

# ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI CHO HỆ QUÁ TRÌNH HÓA HỌC CÓ THÔNG TIN KHÔNG ĐẦY ĐỦ

## STATE ESTIMATION FOR CHEMICAL PROCESS SYSTEMS WITH INCOMPLETE STATE INFORMATION

Lâm Thuận Thành, Hoàng Ngọc Hà

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh; ha.hoang@hcmut.edu.vn

**Tóm tắt** - Trong kỹ thuật hệ thống quá trình hóa học, việc thu thập các dữ liệu đo đạc là phần không thể thiếu để phục vụ việc vận hành và điều khiển hệ thống. Tuy nhiên, trong các ứng dụng thực tế, việc lắp đặt các hệ thống nhằm đo đạc các tham số thường không dễ dàng và có thể rất tốn kém. Có nhiều phương pháp nhằm khắc phục cũng như hỗ trợ giải quyết những khó khăn này, trong đó phải kể đến bộ quan sát. Bộ quan sát là một thuật toán giúp ước lượng các giá trị không/hoặc khó đo được (ví dụ nồng độ/số mol,...) từ những giá trị đo được dễ hơn (như nhiệt độ,...). Bài báo sẽ tiến hành nghiên cứu và ứng dụng bộ quan sát tiệm cận để ước lượng tham số hệ thống quá trình (ví dụ bình phản ứng hoá học hay thiết bị chưng cất phân ứng...). Mô phỏng và so sánh giá trị nồng độ ước lượng thu được từ hệ có bộ quan sát tiệm cận với giá trị nồng độ chính xác sẽ chỉ ra phạm vi ứng dụng của phương pháp đề xuất.

**Từ khóa** - mô hình hoá; bộ quan sát tiệm cận; hệ động lực; ước lượng trạng thái; điều khiển quá trình.

### 1. Đặt vấn đề

Thiết bị phản ứng mở là hệ động lực phi tuyến và có thể hoạt động với nhiều trạng thái cân bằng dừng ổn định/không ổn định do bị ràng buộc bởi các nguyên lý bảo toàn vật chất và năng lượng, kết hợp với các phương trình cấu thành (động học phản ứng, hiện tượng truyền vận và truyền khối...). Do sự có mặt phổ biến của thiết bị phản ứng mở trong các nhà máy hóa chất, dầu khí..., việc vận hành, giám sát và điều khiển nó đặt ra nhiều thách thức thú vị [1]. Thật vậy, vấn đề ước lượng các thông số trạng thái trong vận hành, giám sát và điều khiển thiết bị phản ứng mở đã thu hút được sự quan tâm ngày càng tăng của các nhà khoa học thông qua khái niệm bộ quan sát. Bộ quan sát là thuật toán giúp ước lượng các giá trị không/hoặc khó đo được (ví dụ nồng độ,...) từ những giá trị đo được dễ hơn (như nhiệt độ,...) [2].

Năm 1990, Bastin và Dochain đã xây dựng và đề xuất bộ quan sát tiệm cận cho hai quá trình sinh học: quá trình phân hủy kỵ khí (quá trình liên tục), quá trình sản xuất PHB – PolyHydroxyButyrate (quá trình bán liên tục) và đưa ra các điều kiện để áp dụng nó [2]. Năm 1992, Dochain và cộng sự đã đề cập đến việc xây dựng và khảo sát bộ quan sát tiệm cận cho hệ thống thiết bị khuấy không đẳng nhiệt

cho trường hợp phản ứng sinh học  $A \xrightarrow{k_1} B \xrightarrow{k_2} C$  và chỉ ra sự hội tụ của bộ quan sát tiệm cận phụ thuộc vào điều kiện vận hành quá trình [3]. Năm 2003, Dochain đã so sánh bộ quan sát tiệm cận với một số bộ quan sát khác như: bộ quan sát thích nghi (adaptive observer), bộ quan sát phi tuyến (nonlinear observer), bộ quan sát Luenberger mở rộng (extended Luenberger observer), bộ quan sát Kalman mở rộng (extended Kalman observer)... Qua đó, tác giả đã đưa ra giới hạn chính của bộ quan sát tiệm cận là sự hội tụ của

**Abstract** - In the field of chemical process system engineering, complete information about process data is absolutely necessary for operation and control. However, in many industrial applications, the installation of measuring devices (i.e. sensors) can be troublesome and costly. There exists, among others, the so-called observer to circumvent this challenging issue. Observer is a computational algorithm that allows us to estimate unmeasurable or difficult-to-measure parameters (such as concentration/molar number, etc.) via the availability of easier-to-measure parameters (such as temperature, etc.). In this work, the asymptotic observer is studied and applied to estimate the unavailable parameters of chemical process systems (for example, biochemical reactors or reactive distillation column, etc). The numerical simulations and comparisons are given to show the applications of the proposed approach.

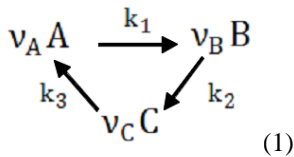
**Key words** - modeling; asymptotic observer; dynamical systems; state estimation; process control.

trạng thái ước lượng phụ thuộc vào điều kiện vận hành [4]. Năm 2012, Hoang và cộng sự đã xây dựng và mô phỏng hệ một phản ứng với hai cấu tử:  $v_A A \rightarrow v_B B$  và đã khảo sát cho hai trường hợp là hệ vòng hở (open loop) và hệ vòng kín (close loop). Mỗi trường hợp có hai trường hợp con là hệ có bộ quan sát tiệm cận và hệ không có bộ quan sát tiệm cận [5]. Năm 2013, Hoang và cộng sự đã mở rộng và đưa ra phân lý thuyết cho bộ quan sát tiệm cận trên hệ nhiều phản ứng với nhiều cấu tử; và đã khảo sát cho cả hai trường hợp, vòng hở và vòng kín [6]. Năm 2015, Mohd và cộng sự đã chỉ ra việc lựa chọn bộ quan sát thích hợp nhất cho một hệ thống quá trình cụ thể là nhiệm vụ quan trọng nhưng không hề dễ dàng do sự đa dạng của các phương pháp, loại quan sát, phạm vi ứng dụng và tính chất của quá trình hóa học sẵn có. Chính vì vậy, nhóm tác giả đã tổng hợp và sắp xếp, phân thành sáu loại bộ quan sát ước lượng chính; đưa ra so sánh ưu nhược điểm cùng điều kiện áp dụng và xu hướng phát triển trong thời gian tới của từng loại [7]. Ngoài ra, [7] còn đưa ra cái nhìn tổng quan về sự phát triển gần đây của bộ quan sát tiệm cận. Ưu điểm nổi bật của bộ quan sát tiệm cận là nó không cần đến thông tin về động học quá trình phản ứng/tốc độ phản ứng (lưu ý là các đại lượng này được xác định dựa trên thực nghiệm).

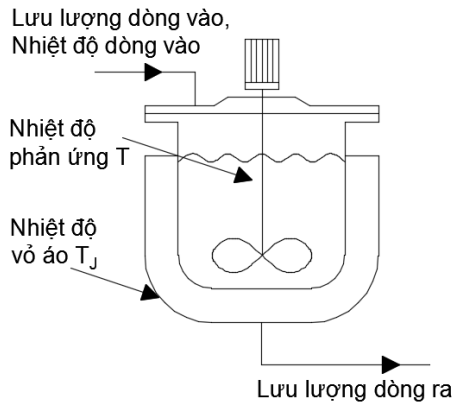
Bài báo được tổ chức như sau. Phần 2 giới thiệu mô hình toán thiết bị phản ứng mở, mà trường hợp được chọn để khảo sát trong nghiên cứu này là thiết bị phản ứng khuấy liên tục lý tưởng. Phần 3 phát triển bộ quan sát tiệm cận để ước lượng số mol/nồng độ các cấu tử trong thiết bị từ đo lường nhiệt độ sẵn có. Phần 4 dành cho việc mô phỏng để kiểm chứng các kết quả đề xuất. Kết luận và hướng phát triển của bộ quan sát tiệm cận sẽ được trình bày trong phần 5.

## 2. Mô hình hóa

Xét phản ứng hóa học xảy ra trong thiết bị phản ứng khuấy liên tục lý tưởng (xem hình 1) có phương trình tỷ lệ lượng như sau<sup>1</sup>:



Với  $v_A, v_B, v_C$  là các hệ số tỷ lệ lượng.



Hình 1. Thiết bị phản ứng khuấy liên tục lý tưởng

Các giả thuyết mô hình hóa sau được xem xét:

(A1) Lưu chất lỏng đẳng áp, lý tưởng và không nén được.

(A2) Nhiệt trao đổi với vỏ áo được thể hiện qua:

$$Q_j = \lambda(T_j - T) \quad (2)$$

Trong đó  $\lambda$  là hệ số trao đổi nhiệt hiệu dụng,  $\lambda$  không phụ thuộc vào nhiệt độ và thành phần của hỗn hợp.  $T_j$  là nhiệt độ vỏ áo làm mát.

(A3) Dòng nhập liệu cấu tử  $i$  ( $i=A, B, C$ ) ở nhiệt độ cố định  $T_1$  và tốc độ pha loãng  $\delta = \frac{F}{V}$  không đổi, trong đó  $F$  là lưu lượng thể tích (đơn vị thể tích/s),  $V$  là thể tích thiết bị (đơn vị thể tích). Nhiệt dung riêng của cấu tử  $i$   $C_{pi}$  ( $i = A, B, C$ ) xem là hằng số.

(A4) Tốc độ phản ứng được miêu tả theo định luật tác dụng khối lượng (mass-action-law):

$$r_j V = k_j(T) F_j (N_A^{v_{Aj}} N_B^{v_{Bj}} \dots) \quad (3)$$

trong đó  $k_j(T)$  là hằng số tốc độ phản ứng thứ  $j$  của pha lỏng,  $F_j$  ( $j = 1, \dots, n_r$ ) là hàm phi tuyến với các đối số [5, 6].

Trong nghiên cứu này,  $k_j(T)$  giả sử tuân theo luật thực nghiệm Arrhenius:

$$k_j(T) = k_{0j} \exp\left(\frac{-E_{aj}}{RT}\right) \quad (4)$$

Trong đó  $k_{0j}$  là hằng số động học và  $E_{aj}$  là năng lượng hoạt hóa.  $R$  là hằng số khí lý tưởng.

Để đơn giản hóa, bài báo sẽ xét hệ phản ứng (1) có các hệ số tỷ lệ lượng bằng 1 (nghĩa là  $v_A = v_B = v_C = 1$ ) và phản ứng 1, 2, 3 là các phản ứng bậc 1 theo số mol tác chất (tức là biểu thức tốc độ phản ứng lấy dạng tường minh của nó được rút ra từ (3)).

Dưới giả thiết (A1), cân bằng năng lượng được viết thông qua enthalpy  $H$  [5, 6, 8, 9]. Do đó, hệ cân bằng vật chất và năng lượng là:

$$\begin{cases} \frac{dN_A}{dt} = \delta(N_{A1} - N_A) - r_1 V + r_3 V \\ \frac{dN_B}{dt} = \delta(N_{B1} - N_B) + r_1 V - r_2 V \\ \frac{dN_C}{dt} = \delta(N_{C1} - N_C) - r_3 V + r_2 V \\ \frac{dH}{dt} = \delta(H_1 - H) + Q_j \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó, kí hiệu  $I$  nhỏ chỉ giá trị dòng vào.

Ta có, enthalpy toàn phần của hệ phản ứng là:

$$H = \sum_i N_i h_i(T) \quad (6)$$

Với  $h_i(T) = C_{pi}(T - T_{ref}) + h_{iref}$

$T_{ref}, h_{iref}, C_{pi}$  lần lượt là nhiệt độ tham khảo, enthalpy theo mol tham khảo của cấu tử  $i$  và nhiệt dung riêng của cấu tử  $i$  ( $A, B, C$ ). Bằng các phép biến đổi, phương trình cân bằng năng lượng  $\frac{dH}{dt}$  của (5) được viết lại dưới dạng tường minh theo nhiệt độ [10]:

$$C_p \frac{dT}{dt} = \delta C_{pI}(T_1 - T) + Q_j + \sum_{j=1}^3 (-\Delta H_{Rj}) r_j V \quad (7)$$

Với  $C_p = C_{pA} N_A + C_{pB} N_B + C_{pC} N_C$  là tổng nhiệt dung riêng. Bản chất tỏa nhiệt hay thu nhiệt thể hiện qua nhiệt của phản ứng hay enthalpy của phản ứng  $\Delta H_{Rj}$  ( $j = 1, 2, 3$ ):

$$\Delta H_{R1} = -h_A + h_B < 0 \quad (8)$$

$$\Delta H_{R2} = -h_B + h_C < 0 \quad (9)$$

$$\Delta H_{R3} = -h_C + h_A > 0 \quad (10)$$

## 3. Thiết kế bộ quan sát tiệm cận

**Giả thuyết nghiên cứu:** giả sử nhiệt độ  $T$  và số mol của 1 trong 3 cấu tử ( $N_A, N_B, N_C$ ) là giá trị đo được online.

**Mục tiêu bài toán:** Ước lượng 2 giá trị số mol chưa biết còn lại.

<sup>1</sup> Phản ứng xem xét là hình thức. Tuy nhiên, mọi phản ứng thực tế thuộc về dạng này sẽ được xử lý bằng cách tương tự. Kết quả phát triển trong bài báo hoàn toàn có thể mở rộng đến các hệ phản ứng phức tạp hơn.

Như vậy, ta cần thiết kế bộ quan sát với đặc tính không cần biết thông tin về động học phản ứng của hệ phản ứng (thường thông tin này khó xác định và nó chỉ được xác định thông qua thực nghiệm) và không phụ thuộc vào bản chất tỏa nhiệt hay thu nhiệt của phản ứng. Trong trường hợp này, bộ quan sát thiết kế được gọi là bộ quan sát tiệm cận (asymptotic observer) [3, 5, 6].

Từ (5), ta viết lại hệ phương trình này dưới dạng rút gọn:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \delta(N_I - N) + vrV \\ \frac{dH}{dt} = \delta(H_I - H) + Q_J \end{cases} \quad (11)$$

Với:  $N = (N_A, N_B, N_C)^T$  là vector số mol,  $r = (r_1, r_2, r_3)^T$  là vector tốc độ phản ứng và

$$v = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \text{ là ma trận hệ số tỷ lệ lượng}^2.$$

Luôn tồn tại các ma trận (khả nghịch) P và Q sao cho<sup>3</sup>:

$$PvQ = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ hay nói cách khác, } v = P^{-1} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} Q^{-1} \quad (12)$$

Ta dễ dàng tìm được:  $P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$  và

$$Q = - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Thay (12) vào phương trình cân bằng vật chất của (11), ta được:

$$\frac{dN}{dt} = \delta(N_I - N) + P^{-1} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} Q^{-1} rV \quad (13)$$

Hay (13) tương đương với phương trình sau :

$$P \frac{dN}{dt} = \delta(PN_I - PN) + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} Q^{-1} rV \quad (14)$$

Đặt biến mới  $Z = (Z_1, Z_2, Z_3)^T = PN$  và  $R = Q^{-1} rV$  (R gọi là vector tốc độ tổng quát). Phương trình (14) trở thành:

$$\frac{dZ}{dt} = \delta(Z_I - Z) + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} R \quad (15)$$

Từ (15), ta thấy  $Z_3$  là trạng thái không phụ thuộc động học phản ứng. Tương tự, ta thấy phương trình cân bằng

năng lượng  $\frac{dH}{dt}$  của (5) (hay (11)) cũng không phụ thuộc

vào động học phản ứng. Từ đó, ta rút ra bộ quan sát tiệm cận của hệ (5) (hay (11)) là<sup>4</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dZ_{3E}}{dt} = \delta(Z_{3I} - Z_{3E}) \\ \frac{dH_E}{dt} = \delta(H_I - H_E) + Q_J \end{cases} \quad (16)$$

Kí hiệu E nhỏ chỉ giá trị ước lượng. Với  $Z_3$  và H được tính từ:

$$\begin{cases} Z_3 = N_A + N_B + N_C \\ H = N_A h_A + N_B h_B + N_C h_C \end{cases} \quad (17)$$

Từ **Giả thuyết nghiên cứu**, ta đã biết 1 trong 3 giá trị số mol cấu tử A, B và C, vì vậy sẽ có 3 trường hợp khảo sát để tính toán ước lượng các số mol chưa biết còn lại thông qua (16) và (17). Đóng góp chính (cách thức rút ra phương trình (16)) là trung tâm để nhận được các kết quả chính trong nghiên cứu này.

#### 4. Mô phỏng và kết quả

Qua việc tham khảo số liệu từ [9], phần này sẽ chạy mô phỏng hệ trên với những thông số của thiết bị phản ứng khuấy liên tục lý tưởng như sau:

**Bảng 1.** Thông số của thiết bị phản ứng khuấy liên tục lý tưởng

Tên	Ký hiệu	Độ lớn
Thể tích thiết bị phản ứng	V	10 (m <sup>3</sup> )
Lưu lượng thể tích	F	0,1 (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
Nhiệt dung riêng của cấu tử A	C <sub>pA</sub>	1000 (J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )
Nhiệt dung riêng của cấu tử B	C <sub>pB</sub>	1000 (J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )
Nhiệt dung riêng của cấu tử C	C <sub>pC</sub>	1000 (J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )
Năng lượng hoạt hóa của phản ứng 1	E <sub>a1</sub>	2,09 x 10 <sup>4</sup> (J mol <sup>-1</sup> )
Năng lượng hoạt hóa của phản ứng 2	E <sub>a2</sub>	4,18 x 10 <sup>4</sup> (J mol <sup>-1</sup> )
Năng lượng hoạt hóa của phản ứng 3	E <sub>a3</sub>	5,225 x 10 <sup>4</sup> (J mol <sup>-1</sup> )

<sup>2</sup> Ký hiệu T là phép chuyển vị ma trận.

<sup>3</sup> P và Q được tìm thấy từ phép khử Gauss-Jordan.

<sup>4</sup> Giải tích sự hội tụ (và ổn định) của trạng thái bộ quan sát về giá trị chính xác đã được chứng minh tường minh trong khuôn khổ Hamilton. Người đọc vui lòng xem [5, 6] để có thông tin chi tiết.

Hằng số động học phản ứng 1	$k_{01}$	$1,1 \text{ (s}^{-1}\text{)}$
Hằng số động học phản ứng 2	$k_{02}$	$172,2 \text{ (s}^{-1}\text{)}$
Hằng số động học phản ứng 3	$k_{03}$	$20,05 \text{ (s}^{-1}\text{)}$
Hằng số khí lý tưởng	$R$	$8,3143 \text{ (J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}\text{)}$
Nhiệt độ tham khảo	$T_{\text{ref}}$	$298 \text{ (K)}$
Hệ số trao đổi nhiệt hiệu dụng	$\lambda$	$85 \times 10^4 \text{ (W K}^{-1}\text{)}$
Enthalpy tham khảo của A	$h_{A\text{ref}}$	$0 \text{ (J mol}^{-1}\text{)}$
Enthalpy tham khảo của B	$h_{B\text{ref}}$	$-20,18 \times 10^4 \text{ (J mol}^{-1}\text{)}$
Enthalpy tham khảo của C	$h_{C\text{ref}}$	$-45,18 \times 10^4 \text{ (J mol}^{-1}\text{)}$
Nhiệt độ vô áo	$T_J$	$350 \text{ (K)}$

Các biến đầu vào (process inputs) được chọn như sau:

$$N_{A0} = 10^4 \text{ (mol)}, N_{B0} = N_{C0} = 0, T_1 = 350 \text{ (K)}$$

Các giá trị trạng thái ban đầu (tức tính tại thời điểm  $t=0$ ) của mô hình (5) (hay (11)) giả sử là:

$$N_{A0} = 10^3 \text{ (mol)}, N_{B0} = 5 \times 10^3 \text{ (mol)},$$

$$N_{C0} = 10^2 \text{ (mol)}, T_0 = 360 \text{ (K)}$$

Các giá trị trạng thái ban đầu (tức tính tại thời điểm  $t=0$ ) của bộ quan sát tiệm cận (16) được chọn là:

$$Z_{3E}(0) = N_{AE0} + N_{BE0} + N_{CE0}$$

$$H_E(0) = 0,75H(T_0, N_{AE0}, N_{BE0}, N_{CE0})$$

Trong đó:

$$N_{AE0} = 0,5 \times N_{A0}, N_{BE0} = 0,6 \times N_{B0},$$

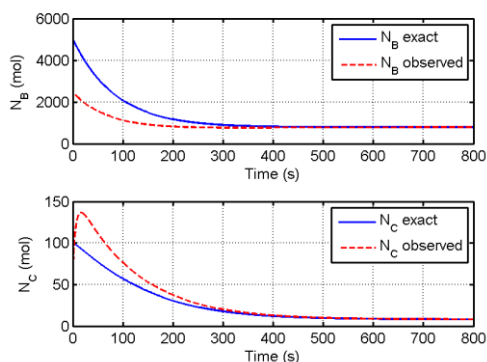
$$N_{CE0} = 0,8 \times N_{C0}$$

Ba trường hợp (TH) tính toán sau được khảo sát:

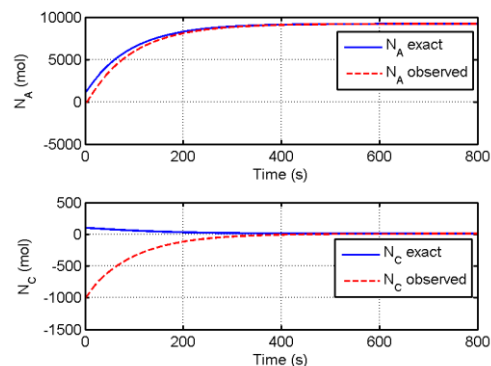
TH1: Biết  $T$  và  $N_A$ , ước lượng  $N_B$  và  $N_C$  (xem hình 2)

TH2: Biết  $T$  và  $N_B$ , ước lượng  $N_A$  và  $N_C$  (xem hình 3)

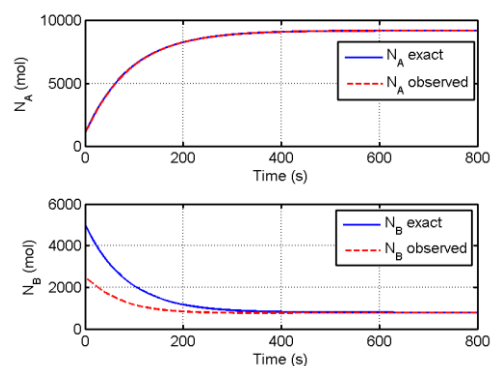
TH3: Biết  $T$  và  $N_C$ , ước lượng  $N_A$  và  $N_B$  (xem hình 4)



**Hình 2.**  $N_B$ ,  $N_C$  và số mol ước lượng tương ứng của trường hợp 1



**Hình 3.**  $N_A$ ,  $N_C$  và số mol ước lượng tương ứng của trường hợp 2



**Hình 4.**  $N_A$ ,  $N_B$  và số mol ước lượng tương ứng của trường hợp 3

Các tính toán và mô phỏng được thực hiện dùng phần mềm Matlab & Simulink. Trong cả ba trường hợp khảo sát, giá trị ước lượng luôn hội tụ về giá trị chính xác (xem các hình 2, 3 và 4). Kết quả cho thấy thời gian hội tụ (đạt đến hơn 95% giá trị chính xác) trong 3 trường hợp khoảng  $3\frac{1}{8} = 300$  giây. Mặt khác, sự hội tụ của bộ quan sát tiệm cận (16) phụ thuộc vào điều kiện vận hành ( $\delta > 0$ ) [2, 3, 7] và đây chính là giới hạn của bộ quan sát tiệm cận. Tuy nhiên, điều kiện này rõ ràng luôn thỏa mãn với các hệ quá trình hoạt động liên tục hoặc bán liên tục...

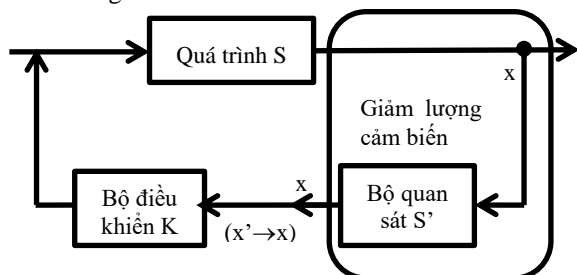
## 5. Kết luận và hướng phát triển

Nghiên cứu đã chỉ ra cách thức xây dựng và mô phỏng bộ quan sát tiệm cận cho một quá trình hóa học, cụ thể ở đây là hệ phản ứng vòng (1) với các hệ số tỷ lượng bằng 1. Đây là một trường hợp đặc biệt khi số phản ứng ( $n_r$ ) khác với hạng của ma trận hệ số tỷ lượng (tức là  $n_r = 3$  và  $\text{rank}(v) = 2$ ).

Bộ quan sát tiệm cận đảm bảo giá trị ước lượng số mol cấu tử hội tụ đến (khoảng hơn 95%) giá trị thực của nó trong thời gian hữu hạn. So sánh tính năng này của bộ quan sát tiệm cận với các bộ quan sát khác (ví dụ bộ quan sát thích nghi, bộ quan sát Luenberger mở rộng và bộ quan sát Kalman mở rộng...) cần được thực hiện trong các nghiên cứu tiếp.

Ngoài ra, với đặc tính không phụ thuộc vào động học phản ứng, bản chất tỏa nhiệt hay thu nhiệt của hệ phản ứng và ưu điểm dễ xây dựng, lắp đặt, ta có thể mở rộng và ứng dụng bộ quan sát tiệm cận vào các quá trình hóa học phức tạp hơn cũng như quá trình sinh hóa khác, đồng thời có thể kết hợp việc thiết kế bộ điều khiển tối ưu (xem hình 5) dùng trong các ứng dụng vận hành thực tế (khi thiếu các cảm biến đo do chi phí cao hoặc trở ngại kỹ thuật...).

Theo hướng này, quá trình sản xuất cyclopentenol từ cyclopentadiene [6] hay tháp chưng cất phản ứng dùng trong công nghiệp lọc hóa dầu/năng lượng [10] sẽ được xem xét và nghiên cứu.



Hình 5. Sơ đồ hệ có bộ điều khiển và bộ quan sát

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Favache, A., Dochain, D., "Thermodynamics and chemical systems

stability: the CSTR case study revisited", *Journal of Process Control*, 19 (3), 2009, 371-379.

- [2] Bastin, G., Dochain, D., *On-line estimation and adaptive control of bioreactors*, ELSERVIER SCIENCE PUBLISHERS, 1990.
- [3] Dochain, D., Perrier, M., Ydstie, B. E., "Asymptotic observers for stirred tank reactors", *Chemical Engineering Science*, 47 (15-16), 1992, 4167-4177.
- [4] Dochain, D., "State and parameter estimation in chemical and biochemical processes: a tutorial", *Journal of Process Control*, 13 (8), 2003, 801-818.
- [5] Hoang N. Ha, Couenne, F., Le Gorrec, Y., Chen, C. L., Ydsite, B. E., "Passivity based controller and observer for exothermic chemical reactors", *IFAC Proceedings*, 45 (15), 2012, 377-384.
- [6] Hoang N. Ha, Couenne, F., Le Gorrec, Y., Chen, C. L., Ydsite, B. E., "Passivity-based nonlinear control of CSTR via asymptotic observers", *Annual Reviews in Control*, 37 (2), 2013, 278-288.
- [7] Ali, J. Mohd, Hoang N. Ha, Hussain, M. A., Dochain, D., "Review and classification of recent observers applied in chemical process systems", *Computer & Chemical Engineering*, 76, 2015, 27-41.
- [8] Sandler, Stanley I., *Chemical, Biochemical, and Engineering Thermodynamics*. 4th edition. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [9] Dochain, D., Couenne, F., Jallut, C., "Enthalpy based modelling and design of asymptotic observers for chemical reactors", *International Journal of Control*, 82 (8), 2009, 1389-1403.
- [10] Luyben, William L., *Process modeling, simulation, and control for chemical engineers*. 2nd ed. McGraw-Hill Publishing Company, 1996.

(BBT nhận bài: 06/03/2017, hoàn tất thủ tục phản biện: 29/03/2017)