

# XÁC ĐỊNH NHIỆT ĐỘ VÀ THỜI GIAN TỰ BỐC CHÁY CỦA HỖN HỢP THAN TRỘN GIỮA THAN ANTHRAXIT VÀ THAN Á-BITUM

## DETERMINATION OF SELF-SPONTANEOUS TEMPERATURE AND IGNITION TIME OF BLENDED COAL BETWEEN ANTHRACITE AND SUB-BITUMINOUS PULVERIZED COALS

Lê Đức Dũng\*, Nguyễn Hữu Linh, Lê Hoàng Hiệp

Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội, Việt Nam<sup>1</sup>

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: dung.leduc@hust.edu.vn

(Nhận bài / Received: 28/6/2023; Sửa bài / Revised: 30/5/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 31/5/2024)

**Tóm tắt** - Việc sử dụng than có hàm lượng chất bốc cao yêu cầu các biện pháp phòng ngừa tự bắt cháy do quá trình oxi hóa ở nhiệt độ thấp. Các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm đã được tiến hành để nghiên cứu về quá trình oxi hóa ở nhiệt độ thấp (90 ÷ 200°C) của năm tỷ lệ trộn giữa bột than á-bitum và than antraxit với có tỷ lệ của than á-bitum là 0, 25, 50, 75 và 100%. Các mẫu than được chứa trong các hộp lưới lập phương có kích thước khác nhau (30, 60 và 100 mm) để đánh giá ảnh hưởng của thể tích đồng than đến quá trình tự bắt cháy. Mô hình Frank-Kamenetskii được sử dụng để dự đoán nhiệt độ tự bắt cháy và thời gian bắt cháy theo thể tích của đồng than. Các kết quả chỉ ra rằng, tăng tỷ lệ trộn của than á-bitum trong hỗn hợp than trộn dẫn đến tăng khả năng tự bắt cháy. Thể tích chứa than càng lớn, nhiệt độ tự bắt cháy càng thấp và thời gian tự bắt cháy càng dài.

**Từ khóa** - Oxi hóa ở nhiệt độ thấp; than trộn; tự bắt cháy

### 1. Đặt vấn đề

Nhằm đáp ứng với nhu cầu năng lượng và than cho các cơ sở sản xuất điện trong triển vọng Việt Nam đến năm 2030, việc nhập khẩu và trộn than á-bitum từ các vùng khác trên thế giới với than antraxit Việt Nam đang được xem xét như một giải pháp thay thế để sử dụng trong các nhà máy điện than hiện có. Tuy nhiên, điều này có thể gây tăng nguy cơ tự bắt cháy trong quá trình lưu trữ than do tính phản ứng cao của than á-bitum so với than antraxit. Do đó, cần theo dõi chặt chẽ quá trình tự bắt cháy của loại than này để có thể sử dụng an toàn và hiệu quả trong các nhà máy nhiệt điện [1].

Quá trình oxi hóa ở nhiệt độ thấp được xem là nguồn nhiệt chính dẫn đến sự tích tụ và tăng nhiệt độ của đồng than. Nếu lượng nhiệt này không được tản nhiệt, nhiệt độ trong đồng than sẽ tiếp tục tăng đến nhiệt độ giới hạn sẽ làm cho than tự bốc cháy [2]. Mặc dù, có nhiều nỗ lực và các biện pháp để phòng ngừa quá trình tự bắt cháy diễn ra, nhưng một số vụ hỏa hoạn trong các nhà máy nhiệt điện đã được xác định nguyên nhân gây ra bởi sự bốc cháy của than do sự tích tụ bột than trong đường ống dẫn than và máy nghiền than [1].

Một số nghiên cứu trong phòng thí nghiệm và mô phỏng số đã được thực hiện để dự đoán và xác minh quá trình tự gia nhiệt và tự bốc cháy của các đồng than. Wang và cộng sự [3] đã sử dụng mô hình Frank-Kamenetskii để

**Abstract** - The use of coal with a high volatile content requires preventive measures against self-ignition due to the oxidation process at low temperatures. Laboratory experiments were conducted to investigate the low-temperature oxidation process (90 ÷ 200°C) of coal blends consisting of different ratios of bituminous coal and anthracite coal, with bituminous coal ratios of 0, 25, 50, 75, and 100%. The coal samples were contained in cubic mesh boxes of various sizes (30, 60, and 100 mm) to assess the influence of the coal pile volume on the self-ignition process. The Frank-Kamenetskii model was used to predict the self-ignition temperature and ignition time based on the coal pile volume. The results indicated that, increasing the ratio of bituminous coal in the mixed coal blend resulted in an increased self-ignition tendency. A larger coal pile volume corresponded to a lower self-ignition temperature and a longer ignition time.

**Key words** - Low temperature oxidation; blended coal; spontaneous combustion

đánh giá nhiệt độ tự bắt cháy của đồng than. Nugroho và cộng sự [4] đã đánh giá ảnh hưởng của kích thước hạt than đến đặc tính tự gia nhiệt của các loại than khác nhau sử dụng phương pháp giao điểm (crossing point method). Fierro và cộng sự [5] đã phát triển mô Hình 1D để đánh giá tốc độ gió đến quá trình oxi hóa của đồng than.

Trong nghiên cứu này, các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm đã được tiến hành để nghiên cứu về quá trình oxi hóa ở nhiệt độ thấp (90 ÷ 200°C) của năm tỷ lệ trộn giữa bột than á-bitum và than antraxit với có tỷ lệ của than á-bitum là 0, 25, 50, 75 và 100%. Các mẫu than được chứa trong các hộp lưới lập phương có kích thước khác nhau (30, 60 và 100 mm) để đánh giá ảnh hưởng của thể tích đồng than đến quá trình tự bắt cháy. Mô hình Frank-Kamenetskii được sử dụng để dự đoán nhiệt độ tự bắt cháy và thời gian bắt cháy theo thể tích của đồng than.

### 2. Phương pháp nghiên cứu

#### 2.1. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Than antraxit (than A) từ nhà máy nhiệt điện Ninh Bình và than á-bitum (than B) nhập khẩu từ Indonesia được lựa chọn cho nghiên cứu này. Các mẫu than được nghiền và sàng lọc lựa chọn kích thước hạt ở trong khoảng 0,045 ÷ 0,075 mm. Trong quá trình thí nghiệm, các mẫu than được sấy khô và bảo quản kín để tránh hiện tượng oxi hóa. Thành phần của than A và B được trình bày trong Bảng 1.

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam (Le Duc Dzung, Nguyen Huu Linh, Le Hoang Hiep)

**Bảng 1.** Thành phần mẫu than

Mẫu	Than A	Than B
<b>Thành phần công nghệ (wt%, d)</b>		
Chất bốc (VM)	11,32	58,96
Cacbon cố định (FC)	63,12	33,04
Tro (A)	25,56	8,00
<b>Thành phần hóa học (wt%, daf)</b>		
C	90,57	70,96
H	3,06	5,13
O	4,15	22,51
N	1,37	1,01
S	0,85	0,39
<b>Nhiệt trị (Kcal/kg, as received)</b>		
HHV	6071,2	6013,61

Than á-bitum (than B) được trộn với than antraxit (Than A) theo phần trăm khối lượng với các tỷ lệ 25, 50 và 75% và được ký hiệu như trong Bảng 2.

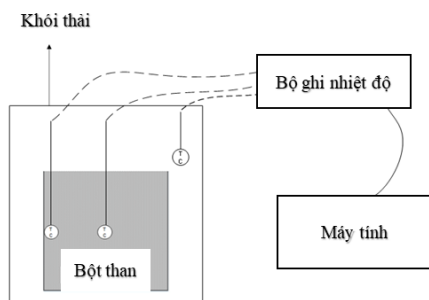
**Bảng 2.** Mẫu than trộn

Mẫu	Than A (%wt)	Than B (%wt)
No.1	100	0
No.2	75	25
No.3	50	50
No.4	25	75
No.5	0	100

Để đánh giá ảnh hưởng của kích thước chứa than đến quá trình tự bắt cháy, các mẫu than được chứa trong các hộp lưới hình lập phương có kích thước 30, 60 và 100 mm với thể tích tương ứng là 25, 216 và 1000 cm<sup>3</sup>.

## 2.2. Quy trình thí nghiệm

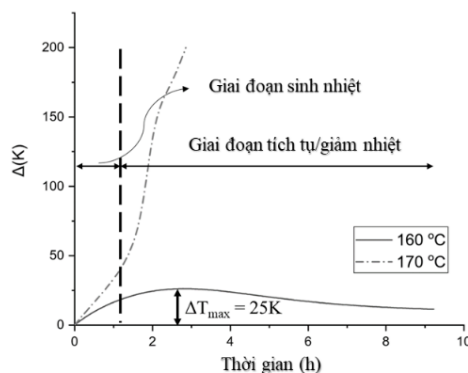
Trong nghiên cứu này sử dụng phương pháp gia nhiệt mẫu than đặt trong lò điện trở, mẫu than được chứa trong các hộp lưới hình lập phương có kích thước khác nhau và được cấp nhiệt làm tăng dần nhiệt độ mẫu từ nhiệt độ môi trường, mỗi bước gia nhiệt 10°C, giữ trong thời gian 10 giờ cho đến khi mẫu than bắt đầu tự cháy, biểu hiện tự cháy thông qua kết quả đo nhiệt độ mẫu tăng vọt cao hơn nhiệt độ buồng gia nhiệt điện trở. Nhiệt độ này được ghi nhận là nhiệt độ tự bắt cháy như mô tả chi tiết dưới đây.

**Hình 1.** Sơ đồ thí nghiệm

Hình 1 trình bày sơ đồ thí nghiệm quá trình tự bắt cháy của than. Mẫu thí nghiệm được đặt trong lò gia nhiệt tích hợp hệ thống điều khiển nhiệt độ và tốc độ gia nhiệt. Trong quá trình thí nghiệm, các mẫu than được gia nhiệt từ nhiệt độ môi trường (25°C) đến nhiệt độ mong muốn với tốc độ gia nhiệt được giữ cố định ở mức 10°C/phút. Không khí đối

lưu tự nhiên vào lò do sự chênh lệch nhiệt độ trong lò và môi trường. Ba cặp nhiệt loại K được bố trí như trong Hình 1 để kiểm soát nhiệt độ bên trong mẫu than và nhiệt độ của lò gia nhiệt. Quá trình thí nghiệm được thực hiện lặp lại với mẫu mới cho đến khi quá trình tự bắt cháy diễn ra với độ tăng nhiệt độ của lò là 10°C. Nhiệt độ tự bắt cháy được xác định theo giá trị trung bình của nhiệt độ thấp nhất mà ở đó quá trình tự bắt cháy diễn ra và nhiệt độ cao nhất mà ở đó quá trình tự bắt cháy chưa xảy ra với sai số là ±5°C [6-8].

Hình 2 minh họa quá trình xác định nhiệt độ tự bắt cháy của mẫu No.1 chứa trong hộp lưới có kích thước 100 mm. Điểm tọa độ 0 tương ứng với thời điểm khi nhiệt độ của mẫu than đạt đến nhiệt độ đặt. Có thể nhận thấy rằng, khi nhiệt độ của lò là 160°C, nhiệt độ của mẫu than tăng từ từ để nhiệt độ cao hơn nhiệt độ đặt của lò khoảng 25°C và sau đó giảm dần. Trong khi đó, khi nhiệt độ của lò là 170°C, mẫu than tích tụ nhiệt và tăng nhiệt độ nhanh chóng. Do đó, nhiệt độ tự bắt cháy của mẫu than No.1 được xác định là giá trị trung bình của 160 và 170°C, tức là 165°C.

**Hình 2.** Minh họa quá trình tự bắt cháy của mẫu than No.1

## 2.3. Mô hình Frank-Kamenetski

Nhiệt độ tự bắt cháy có thể được xác định dựa theo mô hình Frank-Kamenetski và phương trình động học Arrhenius. Phương trình bảo toàn năng lượng của mô hình Frank-Kamenetski được minh họa theo công thức sau:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q' \quad (1)$$

Trong đó, vế trái của phương trình (1) là tốc độ thay đổi entanpy,  $\lambda$  là hệ số truyền nhiệt đối lưu,  $q'$  là nguồn sinh nhiệt.

Tốc độ sinh nhiệt của nguồn nhiệt  $q'$  theo nhiệt độ được biểu diễn theo phương trình Arrhenius. Do đó, phương trình (1) có thể được viết lại như sau:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{\Delta H}{C_p} A e^{-E/RT} \quad (2)$$

Trong đó,  $T$  là nhiệt độ của đồng than,  $\Delta H$  là nhiệt phản ứng (J/kg),  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$  hệ số khuếch tán nhiệt hiệu quả của đồng than (m<sup>2</sup>/s).

Đối với khối than lập phương, phương trình (2) có thể được viết như sau:

$$\nabla^2 \theta + \delta e^\theta = 0 \quad (3)$$

$$\text{Trong đó, } \theta = \frac{\beta(T - T_o)}{T_o} \quad (4)$$

$\delta$  là hệ số Frank-Kamenetski.

$$\delta = \frac{t_c}{t_e} = \frac{r^2 \rho \Delta H \cdot A \cdot E}{\lambda \cdot R T_o^2} \cdot e^{-E/RT_o} \quad (5)$$

Thời gian dẫn nhiệt đặc tính qua đồng than:

$$t_c = \frac{\rho C_p r^2}{\lambda} \quad (6)$$

Trong đó,  $r$  là độ dài đặc tính của đồng than, là khoảng cách mà nhiệt độ phải lan truyền trong một môi trường trước khi quá trình tự bắt cháy diễn ra. Trong trường hợp này đồng than được chứa trong khối lập phương nên  $r$  được xác định là một nửa chiều dài của khối lập phương,  $m$ .

Thời gian bắt cháy đặc tính của đồng than, được sử dụng để đo lường thời gian cần thiết cho quá trình tự bắt cháy bắt đầu sau khi đáp ứng các điều kiện phản ứng:

$$t_e = (\beta \gamma A e^{-\beta})^{-1} \quad (7)$$

$$\text{Trong đó: } \beta = \frac{E}{RT_o}, \quad \gamma = \frac{\Delta H}{c_p T_o}$$

$T_o$  là nhiệt độ tham chiếu, thường được lấy là nhiệt độ môi trường.

$\delta_c$  là giá trị tới hạn của  $\delta$  và phụ thuộc vào hình dạng của đồng than. Đối với than được lưu trữ dưới hình lập phương,  $\delta_c = 2,52$  [6]. Quá trình tự bắt cháy của đồng than xảy ra nếu  $\delta \geq \delta_c$ .

Phương trình (5) có thể được viết lại như sau:

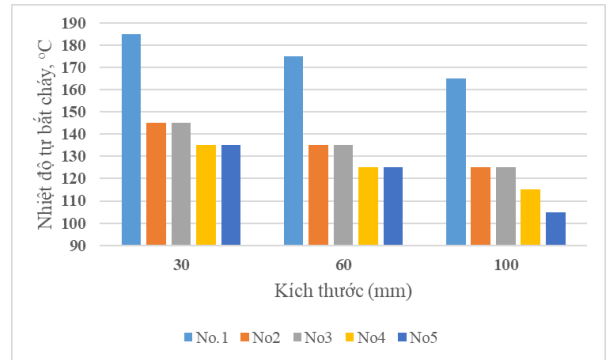
$$\ln\left(\frac{\delta_c T_o^2}{r^2}\right) = \ln\left(\frac{E \Delta H \cdot A \cdot \rho}{\lambda \cdot R}\right) - \frac{E}{RT_c} \quad (8)$$

Phương trình (8) được sử dụng để xác định nhiệt độ tự bắt cháy theo kích thước của đồng than.

### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Ảnh hưởng của kích thước đồng than đến nhiệt độ tự bắt cháy

Hình 3 minh họa kết quả thí nghiệm về ảnh hưởng của kích thước mẫu than đến nhiệt độ tự bắt cháy. Nhìn chung, nhiệt độ tự bắt cháy giảm khi tăng độ dày của lớp than. Quá trình oxi hóa chậm của lớp than ở nhiệt độ thấp dẫn đến sự tích tụ nhiệt và tăng nhiệt độ bên trong lớp than. Nếu lượng nhiệt này không được tản nhiệt, lượng nhiệt này tích tụ dần và nhiệt độ lớp than tiếp tục tăng đến nhiệt độ tới hạn dẫn đến quá trình tự bốc cháy. Do đó, quá trình tự bắt cháy có thể xảy ra hay không được xác định bởi sự cân bằng của hai quá trình: tốc độ sinh nhiệt do quá trình oxi hóa và tốc độ tản nhiệt ra môi trường xung quanh. Nếu tốc độ sinh nhiệt lớn hơn tốc độ tản nhiệt, quá trình tự bắt cháy diễn ra và ngược lại. Đối với các mẫu than có chiều dày lớp than nhỏ hơn (tương ứng với thể tích của lớp than nhỏ hơn) yêu cầu nhiệt độ cao hơn để diễn ra quá trình tự bắt cháy do lượng nhiệt sinh ra trong quá trình oxi hóa dễ dàng tản ra môi trường hơn so với mẫu than có kích thước lớn hơn do đó giảm sự tích tụ nhiệt bên trong lớp than.



Hình 3. Sự thay đổi nhiệt độ tự bắt cháy theo kích thước mẫu than và tỷ lệ trộn

#### 3.2. Ảnh hưởng của tỉ lệ trộn than đến nhiệt độ tự bắt cháy

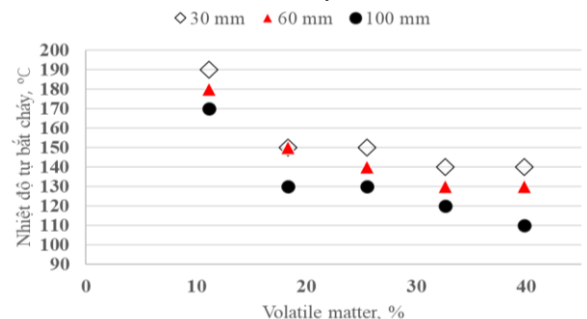
Kết quả trong Hình 3 cũng chỉ ra rằng, tỷ lệ trộn của than á-bitum trong hỗn hợp than trộn có ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ tự bắt cháy của lớp than. Nhìn chung, nhiệt độ tự bắt cháy giảm khi tăng tỷ lệ than á-bitum trong hỗn hợp than trộn. Nhiệt độ tự bắt cháy của than antraxit ở mẫu than số No.1 khi chưa trộn than á-bitum là 185°C tương ứng với kích thước mẫu than 30 mm. Tuy nhiên, khi than á-bitum được trộn với tỷ lệ 25% ở than số No.2, nhiệt độ tự bắt cháy là 145°C, thấp hơn 40°C so với mẫu than số No.1. Nhiệt độ tự bắt cháy của mẫu than số No.4 thấp hơn 10°C so với mẫu than số No.3 khi tỷ lệ than á-bitum tăng từ 50% lên 75%. Ngoài ra, nhiệt độ tự bắt cháy không đổi khi tỷ lệ than á-bitum ở trong khoảng từ 25 ÷ 50% và từ 75 ÷ 100%. Xu hướng tương tự được quan sát cho các mẫu than với kích thước mẫu than 60 mm và 100 mm. Qua đó cho thấy, nhiệt độ tự bắt cháy giảm đáng kể khi tỷ lệ trộn than á-bitum tăng lên 25% và sự giảm nhiệt độ tự bắt cháy không đáng kể khi tiếp tục tăng tỷ lệ than á-bitum lớn hơn 25%.

Khi trộn than antraxit với á-bitum dẫn đến thay đổi tính chất của hỗn hợp than trộn, đặc biệt hàm lượng chất bốc. Hàm lượng chất bốc của hỗn hợp than trộn được tính theo công thức sau:

$$VM_{mix} = (1 - x) \cdot VM_A + x \cdot VM_B \quad (9)$$

Trong đó,  $VM_{mix}$ ,  $VM_A$ ,  $VM_B$  lần lượt hàm lượng chất bốc của hỗn hợp than trộn, than antraxit và than á-bitum.  $x$  là tỷ lệ của than á-bitum trong hỗn hợp.

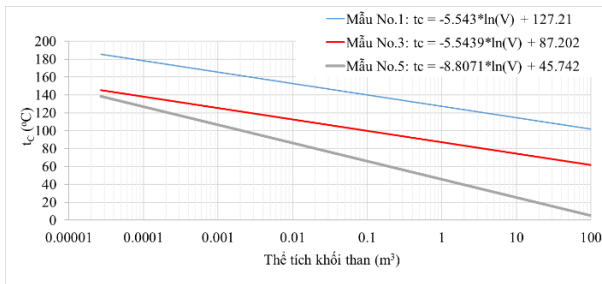
Khi tăng tỷ lệ trộn than á-bitum làm tăng hàm lượng chất bốc trong hỗn hợp than trộn dẫn đến tăng khả năng tự bắt cháy. Hình 4 minh họa sự ảnh hưởng của hàm lượng chất bốc đến nhiệt độ tự bắt cháy.



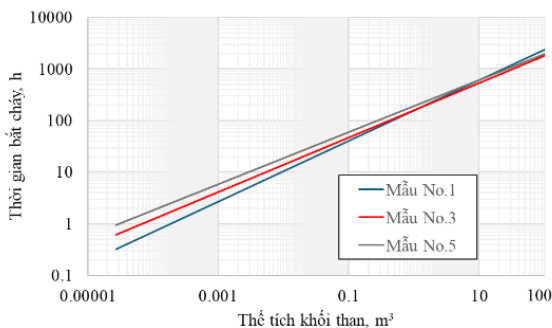
Hình 4. Ảnh hưởng của hàm lượng chất bốc đến nhiệt độ tự bắt cháy

### 3.3. Xác định nhiệt độ và thời gian tự bắt cháy

Từ các kết quả thu được, nhiệt độ và thời gian tự bắt cháy có thể được xác định cho từng mẫu than với các thể tích đồng than khác nhau theo mô hình Frank-Kamenetski. Hình 5 minh họa mối quan hệ giữa thể tích đồng than và nhiệt độ tự bắt cháy. Nhiệt độ tự bắt cháy giảm khi tăng thể tích đồng than, do đó thể tích đồng than càng lớn làm tăng khả năng tự bắt cháy diễn ra. Tuy nhiên, thể tích đồng than càng lớn, cần nhiều thời gian hơn để quá trình tự bắt cháy diễn ra. Kích thước mẫu than càng nhỏ, nhiệt độ để quá trình tự bắt cháy diễn ra càng cao nhưng thời gian để quá trình tự bắt cháy xảy ra nhanh hơn. Hình 6 minh họa mối quan hệ giữa thể tích đồng than và thời gian tự bắt cháy.



Hình 5. Xác định nhiệt tự bắt cháy theo thể tích của đồng than



Hình 6. Xác định thời gian tự bắt cháy theo thể tích của mẫu than

Bảng 3 trình bày so sánh nhiệt độ tự bắt cháy giữa kết quả tính toán lý thuyết theo mô hình Frank-Kamenetski với kết quả thí nghiệm. Kết quả chỉ ra rằng, sai số nhiệt độ tự bắt cháy thu được từ mô hình Frank-Kamenetski và thí nghiệm không đáng kể, với hầu hết sai số ở trong khoảng  $\pm 1^\circ\text{C}$  đối với mẫu than No.1 và No.3 và  $\pm 3 \div 5^\circ\text{C}$  đối với mẫu than số No.5. Qua đó cho thấy độ chính xác và tin cậy của kết quả thu được từ mô hình.

Bảng 3. So sánh nhiệt độ tự bắt cháy giữa mô hình và thí nghiệm (đơn vị,  $^\circ\text{C}$ )

Kích thước	Mẫu No.1		Mẫu No.3		Mẫu No.5	
	Thí nghiệm	Mô hình	Thí nghiệm	Mô hình	Thí nghiệm	Mô hình
30 mm	185	185.52	145	145.52	135	138.39
60 mm	175	174.00	135	133.99	125	120.08
100 mm	165	165.50	125	125.50	105	106.58

## 4. Kết luận

Bài báo trình bày ảnh hưởng của kích thước mẫu than và tỷ lệ trộn than á-bitum với than antraxit về quá trình oxi hóa

ở nhiệt độ thấp ( $90 \div 200^\circ\text{C}$ ). Các kết quả nghiên cứu trong phòng thí nghiệm đã chỉ ra rằng quá trình tự bắt cháy có xu hướng dễ xảy ra khi tăng kích thước mẫu than. Đối với than antraxit, nhiệt độ tự bắt cháy giảm khoảng  $10^\circ\text{C}$  khi tăng kích thước mẫu than từ 30 mm lên 60 mm và từ 60 mm lên 100 mm. Kết quả này tương tự cho các mẫu than với các tỷ lệ trộn của than á-bitum với than antraxit tương ứng là 25%, 50% và 75%. Đối với than á-bitum, nhiệt độ tự bắt cháy giảm khoảng  $10^\circ\text{C}$  khi tăng kích thước từ 30 mm lên 60 mm và khoảng  $15^\circ\text{C}$  khi tăng kích thước từ 60 mm lên 100 mm. Kết quả thí nghiệm còn chỉ ra rằng khi tăng tỷ lệ trộn than á-bitum dẫn đến tăng khả năng tự bắt cháy. Khi than á-bitum được trộn với tỷ lệ 25%, nhiệt độ tự bắt cháy thấp hơn  $40^\circ\text{C}$  so với mẫu than antraxit. Khi tăng tỷ lệ trộn than á-bitum từ 50% lên 75%, nhiệt độ tự bắt cháy giảm khoảng  $10^\circ\text{C}$ . Nhiệt độ tự bắt cháy không đổi khi tỷ lệ than á-bitum ở trong khoảng từ 25 ÷ 50% và từ 75 ÷ 100%. Xu hướng tương tự được quan sát cho các mẫu than với kích thước mẫu than 60 mm và 100 mm. Xu hướng tương tự được quan sát cho các mẫu than với kích thước mẫu than 60 mm và 100 mm.

Các kết quả thu được có thể được sử dụng để xác định nhiệt độ và thời gian tự bắt cháy cho khối lượng than dự trữ lớn bằng mô hình Frank-Kamenetski. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, lưu trữ than với thể tích càng lớn, quá trình tự bắt cháy diễn ra ở nhiệt độ càng thấp. Tuy nhiên, thời gian để quá trình tự bắt cháy diễn ra càng dài. Do đó, có nhiều thời gian hơn để thực hiện các biện pháp tản nhiệt trong đồng than để ngăn ngừa quá trình tự bắt cháy diễn ra.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được thực hiện dưới sự tài trợ kinh phí từ Bộ Khoa học và Công nghệ cho đề tài mã số NĐT.94.CHN/20.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. D. Dung, T. V. Thieu, and N. H. Linh, "Low temperature oxidation and spontaneous combustion tendency of blended coal between anthracite and sub-bituminous pulverized coals", *GMSARN International Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 115-120, 2022.
- [2] T. X. Ren, J. S. Edwards, and D. Clarke, "Adiabatic oxidation study on the propensity of pulverised coals to spontaneous combustion", *Fuel*, vol. 78, no. 14, pp. 1611-1620, 1999.
- [3] Y. Wang, K. Sasaki, Y. Sugai, and X. Zhang, "Measurement of critical self-ignition temperatures of low rank coal piles", *14th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia, Australia*, 2014, pp. 339-343.
- [4] Y. S. Nugroho, A. C. McIntosh, and B. M. Gibbs, "Low-temperature oxidation of single and blended coals", *Fuel*, vol. 79, no. 15, pp. 1951-1961, 2000.
- [5] V. Fierro, J. L. Mirandamailto, C. Romero, J. M. Andrés, A. Arriaga, and D. Schmal, "Model predictions and experimental results on self-heating prevention of stockpiled coals", *Fuel*, vol. 80, no. 1, pp. 125-134, 2001.
- [6] Y. Wang, X. Zhang, Y. Sugai, and K. Sasaki, "Determination of Critical Self-Ignition Temperature of Low-Rank Coal Using a 1 m Wire-Mesh Basket and Extrapolation to Industrial Coal Piles", *Energy & Fuels*, vol. 31, no. 7, pp. 6700-6710, 2017.
- [7] J. Carras and B. Young, "Self-heating of coal and related materials: Models, application and test methods", *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 20, no. 1, pp. 1-15, 1994.
- [8] W. Sujanti and D. Zhang, "A laboratory study of spontaneous combustion of coal: the influence of inorganic matter and reactor size", *Fuel*, vol. 78, pp. 549-556, 1999.