

Bài báo nghiên cứu

TỰ ĐỘNG HÓA QUÁ TRÌNH CÔ ĐẶC GIẢN ĐOẠN
DUNG DỊCH ĐƯỜNG QUY MÔ PILOTTrần Lê Hải^{1,2}, Nguyễn Sĩ Xuân Ân^{1,2}, Nguyễn Thị Như Ngọc^{1,2},
Nguyễn Hồng Hải^{1,2}, Lý Khắc Tông^{1,2}, Bùi Ngọc Pha^{1,2,*}¹Khoa Kỹ thuật Hóa học, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam*Tác giả liên hệ: Bùi Ngọc Pha – Email: buingocpha@hcmut.edu.vn

Ngày nhận bài: 07-9-2021; ngày nhận bài sửa: 16-11-2021; ngày duyệt đăng: 12-12-2021

TÓM TẮT

Cô đặc chân không hoạt động gián đoạn là một quá trình khó điều khiển tự động. Trong nghiên cứu này, chúng tôi nghiên cứu tự động hóa quá trình cô đặc đường của hệ thống cô đặc chân không gián đoạn quy mô pilot. Để phát triển hệ thống tự động hóa, bốn vòng điều khiển đơn độc lập đã được sử dụng nhằm điều khiển lần lượt mức lỏng khi nhập liệu, áp suất chân không trong thiết bị cô đặc, nhiệt độ của dung dịch trong buồng đốt và nhiệt độ của nước giải nhiệt trong thiết bị ngưng tụ. Dựa trên nghiên cứu thực nghiệm và sử dụng mô hình bậc nhất có trễ (FOPDT), hàm truyền của điều khiển quá trình đã được xây dựng thành công. Từ đó, các hệ số thuật toán điều khiển PID bao gồm K_P , K_I và K_D để lập trình cho bộ điều khiển đã được xác định thông qua phương pháp Ziegler-Nichols I. Kết quả đánh giá bằng thực nghiệm và mô phỏng Matlab/Simulink dựa trên các hệ số thu được cho thấy kết quả mô phỏng phản ánh sự tương đồng với hành vi của quá trình thực tế, chứng minh rằng mô hình hàm truyền là đáng tin cậy. Mô phỏng máy tính được sử dụng để hiệu chỉnh các hệ số điều khiển nhằm tối ưu chất lượng điều khiển quá trình dựa trên hàm truyền thu được cho kết quả $K_P = 71,5$; $K_I = 4,5$ và $K_D = 0$ ứng với thời gian đáp ứng 1200 s, độ lọt vó POT khoảng 0,625% và sai số gần bằng không. Kết quả của nghiên cứu đã thiết lập một phương pháp để xác định các hệ số hoạt động điều khiển để tự động hóa quá trình cô đặc chân không hoạt động gián đoạn có thể áp dụng cho nhiều loại dịch nước trái cây và các sản phẩm có hoạt tính sinh học khác nhau.

Từ khóa: tự động hóa; Matlab /Simulink; điều khiển quá trình; cô đặc chân không; Ziegler-Nichols

1. Giới thiệu

Cô đặc chân không là một quá trình phổ biến trong công nghiệp hóa học và thực phẩm nhằm nâng cao hàm lượng chất tan trong dung dịch. Đây là một quá trình không thể thiếu và được sử dụng phổ biến trong quy trình sản xuất đường mía với quy mô công nghiệp lớn

Cite this article as: Tran Le Hai, Nguyen Si Xuan An, Nguyen Thi Nhu Ngoc, Nguyen Hong Hai, Ly Khac Tong, & Bui Ngoc Pha (2021). Automation of sugar fed-batch evaporation process: A pilot study. *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, 18(12), 2147-2161.

đến rất lớn (Nguyen, 2011). Tuy nhiên, việc nghiên cứu ứng dụng cho các quy mô vừa và nhỏ lại còn rất hạn chế vì nhu cầu thực tiễn trước đây không cao.

Ngày nay, các thực phẩm đặc sản, thực phẩm chức năng phát triển ngày càng nhiều về chủng loại. Phương pháp cô đặc chân không có thể được áp dụng để chế biến các loại nước trái cây đặc sản (Nguyen et al., 2014; Le et al., 2018) hay các loại nước uống cô đặc có được tính cao làm thực phẩm chức năng (Dang et al., 2018). Với quy mô các doanh nghiệp đang khởi nghiệp trong lĩnh vực này tại Việt Nam, các hệ thống hoạt động gián đoạn theo mẻ quy mô pilot là phù hợp với thực tế nghiên cứu và sản xuất nhất.

Hệ thống cô đặc chân không hoạt động gián đoạn quy mô pilot thường có cấu tạo đơn giản (Pham et al., 2010) và vận hành thủ công. Sử dụng bơm chân không kết hợp với thiết bị ngưng tụ, các hệ thống này có thời gian cô đặc hoàn toàn phụ thuộc vào thao tác vận hành và kinh nghiệm của người sử dụng. Sự phát triển của khoa học kỹ thuật và tự động hóa ngày càng cao đòi hỏi phải có những phương pháp điều khiển phù hợp hơn nhằm tăng độ chính xác và hiệu quả sử dụng lao động cũng như đảm bảo được năng suất và chất lượng ổn định của sản phẩm.

Nghiên cứu được phát triển từ một hệ thống cô đặc chân không sử dụng nồi cô đặc buồng đốt trong có ống tuần hoàn trung tâm, gia nhiệt bằng hơi nước bão hòa áp suất thường. Kết hợp với thiết bị ngưng tụ ống chùm và bơm chân không để tạo áp suất chân không cho quá trình. Hệ thống cũng tuần hoàn nước giải nhiệt ở thiết bị ngưng tụ qua một tháp đệm để tiết kiệm nước.

Về phương án điều khiển, ý tưởng cơ bản của nghiên cứu đó là: điều chỉnh ổn định áp suất trong suốt quá trình cô đặc và dựa vào nhiệt độ sôi dung dịch để đưa ra tín hiệu điều khiển thời gian kết thúc một mẻ cô đặc. Theo lý thuyết, khi áp suất trong hệ ổn định, nhiệt độ sôi dung dịch sẽ tăng theo nồng độ dung dịch (Pham et al., 2010). Khi khảo sát hệ thống cô đặc hiện hữu chúng tôi đã tiến hành một số thay đổi cải tiến: (i) sử dụng ejector để tạo chân không và (ii) tận dụng lưu lượng của dòng nước giải nhiệt để điều chỉnh ổn định áp suất chân không, là phương án phù hợp về chi phí và kỹ thuật.

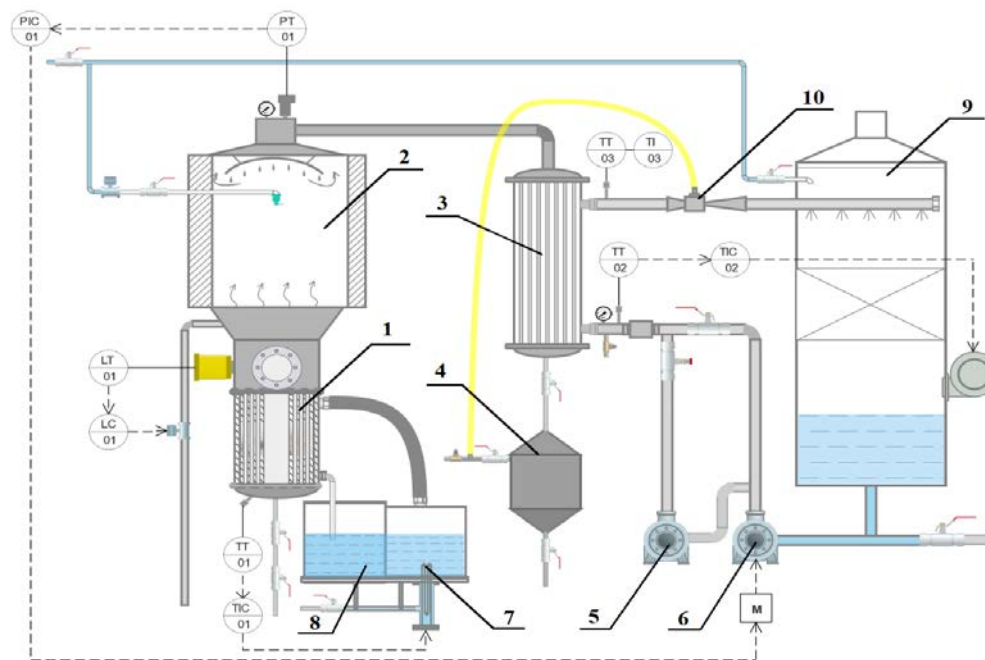
Trong quá trình thiết kế và xây dựng hệ thống điều khiển, nghiên cứu đã sử dụng các thiết bị, linh kiện điều khiển có độ ổn định cao thường dùng trong công nghiệp như bộ điều khiển PLC (programmable logic controller), cảm biến áp suất, cảm biến nhiệt độ và cảm biến mức tiêu chuẩn công nghiệp để đáp ứng tính thực tiễn cao cho hệ thống (Nguyen et al., 2007). Cùng với đó là hoàn thiện quá trình khảo sát và thiết kế giao diện giám sát HMI làm tiền đề để triển khai chế tạo hệ thống sản xuất thực tế.

Dung dịch đường saccarose là một đối tượng quen thuộc của quá trình cô đặc (Elhaq et al., 1999). Do dễ bị biến tính ở nhiệt độ cao, quá trình cô đặc dung dịch đường thường được thực hiện ở áp suất chân không (Nguyen, 2011). Vì vậy, nghiên cứu sử dụng đối tượng này để khảo sát khả năng điều chỉnh ổn định áp suất và tính tự động hóa của hệ thống để được dung dịch sản phẩm có chất lượng không bị biến tính.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu trong bài báo này là hệ thống cô đặc chân không hoạt động gián đoạn quy mô pilot với năng suất nhập liệu 8,2 kg/mẻ, có thể hoạt động ở áp suất chân không cực đại 0,8 atm, được gia nhiệt bởi hơi bão hòa (1 atm). Môi trường chân không trong nồi cô đặc được tạo ra và duy trì bằng thiết bị ejector gắn trên đường nước giải nhiệt nhằm tiết kiệm năng lượng thay vì sử dụng bơm chân không như truyền thống (Wetzell, 1996; Hackett, 2018). Nguyên lí hoạt động của hệ thống cô đặc được thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ P&ID hệ thống cô đặc chân không hoạt động gián đoạn:

(1) Buồng đốt; (2) Buồng bốc; (3) Thiết bị ngưng tụ; (4) Bồn chứa nước ngưng; (5,6) Bơm nước giải nhiệt; (7) Nồi hơi; (8) Bồn cấp nước nồi hơi; (9) Tháp giải nhiệt nước; (10) Ejector; PIC- Hiển thị và điều khiển áp suất; PT- Truyền dẫn tín hiệu áp suất; LT- Truyền dẫn tín hiệu mức chất lỏng; LC- Điều khiển mức chất lỏng; TT- Truyền dẫn tín hiệu nhiệt độ; TI- Hiển thị nhiệt độ; TIC- Hiển thị và điều khiển nhiệt độ; M- Động cơ điện

Hệ thống cô đặc chân không hoạt động gián đoạn trong nghiên cứu này thực hiện nhập liệu một lần. Khác với quá trình liên tục, các quá trình hoạt động gián đoạn thường tiêu tốn một lượng thời gian lớn giữa các mẻ và thời gian khởi động của mỗi mẻ. Nhằm rút ngắn thời gian này, chúng tôi đã xây dựng một quy trình khởi động hệ thống gồm nhiều khâu chạy song song và nối tiếp để cùng hội tụ tại một thời điểm mong muốn định trước. Quy trình khởi động được tự động hoá như sau: khi cho hệ thống khởi động, bơm nước (5,6) hoạt động để tạo áp suất chân không cho toàn hệ thống thông qua ejector (10). Sau khi áp suất chân không đạt được giá trị 0,3 atm, van nhập liệu được mở ra cho dung dịch vào nồi cô đặc (1,2) nhờ chênh lệch áp suất với môi trường. Thông qua cảm biến mức, khi đạt được thể tích dung

dịch mong muốn trong buồng đốt (1), hệ thống đóng van nhập liệu. Song song với quá trình đó, quá trình gia nhiệt cho buồng đốt cũng được tính toán thời điểm khởi động để cấp nhiệt cho dung dịch đạt nhiệt độ sôi đúng tại thời điểm áp suất chân không trong nồi đạt giá trị 0,8 atm, lúc này quá trình cô đặc bắt đầu xảy ra. Hơi thứ bốc lên trong buồng bốc (2) từ sự sôi của dung dịch theo đường ống dẫn đến thiết bị ngưng tụ dạng ống chùm (3). Nước ngưng từ quá trình này được chứa vào bồn chứa nước ngưng (4). Nước giải nhiệt sau khi ra khỏi thiết bị ngưng tụ (3) tiếp tục đi qua ejector (10) để duy trì áp suất chân không cho hệ thống rồi được phun vào tháp đệm (9) để làm mát. Nước sau làm mát được bơm tuần hoàn vào thiết bị ngưng tụ và bắt đầu chu trình trao đổi nhiệt mới. Hệ thống sử dụng 2 bơm lắp song song nhằm đạt được hiệu quả ngưng tụ cần thiết. Trong đó, một bơm đóng vai trò cung cấp nước giải nhiệt đủ để ngưng toàn bộ hơi thứ từ quá trình bốc hơi dung môi. Bơm thứ 2 được sử dụng để điều chỉnh áp suất chân không.

2.2. Nguyên liệu

Dung dịch cô đặc trong nghiên cứu này là dung dịch đường saccarose có nồng độ ban đầu là 20 °Bx (20 %kl) được cô đặc đến nồng độ cuối là 65 °Bx (65 %kl). Nồng độ của đường trong quá trình thực nghiệm được xác định bằng thiết bị đo độ khúc xạ kỹ thuật số (PR-301a, Atago-Nhật Bản).

2.3. Nội dung nghiên cứu

2.3.1. Thiết kế hệ thống điều khiển và lắp đặt linh kiện điều khiển tự động

Để thiết kế hệ thống điều khiển cho thiết bị cô đặc chân không quy mô pilot hoạt động gián đoạn, nghiên cứu này sử dụng phương án điều khiển nhiều vòng đơn độc lập với 4 vòng điều khiển chính để điều chỉnh các điều kiện công nghệ bao gồm mức chất lỏng nhập liệu ban đầu, áp suất chân không nồi cô đặc, nhiệt độ của buồng đốt trong nồi cô đặc và nhiệt độ của thiết bị ngưng tụ. Mục tiêu nhằm duy trì sự ổn định trong hoạt động của hệ thống cô đặc chân không ở các điều kiện công nghệ được cài đặt ở giá trị xác định.

2.3.2. Khảo sát quá trình cô đặc và xác định các tham số điều khiển

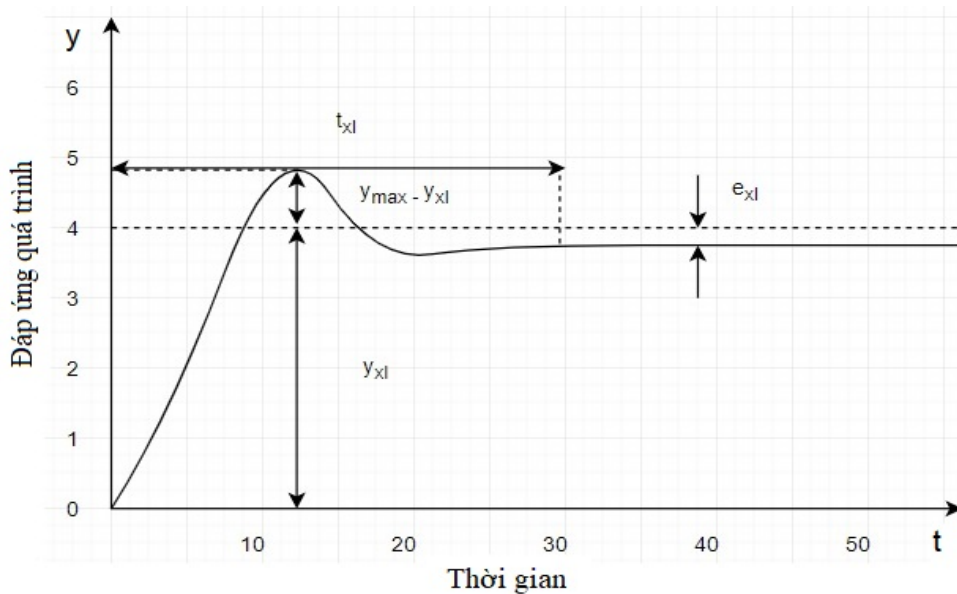
Nội dung nghiên cứu này khảo sát sự thay đổi của áp suất chân không theo thời gian trong quá trình thực nghiệm cô đặc đường. Dựa vào đó để xây dựng hàm truyền hệ thống nhằm tìm ra các thông số của bộ điều khiển, các thông số này phải đáp ứng chất lượng điều khiển. Để đánh giá chất lượng điều khiển, ta quan tâm đến: độ chính xác, độ lộn vố và thời gian đáp ứng. Độ vọt lố *POT* (*Percent Overshoot*) là đại lượng biểu thị sự vượt quá của giá trị đáp ứng với giá trị cài đặt trong quá trình đáp ứng quá độ. Độ lộn vố (*POT*) được tính theo công thức (1). Phương pháp xác định độ lộn vố được thể hiện trong Hình 1. Trong đó, thời gian xác lập t_{xl} là đại lượng đánh giá khoảng thời gian từ khi bắt đầu quá trình điều khiển đến khi giá trị đáp ứng đạt hoặc tiệm cận giá trị cài đặt trong một sai số cho phép. Đặc trưng cho độ chính xác điều khiển là sai số xác lập e_{xl} , nghĩa là sai số của đáp ứng khi quá trình ổn định so với giá trị cài đặt.

$$POT = \frac{y_{max} - y_{xl}}{y_{xl}} \times 100\% \quad (1)$$

Trong đó: POT là độ vọt lố (%); y_{max} là giá trị cực đại trong quá trình quá độ, đơn vị theo biến quá trình; y_{xl} là giá trị xác lập khi hệ đạt trạng thái cân bằng, đơn vị theo biến quá trình.

Mô hình toán của hệ được xây dựng từ thực nghiệm, chúng tôi ứng dụng mô hình quán tính bậc nhất có trễ (First order plus dead-time – FOPDT) vì tính đơn giản và thực dụng của mô hình toán này (Roy et al., 2005; Muresan et al., 2020). Mô hình FOPDT được thể hiện ở phương trình (2) dưới dạng hàm truyền $G(s)$. Trong đó, K là hệ số khuếch đại tĩnh (không đơn vị); τ là hằng số thời gian và θ là thời gian trễ tính theo cùng đơn vị thời gian.

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau \times s} \times e^{-\theta \times s} \quad (2)$$



Hình 2. Sơ đồ mô tả phương pháp xác định POT , t_{xl} và e_{xl}

Trong các quy luật điều khiển thông dụng, vòng điều khiển theo sách lược phản hồi với quy luật điều khiển PID (Proportional Integral Derivative) cho độ chính xác cao tác động đầy đủ đến các thành phần của sai số theo thời gian gồm độ lớn, thời gian tồn tại và xu hướng biến đổi. Bên cạnh đó quy luật điều khiển này cũng tương đối dễ tính toán dựa theo phương trình (3).

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int_0^t e(\tau) \times d\tau + K_D \times \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

Trong đó, K_p , K_i , K_D lần lượt là hệ số khuếch đại tỉ lệ, tích phân, vi phân (không đơn vị); $e(t)$ là hàm sai số theo thời gian của biến được điều khiển so với giá trị cài đặt có đơn vị theo biến được điều khiển. Các hệ số K_p , K_i , K_D quyết định chất lượng của bộ điều khiển

PID. Có nhiều phương pháp xác định và hiệu chỉnh các hệ số này. Nghiên cứu này sử dụng 2 phương pháp thường dùng là Ziegler Nichol I và hiệu chỉnh đồ thị trực quan từ mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink (Yucelen et al., 2006; Diaz-Rodriguez et al., 2017). Phương pháp Ziegler Nichol I đưa ra phương pháp tính các hệ số cho bộ điều khiển PID theo hệ phương trình (4).

$$\begin{cases} K_p = \frac{1,2 \times \tau}{K \times \theta} \\ K_i = \frac{K_p}{2 \times \theta} \\ K_D = \frac{K_p \times \theta}{2} \end{cases} \quad (4)$$

2.4. Trang thiết bị nghiên cứu

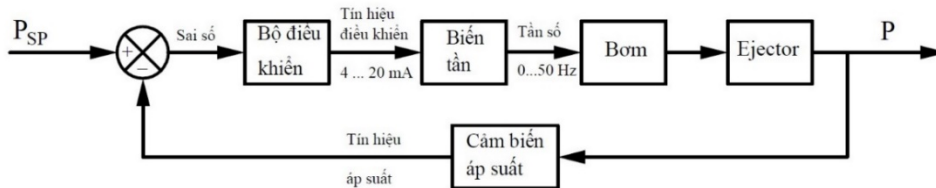
Nghiên cứu này sử dụng các loại linh kiện điều khiển xuất xứ từ châu Âu và Mỹ, được sử dụng trong công nghiệp như biến tần (SKBD200150, Emerson), bộ điều khiển PLC (S7-300, Siemen), cảm biến mức (Model 61, Mega Swing), cảm biến áp suất (PR-23RY, Keller-Druck), cảm biến nhiệt độ (644HANAXAQ4, Emerson).

Các phần mềm tin học như Tia Portal được sử dụng để lập trình hoạt động cho bộ điều khiển PLC và xây dựng giao diện giám sát thời gian thực HMI cho hệ thống cô đặc. Công cụ mô phỏng Matlab Simulink, và phương pháp Ziegler-Nichols I được sử dụng để tính toán các hệ số K_p , K_i , K_D lần lượt là hệ số khuếch đại tỉ lệ, tích phân, vi phân cho bộ điều khiển để điều khiển quá trình cô đặc.

3. Kết quả và thảo luận

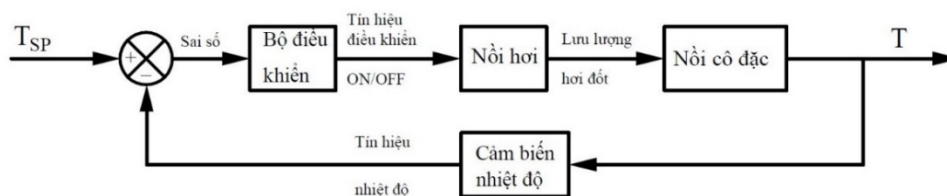
3.1. Thiết kế hệ thống điều khiển và lắp đặt linh kiện điều khiển tự động

Để tiến hành khảo sát quá trình cần thực hiện điều khiển lần lượt các đại lượng công nghệ trong hệ thống. Trong đó, vòng điều khiển ổn định áp suất là quan trọng nhất, tiếp theo là vòng điều khiển giám sát nhiệt độ sôi dung dịch để điều khiển thời gian cô đặc. Lựa chọn sách lược điều khiển phản hồi lần lượt xây dựng sơ đồ khối cho các vòng điều khiển trên. Sơ đồ khối vòng điều khiển áp suất được thể hiện trên Hình 3. Bên cạnh đó, vòng điều khiển nhiệt độ dung dịch trong nồi cô đặc được thực hiện theo sách lược điều khiển phản hồi với thuật toán đóng/mở (ON/OFF) như được trình bày trong Hình 4.



Hình 3. Sơ đồ khối vòng điều khiển áp suất

Kết hợp các sơ đồ khối đã xây dựng thu được thuật toán điều khiển chung cho cả quá trình gồm nhiều nhánh tín hiệu và tác động (Hình 5). Trong đó, bốn vòng điều khiển chính được thể hiện ở bốn nhánh công việc song song với nhau. Lần lượt từ trái sang phải là tạo áp suất chân không, cấp nhiệt buồng đốt, nhập liệu và giải nhiệt dòng nước tuần hoàn. Trong đó nhánh công việc tạo áp suất chân không có kết hợp với giám sát và điều khiển nhiệt độ dung dịch tạo thành nhánh công việc chính quyết định hoạt động và thời điểm kết thúc quá trình, vì sự thay đổi nồng độ đường sẽ cơ bản ảnh hưởng đến nhiệt độ sôi của dung dịch trong quá trình cô đặc, lượng hơi thứ bốc lên trong thiết bị cô đặc và ảnh hưởng đến áp suất chân không của hệ thống. Theo đó, quá trình sôi bên trong thiết bị có thể bị dập tắt hoặc bùng mạnh gây hiện tượng trào bọt. Đây là những hiện tượng không có lợi cho quá trình cô đặc. Do đó, duy trì áp suất chân không và nhiệt độ sôi của dung dịch là rất quan trọng trong quá trình cô đặc.



Hình 4. Sơ đồ khối vòng điều khiển nhiệt độ dung dịch

Lưu đồ thuật toán điều khiển được xây dựng cho của hệ thống cô đặc chân không hoạt động gián đoạn như trình bày ở Hình 5. Vòng điều khiển mức chất lỏng LC-01, sử dụng tín hiệu từ cảm biến mức gắn trên thân nồi cô đặc thực hiện điều khiển nhập liệu đủ lượng dung dịch cần thiết ban đầu. Vòng điều khiển áp suất chân không PIC-01 sử dụng 1 cảm biến áp suất gắn trên đỉnh buồng bốc lấy tín hiệu cho bộ điều khiển tác động đến bơm nước giải nhiệt. Vòng điều khiển nhiệt độ TIC-01, sử dụng tín hiệu từ cảm biến nhiệt độ gắn ở đáy nồi cô đặc để điều khiển và giám sát nhiệt độ sôi của dung dịch bằng cách tác động lên điện trở nồi hơi. Vòng điều khiển nhiệt độ TIC-02, sử dụng tín hiệu từ cảm biến nhiệt độ gắn ở vị trí đầu vào thiết bị ngưng tụ để điều khiển và giám sát nhiệt độ nước cấp cho thiết bị ngưng tụ. Vòng điều khiển này tác động lên đối tượng là tháp giải nhiệt nước. Ngoài ra, vòng điều khiển này kết hợp giám sát nhiệt độ đầu ra của thiết bị ngưng tụ TI-03.

Trong quá trình khảo sát, nhận thấy quá trình ban đầu cần tạo áp suất chân không nhanh nên bộ điều khiển áp suất được lập trình thuật toán ON/OFF trong giai đoạn đầu. Khi sai lệch giữa giá trị áp suất đo được và giá trị cài đặt nhỏ hơn 0,1 atm, bộ điều khiển chuyển sang thuật toán PID. Điều này sẽ giúp cho quá trình điều khiển áp suất ổn định hơn, do giảm ảnh hưởng của thành phần tích phân trong thuật toán điều khiển.

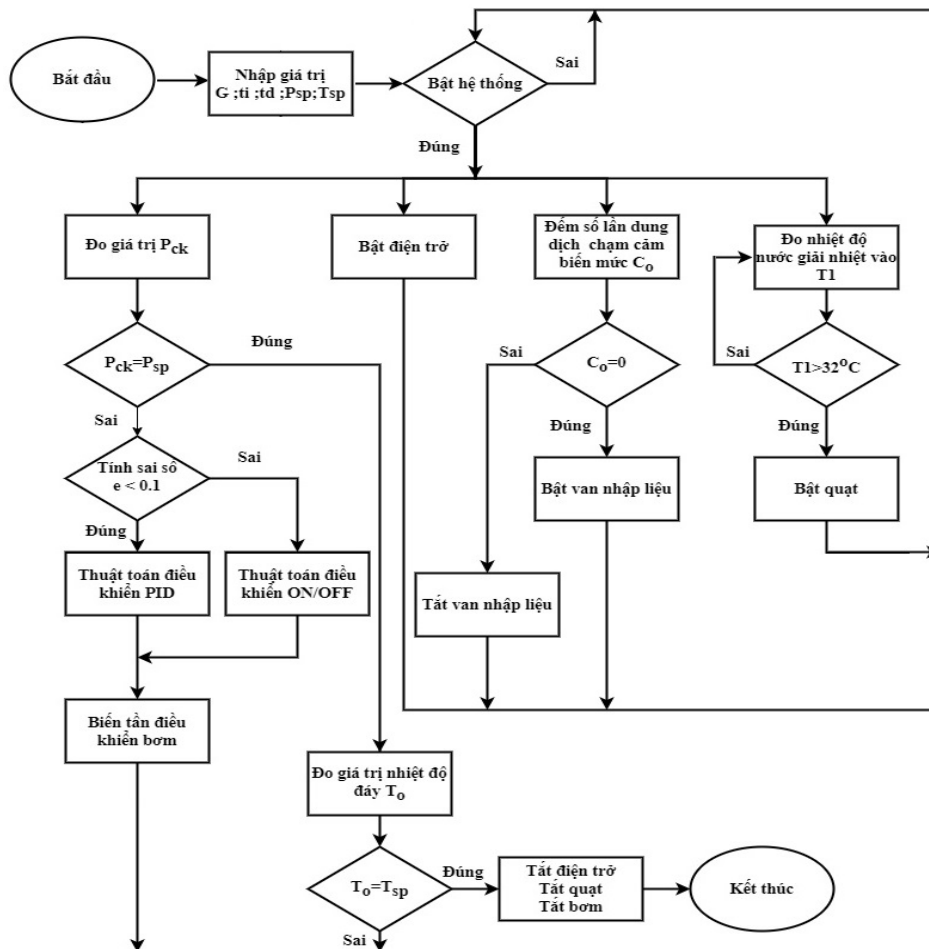
3.2. Khảo sát quá trình cô đặc và xử lý số liệu

Để thực hiện điều khiển quá trình cô đặc, nghiên cứu sử dụng phần mềm Tia Portal để lập trình hoạt động cho bộ điều khiển PLC tuân theo thuật toán thể hiện ở Hình 1 và Hình 5, đồng thời xây dựng giao diện theo dõi thời gian thực HMI kết nối hệ thống với máy tính (Nguyen et al., 2007; Tran, 2016). Trên cơ sở đó thực hiện khảo sát thực nghiệm quá trình

cô đặc và lập hàm truyền hệ thống theo mô hình FOPDT (Roy et al., 2005). Sử dụng phương pháp kẻ tiếp tuyến (Hoang, 2009), với tiếp tuyến đi qua điểm uốn sao cho hệ số góc là lớn nhất. Tiếp tuyến này giao với trục thời gian là thời gian trễ θ trong công thức hàm truyền. Đường thẳng khác tiệm cận với giá trị cân bằng của áp suất cho phép xác định hệ số khuếch đại tĩnh K và hằng số thời gian τ như mô tả ở Hình 6. Từ đó lập được hàm truyền của quá trình theo phương trình (5), với hệ số θ là 8,25.

$$G(s) = \frac{0,874}{1 + 146,4 \times s} e^{-8,25 \times s} \tag{5}$$

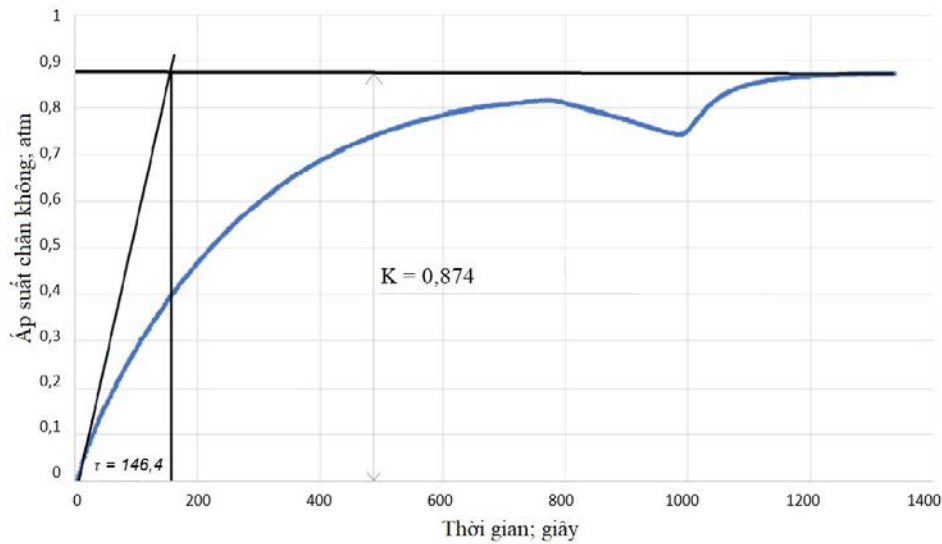
Để đánh giá độ tin cậy của mô hình hàm truyền (5), chúng tôi thực hiện so sánh chất lượng điều khiển của hệ trên phần mềm mô phỏng Matlab Simulink với hệ thực tế khi áp dụng cùng một bộ tham số điều khiển PID. Trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng bộ tham số điều khiển được chọn từ phương pháp truyền thống Ziegler-Nichols I.



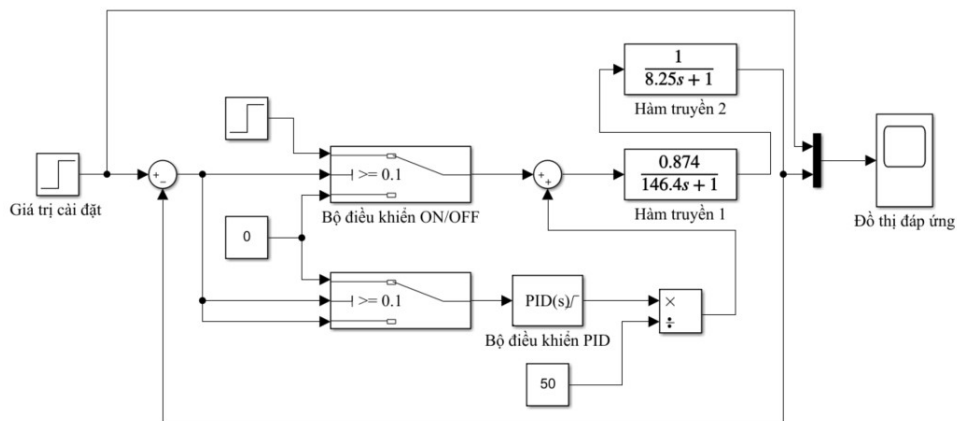
Hình 5. Sơ đồ khối thuật toán điều khiển quá trình cô đặc gián đoạn

Dựa theo phương pháp Ziegler-Nichols I (Yucelen et al., 2006; Scherlozer et al., 2016), với tín hiệu đầu vào là hàm nấc tương đương cho bơm hoạt động tạo áp suất chân không tối đa đã xác định được các hệ số K_P , K_I , K_D theo công thức (6).

$$\begin{cases} K_P = \frac{1,2 \times \tau}{K \times \theta} = 24,4 \\ K_I = \frac{K_P}{2 \times \theta} = 1,48 \\ K_D = \frac{K_P \times \theta}{2} = 100,65 \end{cases} \quad (6)$$



Hình 6. Sự thay đổi áp suất chân không theo thời gian có đặc từ thực nghiệm



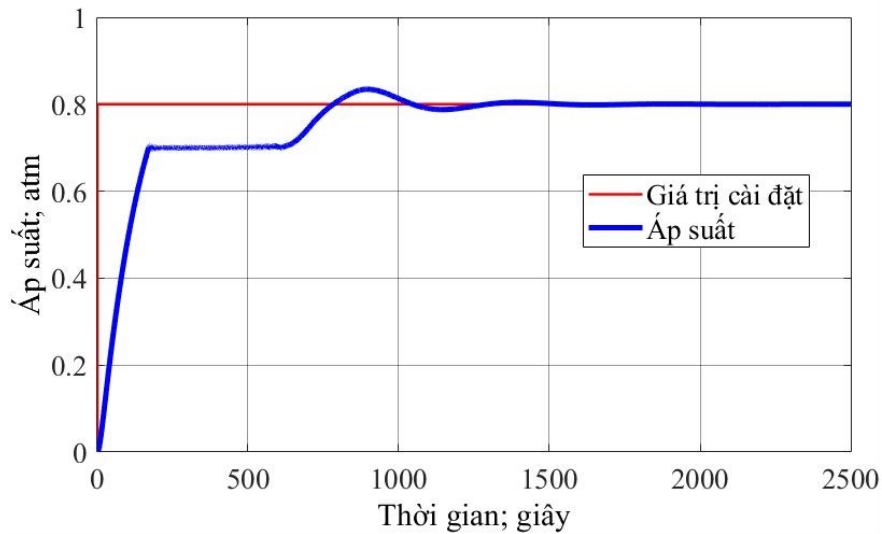
Hình 7. Mô hình mô phỏng hệ kín bằng Matlab Simulink

Bộ hệ số K_P , K_I , K_D từ phương pháp Ziegler-Nichols I được nạp vào PLC và sử dụng để điều khiển quá trình cô đặc thực nghiệm trên hệ thống cô đặc chân không và song song với đó các hệ số này cũng được sử dụng để mô phỏng trên công cụ Matlab Simulink. Mô hình dùng để mô phỏng được thể hiện trên Hình 7, tín hiệu ngõ vào sử dụng khối (Step) là tín hiệu cài đặt giá trị áp suất. Hàm truyền $G(s)$ theo phương trình (5) được biến đổi thành phương trình gần đúng (7).

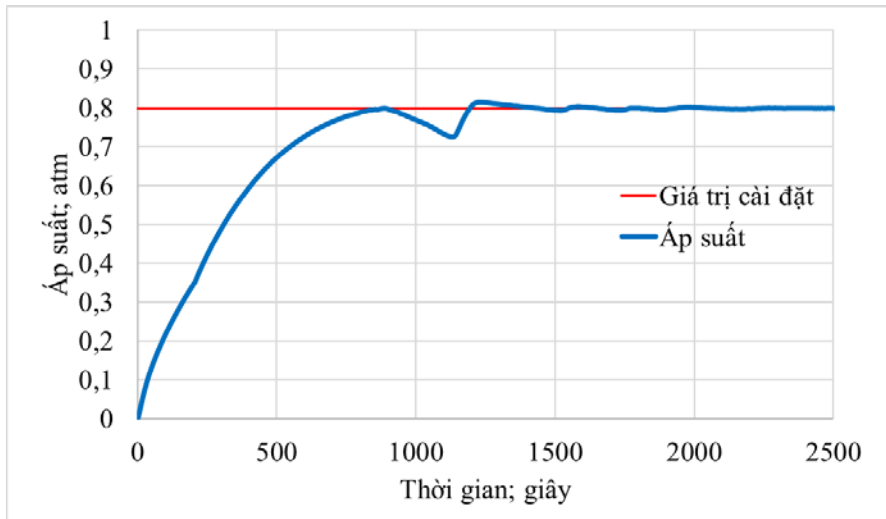
$$G(s) = \frac{0,874}{1 + 146,4 \times s} \times \frac{1}{1 + 8,25 \times s} \quad (7)$$

Ngoài ra trên mô hình mô phỏng còn sử dụng các khối công tắc mô phỏng bộ điều khiển ON/OFF kết hợp khối PID Controller và các khối hàm truyền mô phỏng cho quá trình.

Sử dụng cả hai khối hàm truyền theo phương trình (7) để mô phỏng tính toán quá trình cô đặc theo sơ đồ khối mô phỏng quá trình cô đặc như trình bày ở Hình 7, các hệ số bộ điều khiển được cài đặt cho khối PID là $K_P = 24,4$; $K_I = 1,48$; $K_D = 100,65$. Kết quả thu được là sự thay đổi của áp suất chân không theo thời gian như thể hiện ở Hình 8.



Hình 8. Đồ thị mô tả sự thay đổi của áp suất chân không theo mô phỏng



Hình 9. Đồ thị mô tả sự thay đổi của áp suất chân không theo thực nghiệm

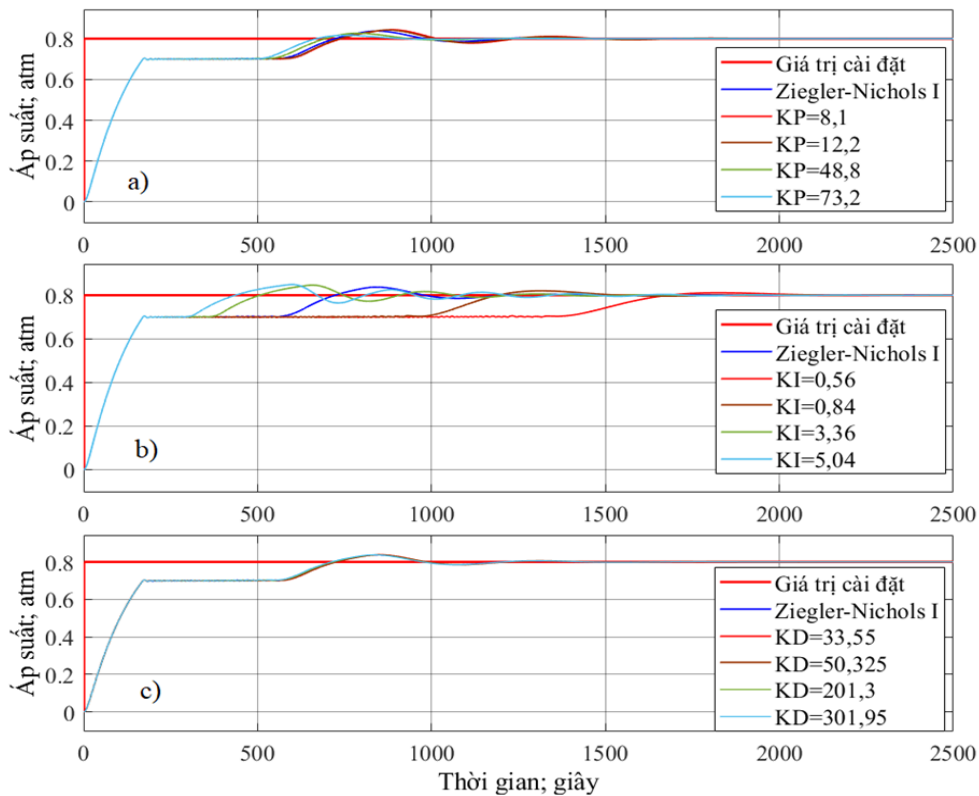
Sử dụng phần mềm TIA-Portal để lập trình cho bộ điều khiển PLC S7-300 vận hành với cùng bộ hệ số điều khiển thu được từ công thức (6). Đồng thời, nhóm nghiên cứu thiết kế một phần mềm giám sát và vận hành HMI để thu thập và lưu trữ số liệu từ thực nghiệm

trên hệ thống cô đặc chân không. Kết quả từ thực nghiệm thu được là sự thay đổi của áp suất chân không theo thời gian như thể hiện ở Hình 9.

Từ kết quả thu được từ Hình 8 và Hình 9 xác định các đại lượng đánh giá chất lượng điều khiển của quá trình cô đặc như thời gian đáp ứng, độ lọt vó và sai số xác lập. Kết quả được trình bày trong Bảng 1. Do mô hình toán mô phỏng bằng Simulink đã bỏ qua giai đoạn sôi nhanh của dung dịch nên giá trị độ vọt lố giữa mô hình và thực tế có sự chênh lệch tương đối lớn, tuy nhiên 2 đại lượng quan trọng hơn là thời gian xác lập và sai số xác lập hầu như không có sự chênh lệch đáng kể. Từ đó cho phép kết luận mô hình máy tính được xây dựng phản ánh sự tương đồng với hành vi của quá trình thực tế. Như vậy mô hình hàm truyền cho kết quả tin cậy.

Bảng 1. Kết quả kiểm tra mô hình và thực nghiệm

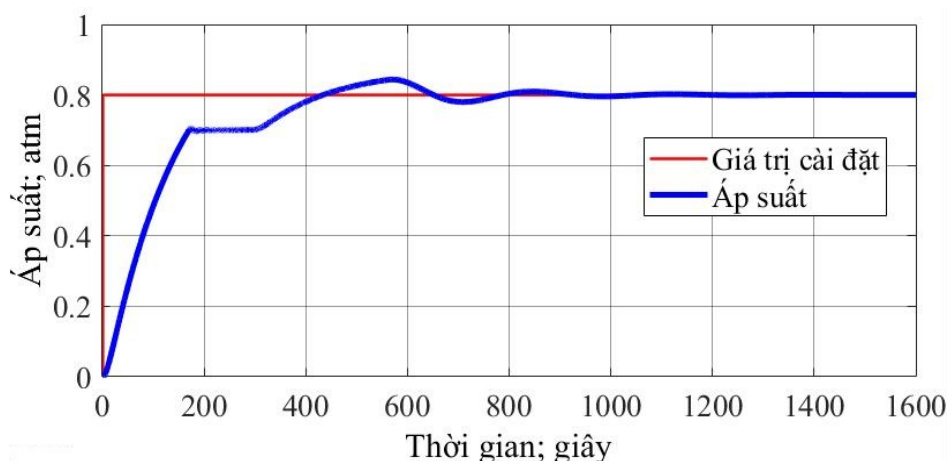
t	Mô phỏng Simulink	Thực nghiệm	Sai lệch
Thời gian đáp ứng	1900 giây	2000 giây	5,26 %
Độ vọt lố	4,19 %	2,25 %	46,3 %
Sai số xác lập	0,001	0,006	-



Hình 10. Sự ảnh hưởng các hệ số bộ điều khiển lên quá trình bằng Matlab/Simulink:
(a) Thay đổi K_P ; (b) Thay đổi K_I ; (c) Thay đổi K_D

Từ kết quả thu được, nhóm nghiên cứu tiếp tục tiến hành hiệu chỉnh các thông số của quá trình điều khiển nhằm tối ưu chất lượng điều khiển quá trình dựa trên mô hình mô phỏng sử dụng công cụ Matlab Simulink. Chúng tôi tiến hành thí nghiệm bằng phương pháp luân

phiên từng biến, tăng và giảm một hệ số đồng thời giữ nguyên hai hệ số còn lại. Hệ số thay đổi được nhân và chia từ hệ số tính được theo phương pháp Ziegler-Nichols I như trình bày ở công thức (6). So sánh sự thay đổi áp suất chân không theo thời gian từ những bộ hệ số điều khiển khác nhau (Hình 10) cho phép dự đoán quy luật về xu hướng biến đổi để có chất lượng điều khiển tối ưu.



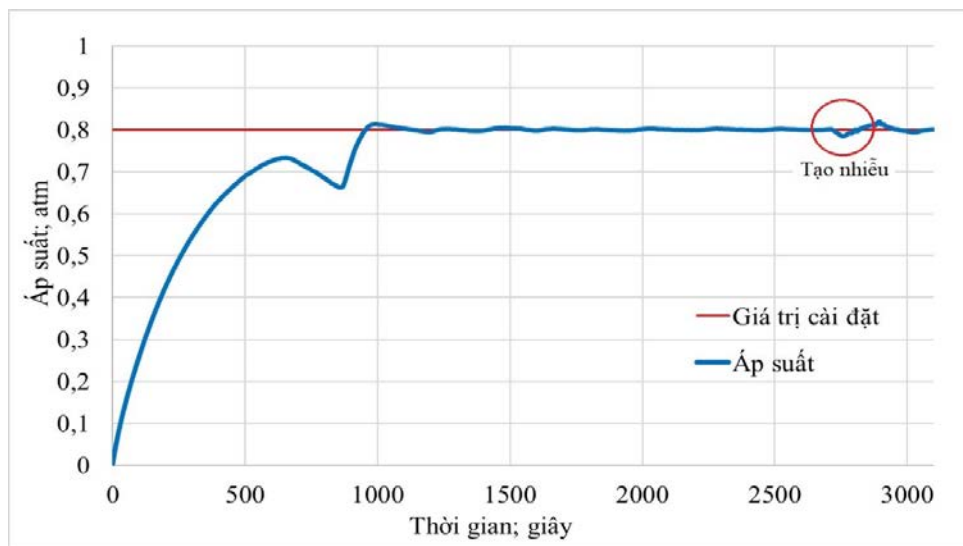
Hình 11. Kết quả mô phỏng điều khiển áp suất chân không với hệ số bộ điều khiển $K_P = 71,5$; $K_I = 4,5$; $K_D = 0$

Theo kết quả thu được ở Hình 10, nhận thấy khi giá trị K_P và K_I tăng dần, đáp ứng của mô hình cũng có xu hướng nhanh hơn theo một quy luật cố định. Sự thay đổi hệ số khuếch đại vi phân K_D trong tất cả các khảo sát đều không làm thay đổi đáp ứng của mô hình, do áp suất chân không là một đại lượng đáp ứng chậm. Như vậy, xu hướng biến đổi của K_P và K_I được xác định là lớn hơn so với giá trị thu được từ phương pháp Ziegler-Nichols I, trong khi đó hệ số K_D không ảnh hưởng đến quá trình. Kết quả hiệu chỉnh thu được bộ giá trị $K_P = 71,5$; $K_I = 4,5$; $K_D = 0$ với đáp ứng áp suất chân không đạt chất lượng điều khiển tốt hơn về thời gian xác lập khoảng 1200 giây và sai số xác lập khoảng 0,001 (Hình 11).

Sử dụng các hệ số điều khiển tối ưu thu được từ mô phỏng máy tính cài đặt vào bộ điều khiển PLC để điều khiển quá trình thực nghiệm. Đồ thị đáp ứng áp suất chân không của hệ thống điều khiển với giá trị cài đặt 0,8 atm cho kết quả như trên Hình 12. Chất lượng điều khiển gần như tương đồng với kết quả thu được từ mô hình mô phỏng về thời gian xác lập và sai số xác lập. Độ vọt lố trong thí nghiệm thực thậm chí còn tốt hơn trong kết quả mô phỏng, với giá trị POT là 0,625 %. Ngoài ra, kết quả của ba lần thí nghiệm cũng cho thấy quá trình cô đặc đã được điều khiển thành công với 100 % duy trì được áp suất chân không của quá trình với thời gian cô đặc là 2 giờ để tăng nồng độ đường từ 20 °Bx lên 65 °Bx. Sai số giữa các mẻ thí nghiệm là 2,5%.

Trong quá trình thực nghiệm, chúng tôi có kết hợp tạo một nhiễu ngẫu nhiên bằng cách mở van làm giảm áp suất chân không trong hệ. Kết quả thu được, hệ thống đã đáp ứng nhanh

và ổn định lại với độ vọt lố gần bằng POT ban đầu là 0,625% (Hình 12). Ngoài ra, khi tiến hành các thí nghiệm tạo áp suất chân không, quá trình luôn có một điểm tăng áp suất bất ngờ làm giảm áp suất chân không. Điểm này thể hiện sự sôi nhanh của dung dịch và quá trình ngưng tụ hơi thứ chưa đáp ứng kịp. Vì sự lặp lại và đồng dạng trong tất cả các thí nghiệm, hiện tượng này gần như không ảnh hưởng đến việc điều khiển hệ thống.



Hình 12. Đồ thị mô tả sự thay đổi của áp suất chân không theo thời gian thực với hệ số bộ điều khiển $K_P = 71,5$; $K_I = 4,5$; $K_D = 0$

4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng thành công hệ thống tự động hóa quá trình cô đặc gián đoạn dung dịch đường quy mô pilot. Dựa trên sách lược điều khiển nhiều vòng đơn độc lập đã thiết lập được lưu đồ P&ID của hệ thống cô đặc với 4 vòng điều khiển bao gồm mức chất lỏng nhập liệu ban đầu, áp suất chân không nồi cô đặc, nhiệt độ của dung dịch cô đặc và nhiệt độ của thiết bị ngưng tụ. Bằng phương pháp khảo sát thực nghiệm quá trình cô đặc và lập hàm truyền hệ thống theo mô hình FOPDT đã xác định được hàm truyền của hệ thống. Các hệ số K_P , K_I , K_D của bộ điều khiển được xác định bằng phương pháp Ziegler-Nichols I và mô phỏng tính toán bằng Matlab Simulink. Kết quả cho thấy, hàm truyền và các hệ số bộ điều khiển tương đồng với quá trình thực nghiệm. Đồng thời từ mô phỏng đã đưa ra thực tế một bộ điều khiển có chất lượng tốt với thời gian đáp ứng nhanh xấp xỉ 1200 giây, sai số xác lập gần bằng không cùng độ vọt lố 0,625%. Nghiên cứu cũng đã thiết lập nền tảng phương pháp xây dựng hệ thống tự động hóa cho điều khiển quá trình cô đặc chân không gián đoạn quy mô pilot hướng tới ứng dụng cho các dung dịch cô đặc đa dạng trong thực tiễn.

- ❖ **Tuyên bố về quyền lợi:** Các tác giả xác nhận hoàn toàn không có xung đột về quyền lợi.
- ❖ **Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số T-KTHH-2020-20. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Dang, T. Y., & Dang, Q. T. (2018). Nghiên cứu quy trình sản xuất trà bột hoa tan [Research on production of instant roselle tea]. *Journal of science technology & food*, 15, 95-105.
- Díaz-Rodríguez, I. D., Han, S., Keel, L.H., & Bhattacharyya, S.P. (2017). Advanced Tuning for Ziegler-Nichols Plants. *IFAC PapersOnLine*, 50(1), 1805-1810.
- Elhaq, S. L., Giri, F., & Unbehauen, H. (1999). Modelling, identification and control of sugar evaporation - theoretical design and experimental evaluation. *Control Engineering Practice*, 7, 931-942.
- Hackett, B. W. (2018). The Essentials of Continuous Evaporation. *American Institute of Chemical Engineers (AIChE) Journal*, 24-28.
- Hoang, M. S. (2009). *Cơ sở hệ thống điều khiển qua trình [Principles of Process Control]*. Hanoi: Bách khoa Publishing House.
- Le, T. T., & Le, T. T. D. (2018). Chế biến jam (mứt) sô ri và sự biến đổi hàm lượng vitamin C và polyphenol trong quá trình chế biến và bảo quản [Processing acerola jam and changes in concentrations of vitamin C and polyphenolic compounds during processing and storage]. *The Journal of Agriculture and Development*, 2, 87-92.
- Muresan, C. I., & Ionescu, C. M. (2020). Generalization of the FOPDT Model for Identification and Control Purposes. *Processes*, 8(682), 1-17.
- Nguyen, D. P., Phan, X. M., & Vu, V. H. (2007). *Tu động hóa với Siematic S7-300 [Use of Siematic S7-300 for automatic control]*. Hanoi: Science and Technics Publishing House.
- Nguyen, M. T., Tran, T. T. T., Dinh, C. D., Nguyen, A. T., & Nguyen, T. M. T. (2014). Ảnh hưởng của áp suất và thời gian cô đặc chân không, chất chống oxy hóa và chế độ thanh trùng đến chất lượng nước khóm cô đặc [Effect of vacuum processing, color stabilizers and pasteurization on concentrated pineapple juice quality]. *Can Tho University Journal of Science*, 31, 12-20.
- Nguyen, N. (2011). *Công nghệ đường mía [Sugar Cane Production Technology]*. Hanoi: Bách khoa Publishing House.
- Pham, V. B., & Nguyen, D. T. (2010). *Quá trình và thiết bị truyền nhiệt – Truyền nhiệt on định [Heat transfer process and equipment]*. Ho Chi Minh City: Vietnam National University, Ho Chi Minh City Publishing House.
- Roy, A., & Iqbal, K. (2005). PID controller tuning for the first-order-plus-dead-time process model via Hermite-Biehler theorem. *ISA Transactions*, 363-378.

- Scherlozer, A., Orsini, M., & Patole, S. (2016). Simulation and Numerical Analysis and Comparative Study of a PID Controller Based on Ziegler-Nichols and Auto Turning Method. *International Conference on Control and Automation*, 1-16.
- Tran, V. H. (2016). *Tu dong hoa PLC S7-300 voi Tia Portal [Automating PLC S7-300 with Tia Portal]*. Ha Noi: Science and Technics Publishing House.
- Wetzel, L. E. (1996). Optimizing vacuum systems for energy-efficient operation. *Chemical Processing*, 1-3.
- Yucelen, T., Kaymakci, O., & Kurtulan, S. (2006). Self-Tuning PID Controller Using ZieglerNichols for Programmable Logic Controllers. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(14), 11-16.

AUTOMATION OF SUGAR FED-BATCH EVAPORATION PROCESS: A PILOT STUDY

Tran Le Hai^{1,2}, *Nguyen Si Xuan An*^{1,2}, *Nguyen Thi Nhu Ngoc*^{1,2},
Nguyen Hong Hai^{1,2}, *Ly Khac Tong*^{1,2}, *Bui Ngoc Pha*^{1,2,*}

¹ Faculty of Chemical Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Vietnam

² Viet Nam National University Ho Chi Minh City (VNU-HCM), Vietnam

*Corresponding author: Bui Ngoc Pha – Email: buingocpha@hcmut.edu.vn

Received: September 07, 2021; Revised: November 16, 2021; Accepted: December 12, 2021

ABSTRACT

Fed-batch vacuum evaporation is considered a difficult process for automation. In the present work, we studied the automation of sugar concentration in a pilot study using a fed-batch vacuum evaporator. For the development of an automatic controlling system, the four individual-controlling loops were used to control the liquid-feeding level, the vacuum pressure in the evaporator, the temperature of the liquid in the heating element, and the temperature of the liquid in the condenser, respectively. Based on the study using the First order plus dead-time model (FOPDT), a transfer function of the process was successfully developed. Accordingly, the operational parameters for PID control, including K_P ; K_I and K_D to program the controller were determined based on the Ziegler-that the simulation results reflect similar behavior of the actual process, indicating that the obtained transfer function is reliable. The computational simulation is utilized to adjust the operational parameters for an optimization of the controlling quality using the derived transfer function and obtaining the $K_P = 71,5$; $K_I = 4,5$ and $K_D = 0$, with the response time of 1200 s, the percentage of overshoot (POT) of 0,625%, and the error of nearly zero. The study has developed an approach to determine the operating parameters for automatation of the evaporation process which can be applied to different types of fruit juices and bio-active products.

Keywords: automation; Matlab/Simulink; process control, vacuum evaporation; Ziegler-Nichols