

PENGENDALI PROSES PADA CSTR DIABATIK DENGAN PENGENDALI H-INFINITY

Agus Suprajitno

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Sultan Agung

Semarang

aguschips@gmail.com

Abstrak

CSTR diabatik merupakan system nonlinear dengan derajat non linearitas tinggi. Pada pemodelan reactor ini diasumsikan proses bersifat kontinyu, homogen dan endoterm, reaksinya adalah orde satu, reaksinya tidak dapat dibalik, reaktan dan hasil reaksinya homogen dan nonisotermal.

Masukan system sebagai sinyal pengendali adalah volume aliran pendingin pada jaket dan keluaran system yang dikendalikan adalah temperatur reactor.

Simulasi yang telah dilakukan menyimpulkan bahwa kendali H-infinity (robust) memiliki performance yang lebih baik disbanding dengan kendali PI dengan menghilangkan efek osilasi pada temperatur keluaran pada system reactor

Kata kunci : Reaktor, CSTR. Kendali PI, Robust

1. Latar Belakang

Perkembangan sistem kendali otomatis (*automatic control system*) sudah merambah ke setiap sisi kehidupan manusia. Penelitian tentang teknologi kendali juga dilakukan untuk mengendalikan proses pada industri besar, seperti pengendalian proses pada industri kimia (*chemical plant*), industri otomotif dan sebagainya. Proses kendali di industri kimia merupakan proses yang berlangsung secara dinamik, yaitu variabel-variabel yang menentukan terjadinya proses itu berubah-ubah terhadap waktu.

Reaktor kimia merupakan bagian terpenting pada industri kimia sehingga kestabilan kerja reaktor kimia menjadi bahan penelitian tentang sistem kendali proses pada reaktor. Pada industri kimia, masalah keteraturan temperatur reaktor telah dipecahkan dengan menggunakan pengendali konvensional, PID (*proportional, integral and derivative controllers*). Di sisi yang lain, beberapa faktor-faktor penting seperti : ketidaklinieran yang tidak menentu (*uncertainty*) dari kinetika kimia, panas yang dihasilkan dari aktifitas reaksi kimia (*exothermicity*), keadaan saturasi pada sistem pendingin/pemanas, harus dipertimbangkan dalam merancang kendali untuk aplikasi aktual di industri .

Dengan kenyataan bahwa terdapat keterbatasan pada pengendalian konvensional, sehingga teknik kendali robust (*robust control*) terus dikembangkan oleh para ahli kendali . Kendali H-Infinity (H_{∞}) merupakan kendali robust yang menyediakan metode sistematis dengan memasukkan efek gangguan eksternal dan internal dalam sebuah prosedur desain pengendalian, sehingga membuat sistem kendali yang dihasilkan menjadi tegar (*robust*) terhadap gangguan (*disturbances*) ketika pengendali diaplikasikan pada sistem yang sebenarnya .

Dalam penelitian ini akan dibandingkan antara dua jenis pengendali proses pada sistem reaktor, yaitu pengendali PI dan pengendali H-Infinity, dengan maksud membandingkan kinerja (*performance*) dari masing-masing jenis pengendali tersebut.

2. Tujuan Penelitian

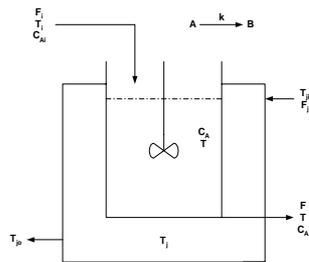
Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mensimulasikan pengendali H-Infinity sebagai pengendali proses pada CSTR diabatik dan dibandingkan dengan pengendali PI.

3. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini dibahas tentang pengendalian proses pada reaktor kontinyu dengan pengaduk (CSTR) menggunakan pengendali H-Infinity di mana persamaan reaksinya adalah orde satu, reaksinya tidak dapat dibalik (*irreversible*), reaktan dan hasil reaksinya homogen dan nonisotermal. Masukan sistem sebagai sinyal pengendali adalah volume aliran pendingin pada jaket dan keluaran sistem yang dikendalikan adalah temperatur reaktor.

4. Model Reaktor

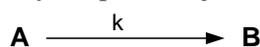
Diagram dari CSTR diabatik seperti pada gambar 1. di bawah ini :



Gambar 1. Diagram CSTR diabatik

Pada gambar 1, aliran reaktan secara kontinyu mengalir ke dalam reaktor dengan kecepatan F_i dan besarnya konsentrasi C_{Ai} dengan temperatur T_i . Dengan adanya pengaduk, reaktan dapat dianggap tercampur sempurna dalam reaktor sehingga konsentrasinya sebesar C_A dengan temperatur T menyebar merata dalam reaktor. Hasil produk berupa konsentrasi C_A dengan temperatur T secara kontinyu keluar dari reaktor dengan kecepatan F , di mana besarnya F sama dengan F_i .

Reaksi yang terjadi dalam reaktor bersifat *eksoterm*, yakni ketika bereaksi mengeluarkan panas, maka untuk menjaga temperatur reaktor agar tetap, maka reaktor dilapisi jaket yang berfungsi mengalirkan cairan pendingin dengan kecepatan F_j . Sehingga dengan temperatur jaket T_j yang lebih rendah dari pada temperatur dalam reaktor T , energi panas yang ditimbulkan karena proses reaksi berpindah dari reaktor ke lapisan jaket dan jumlah cairan pendingin diatur agar dapat mempertahankan temperatur reaktor tersebut. Reaksi ini merupakan reaksi derajat satu di mana reaksi kimianya dapat ditunjukkan sebagai berikut :



Di mana k adalah kecepatan reaksi pada reaksi A berubah menjadi B

5. Model Matematika Reaktor

Pemodelan matematika untuk proses reaktor pada gambar 1 adalah :

$$V \frac{dC_A}{dt} = F(C_{Ai} - C_A) - V k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) C_A \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$V \rho C_p \frac{dT}{dt} = \rho C_p F (T_i - T) + \frac{(-\Delta H)}{\rho C_p} V k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) C_A - Q \quad \dots\dots\dots(2)$$

Q = banyaknya panas yang diserap jaket per waktu

Beberapa asumsi untuk menentukan model sebagai berikut :

- Pendingin pada jaket memiliki masa jenis (ρ_j) dan kapasitas panas (C_{pj}) yang konstan
- Dinamika pendingin diabaikan

Pendekatan koefisien penghantar panas adalah :

$$UA_i = \alpha F_j^\beta \dots\dots\dots(3)$$

F_j = kecepatan aliran pendingin
 α, β = konstanta

Temperatur jaket rata-rata adalah :

$$T_j = \frac{T_{ji} + T_{jo}}{2} \dots\dots\dots(4)$$

Dengan asumsi-asumsi di atas, maka dapat dinyatakan dua persamaan tentang panas yang diserap oleh jaket, yakni :

$$Q = F_j \rho_j C_{pj} (T_{jo} - T_{ji}) \dots\dots\dots(5)$$

$$Q = \alpha F_j^\beta \left(T - \frac{T_{ji} + T_{jo}}{2} \right) \dots\dots\dots(6)$$

Dengan mengeliminasi T_{jo} pada persamaan (5) dan (6) didapat :

$$Q = \frac{\alpha F_j^{\beta+1} (T - T_{ji})}{F_j + \frac{\alpha F_j^\beta}{2 \rho_j C_{pj}}} \dots\dots\dots(7)$$

Sehingga persamaan (2) dapat ditulis menjadi :

$$V \rho C_p \frac{dT}{dt} = \rho C_p F (T_i - T) + \frac{(-\Delta H)}{\rho C_p} V k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) C_A - \left[\frac{\alpha F_j^{\beta+1} (T - T_{ji})}{F_j + \frac{\alpha F_j^\beta}{2 \rho_j C_{pj}}} \right] \dots\dots(8)$$

Kecepatan reaksi fungsi temperatur merupakan persamaan *Arrhenius* yang dapat dinyatakan sebagai :

$$k(T) = k_0 e^{-E/RT} \dots\dots\dots(9)$$

- k_0 = faktor frekuensi
- E = energi aktivasi
- R = konstanta gas ideal

Dari persamaan (1) dan (.9) diperoleh :

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{F}{V} (C_{Ai} - C_A) - k(T) C_A \dots\dots\dots(10)$$

Dari persamaan (2) dan (9) diperoleh :

$$V \rho C_p \frac{dT}{dt} = \rho C_p F (T_i - T) + \frac{(-\Delta H)}{\rho C_p} k(T) V C_A - Q$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} (T_i - T) + \frac{(-\Delta H)}{\rho^2 C_p^2} k(T) C_A - \frac{1}{V \rho C_p} \left[\frac{\alpha F_j^{\beta+1} (T - T_{ji})}{F_j + \frac{\alpha F_j^\beta}{2 \rho_j C_{pj}}} \right] \dots\dots\dots(11)$$

Persamaan (1) dan persamaan (11) menjadi dasar pembuatan simulasi sistem reaktor menggunakan simulink.

6. Linierisasi

Pada umumnya, untuk penyederhanaan rancangan dan analisis sistem kendali selalu didasarkan pada bentuk linier dari proses yang dikendalikan. Persamaan (1) dan (8) adalah persamaan diferensial nonlinier sehingga perlu dilinierisasi.

Linierisasi kedua persamaan tersebut adalah sebagai berikut [8]:

$$\frac{dC_A'}{dt} = a_{11}C_A' + a_{12}T' + a_{13}C_{Ai}' + a_{14}F_j' + a_{15}T_i' + a_{16}F' \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\frac{dT'}{dt} = a_{21}C_A' + a_{22}T' + a_{23}C_{Ai}' + a_{24}F_j' + a_{25}T_i' + a_{26}F' \quad \dots\dots\dots(13)$$

Persamaan (12) dan (13) dapat dinyatakan dalam persamaan ruang keadaan (*state-space*) yang bentuk umumnya adalah :

$$\dot{x} = Ax + Bu + Cd \quad \dots\dots\dots(14)$$

di mana :

$$\dot{x} = \text{vektor diferensial, yakni } \dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{dC_A'}{dt} \\ \frac{dT'}{dt} \end{bmatrix}$$

$$u = \text{vektor yang dimanipulasi } u = [F_j']$$

$$d = \text{vektor gangguan } d = [C_{Ai}', T_i', F']$$

Sehingga persamaan ruang keadaan sistem (*state-space*) adalah:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_A' \\ T' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_{21} \end{bmatrix} F_j' + \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & c_{13} \\ 0 & c_{22} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{Ai}' \\ T_i' \\ F' \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(15)$$

Untuk mengetahui kestabilan sistem dapat dilakukan dengan menganalisis harga *eigen* di mana nilai *eigen* ditentukan dengan persamaan :

$$(\lambda I - A) = 0 \quad \dots\dots\dots(16)$$

Dengan A adalah matrik A pada persamaan dan nilai lambda (λ) merupakan akar-akar karakteristik sistem. Jika nilai *eigen* (λ) adalah **negatif** di mana kedudukan akar karakteristik berada pada sebelah kiri kedudukan akar maka sistem stabil. Jika nilai *eigen* (λ) adalah **positif** di mana kedudukan akar karakteristik berada pada sebelah kanan kedudukan akar maka sistem tidak stabil.

7. Fungsi Alih Reaktor

Dalam persamaan (12) dan (13), variabel input yang berubah hanya aliran pendingin (F_j) dengan perubahan bertahap, sehingga $C_{Ai}'(s) = T_0'(s) = F'(s) = 0$. Transformasi laplace dari persamaan (12) dan (13) adalah :

$$sC_A'(s) = a_{11}C_A'(s) + a_{12}T'(s) + a_{14}F_j'(s) \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$sT'(s) = a_{21}C_A'(s) + a_{22}T'(s) + a_{24}F_j'(s) \quad \dots\dots\dots(18)$$

Persamaan (17) dan (18) dapat dikombinasikan secara aljabar. Persamaan (17) diubah untuk mendapatkan :

$$C_A'(s) = \frac{a_{12}T'(s)}{(s - a_{11})} \text{ dengan } a_{14} = 0, \text{ bentuk ini lalu disubstitusikan ke dalam persamaan}$$

(18) untuk memperoleh:

$$T'(s) = \frac{a_{24}s + (a_{21}a_{14} - a_{24}a_{11})}{s^2 - (a_{11} + a_{22})s + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})} F_j'(s) \dots\dots\dots(19)$$

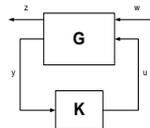
8. Pengendali H-Infinity H_∞

Digunakannya pengendali H_∞ adalah karena pengendali ini menyediakan metode sistematis untuk memasukkan efek gangguan eksternal dan internal dalam sebuah prosedur rancangan pengendalian, sehingga membuat sistem kendali menjadi tegar (*robust*) terhadap gangguan, ketika pengendali diaplikasikan pada sistem yang sebenarnya .

Pengendali pada umumnya dirancang dengan memberikan model dinamik dari objek kendali (*plant*). Model dinamik dapat digambarkan dalam fungsi alih atau ekspresi ruang-keadaan (*state-space expression*). Nilai parameter *numerator* dan *denominator* polynomial dari fungsi alih dan *state-space* diperoleh dengan menghitung, mengukur dan/atau dengan percobaan identifikasi parameter. Setelah itu maka dapat dirancang sebuah pengendali dengan menggunakan metode kendali yang telah ada. Kendali H_∞ dapat mengatasi problem pengendali yang dihubungkan dengan gangguan, yang mencakup :

1. Stabilisasi sistem *close loop* terhadap gangguan
2. Sensitifitas rendah terhadap gangguan
3. Pemeliharaan *performance* terhadap gangguan

Gambar 2 menunjukkan diagram blok secara umum dari sebuah sistem pengendali H_∞ .



Gambar 2. Sistem pengendali H_∞

Pada gambar 2, $G(s)$ adalah objek kendali (*plant*) dan $K(s)$ adalah pengendali H_∞ . Sedangkan y mewakili sinyal output yang diukur dan u adalah input pengendali, w adalah sinyal input yang tidak diinginkan (*disturbances*) dan z adalah sinyal evaluasi.

Plant digambarkan mengikuti *state-space* dan hasil persamaannya

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \\ u \end{bmatrix} \dots\dots\dots(17)$$

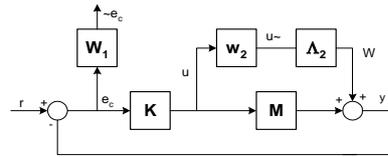
Kendali $K(s)$ dirancang untuk memenuhi kriteria H_∞

$$\|T_{zw}\|_\infty < \gamma \dots\dots\dots(18)$$

T_{zw} adalah fungsi alih dari sistem *close loop* yang memetakan sinyal yang tidak diinginkan w untuk sinyal evaluasi z dan γ adalah angka positif.

9. Sistem Closed-Loop dengan H_∞

Secara umum, model yang dikenali dari sebuah *plant* dihubungkan dengan suatu rangkaian yang tidak tentu (*uncertainty*) untuk mewakili *plant* yang tak diketahui . Pengendali umpan balik biasanya dirancang untuk menjadi sempurna dari bentuk yang tidak tentu. Gambar 2 berikut ini menunjukkan sistem *closed-loop* dalam bingkai H_∞ .



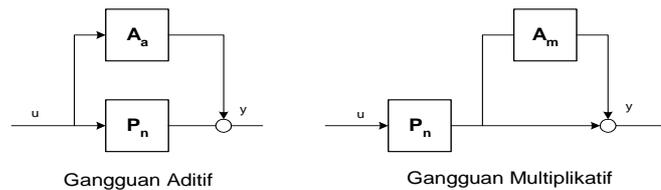
Gambar 3. Sistem closed-loop dalam H_∞

Pada gambar 3, M adalah *plant* yang tidak diketahui, Λ_2 mewakili ketidak tentuan (*uncertainty*), W_1 dan W_2 adalah fungsi pembobotan (*weighting function*), K adalah pengendali. *Weighting function* dimasukkan dalam sistem untuk menambah atau mengurangi kontribusi yang diberikan keluaran atau masukan ke masalah optimasi.

10. Fungsi Pembobotan dalam H_∞

Dalam rancangan sistem kendali robust terdapat dua tipe fungsi pembobotan, yaitu : fungsi pembobotan stabilitas (*robust stability*) dan fungsi pembobotan kinerja (*performance*) .

Fungsi pembobotan stabilitas digunakan dalam rancangan pengendali untuk menjamin bahwa *plant* pada sistem *closed-loop* tetap stabil meskipun terdapat gangguan, baik berupa gangguan internal (*plant perturbation*) maupun gangguan eksternal. Gambar 4 menunjukkan diagram *plant* dengan gangguan-gangguan.



Gambar 4. Plant dengan gangguan

P_n merupakan model teori dari *plant* yang digunakan untuk rancangan kendali. Pada gambar 4 diperlihatkan bahwa gangguan internal dapat digolongkan dalam dua kategori, yakni : gangguan aditif dan gangguan multiplikatif.

Dalam kondisi yang sebenarnya, penguatan gangguan akan tinggi pada area frekuensinya, jadi fungsi pembobotan stabilitas robust (W_d) diformulasikan sebagai berikut :

$$W_d(s) = K_p \frac{s + \eta_1}{\eta_2}, \quad \eta_1 \ll \eta_2 \quad \dots\dots\dots(19)$$

η_1, η_2 merupakan koefisien frekuensi

K_p merupakan koefisien penguat

K_p, η_1, η_2 bernilai positif

Matrik *state-space* dari $W_d(s)$ adalah:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_d s_d + B_d u & \dots\dots\dots(20) \\ y &= C_d x_d + D_d u \end{aligned}$$

$$A_d = -\eta_2$$

$$B_d = 1$$

$$C_d = K_p (\eta_1 - \eta_2) \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$D_d = K_p$$

11. Rangkaian Simulasi Sistem

Sistem reaktor disimulasikan berdasarkan persamaan dinamika. Persamaan dinamik reaktor telah diberikan oleh persamaan (1) dan (8) yang dapat ditulis kembali sebagai berikut :

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{F}{V} (C_{Ai} - C_A) - k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) C_A \quad \dots \dots \dots (22)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} (T_i - T) + \frac{(-\Delta H)}{\rho C_p} k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) C_A - \frac{UA}{V\rho C_p} (T - T_{ji}) \quad \dots \dots \dots (23)$$

di mana :

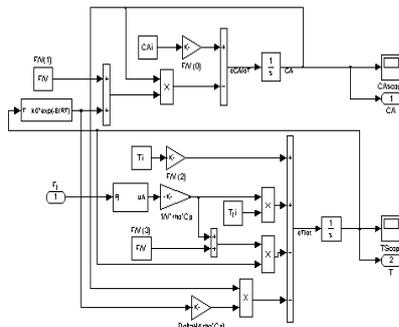
$$UA = \left[\frac{\alpha F_j^{\beta+1}}{F_j + \frac{\alpha F_j^{\beta}}{2\rho_j C_{pj}}} \right]$$

Untuk memudahkan dalam perancangan rangkaian simulasi sistem reaktor, maka persamaan (17) dan (18) dapat diuraikan sebagai berikut :

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{F}{V} C_{Ai} - \left[\frac{F}{V} + k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \right] C_A \quad \dots \dots \dots (24)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} T_i + \frac{UA}{V\rho C_p} T_{ji} - \left[\frac{F}{V} + \frac{UA}{V\rho C_p} \right] T + \frac{(-\Delta H)}{\rho C_p} k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) C_A \quad \dots \dots (25)$$

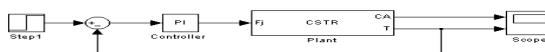
Dari persamaan (24) dan (25) dapat dibuat simulasi sistem reaktor menggunakan rangkaian simulink untuk sistem reaktor sebagaimana pada gambar 5 berikut ini dan ditempatkan dalam satu blok dengan nama CSTR.



Gambar 5. Rangkaian simulink sistem reaktor

12. Rangkaian Simulasi Kendali PI

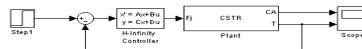
Rangkaian simulink kendali PI pada sistem reaktor dapat dilihat pada gambar 6 berikut ini:



Gambar 6. Rangkaian simulink kendali PI

13. Rangkaian Simulasi Kendali H_∞

Rangkaian simulink kendali H_∞ pada sistem reaktor dapat dilihat pada gambar 7 berikut ini :



Gambar 7 Rangkaian simulink kendali H_∞

14. Parameter Sistem Reaktor

Parameter-parameter sistem yang digunakan dalam simulasi adalah seperti pada tabel 1 berikut ini :

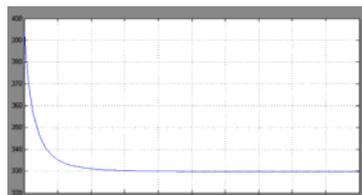
Tabel 1. Nilai parameter sistem CSTR

Parameter	Keterangan	Harga
F	Volume aliran	$1 \text{ m}^3/\text{min}$
V	Volume reaktor	1 m^3
C_{Ai}	Konsentrasi reaktan A pada reaktor	$2.0 \text{ kmole}/\text{m}^3$
T_i	Temperatur reaktan A	323 K
C_p	Kapasitas panas	$1 \text{ cal}/(\text{g}/\text{K})$
ρ	Massa jenis	$10^6 \text{ g}/\text{m}^3$
k_0	Faktor pra-eksponensial	$1.0 \times 10^{10} \text{ min}^{-1}$
$\frac{E}{R}$	Aktivasi energi / konstanta gas ideal	8330.1 K
$(-\Delta H)$	Reaksi panas	$130 \times 10^6 \text{ cal}/(\text{kmole})$
T_{ji}	Temperatur jaket	365 K
F_j	Volume aliran jaket	$15 \text{ m}^3/\text{min}$
C_{pj}	Kapasitas panas pada jaket	$1 \text{ cal}/(\text{g}/\text{K})$
ρ_j	Massa jenis jaket	$10^6 \text{ g}/\text{m}^3$
α	Konstanta	$1.678 \times 10^6 \text{ (cal/min)} / (\text{K})$
β	Konstanta	0.5

Pada tabel 1 parameter sistem, nilai *steady-state* dari variabel yang mempengaruhi adalah $T = 394\text{K}$ dan $C_A = 0.265\text{kmole}/\text{m}^3$ [8].

15. Simulasi dan Analisis Pengendalian PI

Pengujian pertama adalah rangkaian simulink sistem reaktor yang menggunakan kendali PI. Untuk itu perlu dihitung nilai K_c dan τ_I dari kendali PI berdasarkan grafik *open-loop* untuk temperatur (T) gambar 8 berikut ini :



Gambar 8. Hasil simulasi *open-loop* sistem reaktor

Teknik grafik yang digunakan untuk menentukan parameter model τ , t_0 , dan K adalah metode **Sundaresan-Krishnaswamy** [11]. Metode ini menggunakan dua parameter waktu t_1 dan t_2 yang didapat dari kurva *step-response* saat mencapai 35.3% dan 85.3% dari waktu respons secara berturut-turut. Waktu tunda (t_0) dan waktu konstan (τ) dihitung dengan menggunakan persamaan (21), harga dari t_0 dan τ memperkecil perbedaan antara respons yang diukur dan model sistem, berdasarkan hubungan dari data parameternya .

$$\begin{aligned} t_0 &= 1.3t_1 - 0.29t_2 \\ \tau &= 0.67(t_2 - t_1) \end{aligned} \dots\dots\dots(26)$$

Pengujian *open-loop* sistem reaktor dari gambar 4.4. diperoleh data sebagai berikut :

$$K = 394 - 330 = 64$$

$$t_1 = 35.3\% \times 64 = 22.59$$

$$t_2 = 85.3\% \times 64 = 54.59$$

Dengan menggunakan persamaan (21) maka $t_0 = 13.54$ dan $\tau = 21.44$, sehingga :

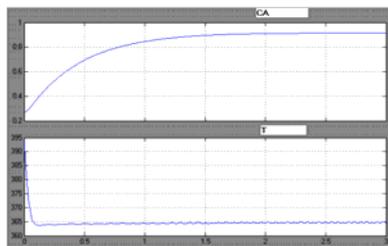
$$G_{(p)} = \frac{64e^{-13.54s}}{(21.44s + 1)}$$

Dengan menggunakan metode *quarter decay ratio response* dari **Cohen-Coon**, diperoleh harga penalaan kendali PID seperti pada tabel 2 berikut ini :

Tabel 2. Rumus *quarter decay ratio response*

Tipe Kendali	K_c	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	-	-
PI	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$3.33t_0$	-
PID	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$2.0t_0$	$\frac{1}{2}t_0$

Dengan data yang telah dihitung berdasarkan persamaan (26), maka $K_c = 0.02$ dan $\tau_I = 45.09$. Selanjutnya nilai K_c dan τ_I dimasukkan ke dalam rangkaian simulink kendali PI untuk dilakukan pengujian *close-loop*. Hasil pengujian diperlihatkan pada gambar 9. berikut ini :



Gambar 9. Hasil simulasi sistem reaktor dengan kendali PI

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kendali PI memberikan nilai konsentrasi (C_A) sebesar 0.9 kmole/m³ (*steady-state*) dan nilai temperatur (T) sebesar 365° K (*steady-state*), terdapat *overshoot* dan terjadi osilasi pada temperatur output sistem reaktor.

16. Simulasi dan Analisis Pengendalian H_∞

Pengujian selanjutnya adalah pada rangkaian simulink menggunakan kendali H-Infinity. Namun sebelumnya perlu dihitung beberapa parameter yang diperlukan oleh kendali H_∞ dengan menggunakan program MATLAB (*toolbox robust control*).

Dengan memasukkan nilai parameter sistem (tabel 1) ke dalam bentuk persamaan (16) berikut ini :

$$T'(s) = \frac{a_{24}s + (a_{21}a_{14} - a_{24}a_{11})}{s^2 - (a_{11} + a_{22})s + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})} F_j'(s)$$

di mana :

$$F_j'(s) = -1/s \quad a_{11} = -7.55 \quad a_{12} = -0.0931 \quad a_{14} = 0.0$$

$$a_{21} = 852.02 \quad a_{22} = 5.77 \quad a_{24} = -6.07$$

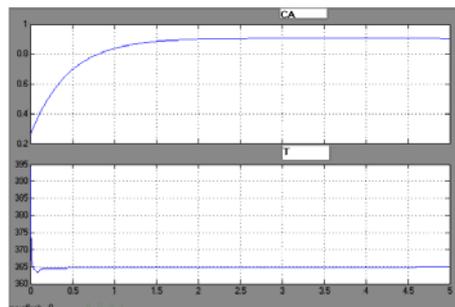
maka diperoleh :

$$T'(s) = \frac{(-1)[-6.07(s) - 45.83]}{s(s^2 + 1.79s + 35.80)}$$

Sedangkan fungsi pembobotan (*weighting function*) dari kendali H_∞ adalah :

$$W_1 = \frac{s+3}{8(s+0.03)(s+0.6)} \quad W_2 = \frac{5(s+100)}{s+10000} \quad W_3 = 0$$

Hasil pengujian rangkaian simulink kendali H_∞ pada sistem reaktor diperlihatkan pada gambar 10 berikut ini :



Gambar 10. Hasil simulasi sistem reaktor dengan kendali H_∞

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kendali H_∞ memberikan nilai konsentrasi (C_A) sebesar 0.9 kmole/m^3 (*steady-state*) dan temperatur (T) sebesar 365° K (*steady-state*), terdapat *overshoot* namun tidak terjadi osilasi pada temperatur output sistem. Ini menunjukkan bahwa kestabilan kerja reaktor yang menggunakan kendali H_∞ ternyata lebih baik dibandingkan dengan kendali PI.

17. Kesimpulan

1. CSTR diabatik merupakan sistem nonlinier dengan derajat non linearitas tinggi.
2. Simulasi yang telah dilakukan menyimpulkan bahwa kendali H-Infinity (*robust control*) memiliki *performance* yang lebih baik dibandingkan dengan kendali PI dengan menghilangkan efek osilasi pada temperatur output pada sistem reaktor,
3. Pada temperatur output sistem reaktor yang menggunakan kendali H-Infinity terjadi *overshoot* (0.08 detik), namun itu terjadi dalam waktu yang cepat dan setelah itu mengalami *steady-state* pada temperatur 365° K .

18. Daftar Pustaka

- Alvarez, Jose., Ramirez and Ricardo Femat, 1999, *Robust PI Stabilization of a Class of Chemical Reactors*, System and Control Letters.
- Antonelli, R. and A. Astolfi, 2003, *Continuous Stirred Tank Reactors : Easy to Stabilise?*, Automatica 39.
- Bequette, B.W., 1998, *Process Dynamics: Modeling, Analysis, and Simulation*, Upper Saddle River, NJ. Prentice Hall.
- Chiang, Richard Y., 1998, *MATLAB Robust Control Toolbox*, The MathWorks, Inc.
- Dorato, Peter, 1987, *Robust Control*, IEEE Press, New York.
- Green, Michael and David J.N. Limebeer, 1995, *Linear Robust Control*, Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Luis, Dario and A. Astolfi, *Design of Nonlinear Robust Controller for an Exothermic Reaction System*, Dept. of Chemical Engineering and Technology, Imperial College, London
- Marlin, T.E., 2000, *Process Control: Designing, Processes and Control Systems for Dynamic Performance*, 2nd ed, Singapore, McGraw-Hill.