

# Tối ưu hóa công nghệ nén ép thuốc hỏa thuật trên cơ sở Magie-Teflon-Viton có sử dụng phụ gia nano bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm Box-Behnken

Nguyễn Nam Sơn<sup>1\*</sup>, Đàm Quang Sang<sup>1</sup>, Nguyễn Văn Tính<sup>1</sup>, Hoàng Thị Chung<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Học viện Kỹ thuật quân sự, Số 236 Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm – Hà Nội.

<sup>2</sup> Khoa Môi trường, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Số 18, Phố Viên, P. Đức Thắng, Q. Bắc Từ Liêm, Hà Nội

## TÓM TẮT

*Hiện nay, đạn môi bẫy hồng ngoại là một trong những phương tiện hữu hiệu được sử dụng để bảo vệ máy bay chống lại các loại tên lửa dẫn đường hồng ngoại. Trong đạn môi bẫy hồng ngoại, thuốc hỏa thuật (THT) phát xạ hồng ngoại trên cơ sở Magie-Teflon-Viton (MTV) được tạo hạt và nén ép, hoặc ép đùn thành các viên hình trụ có kích thước khác nhau để đưa vào đạn. Bài báo này trình bày nghiên cứu tối ưu hóa các thông số công nghệ nén ép THT MTV gồm khối lượng mẫu (g), lực nén (tấn) và thời gian giữ lực nén (s). Phương pháp quy hoạch thực nghiệm Box-Behnken được áp dụng đã cho kết quả tối ưu mật độ 1,68 g/cm<sup>3</sup> và độ bền nén 20,5 MPa (khối lượng mẫu 3,6 g, lực nén 1 tấn và thời gian giữ lực nén 40 s).*

**Từ khóa:** MTV; quy hoạch thực nghiệm; độ bền nén, mật độ.

## 1. MỞ ĐẦU

Thuốc hỏa thuật (THT) trên cơ sở Magie-Teflon-Viton (MTV) đã được nghiên cứu và ứng dụng phổ biến trong các loại đạn môi bẫy hồng ngoại [1, 12]. Để nâng cao khả năng phát xạ hồng ngoại, THT MTV thường được bổ sung một số phụ gia, đặc biệt là phụ gia nano [2, 3, 12]. Sắt oxit  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano và graphen là những phụ gia có khả năng làm tăng khả năng phát xạ hồng ngoại của THT MTV [3, 12]. Sắt oxit  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> được biết đến là loại phụ gia quan trọng đóng vai trò phụ gia làm tăng tốc độ cháy cho các vật liệu năng lượng cao [4]. Hiệu quả xúc tác của  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kích thước nano so với kích thước micro cũng đã được chứng minh trong nghiên cứu của Joshi và cộng sự (2008) [5]. Bên cạnh đó, sự kết hợp của  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano với Mg kim loại tạo thành hỗn hợp tecmit tỏa nhiệt nhờ phản ứng oxi hóa khử [3], tạo ra nguồn nhiệt đáng kể cho sự phát xạ. Trong khi đó, graphen ở trong THT hầu như không tham gia phản ứng cháy mà phát tán thành cacbon tự do với diện tích bề mặt lớn có khả năng phát xạ như vật đen [6], giúp tăng cường độ bức xạ.

Trong đạn môi bẫy hồng ngoại, THT MTV được tạo hạt, nén ép thành các viên hình trụ có kích thước khác nhau để nhồi vào đạn [1]. Tính ổn định về khả năng phát xạ của đạn môi bẫy hồng ngoại phụ thuộc vào mật độ và độ bền nén [7, 8]. Các nghiên cứu đã chỉ ra, khi tạo hình viên từ hạt THT, các thông số kỹ thuật có khả năng ảnh hưởng đến hiệu quả hoạt động của viên nén hỏa thuật đó là: a) Hình dạng của viên nén (hình trụ, hình trụ có rãnh, v.v...); b) Kích thước của viên nén; c) Khối lượng thuốc mỗi viên nén; d) Lực nén lên hỗn hợp hỏa thuật; e) Thời gian giữ lực nén [7, 9]. Các thông số a) và b) ảnh hưởng nhiều đến thời gian cháy của viên nén hỏa thuật. Trong khi, các thông số c), d) và e) ảnh hưởng nhiều đến độ bền và mật độ của viên hỏa thuật. Như vậy, mật độ và độ bền nén của viên hỏa thuật có thể được điều chỉnh thông qua các yếu tố công nghệ là khối lượng thuốc, lực nén và thời gian giữ lực nén. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu, đánh giá ảnh hưởng của một số tham số công

nghe nén gồm khối lượng thuốc (g), lực nén (tấn) và thời gian giữ lực nén (s) tới mật độ nén ( $\text{g/cm}^3$ ) và độ bền nén (MPa) của viên hỏa thuật MTV có bổ sung phụ gia nano. Trên cơ sở đó tìm ra công nghệ nén tối ưu, bảo đảm mật độ và độ bền nén dựa trên mô hình quy hoạch thực nghiệm Box-Behnken [10].

## 2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

### 2.1. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm Box-Behnken

Phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc hai Box-Behnken được sử dụng phổ biến để đánh giá ảnh hưởng đồng thời của nhiều yếu tố tới một hay nhiều hàm mục tiêu mà không cần sử dụng quá nhiều thí nghiệm. Để xây dựng ma trận thực nghiệm theo quy hoạch Box-Behnken, trước tiên cần phải lựa chọn phạm vi thay đổi của từng yếu tố ảnh hưởng (biến thực), sau đó chuyển biến thực thành biến mã hóa. Giả sử biến thực  $z_j$  thay đổi trong khoảng  $[a_j, b_j]$ , với  $(1 \leq j \leq k$  là số biến ảnh hưởng tới hàm mục tiêu). Giá trị  $a_j$  được gọi là mức thấp, giá trị  $b_j$  được gọi là mức cao của biến  $z_j$ . Biến thực  $z_j$  được chuyển thành biến mã hóa  $x_j$  như sau:

$$\text{Giá trị mức "gốc" của biến } Z_j \text{ là: } z_{j0} = \frac{a_j + b_j}{2} \quad (1)$$

$$\text{Mức biến đổi của biến } z_j: \Delta z_j = \frac{b_j - a_j}{2} \quad (2)$$

$$\text{Giá trị biến mã hóa: } x_j = \frac{z_j - z_{j0}}{\Delta z_j} \quad (3)$$

Như vậy, giá trị mức cao, mức thấp và mức "gốc" của biến mã hóa sẽ tương ứng là: 1; -1 và 0. Ma trận thực nghiệm theo quy hoạch Box-Behnken được tạo thành từ 15 hàng. Trong đó, 12 hàng đầu tương ứng với 12 phương án thí nghiệm khác nhau, khi mỗi biến số nhận một trong 3 giá trị ở mức cao, thấp hay "gốc". Ba hàng cuối cùng là phương án thí nghiệm với toàn bộ các biến đều ở mức "gốc" được thực hiện lặp 3 lần. Với mỗi thí nghiệm, ta sẽ xác định được giá trị thực nghiệm của hàm mục tiêu  $y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), trong đó  $m$  là số hàm mục tiêu cần tìm trong nghiên cứu. Dựa trên kết quả thí nghiệm, người ta sẽ tiến hành hồi quy để tìm phương trình bậc hai mô tả ảnh hưởng của các biến (các yếu tố) tới các hàm mục tiêu. Dưới đây là dạng tổng quát của phương trình hồi quy bậc 2 với 3 yếu tố ảnh hưởng:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^3 b_{ii} x_i^2 \quad (y = y_1, y_2; x = x_1, x_2, x_3) \quad (4)$$

Trong đó:  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$  là các hệ số hồi quy.

Dựa trên phương trình hồi quy, người ta có thể xác định được mức độ ảnh hưởng và chiều hướng tác động của từng yếu tố tới hàm mục tiêu, thậm chí có thể tìm được giá trị các biến để hàm mục tiêu đạt giá trị tối ưu.

### 2.2. Thực nghiệm

#### 2.2.1. Nguyên liệu

Bột Mg có kích thước hạt  $\leq 63 \mu\text{m}$  (tỷ trọng  $1,73 \text{ g/cm}^3$ ), công ty Eternal Bliss Alloy Casting & Forging - Trung Quốc. Bột teflon (PTFE) có kích thước hạt  $\leq 10 \mu\text{m}$  (tỷ trọng  $2,31 \text{ g/cm}^3$ ), nhựa viton A có hàm lượng flo đạt 66% (tỷ trọng  $1,81 \text{ g/cm}^3$ ), axeton tinh khiết 99,5%, hãng Xilong - Trung Quốc.

#### 2.2.2. Chuẩn bị mẫu

Mẫu MTV được chuẩn bị có tỷ lệ thành phần % khối lượng là 65/30/5. Phụ gia nano được bổ

sung có hàm lượng  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  và graphen tương ứng là 4% và 8 % tính ngoài hỗn hợp MTV. Trong đó, cao su viton A được hòa tan vào trong axeton với tỷ lệ  $c = 0,05$  g viton/1 ml axeton khoảng 8 giờ. Phụ gia  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ /graphen được bổ sung vào dung dịch viton/axeton và khuấy trộn bằng thiết bị đồng hóa mẫu khoảng 30 phút. Hỗn hợp Mg/PTFE được trộn khô trước khi cho vào dung dịch viton/axeton/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ /graphen, trộn ướt hỗn hợp trong khoảng 30 phút. Hong khô hỗn hợp thu được trong 60 phút để đuổi dung môi đến hỗn hợp nhão rồi tiến hành sàng tạo hạt trên sàng 0,8 mm. Cuối cùng hỗn hợp THT được sấy đối lưu ở  $60^\circ\text{C}$  trong 3 giờ để đuổi dung môi.

### 2.2.3. Phương pháp nén viên hóa thuật MTV

Thực tế đường kính các loại đạn môi bẫy thay đổi trong một khoảng khá rộng, với kích thước vỏ đạn có thể thay đổi từ 14 mm (NOTS Model 736) cho đến 300 mm (NOTS Model 723), tùy vào mục đích nghiên cứu, sử dụng [1]. Vì vậy, để phù hợp với quy mô PTN, tác giả lựa chọn các viên nén hóa thuật có đường kính 12 mm để nghiên cứu. Các mẫu THT phát xạ hồng ngoại trên cơ sở MTV - phụ gia nano sau khi tạo hạt được nén vào khuôn hình trụ có đường kính trong 12 mm bằng máy nén thủy lực Specac 15T - GS 15011. Các thông số được thay đổi trong quá trình nén là khối lượng thuốc ( $x_1$ ), lực nén ( $x_2$ ), thời gian giữ lực nén ( $x_3$ ). Phạm vi thay đổi của từng yếu tố được xác định nhờ kinh nghiệm và phù hợp với điều kiện phòng thí nghiệm (Bảng 1). Toàn bộ thuốc của từng mẫu với khối lượng khác nhau được cho vào khuôn 1 lần và tiến hành nén.

**Bảng 1.** Thiết kế các thông số nén viên hóa thuật MTV

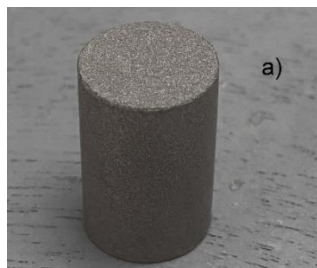
| TT | Yếu tố ảnh hưởng                | Đơn vị | Các mức thí nghiệm |     |     |
|----|---------------------------------|--------|--------------------|-----|-----|
|    |                                 |        | -1                 | 0   | 1   |
| 1  | Khối lượng thuốc ( $x_1$ )      | g      | 3,6                | 3,7 | 3,8 |
| 2  | Lực nén ( $x_2$ )               | tấn    | 0,6                | 0,8 | 1,0 |
| 3  | Thời gian giữ lực nén ( $x_3$ ) | s      | 40                 | 60  | 80  |

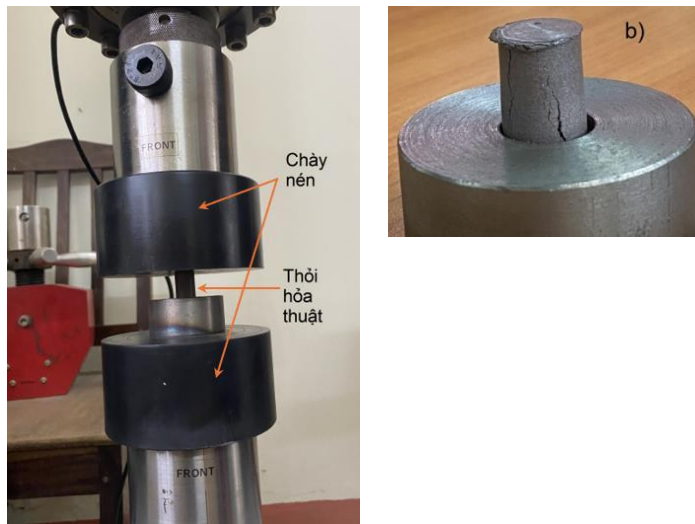
Chú ý trước khi nén, cần tiến hành sấy thuốc đến khối lượng không đổi để đuổi hết dung môi, tránh sự ảnh hưởng của hàm lượng chất bay hơi đến mật độ và độ bền nén của khối thuốc hóa thuật.

### 2.2.4. Xác định mật độ nén và độ bền nén viên hóa thuật MTV

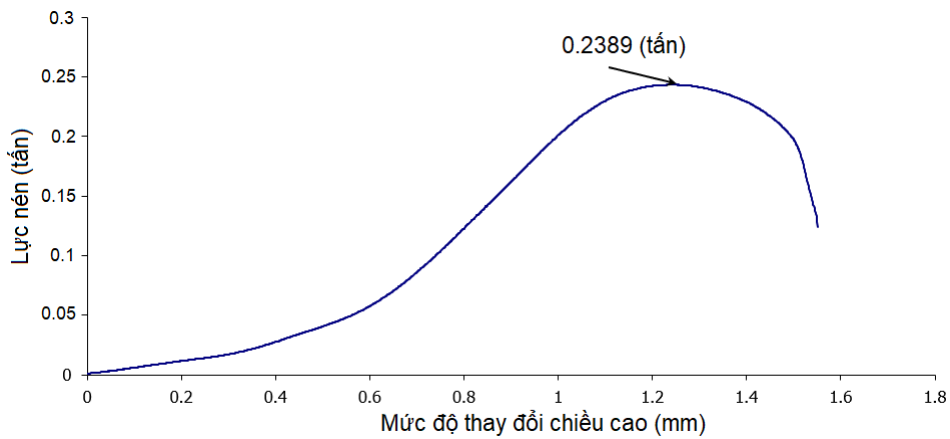
Các viên hóa thuật sau nén ép có diện tích bề mặt không đổi nhưng chiều dài các viên thay đổi theo các thông số quá trình nén. Mật độ nén ( $y_1$ ) được xác định bằng khối lượng nạp THT MTV chia cho thể tích của viên hóa thuật nhận được.

Độ bền nén được xác định trên thiết bị đo độ bền kéo nén Testometric M500-100AT (Hình 1). Phương pháp dựa trên nguyên tắc nén mẫu THT đến khi vỡ. Mẫu được chuẩn bị có dạng hình trụ, đường kính 12 mm. Kết quả đo độ bền nén ( $y_2$ ) được lưu lại tự động trong bảng ngay dưới đồ thị đường nén (Hình 2).





**Hình 1.** Xác định độ bền nén mẫu THT  
a) Mẫu trước khi nén; b) Mẫu sau khi nén



**Hình 2.** Đồ thị đường lực nén mẫu thử nghiệm xác định độ bền nén

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Tiến hành thí nghiệm nén ép THT MTV theo quy hoạch thực nghiệm Box-Behnken rồi đo các thông số mật độ nén, độ bền nén. Kết quả đo được trình bày trong Bảng 2.

Sử dụng công cụ Regression trong Excel xác định được phương trình hồi quy mô tả ảnh hưởng của 3 yếu tố (khối lượng mẫu, lực nén và thời gian giữ lực nén) tới:

- Mật độ viên hòa thuật  $y_1$ :

$$y_1 = 1,5937 - 0,0015x_1 + 0,1041x_2 + 0,0026x_3 - 0,0015x_1x_2 + 0,0015 x_1x_3 + 0,0048 x_2x_3 - 0,0112 x_1^2 - 0,008 x_2^2 + 0,0085 x_3^2 \quad (5)$$

với hệ số tương hợp  $R^2 = 0,969$ .

- Độ bền nén của viên hòa thuật  $y_2$ :

$$y_2 = 12,0433 - 0,2213x_1 + 6,595x_2 + 0,4163x_3 - 0,09x_1x_2 - 0,2025x_1x_3 + 0,605x_2x_3 + 0,2271 x_1^2 + 1,7896 x_2^2 + 0,7571 x_3^2 \quad (6)$$

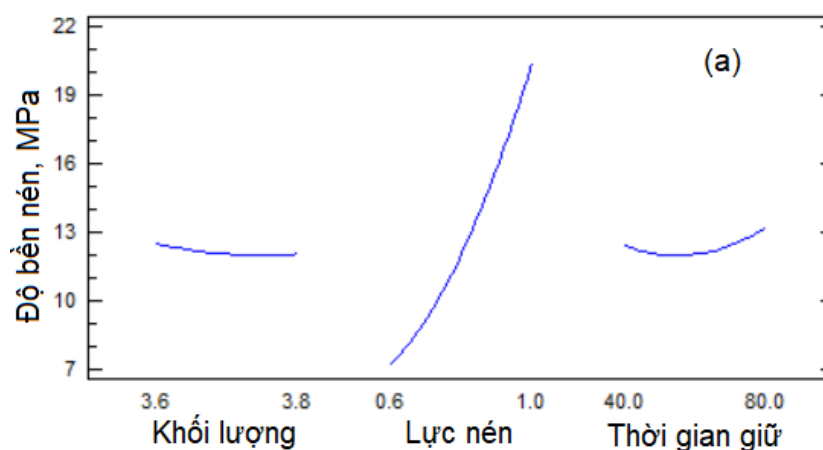
với hệ số tương hợp  $R^2 = 0,992$ .

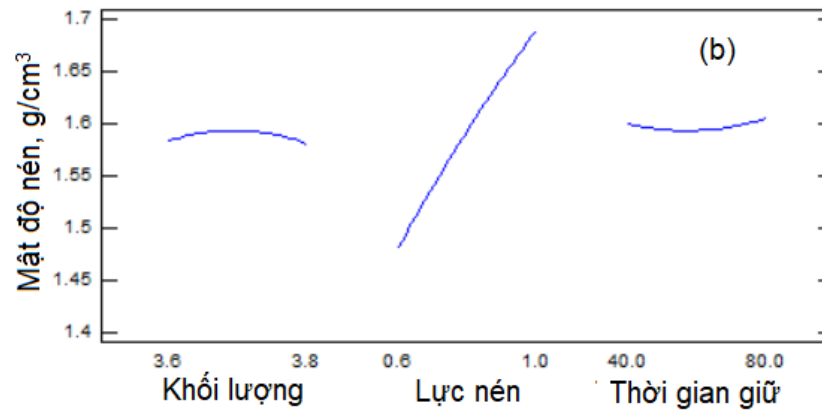
Giá trị hệ số tương hợp  $R^2$  trong cả 2 phương trình hồi quy đối với mật độ và độ bền nén của viên hòa thuật đều lớn hơn 0,95 chứng tỏ mô hình đưa ra phù hợp với số liệu thực nghiệm.

**Bảng 2.** Ma trận quy hoạch thực nghiệm Box-Behnken với 3 yếu tố

| STT | Các yếu tố ảnh hưởng |             |           |       |       |       | Hàm mục tiêu              |             |
|-----|----------------------|-------------|-----------|-------|-------|-------|---------------------------|-------------|
|     | $z_1$ , g            | $z_2$ , tấn | $z_3$ , s | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $y_1$ , g/cm <sup>3</sup> | $y_2$ , MPa |
| 1   | 3,6                  | 0,8         | 80        | -1    | 0     | 1     | 1,605                     | 14,46       |
| 2   | 3,7                  | 0,6         | 80        | 0     | -1    | 1     | 1,491                     | 7,56        |
| 3   | 3,8                  | 0,8         | 80        | 1     | 0     | 1     | 1,604                     | 13,35       |
| 4   | 3,7                  | 1           | 80        | 0     | 1     | 1     | 1,681                     | 21,53       |
| 5   | 3,6                  | 1           | 60        | -1    | 1     | 0     | 1,695                     | 21,05       |
| 6   | 3,6                  | 0,6         | 60        | -1    | -1    | 0     | 1,456                     | 7,25        |
| 7   | 3,8                  | 0,6         | 60        | 1     | -1    | 0     | 1,457                     | 7,25        |
| 8   | 3,8                  | 1           | 60        | 1     | 1     | 0     | 1,690                     | 20,69       |
| 9   | 3,6                  | 0,8         | 40        | -1    | 0     | -1    | 1,581                     | 12,30       |
| 10  | 3,7                  | 0,6         | 40        | 0     | -1    | -1    | 1,517                     | 8,86        |
| 11  | 3,8                  | 0,8         | 40        | 1     | 0     | -1    | 1,574                     | 12,00       |
| 12  | 3,7                  | 1           | 40        | 0     | 1     | -1    | 1,688                     | 20,41       |
| 13  | 3,7                  | 0,8         | 60        | 0     | 0     | 0     | 1,607                     | 11,99       |
| 14  | 3,7                  | 0,8         | 60        | 0     | 0     | 0     | 1,591                     | 12,69       |
| 15  | 3,7                  | 0,8         | 60        | 0     | 0     | 0     | 1,583                     | 11,45       |

Qua số liệu thực nghiệm và 02 phương trình hồi quy (5) và (6) có thể nhận thấy, trong số 3 yếu tố trên, lực nén có ảnh hưởng lớn nhất và rõ rệt nhất tới mật độ và độ bền nén, lực nén càng cao thì mật độ và độ bền nén càng cao. Xếp theo mức độ ảnh hưởng, thời gian giữ lực nén và khối lượng mẫu lần lượt ở vị trí thứ hai và thứ ba. Tương tự như lực nén, thời gian giữ lực nén càng lớn thì mật độ và độ bền nén tăng. Tuy nhiên, trong phạm vi nghiên cứu thời gian giữ lực nén từ 40 tới 80 s, sự thay đổi này không nhiều vì khả năng đàn hồi của mẫu (sau khi ngừng nén) đã giảm tiệm cận giá trị tới hạn. Mặt khác, việc kéo dài thời gian giữ áp sẽ không có lợi về công suất nén và cuối cùng là hiệu quả kinh tế, do đó, thời gian giữ lực nén không nên quá lớn. Đồ thị ảnh hưởng của các yếu tố đến mật độ nén và độ bền nén khối thuốc được trình bày trên Hình 3.





**Hình 3.** Đồ thị ảnh hưởng của các yếu tố đến mật độ nén và độ bền nén

Khác với lực nén và thời gian giữ lực nén, khối lượng mẫu tăng thì mật độ và độ bền nén có xu hướng giảm nhưng không nhiều. Điều này được giải thích là do khối lượng mẫu lớn dẫn tới chiều cao của viên thuốc tăng (cùng điều kiện lực nén và thời gian giữ lực nén). Chiều cao viên thuốc càng lớn thì khả năng truyền lực nén từ lớp thuốc trên xuống lớp thuốc dưới giảm. Khi đó, lớp thuốc dưới sẽ có mật độ thấp hơn lớp thuốc trên và hệ quả là mật độ và độ bền viên nén giảm. Tuy nhiên, trong phạm vi thay đổi khối lượng mẫu từ 3,6 tới 3,8 g, mức độ thay đổi này không lớn. Trong trường hợp yêu cầu viên nén khối lượng lớn, cần chia nhỏ lượng thuốc và nén nhiều lần nhằm bảo đảm mật độ cao và đồng đều trong toàn bộ cấu trúc của viên thuốc.

Sử dụng công cụ Solver của Excel, tác giả xác định được rằng, mật độ và áp suất nén lớn nhất trong phạm vi nghiên cứu (biến mã hóa  $x_j$  nằm trong khoảng từ -1 tới 1) khi các yếu tố ảnh hưởng có giá trị tương ứng là: khối lượng mẫu bằng 3,6 g (giá trị mã hóa bằng -1); lực nén bằng 1 tấn (giá trị mã hóa bằng 1); thời gian giữ lực nén bằng 80 s (giá trị mã hóa bằng 1). Mật độ và độ bền nén của viên thuốc khi đó tương ứng bằng 1,70 và 22,95. Tuy nhiên, như đã phân tích ở phần trên, nếu lựa chọn thời gian giữ lực nén 80 s sẽ không có lợi về hiệu quả kinh tế. Do đó, tác giả sử dụng phương trình hồi quy (5) và (6) để xác định mật độ và độ bền nén tương ứng với thời gian giữ lực nén 40 s (khi giữ nguyên khối lượng mẫu 3,6 g và lực nén 1 tấn) và kết hợp cùng với giá trị thực nghiệm ứng với thời gian giữ lực nén 60 s (hàng thứ 5 của Bảng 2). Kết quả được trình bày trên Bảng 3. Từ kết quả trên Bảng 3 ta nhận thấy, với thời gian giữ lực nén 40 s, mật độ đạt 1,68 g/cm<sup>3</sup>, ngoài ra độ bền nén khi đó đạt giá trị tương đối lớn 20,5 MPa. Do vậy, có thể lựa chọn thời gian giữ lực nén bằng 40 s để đồng thời mật độ, độ bền viên nén và công suất nén đủ lớn.

**Bảng 3.** Sự phụ thuộc của mật độ và độ bền nén của viên thuốc vào thời gian giữ áp khi cố định khối lượng mẫu và lực nén

| STT | Các yếu tố ảnh hưởng |             |           |       |       |       | Hàm mục tiêu              |             |
|-----|----------------------|-------------|-----------|-------|-------|-------|---------------------------|-------------|
|     | $z_1$ , g            | $z_2$ , tấn | $z_3$ , s | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $y_1$ , g/cm <sup>3</sup> | $y_2$ , MPa |
| 1   | 3,6                  | 1           | 40        | -1    | 1     | -1    | 1,68                      | 20,50       |
| 2   | 3,6                  | 1           | 60        | -1    | 1     | 0     | 1,70                      | 21,05       |
| 3   | 3,6                  | 1           | 80        | -1    | 1     | 1     | 1,70                      | 22,95       |

Theo tài liệu [1], các loại đạn môi bẫy hồng ngoại thường có mật độ nén dao động trong khoảng 1,5 ÷ 1,8 g/cm<sup>3</sup> (đối với đạn của Mỹ, Anh). Trong khi đó các loại đạn môi bẫy hồng ngoại thường yêu cầu độ

bền nén tối thiểu là 1MPa để chịu được gia tốc máy bay chiến đấu có thể lên tới 9G [9, 11] . Điều này cho thấy, chế độ công nghệ để đạt được kết quả tối ưu về độ bền nén 20,5 MPa và mật độ nén 1,68 g/cm<sup>3</sup> là phù hợp để áp dụng chế tạo đạn mồi bẫy hồng ngoại.

#### 4. KẾT LUẬN

Áp dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm Box-Behnken, đã xác định được giá trị tối ưu các yếu tố đầu vào: khối lượng mẫu thuốc, lực nén, thời gian giữ lực nén. Trong đó:

- Phương trình hồi quy tổng quát mô tả ảnh hưởng của 3 yếu tố đến mật độ, độ bền nén với giá trị hệ số tương hợp  $R^2$  lớn hơn 0,95 có thể được sử dụng để dự đoán mật độ và độ bền nén.

- Mật độ tối ưu đạt được là 1,68 g/cm<sup>3</sup> với khối lượng 3,6 g ở lực nén 1 tấn và thời gian giữ áp suất nén là 40 s để đảm bảo hiệu quả kinh tế. Khi đó, độ bền nén đạt được là 20,5 MPa.

- Trong trường hợp yêu cầu viên nén khối lượng lớn, cần chia nhỏ lượng thuốc và nén nhiều lần nhằm bảo đảm mật độ cao và đồng đều trong toàn bộ cấu trúc của thỏi hỏa thuật.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Douda, B.E., *Genesis of infrared decoy flares: the early years from 1950 into the 1970s*, in. 2009, Naval Surface Warfare Center Crane Div In, p. 44-67, 79-81.
- [2]. Zarko, V.E., Gromov, A., *Energetic nanomaterials: synthesis, characterization, and application*: Elsevier, 2016, p. 7, 8, 95, 173-178.
- [3]. Elbasuney, S., et al., *Multi-component nanocomposite infrared flare with superior infrared signature via synergism of nanothermite and reduced graphene oxide*, Journal of Materials Science: Materials in Electronics. **31**(14), 2020, pp. 11520-11526.
- [4]. Ma, Z., Li, F., Bai, H., *Effect of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AP composite particles on thermal decomposition of AP and on burning rate of the composite propellant*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics: An International Journal Dealing with Scientific Technological Aspects of Energetic Materials. **31**(6), 2006, pp. 447-451.
- [5]. Joshi, S.S., Patil, P.R., Krishnamurthy, V., *Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate in the Presence of Nanosized Ferric Oxide*, Defence Science Journal. **58**(6), 2008.
- [6]. Koch E. C., *Review on Pyrotechnic Aerial Infrared Decoys*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics. **26**, 2001, pp. 3-11.
- [7]. Adhikary, S., Sekhar, H., Thakur, D., *Investigations of process parameters on the mechanical properties of MTV decoy flare pellets for defence applications*, Procedia Structural Integrity. **14**, 2019, pp. 127-133.
- [8]. Adhikary, S., Sekhar, H., Thakur, D.G., *Optimisation of density of infra-red decoy flare pellets by Taguchi method*, Sādhanā. **44**, 2019, pp. 1-9.
- [9]. Adhikary, S., Sekhar, H., Thakur, D.G., *Optimization of compressive strength of MTV decoy flare pellets by Taguchi method*, Particulate Science Technology. **39**(3), 2020, pp. 338-343.
- [10]. Ferreira, S.C., et al., *Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods*, Analytica chimica acta. **597**(2), 2007, pp. 179-186.
- [11]. Pollock, D.H., Accetta, J.S., Shumaker, D.L., *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Countermeasure Systems, Volume 7*, 1993, p. 163-164, 296-303.
- [12]. Koch E. C., *Metal-fluorocarbon based energetic materials*, John Wiley & Sons 2012, p. 151-193.

#### ABSTRACT

##### **Optimization of compressive technology on the composition pyrotechnic based on Magnesium-Teflon-Viton with nano additives by Box-Behnken method**

Nowadays, infrared decoy flares are one of the effective means used to protect aircraft against infrared guided missiles. In the infrared decoy projectile, the composition pyrotechnic based on Magnesium-Teflon-Viton (MTV) is granulated and compressed, or extruded into cylindrical pellets of various sizes. This article presents research on optimization of MTV pellets compression technology parameters including sample weight (g), compression pressure (tons) and compression holding time (s).

*The applied Box-Behnken experimental planning method has resulted in optimal density of 1.68 g/cm<sup>3</sup> and compressive strength of 20.5 MPa (sample mass of 3.6 g, compression pressure of 1 ton and time pressure holding time 40 s).*

**Keywords:** MTV; experimental planning; compressive strength; density.