

Thiết kế điều khiển cho lò phản ứng liên tục CSTR phát nhiệt

A novel control design for a Exothermic Continuous stirred tank reactor

Mai Thị Đoan Thanh*, Đoàn Quang Vinh**

*Trường Cao đẳng nghề Đà Nẵng

**Đại học Đà Nẵng

e-Mail: maithidoanThanh@gmail.com

Tóm tắt

Bài báo giới thiệu thiết kế hệ thống điều khiển lò phản ứng liên tục CSTR. Xuất phát từ các phương trình cân bằng, bài báo xây dựng mô hình điều khiển và thiết kế điều khiển. Hệ điều khiển lò phản ứng CSTR là hệ đa biến phi tuyến, tuy nhiên hệ làm việc tại điểm cân bằng, nên trong thực tế thường dùng điều khiển phản hồi tuyến tính với bộ điều khiển PID. Điều này dẫn đến chất lượng và năng suất sản phẩm không đạt được như thiết kế ban đầu. Vì vậy cần phân tích các yếu tố ảnh hưởng tới chất lượng của hệ để có giải pháp khắc phục.

Từ khóa: Phương trình cân bằng, lò phản ứng liên tục, cân bằng năng lượng, nhiệt phản ứng

Abstract: The paper presents a control design for a Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR). The proposed control is derived based on the balance equations. The dynamics of the CSTR are nonlinear and multivariable. However the system operates at the equilibrium, so it is suitable to apply a classical feedback PID control. This makes the performance of the closed-loop system difficult to reach designed value. Therefore, negative affecting factors needed to be analyzed for possible solutions.

Keywords: Balance equation, Continuous stirred tank reactor, Energy balance, Heat reaction

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
W_1	kg/s	Lưu lượng khối của chất đầu vào
W_2	kg/s	Lưu lượng khối của sản phẩm ra
V	m^3	Thể tích lò phản ứng
ρ	kg/m^3	Khối lượng riêng sản phẩm
F_1	m^3/s	Lưu lượng thể tích của chất đầu vào
F_2	m^3/s	Lưu lượng thể tích sản phẩm đầu ra
C_{A1}	%	Nồng độ thành phần đầu vào của A
C_{A2}	%	Nồng độ thành phần sản phẩm đầu ra của A
K_T	W/m^2K	Hệ số truyền nhiệt
T	K	Nhiệt độ của chất trong lò phản ứng

T_1	K	Nhiệt độ của chất đầu vào lò phản ứng
T_{j1}	K	Nhiệt độ đầu vào của nước làm mát
T_{j2}	K	Nhiệt độ đầu ra của nước làm mát
C_p	kJ/kgK	Nhiệt dung riêng đẳng áp của chất tham gia phản ứng
ρ_j	kg/m^3	Khối lượng riêng của nước làm mát
C_{pj}	kJ/kgK	Nhiệt dung riêng của môi chất làm mát
V_j	m^3	thể tích của môi chất
A	m^2	Diện tích đáy lò
E	kJ/mol	Năng lượng riêng phần của phản ứng

Chữ viết tắt

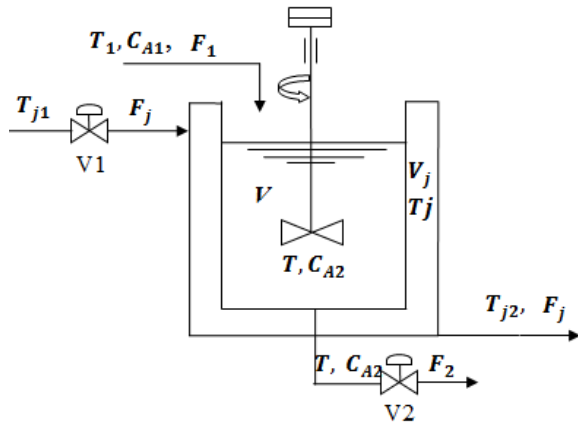
CSTR Continous Stirred Tank Reactor

1. Phần mở đầu

Trên hình H. 1 mô tả một thiết bị phản ứng liên tục phát nhiệt [5] gồm có lò phản ứng hóa học nhận nguyên liệu đầu vào với lưu lượng F_1 , nồng độ chất A C_{A1} , nhiệt độ T_1 , phản ứng phát ra một nhiệt lượng ΔH . Để có nồng độ sản phẩm chất A đầu ra C_{A2} , cần phải giải phóng nhiệt phản ứng, sao cho nhiệt độ dung dịch phản ứng ổn định tại giá trị T ứng với nồng độ yêu cầu. Vì vậy người ta cấp cho lò một lượng công suất làm mát. Điều khiển công suất làm mát thông qua điều chỉnh lưu lượng nước làm mát F_j (dùng van V_1) cấp vào vỏ lò (Jaket). Jacket có thể tích V_j , nhiệt độ đầu vào của nước làm mát là T_{j1} , khi ra khỏi Jacket là T_j . Lưu lượng sản phẩm ra F_2 , được điều chỉnh cân bằng với lưu lượng nguyên liệu vào F_1 , thông qua van V_2 điều này có nghĩa mức dung dịch trong lò được giữ không đổi. Để sản phẩm đầu ra đồng đều, cần có một thiết bị khuấy trộn.

Trong bài báo này các tác giả sẽ đi phân tích mô hình điều khiển, tính phi tuyến và xen kênh của lò phản ứng, thiết kế điều khiển truyền thống theo cấu trúc phản hồi dùng PID. Kết quả nghiên cứu làm cơ sở để thiết kế điều khiển nâng cao hiệu suất sản phẩm của lò phản ứng CSTR. Nội dung bài báo gồm ba phần: Phần 1, khái quát các phương trình động học, tính toán thông số vận hành tại điểm cân bằng, xây dựng mô hình mô phỏng lò phản ứng (được gọi là mô hình

phi tuyến) và kiểm tra điểm làm việc cân bằng, tính chọn lưu lượng làm việc cực đại và điểm làm việc của van; Phần 2 xây dựng mô hình lò phản ứng ở dạng tuyến tính xung quanh điểm làm việc (gọi là mô hình tuyến tính), từ đó làm cơ sở thiết kế bộ điều khiển phản hồi PID, đánh giá các đáp ứng với các nhiễu đầu vào khác nhau. Phần 3 dựa trên tham số bộ điều khiển PID ở mô hình tuyến tính, chạy trên mô hình phi tuyến, đánh giá đáp ứng hệ khi thay đổi tham số của nhiễu.



H.1 Lò phản ứng khuấy trộn liên tục CSTR

2. Nội dung chính

2.1. Khái quát động học quá trình trong lò phản ứng CSTR

Giả thiết trong lò phản ứng:

- Hỗn hợp trong lò phản ứng lý tưởng, gradient nồng độ (độ thâm thấu) trong bình ở mọi vị trí là như nhau (do khuấy trộn liên tục) và nồng độ trong lò phản ứng giống như nồng độ đầu ra.

- Phản ứng của quá trình là bậc nhất trong thành phần A, tốc độ phản ứng được mô tả bằng $r = kC_A^\alpha$ (α là bậc của phản ứng, $\alpha = 1$)

2.1.1. Phương trình cân bằng khối lượng:

Theo tài liệu [1] ta có phương trình:

$$\frac{dm}{dt} = W_1 - W_2 \quad (1)$$

Với giả thiết ρ khối lượng riêng hợp chất không đổi trong quá trình phản ứng là hằng số ta có:

$$\frac{dV}{dt} = F_1 - F_2 \quad (2)$$

Trong đó: F_1 (m^3/s) là lưu lượng dòng nguyên liệu cấp cho lò, F_2 (m^3/s) là lưu lượng dòng sản phẩm đầu ra. V là thể tích của dung dịch trong lò (m^3)

Lò phản ứng có dạng hình trụ diện tích đáy không đổi $V=A.H$, chiều cao là $H(m)$ là mức của dung dịch. Biến đổi (2) ta có:

$$V_m \frac{dh}{dt} = F_1 - C_v m\% \sqrt{k_v h} \quad (3)$$

h là mức của dung dịch phản ứng ở đơn vị tương đối $h = V/V_m$ (V_m là giá trị lớn nhất của thể tích dung dịch trong lò)

k_v là hệ số quy đổi đơn vị áp suất (m^2/s^2). C_v là độ dẫn cực đại của van (m^2) (khi van mở 100%), $m\%$ là độ mở của van tỷ lệ với tín hiệu điều khiển, với giả thiết

dùng van tuyến tính thì lưu lượng ra tỷ lệ với độ mở của van.

2.1.2. Phương trình cân bằng thành phần:

Theo [2], ta có phương trình cân bằng thành phần của phản ứng:

$$V \frac{dC_{A2}}{dt} = F_1(C_{A1} - C_{A2}) - k_0 e^{-E/(RT)} V C_{A2} \quad (4)$$

Trong đó:

$k = k(T) = k_0 \exp -E/RT$ là hệ số tốc độ phản ứng.

2.1.3. Phương trình cân bằng năng lượng của lò phản ứng:

Theo [2] ta được phương trình cân bằng năng lượng như sau:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F_1}{V}(T_1 - T) + \frac{\Delta H}{\rho C_p} k_0 e^{-E/(RT)} C_{A2} - \frac{K_T A}{\rho C_p V} T - T_j \quad (5)$$

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{F_j(T_{j1} - T_j)}{V_j} - \frac{K_T A}{\rho_j C_{pj} V_j} T_j - T \quad (6)$$

Trong đó: T_{j1} là nhiệt độ đầu vào nước làm mát, T_j là nhiệt độ đầu ra nước làm mát, K_T hệ số truyền nhiệt ($kW/K.m^2$), A là diện tích truyền nhiệt (m^2), ρ khối lượng riêng của môi chất phản ứng (kg/m^3), C_p là nhiệt dung riêng của chất phản ứng ($kJ/kg.K$), V_j thể tích của Jacket (m^3), ρ_j khối lượng riêng nước làm mát (kg/m^3), C_{pj} là nhiệt dung riêng nước làm mát ($kJ/kg.K$).

Nhận xét: Động học quá trình lò phản ứng là quá trình đa biến và phi tuyến.

Thông số thiết kế lò phản ứng CSTR như sau [3]:

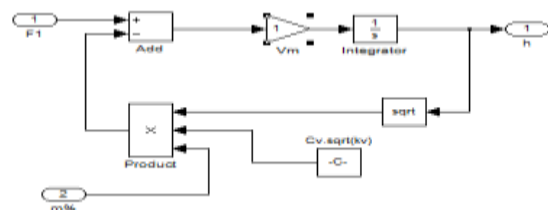
$F_1 = 0.001 m^3/s$; $V = 1 m^3$, $A = 0.5 m^2$; $C_{A1} = 100\%$; $C_{A2} = 50\%$; $K_0 = 32 s^{-1}$; $T_1 = 573 K$; $E = 42 kJ/mol$; $C_p = 1,0 kJ/kg.K$; $R = 0,008314 kJ/mol.K$; $\Delta H = 2000 kJ/kg$; $K_T A = 0,6 kW/kg$; $V_j = 0,2 m^3$; $\rho_j = 1000 kg/m^3$; $C_{pj} = 4,1 kJ/kg.K$; $T_{j1} = 293 K$; $F_j = 0,004 m^3/s$

2.1.4. Xây dựng mô hình lò phản ứng CSTR

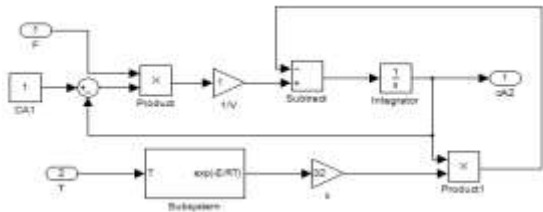
Từ (3), (4), (5), (6) đi xây dựng mô hình mô phỏng vận hành của lò [3] [4] cho các quá trình.

Mô hình mô phỏng quá trình cân bằng khối lượng thông qua đại lượng mức dung dịch theo (3)

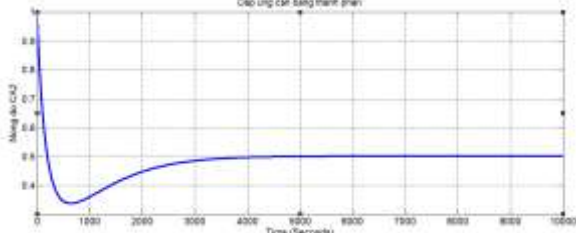
Đầu vào mô hình là lưu lượng vào F_1 , lưu lượng ra F_2 tính qua góc mở van $V_2 m\%$, đầu ra là mức tính qua đơn vị tương đối h .



H.2 Mô hình mô phỏng đại lượng mức dung dịch. Mô hình mô phỏng quá trình cân bằng thành phần theo (4)

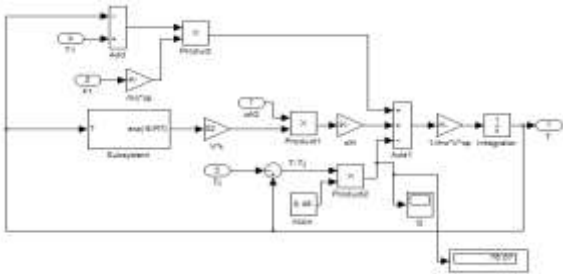


H.3 Mô hình mô phỏng cân bằng thành phần

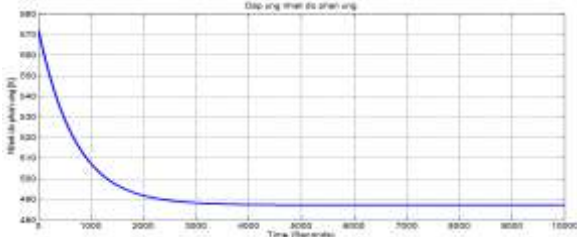


H.4 Đáp ứng quá trình cân bằng thành phần

Mô hình mô phỏng quá trình cân bằng năng lượng lò phản ứng theo (5)

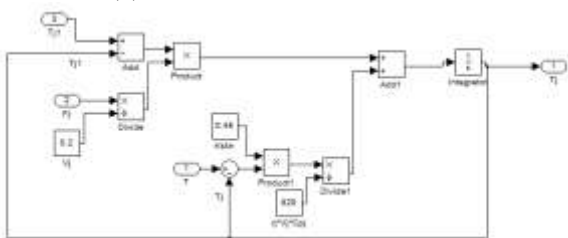


H.5 Mô hình mô phỏng quá trình cân bằng năng lượng lò phản ứng



H.6 Đáp ứng quá trình cân bằng năng lượng lò phản ứng

Mô hình mô phỏng quá trình cân bằng năng lượng của Jacket theo (6)

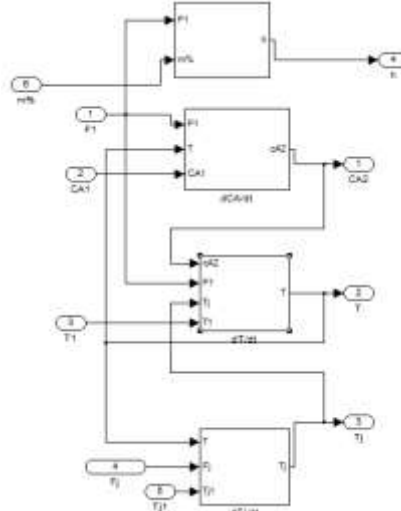


H.7 Mô hình mô phỏng quá trình cân bằng năng lượng Jacket của lò phản ứng



H.8 Đáp ứng quá trình cân bằng năng lượng Jacket của lò phản ứng

- Mô hình mô phỏng hệ thống lò phản ứng:



H.9 Mô hình mô phỏng hệ thống lò phản ứng (Mô hình phi tuyến)

Nhận xét: Từ mô hình lò phản ứng CSTR, với số liệu ban đầu, ta nhận được các đáp ứng: cân bằng thành phần, cân bằng năng lượng, cân bằng khối lượng.

Mô hình điều khiển lò CSTR là phi tuyến. Có hai lượng cần điều khiển: mức h (cân bằng khối lượng) và nồng độ đầu ra C_{A2} . Tuy nhiên nồng độ C_{A2} không đo trực tuyến được, vì vậy cần điều khiển qua đại lượng nhiệt độ phản ứng T [5]. Mạch vòng điều khiển mức (h) ta chọn đại lượng tác động là F_2 , cơ cấu chấp hành là van V_2 . Mạch vòng điều khiển nhiệt độ (nồng độ) chọn đại lượng tác động là lưu lượng nước làm mát F_j , cơ cấu chấp hành là van V_1 (xem H.10). Hai mạch vòng này có tác động xen kẽ. Các đại lượng còn lại được xác định là nhiễu: F_1, T_1, C_{A1}, T_{j1} . Biến tự đo không kiểm soát T_j .

Từ mô hình điều khiển tính được giá trị các điểm cân bằng như sau:

Khi nồng độ đầu vào $C_{A10}=100\%$, nhiệt độ đầu vào $T_{10} = 573K$; để có nồng độ đầu ra $C_{A20} = 50\%$ ứng với nhiệt độ đầu ra $T = 489K$; Lưu lượng cấp cho lò được xác định là $F_{10} = 0.001m^3/s$; Mức dung dịch trong lò $H_0 = 2m$; Công suất làm mát $Q = 76.57kW$; Nhiệt độ nước làm mát đầu vào $T_{j10} = 298K$; tính được lưu lượng nước làm mát $F_{j0} = 0.004m^3/s$;

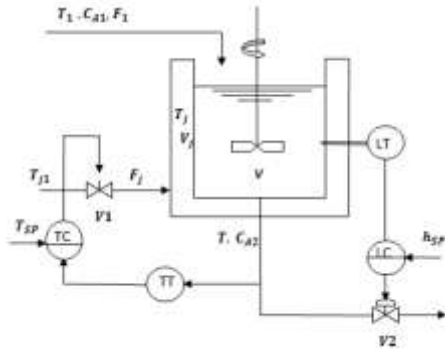
Chọn thông số làm việc của lò như sau:

- Để đảm bảo điều khiển cân bằng khối lượng, chọn lưu lượng cực đại đầu ra lò là $F_{2max}=0,002m^3/s$ (gấp 2 lần giá trị làm việc ổn định), góc mở van V_2 tại điểm làm việc ổn định $m_o\%=50\%$.

- Để đảm bảo cân bằng năng lượng chọn lưu lượng nước làm mát cực đại $F_{jmax}=0,008m^3/s$, (gấp 2 lần giá trị làm việc ổn định), góc mở van V_1 là $m_{oj}\%=50\%$.

2.2 Xây dựng mô hình tuyến tính cho lò phản ứng CSTR và thiết kế điều khiển phản hồi:

Trên H. 10 là cấu trúc điều khiển phản hồi dùng bộ điều khiển PID. Có hai mạch vòng: Mạch vòng điều khiển mức và mạch vòng điều khiển nhiệt độ (nồng độ). Áp dụng phương pháp tuyến tính hóa [3] ta đi xây dựng mô hình tuyến tính hóa cho lò CSTR.



H. 10 Cấu trúc điều khiển lò phản ứng với hai mạch vòng điều khiển

2.2.1. Tuyến tính hóa phương trình cân bằng khối lượng:

Từ phương trình cân bằng khối lượng được thiết lập ở (3), áp dụng phương pháp tuyến tính hóa quanh điểm làm việc (theo 2.1.5). Đặt giá trị biến thiên xung quanh điểm làm việc: Mức $\Delta h = h_0 - h$, góc mở van V_2 : $\Delta m\% = m_0\% - m\%$, Lưu lượng vào $\Delta f_1 = f_{10} - f_1$, lưu lượng ra $\Delta f_2 = f_{20} - f_2$ phương trình (3) được biến đổi tuyến tính hóa :

$$V_m \frac{dh}{dt} = F_1 - F_2 = F_1 - C_v m\% \sqrt{k_v h} \quad (7)$$

$$\frac{V_m}{F_{max}} \frac{dh}{dt} = f_1 - f_2. \quad (8)$$

Với: $f_1 = \frac{F_1}{F_{max}}; f_2 = \frac{F_2}{F_{max}} = \frac{C_v m\% \sqrt{k_v h}}{F_{max}}$

$$\Delta f_2 = \frac{1}{F_{ma}} (m_0\% \frac{C_v \sqrt{k_v h_0}}{2} \Delta h + \Delta m\% C_v \sqrt{k_v h_0})$$

$$\frac{V_m}{F_{ma}} \frac{d\Delta h}{dt} = \Delta f_1 - \Delta f_2 \quad (9)$$

$$= \Delta f_1 - \frac{1}{F_{ma}} (\frac{1}{2\sqrt{h_0}} m_0\% C_v \sqrt{k_v} \Delta h + \Delta m\% C_v \sqrt{k_v h_0})$$

$$\frac{V_m}{F_{ma}} \frac{d\Delta h}{dt} = \Delta f_1 - \Delta f_2 \quad (10)$$

Giải kết hợp (7), (8), (9), (10) và đưa về dạng hàm truyền ta có :

$$\Delta h(s) = \frac{k_1}{\tau_1 s + 1} \Delta m\%(s) + \frac{k_2}{\tau_1 s + 1} \Delta f_1(s) \quad (11)$$

Trong đó:

$$\tau_1 = \frac{2\sqrt{h_0} V_m}{C_v m_0\% \sqrt{k_v}}, k_1 = -\frac{2h_0}{m_0\%}, k_2 = \frac{2\sqrt{h_0} F_{max}}{C_v m_0\% \sqrt{k_v}}$$

$$k_v = 19,62 m^2 / s^2; F_{max} = 0,002 m^3 / s;$$

$$C_v = \frac{0,002}{\sqrt{19,62}} m^2 = 4,51510^{-4} m^2 = 4,515 cm^2;$$

Thay số vào ta được:

$\tau_1 = 100 s, k_1 = -4, k_2 = 4$ là hằng số thời gian mạch vòng mức.

2.2.2. Tuyến tính hóa phương trình cân bằng thành phần

Từ phương trình cân bằng thành phần được thiết lập ở (4), áp dụng phương pháp tuyến tính hóa xung quanh điểm làm việc (theo 2.1.5); Tỷ số F/V được coi gần đúng không đổi (khi thay đổi lưu lượng đầu vào thì thể tích cũng tỷ lệ theo). Đặt biến $\Delta C_{A2} = C_{A20} - C_{A2}$;

$\Delta T = T_{10} - T_1$. Biến đổi (6) ta có:

$$\frac{d \Delta C_{A2}}{dt} = \frac{F_{max} f_{10}}{V} \Delta C_{A1} - \left[\frac{F_{max} f_{10}}{V} + k_0 e^{-E/(RT_0)} \right] \Delta C_{A2} \quad (12)$$

$$- \frac{C_{A20} E}{RT_0^2} k_0 e^{-E/(RT_0)} \Delta T + \frac{C_{A10} - C_{A20}}{V} \Delta f_1 F_{max}$$

Đưa (16) về dạng hàm truyền ta có:

$$\Delta C_{A2}(s) = \frac{K_3}{\tau_2 s + 1} \Delta C_{A1}(s) + \frac{K_4}{\tau_2 s + 1} \Delta T(s) + \frac{K_5}{\tau_2 s + 1} \Delta f_1(s) \quad (13)$$

Trong đó:

$$\tau_2 = \frac{1}{\left[\frac{F_{max} f_{10}}{V} + r_0 \right]}; r_0 = k_0 e^{-E/(RT_0)}$$

$$k_3 = \tau_2 \frac{F_{max} f_{10}}{V}; k_4 = \tau_2 \frac{C_{A20} E}{RT_0^2} r_0 \quad (14)$$

$$k_5 = \tau_2 \frac{C_{A10} - C_{A20}}{V} F_{max}$$

Biến đổi phương trình (13) về dạng:

$$\Delta C_{A2}(s) = \frac{K_3}{\tau_2 s + 1} \Delta C_{A1}(s) + \frac{K_4}{\tau_2 s + 1} \Delta T(s) + \frac{K_5}{\tau_2 s + 1} \Delta f_1(s) \quad (15)$$

Thay số vào thu được:

$$\tau_2 = 501.1609s; k_3 = 0.5012; k_4 = 0.0053; k_5 = 0.5012$$

2.2.3. Tuyến tính hóa phương trình cân bằng nhiệt phản ứng

Phương trình cân bằng năng lượng được thiết lập ở (5), áp dụng phương pháp tuyến tính hóa xung quanh điểm làm việc (theo 2.1.5). Đặt biến $\Delta T_j = T_{j0} - T_j$, biến đổi (5) ta có:

$$\frac{d\Delta T}{dt} = \frac{F_{max}}{V} f_{10} \Delta T_1 - \left[-\frac{\Delta H}{\rho C_p} C_{A20} \left(\frac{E}{RT_0^2} \right) r_0 + \frac{F_{max}}{V} f_{10} + \frac{K_T A_h}{\rho C_p V} \right] \Delta T$$

$$+ \frac{K_T A_h}{\rho C_p V} \Delta T_j + \frac{T_{10} - T_0}{V} F_{max} \Delta f_1 + \frac{\Delta H}{\rho C_p} r_0 \Delta C_{A2}$$

(16)

$$\Delta T = \frac{k_6}{\tau_3 s + 1} \Delta T_1(s) + \frac{k_7}{\tau_3 s + 1} \Delta C_{A2} + \frac{k_8}{\tau_3 s + 1} \Delta T_j + \frac{k_9}{\tau_3 s + 1} \Delta f_1 \quad (17)$$

Trong đó:

$$\tau_3 = \frac{1}{\left[-\frac{\Delta H}{\rho C_p} C_{A20} \left(\frac{E}{RT_0^2} \right) r_0 + \frac{F_{\max}}{V} f_{10} + \frac{K_T A_h}{\rho C_p V} \right]}$$

$$k_6 = \tau_3 \frac{F_{\max}}{V} f_{10} \quad (18)$$

$$k_7 = \tau_3 \frac{\Delta H}{\rho C_p} r_0; k_8 = \tau_3 \frac{K_T A_h}{\rho C_p V}$$

$$k_9 = \tau_3 \frac{T_{10} - T_0}{V} F_{\max}$$

Biến đổi (17) về dạng hàm truyền ta có:

$$\Delta T(s) = \frac{k_6}{\tau_3 s + 1} \Delta T_1(s) + \frac{k_7}{\tau_3 s + 1} \Delta C_{A2}(s) + \frac{k_8}{\tau_3 s + 1} \Delta T_j(s) + \frac{k_9}{\tau_3 s + 1} \Delta f_1(s) \quad (19)$$

Thay số vào ta được:

$$\tau_3 = 685.5004s; k_6 = 0.6855; k_7 = 1.3646;$$

$$k_8 = 0.329; k_9 = 117.9062;$$

2.2.4. Tuyến tính hóa phương trình cân bằng nhiệt Jacket

Từ phương trình cân bằng năng lượng cho Jacket được thiết lập ở (6), áp dụng phương pháp tuyến tính hóa xung quanh điểm làm việc (theo 2.15); Đặt biến $\Delta T_{j1} = T_{j10} - T_{j1}$, $\Delta F_j = F_{j0} - F_j$. Biến đổi (6) ta có:

$$\frac{d\Delta T_j}{dt} = \frac{T_{j10} - T_{j0}}{V_j} F_{j\max} \Delta f_j + \frac{F_{j0}}{V_j} \Delta T_{j1} - \left[\frac{F_{j0}}{V_j} + \frac{K_T A_h}{\rho_j C_{pj} V_j} \right] \Delta T_j + \frac{K_T A_h}{\rho_j C_{pj} V_j} \Delta T \quad (20)$$

$$\Delta T_j = \frac{k_{10}}{\tau_4 s + 1} \Delta f_j + \frac{k_{11}}{\tau_4 s + 1} \Delta T_{j1} + \frac{k_{12}}{\tau_4 s + 1} \Delta T \quad (21)$$

$$\tau_4 = \frac{1}{\left[\frac{F_{j0}}{V_j} + \frac{K_T A_h}{\rho_j C_{pj} V_j} \right]}; k_{10} = \tau_4 \frac{T_{j10} - T_{j0}}{V_j} F_{j\max}; \quad (22)$$

$$k_{11} = \tau_4 \frac{F_{j0}}{V_j}; k_{12} = \tau_4 \frac{K_T A_h}{\rho_j C_{pj} V_j}$$

Biến đổi phương trình (21) về dạng:

$$\Delta T_j(s) = \frac{K_{10}}{\tau_4 s + 1} \Delta f_j(s) + \frac{K_{11}}{\tau_4 s + 1} \Delta T_{j1}(s) + \frac{K_{12}}{\tau_4 s + 1} \Delta T(s) \quad (23)$$

Thay số vào (22) thu được:

$$\tau_4 = 94.47s; k_{10} = -116.2573;$$

$$k_{11} = 1.8894; k_{12} = 0.0553$$

2.2.5. Mô hình tuyến tính hóa lò phản ứng CSTR

Từ phương trình (11), (15), (19) và (23), viết gọn dưới dạng hàm truyền dưới dạng sau:

$$\Delta h(s) = G_1(s) \Delta m\%(s) + G_2(s) \Delta f_1(s) \quad (24)$$

$$\Delta C_{A2}(s) = G_3(s) \Delta C_{A1}(s) + G_4(s) \Delta T(s) + G_5(s) \Delta f_1(s) \quad (25)$$

$$\Delta T(s) = G_6(s) \Delta T_1(s) + G_7(s) \Delta C_{A2}(s) + G_8(s) \Delta T_j(s) + G_9(s) \Delta f_1(s) \quad (26)$$

$$\Delta T_{j2}(s) = G_{10}(s) \Delta f_j(s) + G_{11}(s) \Delta T_{j1}(s) + G_{12}(s) \Delta T(s) \quad (27)$$

Trong đó:

$$G_1(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1}; \quad G_2(s) = \frac{K_2}{\tau_1 s + 1}$$

$$G_3(s) = \frac{K_3}{\tau_2 s + 1}; \quad G_4(s) = \frac{K_4}{\tau_2 s + 1};$$

$$G_5(s) = \frac{K_5}{\tau_2 s + 1}; \quad G_6(s) = \frac{K_6}{\tau_3 s + 1};$$

$$G_7(s) = \frac{K_7}{\tau_3 s + 1}; \quad G_8(s) = \frac{K_8}{\tau_3 s + 1};$$

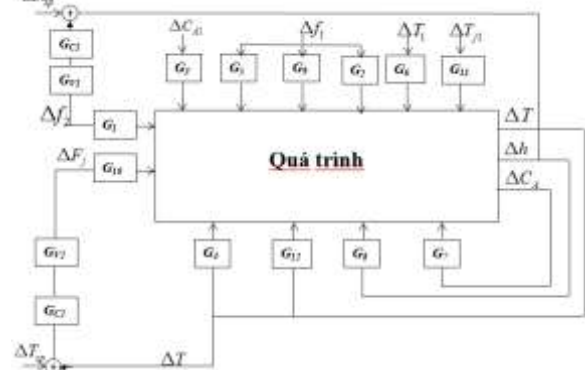
$$G_9(s) = \frac{K_9}{\tau_3 s + 1}; \quad G_{10}(s) = \frac{K_{10}}{\tau_4 s + 1};$$

$$G_{11}(s) = \frac{K_{11}}{\tau_4 s + 1}; \quad G_{12}(s) = \frac{K_{12}}{\tau_4 s + 1}$$

Hàm truyền của van điều khiển V1 và V2 (là van tuyến tính):

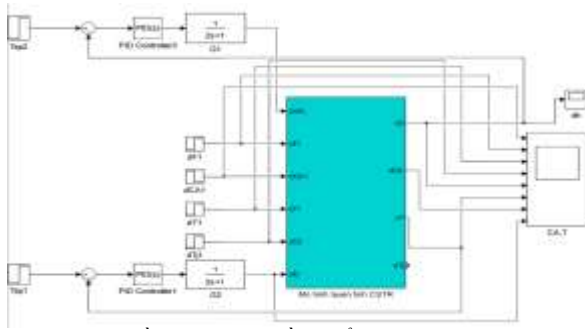
$$G_{v1}(s) = \frac{K_{v1}}{\tau_{v1} s + 1}; G_{v2}(s) = \frac{K_{v2}}{\tau_{v2} s + 1} \quad (28)$$

Sơ đồ cấu trúc điều khiển với mô hình tuyến tính hóa xung quanh điểm làm việc lò phản ứng được mô tả trên hình H. 11, trong đó biến đầu ra ΔC_{A2} , ΔT , Δh (đại lượng cần điều khiển), ΔT_j (biến tự do), đại lượng điều khiển $\Delta m\%$, Δf_j , biến nhiễu ΔC_{A1} , Δf_1 , ΔT_1 , ΔT_{j1} . Hai bộ điều khiển: Điều khiển mức, điều khiển nhiệt độ (các bộ PID được chỉnh định theo Tuner của Matlab). Các hàm truyền quá trình theo (24), (25), (26), (27), (28).



H. 11 Sơ đồ cấu trúc điều khiển lò phản ứng CSTR với mô hình tuyến tính

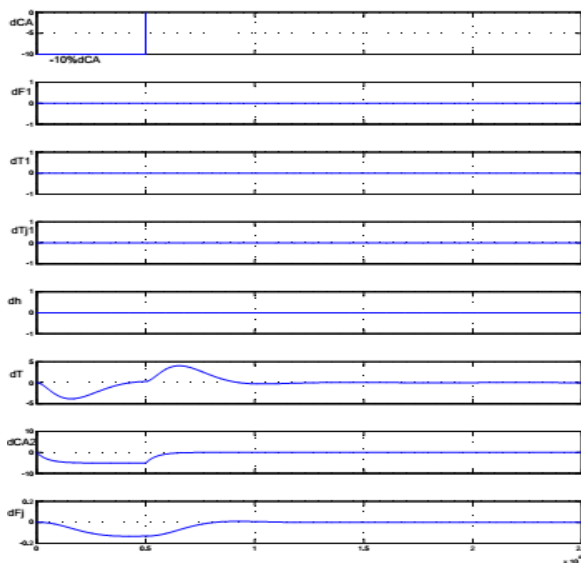
Hình H. 12 là mô hình mô phỏng tuyến tính hóa điều khiển lò phản ứng CSTR



H. 12 Sơ đồ mô phỏng điều khiển lò phản ứng CSTR với mô hình tuyến tính

2.2.6 Khảo sát hệ điều khiển với tác động các nhiễu đầu vào trên mô hình tuyến tính:

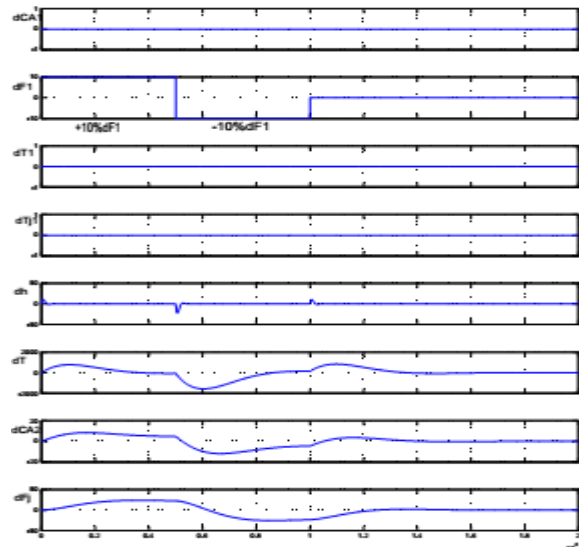
Nhiều ΔC_{A1} giảm 10%, ta có các đáp ứng như hình H. 13.



H. 13 Các đáp ứng của hệ khi thay đổi $-10\% \Delta C_{A1}$

Ta thấy khi nồng độ đầu vào ΔC_{A1} giảm 10% thì mức h không thay đổi, nhiệt độ ΔT giảm 4% rồi tiến về 0 và ổn định tại 0, nồng độ đầu ra ΔC_{A2} giảm sau đó ổn định, có sai lệch tĩnh 5%, lưu lượng nước làm mát Δf_j giảm 0.11%, sau đó về 0 và ổn định.

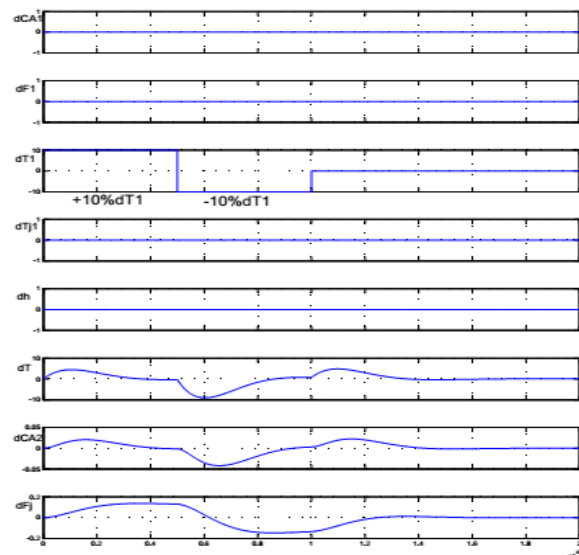
Nhiều Δf_j thay đổi $\pm 10\%$ ta có các đáp ứng như hình H. 14



H. 14 Các đáp ứng của hệ khi thay đổi $\pm 10\% \Delta f_1$

Ta thấy khi lưu lượng chất đầu vào tăng 10%, mức h tăng và đáp ứng nhanh về 0 ngay, nhiệt độ T tăng và sau đó ổn định tại 0, nồng độ đầu ra ΔC_{A2} tăng và có sai lệch tĩnh, lưu lượng nước làm mát F_j tăng và sau đó về lại 0 và ổn định. Còn khi lưu lượng chất đầu vào giảm 10%, mức h cũng giảm và đáp ứng nhanh về 0 ngay, nhiệt độ T giảm sau đó ổn định tại 0, nồng độ đầu ra ΔC_{A2} giảm và có sai lệch tĩnh, lưu lượng nước làm mát F_j giảm và sau đó về lại 0 và ổn định.

Nhiều ΔT_1 thay đổi $\pm 10\%$ ta có các đáp ứng như hình H. 15

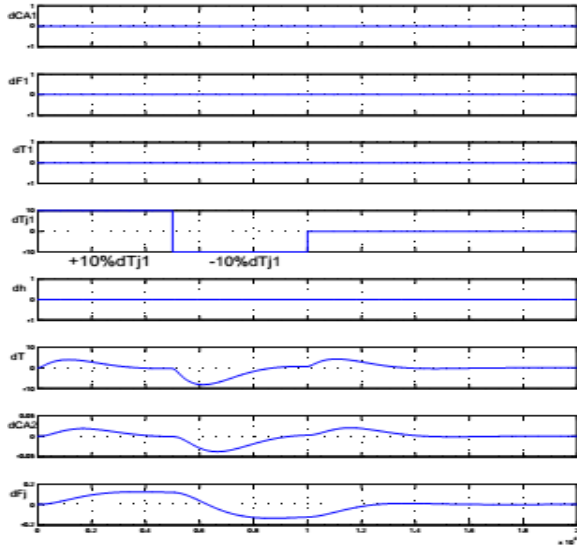


H. 15 Các đáp ứng của hệ khi thay đổi $\pm 10\% \Delta T_1$

Ta thấy khi nhiệt độ đầu vào ΔT_1 tăng 10%, mức h không thay đổi, nhiệt độ T tăng sau đó ổn định tại 0, nồng độ đầu ra ΔC_{A2} tăng và sau đó về lại 0 và ổn định, lưu lượng nước làm mát F_j tăng, sau đó về lại 0 và ổn định. Còn khi nhiệt độ đầu vào giảm 10%, mức h không đổi và đáp ứng nhanh về 0 ngay, nhiệt độ T giảm sau đó ổn định tại 0, nồng độ đầu ra ΔC_{A2}

giảm, sau đó về lại 0 và ổn định, lưu lượng nước làm mát F_j giảm và sau đó về lại 0 và ổn định.

Nhiều ΔT_{j1} thay đổi $\pm 10\%$ ta có các đáp ứng như hình H. 16

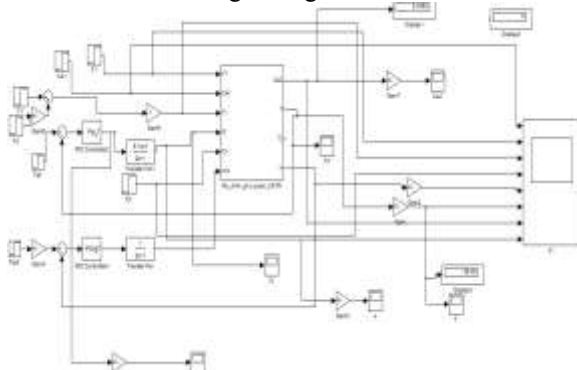


H. 16 Các đáp ứng của hệ khi thay đổi $\pm 10\% \Delta T_{j1}$

Ta thấy khi nhiệt độ đầu vào ΔT_1 tăng 10%, mức h không thay đổi, nhiệt độ T tăng sau đó ổn định tại 0, nồng độ đầu ra ΔC_{A2} tăng và sau đó về lại 0 và ổn định, lưu lượng nước làm mát F_j tăng, sau đó về lại 0 và ổn định. Còn khi nhiệt độ đầu vào giảm 10%, mức h không đổi và đáp ứng nhanh về 0 ngay, nhiệt độ T giảm sau đó ổn định tại 0, nồng độ đầu ra ΔC_{A2} giảm, sau đó về lại 0 và ổn định, lưu lượng nước làm mát F_j giảm và sau đó về lại 0 và ổn định.

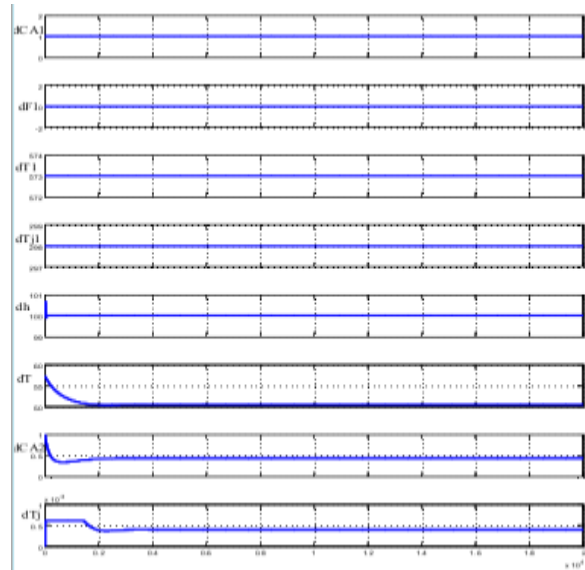
2.3 Hệ điều khiển phản hồi PID cho lò phản ứng với mô hình phi tuyến

Trên hình H. 17 là mô hình phi tuyến lò CSTR, ta kết hợp với điều khiển tuyến tính phản hồi PID và khảo sát các nhiễu tác động tương tự như 2.2.6



H. 17 Mô hình mô phỏng điều khiển phản hồi PID lò phản ứng CSTR cấu trúc phi tuyến

2.3.1. Xét hệ chưa có tác động của nhiễu:



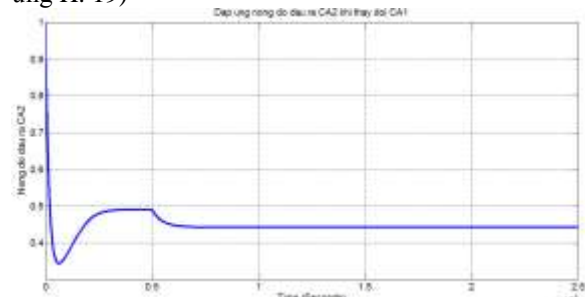
H. 18 Các đáp ứng của hệ khi khởi động chưa có nhiễu 2.3.2. Xét ảnh hưởng tác động nhiễu đầu vào:

Có bốn nhiễu đầu vào: Nhiệt độ đầu vào của hệ, nồng độ đầu vào, lưu lượng đầu vào và nhiệt độ nước làm mát thay đổi theo thông số sau:

- Nồng độ đầu vào C_{A1} thay đổi -10%
- Lưu lượng đầu vào F_1 thay đổi +10%
- Nhiệt độ đầu vào T_1 thay đổi +5%
- Nhiệt độ nước làm mát đầu vào T_{j1} thay đổi +10%

Vì sản phẩm đầu ra là nồng độ C_{A2} vì vậy ta chỉ xét đáp ứng của C_{A2} khi có tác động của nhiễu

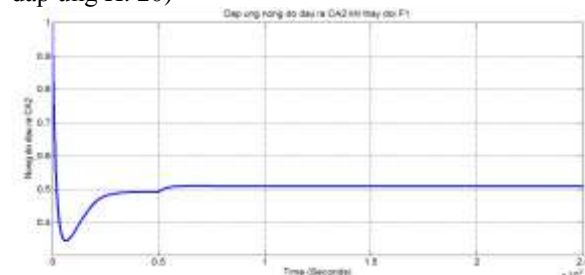
- Xét ảnh hưởng của nhiễu nồng độ đầu vào (xem đáp ứng H. 19)



H. 19 Đáp ứng nồng độ đầu ra khi thay đổi -10% C_{A1}

Đến thời điểm 5000s, hệ đang làm việc ổn định. Tại 5000s, khi C_{A1} giảm 10%, nồng độ sản phẩm đầu ra C_{A2} giảm và ổn định, có sai lệch tĩnh 11,72%. Ảnh hưởng tác động xen kênh của mạch vòng mức là không đáng kể.

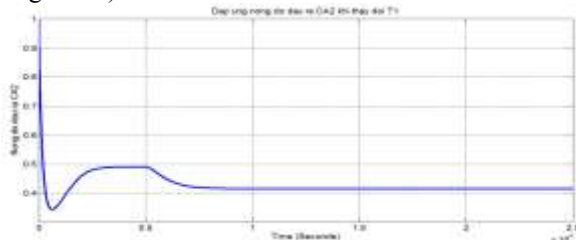
- Xét ảnh hưởng của nhiễu lưu lượng đầu vào (xem đáp ứng H. 20)



H. 20 Đáp ứng nồng độ đầu ra khi thay đổi

Đến thời điểm 5000s, hệ đang làm việc ổn định. Tại thời điểm 5000s, khi nhiệt độ F_1 tăng 10%, nồng độ sản phẩm đầu ra C_{A2} thay đổi và ổn định với sai lệch tĩnh 1,6%. Lý do mạch vòng điều khiển mức đã tác động đảm bảo cân bằng khối lượng nên nhiệt độ của lưu lượng đầu vào là không đáng kể, có thể bỏ qua.

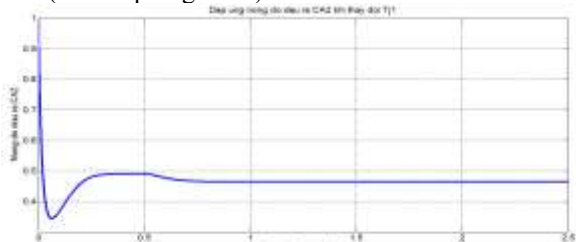
- Xét ảnh hưởng của nhiệt độ đầu vào (xem đáp ứng H. 21)



H. 21 Đáp ứng nồng độ đầu ra khi thay đổi +5% T_1

Đến thời điểm 5000s, hệ đang làm việc ổn định. Tại thời điểm 5000s, khi nhiệt độ T_1 tăng 5%, nồng độ sản phẩm đầu ra C_{A2} giảm và ổn định với sai lệch tĩnh 17,14%. Ảnh hưởng tác động xen kênh của mạch vòng mức là không đáng kể.

- Xét ảnh hưởng của nhiệt độ đầu vào nước làm mát (xem đáp ứng H.22)



H. 22 Đáp ứng nồng độ đầu ra khi thay đổi +10% T_1

Đến thời điểm 5000s, hệ đang làm việc ổn định. Tại thời điểm 5000s, khi nhiệt độ T_1 tăng 10%, nồng độ sản phẩm đầu ra C_{A2} giảm và ổn định với sai lệch tĩnh 7,38%. Ảnh hưởng tác động xen kênh của mạch vòng mức là không đáng kể.

Nhận xét chung: Hệ điều khiển lò phản ứng với bộ điều khiển PID cho mô hình tuyến tính và phi tuyến đều đảm bảo ổn định khi nhiễu đầu vào tác động nhỏ. Đối với mô hình tuyến tính, hệ cho đáp ứng tốt hơn và chất lượng sản phẩm đầu ra đảm bảo (có sai lệch tĩnh nhưng ở giá trị nhỏ).

Đối với mô hình phi tuyến, hệ điều khiển luôn tồn tại sai lệch tĩnh của chất lượng sản phẩm (nồng độ), sai lệch tĩnh càng tăng khi biên độ nhiễu tăng. Ảnh hưởng nhiễu tới nồng độ sản phẩm được phân tích như sau:

- Ảnh hưởng của nhiệt độ dung dịch đầu vào gây sai lệch là lớn nhất (17,14% khi nhiễu 5%).

- Kế tiếp là ảnh hưởng của nhiễu nồng độ đầu vào, nhiệt độ đầu vào nước làm mát, đều gây sai lệch tĩnh lớn.

- Tác động xen kênh giữa mạch vòng mức tới mạch vòng nhiệt độ và ngược lại là không đáng kể, vì mạch vòng mức tác động rất nhanh so với mạch vòng nhiệt độ.

- Thực tế trong sản xuất, lò phản ứng ta xét là công đoạn cuối cùng của quá trình sản xuất hóa chất (cho

sản phẩm đầu ra). Nên khi xét bốn tác động nhiễu đầu vào ta thấy: Nhiễu lưu lượng đầu vào F_1 đã được mạch vòng điều khiển mức khắc phục. Nhiễu nhiệt độ đầu vào của nước làm mát hoàn toàn có thể làm chủ khi vận hành. Nhiễu nhiệt độ đầu vào là có thể kiểm soát và khắc phục được thông qua một hệ ổn định nhiệt độ trước khi cấp vào lò. Riêng nhiễu nồng độ đầu vào là khó khắc phục nhất vì không đo được và là biến ngẫu nhiên (là thông số của phản ứng phía trước).

3. Kết luận

Bài báo đã xây dựng được mô hình lò phản ứng CSTR ở dạng tổng quát (mô hình phi tuyến), tính chọn được thông số vận hành. Thiết kế được điều khiển lò phản ứng CSTR trên mô hình tuyến tính xung quanh điểm làm việc cân bằng (mô hình tuyến tính). Đánh giá được tác động của nhiễu đầu vào khi vận hành lò với bộ điều khiển tuyến tính (cho mô hình phi tuyến). Kết quả cho thấy: Lò CSTR có thể làm việc ổn định khi có nhiễu đầu vào với biên độ không lớn tác động, tuy nhiên chất lượng sản phẩm đầu ra luôn luôn có sai lệch tĩnh. Đặc biệt khi nhiệt độ đầu vào thay đổi lớn hệ sẽ mất ổn định, chất lượng sản phẩm không đạt yêu cầu (phế phẩm). Để đảm bảo chất lượng sản phẩm, cần thiết kế điều khiển theo hai hướng: Điều khiển bù nhiễu và điều khiển phi tuyến cho CSTR, đây là nội dung tác giả sẽ nghiên cứu tiếp.

Tài liệu tham khảo

- [1] B. Q. Khánh, P. Q. Đăng, N. H. Phương, and V. T. Nguyễn, *Điều khiển quá trình*: Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2014.
- [2] M. T. Đ. Thanh and Đ. Q. Vinh, "Xây dựng mô hình điều khiển cho lò phản ứng liên tục CSTR (Continuous stirred tank reactor)," *tạp chí Khoa học công nghệ Đại học Đà Nẵng*, vol. 01(86), 2015.
- [3] B. R. a. B. Betlem, *Process Dynamics and Control*: John Wiley & Sons 2006.
- [4] P. J. Thomas, *Simulation of industrial processes for control engineers*: Elsevier Science & Technology Books, 1999.
- [5] W. L. Luyben, *Process modeling simulation and control for chemical engineers* McGraw-Hill 1996.



Đoàn Quang Vinh sinh năm 1962. Ông nhận bằng đại học ngành Kỹ thuật điện tại trường đại học Điện máy Plazen – Tiệp Khắc, năm 1986. Ông nhận bằng Tiến sĩ của trường Đại học Tây Tiệp – CH Czech, năm 1996, và được công nhận Phó Giáo sư năm 2004. Đã có nhiều công trình nghiên cứu

cứu khoa học các cấp. Từ năm 1986 đến nay là giảng viên của Đại học Đà Nẵng. Hiện đang là Phó Giám đốc Đại học Đà Nẵng. Hướng Nghiên cứu chính: Điện tử công suất, truyền động điện, điều khiển quá trình,..



Mai Thị Đoan Thanh sinh năm 1982, nhận bằng thạc sỹ Tự động hóa tại Đại học Đà Nẵng năm 2011, về nghiên cứu ứng dụng bộ lọc tích cực PWM để cải thiện chất lượng điện năng trong công nghiệp. Chị hiện đang là nghiên cứu sinh tại Đại học Đà Nẵng về chuyên ngành Tự động hóa. NCS Mai Thị

Đoan Thanh tham gia giảng dạy tại Trường Cao đẳng nghề Đà Nẵng từ năm 2005 đến nay. Hiện đang là giảng viên, Phó Trưởng phòng Kiểm định và Hợp tác phát triển trường Cao đẳng nghề Đà Nẵng. Hướng nghiên cứu chính về Điều khiển tự động, Điều khiển quá trình,...