

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT
KHOA CƠ - ĐIỆN

**HỘI NGHỊ KHOA HỌC TOÀN QUỐC VỀ
CƠ KHÍ - ĐIỆN - TỰ ĐỘNG HÓA**

*National Conference on Mechanical, Electrical, Automation Engineering
(MEAE2023)*



NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

- rotor. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104(1):1183–1194.
- [10] Michaël Pereira et al. (2021), Improved Aerodynamics of a Hollow-Blade Axial Flow Fan by Controlling the Leakage Flow Rate by Air Injection at the Rotating Shroud. Entropy 2021, 23, 877. <https://doi.org/10.3390/e23070877>
- [11] Mark Kearns and RJ Crawford. (2003), Practical guide to rotational moulding.
- [12] Roy J Crawford. (2012), Practical guide to rotational moulding. Smithers Rapra.
- [13] Vu-Dinh DANG. (2021), Étude de l'influence des paramètres du procédé de rotomoulage sur les caractéristiques aérodynamiques de fonctionnement d'un ventilateur axial. Thèse Doctorat (PhD).
- [14] ISO, "Norme internationale ISO 5801. (2007), Ventilateurs industriels - Essais aérauliques sur circuits normalisés.", fr, p. 248.

QUY LUẬT ẢNH HƯỞNG CỦA THAM SỐ KẾT CẤU VI MÔ DẠNG ĐẶC BIỆT ĐẾN HIỆU SUẤT MA SÁT CỦA CẶP MA SÁT GỐI TRƯỢT-ĐĨA NGHIÊNG BƠM PISTON HƯỚNG TRỰC VÀ THIẾT KẾ TỐI ƯU HÓA THAM SỐ VI MÔ

Lê Văn Lợi^{1,*}, XuPing¹, Yu YingHua¹, Nguyễn Duy Trung¹, Đỗ Trung Hiếu², Nguyễn Thanh Tuấn³

¹Đại học Kỹ thuật Công nghệ Liêu Ninh, Liêu Ninh, Trung Quốc;

²Viện Cơ khí Năng lượng và Mô-Vinacomin, Hà Nội, Việt Nam;

³Khoa Dầu khí, Trường Đại học Mỏ-Địa Chất, Hà Nội, Việt Nam;

TÓM TẮT

Để nghiên cứu ảnh hưởng của kết cấu vi mô, nâng cao hiệu suất ma sát của bơm piston hướng trục kiểu đĩa nghiêng, lựa chọn cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng làm đối tượng nghiên cứu. Nghiên cứu này giới thiệu lý thuyết phân tích bề mặt đáp ứng và sử dụng phân tích lý thuyết bề mặt đáp ứng để thiết kế thực nghiệm 5 cặp 6 yếu tố và tiến hành 40 bộ thử nghiệm mô phỏng và thu được kết quả mô phỏng của từng nhóm về khả năng chịu tải, hệ số ma sát, nhiệt độ trung bình. Nghiên cứu quy luật và mức độ ảnh hưởng của các tham số kết cấu EOPT đặc trưng đối với khả năng chịu tải, hiệu suất ma sát và mòn, mức độ gia tăng nhiệt độ của cặp ma sát. Kết quả nghiên cứu cho thấy: thứ tự ảnh hưởng đối với khả năng chịu tải màng dầu: bán kính ngắn(B) > bán kính dài(A) > góc phân bố(F) > độ sâu(D) > khoảng cách kết cấu(E) > độ lệch(C); hệ số ma sát: bán kính ngắn(B) > bán kính dài(A) > độ sâu(D) > góc phân bố(F) > độ lệch(C) > khoảng cách kết cấu(E); nhiệt độ màng dầu: bán kính ngắn(B) > bán kính dài(A) > độ sâu(D) > góc phân bố(F) > độ lệch(C) > khoảng cách kết cấu(E); Với sự kết hợp tối ưu của các tham số EOPT đặc trưng: bán kính dài: 400,25 μ m, bán kính ngắn: 209,85 μ m, độ sâu: 75,25 μ m, độ lệch: 49,15 μ m và khoảng cách hai hàng kết cấu: 1086,75 μ m và góc phân bố: 5,6°; So với cặp ma sát nguyên mẫu, hệ số ma sát của cặp ma sát có kết cấu vi mô và tối ưu hóa giảm 12,63% và 16,3%, khả năng chịu tải của màng dầu cặp ma sát có kết cấu vi mô và tối ưu hóa tăng 15,23% và 19,93%, mức độ gia tăng nhiệt độ của màng dầu có kết cấu vi mô và tối ưu hóa giảm 7,85% và 9,46%.

Từ khóa: bơm piston hướng trục, gối trượt-đĩa nghiêng, kết cấu vi mô, ma sát, mặt phản hồi, nhiệt độ, tải trọng, tối ưu hóa...

1. Mở đầu

Trong hơn nửa thế kỷ qua, các nghiên cứu về kết cấu vi mô bề mặt (vân bề mặt-surface texture) đã đạt được những bước tiến dài trong vấn đề cải thiện khả năng chống mài mòn của dụng cụ gia công, cải thiện khả năng chống mài mòn và cải thiện tính năng bôi trơn và làm kín của các cặp ma sát trong các thiết bị cơ khí. Đây cũng là một trong những phương pháp hiệu quả để nâng cao khả năng chịu lực bề mặt, cải thiện đặc tính ma sát bề mặt, giảm thiểu quá trình gia tăng nhiệt độ và kéo dài thời gian sử dụng của cặp ma sát. Trong quá trình gia công kết cấu vi mô bề mặt, các thông số hình học của kết cấu như đường kính, độ lệch, độ sâu, khoảng cách và góc phân bố là những yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu tải và đặc tính chống ma sát mòn. Do đó phân tích ảnh hưởng của một số yếu tố công nghệ đến khả năng chịu tải, hệ số ma sát và nhiệt độ của màng dầu khe hở giữa các cặp ma sát là vô cùng cần thiết hiện nay.

Phương pháp bề mặt đáp ứng dựa trên phương trình hồi quy để thiết lập dạng phương trình toán học phù hợp giữa hàm mục tiêu và các biến độc lập, đồng thời phân tích giá trị dự đoán và giá trị thực của phương trình hồi quy đã thiết lập và sự tương tác giữa các yếu tố khác nhau thông qua mặt phản hồi, sau đó có thể nhận được các tham số kết hợp khác nhau của các biến khi mục tiêu là tối ưu.

Xuất phát từ những phân tích trên, nghiên cứu này nhóm tác giả đưa ra hướng nghiên cứu nhằm tìm ra quy luật ảnh hưởng của các tham số kết cấu EOOPT tác động đến khả năng chịu lực, hệ số ma sát và nhiệt độ của màng dầu cặp ma sát. Dựa trên phương pháp bề mặt đáp ứng kết hợp với phương trình hồi quy và thuật toán tối ưu hóa cá voi để thiết lập mô hình thử nghiệm ứng dụng trong phân tích ảnh hưởng của các tham số hình học kết cấu vi mô đến tính năng cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng của bơm piston hướng trục.

2. Nội dung nghiên cứu

Phương pháp tối ưu hóa bề mặt đáp ứng (RSM) có thể bao gồm lỗi ngẫu nhiên của hệ thống thử nghiệm và các phương trình toán học phức tạp có thể được đưa vào dạng đa thức thuận tiện hơn cho

việc tính toán thông qua phương pháp phân tích bề mặt đáp ứng, nhanh chóng và hiệu quả trong việc giải quyết thực tế. Đồng thời, phương pháp phân tích bề mặt đáp ứng có thể phân tích liên tục từng cấp độ thử nghiệm trong quá trình giải quyết tối ưu hóa, để đảm bảo tính liên tục của tối ưu hóa. Nó thường bao gồm các bước như thiết kế thử nghiệm, thiết lập mô hình mục tiêu, dự đoán giá trị mục tiêu và đánh giá mô hình.

2.1. Lý thuyết bề mặt đáp ứng (RSM)

Phương pháp bề mặt đáp ứng [ZhaoYali, ZhangSiqi, LuWenqian, ChenChong, WeiLi, (2021); Xing Lei, Li Jinyu, Zhao Lixin, et al, (2021); WeiXin, WangLeigang, WangZhao, PanShuhua, (2021); YangXu, ZhouDejian, ZhuangGongwei, Song Wei, LiuXiaolong, SheYulai, (2021); HuYanfeng, Du Yanbin, XuLei, ZhouZhijie, ShuLinsen, (2021); Mahanthesh B, Mackolil Joby, Mallikarjunaiah S.M, (2021)] (Response Surface Methodology, RSM) là một phương pháp thu thập dữ liệu trước tiên bằng cách thiết kế một kế hoạch thử nghiệm để tiến hành thử nghiệm, sau đó thiết lập mô hình mục tiêu và kết hợp dữ liệu thử nghiệm với nhiều phương trình hồi quy bậc hai để điều chỉnh tính toán phù hợp, cuối cùng, mối quan hệ tương ứng giữa các yếu tố khác nhau được thể hiện dưới dạng bề mặt phản hồi, để thu được kết quả tối ưu, được sử dụng để giải quyết vấn đề ảnh hưởng của nhiều yếu tố cùng tác động đến giá trị mục tiêu. Ưu điểm chính của nó là có thể kết hợp hiệu quả với mô phỏng ngẫu nhiên và mô phỏng xác định, sắp xếp một cách khoa học tổ hợp các phép thử và kết quả theo yêu cầu, vừa đạt được kết quả nghiên cứu khoa học tốt nhất, tối ưu nhất, vừa tiết kiệm thời gian, công sức, do đó phương pháp này phù hợp khi các yếu tố liên tục, số lượng lớn; Quá trình tìm kiếm tối ưu hóa của bề mặt phản ứng là liên tục, trong khi thí nghiệm trực giao tiến hành phân tích các điểm rời rạc và biệt lập, dẫn đến quá trình phân tích thêm chính xác hơn. Phương pháp tối ưu hóa đáp ứng bề mặt (RSM) lần đầu tiên được đề xuất và ứng dụng trong công nghiệp hóa chất vào những năm 1950, đến năm 1966, Hill và Hunte đã áp dụng lý thuyết bề mặt đáp ứng vào quá trình hóa học để thiết kế tối ưu hóa đa mục tiêu; Năm 1975, Mead và Pike áp dụng lý thuyết đáp ứng bề mặt vào lĩnh vực sinh học; Tiếp theo Myers, Khuri, và Carter đã giới thiệu quá

trình phát triển và hướng của lý thuyết bề mặt đáp ứng. Do tính ưu việt và độ dẻo của nó, lý thuyết bề mặt đáp ứng đã được ứng dụng rộng rãi trong các ngành khác nhau, đồng thời nó cũng được quan tâm và ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực cơ học.

Trong số các mô-đun tối ưu hóa bề mặt đáp ứng, mô-đun được sử dụng rộng rãi nhất là thiết kế Box-Behnken (BBD) và thiết kế tổng hợp trung tâm (CCD), bề mặt một thiết kế có độ chính xác bằng nhau hoặc trực giao, do đó có thể tìm vị trí của hệ số tối ưu và giá trị mục tiêu tốt hơn và chính xác hơn [YangYubing, ZhangChunguang, LiuGuangheng, LiShangqing, ZhangJunfeng, AnLei, ChuShuai, (2021)]; Mỗi nhân tố của BBD chỉ có 3 mức, khi số nhân tố là 3 thì kiểm định rất hiệu quả, nhưng lại không áp dụng được khi số nhân tố lớn hơn 5. Do đó, bài báo này chọn thiết kế phức hợp trung tâm (CCD).

Qua thực tế, người ta đã chứng minh rằng đường cong lý tưởng có thể phù hợp với số hạng bậc hai. Biểu thức của phương trình bề mặt đáp ứng [HuYanfeng, DuYanbin, XuLei, ZhouZhijie, ShuLinsen, (2021)] được thể hiện trong công thức sau:

$$y = \beta_0 + \sum_{k=1}^n \beta_k(1)x_k^2 + \sum_{k=n+1}^{2n} \beta_k(2)x_k^2 + \sum_{l=1}^{n-1} \sum_{k=l+1}^n \beta_k(l)x_k x_l + \Delta \quad (1)$$

trong đó: x_k : phạm vi của tham số:

$$x_k \in [x_k^1, x_k^u], x_k^1, x_k^u;$$

$\beta_0, \beta_k(1), \beta_k(2), \beta_k(l)$: hệ số của phương trình hồi quy đa thức bậc hai.

Kết hợp các biến trong công thức (1) với tích của hai cặp và đơn giản hóa kết quả ta có:

$$y_k = \beta_0 + \beta_1 x_k(1) + \dots + \beta_k x_k(m) + \Delta_k \quad (2)$$

$$y_k = \beta_0 + \sum_l^k \beta_l x_k(l) + \Delta; \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

Thông qua nhiều lần thử nghiệm thu được ma trận như sau:

$$Y = X\beta + \Delta \quad (4)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_1(1) & x_1(2) & x_1(k) \\ 1 & x_2(1) & x_2(2) & x_2(k) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_m(1) & x_m(2) & x_m(k) \end{bmatrix},$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \Delta = \begin{bmatrix} \Delta_0 \\ \Delta_1 \\ \vdots \\ \Delta_k \end{bmatrix}$$

Biểu thức phương sai tối thiểu C như sau:

$$C = \sum_{k=1}^m \Delta_k^2 = \Delta' \Delta = (Y - X\beta)' (Y - X\beta) \quad (5)$$

Khi giá trị C nhỏ nhất, thu được giá trị hiệu quả mô hình gần nhất với kết quả thực tế và biểu thức của nó như sau:

$$\frac{\partial C}{\partial \beta} \Big|_{\hat{\beta}} = -2X'Y + 2X'X \hat{\beta} = 0 \quad (6)$$

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'Y \quad (7)$$

Thu được phương trình bề mặt đáp ứng sau đây:

$$\hat{Y} = X \hat{\beta} \quad (8)$$

Sau khi thiết lập mô hình bề mặt đáp ứng đa thức bậc hai, cần kiểm tra xem mô hình có đáp ứng các yêu cầu về độ chính xác hay không. Các tiêu chuẩn kiểm tra độ chính xác chủ yếu bao gồm R^2 (hệ số xác định), MSE (sai số bình phương trung bình) và RMSE (sai số bình phương trung bình gốc), các biểu thức như sau:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N [y_{RS}(k) - y(k)]^2}{\sum_{k=1}^N [y(k) - \bar{y}]^2} \quad (9)$$

$$MES = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y_{RS}(k) - y(k)]^2 \quad (10)$$

$$RMSE = \frac{1}{N_y} \sqrt{\sum_{k=1}^N [y(k) - y_{RS}(k)]^2} \quad (11)$$

Trong đó:

y_{RS} : kết quả thu được từ việc tính bề mặt đáp ứng đa thức bậc hai;

y : kết quả tính toán mô phỏng phần tử hữu hạn;

N : số lượng điểm kiểm tra cần thiết để thiết kế bề mặt đáp ứng;

\bar{y} : giá trị trung bình của kết quả tính toán mô phỏng phần tử hữu hạn.

Khi R^2 được sử dụng để đánh giá độ chính xác, phạm vi giá trị của R^2 là (0, 1), giá trị của R^2 càng lớn thì mô hình bề mặt phản ứng càng chính xác và càng gần với tình hình thực tế. $R^2 > 0,95$, mô hình có thể được xem xét cho hoạt động tối ưu hóa tiếp theo; nếu độ chính xác được đánh giá bởi MSE và RMSE, giá trị càng nhỏ, mô hình bề mặt phản hồi càng chính xác. Trong bài báo này, R^2 được sử dụng làm cơ sở phán đoán để đánh giá độ chính xác của mô hình bề mặt đáp ứng.

2.2. Phân tích tính năng cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng nguyên mẫu

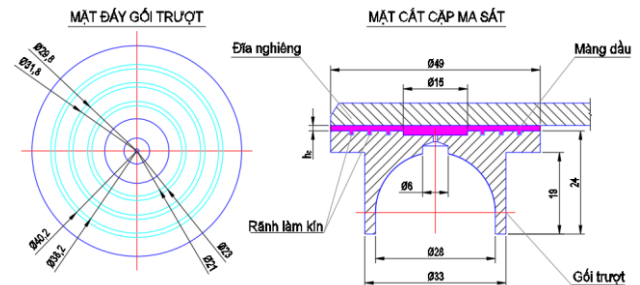
Các thông số chính, kết cấu chủ yếu của cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng của mẫu nghiên cứu thể hiện trong bảng 1 và hình 1. Để nâng cao hiệu quả tính toán và đảm bảo độ chính xác của kết quả mô phỏng cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng bơm piston hướng trục loại (250CY14-1B) được tiến hành chia nhỏ, và lựa chọn 1 trong số 7 gối trượt đại diện cho nhóm gối trượt (hình 1) để tiến hành phân tích và thiết lập điều kiện biên tuần hoàn tại bề mặt phân chia.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật cơ bản của bơm piston hướng trục 250SCY14

TT	Thông số kỹ thuật	Đơn vị	Giá trị	Ghi chú
1	Áp suất làm việc	MPa	31,5	
2	Tốc độ quay trục chính	vg/ph	1500	
3	Bán kính phân chia piston	mm	58	
4	Đường kính đầu tròn piston	mm	35	
5	Số lượng piston	-	7	
6	Góc lệch đĩa nghiêng	độ	18	
7	Đường kính lỗ cấp dầu bôi trơn trong piston	mm	1,5	

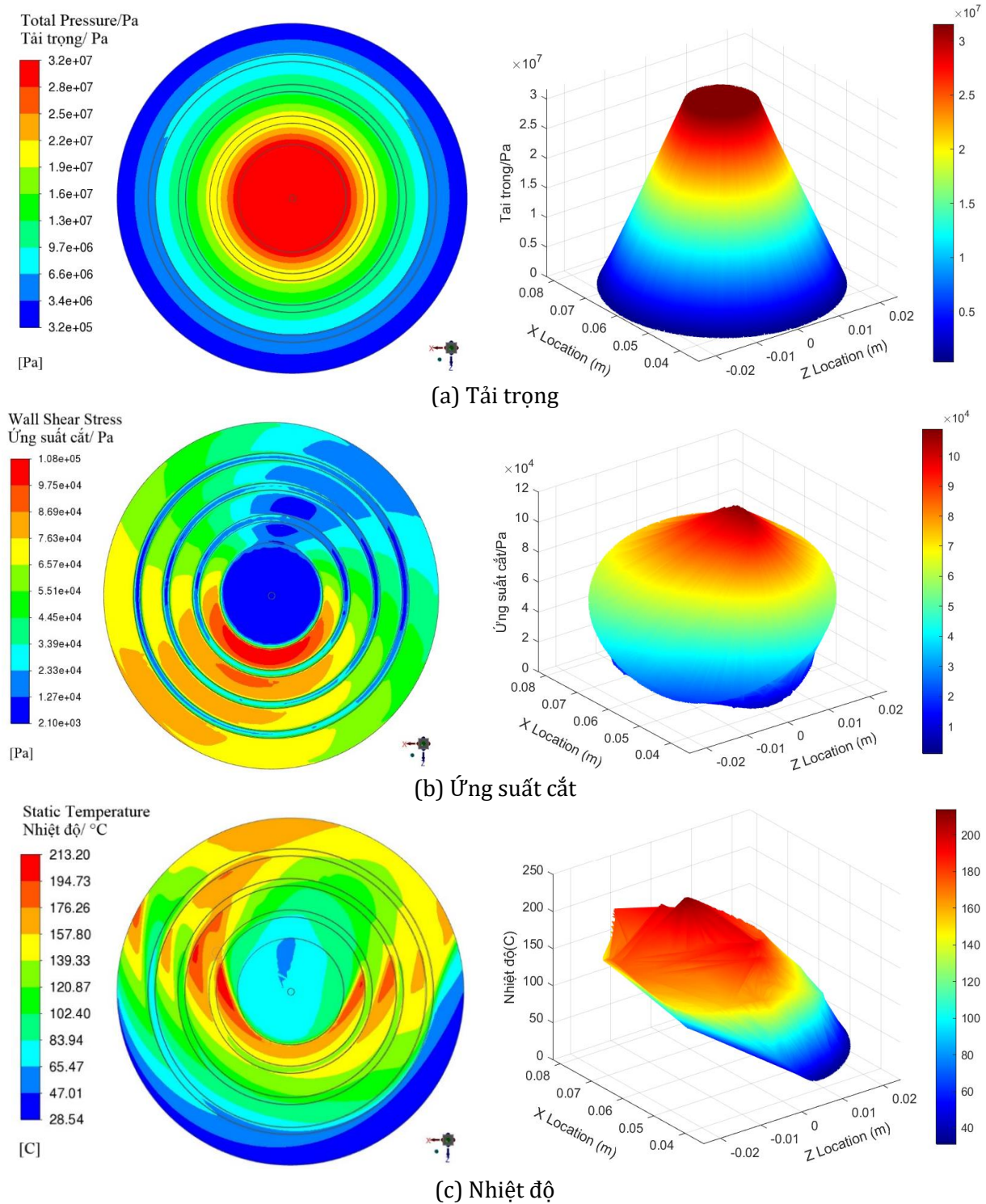
8	Chiều dài lỗ cấp dầu bôi trơn trong piston	mm	35,55	
9	Khối lượng riêng dầu thủy lực	kg/m ³	872,5	
10	Độ nhớt	m ² /s (40°C)	115.10 ⁻⁶	
11	Độ nhớt động học	Pa.s	0,155	
12	Nhiệt độ làm việc	°C	50	

Sử dụng Fluent Meshing trong Fluent để tiến hành chia lưới đa diện phân chia mô hình, tổng số phần tử lưới trong mô hình hữu hạn khoảng 134487, số nút khoảng 167238, trong đó trên 98% chất lượng lưới trên 0.5 μ m, nhỏ nhất là 0.35 μ m. Nhập các thông số phân tích trong Bảng 1 vào Ansys Fluent để tiến hành phân tích, sau cùng thu được biểu đồ mô phỏng áp suất màng dầu phân bố trên khe hở của cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng nguyên mẫu như trong hình 2.



Hình 1. Kết cấu hình học cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng bơm piston

Thông qua mô phỏng và phương trình tính toán áp suất đơn vị bề mặt, hệ số ma sát [Nguyễn Đăng Bình, (2006); (Nguyễn Anh Tuấn, (2006); Lê Văn Lợi and nnk, (2022)] và nhiệt độ trung bình của màng dầu khe hở cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng trong bơm piston hướng trục kiểu đĩa nghiêng loại 250SCY14-1B, trong điều kiện tải trọng làm việc áp suất cao 31.5 MPa, kết hợp biểu đồ đám mây (hình 2) về khả năng chịu lực, hệ số ma sát, nhiệt độ TB và nhiệt độ cao nhất của màng dầu khe hở của cặp ma sát, lần lượt là: 10824542.3 Pa; 0,00423, 120,32°C và 213,2°C.



Hình 2. Biểu đồ phân tích hiệu suất ma sát của cặp ma sát nguyên mẫu

2.3. Mô hình thiết kế thử nghiệm bề mặt đáp ứng phản hồi

Căn cứ vào một số nghiên cứu và quá trình nghiên cứu kiểm tra khảo sát một số đơn

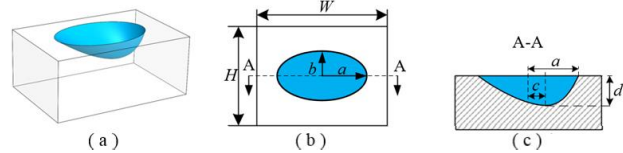
nguyên vi mô dạng parabol không đối xứng, bán nguyệt, tam giác, trụ tròn có cửa mở hình elip, tròn... (những nghiên cứu liên quan) [Ezhilmaran V. et al (2018); Fiaschi. G et al

(2019); Jonathon, et al (2016); Lê Văn Lợi và nnk, (2022), Lê Văn Lợi và nnk, (2022); Lê Văn Lợi và nnk, (2023); Yu Yinghua, Yang Shuaibin, Cao Maolin, Shen Jiaying, Nguyễn Văn Tân, (2022)], nhận thấy đơn nguyên kết cấu vi mô dạng parabol không đối xứng với cửa mở hình elip có hệ số ma sát và khả năng chịu tải tốt hơn, do đó trong nghiên cứu này tác giả đi sâu vào giải quyết bài toán tối ưu với đơn nguyên vi mô dạng parabol không đối xứng có cửa mở hình elip (gọi tắt là EOOPT). Theo phân tích hình dạng và kích thước trong quá trình xây dựng kết cấu trong nghiên cứu trước [Lê Văn Lợi và nnk, (2022)], 6 tham số ảnh hưởng của cấu trúc kết cấu đã được chọn lần lượt: bán kính dài, bán kính ngắn, độ lệch, độ sâu và khoảng cách giữa hai hàng kết cấu liền kề theo hướng chu vi và góc phân bố kết cấu. Mục đích của việc tối ưu hóa trong nghiên cứu này là chứng minh bề mặt gối trượt có kết cấu vi mô tốt hơn so với gối trượt không có kết cấu về hiệu suất chịu lực, hiệu suất ma sát và mài mòn và tăng nhiệt độ của màng dầu bôi trơn, do đó, áp suất chịu lực của màng dầu của cặp gối trượt có kết cấu vi mô cao hơn so với cặp gối trượt không có kết cấu, đồng thời hệ số ma sát và độ tăng nhiệt độ của màng dầu của cặp ma sát có kết cấu vi mô nhỏ hơn hệ số ma sát và sự gia tăng nhiệt độ của cặp ma sát không có kết cấu.

2.3.1. Xây dựng và tối ưu đơn nguyên kết cấu vi mô

Đơn nguyên kết cấu vi mô được xây dựng có dạng parabol không đối xứng có cửa mở hình elip (EOOPT- hình 3) và có các thông số hình học chủ yếu bao gồm: a, b- lần lượt là bán kính dài, bán kính ngắn của hình elip; c- độ dịch chuyển (khoảng lệch hay khoảng cách từ đường thẳng nối điểm thấp nhất của parabol tương ứng với độ sâu mặt cắt đường thẳng nối điểm tâm của hình elip), d- chiều sâu cắt lớn nhất. Vì elip dị hướng nên có thể biến đổi thành hình tròn, và parabol không đối xứng có thể biến đổi thành parabol đối xứng, hình tam giác và hình bán nguyệt (những hình cắt này có được trong những nội dung nghiên cứu liên quan), đây có thể tăng không gian tối ưu hóa cho các thông số kết cấu vi mô, và sau đó thu được các thông số

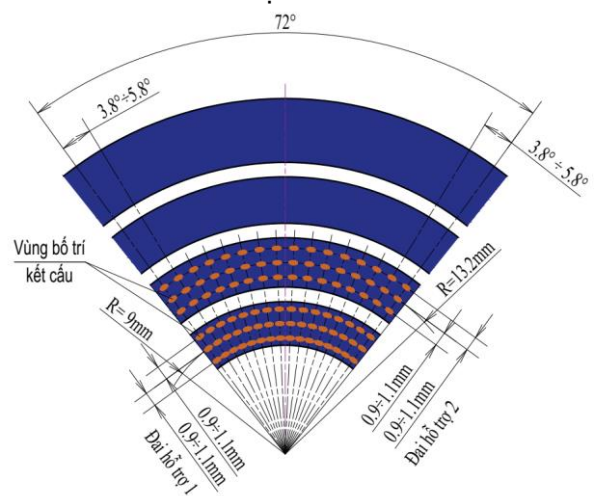
kết cấu vi mô tối ưu nhất liên quan đến hiệu suất của cặp ma sát.



Hình 3. Hình dạng đơn nguyên kết cấu vi mô dạng parabol không đối xứng

a- hình 3D; b- hình chiếu bằng; c- mặt cắt

Căn cứ vào nghiên cứu trước [Lê Văn Lợi và nnk, (2022)], tiến hành nhiều thử nghiệm mô phỏng kiểm tra và kết quả cho thấy, với việc bố trí các vùng kết cấu với mật độ góc 72° phân bố cân đối trên 2 đai hỗ trợ phía trong mặt đáy gối trượt cho màng dầu cặp ma sát có khả năng chịu tải cao nhất, hệ số ma sát và mức tăng nhiệt thấp nhất. Do vậy, trong nghiên cứu này, tác giả chỉ tiến hành mô phỏng theo sơ đồ bố trí kết cấu vi mô trên bề mặt cặp ma sát (hình 4- thể hiện $\frac{1}{4}$ gối trượt), tức gia công trên bề mặt đáy của gối trượt. Để tìm ra các tham số tối ưu tốt hơn, các kích thước khác nhau và phương pháp kết hợp của 6 yếu tố này được nghiên cứu để xác định khả năng chịu tải tối ưu của bề mặt dưới của gối trượt có kết cấu vi mô và mức tăng nhiệt độ của bề mặt đáy của gối trượt có kết cấu EOOPT, 6 biến tham số được đặt thành 5 cấp độ, tiến hành thiết lập mức độ thực nghiệm giá trị (hình 4 và bảng 2) thể hiện bằng mức độ thực nghiệm số với 6 nhân tố và 5 mức độ.



Hình 4. Sơ đồ bố trí kết cấu EOOPT trên 2 đai làm kín

Bảng 2. Mức độ kiểm tra thử nghiệm các tham số kết cấu EOOPT tối ưu

Tham số	Mức độ				
	-2	-1	0	1	2
A-Bán kính dài/ μm	200	250	300	350	400
B-Bán kính ngắn/ μm	90	120	150	180	210
C-Độ lệch / μm	30	35	40	45	50
D-Độ sâu/ μm	35	45	55	65	75
E-Khoảng cách/ μm	900	950	1000	1050	1100
F-Góc phân bố/°	3.8	4.3	4.8	5.3	5.8

Chọn thiết kế thí nghiệm tổ hợp trung tâm (CCD) trong phần mềm Design-Expert để thiết lập và xây dựng phương án thí nghiệm cho bộ dữ liệu mô hình kết cấu 3 chiều từ bảng thí nghiệm 5 mức 6 tham số trên, lựa chọn 40 bộ

tham số thông qua chương trình thiết kế và nhập 40 mô hình với các tham số trên tiến hành từng bước thực hiện phân tích mô phỏng Ansys Flunet và kết quả thu được thông qua phân tích mô phỏng được trình bày trong bảng 3.

Bảng 3. Kết quả mô phỏng phân tích ảnh hưởng tham số kết cấu tối ưu đến tính năng cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng

TT	Tham số kết cấu						Kết quả		
	A (μm)	B (μm)	C (μm)	D (μm)	E (μm)	F (°)	Tải trọng (Pa)	Nhiệt độ TB (°C)	Hệ số ma sát
1	300	150	35	55	1000	4,8	12473571	111,869	0,00369
2	200	90	30	75	900	3,8	12206524	112,786	0,00377
3	200	90	30	35	1100	3,8	12155073	112,997	0,00378
4	400	210	50	35	1100	3,8	12906554	110,624	0,00357
5	300	150	40	55	1000	4,8	12473571	111,869	0,00369
6	200	210	30	35	1100	5,8	12370312	112,529	0,00373
7	200	210	30	75	1100	3,8	12747572	111,580	0,00362
8	400	210	50	35	900	5,8	12669095	111,573	0,00364
9	300	150	40	65	1000	4,8	12492899	111,970	0,00369
10	300	150	40	55	1000	4,8	12473571	111,869	0,00369
11	300	150	40	55	1000	4,8	12473571	111,869	0,00369
12	200	210	30	75	900	5,8	12531518	112,125	0,00368
13	300	120	40	55	1000	4,8	12340201	112,390	0,00373
14	200	90	30	35	900	5,8	12112711	113,113	0,00379
15	400	90	30	75	1100	3,8	12348812	112,648	0,00374
16	300	150	40	45	1000	4,8	12440969	112,165	0,003706
17	400	210	30	35	900	3,8	12950691	110,437	0,00356
18	200	210	50	75	1100	5,8	12511025	112,256	0,00368
19	200	210	50	35	900	3,8	12554034	112,035	0,00367
20	300	150	40	55	950	4,8	12479246	112,040	0,00369
21	400	90	50	75	1100	5,8	12222855	112,604	0,00376
22	300	150	40	55	1000	4,8	12473571	111,869	0,00369
23	400	210	50	75	900	3,8	13167150	109,510	0,0035
24	350	150	40	55	1000	4,8	12673571	111,870	0,00363
25	300	150	45	55	1000	4,8	12467068	112,090	0,00369

26	300	150	40	55	1000	4,8	12473571	111,869	0,00369
27	400	90	50	35	900	3,8	12310859	112,993	0,00386
28	400	210	50	75	1100	5,8	12972571	109,930	0,00356
29	250	150	40	55	1000	4,8	12408834	112,320	0,00371
30	300	180	40	55	1000	4,8	12619466	111,700	0,00365
31	300	150	40	55	1000	5,3	12444064	112,160	0,0037
32	300	150	40	55	1000	4,3	12520486	111,900	0,00368
33	400	210	50	35	900	3,8	12936467	110,559	0,00356
34	200	90	50	75	900	5,8	12134029	113,063	0,00379
35	300	150	40	55	1050	4,8	12468155	112,070	0,00369
36	200	90	50	75	1100	3,8	12188842	112,864	0,00377
37	400	90	30	35	1100	5,8	12193769	112,789	0,00377
38	300	150	40	55	1000	4,8	12473571	111,869	0,00369
39	400	90	30	75	900	5,8	12240893	112,554	0,00375
40	200	90	50	35	1100	5,8	12100618	113,164	0,0038

2.4. Nghiên cứu quy luật ảnh hưởng của các tham số kết cấu đến hiệu suất của cặp ma sát

Từ bảng 2 cho thấy, số liệu tham số đặc trưng của kết cấu bề mặt EOOPT tối ưu đối với tải trọng, nhiệt độ và hệ số ma sát. Để xác định quy luật ảnh hưởng của các tham số đặc trưng khác nhau đến nhiệt độ, khả năng chịu tải và hệ số ma sát, xây dựng đồ thị quan hệ các tham số đặc trưng của kết cấu vi mô đối với tính năng ma sát. Nhận thấy, tồn tại rất nhiều quan hệ giữa các tham số, trong đó sự biến đổi của bán kính dài, bán kính ngắn, độ lệch và độ sâu, mật độ kết cấu

$$\begin{aligned}
 R1 = & 6.731 \times 10^6 - 12855.354A + 4510.074B - 51340.23C + 20746.10D + \\
 & + 9875.18E + 1.960 \times 10^5 F + 9.6517AB - 1.6128AC + 4.0752AD - \\
 & - 0.089796AE - 125.38736AF - 9.822BC + 33.61466BD + 0.46146BE - \\
 & - 598.4288BF + 24.2756CD - 0.76492CE + 87.0805CF - 1.915DE - \\
 & - 428.954DF + 15.50969EF + 22.0212 A^2 - 7.01779B^2 - 633.2C^2 - \\
 & - 192.155D^2 - 4.9796E^2 - 15498.038F^2
 \end{aligned} \tag{13}$$

Sơ đồ phân tích độ tin cậy của mô hình hồi quy đa thức bậc hai tải trọng thu được bằng mô-đun thiết kế được thể hiện trong (hình 5), đường thẳng màu đen là giá trị dự đoán và các hình vuông màu là giá trị thực tế thu được từ thử nghiệm, có thể nhận thấy giá trị dự đoán của hệ thống và giá trị thực tế thu được từ thử nghiệm về cơ bản trùng nhau trên một đường thẳng, từ đó có thể cho biết độ chính xác, mức

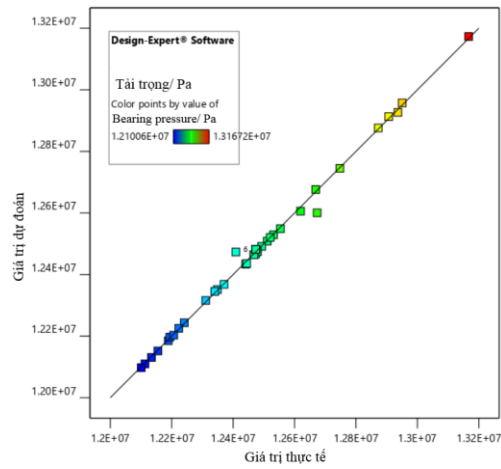
có xu hướng tác động như thế nào, có xuất hiện giao thoa hay không, tức sự tương tác giữa các yếu tố trên đến các mục tiêu như thế nào sẽ được phân tích cụ thể dưới đây.

2.4.1 Quy luật ảnh hưởng của các tham số đến khả năng chịu tải của màng dầu

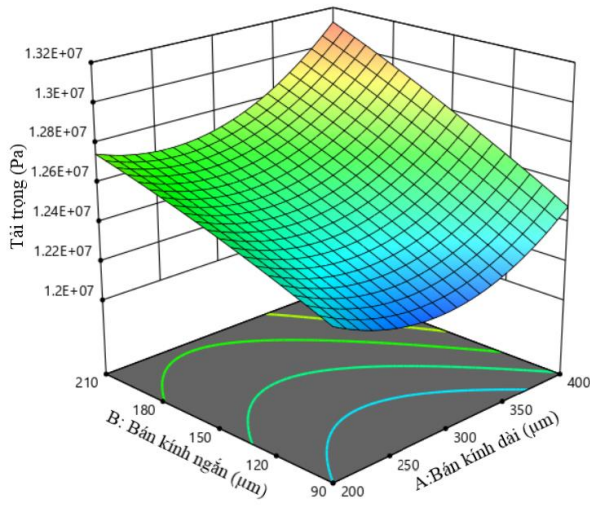
Theo số liệu ở bảng 3, thông qua quá trình phân tích thực nghiệm kết quả trên phần mềm Design-Expert, xây dựng được phương trình hồi quy đa thức bậc hai về sự ảnh hưởng của các tham số khác nhau đối với tải trọng màng dầu cặp gối trượt của bơm piston:

độ phù hợp cao và mô hình xây dựng có độ tin cậy cao.

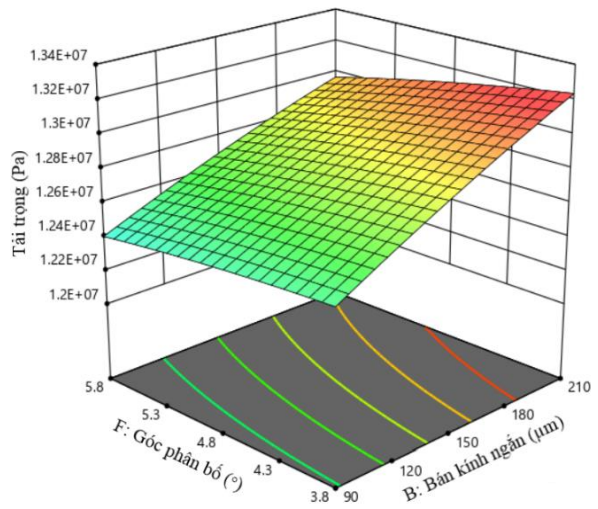
Biểu đồ bề mặt đáp ứng 3D về ảnh hưởng của sự tương tác giữa 6 tham số đến khả năng chịu lực của màng dầu được phân tích trên phần mềm Design Expert, như trong (hình 6).



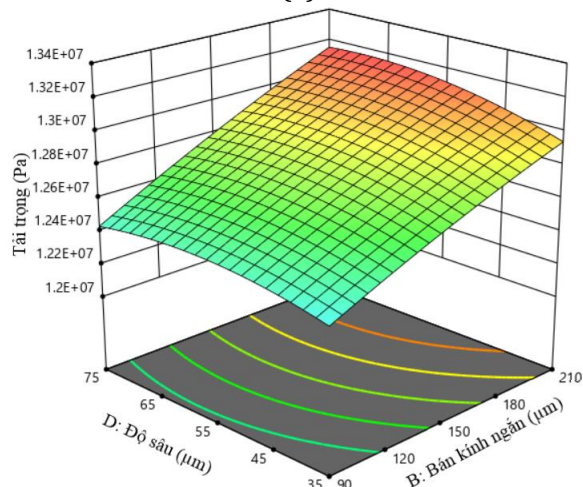
Hình 5. Mối quan hệ so sánh giữa giá trị dự đoán và thực tế của tải trọng



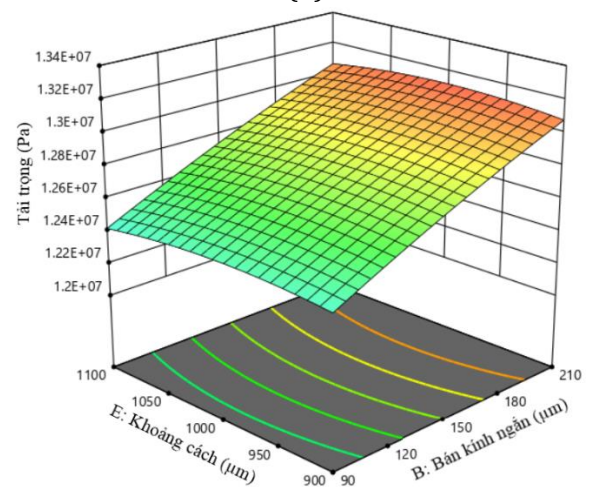
(a)



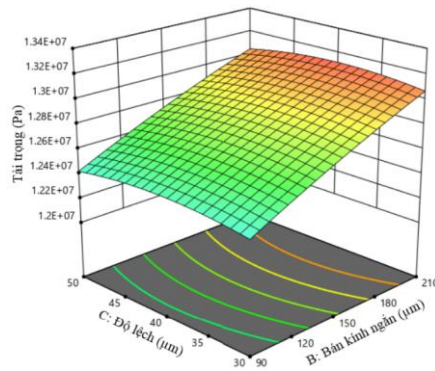
(b)



(c)



(d)



(e)

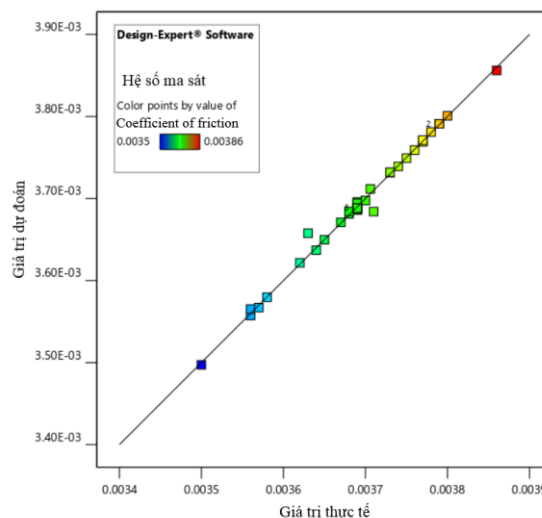
Hình 6. Bề mặt đáp ứng của các tham số kết cấu đối với tải trọng màng dầu

Thông qua mô phỏng và kết quả phân tích mức độ bề mặt đáp ứng trên phần mềm thấy được thứ tự ảnh hưởng của 6 tham số kết cấu đến khả năng chịu tải của màng dầu là: Bán kính ngắn (B) > bán kính dài (A) > góc phân bố kết cấu (F) > độ sâu (D) > khoảng cách kết cấu (E) > độ lệch (C).

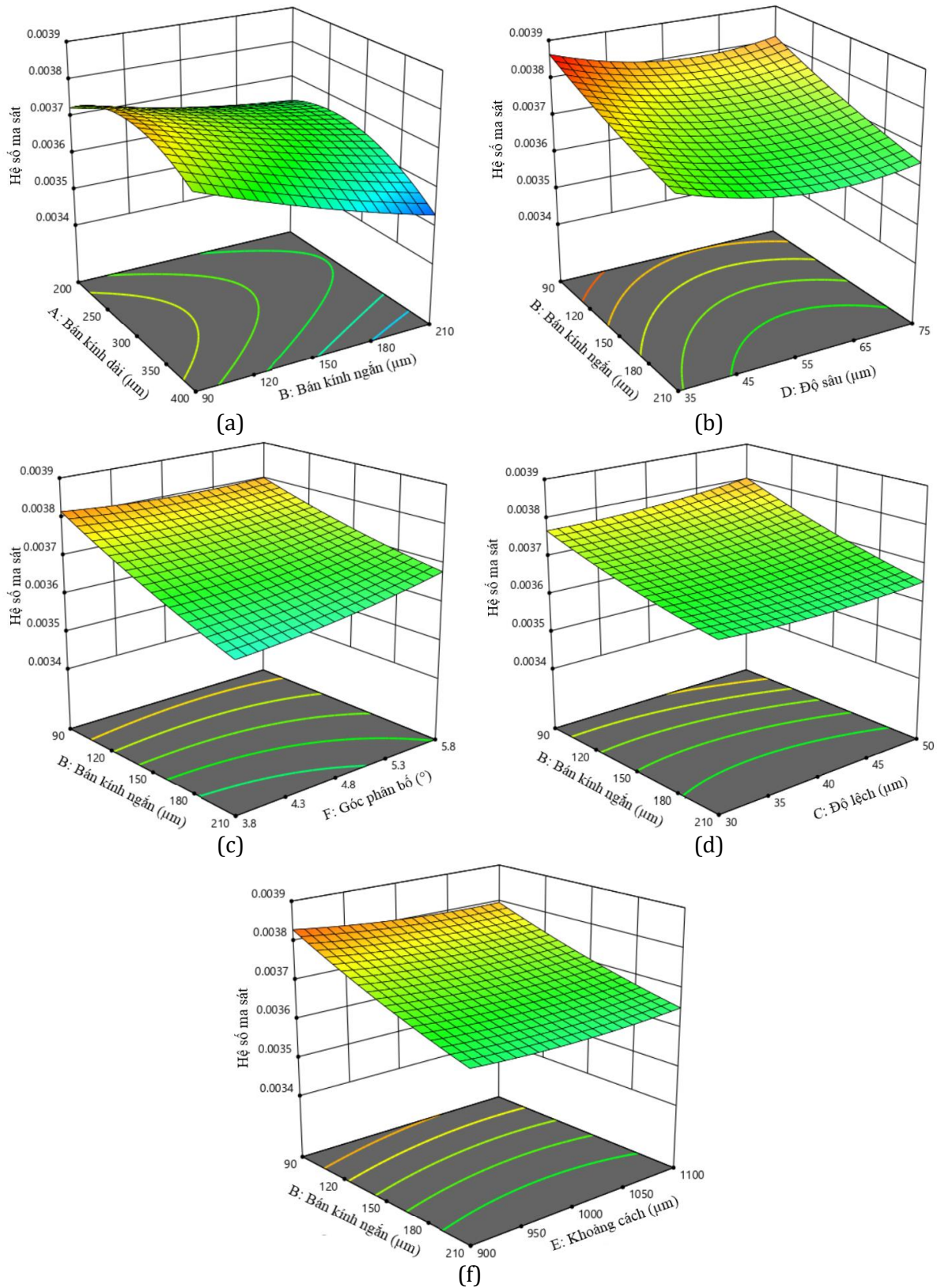
2.4.2 Quy luật ảnh hưởng của các tham số đến hệ số ma sát của màng dầu

Tương tự như trên, phương trình hồi quy đa thức bậc hai về sự ảnh hưởng của các tham số khác nhau đối với hệ số ma sát màng dầu cặp gối trượt của bơm piston:

$$\begin{aligned}
 R2 = & +0.00538 + 4.446 \times 10^{-6} A - 3.261 \times 10^{-6} B - 3.633 \times 10^{-6} C + 12 \times 10^{-6} D - \\
 & - 2.38 \times 10^{-6} E - 149 \times 10^{-6} F - 4.486 \times 10^{-9} AB + 5.392 \times 10^{-10} AC - \\
 & - 1.103 \times 10^{-9} AD + 1.116 \times 10^{-10} AE + 1.116 \times 10^{-8} AF - 1.544 \times 10^{-8} BC - \\
 & - 2.0006 \times 10^{-9} BD + 1.404 \times 10^{-9} BE + 3.486 \times 10^{-7} BF - 1.179 \times 10^{-8} CD - \\
 & - 1.535 \times 10^{-9} CE + 9.6408 \times 10^{-8} CF + 3.5157 \times 10^{-10} DE + 3.515 \times 10^{-8} DF - \\
 & - 1.1949 \times 10^{-9} EF - 6.938 \times 10^{-9} A^2 + 2.948 \times 10^{-9} B^2 + 1.0611 \times 10^{-7} C^2 + \\
 & + 1.0652 \times 10^{-7} D^2 + 1.0611 \times 10^{-9} E^2 + 0.000011F^2
 \end{aligned}
 \tag{14}$$



Hình 7. Mối quan hệ so sánh giữa giá trị dự đoán và thực tế của hệ số ma sát



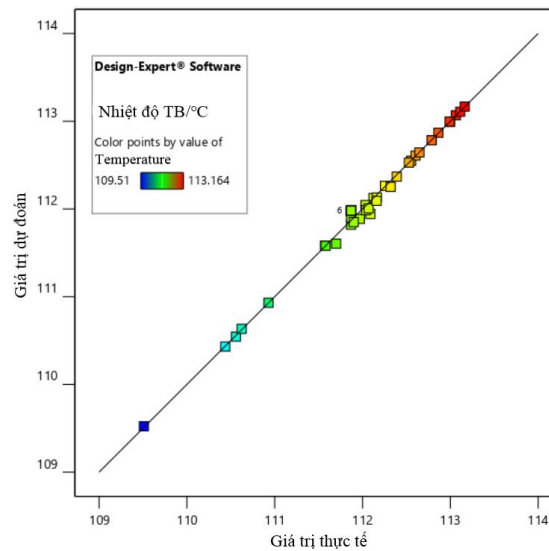
Hình 8. Bề mặt đáp ứng của các tham số kết cấu đối với hệ số ma sát màng dầu

Thông qua mô phỏng và kết quả phân tích mức độ bề mặt đáp ứng trên phần mềm thực nghiệm cho thấy, thứ tự ảnh hưởng của 6 tham số kết cấu đến hệ số ma sát của màng dầu là: Bán kính ngắn (B) > bán kính dài (A) > độ sâu (D) > góc phân bố (F) > độ lệch (C) > khoảng cách kết cấu (E).

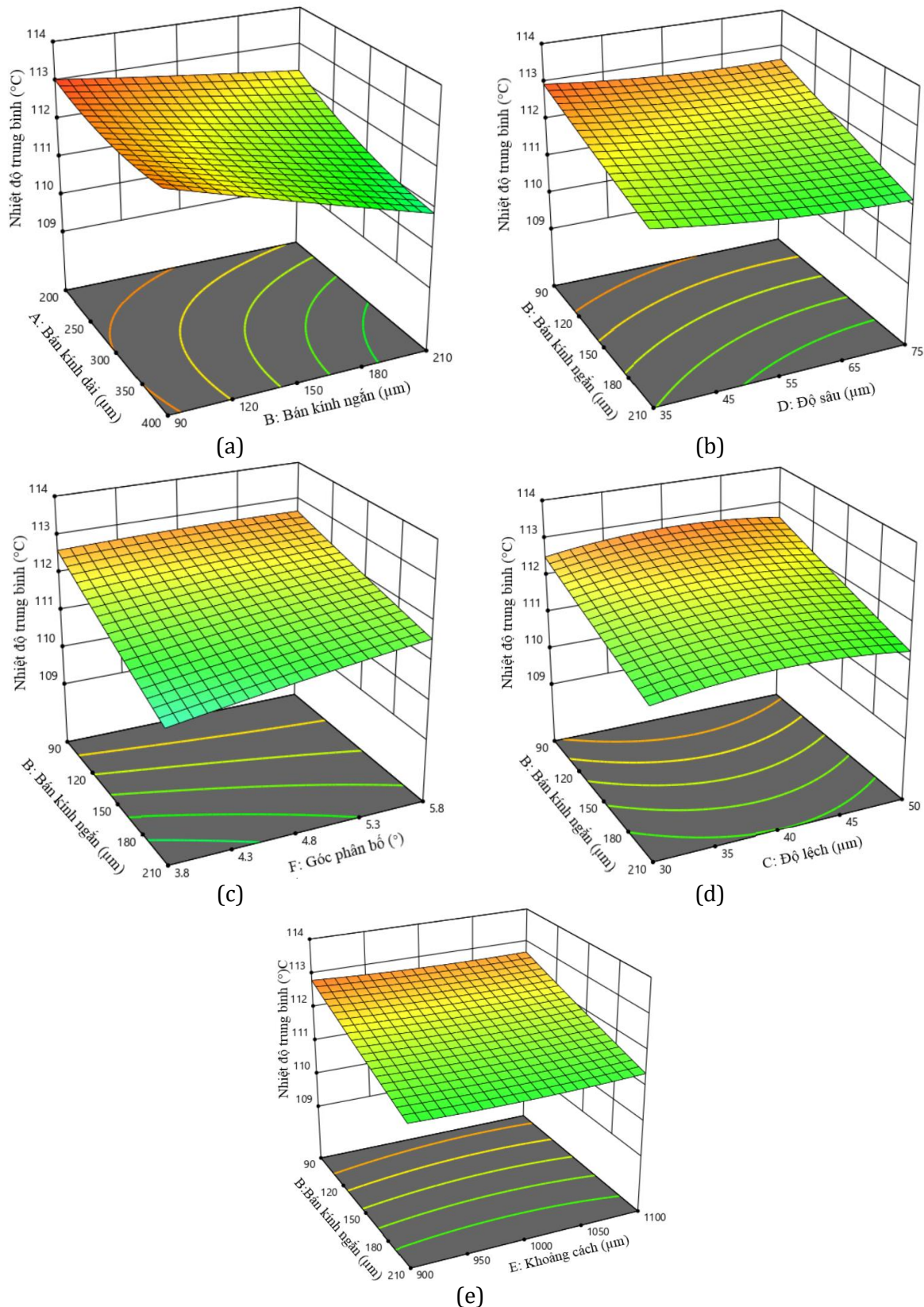
2.4.3 Quy luật ảnh hưởng của các tham số đến nhiệt độ của màng dầu

Tương tự như trên, phương trình hồi quy đa thức bậc hai về sự ảnh hưởng của các tham số khác nhau đối với mức độ gia tăng nhiệt độ màng dầu cặp gối trượt của bơm piston:

$$\begin{aligned}
 R3 = & 118.357 - 0.0123A - 0.0182B + 0.2386C - 0.0508D - 0.0123E + 0.3305F \\
 & - 47 \times 10^{-6} AB - 27 \times 10^{-6} AC - 21 \times 10^{-6} AD + 3 \times 10^{-6} AE + 22 \times 10^{-5} AF - \\
 & - 3 \times 10^{-5} BC - 6 \times 10^{-5} BD + 6.898 \times 10^{-6} BE + 0.003BF - 338 \times 10^{-6} CD - \\
 & - 29 \times 10^{-6} CE + 0.0036CF + 32 \times 10^{-6} DE + 0.001DF - 46 \times 10^{-6} EF + \\
 & + 22 \times 10^{-6} A^2 + 5.799 \times 10^{-6} B^2 - 0.00239C^2 + 0.000277D^2 + 6.087 \times 10^{-4} E^2 \\
 & - 0.039F^2
 \end{aligned} \tag{15}$$



Hình 9. Mối quan hệ so sánh giữa giá trị dự đoán và thực tế của nhiệt độ TB



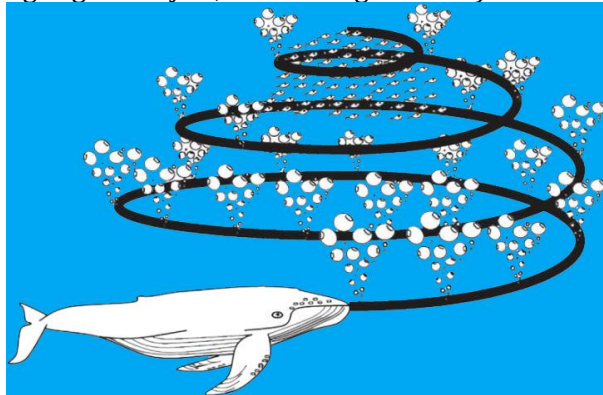
Hình 10. Bề mặt đáp ứng của các tham số kết cấu đối với nhiệt độ màng dầu

Thông qua mô phỏng và kết quả phân tích mức độ bề mặt đáp ứng trên phần mềm thấy được thứ tự ảnh hưởng của 6 tham số kết cấu đến mức độ gia tăng nhiệt độ màng dầu là: bán kính ngắn (B) > bán kính dài (A) > độ sâu (D) > góc phân bố (F) > độ lệch (C) > khoảng cách kết cấu (E).

3. Tối ưu hóa tham số kết cấu dựa trên thuật toán cá voi

3.1. Nguyên lý tối ưu hóa thuật toán cá voi

Năm 2016, Giáo sư Seyedali Mirjalili căn cứ vào quá trình săn mồi của cá voi lưng gù, đã đề xuất một thuật toán tối ưu hóa toàn cục cá voi (WOA) [Mirjalili, S, Lewis, A, 2016], và thể hiện hành vi săn mồi này bằng một phương pháp mô hình toán học bao vây con mồi, kiếm ăn bằng lưới bong bóng xoắn ốc và tìm kiếm con mồi (hình 12). Các hành vi săn mồi của cá voi cũng là yếu tố chính trong giải thuật này, bao gồm: (1-Theo dõi và tiếp cận con mồi; 2-Truy đuổi, bao vây và quấy nhiễu con mồi cho đến khi con mồi ngừng di chuyển; 3-Tấn công con mồi).



Hình 12. Sơ đồ săn mồi bằng lưới bong bóng xoắn ốc của cá voi lưng gù

- **Giai đoạn bao vây con mồi:** sau khi xác định được cá thể tìm kiếm tốt nhất, các cá thể khác sẽ cập nhật vị trí của mình theo cá thể tìm kiếm tốt nhất đó. Hành vi này được thể hiện bởi các biểu thức sau:

$$\bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X}^*(t) - \bar{X}(t)| \quad (16)$$

$$\bar{X}^*(t+1) = \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (17)$$

Với t là vòng lặp hiện tại; \bar{A} và \bar{C} là các

vector hệ số; $\bar{X}^*(t)$ là vector vị trí tốt nhất đạt được; $\bar{X}(t)$ là vector vị trí. Quan trọng ở đây là \bar{X}^* cần được cập nhật trong mỗi $(t+1)$ lần lặp nếu có kết quả tối ưu hơn. Vector \bar{A} và \bar{C} được tính như sau:

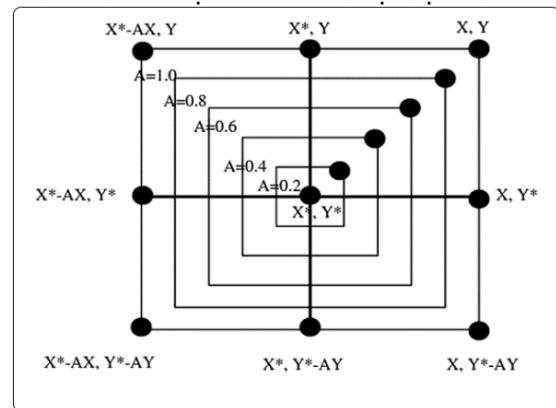
$$\bar{A} = 2a\bar{r} - \bar{a} \quad (18)$$

$$\bar{C} = 2\bar{r} \quad (19)$$

trong đó: \bar{r} là một vector ngẫu nhiên trong khoảng $[0,1]$ và \bar{a} là hệ số chỉ định có độ dài modul giảm tuyến tính từ 2 về 0 trong quá trình tính toán.

- **Giai đoạn săn mồi:** quá trình săn mồi của cá voi lưng gù được thể hiện bằng 2 cơ chế chính:

Cơ chế thu hẹp vòng vây: hành vi này có thể đạt được bằng cách giảm giá trị của a trong phương trình (18). Giá trị của a giảm từ 2 xuống 0 trong quá trình lặp, do đó A sẽ nhận giá trị trong khoảng $[-a; a]$. Chính vì vậy, vị trí mới có thể được định nghĩa bất cứ nơi nào giữa vị trí ban đầu và các vị trí tốt nhất hiện tại.



Hình 13. Vị trí tối ưu trong không gian 2D

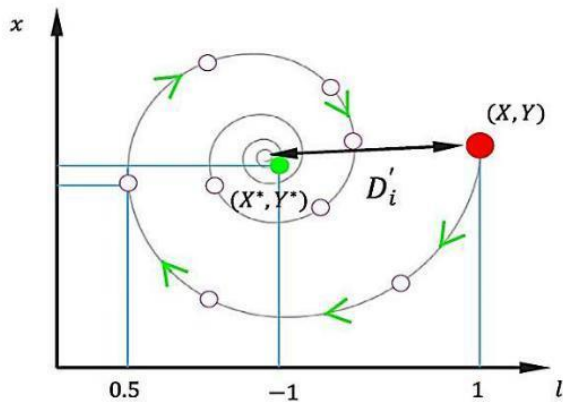
Cơ chế cập nhật vị trí theo hình xoắn ốc: ngoài việc cập nhật vị trí so với con mồi theo quỹ đạo hình tròn, cá voi lưng gù còn tiếp cận con mồi theo quỹ đạo hình xoắn ốc. Phương trình hình xoắn ốc như sau:

$$\bar{X}(t+1) = D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \bar{X}^*(t) \quad (20)$$

$$D' = |\bar{X}^*(t) - \bar{X}(t)| \quad (21)$$

trong đó: D' chỉ ra khoảng cách của con cá voi thứ i tới con mồi; b là hằng số xác định

hình dạng của đường xoắn ốc lô-ga-rít; l là một số ngẫu nhiên nằm trong đoạn $[-1, 1]$.



Hình 14. Cập nhật vị trí theo hình xoắn ốc
Giả định rằng có xác suất 50% cá voi lưng gù sẽ lựa chọn một trong hai cơ chế chuyển động

trình bày ở các biểu thức (16), (17), (20), (21) ta có được:

Phương trình cập nhật vị trí của cá voi lưng gù:

$$\bar{X}(t+1) = \begin{cases} \bar{X}^*(t) - \bar{A}.D & p \leq 0,5 \\ D'.e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \bar{X}^*(t) & p > 0,5 \end{cases} \quad (22)$$

Với p là số ngẫu nhiên nằm trong khoảng $[0; 1]$

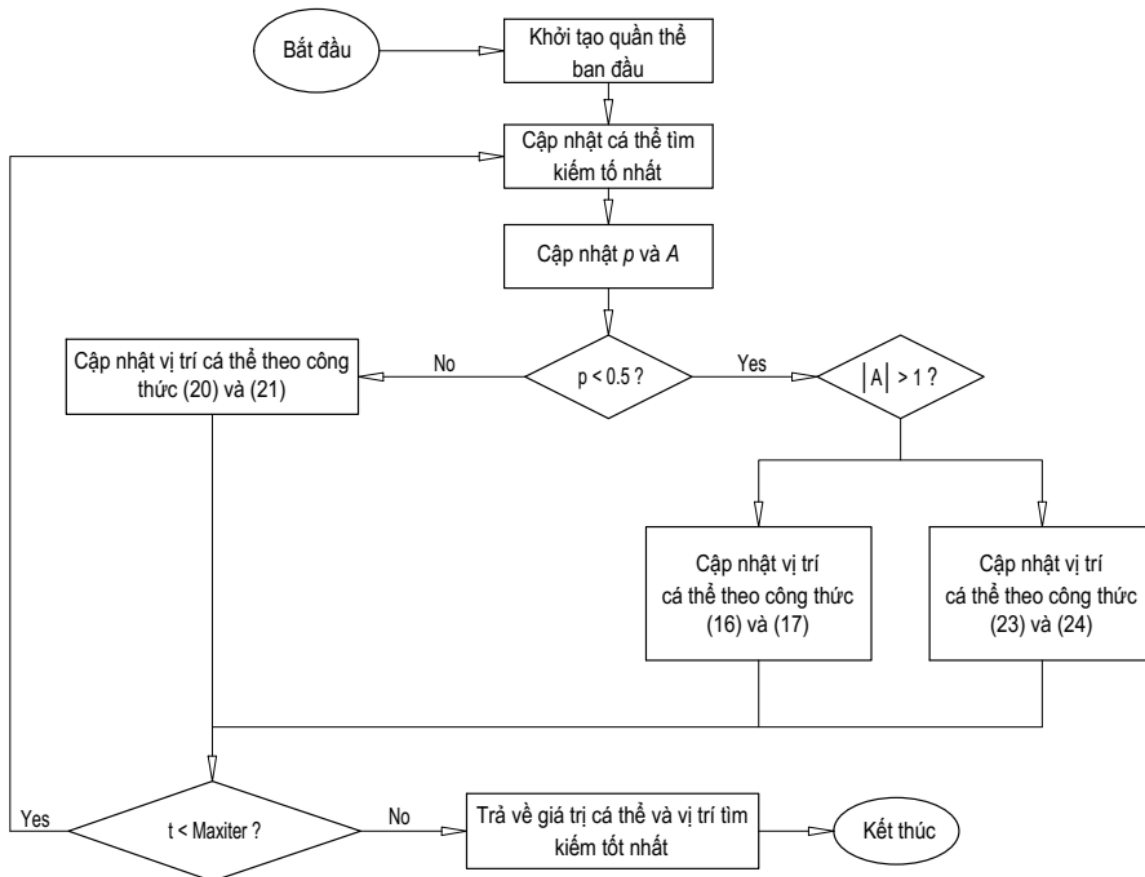
Giai đoạn tấn công con mồi: khi tấn công con mồi, mô hình toán học được thể hiện như sau:

$$\bar{E} = |\bar{C} \cdot \bar{X}_{rand} - \bar{X}| \quad (23)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}_{rand} - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (24)$$

trong đó: \bar{X}_{rand} là một vectơ ngẫu nhiên (cá voi ngẫu nhiên) trong quần thể.

Lưu đồ thuật giải của thuật toán được thể hiện trên hình 15.



Hình 15. Lưu đồ giải thuật của thuật toán tối ưu WOA