebih dahulu bentuk pengendalian yang akan digunakan seperti pengendali umpan balik PID.

Setelah semua langkah – langkah penetapan fungsi alih, model dan pengendali dari proses tersebut dilakukan dengan baik, maka langkah yang

terakhir adalah melakukan simulasi dari sistem secara keseluruhan untuk melihat tanggapan

## II. PEMODELAN HEAT EXCHANGER

Dinamika proses pada sebuah Heat Exchanger sangat ditentukan oleh parameter – parameter internal yang dimiliki oleh peralatan dari Heat Exchanger yang bersangkutan, disamping adanya gangguan – gangguan dari luar yang terjadi pada proses. Pada gambar 1 berikut ini, diperlihatkan sebuah konfigurasi sistem pengendalian Heat Exchanger.



Gambar 1. Sistem pengendalian Heat Exchanger[1]

Dari gambar 1 tersebut dapat dilihat bahwa, sistem Heat Exchanger pada dasarnya terdiri dari dua masukan yaitu fluida panas (fluida primer) dan fluida dingin (fluida sekunder) dengan keluaran berupa fluida dingin yang telah dipanaskan.

Untuk mengetahui bentuk respon temperatur keluaran fluida dingin yang dipanaskan terhadap perubahan fluida panas, maka secara analitik fungsi alih sistem yaitu perbandingan temperatur keluaran fluida dengan temperatur fluida primer dapat dicari dan menganggap bahwa kondisi tunak tidak terjadi rambatan konduksi axial, serta variabel – variabel lainnya berupa tekanan dan aliran fluida dibuat konstan.

Bentuk persamaan kesetimbangan energi pada pertukaran panas antara fluida yang dipanaskan dengan dinding pipa bagian dalam adalah : [1]

$$M_f c_f \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} \right) + F c_f \left( \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = h_1 A_1 (T_d - T_f) \quad (1)$$

dimana :

$M_f$  adalah massa fluida yang dipanaskan per feet dengan satuan lb/ft.

$c_f$  adalah koefisien panas dari fluida (Btu/lb  $^{\circ}$ F).

keluaran proses terhadap perubahan masukan yang terjadi.

$T_f$  adalah temperatur fluida yang dipanaskan ( $^{\circ}$ F)

$F$  adalah flow dari fluida yang dipanaskan (lb/sec)

$h_1$  adalah koefisien rambat panas pipa bagian dalam (Btu/sec  $ft^2$   $^{\circ}$ F)

$A_1$  adalah luas perpindahan panas pada dinding pipa bagian dalam per feet ( $ft^2/ft$ )

Jika fluida yang dipanaskan adalah air ( $\rho = 1$ ) maka  $F = v V_f = v M_f$ , dengan  $v$  adalah kecepatan aliran fluida di dalam pipa (ft/sec), sehingga persamaan (1) tersebut diatas menjadi :

$$M_f c_f \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} \right) + v M_f c_f \left( \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = h_1 A_1 (T_d - T_f) \quad (2)$$

dimana  $\tau_1 = \frac{M_f c_f}{h_1 A_1}$  adalah konstanta waktu

rambatan panas antara fluida dengan dinding pipa, sehingga persamaan (2) menjadi :

$$\tau_1 \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} \right) + v \tau_1 \left( \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = T_d - T_f \quad (3)$$

$$\tau_1 \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} \right) + v \tau_1 \left( \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + T_f = T_d$$

Kemudian tinjauan persamaan kesetimbangan energi antara dinding pipa konduksi dengan media pemanasnya adalah: [1]

$$M_d c_d \left( \frac{\partial T_d}{\partial x} \right) = h_2 A_2 (T_s - T_d) - h_1 A_1 (T_d - T_f) \quad (4)$$

dimana :

$T_s$  adalah temperatur masukan air panas ( $^{\circ}$ F)

$T_d$  adalah temperatur dinding pipa konduksi ( $^{\circ}$ F)

$M_d c_d$  adalah kapasitas panas dinding pipa (BTU /  $^{\circ}$ F.ft)

$h_2$  adalah koefisien rambat panas pada pipa bagian luar (BTU/sec  $ft^2$   $^{\circ}$ F)

$A_2$  adalah luas perpindahan panas pada pipa bagian luar setiap feet ( $ft^2/ft$ )

Karena konstanta waktu rambat panas antara dinding pipa dengan media pemanasnya adalah :

$$\tau_2 = \frac{M_d c_d}{h_2 A_2} \quad (5)$$

dan konstanta waktu rambat panas total antara fluida sekunder dengan fluida primer adalah :

$$\tau_{12} = \frac{M_d c_d}{h_1 A_1} \quad (6)$$

maka persamaan (6) dapat diubah menjadi:

$$\tau_2 \left( \frac{\partial T_d}{\partial t} \right) = T_s + \frac{\tau_2}{\tau_{12}} T_f - T_d \left( 1 + \frac{\tau_2}{\tau_{12}} \right) \quad (7)$$

Selanjutnya  $T_d$  pada persamaan (3) dapat disubsitusikan kedalam persamaan (7) akan menghasilkan :

$$\tau_2 \frac{\partial T_d}{\partial t} + \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_{12}}\right) \left[ \tau_1 \frac{\partial T_f}{\partial t} + v \tau_1 \frac{\partial T_f}{\partial x} \right] = T_s - T_f \quad (8)$$

Pada kenyataannya, temperatur dinding pipa konduksi ( $T_d$ ) merupakan variable proses yang sulit diukur, karena itu  $\delta T_d / \delta t$  pada persamaan (8) harus dieliminir, yaitu dengan mengubah persamaan (3) kedalam persamaan differensial fungsi waktu.

$$\frac{\partial T_d}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \tau_1 \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} \right) + v \tau_1 \left( \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + T_f \right] \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_d}{\partial t} = \left[ \tau_1 \left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) + v \tau_1 \left( \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \right] T_f \quad (10)$$

Kemudian dengan memasukkan persamaan (10) kedalam persamaan (8) maka diperoleh :

$$T_f \left[ \tau_1 \tau_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + v \tau_1 \tau_2 \frac{\partial^2}{\partial t \partial x} + \tau_2 \frac{\partial}{\partial t} \right] + \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_{12}}\right) \left[ \tau_1 \frac{\partial T_f}{\partial t} + v \tau_1 \frac{\partial T_f}{\partial x} \right] = (T_s - T_f) \quad (11)$$

Dengan menganggap factor faktor lain sebagai factor tetap, maka dianggap  $\delta t = dt$ , sehingga variabel kecepatan fluida didalam pipa ( $v$ ) pada persamaan (12) dapat dieliminir dan bentuk persamaannya menjadi :

$$T_f \left[ \left[ 2\tau_1 \tau_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] + \left( \tau_2 + 2\tau_1 \left(1 + \frac{\tau_1}{\tau_{12}}\right) \right) \frac{\partial}{\partial t} + 1 \right] = T_s \quad (12)$$

Kemudian dengan menggunakan transformasi Laplace maka persamaan (13) dapat diubah menjadi :

$$T_f \left[ \left[ 2\tau_1 \tau_2 S^2 \right] + \left( \tau_2 + 2\tau_1 \left(1 + \frac{\tau_1}{\tau_{12}}\right) \right) S + 1 \right] = T_s(s) \quad (13)$$

$$\frac{T_f(s)}{T_s(s)} = \frac{1}{T_f \left[ \left[ 2\tau_1 \tau_2 S^2 \right] + \left( \tau_2 + 2\tau_1 \left(1 + \frac{\tau_1}{\tau_{12}}\right) \right) S + 1 \right]} \quad (14)$$

Persamaan (14) diatas adalah merupakan fungsi alih antara keluaran dan masukan dari unit Heat Exchanger yang mempunyai orde 2 dengan konstanta waktu proses  $\tau_1$  dan  $\tau_2$ , dimana besarnya  $\tau_{12} = \tau_1 + \tau_2$ . fungsi alih antara temperatur keluaran dan temperatur masukan Heat Exchanger yang terdapat pada persamaan (14) yang juga merupakan fungsi alih orde dua dapat juga diwakilkan dengan fungsi alih orde satu.

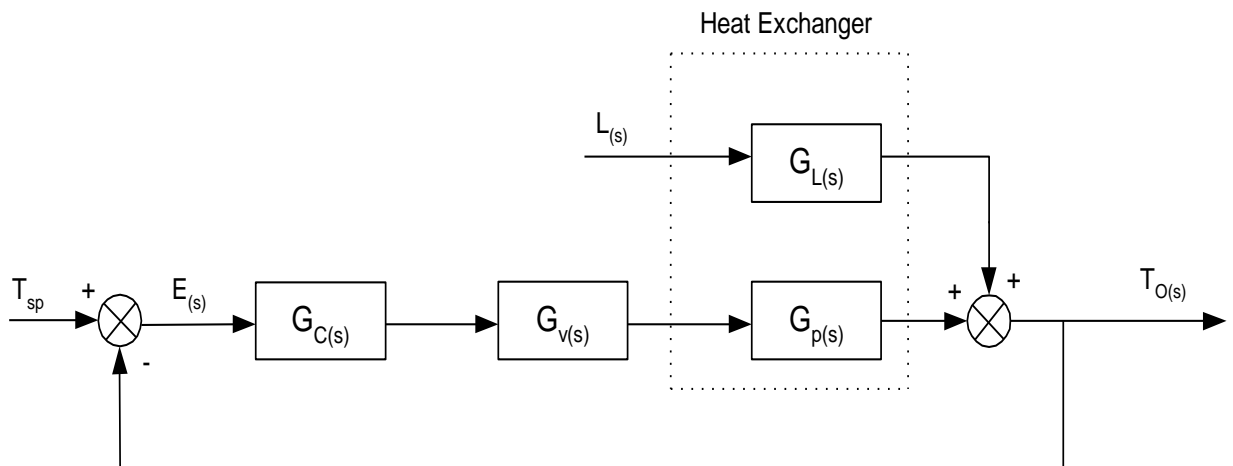
Untuk proses yang lambat seperti Heat Exchanger, maka pemodelannya dapat diwakili dengan pemodelan orde satu dengan waktu tunda (first order plus dead time).[3],[4],[7]

#### A. Diagram Blok

Untuk sistem yang lambat seperti Heat Exchanger, maka untuk mencapai kondisi stabil memerlukan waktu tertentu, yang biasanya disebut konstanta waktu proses efektif (the effective process time constant), yang biasanya relatif cukup besar[1],[2].

Untuk mengatasi kendala – kendala dasar tersebut maka diperlukannya suatu proses pengendalian. Gambar 2 dibawah ini adalah penggambaran dari blok diagram sederhana pengendalian Heat Exchanger.

Dari blok diagram tersebut terlihat bahwa sistem Heat Exchanger diwakili oleh dua blok proses yaitu  $G_{p(s)}$  yang mewakili proses pertukaran panas antara fluida primer dan fluida sekunder, sedangkan  $G_{L(s)}$  adalah mewakili proses gangguan seperti perubahan dari debit fluida sekunder. Sedangkan blok proses lainnya adalah  $G_{v(s)}$  yang mewakili fungsi valve dan  $G_{c(s)}$  yang mewakili fungsi pengendali umpan balik.



Gambar 2. Diagram blok sederhana pengendalian Heat Exchanger[1]

Berdasarkan gambar 2 tersebut, maka dapat dituliskan persamaan dasarnya :

$$T_{o(s)} = G_{p(s)}G_{c(s)}G_{v(s)}(T_{sp(s)} - T_{o(s)}) + G_{L(s)}L_{c(s)} \quad (15)$$

Untuk  $L(s) = 0$ , yang berarti tidak ada gangguan yang masuk, maka persamaan (15) tersebut diatas menjadi :

$$\frac{T_{o(s)}}{T_{sp(s)}} = \frac{G_{p(s)}G_{c(s)}G_{v(s)}}{1 + G_{p(s)}G_{c(s)}G_{v(s)}} \quad (16)$$

Persamaan (16) adalah menggambarkan perbandingan antara temperatur keluaran dan temperatur masukan, yang merupakan bentuk persamaan umpan balik. Pada persamaan tersebut terlihat bahwa yang memegang peranan penting adalah fungsi  $G_{c(sp)}$  yang merupakan fungsi dari pengendali umpan balik. Fungsi  $G_{c(sp)}$  disini akan dilakukan oleh pengendali PID.

### B. Pengendali PID

Pengendali jenis PID mempunyai kehandalan yang cukup baik, sehingga pengendali jenis ini masih banyak digunakan di dunia industri. Bentuk keluaran PID dapat dinyatakan sebagai berikut [1],[3],[5] :

$$G_{c(t)} = K_c e_{(t)} + \frac{K_c}{\tau_I} \int e_{(t)} dt + K_c \tau_D \frac{de_{(t)}}{dt} \quad (17)$$

dimana :  $K_c$  adalah *controller gain*

$\tau_I$  adalah *integral (reset) time*

$\tau_D$  adalah *derivative (rate) time*

$e_{(t)} = T_{sp(t)} - T_{o(t)}$  adalah selisih antara set point dengan nilai keluaran.

Dengan menggunakan transformasi Laplace, maka persamaan (17) dapat diubah menjadi :

$$G_{C(s)} = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad (18)$$

Ketiga variabel pengendali yang ada pada pengendali PID tersebut adalah  $K_c$ ,  $\tau_I$  dan  $\tau_D$ . Sebelum melakukan penalaan terhadap ketiga parameter pengendalian tersebut, maka harus didapatkan terlebih dahulu model dari proses yang akan dikendalikan. Untuk mendapatkan model dari proses tersebut, maka akan dilakukan terlebih dahulu process step testing, yang biasa dikenal dengan nama process reaction curve.[1]

Seperti yang diketengahkan oleh Paul W Murril dan Cecil L Smith, bahwa penalaan Quarter Decay Ratio yang telah

diperkenalkan oleh Zeigler – Nichols pada pengendali PID belumlah menunjukkan kriteria unjuk kerja tanggapan keluaran yang terbaik. [6]

Adapun beberapa kriteria ukuran yang dapat digunakan dalam pemilihan metoda penalaan parameter pengendali diantaranya :[7]

- Maksimum error yang terjadi haruslah sekecil mungkin.
- Settling / rise time yang secepat mungkin.
- Meminimalkan integral error yang terjadi sampai keluaran proses mencapai nilai yang telah ditetapkan.

Metoda error integral yang akan digunakan adalah Integral of the Time weighted Absolute Error (ITAE), dimana :

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (19)$$

### C. Pengendali Feedforward

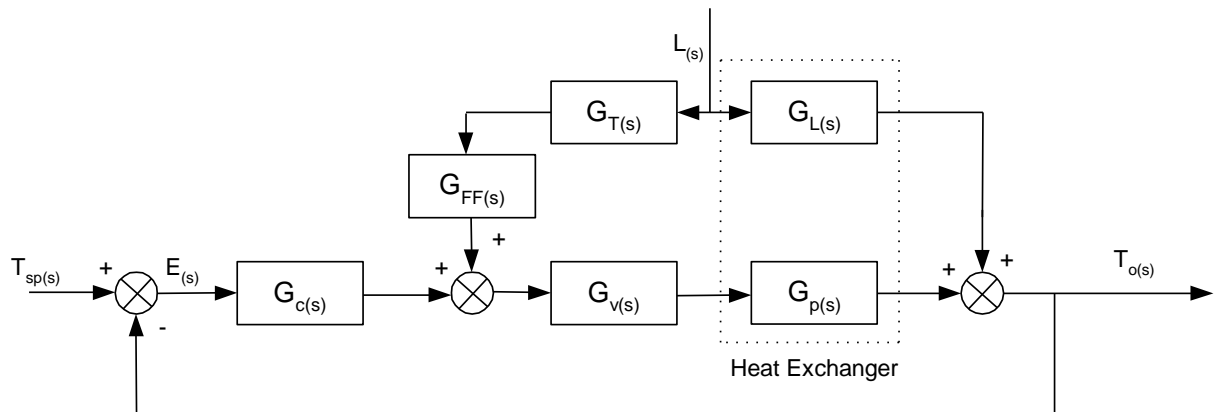
Dan jika dilihat kembali persamaan (16), dimana  $T_{sp(s)} = 0$ , maka kita akan mendapatkan persamaan :

$$\frac{T_{o(s)}}{L_{c(s)}} = \frac{G_{L(s)}}{1 + G_{p(s)}G_{c(s)}G_{v(s)}} \quad (20)$$

yang merupakan perbandingan antara fungsi keluaran dan fungsi gangguan. Dari persamaan tersebut, terlihat bahwa masukan gangguan dari  $L_{c(s)}$  akan dapat langsung mempengaruhi sistem Heat Exchanger melalui fungsi  $G_{L(s)}$ , tanpa dapat diantisipasi dengan baik oleh pengendali PID dalam hal ini adalah fungsi dari  $G_{c(s)}$ , sebelum pengaruh dari gangguan tersebut mempengaruhi keluaran sistem.

Untuk itu, dipergunakanlah pengendali tambahan yang berupa pengendali Feed forward untuk mengkoreksi terjadinya gangguan tersebut sehingga tidak mengganggu sistem Heat Exchanger secara keseluruhan.

Sistem pengendali Feedforward yang akan digunakan pada pengendalian sistem Heat Exchanger tersebut dapat dilihat pada gambar 3. berikut ini.



Gambar 3. Sistem pengendalian Feedback dan Feedforward.[2]

Dari gambar 3. tersebut diatas, maka persamaan (15) dapat ditulis kembali :

$$T_{o(s)} = G_{p(s)} G_{c(s)} G_{v(s)} (T_{sp(s)} - T_{o(s)}) + L_{(s)} (G_{L(s)} + G_{T(s)} G_{FF(s)} G_{v(s)} G_{p(s)}) \quad (21)$$

dimana  $G_{T(s)}$  adalah merupakan fungsi peralatan pengukur gangguan (sensor measuring disturbance) dan  $G_{FF(s)}$  adalah merupakan pengendali Feedforward.

Dari persamaan (20) tersebut diatas, dimana  $T_{sp(s)} = 0$ , maka kita akan mendapatkan persamaan :

$$\frac{T_{o(s)}}{L_{(s)}} = \frac{G_{L(s)} + G_{p(s)} G_{FF(s)} G_{v(s)} G_{T(s)}}{1 + G_{p(s)} G_{c(s)} G_{v(s)}} \quad (22)$$

yang merupakan perbandingan antara fungsi keluaran dan fungsi gangguan. Dan pengendali yang digunakan untuk mengeliminir efek dari gangguan, adalah :

$$G_{L(s)} + G_{p(s)} G_{FF(s)} G_{v(s)} G_{T(s)} = 0 \quad (23)$$

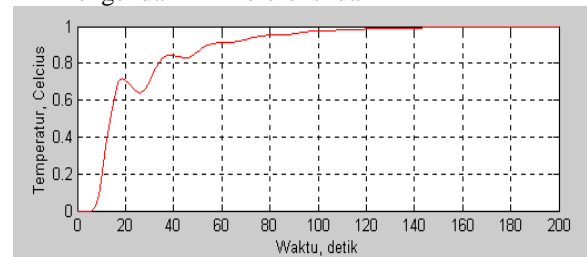
$$G_{FF(s)} = - \frac{G_{L(s)}}{G_{T(s)} G_{v(s)} G_{p(s)}} \quad (24)$$

Dengan adanya  $G_{FF(s)}$  (pengendali Feedforward), maka diharapkan gangguan yang masuk dapat dieliminir seminimal mungkin, sehingga tidak mengganggu keluaran proses.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

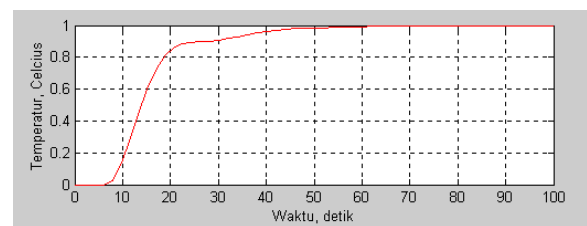
Setelah didapatkan model pada *Heat Exchanger* ini, dilakukan simulasi yang membandingkan antara PID dengan ITAE dan pengendali gabungan (PID dan Feedforward) kemudian didapatkan hasil yaitu :

- Pengendali PID referensi dan PID ITAE



Gambar 4 Respon Keluaran dengan PID Referensi

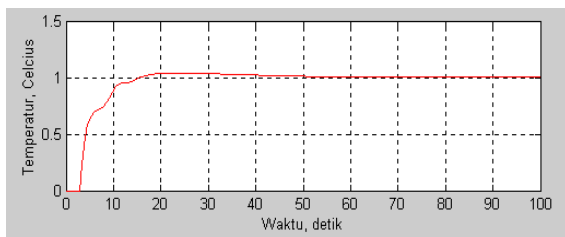
Pada pengendali PID ini dapat dilihat pada gambar 4 bahwa respon telah beresilasi sebelum mencapai nilai set point. Settling time mencapai 160 sec.



Gambar 5 Respon Keluaran dengan PID ITAE

Pada pengendali PID yang menggunakan metode ITAE pada gambar 5 dapat dilihat bahwa respon keluaran tidak beresilasi saat mendekati nilai set point kemudian nilai settling time mencapai 80 sec, sehingga jika dibandingkan keduanya maka dapat dikatakan bahwa pengendali PID dengan metode ITAE memberikan respon keluaran lebih baik.

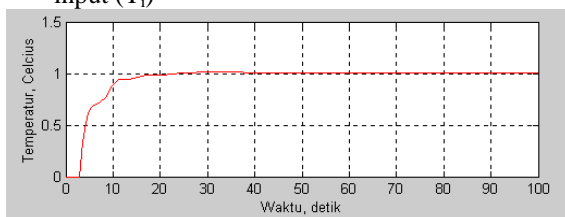
- Pengujian Pengendali PID ITAE terhadap gangguan perubahan set point dan Temperatur input



Gambar 6 Respon Keluaran dengan PID ITAE

Pada gambar terlihat bahwa masih terjadi *overshoot* dan settling time yang terjadi yaitu 80 sec

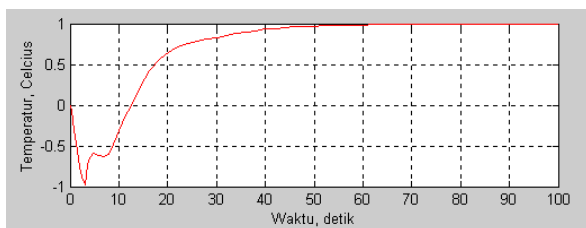
- Pengujian Pengendali Gabungan terhadap gangguan perubahan set point dan Temperatur input ( $T_i$ )



Gambar 7 Respon Keluaran dengan PID Gabungan

Pada gambar terlihat bahwa masih terjadi *overshoot* namun kecil dan settling time yang terjadi yaitu 65 sec

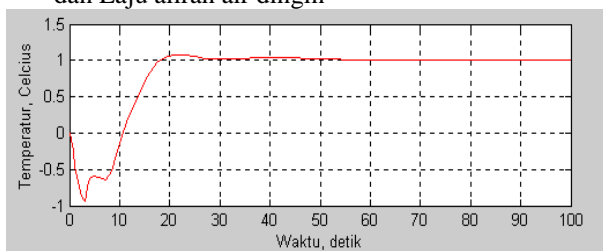
- Pengujian Pengendali PID ITAE terhadap gangguan perubahan set point, Temperatur input dan Laju aliran air dingin



Gambar 8. Respon Keluaran dengan PID ITAE

Pada gambar 8. terlihat bahwa tidak terjadi *overshoot* lagi dan settling time yang terjadi yaitu 62 sec

- Pengujian Pengendali Gabungan terhadap gangguan perubahan set point, Temperatur input dan Laju aliran air dingin



Gambar 9 Respon Keluaran dengan PID Gabungan

Pada gambar 9. terlihat bahwa masih terjadi *overshoot* namun kecil hanya 5% dan setting time yang terjadi yaitu 58 sec

#### IV. KESIMPULAN

1. Fungsi alih antara fungsi keluaran dan fungsi masukan dari Heat Exchanger dari hasil pemodelan yang didapat, adalah merupakan fungsi alih orde dua.
2. Proses pertukaran panas yang terjadi pada Heat Exchanger adalah proses yang cenderung lambat, maka pemodelan dari Heat Exchanger dapat diwakili dengan fungsi transfer orde satu dengan waktu tunda.
3. Untuk mengkoreksi terjadinya gangguan yang masuk agar tidak mengganggu keluaran proses sistem Heat Exchanger secara keseluruhan, maka dapat digunakan pengendali Gabungan (PID dan Feedforward).
4. Respon yang paling baik dalam mengatasi gangguan yaitu pengendali gabungan dimana mencapai stabil saat 58 sec dan osilasi hanya 5%

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Carlos A. Smith and Armando B. Corripio, "*Principles and Practice of Automatic Process Control*", 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons Inc., 1985.
- [2]. Gunterus, Frans., "*Sistem Pengendalian Proses*", Elex Media Computindo, 1997.
- [3]. Luyben, William L., "*Process Modelling, Simulation and Control for Chemical Engineers*", Mc.Graw-Hill Inc., 1990.
- [4]. Marlin, Thomas E., "*Process Control, Designing Process and Control System for Dynamic Performance*", 2<sup>nd</sup> edition, Mc.Graw-Hill International.
- [5]. Shinskey, F. G., "*Process Control System. Application, Design and Tuning*", McGraw-Hill International Edition, 1988.
- [6]. Seborg, Dale E., Edgar, Thomas F., Mellichamo, Duncan A., "*Process Dynamics and Control*", John Wiley & Sons, 1989.
- [7]. Stephanopoulos, George, "*Chemical Process Control : an Introduction to Theory and Practice*", Prentice-Hall International Editions, 1984