

ĐIỀU KHIỂN NHIỆT ĐỘ LÒ NUNG CÓ THỜI GIAN TRỄ

TEMPERATURE CONTROL OF GAS FURNACE WITH TIME DELAY

Nguyễn Tấn Tiến^{1,2}, Đoàn Công Thắng³, Nguyễn Đức Trung⁴,
 Dương Văn Tú^{2,3}, Nguyễn Huy Hùng⁵

¹DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

²Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

³Trường Sĩ quan Không quân

⁴Viện Đo lường Việt Nam

⁵Trường Đại học Sài Gòn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế và điều khiển lò nhiệt theo tiêu chuẩn ISO384. Một số giả thiết ban đầu được đặt ra cho bài toán thiết kế kết cấu lò và bài toán nhiệt. Hàm truyền hệ thống được xây dựng từ kết quả thực nghiệm. Bộ điều khiển hệ bậc nhất có thời gian trễ, bộ điều khiển trượt có xét đến sai số hệ thống và bộ điều khiển PID truyền thống được thiết kế cho lò đốt. Kết quả mô phỏng chứng minh tính khả thi của giải pháp đề nghị.

Từ khóa: ISO 834; TCVN 9383:2012; Lò đốt.

ABSTRACT

This paper study design and control of gas furnace with ISO384 standard. Some assumption is made to design the furnace including heat design. The furnace transfer function is derived from the experimental measurement. The controllers for the first order system with time delayed, sliding mode control for system with uncertainty and conventional PID controller are designed. Simulation results show the possibility of the proposed solutions.

Keywords: ISO 834; TCVN 9383:2012; Gas furnace.

1. TỔNG QUAN

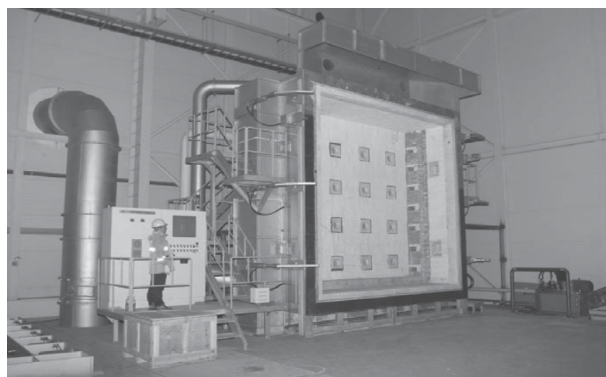
Phòng cháy chữa cháy luôn là vấn đề lớn và được Nhà nước quan tâm, đặc biệt đối với thời đại phát triển hiện nay. Theo quy chuẩn, các nhà máy và các công trình xây dựng luôn phải đảm bảo an toàn trong phòng cháy, chữa cháy theo quy định. Điều đó, dẫn đến nhu cầu của việc kiểm tra khả năng phòng chống

cháy của vật liệu, sản phẩm sử dụng trong xây dựng.

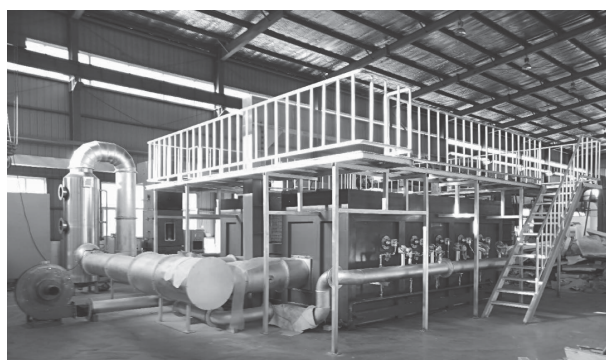
Các vật liệu khi kiểm định khả năng chịu cháy được thử nghiệm với các tiêu chuẩn khác nhau, tùy theo ứng dụng. Có hai loại lò đốt thông dụng được sử dụng, phân thành 2 loại là lò đốt chống cháy dọc (vertical type) và lò đốt chống cháy ngang (horizontal type) như Hình 1.



Nhiệt trong lò phải được điều khiển theo các tiêu chuẩn: Cellulosic (TCVN 9383:2012, ISO384); Hydrocarbon curve; Modified Hydrocarbon; RABT ZTV; RWS (Rijkswaterstaat) và được thể hiện trong Hình 2.

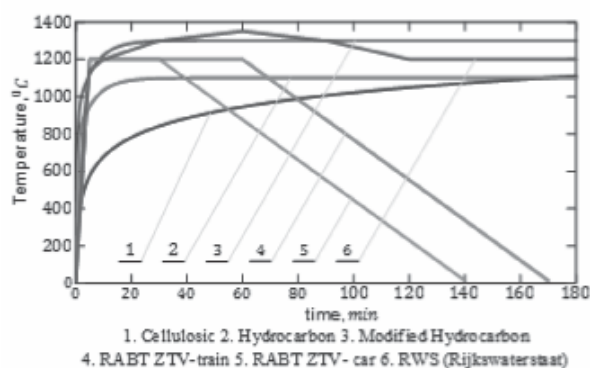


a) Vertical Type



b) Horizontal Type

Hình 1. Fire Resistance Testing Furnace



Hình 2. Đường cong nhiệt độ test quy định theo các tiêu chuẩn khác nhau

Nhiều nghiên cứu về vấn đề này được triển khai ở nước ngoài. Tuy nhiên, tại Việt Nam, nhóm nghiên cứu chưa tìm thấy công bố nào về vấn đề này, có lẽ do một số lý do: Nhiệt độ rất cao, độ trễ hệ thống cao, cần kinh phí rất lớn để thực nghiệm, ... Trong nước cũng chưa thấy đơn vị nào nghiên cứu thiết kế chế tạo các sản phẩm tương tự.

Bài báo này tập trung trình bày nghiên cứu và thiết kế lò đốt nhằm kiểm tra khả năng cháy của sản phẩm dạng tấm như vách, cửa, kiếng,... theo tiêu chuẩn ISO 834 [5] (TCVN 9383: 2012).

Bài toán thiết kế:

Thiết kế lò đốt có kích thước lòng lò 3m×3m×1,5m. Nhiệt độ và áp suất trong lò đốt phải theo tiêu chuẩn ISO 834. Nhiệt độ khí thải trong ống khói thép không vượt quá 400⁰C. Lò đốt đáp ứng các chỉ tiêu ô nhiễm môi trường.

2. THIẾT KẾ LÒ ĐỐT

2.1. Phương trình đường cong nhiệt

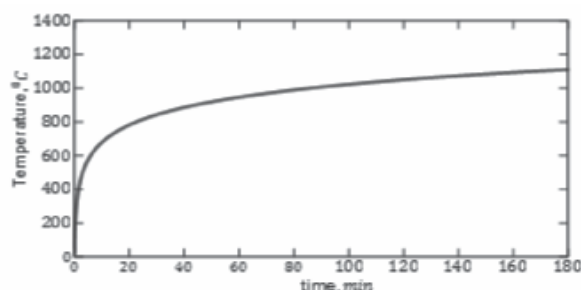
Phương trình đường cong nhiệt độ theo ISO384.

$$T=20+345\log(8t+1) \quad (1)$$

với, T: Nhiệt độ trung bình của lò đốt;

T₀: Nhiệt độ ban đầu của lò đốt;

t: Thời gian, phút.



Hình 3. Đường cong nhiệt độ test theo ISO384

2.2. Giả thiết thiết kế

Một số giả thiết cho bài toán thiết kế:

- Vách bên trong lò đốt được có độ bức xạ là $0,2 \div 0,3$, khí gas là $0,8$;

- Hệ số quan sát của mẫu thử và tường với nguồn nhiệt được giả sử là 1 ;

- Vách và mẫu được giả sử là vật xám, nhiệt độ phân phối đều trên bề mặt;

- Hệ số truyền nhiệt đối lưu trong lò là $h_c = 50 \text{ W/m}^2 \text{ K}$;

- Nhiệt độ vách lò và mẫu nhỏ hơn nhiệt độ khí gas từ $10^\circ\text{C} \div 100^\circ\text{C}$;

- Nhiệt độ không khí ngoài lò là 27°C ;

- Kích thước của lò đốt;

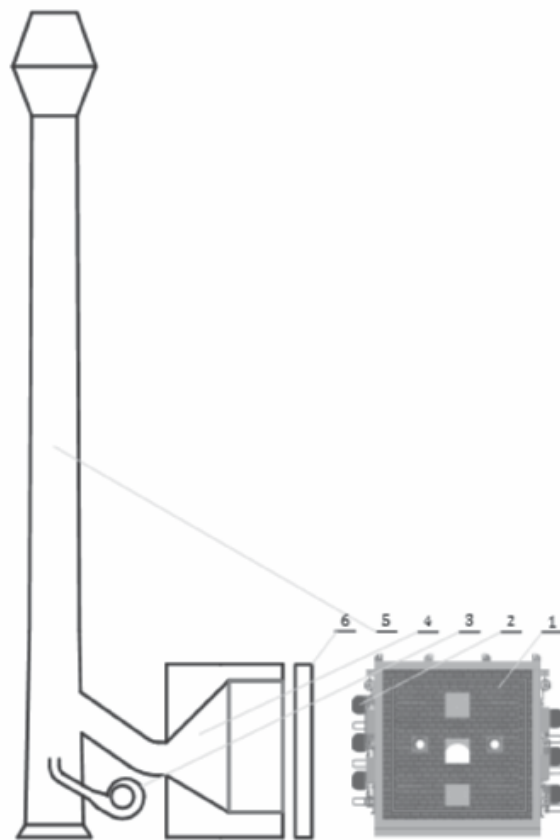
+ Chiều dày lớp cách nhiệt ban đầu: $b=300\text{mm}$;

+ Chiều rộng lò đốt $W=3.000\text{m}$;

+ Chiều cao lò đốt $H=3.000\text{m}$;

- Khí gas chỉ tác dụng trực tiếp nhiệt một phía của bức tường nên có thể xem tường là một vật rắn bán vô hạn;

- Vật liệu cách nhiệt được chọn là ceramic fiber board 1.600 có hệ số dẫn nhiệt $\delta = 0.21 \text{ W/mK}$.



Hình 4. Lò đốt thiết kế: 1) Buồng đốt; 2) Béc đốt; 3) Quạt đẩy khói; 4) Buồng gom khí; 5) Ống khói; 6) Cửa lò đốt

Giả sử nhiệt độ ở vách trên, dưới cũng như vách bên phải, trái gần như giống nhau. Do đó, không có sự truyền nhiệt qua lại giữa các mặt tường nhưng có sự trao đổi nhiệt giữa bề mặt trong và ngoài của bức tường.

2.3. Tính toán nhiệt

Nhiệt độ sẽ được truyền qua đối lưu và bức xạ từ béc đốt đến bề mặt trong của tường và mẫu. Nhiệt độ bề mặt trong này tiếp tục truyền nhiệt qua dẫn nhiệt với mặt ngoài của lò đốt. Tổng nhiệt lượng tạo ra trong lò bằng tổn thất nhiệt lượng do đối lưu và bức xạ

$$Q_{TL} = Q_{LR} + Q_{LC} \quad (3)$$

Trong đó,
Nhiệt lượng tổn thất do đối lưu:

$$Q_{LC} = H_c A_f (t_g - t_f) \quad (4)$$

Nhiệt lượng tổn thất do bức xạ:

$$Q_{LR} = \frac{\sigma A_f (T_g^4 - T_f^4)}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_f} - 1} + \frac{\sigma A_s (T_g^4 - T_s^4)}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_f} - 1} \quad (5)$$

$$Q_{LR} = h_r A_f (T_g - T) \quad (5)$$

Hệ số truyền nhiệt đối lưu:

$$h_r = \frac{Q_{LR}}{A_f (T_g - T_f)} \quad (6)$$

Phương trình trao đổi nhiệt tổng quát trong lò:

$$HRR - \frac{m_{tt} c_p dT}{dt} = m_{fuel} c_g T_g + H_c A_f \times (T_g - T_f) + \frac{\sigma A_f (T_g^4 - T_s^4)}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_f} - 1} \quad (7)$$

Tổng hệ số trao đổi nhiệt:

$$h = h_r + h_c \quad (8)$$

Giải thiết nhiệt truyền theo một hướng, ta được phương trình sau:

$$T_{o,\tau} = (T_\infty - T_i) \times \left[1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{h\sqrt{\alpha\tau}}{k} \right) e^{\frac{h^2 \alpha d \tau}{k^2}} \right] + T \quad (9)$$

Với, $T_{o,\tau}$: Nhiệt độ vách trong của lò:

α : $\alpha = 2.61 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

σ : $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

$d\tau$: Thời gian lấy mẫu

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

3.1. Mô hình hóa hệ thống

Hàm truyền tổng quát của hệ lò nhiệt bậc nhất có độ trễ cho bởi:

$$\frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{K e^{-t_0 s}}{1 + \tau s} \quad (10)$$

với, T: Nhiệt độ lò, °C;
Q: Nhiệt lượng cung cấp, kW;
K: Hằng số;
 τ : Hằng số thời gian;
 t_0 : Thời gian trễ (deadtime), sec.

3.2. Thiết kế bộ điều khiển hệ bậc nhất có thời gian trễ (first-order-plus-deadtime), [8].

Thời gian trễ, $e^{-t_0 s}$, có thể được xấp xỉ bằng khai triển bậc nhất Taylor

$$e^{-t_0 s} \approx \frac{1}{1 + t_0 s} \quad (11)$$

$$\text{hoặc Pade: } e^{-t_0 s} \approx \frac{1 - 0.5 t_0 s}{1 + 0.5 t_0 s} \quad (12)$$

Trong điều khiển quá trình có độ trễ, cả hai xấp xỉ trên đều phù hợp cho hệ bậc nhất có độ trễ. Trong bài báo này, xấp xỉ Taylor được sử dụng. Sử dụng (2), hàm truyền (1) được viết lại:

$$\frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{K}{(1 + \tau s)(1 + t_0 s)} \quad (13)$$

Bộ điều khiển cho quá trình bậc nhất có thời gian trễ được sử dụng trong nghiên cứu này được giới thiệu bởi O. Camacho (2000) và được tóm tắt như sau:

Gọi sai số giữa nhiệt độ mong muốn T_d và nhiệt độ lò T .

$$e = T_d - T \quad (14)$$

Chọn hàm mặt trượt:

$$s = \dot{e} + \lambda_1 e + \lambda_0 \int_0^t e dt \quad (15)$$

Với λ_1 và λ_2 được xác định bởi:

$$\lambda_1 = (t_0 + \tau)/(t_0 \tau) \quad (16)$$

$$\lambda_0 = 0.25 \lambda_1^2 \quad (17)$$

Bộ điều khiển trượt cho hệ thống:

$$u = \frac{a}{K} \left(\frac{1}{a} T + \lambda_0 e \right) + K_D \frac{s}{|s| + \delta} \quad (18)$$

Với a , K_D và δ được xác định bởi:

$$a = t_0 \tau \quad (19)$$

$$K_D = \frac{0.51}{|K|} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{0.76} \quad (20)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12 |K| K_D \lambda_1 \quad (21)$$

3.3. Thiết kế bộ điều khiển trượt có xét đến sai số hệ thống [5]

Xét hệ thống dạng:

$$\ddot{T}(t) = -f(T, t) + bu(t) + d(t) \quad (22)$$

biết $f(T, t)$, $b > 0$, $d(t)$ là sai số hệ thống bao gồm cả sai số do mô hình hóa, $d_U \leq d \leq d_L$.

Sai số bám quỹ đạo:

$$e = T_d - T, \dot{e} = \dot{T}_d - \dot{T} \quad (23)$$

Chọn mặt trượt

$$s = ce + \dot{e} \quad (23)$$

với c : Hằng số thỏa điều kiện Hurwitz, $c > 0$

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{s} &= c\dot{e} + \ddot{e} = c(\dot{T}_d - \dot{T}) \\ &+ (\ddot{T}_d + f - bu - d) \end{aligned} \quad (24)$$

Theo nguyên lý mặt trượt:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \quad k > 0, \varepsilon > 0 \quad (25)$$

Từ (24) và (25)

$$\begin{aligned} c(\dot{T}_d - \dot{T}) + (\ddot{T}_d + f - bu - d) \\ = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \end{aligned} \quad (26)$$

và luật điều khiển trượt cho hệ thống:

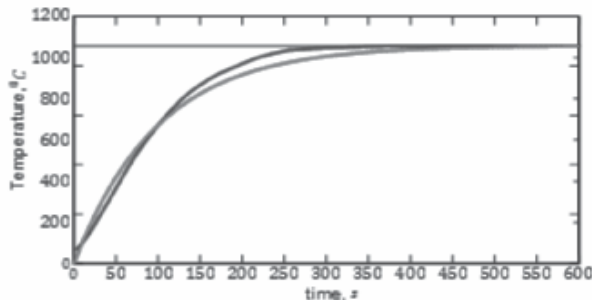
$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{\tau} [\varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks + c(\dot{T}_d - \dot{T}) \\ &+ \ddot{T}_d + f - d_c] \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \text{với, } d_c &= \frac{d_U + d_L}{2} - \frac{d_U - d_L}{2} \operatorname{sgn}(s) \end{aligned}$$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

Lò đốt được thiết kế và chế tạo với kích thước lọt lòng $3\text{m} \times 3\text{m} \times 1.5\text{m}$ như Hình 5.

Mô hình hàm truyền hệ thống lò được lấy từ thực nghiệm như sau: 



Hình 5. Thực nghiệm đáp ứng nấc của lò đốt

Từ số liệu nhiệt độ từ đáp ứng nấc của lò đốt, ta có hàm truyền lò nhiệt:

$$\frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{7167e^{-35s}}{1 + 344.2341s} \quad (28)$$

4.1. Bộ điều khiển hệ bậc nhất có thời gian trễ

Luật điều khiển (18) được sử dụng, với

$$t_0 = 35; \lambda_1 = 0.0315; \lambda_0 = 2.4769 \times 10^{-4}; K_D = 4.0434 \times 10^{-4}; \delta = 0.6910; t_0/K = 0.2809; t_0\tau = 296.8434$$

4.2. Bộ điều khiển trượt có xét đến sai số hệ thống

Luật điều khiển (27) được sử dụng, với:

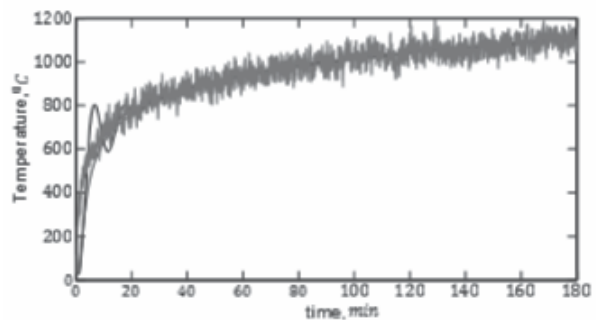
$$\begin{bmatrix} \dot{T} \\ \ddot{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{\tau t_0} & -\frac{\tau + t_0}{\tau t_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ \dot{T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u$$

$$f = \frac{1}{\tau t_0} T + \frac{\tau + t_0}{\tau t_0} \ddot{T}$$

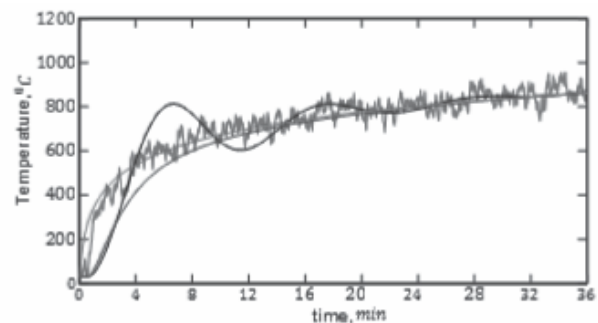
$$b = \frac{K}{\tau t_0}$$

Ngoài hai luật điều khiển trên, bộ điều khiển PID kinh điển được thiết kế để so sánh hiệu quả điều khiển nhiệt lò đốt. Kết quả mô phỏng cho bởi Hình 6.

Kết quả mô phỏng cho thấy, bộ điều khiển (27) cho kết quả bám theo đường nhiệt tham chiếu tốt nhất, dù thời gian trễ của hệ thống là khá lớn (35s).



a) Đáp ứng nhiệt lò đốt trong thời gian 3 giờ



b) Đáp ứng nhiệt lò đốt thời gian đầu

Hình 6. Kết quả mô phỏng nhiệt với các luật điều khiển khác nhau

Kết quả trên được thực hiện với đầu vào là nhiệt lượng cung cấp cho lò đốt. Trên thực tế, béc đốt gas chưa được đề cập ở đây. Bài toán thiết kế bộ điều khiển bao gồm cả hệ béc đốt gas đang được triển khai tiếp tục tại DCSELab, Trường Đại học Bách khoa.

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày vấn đề điều khiển lò nhiệt theo tiêu chuẩn ISO384. Một số giả thiết ban đầu được đặt ra cho bài toán thiết kế kết cấu lò và nhiệt. Hàm truyền hệ thống được xây dựng từ kết quả thực nghiệm. Bộ điều khiển hệ bậc nhất có thời gian trễ, bộ điều khiển trượt có

xét đến sai số hệ thống và bộ điều khiển PID truyền thống được thiết kế cho lò đốt. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển có xét đến sai số hệ thống cho kết quả điều khiển là tốt nhất, dù thời gian trễ của hệ thống là khá lớn. Kết quả này chứng minh tính khả thi của bộ điều khiển đề nghị.

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 TX2022-20b-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: **05/7/2022**

Ngày phản biện: **25/7/2022**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. C. Maluk et. al., *A Heat-Transfer Rate Inducing System (H-TRIS) Test Method*, Fire Safety Journal, Vol.105, pp.307–319, 2019.
- [2]. Joseph Igoe et. al., *Design of Small-Scale Furnace for Fire Resistance Testing of Building Construction Materials*, BS Thesis, 2017.
- [3]. A. Byström and S. Structures, *Compartment Fire Temperature: Calculations and Measurements*, 2017.
- [4]. Arman Jahed et. al., *Design a Methodology to Model-Reference Control of First Order Delays System*, Int'l Journal of Hybrid Information Technology, Vol.9, No.3, pp. 105-116, 2016.
- [5]. Jinkun Liu and Xinhua Wang, *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems - Design, Analysis and Matlab Simulation*, Springer, 2012.
- [6]. Craig Beyler et. al., *Fire Resistance Testing for Performance-based Fire Design of Building – Final Report*, National Institute of Standards and Technology, NIST GCR 07-190, June 2007.
- [7]. M.A. Sultan et. al., *Heat Exposure in Fire Resistance Furnaces: Full-scale vs Intermediate-scale*, 2003.
- [8]. O. Camacho et. al., *Sliding Mode Control: An Approach to Regulate Nonlinear Chemical Processes*, ISA Transaction 39, pp. 205-218, 2000.
- [9]. ISO 834-1, *Fire-Resistance Tests-Elements of Building Construction - Part 1: General Requirements*, 1999.

