

Nghiên cứu hệ suy luận Nơron mờ thích nghi - Ước lượng thành phần cấu tử tháp chưng cất trong công nghiệp dầu khí

Đình Trung Trọng^{a*}, Nguyễn Thị Hồng Yến^b, Hà Thị Thu Thủy^c, Nguyễn Hữu Lập Trường^d

Tóm tắt:

Mô hình quá trình tháp chưng cất là một mô hình đa biến, tác động xen kênh và tính phi tuyến mạnh. Bài báo giới thiệu sự phụ thuộc giữa các cửa vào, cửa ra và các đĩa trên tháp dựa trên động học tháp chưng cất và các phương trình toán ở trạng thái xác lập; Nghiên cứu sử dụng hệ suy luận nơron mờ thích nghi để ước lượng thành phần cấu tử trong tháp chưng cất, qua đó so sánh với việc ước lượng sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng để đánh giá giải pháp ước lượng này.

Từ khóa: Tháp chưng cất, ước lượng, động học, Kalman, ANFIS

^a Trường Cao đẳng Công nghiệp Huế; 70 Nguyễn Huệ, phường Vĩnh Ninh, thành phố Huế, tỉnh Thừa Thiên Huế. e-mail: dttrong@hueic.edu.vn

^b Trường Cao đẳng Công nghiệp Huế; 70 Nguyễn Huệ, phường Vĩnh Ninh, thành phố Huế, tỉnh Thừa Thiên Huế. e-mail: nthyen@hueic.edu.vn

^c Trường Cao đẳng Công nghiệp Huế; 70 Nguyễn Huệ, phường Vĩnh Ninh, thành phố Huế, tỉnh Thừa Thiên Huế. e-mail: httthuy@hueic.edu.vn

^d Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; 54 Nguyễn Lương Bằng, phường Hòa Khánh Bắc, quận Liên Chiểu, thành phố Đà Nẵng. e-mail: nhltruong@dut.udn.vn

* Tác giả chịu trách nhiệm chính.

Research Adaptive Neural Fuzzy Inference System - Estimate Composition Distillation Column in Petroleum Industry.

Dinh Trung Trong^{a*}, Nguyen Thi Hong Yen^b, Ha Thi Thu Thuy^c, Nguyen Huu Lap Truong^d

Abstract:

The model of distillation column process is a model of multivariable, inter-channel effects and strong nonlinearities. The paper introduces the dependence between the inlets, outlets and the plates on the column based on the distillation column kinematics and the mathematical equations at steady state; The study uses an adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS) to estimate the composition of the distillation column, thereby comparing it with the estimation using the Extended Kalman Filter to evaluate this estimation solution.

Keywords: *distillation column, estimate, dynamic, Kalman, ANFIS*

Received: 27.3.2023; Accepted: 15.12.2024; Published: 30.12.2024

DOI: 10.59907/daujs.3.4.2024.156

^a Hue Industrial College; 70 Nguyen Hue Street, Vinh Ninh Ward, Hue City, Thua Thien Hue Province, Vietnam. e-mail: dttrong@hueic.edu.vn

^b Hue Industrial College; 70 Nguyen Hue Street, Vinh Ninh Ward, Hue City, Thua Thien Hue Province, Vietnam. e-mail: nthyen@hueic.edu.vn

^c Hue Industrial College; 70 Nguyen Hue Street, Vinh Ninh Ward, Hue City, Thua Thien Hue Province, Vietnam. e-mail: httthuy@hueic.edu.vn

^d Da Nang University of Science and Technology, Danang University; 54 Nguyen Luong Bang Street, Hoa Khanh Bac Ward, Lien Chieu District, Danang City, Vietnam. e-mail: nhltruong@dut.udn.vn

* *Corresponding author.*

Đặt vấn đề

Hiện nay việc giám sát và điều khiển nồng độ thành phần các tháp chưng cất rất khó khăn, mặt khác chất lượng sản phẩm không thể đo được nhanh và đảm bảo độ tin cậy. Ở nước ta, việc đo nồng độ này được thực hiện rời rạc bằng cách phân tích các mẫu đo theo từng thời gian nhất định, hoặc xác định nồng độ các chất thông qua việc ổn định nhiệt độ, áp suất ở đỉnh và đáy tháp. Vì vậy sản phẩm thu được chưa được như mong đợi, chưa tận thu được các sản phẩm có chất lượng và giá trị cao (Đặng Văn Chí, 2012; Lý Ngọc Minh, 2010).

Nghiên cứu đã sử dụng hệ suy luận nơron mờ thích nghi để xác định trực tiếp nồng độ thành phần chưng cất, làm cơ sở để có thể ứng dụng vào điều chỉnh liên tục nồng độ sản phẩm, duy trì sự ổn định chất lượng sản phẩm là một đòi hỏi cấp thiết tại các nhà máy lọc dầu và chế biến khí ở nước ta hiện nay.

Việc mô hình hóa, nghiên cứu giải pháp đo lường trực tiếp thành phần cấu tử, khắc phục những hạn chế còn tồn tại, làm cơ sở để nâng cao chất lượng điều khiển và chất lượng sản phẩm.

Phương pháp nghiên cứu

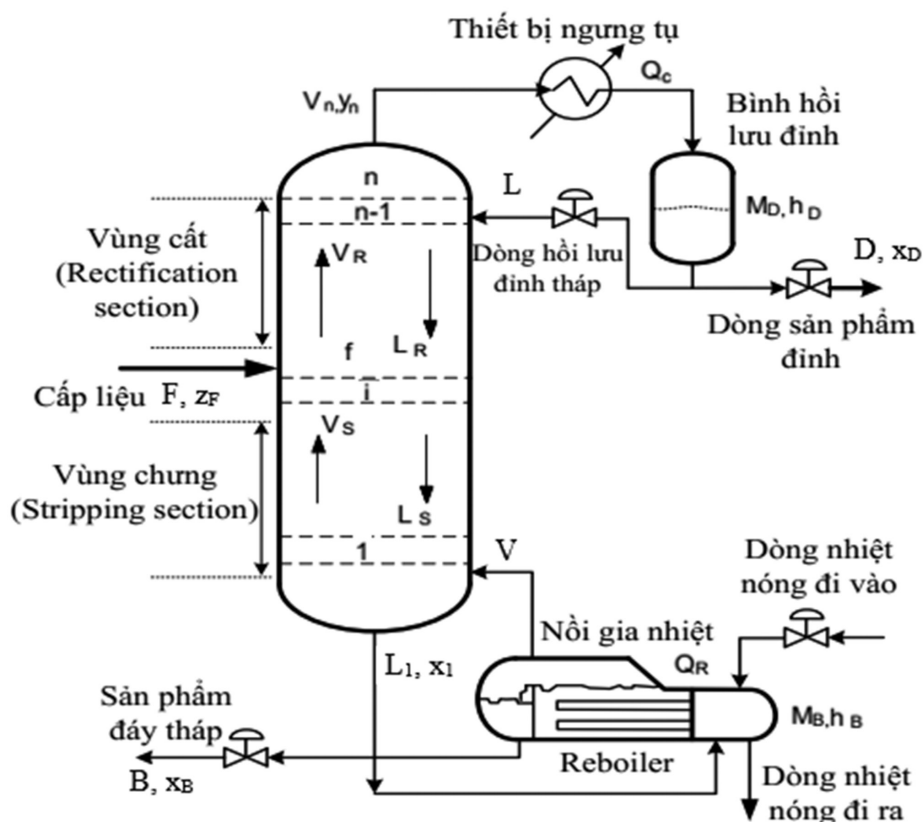
Mô hình toán tháp chưng cất

Tháp chưng cất là thiết bị trung tâm trong phân xưởng chưng cất. Hầu hết các tháp chưng cất dùng trong công nghệ lọc dầu là tháp đĩa hình trụ. Trong tháp chưng cất có nhiều đĩa. Đĩa là một cấu hình cơ khí nằm ngang có tác dụng tạo điều kiện cho pha hơi bay lên pha lỏng đi xuống tiếp xúc với nhau một cách tốt nhất, đủ lâu để sự trao đổi giữa chúng xảy ra hoàn hảo.

Đường kính của tháp phụ thuộc vào lưu lượng nguyên liệu để chưng cất. Chiều cao của tháp phụ thuộc vào số đĩa lọc. Khoảng cách giữa hai đĩa liên tiếp nhau khoảng 0,25 - 0,8m (Buckley et al., 1985).

Để mô tả hệ thống, ta đưa ra các giả thiết (Buckley et al., 1985; Skodestad, 1997):

1. Các đĩa trong tháp làm việc với hiệu suất 100%.
2. Lượng lỏng trên đĩa không thay đổi trong chế độ quá độ.
3. Chất lỏng trong tháp ở nhiệt độ sôi, hơi ở trạng thái bão hòa.
4. Chưng cất được thực hiện trong điều kiện cân bằng pha lỏng - hơi.
5. Tổn thất nhiệt từ tháp ra môi trường xung quanh có thể bỏ qua (do rất nhỏ).



Hình 1. Sơ đồ tổng quát tháp chưng cất với cấu hình điều khiển LV (Buckley et al., 1985)

Nghiên cứu về mô hình động học và mô phỏng một tháp chưng cất 3 tầng (Skodestad, 1997).

Tháp chưng cất có chức năng tách 2 thành phần, áp suất không đổi và giữ hơi ở mức cao không đáng kể, điều khiển hoàn hảo về mức bằng cách sử dụng cấu hình LV, dòng chảy toàn bộ không đổi (thay cho cân bằng năng lượng), cân bằng lỏng - hơi của tất cả các tầng.

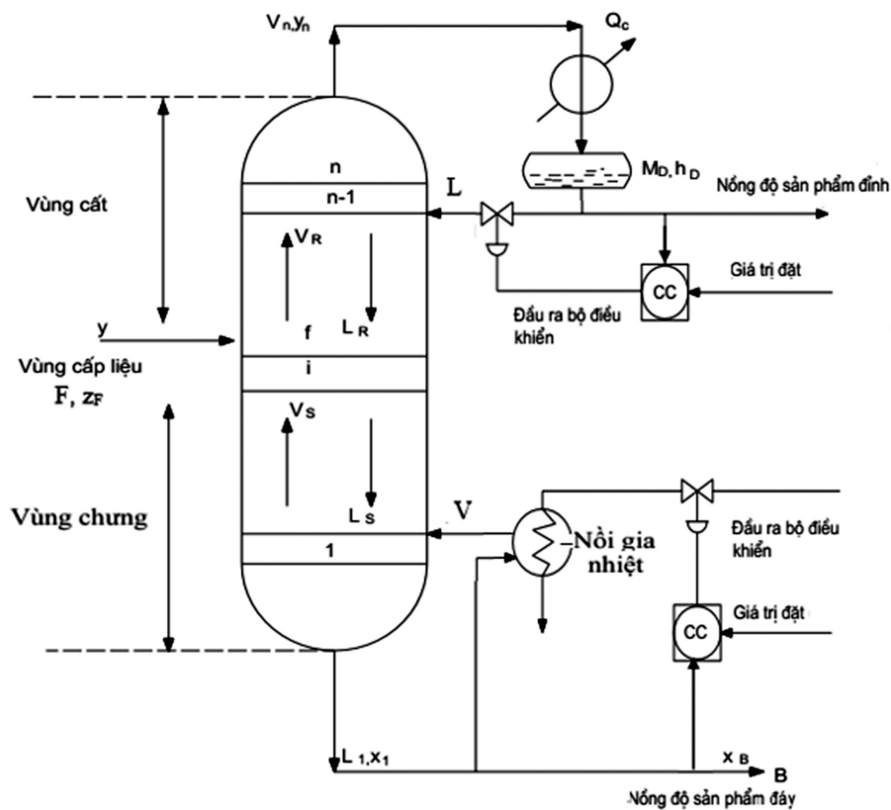
Các phương trình động học tháp chưng cất 2 thành phần 3 tầng (Đình Trung Trọng, 2015):

$$M_1 \frac{dx_1}{dt} = (V - L - F - Vk_1)\Delta x_1 + (L + F)\Delta x_2 + (x_2 - x_1)\Delta L + (x_1 - y_1)\Delta V + (x_2 - x_1)\Delta F \quad (1)$$

$$M_2 \frac{dx_2}{dt} = Vk_1\Delta x_1 - (L + F + Vk_2)\Delta x_2 + L\Delta x_3 + (x_3 - x_2)\Delta L + (y_1 - y_2)\Delta V + (z_F - x_2)\Delta F + F\Delta z_F \quad (2)$$

$$M_3 \frac{dx_3}{dt} = Vk_2\Delta x_2 - V\Delta x_3 + (y_2 - x_3)\Delta V = Vk_2\Delta x_2 - V\Delta x_3 \quad (3)$$

y_i, x_i, L, V là các giá trị ở trạng thái ổn định tại thời điểm hoạt động bình thường.



Hình 2. Sơ đồ tháp chưng cất với cấu hình điều khiển LV (Buckley et al., 1985)

Trong đó:

Vùng nạp liệu: Vị trí đĩa nạp n_F ($1 < n_F < n$).

n là số đĩa của tháp được tính từ đáy tháp lên đỉnh tháp.

F - lưu lượng dòng nạp liệu (kmol/ph).

z_F - phần mol của chất nhẹ trong dòng nguyên liệu nạp (%).

D - lưu lượng dòng sản phẩm đỉnh (kmol/ph).

B - lưu lượng dòng sản phẩm đáy (kmol/ph).

L_n và V_n - dòng chảy của pha lỏng và pha hơi tương ứng khi rời khỏi đĩa n (kmol/ph).

x_D - phần mol chất nhẹ trong sản phẩm đỉnh (%).

x_B - phần mol chất nhẹ trong sản phẩm đáy (%).

x_i, y_i - phần mol chất nhẹ của pha lỏng, pha hơi trên đĩa thứ i (%).

L - dòng hồi lưu ở đỉnh tháp (kmol/ph).

V - dòng hơi hồi lưu vào đáy tháp (kmol/ph).

M_i - khối lượng chất lỏng đọng lại trên đĩa thứ i .

Mô hình trạng thái trở thành tuyến tính ở dạng vi phân:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu + Ed \\ y = Cx \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó: $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ là biến trạng thái; $u = [L \ V]^T$ là biến đầu vào;

$y = [x_D \ x_B]^T$ là biến đầu ra;

$d = [F, z_F]^T$ là nhiễu của mô hình.

Các ma trận:

$$A = \begin{bmatrix} (V - L - F - Vk_1) / M_1 & (L + F) / M_1 & 0 \\ Vk_1 / M_2 & (-L - F - Vk_2) / M_2 & L / M_2 \\ 0 & Vk_2 / M_3 & -V / M_3 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) / M_1 & (x_1 - y_1) / M_1 \\ (x_3 - x_2) / M_2 & (y_1 - y_2) / M_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) / M_1 & 0 \\ (z_F - x_2) / M_2 & F / M_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Từ hệ phương trình (4) ta xây dựng sơ đồ khối mô phỏng hệ thống tháp chưng cất 2 thành phần như Hình 3.

Các dữ liệu về động học và điều khiển cột tháp chưng cất [4].

Bảng 1. Các tham số của mô hình tháp chưng cất 2 thành phần 3 tầng

n	n_t	n_F	F Kmol/ph	Z_F %	D Kmol/ph	L Kmol/ph	V Kmol/ph	x_D %	x_B %	M_i Kmol	q
2	3	2	1	0,5	0,5	3,55	3,55	0,9	0,1	1	1

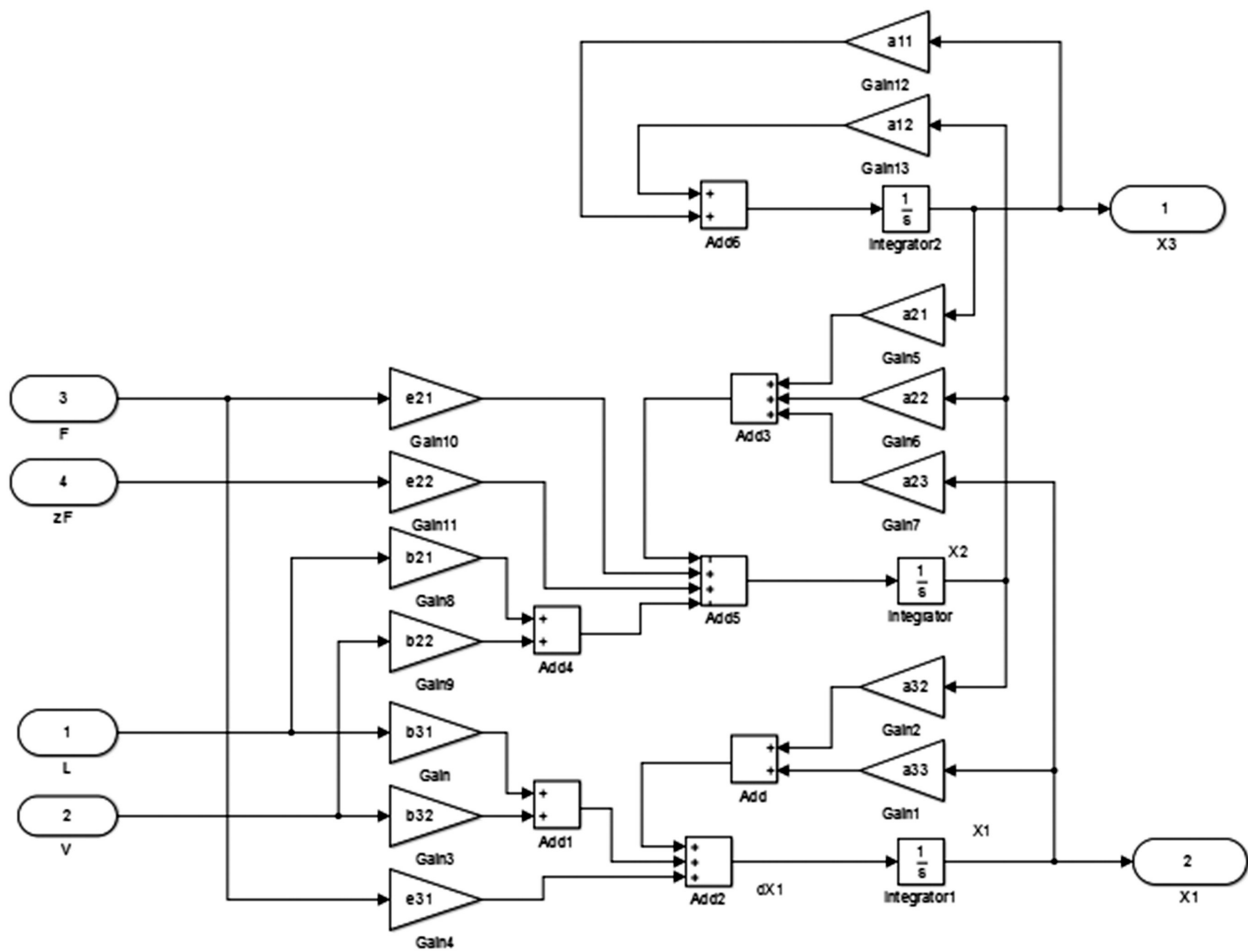
Trong đó: x_D là phần mol chất nhẹ trong sản phẩm đỉnh;

x_B là phần mol chất nhẹ trong sản phẩm đáy.

Bảng 2. Các dữ liệu thành phần L , V và x , y của 3 tầng ở trạng thái cân bằng của tháp

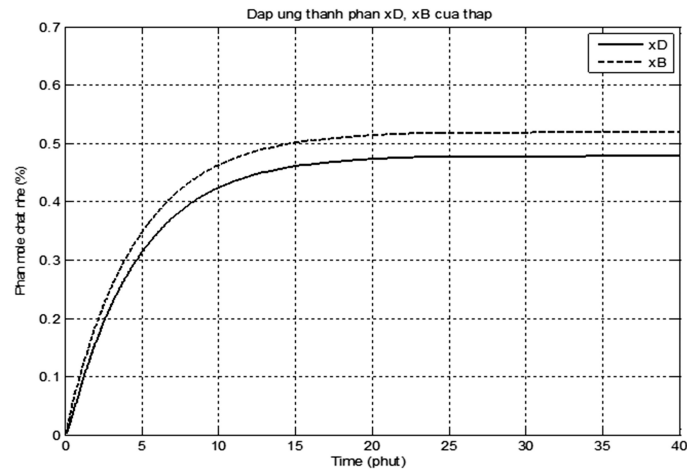
Tầng	i	L_i	V_i	x_i (%)	y_i (%)
Bình ngưng	3	3,05		0,9	
Đĩa cấp liệu	2	4,05	3,55	0,4737	0,9
Nồi hơi	1		3,55	0,1	0,5263

Trong đó tầng 2 ($i = 2$) là đĩa cấp liệu, tầng 3 là bình ngưng và tầng 1 là nồi hơi.



Hình 3. Sơ đồ khối mô phỏng hệ thống tháp chưng cất 2 thành phần 3 tầng

Kết quả mô phỏng với $d = [1, 0,5]^T$, $u = [3,05, 3,55]^T$



Hình 4. Đồ thị đáp ứng thành phần x_D , x_B của tháp chưng cất

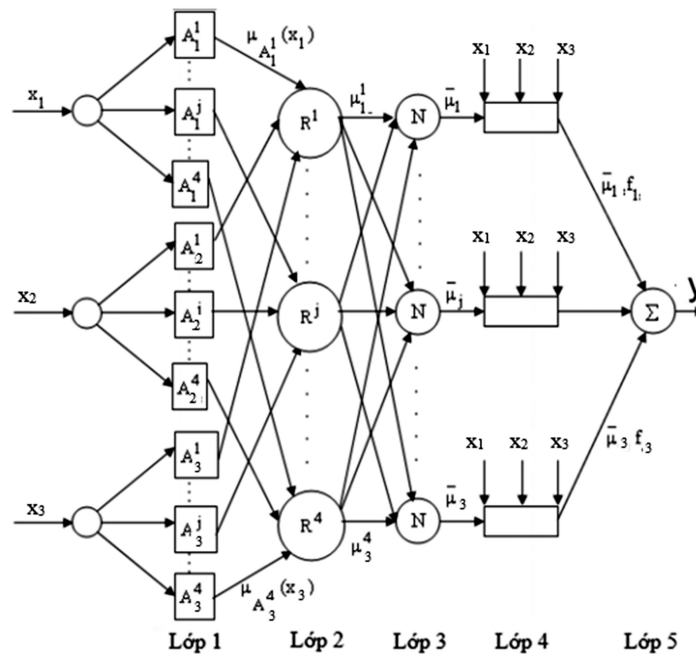
Xây dựng hệ suy luận nơron mờ thích nghi (anfis) để ước lượng thành phần cấu tử trong tháp chưng cất

Cấu trúc ANFIS gồm có 5 lớp như sau (Jang, 1993), hình 5.

Các đầu vào có tín hiệu vào là x_i .

Sai lệch trung bình bình phương giữa hàm đầu ra mong muốn y^m và hàm đầu ra y :

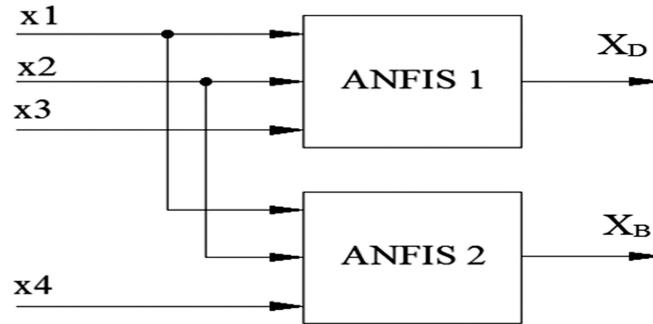
$$E = \frac{1}{2} [y^m - \sum_{j=1}^M \frac{(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i)) f_j}{\sum_{j=1}^M (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i))}]^2 \quad (5)$$



Hình 5. Cấu trúc ANFIS có 3 đầu vào (Đình Trung Trọng, 2015)

ANFIS 1 ước lượng thành phần cấu tử x_D

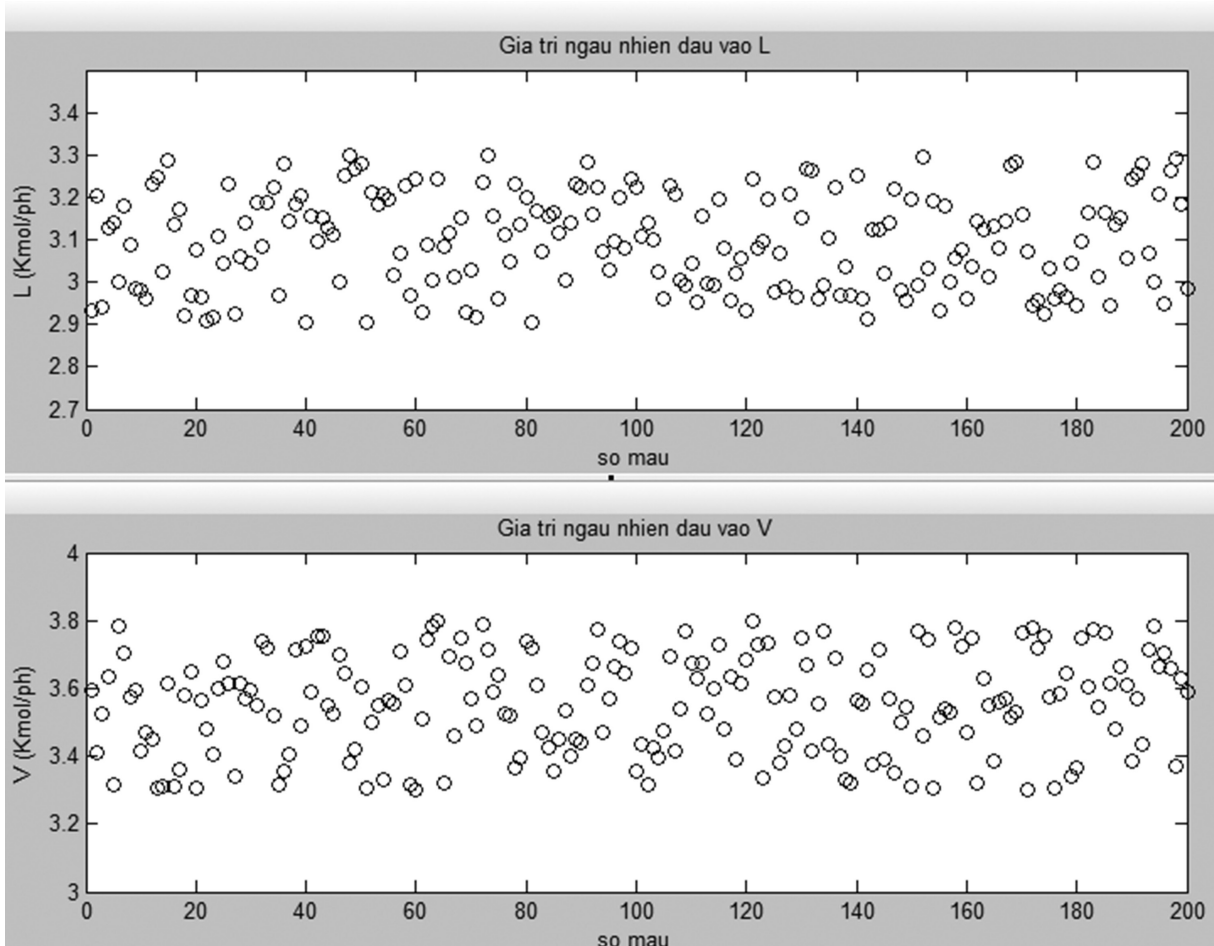
ANFIS 2 ước lượng thành phần cấu tử x_B



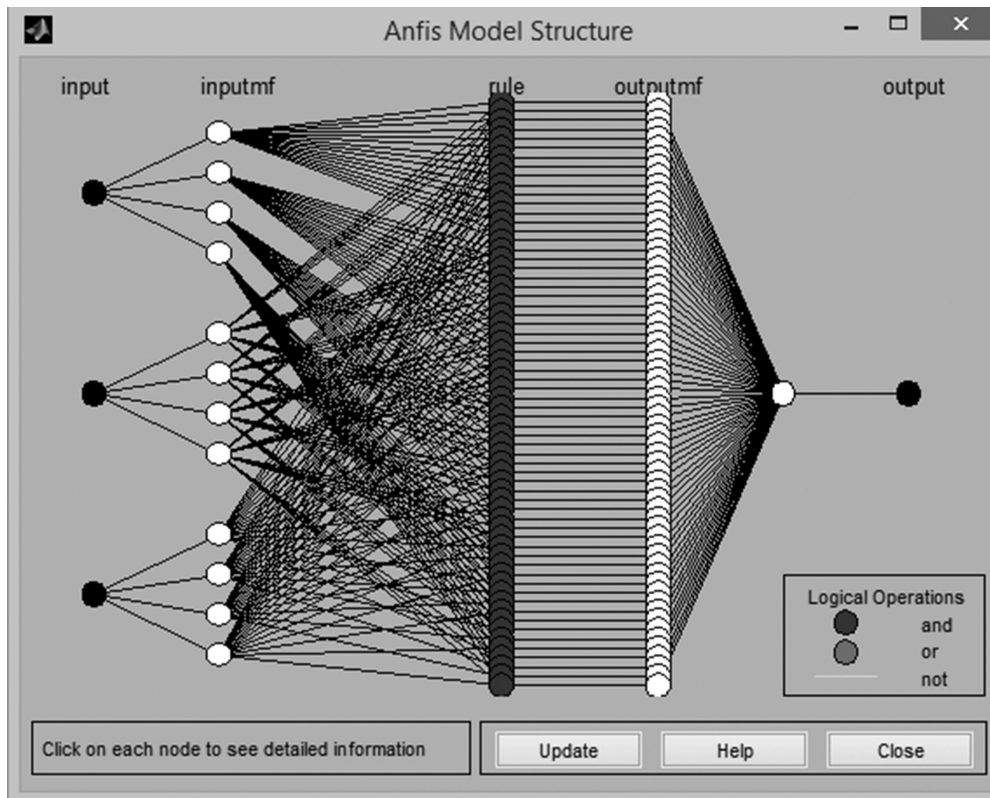
Hình 6. Mô hình đầu vào, đầu ra của 2 ANFIS (Đình Trung Trọng, 2015)

Trong đó các đầu vào:

$$x_1 = L; \quad x_2 = V; \quad x_3 = x_D(k-1); \quad x_4 = x_B(k-1)$$



Hình 7. Giá trị ngẫu nhiên đầu vào L và V

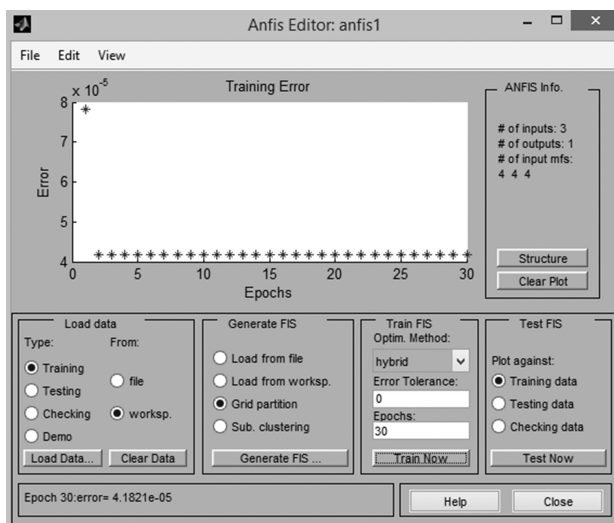


Hình 8. Cấu trúc của ANFIS 1 và ANFIS 2

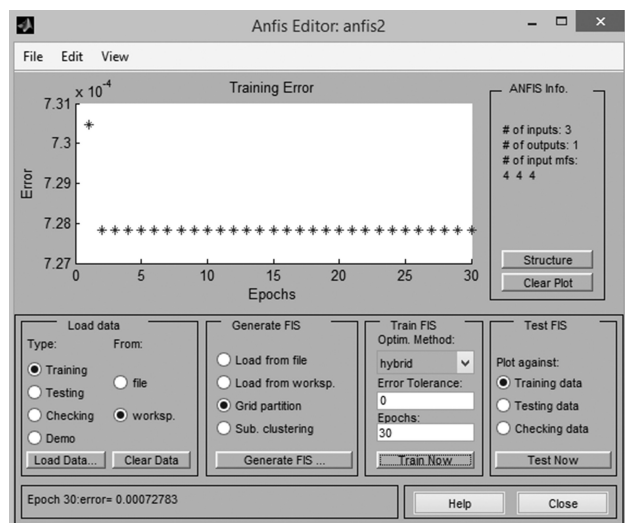
Sau 30 chu kỳ huấn luyện ta thu được ANFIS với sai số nhỏ nhất giữa dữ liệu vào ra đích và dữ liệu vào ra của mạng là:

ANFIS 1: 0.42×10^{-4}

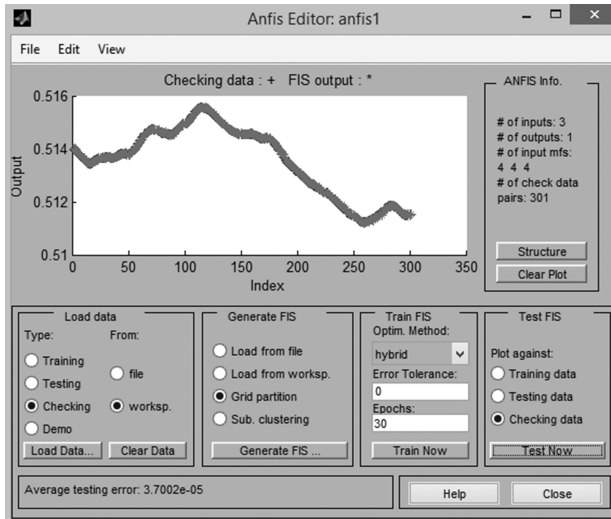
ANFIS 2: 7.3×10^{-4}



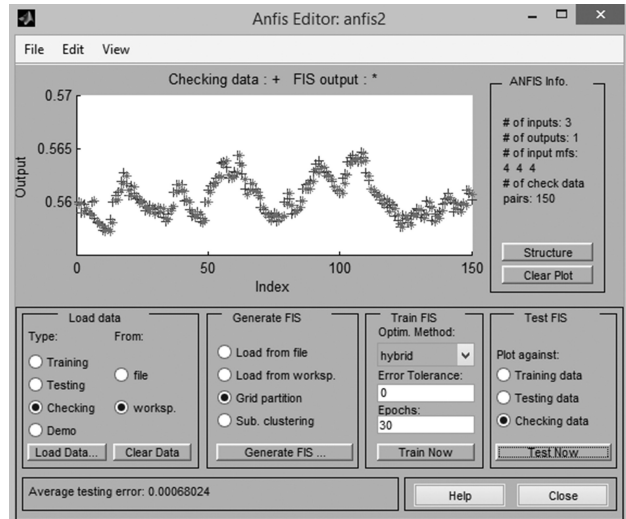
Hình 9. Kết quả huấn luyện ANFIS 1



Hình 10. Kết quả huấn luyện ANFIS 2



Hình 11. Kết quả kiểm tra dữ liệu của ANFIS 1



Hình 12. Kết quả kiểm tra dữ liệu của ANFIS 2

Kết quả kiểm tra hệ ANFIS 1 và ANFIS 2 thì sai lệch trung bình bình phương giữa dữ liệu vào ra của mạng và vào ra đích là:

$$\text{ANFIS 1: } 0,37 \times 10^{-4}$$

$$\text{ANFIS 2: } 6,8 \times 10^{-4}$$

Xây dựng bộ lọc kalman mở rộng để ước lượng thành phần cấu tử trong tháp chưng cất

1. Tính độ lợi Kalman

$$K(k) = P_k^-(P_k^- + R_k)^{-1}$$

2. Cập nhật giá trị ước lượng

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(x_k - \hat{x}_k^-)$$

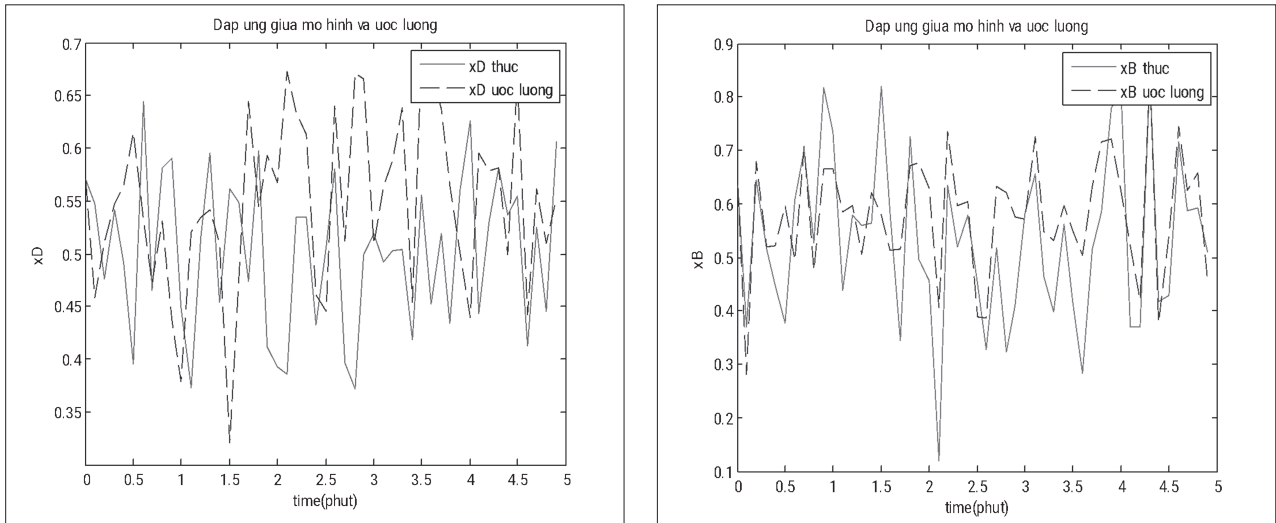
3. Cập nhật giá trị ước lượng P_k

$$P_k^+ = (I - K_k)P_k^-$$

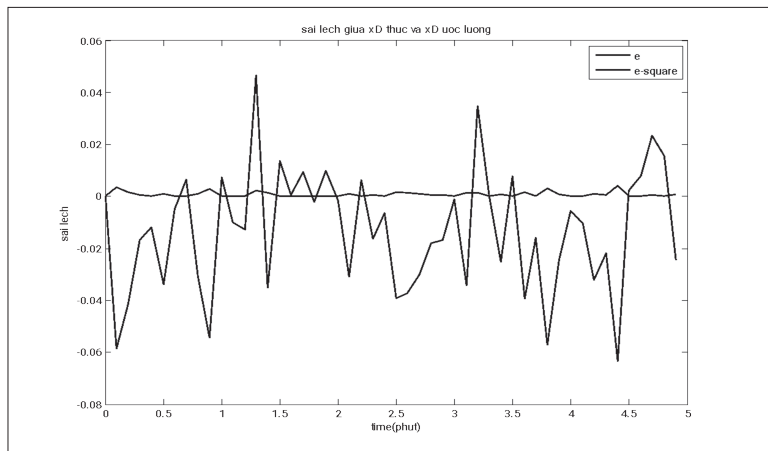
4. Ước đoán

$$\hat{x}_{k+1}^- = A_k \hat{x}_k^+ + Q_k$$

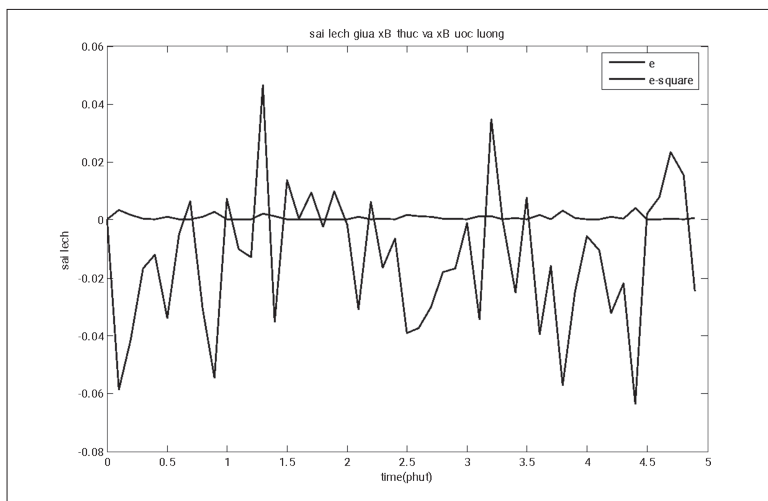
Sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng (EKF- Extended Kalman Filter) ước lượng thành phần sản phẩm tháp chưng cất 2 thành phần 3 tầng, ta có các kết quả sau:



Hình 13. Đáp ứng giữa x_D , x_B đo được và x_D , x_B ước lượng bằng EKF



Hình 14. Sai lệch e và e^2 giữa x_D đo được và x_D ước lượng bằng EKF

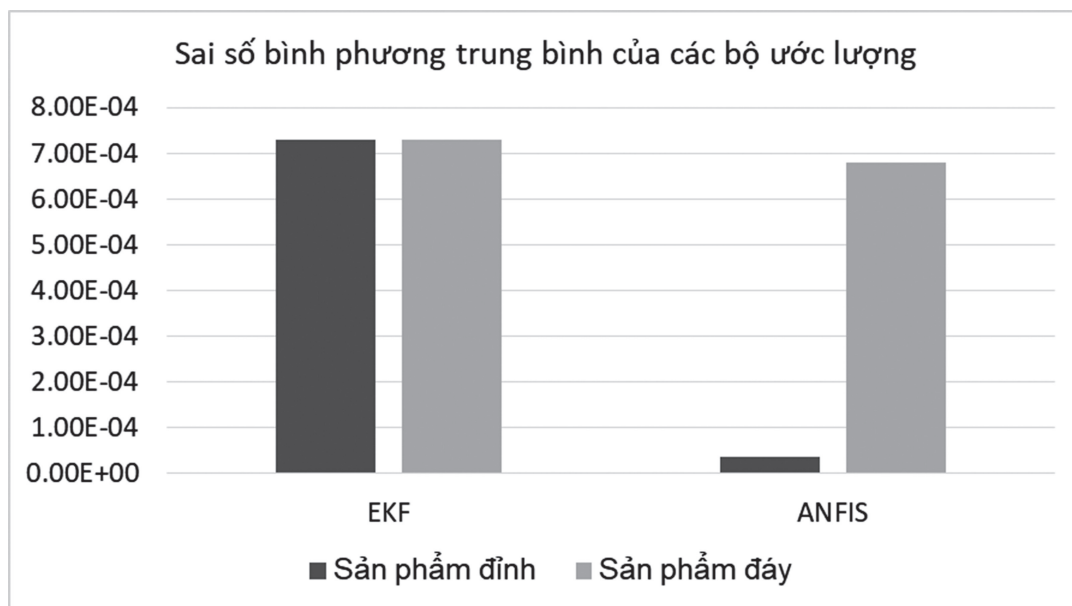


Hình 15. Sai lệch e và e^2 giữa x_B đo được và x_B ước lượng bằng EKF

So sánh giữa nghiên cứu ước lượng thành phần cấu tử trong chung cất bằng cách sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) và ANFIS (Đình Trung Trọng, 2015).

Bảng 3. Các chỉ số sai lệch của các bộ ước lượng

Quá trình	Bộ ước lượng	Sai số bình phương trung bình	
		Sản phẩm đỉnh	Sản phẩm đáy
Chung cất hai thành phần	EKF	7,3e-4	7,3e-4
	ANFIS	0,37e-4	6,8e-4



Hình 16. Biểu đồ các chỉ số sai lệch của bộ lọc EKF và ANFIS

Thông qua nghiên cứu so với ước lượng cấu tử sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng, nghiên cứu đã chứng minh được việc ứng dụng hệ suy luận nơon mờ thích nghi là rất cần thiết và quan trọng trong việc ước lượng thành phần sản phẩm tháp chung cất.

Kết luận

Nghiên cứu đã giới thiệu cấu hình LV cho tháp chung cất hai thành phần, tháp có 3 tầng. Ứng dụng hệ suy luận nơon mờ thích nghi xây dựng mô hình ANFIS ước lượng thành phần cấu tử trong tháp chung cất hai thành phần dựa trên 2 dòng phản hồi L, V và dữ liệu ra ở trạng thái trước của cấu tử.

Kết quả mô phỏng hệ ANFIS trên Matlab-Simulink tương đối tốt, sai lệch trong quá trình huấn luyện là nhỏ 10^{-4} , sai lệch trong quá trình kiểm tra cũng tương đối nhỏ 10^{-4} , kết

quả này cũng khắc phục được yếu tố sai số cũng như yếu tố đo đạc trong mô hình ước lượng sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng.

Ước lượng thành phần sản phẩm dựa trên các thông số phản hồi L , V của cấu hình LV là khả quan, các thông số L , V có thể đo trực tiếp, dễ dàng, cho kết quả nhanh hơn và chi phí rẻ hơn so với việc phân tích thành phần sản phẩm của tháp chưng cất hiện nay.

Tài liệu tham khảo

- Buckley, P. S., Luyben, W. L., & Shunta, J. P. (1985). *Design of distillation column control systems*. (No Title).
- Đặng Văn Chí (2012). *Nghiên cứu các giải pháp để nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu suất làm việc của tháp chưng cất trong công nghiệp dầu mỏ*. Luận án tiến sĩ, Chuyên ngành tự động hóa, Trường Đại học Mở - Địa chất.
- Đình Trung Trọng (2015). *Ước lượng thành phần cấu tử tháp chưng cất sử dụng hệ suy luận nơron mờ thích nghi*. Luận văn Thạc sĩ, Chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng.
- Jang, J.-S. (1993). "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system". *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(3), 665-685.
- Lý Ngọc Minh (2010). *Nghiên cứu xây dựng phương pháp đánh giá sự cố môi trường trong sử dụng khí hóa lỏng (LPG) ở Việt Nam*. Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật, Viện Môi trường và Tài nguyên, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.
- Skodestad, S. (1997). "Dynamics and control of distillation columns". *Chem. Eng. Res. Des. (Trans. IChemE)*, 75, 539-562.