

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ THIẾT BỊ KIỂM ĐỊNH ĐỘ CHỊU ẪN MÒN SULFUA DIOXIT CHO SPRINKLER THEO 6305-1:2007

STUDY ON DESIGN OF A CORROSION TESTING APPARATUS FOR SULFUR DIOXIDE RESISTANCE OF SPRINKLER UNDER TCVN 6305-1:2007

Phan Hoàng Long^{1,2}, Nguyễn Hữu Nhân¹, Nguyễn Huy Hùng⁴,
Dương Văn Tú^{1,2,3}, Nguyễn Tấn Tiến^{1,2,3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

⁴Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Sài Gòn

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế thiết bị kiểm định độ chịu ăn mòn của đầu phun chữa cháy (sprinkler) trong môi trường khí SO₂ theo TCVN 6305-1:2007. Thiết bị gồm bể thủy tinh borosilicate, chi tiết tiếp xúc SO₂ bằng teflon, khung thép không gỉ, và hệ thống gia nhiệt đèn halogen được giám sát kép trong buồng thử và tại nguồn. Trên cơ sở mô hình truyền nhiệt bậc nhất có tổn thất, cấu trúc điều khiển cascade kết hợp bộ điều khiển trượt được áp dụng để duy trì nhiệt độ ổn định. Mô phỏng cho thấy hệ thống đạt nhanh điểm đặt, ổn định trong dải yêu cầu, đáp ứng điều kiện khắc nghiệt và phù hợp để tự động hóa.

Từ khóa: Đầu phun chữa cháy; Sulfua dioxit; TCVN 6305-1:2007; Điều khiển trượt; Kiểm định tự động.

ABSTRACT

This paper presents the design of a corrosion testing apparatus for fire sprinklers in a sulfur dioxide (SO₂) environment in compliance with TCVN 6305-1:2007. The apparatus consists of a borosilicate glass chamber, SO₂-exposed parts made of Teflon, a stainless steel frame, and a halogen heating system with dual temperature monitoring-inside the test chamber and at the heating source. Based on a first-order heat-transfer model with losses, a cascade control structure combined with a sliding-mode controller is applied to maintain stable temperature. Simulation results show that the system rapidly reaches the setpoint and remains within the required tolerance range, meeting stringent testing conditions and being suitable for automation.

Keywords: Fire sprinkler; Sulfur dioxide; TCVN 6305-1:2007; Sliding mode control; Automated testing.

1. TỔNG QUAN

Đầu phun chữa cháy (sprinkler) là một trong những thiết bị phòng cháy chữa cháy (PCCC) quan trọng, có khả năng kích hoạt sớm nhằm kiểm soát và dập tắt đám cháy ngay từ giai đoạn đầu, hạn chế tối đa thiệt hại về người và tài sản. Tại Việt Nam, trước khi được lắp đặt và đưa vào sử dụng, sprinkler bắt buộc phải đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật quy định trong QCVN 03:2021/BCA và TCVN 6305-1:2007.

Các yêu cầu và quy trình thử nghiệm tương ứng đã được hệ thống hóa trong các nghiên cứu [1], [2]. Trong đó, [2] đề xuất phương pháp phân nhóm các bài kiểm tra dựa trên đặc tính hóa – lý và sự tương đồng về quy trình thực hiện. Nhóm 4 gồm bốn phép thử:

- (6) Nhiệt độ làm việc của sprinkler;
- (7) Khả năng chịu nhiệt của bầu thủy tinh;
- (8) Sốc nhiệt;
- (14) Độ chịu ăn mòn bởi khí sulfua dioxit (SO_2).

Trong các phép thử này, bài kiểm tra (14) đòi hỏi yêu cầu kỹ thuật khắt khe hơn cả, không chỉ về điều kiện môi trường thử nghiệm (độ ẩm và khí SO_2 ở nhiệt độ được điều khiển chính xác) mà còn về thời gian duy trì liên tục (từ 24 đến 48 giờ), dài hơn đáng kể so với ba phép thử còn lại (thường dưới 1 giờ). Do đó, một thiết bị kiểm định được thiết kế đáp ứng yêu cầu của bài kiểm tra (14) hoàn toàn có thể sử dụng để thực hiện các phép thử khác trong nhóm, vừa đảm bảo tính chính xác vừa nâng cao hiệu quả vận hành.

Thực tế cho thấy, trong các môi trường khắc nghiệt như nhà máy hóa chất hoặc kho chứa vật liệu dễ cháy, sự hiện diện của khí SO_2 kết hợp với độ ẩm cao có thể tạo thành

dung dịch axit yếu, gây ăn mòn dần các chi tiết kim loại của sprinkler. Hiện tượng này làm suy giảm hiệu suất hoạt động và có thể dẫn tới hỏng hóc, làm chậm hoặc mất khả năng kích hoạt khi có cháy. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết phải kiểm định và đánh giá độ chịu ăn mòn của sprinkler theo tiêu chuẩn trước khi lắp đặt, cũng như trong quá trình khai thác.

Xuất phát từ yêu cầu thực tiễn đó và định hướng thúc đẩy tự động hóa trong kiểm định PCCC, bài báo này đề xuất phương án thiết kế một thiết bị kiểm định độ chịu ăn mòn bởi khí SO_2 cho sprinkler. Thiết bị vừa đảm bảo đáp ứng đầy đủ các tiêu chuẩn kỹ thuật của TCVN 6305-1:2007, vừa có khả năng mở rộng để thực hiện các phép thử khác thuộc cùng nhóm, góp phần nâng cao độ tin cậy, an toàn và hiệu quả trong công tác kiểm định thiết bị PCCC.

2. PHƯƠNG ÁN

Mặc dù các thông số kỹ thuật và cấu trúc cơ khí của bể kiểm nghiệm đã được xác định rõ ràng dựa trên yêu cầu của TCVN 6305-1:2007, thách thức chính trong thiết kế là đảm bảo duy trì ổn định nhiệt độ bên trong buồng thử ở mức quy định trong suốt thời gian kiểm định.

Trong cấu hình đề xuất, bộ phận gia nhiệt được đặt ngoài không khí và truyền nhiệt gián tiếp vào buồng thử thông qua thành bể thủy tinh và lớp dung dịch muối. Do đó, tốc độ gia nhiệt của nguồn nhiệt cao hơn đáng kể so với tốc độ tăng nhiệt của không khí bên trong buồng. Quá trình truyền nhiệt diễn ra theo nhiều giai đoạn:

- Nhiệt bức xạ từ đèn halogen truyền vào thành bể thủy tinh;



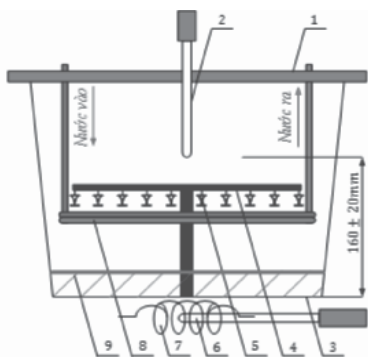
- Nhiệt lan truyền qua dung dịch muối;
- Nhiệt đối lưu từ dung dịch sang không khí bên trong bể thử.

Hiệu suất truyền nhiệt bị giới hạn bởi:

- Độ dẫn nhiệt thấp của chất lỏng;
- Đối lưu tự nhiên kém trong môi trường không khí tĩnh;
- Tổn thất nhiệt lớn qua thành bể thủy tinh (do không có lớp cách nhiệt nhằm phục vụ quan sát).

Các yếu tố này khiến quá trình gia nhiệt trở nên chậm và khó ổn định, gây khó khăn trong việc đạt và giữ nhiệt độ mục tiêu trong thời gian dài.

*Giải pháp khắc phục: Nhằm khắc phục hiện tượng chênh lệch lớn giữa tốc độ gia nhiệt của nguồn và tốc độ tăng nhiệt trong buồng thử, nhóm tác giả đề xuất tích hợp thêm cảm biến nhiệt độ tại bộ phận gia nhiệt. Cảm biến này có vai trò giám sát và giới hạn nhiệt độ tại nguồn, đảm bảo không vượt quá ngưỡng an toàn trong suốt quá trình vận hành.



Hình 1. Phương án thiết kế bể kiểm định SO_2 cho sprinkler theo TCVN 6305-1:

- 1 - Nắp bể; 2 - Cảm biến nhiệt độ trong bể;
- 3 - Bể thủy tinh; 4 - Gá đỡ sprinkler; 5 - Sprinkler;
- 6 - Cảm biến nhiệt độ tại bộ phận gia nhiệt;
- 7 - Bộ phận gia nhiệt; 8 - Ống sinh hàn;
- 9 - Dung dịch muối $Na_2S_2O_3$.

Giải pháp này đặc biệt quan trọng vì nhiệt độ đèn halogen có thể tăng lên hàng trăm °C chỉ sau vài phút nếu hoạt động liên tục, trong khi nhiệt độ bên trong buồng thử tăng chậm do quán tính nhiệt lớn. Nếu không kiểm soát, tình trạng quá nhiệt cục bộ có thể xảy ra, làm giảm tuổi thọ hoặc gây hỏng hóc thành bể thủy tinh, thậm chí dẫn tới nứt vỡ, gián đoạn quá trình kiểm nghiệm.

Như vậy, việc bổ sung cảm biến tại vị trí gia nhiệt không chỉ bảo vệ an toàn cho thiết bị mà còn giúp duy trì quá trình gia nhiệt hiệu quả, ổn định, đáp ứng yêu cầu nghiêm ngặt của tiêu chuẩn.

3. THIẾT KẾ CƠ KHÍ

Thiết kế cơ khí của bể kiểm nghiệm SO_2 được xây dựng dựa trên các yêu cầu kỹ thuật của TCVN 6305-1:2007, đảm bảo khả năng vận hành an toàn và đáp ứng các bài kiểm tra độ chịu ăn mòn của sprinkler trong môi trường khí SO_2 .

3.1. Cấu tạo bể kiểm nghiệm

Thân bể được chế tạo từ thủy tinh borosilicate, có khả năng chịu nhiệt độ đến 500°C, hệ số giãn nở nhiệt thấp và khả năng chịu sốc nhiệt tốt. Vật liệu này cho phép quan sát trực tiếp bên trong bể trong quá trình kiểm nghiệm, đồng thời bảo đảm độ bền cơ học và tính ổn định khi chịu tác động nhiệt.

Các chi tiết tiếp xúc trực tiếp với khí SO_2 như nắp bể, tấm gá và nắp đậy sprinkler được làm từ Teflon do đặc tính chịu nhiệt cao, kháng hóa chất tốt và không phản ứng với môi trường thử nghiệm. Khung đỡ, chốt khóa và ống sinh hàn được chế tạo từ thép không gỉ 304 nhằm bảo đảm độ bền cơ học, chống ăn mòn và đáp ứng điều kiện vận hành dài hạn.

3.2. Kết cấu tổng thể

Bể kiểm nghiệm và tủ điều khiển được bố trí đồng bộ trên cùng một khung để bằng thép sơn tĩnh điện, đảm bảo tính ổn định, thuận tiện khi di chuyển và giảm độ phức tạp trong lắp đặt. Cách bố trí này cũng giúp rút ngắn đường kết nối tín hiệu và nguồn, nâng cao độ tin cậy vận hành.

3.3. Hỗ trợ tự động hóa

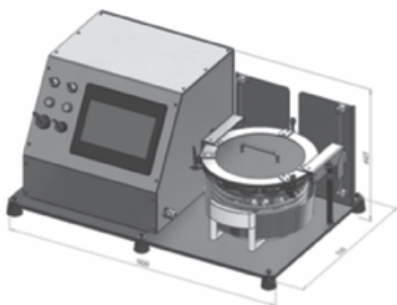
Hệ thống được tích hợp các cơ cấu hỗ trợ thao tác tự động, bao gồm:

- Cơ cấu đóng/mở nắp bể bằng tay quay hoặc cơ cấu nâng hạ tự động;
- Van xả dung dịch muối sau khi hoàn tất thử nghiệm;
- Các gá lắp tháo nhanh để thay thế hoặc kiểm tra sprinkler.

Những cải tiến này giúp giảm thời gian thao tác, nâng cao hiệu suất và hướng tới mục tiêu tự động hóa toàn bộ quy trình kiểm định.

3.4. Minh họa thiết kế

Hình 2 trình bày thiết kế tổng thể của hệ thống, bao gồm khung đỡ, tủ điều khiển và bể kiểm nghiệm, cho thấy cách bố trí đồng bộ và gọn gàng.



Hình 2. Thiết kế tổng thể hệ thống kiểm định độ chịu ăn mòn SO_2 cho sprinkler.

4. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

4.1. Mô hình quá trình truyền nhiệt

Bảng 1. Bảng định nghĩa mô hình hóa hệ thống

Ký hiệu	Ý nghĩa
T	Nhiệt độ trung bình của không khí trong bể thử, $^{\circ}C$
m_{air}	Khối lượng hỗn hợp khí bên trong bể thử, Kg
c_p	Nhiệt dung riêng của hỗn hợp khí bên trong bể thử, $JKg^{-1}K^{-1}$
Q_{in}	Công suất gia nhiệt do đèn nhiệt cấp cho bể thử, W
Q_{conv}	Tổn thất nhiệt do đối lưu qua thành bể, W
h_{conv}	Hệ số truyền nhiệt đối lưu, $Wm^{-2}K^{-1}$
A	Diện tích bề mặt trao đổi nhiệt, m^2
T_{amb}	Nhiệt độ môi trường bên ngoài, $^{\circ}C$
Q_{rad}	Tổn thất bức xạ nhiệt giữa bể và môi trường, W
ε	Hệ số bức xạ của vật liệu thành bể, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} (Wm^{-2}K^{-4})$ là hằng số Stefan Boltzmann.
Q	Tín hiệu công suất đầu vào, kW
T_h	Nhiệt độ tại cảm biến nguồn, $^{\circ}C$
K_H	Tham số khuếch đại tại nguồn
τ_h	Hằng số thời gian tại nguồn
τ_{oh}	Hằng số độ trễ tại nguồn
T_c	Nhiệt đầu ra tại cảm biến bể, $^{\circ}C$
K_C	Tham số khuếch đại tại đầu ra
τ_C	Hằng số thời gian tại đầu ra
τ_{0C}	Hằng số độ trễ tại đầu ra

Quá trình truyền và mất nhiệt của bể kiểm nghiệm được mô tả bởi phương trình cân bằng năng lượng:

$$m_{air}c_p \frac{dT(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{conv}(t) - Q_{rad}(t) \quad (1)$$

$$Q_{\text{conv}}(t) = h_{\text{conv}}A(T(t) - T_{\text{amb}}) \quad (2)$$

$$Q_{\text{rad}}(t) = \varepsilon\sigma A(T(t)^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (3)$$

4.2. Mô hình hóa hệ thống

Kết quả thí nghiệm đáp ứng bậc (step response) tại cả hai điểm đo – cảm biến nguồn (đèn halogen) và cảm biến bể – cho phép xấp xỉ hệ thống dưới dạng hàm truyền bậc nhất có trễ thời gian:

$$G(s) = \frac{T_h(s)}{Q(s)} = \frac{K_h e^{-t_{0h}s}}{1 + \tau_h s} \quad (4)$$

Dữ liệu đáp ứng thay đổi từ T_h đến T_c được dùng để ước lượng:

$$\frac{T_c(s)}{T_h(s)} = \frac{K_c e^{-t_{0c}s}}{1 + \tau_c s} \quad (5)$$

Để thuận tiện tính toán, độ trễ của mỗi vòng được thế bằng xấp xỉ Pade bậc 1:

$$e^{-t_{0s}} \approx \frac{1 - 0,5t_{0s}}{1 + 0,5t_{0s}} \quad (6)$$

4.3. Cấu trúc điều khiển

Do sự khác biệt lớn về động học giữa nguồn nhiệt và nhiệt độ bể, hệ thống sử dụng cấu trúc điều khiển cascade hai vòng:

Vòng trong bù trừ nhiệt của đèn halogen, điều khiển sai số $e_i = T_h^* - T_h$ để ra được tín hiệu Q .

Vòng ngoài dùng tham chiếu $T_{c,ref}$ so sánh với T_c để sinh ra T_h^* , giúp đảm bảo độ chính xác nhiệt độ bể.

4.4. Thiết kế bộ điều khiển trượt

Để nâng cao khả năng kháng nhiễu và giảm ảnh hưởng của biến động tải, vòng ngoài được thiết kế bằng luật điều khiển trượt.

Sai số bám:

$$e(t) = T_{c,ref}(t) - T_c(t) \quad (7)$$

Chọn hàm mặt trượt có dạng:

$$s(t) = ce(t) + \dot{e}(t) \quad (8)$$

Trong đó, hệ số $c > 0$ được xác định để hàm đặc trưng của mặt trượt là Hurwitz.

$$c = \frac{t_0 + \tau}{t_0 \tau} \quad (9)$$

Chọn luật tiếp cận tuyến tính:

$$\dot{s}(t) = -k\text{sgn}(s(t)) - \eta s(t) \quad (10)$$

Với $k > 0$ điều khiển tốc độ hội tụ và $\eta > 0$ hạn chế dao động khi s đủ nhỏ.

Kết hợp luật điều khiển (8) và (10) với mô hình (5), (6), ta có luật điều khiển:

$$u(t) = u_{eq}(t) - \frac{1}{b} [k\text{sgn}(s(t)) + \eta s(t)] \quad (11)$$

Trong đó, $u_{eq}(t)$ tìm được bằng cách đặt $\dot{s} = 0$ và giải ngược $G_{\text{pade}}(s)$; b là hệ số khuếch đại của tín hiệu đầu vào.

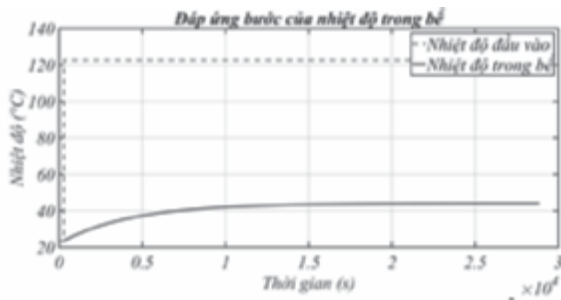
5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

5.1. Mục tiêu đánh giá

Các mô phỏng được thực hiện nhằm kiểm chứng khả năng đáp ứng của hệ thống điều khiển nhiệt độ bể kiểm nghiệm SO_2 khi áp dụng cấu trúc điều khiển cascade kết hợp bộ điều khiển trượt (SMC) ở vòng ngoài. Các tiêu chí đánh giá gồm:

- Thời gian đạt nhiệt độ mục tiêu T_{ref} ;
- Mức độ ổn định nhiệt độ trong vùng sai số cho phép $\pm\Delta T$;
- Khả năng kháng nhiễu khi tải nhiệt thay đổi hoặc môi trường xung quanh biến động.

Từ số liệu nhiệt độ đáp ứng bước của bể, ta tính được hàm truyền của hệ như sau:



Hình 3. Đáp ứng bước của hệ thống

$$G(s) = \frac{T_h(s)}{Q(s)} = \frac{1,92}{1 + 150s} \quad (12)$$

5.2. Cấu hình mô phỏng

Điều kiện ban đầu: Nhiệt độ môi trường 25°C.

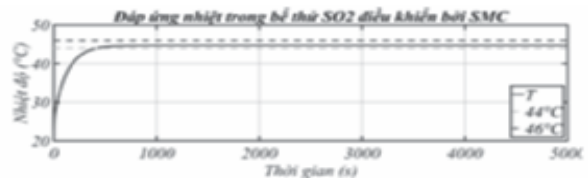
- Nhiệt độ đặt: $T_{ref} = 25^\circ\text{C} \div 150^\circ\text{C}$ (theo TCVN 6305-1:2007).

- Thời gian mô phỏng: 5000s, bước thời gian 1s.

Bộ điều khiển: (i) Vòng trong: PID điều khiển nhiệt độ nguồn (đèn halogen); (ii) Vòng ngoài: SMC điều khiển nhiệt độ bể.

Thông số SMC: $k = 300$; $\lambda = 0,2$; $\phi = 0,03$ (hiệu chỉnh qua thử nghiệm mô phỏng).

5.3. Kết quả mô phỏng



Hình 4. Mô phỏng đáp ứng nhiệt trong bể SO_2 điều khiển bởi bộ điều khiển mặt trượt với thời gian mô phỏng 5000 giây

Kết quả cho thấy:

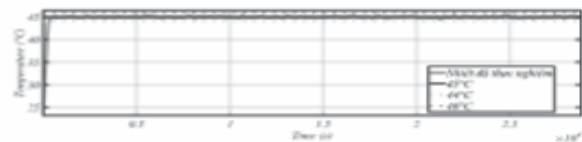
- Nhiệt độ bể tăng nhanh, đạt giá trị mục tiêu sau khoảng 500s;
- Sau khi đạt điểm đặt, nhiệt độ duy trì ổn định trong vùng $\pm\Delta T$, không xuất hiện dao động đáng kể;
- Hệ thống phản ứng tốt với nhiễu mô phỏng (thay đổi tải nhiệt 10% và dao động nhiệt môi trường $\pm 2^\circ\text{C}$).

5.4. Kết quả thực nghiệm

Một máy kiểm định được chế tạo dựa theo thiết kế đề ra được thực hiện để kiểm tra tính khả thi của phương án.



Hình 5. Hệ thống kiểm nghiệm độ ăn mòn SO_2 cho sprinkler theo TCVN 6305-1:2007



Hình 6. Nhiệt độ thực nghiệm với bể SO_2

Một thực nghiệm được thực hiện với nhiệt độ mong 45°C bằng bể kiểm nghiệm SO_2 trong thời gian khoảng 8 giờ. Kết quả thực nghiệm cho thấy nhiệt độ đạt được mức mong muốn trong khoảng 375 giây, nhiệt độ được duy trì ổn định trong khoảng $45 \pm 1^{\circ}\text{C}$ trong suốt thời gian sau đó, hoàn toàn đáp ứng nhu cầu kiểm nghiệm theo TCVN 6305-1:2007.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất và thiết kế thiết bị kiểm định độ chịu ăn mòn SO_2 cho sprinkler theo TCVN 6305-1:2007, xây dựng mô hình truyền nhiệt bậc nhất có tổn thất và kiến trúc điều khiển cascade với SMC. Mô phỏng/ thử nghiệm ban đầu cho thấy hệ đạt nhiệt độ đặt khoảng 500s, duy trì ổn định trong dải $\pm\Delta T$ và vận hành an toàn tại nguồn gia nhiệt. Giải pháp đáp ứng yêu cầu bài thử (14) và có thể mở rộng sang các phép thử cùng nhóm. Hướng tới: Hoàn thiện nguyên mẫu quy mô thực, tích hợp thị giác máy tính và tối ưu hóa năng lượng/ thời gian kiểm định.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 06/8/2025

Ngày phản biện: 22/8/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Hữu Nhân, Phan Hoàng Long, Dương Văn Tú, Nguyễn Huy Hùng, Nguyễn Tấn Tiến, “Study on automation of sprinkler testing system part 1 – Study on assessment criteria of TCVN 6350-1:2007”. Vietnam Mechanical Engineering Journal, Tập 309, tr. 162-167, 2023.
- [2]. Nguyễn Hữu Nhân, Phan Hoàng Long, Dương Văn Tú, Nguyễn Huy Hùng, Nguyễn Tấn Tiến, “Study on automation of sprinkler testing system part 2 – Proposed solution of auto sprinkler testing”. Vietnam Mechanical Engineering Journal, Tập 309, tr. 187-192, 2023.
- [3]. TCVN 6305-1:2007, “Phòng cháy chữa cháy – Hệ thống sprinkler tự động – Phần 1: Yêu cầu và phương pháp thử đối với sprinkler”. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam, 2007.
- [4]. QCVN 03:2021/BCA, “Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về phương tiện phòng cháy và chữa cháy”. Bộ Công an, Việt Nam, 2021.
- [5]. Nguyễn Huy Hùng, Dương Chí Tuấn, Phan Hoàng Long, Nguyễn Trọng Trung, Dương Văn Tú, Nguyễn Tấn Tiến, “Model identification of gas-fired industrial furnace”. The 7th International Conference on Advanced Engineering – Theory and Applications 2022 (AETA2022), tr. 42-51, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam, 12-2022.
- [6]. Nguyễn Quốc Bảo, Hồ Hải Đăng, Nguyễn Đức Tài, Dương Văn Tú, Nguyễn Huy Hùng, Nguyễn Tấn Tiến, “Design and Calibration of Multi-Channel Thermocouple Signal Converter”. 2023 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE), tr. 1-6, 2023.