

THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN TỰ ĐỘNG CHO THIẾT BỊ TRAO ĐỔI NHIỆT ỚNG CHÙM

● PHẠM HOÀNG HUY PHƯỚC LỢI^{1,2} - BÙI NGỌC PHA^{1,2,*}

¹Khoa Kỹ thuật Hóa học, Trường Đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh

²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: buingocpha@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT:

Nghiên cứu giải pháp thiết kế hệ thống điều khiển tự động cho thiết bị trao đổi nhiệt dạng ống chùm quy mô phòng thí nghiệm. Mục tiêu chính là ổn định nhiệt độ đầu ra của dòng nóng thông qua việc điều chỉnh tự động lưu lượng dòng lạnh. Nghiên cứu đã tiến hành cải tạo phần cứng, lắp đặt thêm bơm lưu lượng DC và nâng cấp hệ thống đo lường bằng cảm biến kỹ thuật số DS18B20. Giao diện điều khiển giám sát được xây dựng trên phần mềm SerialCom Instrument kết nối với vi điều khiển trung tâm Arduino Mega 2560. Bộ điều khiển tỷ lệ - tích phân - vi phân (PID) phản hồi được thiết kế và tối ưu hóa thông số thông qua phương pháp Ziegler-Nichols, công cụ Matlab Simulink và thực nghiệm thử sai. Kết quả cho thấy, hệ thống hoạt động ổn định, bộ thông số PID tối ưu giúp nhiệt độ bám sát giá trị đặt với sai số rất thấp (0,12%) và hiệu suất truyền nhiệt thực tế đạt khoảng 65%.

Từ khóa: thiết bị trao đổi nhiệt ống chùm, điều khiển tự động, điều khiển PID, Matlab Simulink, Arduino.

1. Đặt vấn đề

Thiết bị trao đổi nhiệt ống chùm là một trong những thiết bị quan trọng nhất, chiếm từ 35% đến 40% các ứng dụng trong dây chuyền sản xuất công nghiệp như nhiệt điện, lọc hóa dầu và hóa chất (S. Kallannavar S. Mashyal, M. Rajangale, 2020; L. Y. Chen, V. S. K. Adi, R. Laxmidewi, 2022). Để đảm bảo chất lượng sản phẩm, hiệu quả vận hành và an toàn hệ thống, nhu cầu tự động hóa và giám sát chặt chẽ đối với loại thiết bị này là rất lớn (S. Dehran, 2017).

Mặc dù đã có một lượng lớn các nghiên cứu về việc thiết kế và thử nghiệm bộ điều khiển ở quy mô phòng thí nghiệm được công bố, việc triển khai trên thực tế thường gặp rào cản do phần mềm điều khiển mặc định của nhà sản xuất bị giới hạn, không cho phép sửa đổi để áp dụng các thuật toán tùy (N.

Mansour, M. Bin Shams, and H. Ismail, 2022). Vì vậy, nghiên cứu này được thực hiện với mục tiêu xây dựng một giải pháp toàn diện từ cải tạo phần cứng, lắp đặt thiết bị đến thiết kế giao diện phần mềm giám sát, từ đó triển khai thành công thuật toán điều khiển PID cho hệ thống trao đổi nhiệt dạng ống chùm kiểu 1-4.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Cấu trúc hệ thống và thiết bị

Hệ thống sử dụng thiết bị trao đổi nhiệt ống chùm với lớp vỏ inox và 20 ống đồng truyền nhiệt bên trong (đường kính ngoài 8mm, chiều dài 340mm). Để tự động hóa quá trình, một bơm chìm DC 12V (công suất 180W) được lắp đặt bổ sung nhằm tự động điều chỉnh lưu lượng dòng lạnh giải nhiệt. Khắc phục hạn chế của cảm biến Pt100 nguyên bản, hệ thống được nâng cấp sử dụng 5 cảm biến kỹ thuật số DS18B20 (sai số $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) để đo lường chính xác và giao tiếp

trực tiếp với vi điều khiển Arduino Mega 2560. Toàn bộ cấu trúc của hệ thống bài thí nghiệm sau khi được cải tạo, bao gồm việc lắp đặt thêm bơm điều khiển dòng lạnh và tủ điện tự động, được minh họa chi tiết trong Hình 1.

2.2. Sách lược điều khiển quá trình

Quá trình truyền nhiệt trong thiết bị được áp dụng sách lược điều khiển phản hồi vòng kín với các biến sau:

Biến cần điều khiển: Nhiệt độ đầu ra của dòng nóng (T_{RI}).

Biến điều khiển: Lưu lượng dòng lạnh (F_2), được thao tác bằng cách thay đổi độ rộng xung cấp cho Module Mosfet HA210N06 để thay đổi tốc độ quay của bơm.

Biến nhiễu: Lưu lượng và nhiệt độ đầu vào của dòng nóng, cùng sự tổn thất nhiệt ra môi trường.

2.3. Thiết kế bộ điều khiển PID

Đầu tiên, hàm truyền của hệ thống được xác định

bằng thực nghiệm qua phương pháp kẻ tiếp tuyến tại điểm uốn, thu được mô hình xấp xỉ bậc 1 có trễ:

$$W(s) = \frac{-6}{40s + 1} e^{-6.67s}$$

Từ hàm truyền này, nghiên cứu tiến hành tìm tham số cho bộ điều khiển PID thông qua 3 phương pháp:

- (i) Tính toán theo tiêu chuẩn Ziegler-Nichols 1.
- (ii) Tối ưu hóa bằng công cụ PID Tuner trên phần mềm Matlab Simulink.
- (iii) Thực nghiệm thử sai trực tiếp trên hệ thống vật lý để triệt tiêu các sai lệch do nhiễu môi trường.

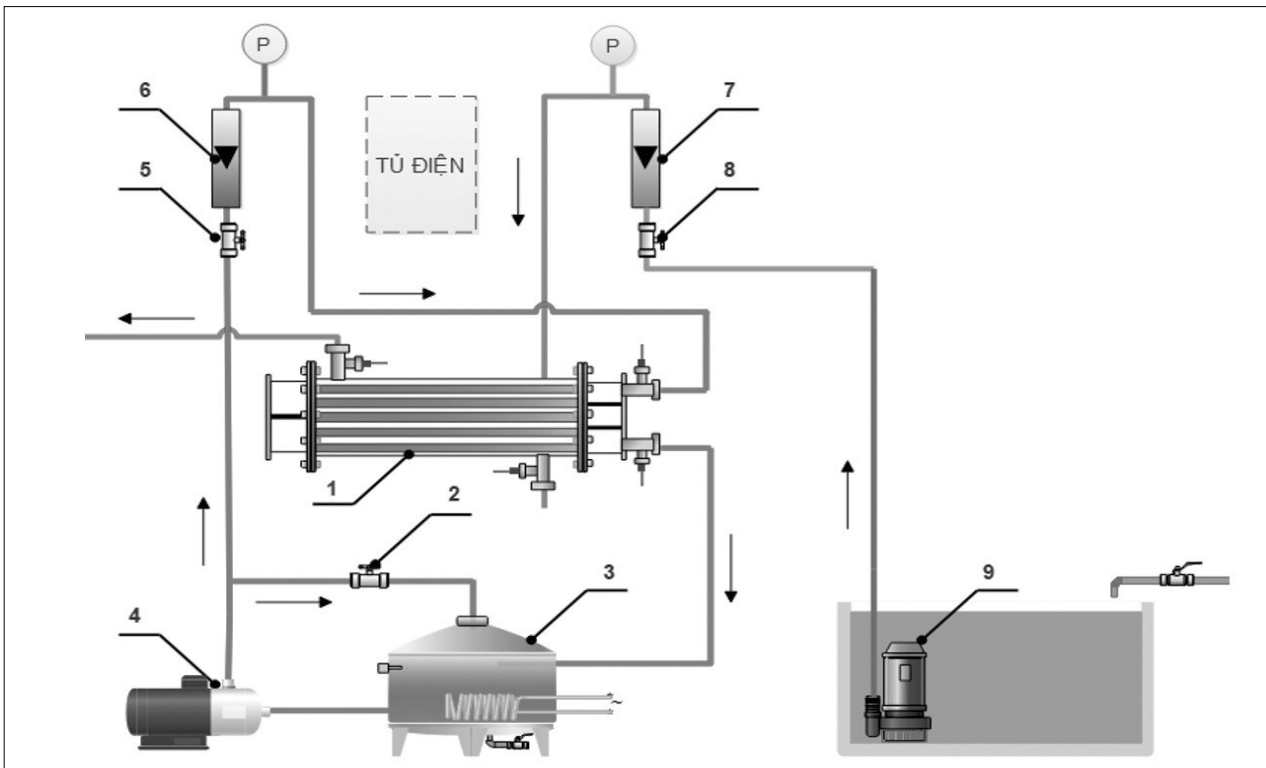
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Phân tích đáp ứng của hệ thống điều khiển PID

Để đánh giá chất lượng của thuật toán PID lý thuyết, quá trình mô phỏng trên Matlab Simulink đã được tiến hành để so sánh giữa bộ thông số Ziegler-Nichols 1 ($K_P = 1.2$, $K_I = 0.09$, $K_D = 4$) và bộ thông

Hình 1: Cấu tạo hệ thống bài thí nghiệm truyền nhiệt ống chùm sau khi lắp bơm điều khiển dòng lạnh và tủ điện

(1) Lưu lượng kế dòng nóng; (2) Van điều chỉnh dòng nóng; (3) Bơm; (4) Van điều chỉnh dòng hồi lưu; (5) Nồi đun; (6) Thiết bị truyền nhiệt ống chùm; (7) Van điều chỉnh dòng lạnh; (8) Lưu lượng kế dòng lạnh; (9) Bơm chìm.



số tối ưu hóa bằng PID Tuner ($K_P = 0.294$, $K_I = 0.011$, $K_D = 1.03$).

Dựa vào đồ thị mô phỏng Hình 2 và các chỉ số tính toán, có thể thấy phương pháp Ziegler-Nichols mang lại độ vọt lố thấp hơn rất nhiều (chỉ 0,44% so với 2,22% của bộ Simulink). Mặc dù bộ thông số Matlab cho thời gian xác lập nhanh hơn đôi chút (160s so với 200s), nhưng đặc tính ít vọt lố của Ziegler-Nichols đảm bảo tính ổn định cao hơn, phù hợp để áp dụng cho hệ thống nhiệt thực tế nơi tính an toàn được đặt lên hàng đầu.

Khi tiến hành chạy trên thiết bị vật lý thực tế, do có tác động của nhiều môi trường, phương pháp thử sai đã được áp dụng để vi chỉnh lại bộ số Ziegler-Nichols nhằm tìm ra thông số tối ưu nhất. Hình 3 biểu diễn quá trình nhiệt độ bám theo giá trị đặt (setpoint) theo thời gian thực. Sau quá trình tinh chỉnh (tăng K_I lên 0.1 và giảm K_D xuống 2), đường đáp ứng (màu đen) bám sát hoàn hảo vào đường giá trị mong muốn (màu đỏ). Cụ thể, nhiệt độ đầu ra của dòng nóng đạt và duy trì vô cùng ổn định ở mức 49.94°C. Sai số xác lập đạt mức cực kỳ thấp, chỉ 0,12%, với thời gian để hệ thống đi vào trạng thái ổn định (thời gian xác lập) chỉ mất 5 phút (300 giây). Điều này minh chứng hệ thống có khả năng kháng nhiễu và bám điểm đặt tuyệt vời.

3.2. Đánh giá hiệu suất truyền nhiệt thực tế

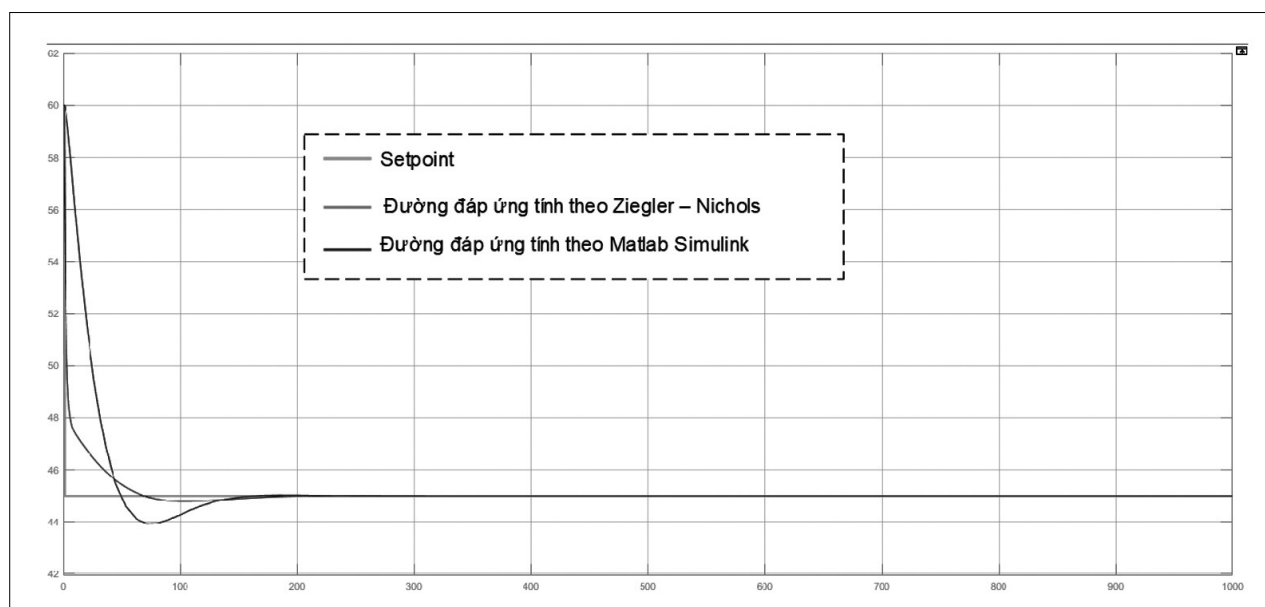
Nhằm đánh giá năng lực hoạt động của thiết bị sau khi được điều khiển tự động hóa, nhóm nghiên cứu đã tiến hành đo lường nhiệt lượng tỏa ra, nhiệt lượng thu vào và tính toán hiệu suất truyền nhiệt theo thời gian thực. Toàn bộ kết quả đo lường và các thông số tính toán chi tiết được tổng hợp trong Bảng 1.

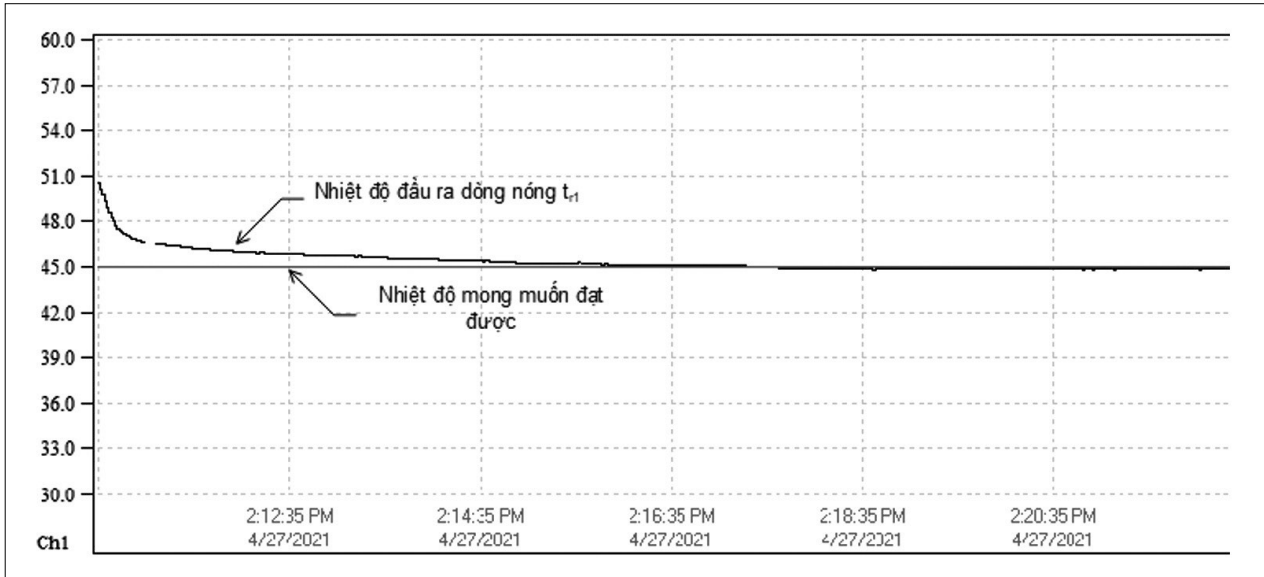
Số liệu thực nghiệm chỉ ra một khuynh hướng rõ rệt về hiệu suất của thiết bị. Trong khoảng 2 phút đầu tiên, quá trình trao đổi nhiệt diễn ra rất tốt với hiệu suất η đạt tới 86.2%. Tuy nhiên, từ phút thứ 6 trở đi khi hệ thống đạt được trạng thái xác lập nhiệt độ (setpoint), hiệu suất bắt đầu sụt giảm và ổn định quanh mức 64,7% đến 65%. Sự biến thiên này được giải thích bởi lượng nhiệt thất thoát ra môi trường xung quanh gia tăng khi thiết bị đi vào ổn định nhiệt (Q_f dao động từ 680W đến 713W) do thiết bị hiện tại không được trang bị lớp bọc cách nhiệt. Đồng thời, dựa vào chênh lệch nhiệt độ logarit trung bình, hệ số truyền nhiệt dài thực tế (K_{tt}) của thiết bị được tính toán duy trì ổn định ở mức xấp xỉ 245 W/m.K, chứng tỏ thiết bị tuy có tổn thất nhưng lõi truyền nhiệt bên trong vẫn làm việc hiệu quả.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng và vận hành thành công hệ thống điều khiển tự động hoàn chỉnh cho thiết bị

Hình 2: Đồ thị so sánh khả năng đáp ứng của bộ PID tính theo Ziegler - Nichols và bộ K_P , K_I , K_D tối ưu theo Matlab Simulink



Hình 3: Đồ thị đáp ứng với bộ $K_P = 1.2$; $K_I = 0.1$; $K_D = 2$ trên hệ thống thực**Bảng 1. Kết quả các thông số tính toán (Hiệu suất η , Tổn thất Q_f theo thời gian)**

Thời gian (phút)	Lưu lượng dòng nóng G_N (kg/s)	Lưu lượng dòng lạnh G_L (kg/s)	Nhiệt lượng dòng nóng Q_N (W)	Nhiệt lượng dòng lạnh Q_L (W)	Nhiệt lượng tổn thất Q_f (W)	η
1	0.066	0.133	1926.532	1661.173	265.359	0.862
2	0.066	0.133	2284.316	1938.035	346.281	0.848
4	0.066	0.133	2171.476	1661.173	510.303	0.765
6	0.066	0.099	2132.946	1453.526	679.419	0.681
8	0.066	0.099	2149.459	1453.526	695.933	0.676
10	0.066	0.066	1959.558	1245.880	713.678	0.636
12	0.066	0.066	1926.532	1245.880	680.652	0.647

trao đổi nhiệt dạng ống chùm. Việc nâng cấp phần cứng bằng bơm chìm và cảm biến kỹ thuật số DS18B20 đã tạo ra sự đồng bộ tốt với vi điều khiển Arduino và giao diện giám sát trên nền tảng SerialCom Instrument. Bộ điều khiển PID với thông số hiệu chỉnh thực nghiệm ($K_P = 1.2$, $K_I = 0.1$, $K_D = 2$) đảm bảo hệ thống phản hồi cực nhanh,

duy trì sai số tĩnh vô cùng nhỏ (0,12%) và giữ hiệu suất thiết bị ổn định ở mức 65%. Hướng phát triển trong tương lai là thay thế bơm dòng lạnh bằng thiết bị có công suất lớn hơn kết hợp điều khiển bằng biến tần nhằm mở rộng dải nhiệt độ điều khiển của toàn bộ hệ thống, cũng như bọc cách nhiệt để hạn chế thất thoát nhiệt ■

Lời cảm ơn :

Nhóm tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU TRÍCH DẪN VÀ THAM KHẢO:

- [1] S. Kallannavar S. Mashyal, and M. Rajangale (2020). Effect of tube layout on the performance of shell and tube heat Exchangers. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 263-267.
- [2] L. Y. Chen, V. S. K. Adi, and R. Laxmidewi (2022). Shell and tube heat exchanger flexible design strategy for process operability. *Case Studies in Thermal Engineering*, 37.
- [3] S. Dehran (2017). Modern Day Automation for Heat Exchanger Monitoring. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, 5, 15.
- [4] N. Mansour, M. Bin Shams, and H. Ismail (2022). Model predictive controller for a retrofitted heat exchanger temperature control laboratory experiment. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 25, 857-866.

Ngày nhận bài: 14/3/2026

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 27/3/2026

Ngày chấp nhận đăng bài: 15/4/2026

**DESIGN OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM
FOR A SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER**

● **PHAM HOANG HUY PHUOC LOI^{1,2}**

● **BUI NGOC PHA^{1,2*}**

¹ Faculty of Chemical Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology

² Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam

*Email: buingocpha@hcmut.edu.vn

ABSTRACT:

This study investigates the design and implementation of an automated control system for a laboratory-scale shell-and-tube heat exchanger. The primary objective was to stabilize the outlet temperature of the hot stream by automatically regulating the cold-stream flow rate. The research involved hardware modifications, including the integration of a DC flow pump and an upgraded temperature measurement system using DS18B20 digital sensors. A control and monitoring interface was developed using SerialCom Instrument software and connected to an Arduino Mega 2560 microcontroller. A proportional–integral–derivative (PID) feedback controller was designed and optimized through the Ziegler-Nichols method, MATLAB Simulink simulations, and trial-and-error experiments. The results demonstrate that the system operated stably, with the optimized PID parameters enabling the outlet temperature to closely track the setpoint with a very low error of 0.12%. The actual heat transfer efficiency reached approximately 65%, indicating the effectiveness of the proposed automated control system.

Keywords: shell-and-tube heat exchanger, automatic control, PID control, Matlab Simulink, Arduino.