

# ẢNH HƯỞNG CỦA VẾT XƯỚC ĐẾN SỰ PHÂN BỐ ÁP SUẤT VÀ NHIỆT ĐỘ TRONG Ổ TRƯỢT ĐỠ THỦY ĐỘNG

## INFLUENCE OF SCRATCHES ON PRESSURE AND TEMPERATURE DISTRIBUTION OF HYDRODYNAMIC JOURNAL BEARING

Võ Trần Anh\*, Đặng Phước Vinh, Lưu Đức Bình, Hoàng Văn Thạnh, Nguyễn Bá Kiên, Nguyễn Phạm Thế Nhân, Tào Quang Bằng

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng<sup>1</sup>

\*Tác giả liên hệ: vtanh@dut.udn.vn

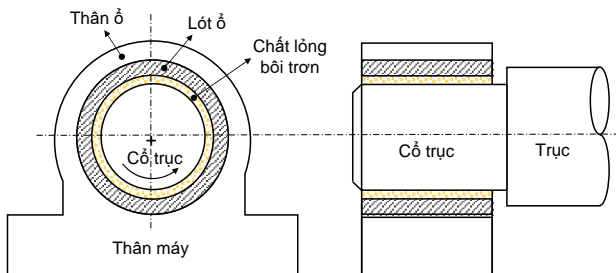
(Nhận bài: 02/2/2023; Chấp nhận đăng: 29/3/2023)

**Tóm tắt** - Xước trong ổ trượt thủy động là một trong những nguyên nhân chính yếu gây ra sự xuống cấp của ổ. Nhiều nghiên cứu bằng thực nghiệm liên quan đến chủ đề này đã được thực hiện, nhưng những nghiên cứu về mô hình số vẫn còn khá ít. Nghiên cứu này sử dụng một mô hình mô phỏng số nhiệt động lực học để nghiên cứu đánh giá chi tiết ảnh hưởng của vết xước đến hai yếu tố làm việc quan trọng nhất trong ổ trượt đờ thủy động, đó là sự phân bố áp suất và nhiệt độ. Vết xước trong nghiên cứu này được đặc trưng bằng ba thông số: Chiều sâu, độ rộng, và vị trí. Kết quả cho thấy, cả ba thông số này đều ảnh hưởng đến sự phân bố áp suất và nhiệt độ bên trong ổ trượt với những mức độ khác nhau: Chiều sâu vết xước có ảnh hưởng lớn, đặc biệt khi vết xước lớn hơn độ lệch tâm tuyệt đối của ổ; Độ rộng vết xước chỉ ảnh hưởng thấy rõ khi nó đủ lớn; vị trí vết xước dường như không ảnh hưởng lớn đến ổ trượt.

**Từ khóa** - Ổ trượt đờ thủy động; xước; mô phỏng nhiệt động lực học; thực nghiệm.

### 1. Giới thiệu

Ổ trượt thủy động là một cụm kết cấu cơ khí rất quan trọng, được dùng để đỡ trục quay và chịu tác dụng của các lực đặt trên trục và truyền các lực này vào thân máy, bệ máy. Hình 1 minh họa kết cấu đơn giản của một bộ ổ trượt đờ. Bộ ổ trượt đờ này bao gồm một trục quay trong ổ trượt. Ổ trượt bao gồm thân ổ và lót ổ; Giữa lót ổ và cổ trục là một lớp màng chất lỏng có tác dụng bôi trơn và ngăn cách cổ trục tiếp xúc trực tiếp với lót ổ khi trục quay. Lót ổ thường được làm từ vật liệu hợp kim mềm có hệ số ma sát thấp như thiếc, Babbitt,... Chất bôi trơn dùng trong các ổ trượt có thể là chất lỏng, khí, hoặc mỡ tùy thuộc vào các ứng dụng khác nhau.



**Hình 1.** Minh họa kết cấu đơn giản của một cụm ổ trượt

Ổ trượt đờ thủy động là một dạng ổ trượt chịu tải trọng

**Abstract** - Scratches on hydrodynamic bearings are one of leading causes of bearing deterioration and reduced bearing life. Although many empirical studies have examined this issue, there are relatively few numerical modeling researches. In this study, a hydrothermodynamic numerical simulation model was employed to gain a better understanding of the impact of scratches on the two main working factors in hydrodynamic journal bearings: Pressure and temperature distribution. Three parameters were used to categorize the scratches: Depth, width, and location. The results demonstrate that, all three parameters have different degrees of influence on the pressure and temperature distribution within the bearing. Specifically, the depth of the scratches was found to have a significant influence, particularly when they exceeded the bearing clearance. The width of the scratches was more noticeable when they were wider, while the location of the scratches was found to have no significant influence.

**Key words** - Hydrodynamic journal bearings; scratches; thermohydrodynamic simulations; experiment

tác dụng hướng tâm đối với đường tâm của trục quay và làm việc trong điều kiện bôi trơn thủy động. Bôi trơn thủy động là một thuật ngữ chỉ trạng thái xảy ra khi hai bề mặt phẳng không song song chuyển động trượt tương đối với nhau, được bôi trơn và ngăn cách bởi một màng mỏng chất lỏng có hình dạng của một cái chêm hội tụ giữa chúng. Áp suất sinh ra trong lớp màng mỏng chất lỏng bôi trơn hình chêm này tạo ra một lực nâng và cũng chính là khả năng tải của lớp chất lỏng bôi trơn. Ổ trượt đờ thủy động có thể dùng để đỡ các trục quay có đường kính rất lớn và vận tốc cao thường thấy trong các tua-bin, máy nén, bơm, v.v. nhờ vào những đặc tính vượt trội của nó như chịu được tải trọng rất lớn, hiệu suất cao, và có tuổi thọ làm việc rất lâu dài mà không đòi hỏi phải bảo trì sửa chữa nhiều. Một ổ trượt thủy động được thiết kế tốt có thể làm việc một cách hiệu quả rất nhiều năm với chi phí bảo trì thấp. Tuy nhiên, khi ổ trục này bị hư hỏng hoặc xuống cấp thì sẽ dẫn đến sự giảm hiệu suất hoạt động một cách nhanh chóng, hậu quả có thể là kéo theo sự hư hỏng của các chi tiết khác trên máy, hoặc phải dừng máy dẫn đến sự gián đoạn của hệ thống đang hoạt động. Các loại hư hỏng chủ yếu trong ổ trượt thủy động thường do ảnh hưởng của các hạt tạp chất lẫn trong chất lỏng bôi trơn gây ra mài mòn, những vết xước, những rãnh nhỏ; ổ bị ăn mòn hóa học; bị cháy bong bề mặt do nhiệt độ làm việc cao; hoặc có thể do nhiều nguyên nhân

<sup>1</sup> The University of Danang – University of Science and Technology (Vo Tran Anh, Dang Phuoc Vinh, Luu Duc Binh, Hoang Van Thanh, Nguyen Ba Kien, Nguyen Pham The Nhan, Tao Quang Bang)

khác nữa. Nguyên nhân gây hư hỏng cho ổ trục thường khó xác định bởi vì sự lắp ráp, liên kết phức tạp của ổ trượt và các chi tiết máy khác trong máy và hệ thống dẫn đến có quá nhiều yếu tố liên quan. Việc phân tích đúng các yếu tố nào gây ra hư hỏng nào là không dễ dàng vì một hư hỏng có thể do nhiều yếu tố kết hợp lại gây ra.

Để giảm thiểu hậu quả gây ra bởi hư hỏng của ổ trục trên máy và hệ thống thì điều quan trọng là phải phát hiện các hư hỏng, tìm và xác định nguyên nhân của nó, và có kế hoạch bảo trì phù hợp (kiểm tra hệ thống, sửa chữa hoặc thay thế các thành phần bị hư hỏng,...). Một cách tiếp cận khác có thể được xem xét đó là dự đoán và phòng ngừa những hư hỏng trước khi chúng xảy ra. Cách tiếp cận này đòi hỏi sự hiểu biết về nguyên lý và hành vi hoạt động phức tạp của ổ trục trong trường hợp phải làm việc ở trạng thái hư hỏng. Nếu biết được khi bị hư hỏng ổ sẽ hoạt động như thế nào, thay đổi gì xảy ra so với khi ổ làm việc với trạng thái không hư hỏng, hiệu suất làm việc sẽ thay đổi thế nào,..., thì người sử dụng sẽ có những điều chỉnh phù hợp về chế độ làm việc của ổ cho phù hợp với trạng thái hiện tại, từ đó sẽ ngăn chặn hoặc giảm thiểu được những tác hại do hư hỏng trong ổ gây ra. Mục đích này có thể đạt được bằng cả mô phỏng số và thực nghiệm. Thực nghiệm thường có độ tin cậy cao hơn nhưng chi phí cho việc tiến hành thực nghiệm sẽ rất cao, đặc biệt đối với những ổ có đường kính lớn (hàng mét), ví dụ như các ổ trục sử dụng hỗ trợ các trục quay rất lớn trong tua bin ở các nhà máy phát điện, nhà máy hạt nhân,... Với lý do đó, mô phỏng số được xem là một lựa chọn phù hợp, giúp giảm thiểu chi phí so với thực nghiệm. Mô phỏng số giúp hiểu được hoạt động của ổ trượt bị hư hỏng khi thay đổi các thông số thiết kế và chế độ làm việc (tải trọng áp dụng, vận tốc, nhiệt độ, hình dạng hư hỏng,...). Mức độ tin cậy của kết quả mô phỏng phụ thuộc vào mức độ tin cậy của quá trình kiểm nghiệm mô hình, và kiểm nghiệm là bắt buộc đối với một mô hình số. Quá trình kiểm nghiệm thường được thực hiện bằng cách so sánh các mô phỏng với kết quả đã được xác thực trước đó, hoặc được thực hiện bằng cách so sánh chúng với các kết quả thực nghiệm. Khi xây dựng được một mô hình số có độ chính xác và tin cậy cao thì nó sẽ rất hữu ích cho việc hiểu được hoạt động của ổ trượt bị hư hỏng, có thể giúp người sử dụng tính toán, mô phỏng, và đánh giá nhiều giả thuyết khác nhau. Hiểu được hoạt động phức tạp của ổ trượt bị hư hỏng có thể giúp người sử dụng phòng ngừa được những hư hỏng tiềm ẩn khác có thể xảy ra, bằng cách hạn chế các điều kiện làm việc như tải trọng áp dụng, tốc độ quay ứng với mỗi mức độ hư hỏng, hoặc quyết định liệu ổ bị hư hỏng vẫn có thể được sử dụng tiếp không hay nên được thay thế,...

Quan sát trong các ứng dụng trong công nghiệp cho thấy, sau một thời gian hoạt động, đặc biệt là trong điều kiện khắc nghiệt (nhiệt độ cao, tải lớn, vận tốc lớn, bôi trơn khó khăn,...) thì ổ trượt thủy động thường bị giảm hiệu suất làm việc do sự xuất hiện của các vết trầy xước, một dạng của mài mòn trong ổ. Các vết trầy xước thường do các hạt tạp chất, bụi bẩn rần nhiễm trong chất lỏng bôi trơn gây ra. Khi trục quay, do lớp chất lỏng bôi trơn rất mỏng nên các hạt rần này có thể cào vào bề mặt của cổ trục và lót ổ gây ra

những vết xước trên cả hai bề mặt; hoặc chúng có thể kẹt lại trên bề mặt lót ổ, và khi trục quay thì chúng cắt vào bề mặt cổ trục như một dao cắt. Vết xước đủ lớn và sâu sẽ làm giảm diện tích bề mặt làm việc của lớp chất lỏng dẫn đến khả năng tải của ổ bị giảm xuống, nhiệt độ làm việc cao lên, hiệu suất làm việc giảm.

Những ảnh hưởng vết xước đến sự hoạt động của ổ trượt là khá lớn và rõ ràng trong thực tế, tuy nhiên những nghiên cứu trong chủ đề này đã không được chú ý nhiều trong một thời gian khá dài. Trước năm 2006, những đánh giá về hư hỏng của ổ trượt thủy động chủ yếu là những đánh giá mang tính định tính. Một trong những nghiên cứu mang tính định lượng đầu tiên về chủ đề này được trình bày vào năm 2006 khi Branagan [1] nghiên cứu ảnh hưởng của vết xước đến hoạt động của ổ trượt đỡ thủy động, dạng ổ trượt ngắn. Nghiên cứu kết luận, chỉ một vết xước hẹp và sâu (rộng bằng 0,1% của chiều rộng ổ trượt, sâu gấp ba lần chiều dày nhỏ nhất của lớp chất lỏng bôi trơn), với giả thiết nó có chiều dài bằng toàn bộ chu vi bề mặt làm việc và nằm tại vị trí giữa ổ theo hướng dọc trục, sẽ làm giảm đến 75% khả năng tải của ổ. Nghiên cứu mặc dù được tiến hành với nhiều sự đơn giản hóa về kích thước và giả định độ nhớt của chất lỏng là đẳng nhiệt hay là không đổi theo nhiệt độ, nó cũng đưa ra những kết quả định lượng quan trọng về sự ảnh hưởng của vết xước trong ổ trượt thủy động. Đến năm 2012, M.B. Dobrica và M. Fillon [2] tiến hành một nghiên cứu sự xuống cấp của ổ trượt đỡ thủy động bị trầy xước dùng phương pháp số. Nhóm tác giả trên nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số hình học của vết xước bao gồm độ sâu, rộng, mật độ, và vị trí vết xước đến quá trình làm việc của ổ trượt thủy động sử dụng mô hình mô phỏng số đẳng nhiệt. Các tác giả kết luận rằng, vết xước càng sâu, càng rộng, và nhiều thì hiệu suất làm việc của ổ trượt càng kém hơn, chiều sâu vết xước có ảnh hưởng lớn đến hoạt động của ổ trượt. Nghiên cứu này cũng sử dụng mô hình đẳng nhiệt đối với độ nhớt của chất lỏng. Giả thuyết này sẽ giúp quá trình tính toán đơn giản, và nhanh hơn rất nhiều so với việc tính toán mà trong đó độ nhớt của chất lỏng biến thiên theo nhiệt độ, dẫn đến độ chính xác có thể sẽ không cao. Năm 2016, nhóm tác giả trong [3] cũng đã nghiên cứu thực nghiệm những ảnh hưởng của sai số gia công đến ổ trượt nhiều mảnh. Năm 2017, trong nghiên cứu [4] Giraudeau đã thực hiện một nghiên cứu thực nghiệm khá đầy đủ về ảnh hưởng của vết xước lên một ổ trượt 2 mảnh. Tiếp sau đó, từ năm 2019 đến 2021, nhiều nỗ lực nghiên cứu thực nghiệm khác về chủ đề này được tiến hành bởi Jean Bouyer và các cộng sự [5], [6] với các giả thiết khác nhau về số mật độ, chiều sâu, và vị trí vết xước. Năm 2020, Ranjan trong [7] tìm thấy những ổ trượt sử dụng trong một nhà máy thủy điện xuất hiện các vết xước và nó làm cho nhiệt độ và rung động của ổ trượt tăng lên đáng kể.

Hầu hết các nghiên cứu kể trên đã xác nhận sự ảnh hưởng rõ ràng của vết xước lên hoạt động của ổ trượt. Tuy nhiên, việc mô hình hóa trực quan sự ảnh hưởng này lại gặp khó khăn. Thêm vào đó, các thí nghiệm được xây dựng theo từng trường hợp nghiên cứu riêng lẻ nên chưa thể hiện được tính tổng quát. Do đó, một mô hình lý thuyết mô phỏng tổng thể là rất cần thiết, giúp có thể mô phỏng trực quan những ảnh hưởng của vết xước trong ổ trượt đỡ thủy

động. Trong năm 2020, Chatterton và cộng sự công bố một nghiên cứu về vết xước trong ổ trượt nhiều mảnh và xác nhận sự xuống cấp của ổ trượt có vết xước bằng cả lý thuyết mô phỏng và thực nghiệm [8]. Gần đây nhất vào năm 2021, Anh. T. Vo và cộng sự đã công bố một mô hình mô phỏng nhiệt thủy động học cho ổ trượt bị xước, có tính toán đến sự biến thiên của độ nhớt chất lỏng theo nhiệt độ tại mỗi điểm trong không gian ba chiều [9-10]. Việc tính toán tuy phức tạp hơn nhiều so với mô hình mà độ nhớt chất lỏng là đẳng nhiệt, nhưng các kết quả mô phỏng sẽ chính xác và sát với thực tế hơn. Mô hình số đã được kiểm chứng với thực nghiệm là có khả năng tính toán và mô phỏng được ổ trượt thủy động có vết xước trên trục. Kết quả mô phỏng về phân bố áp suất và nhiệt độ có sự tương đồng cao với kết quả thực nghiệm.

Nghiên cứu trong bài báo này áp dụng mô hình trong [9-10] để mở rộng phạm vi nghiên cứu về các ảnh hưởng của vết xước lên sự hoạt động của ổ trượt. Bài báo tập trung vào ảnh hưởng của ba thông số chính của vết xước ảnh hưởng đến ổ trượt bao gồm: Độ sâu, độ rộng, và vị trí xét theo phương dọc trục.

## 2. Cơ sở lý thuyết và đối tượng nghiên cứu

### 2.1. Những phương trình cơ bản

- Để tính được sự phân bố áp suất sinh ra trong lớp chất lỏng bôi trơn, ta sử dụng phương trình Reynolds tổng quát áp dụng cho chất lỏng Newton không nén được và ở trạng thái ổn định:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( G \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( G \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \rho U \frac{\partial (J_1 / J_0)}{\partial x} \quad (1)$$

Trong đó:

$$J_n = \int_0^h \frac{y^n}{\mu(x, y, z)} dy \quad (2)$$

$$G(x, z) = \rho \left[ \int_0^h \frac{y^2}{\mu(x, y, z)} dy - \frac{J_1^2(x, z)}{J_0(x, z)} \right] \quad (3)$$

Với  $p$  là áp suất trong chất lỏng,  $U$  là tốc độ quay của trục,  $h$  là chiều dày lớp chất lỏng,  $\mu$  và  $\rho$  lần lượt là độ nhớt và khối lượng riêng của chất lỏng.

- Để tính được nhiệt độ của chất lỏng bôi trơn, ta sử dụng phương trình bảo toàn năng lượng:

$$\rho C_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = K \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Trong đó:  $T$  là nhiệt độ chất lỏng bôi trơn;  $K$  là hệ số truyền nhiệt;  $u, v, w$  lần lượt là vận tốc thành phần của mỗi điểm trong lớp chất lỏng lần lượt theo các phương  $X, Y, Z$ ;  $C_p$  là nhiệt dung riêng của chất lỏng.

- Để tính được nhiệt độ của phần thân ổ, ta sử dụng phương trình truyền nhiệt sau:

$$\frac{\partial^2 T_b}{\partial r_b^2} + \frac{1}{r_b} \frac{\partial T_b}{\partial r_b} + \frac{1}{r_b^2} \frac{\partial^2 T_b}{\partial \theta_b^2} + \frac{\partial^2 T_b}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

Trong đó,  $T_b$  nhiệt độ thân ổ;  $r_b, \theta_b$  là lần lượt là những tọa độ hướng kính, tọa độ góc xét trong hệ tọa độ trụ.

### 2.2. Điều kiện biên

Các phương trình nêu trên được giải với các điều kiện biên dưới đây:

- Áp suất tại tiết diện đầu vào và đầu ra của ổ bằng áp suất bằng áp suất chất lỏng cung cấp  $P_{sup}$ ; Áp suất tại hai mặt bên của ổ bằng áp suất bằng áp suất môi trường xung quanh  $P_{atm}$ .

$$P|_{x=x_{in}} = P_{sup}; \quad P|_{x=x_{out}} = P_{sup}; \quad P|_{z=0, L} = P_{atm} \quad (6)$$

- Tại phần tiếp xúc giữa chất lỏng và mặt trong của ổ, điều kiện biên cho nhiệt độ được tính toán dựa vào điều kiện trao đổi nhiệt liên tục, theo phương trình:

$$K_f \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} = -K_b \frac{\partial T_b}{\partial r} \Big|_{r=r_{b,inner}} \quad (7)$$

Trong đó,  $K_f$  là hệ số truyền nhiệt của chất lỏng,  $K_b$  là hệ số truyền nhiệt của thân ổ.

- Tại bề mặt ngoài của thân ổ, điều kiện trao đổi nhiệt đối lưu của thân với môi trường bên ngoài được áp dụng.

$$K_b \frac{\partial T_b}{\partial r} \Big|_{r=R_l} = -H_{b_{ext}} \left( T_b \Big|_{r=r_{b,outer}} - T_{amb} \right) \quad (8)$$

Trong đó,  $H_{b_{ext}}$  là hệ số trao đổi nhiệt đối lưu của thân ổ và môi trường xung quanh.

- Tại vùng cung cấp dầu, thân ổ trao đổi nhiệt với dầu theo công thức:

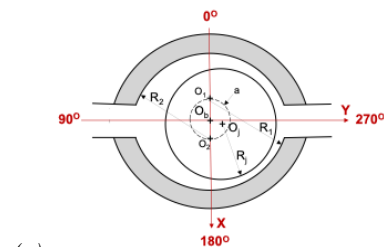
$$K_b \frac{\partial T_b}{\partial r} \Big|_{r=R_l} = -H_{b_{ext}} \left( T_b \Big|_{r=r_{b,outer}} - T_{amb} \right) \quad (9)$$

$$K_b \frac{\partial T_b}{\partial x} \Big|_{x=x_{out}} = -H_{b_{groove}} \left( T_b \Big|_{x=x_{out}} - T_{groove} \right) \quad (10)$$

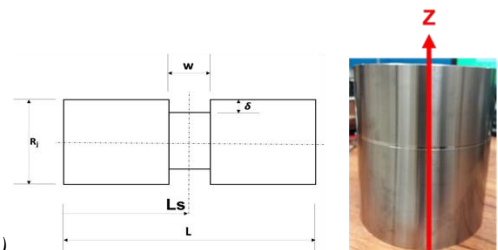
Trong đó,  $H_{b_{groove}}$  là hệ số trao đổi nhiệt đối lưu giữa dầu bôi trơn và thân ổ.

Các phương trình 1, 4, và 5 được rời rạc hoá dùng phương pháp thể tích hữu hạn và sau đó được giải bằng phương pháp lặp, sử dụng ngôn ngữ lập trình Fortran. Chi tiết hơn có thể tìm được trong bài báo của chính tác giả [9].

### 2.3. Hình học ổ trượt và các thông số mô phỏng



(a)



(b)

**Hình 2.** Minh họa ổ trượt và vết xước trên trục  
(a) Ổ trượt thí nghiệm, (b) Thông số hình học vết xước

Hình 2 minh họa ô trượt hai mảnh được nghiên cứu trong bài báo này. Trên trục có một vết xước với 3 thông số đặc trưng: chiều sâu delta  $\delta$ , độ rộng  $w$ , và vị trí vết xước  $L_s$  theo phương dọc trục.

Bảng 1 mô tả các thông số về kích thước hình học và điều kiện vận hành của ô trượt.

**Bảng 1.** Kích thước ô trượt và thông số hoạt động

THÔNG SỐ Ô TRƯỢT	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
<b>Kích thước ô trượt đỡ</b>			
Đường kính cổ trục	$d$	99,908	mm
Đường kính trong của ô	$D$	100,058	mm
Chiều dài ô	$L$	68,4	mm
Góc mỗi mảnh	$\beta$	145	độ
Độ lệch tâm tuyệt đối theo phương ngang	$C$	143	$\mu\text{m}$
Độ lệch tâm tuyệt đối theo phương dọc	$C_b$	68	$\mu\text{m}$
Chiều dày của thân ô	$R_b$	20	mm
<b>Đặc tính của dầu bôi trơn (ISO VG 46):</b>			
Độ nhớt tại 40°C	$\mu_{40}$	0,0416	Pa.s
Độ nhớt tại 60°C	$\mu_{60}$	0,0191	Pa.s
Khối lượng riêng	$\rho$	850	$\text{kg}/\text{m}^3$
Nhiệt dung riêng	$C_p$	2000	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
Hệ số truyền nhiệt	$K_f$	0,13	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
Áp suất bơm dầu vào	$C_{sup}$	0,17	MPa
Nhiệt độ dầu bơm vào	$T_{sup}$	43	°C

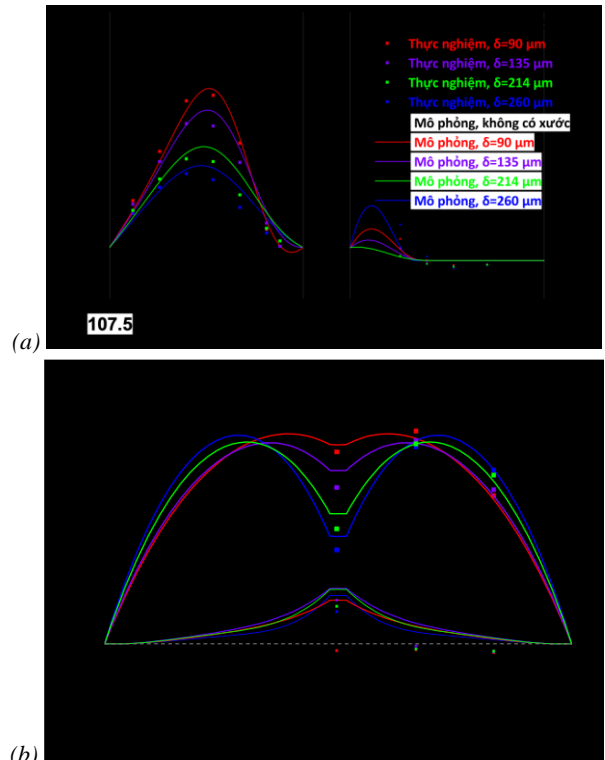
### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Ảnh hưởng của chiều sâu vết xước

Trong phần này, ảnh hưởng của chiều sâu vết xước được nghiên cứu bằng cách mô phỏng sự phân bố áp suất và nhiệt độ trong ô trượt với các giá trị chiều sâu vết xước khác nhau. Ô trượt được nghiên cứu có một vết xước ở vị trí giữa ô trượt theo hướng dọc trục và rộng 2 mm. Điều kiện vận hành của ô trượt được giữ không đổi với giá trị lực đặt vào ô là 6000 N và tốc độ quay của trục là 3500 vòng/phút. Chiều sâu của vết xước được thay đổi với năm giá trị khác nhau: 0 (không có vết xước), 90, 135, 241, và 260  $\mu\text{m}$ . Các giá trị này khi so sánh với độ lệch tâm tuyệt đối theo phương ngang của ô trượt  $C$  thì tương ứng gần bằng với 0; 0,5 $C$ ; 1 $C$ ; 1,5 $C$ ; 2 $C$ . Kết quả mô phỏng được so sánh với kết quả thí nghiệm và được trình bày trong Hình 3 và 4. Thực nghiệm và kết quả được tiến hành và thu thập bởi Yann Alexandre tại viện Pprime Institute, Pháp [6].

Hình 3 a, b so sánh phân bố áp suất trong ô theo hướng chu vi và dọc trục tương ứng. Theo hướng chu vi, kết quả được chọn để so sánh là áp suất tại mặt phẳng ở vị trí giữa ô trượt, cũng chính là ở giữa vết xước. Theo hướng dọc trục, kết quả được chọn để so sánh là tại hai mặt phẳng ở hai góc 185 độ và 225 độ. Dựa vào kết quả thu được, có thể thấy kết quả mô phỏng và thực nghiệm rất trùng khớp nhau theo cả hai mặt là xu hướng và giá trị, với sự chênh lệch lớn nhất ở khoảng 3%. Thêm vào đó, sự khác biệt này dường như không phụ thuộc vào chiều sâu của vết xước và rất nhất quán khi mô phỏng với các giá trị khác nhau của chiều sâu vết xước. Kết quả này có thể xem như một sự

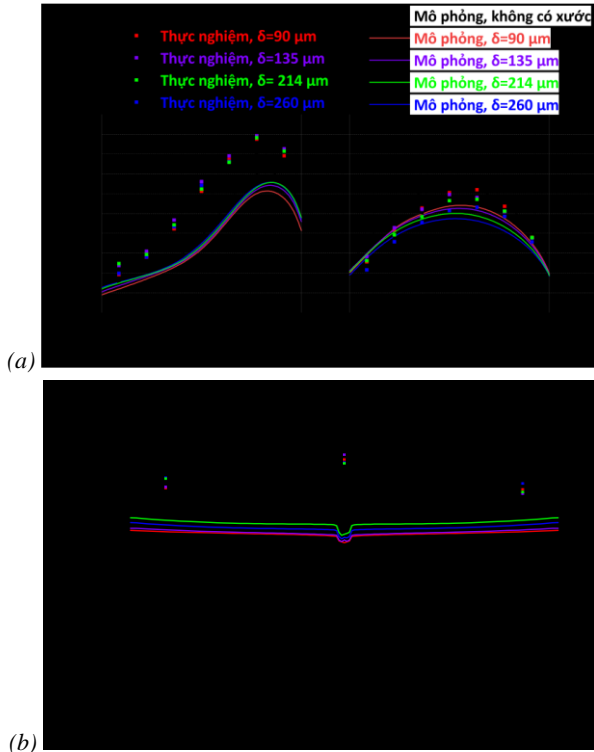
kiểm định về tính chính xác và khả năng mô phỏng của mô hình khi thay đổi thông số chiều sâu vết xước. Cũng từ kết quả này, có thể kết luận bằng cả mô phỏng và thực nghiệm rằng khi chiều sâu vết xước tăng lên thì áp suất trong ô trượt sẽ giảm xuống trong vùng có vết xước. Cụ thể, áp suất lớn nhất trong ô trượt tại vùng vết xước giảm xuống khoảng 25% (từ 2,7 xuống 2 MPa) đối với vết xước sâu 135  $\mu\text{m}$  (~ 0,9 $C$ ), và giảm hơn 50% (từ 2,7 xuống 1,25 MPa) đối với vết xước sâu 260  $\mu\text{m}$  (~ 1,8 $C$ ). Theo hướng dọc trục, phân bố áp suất chỉ bị thay đổi nhẹ khi chiều sâu của vết xước có giá trị nhỏ hơn 1 $C$ , nhưng thay đổi tăng nhanh khi vết xước sâu hơn 1 $C$ .



**Hình 3.** So sánh phân bố áp suất với các vết xước có chiều sâu khác nhau (0, 90, 135, 214, và 260  $\mu\text{m}$ ): (a) xét theo hướng chu vi, tại tiết diện chính giữa ô; (b) xét theo hướng dọc trục, tại các mặt cắt có vị trí góc 185° và 225°

Hình 4 a, b so sánh biên dạng nhiệt độ tại vùng tiếp xúc giữa dầu và lót ô, xét tại mặt phẳng ở giữa ô trượt theo hướng dọc trục. Xét về xu hướng thì mô hình mô tả khá chính xác phân bố nhiệt độ; Xét về giá trị thì có thể thấy có sự khác biệt trong hai mảnh (mảnh trên và mảnh dưới) của ô. Đối với mảnh trên của ô (mảnh ít chịu lực), dữ liệu mô phỏng trùng khớp rất tốt so với giá trị thực nghiệm đo được, với sự chênh lệch trong khoảng 1 đến 3°C. Tuy nhiên, đối với mảnh dưới của ô (mảnh chịu lực chính), sự khác biệt này lớn hơn một ít với độ chênh lệch từ 2 đến 7°C theo cả hướng chu vi (Hình 4a) và dọc trục tại vị trí góc 200° (Hình 4b). Sự khác biệt này được dự đoán là do mô hình hiện tại chưa tính đến ảnh hưởng sự biến dạng cơ học và biến dạng nhiệt của ô, đây là những yếu tố ảnh hưởng khá lớn đến kết quả tính toán. Sự biến dạng này có ảnh hưởng lớn hơn đối với mảnh dưới của ô vì đây là mảnh chịu lực chính và nhiệt độ làm việc của mảnh này thông thường sẽ cao hơn đối với mảnh trên. Do đó, sự khác biệt trong kết quả mô phỏng lớn hơn đối với mảnh dưới của ô.

Xét về ảnh hưởng của chiều sâu vết xước đến nhiệt độ làm việc của ổ, ta có thể thấy, khi chiều sâu vết xước tăng lên, nhiệt độ thay đổi không nhiều. Nhiệt độ tăng lên chỉ khoảng 1 - 2°C đối với mảnh dưới và giảm 1 - 2°C đối với mảnh trên; Kết quả thể hiện trong cả giá trị mô phỏng và thực nghiệm.



**Hình 4.** So sánh phân bố nhiệt độ: (a) theo hướng chu vi, tại tiết diện chính giữa ổ; (b) theo hướng dọc trục, tại góc 200°

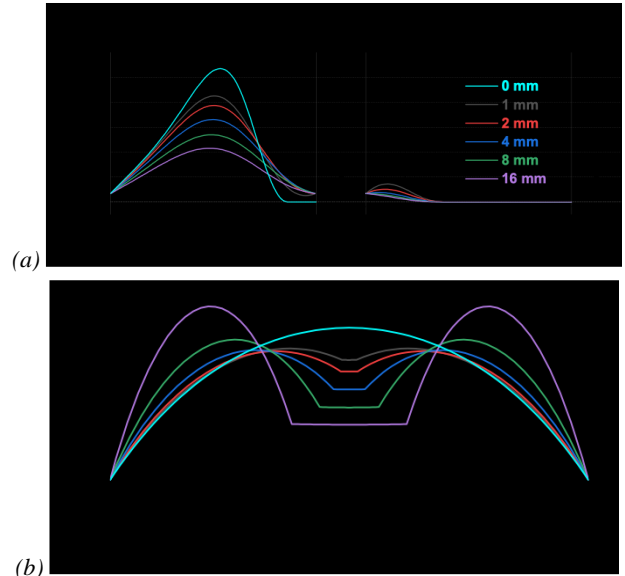
### 3.2. Ảnh hưởng của độ rộng vết xước

Trong phần này, sử dụng mô hình và chương trình tính toán trên để nghiên cứu mô phỏng về ảnh hưởng của chiều rộng vết xước đến phân bố áp suất và nhiệt độ làm việc trong ổ. Ổ trượt được mô phỏng có một vết xước ở vị trí giữa ổ trượt theo hướng dọc trục và sâu 140  $\mu\text{m}$  (1C). Điều kiện vận hành của ổ trượt được giữ không đổi với giá trị lực đặt vào ổ là 6000 N và tốc độ quay của trục là 3500 vòng/phút. Độ rộng của vết xước được thay đổi tăng dần từ 1 đến 16 mm và kết quả được so sánh với trường hợp tham chiếu là ổ không bị xước. Kết quả mô phỏng được biểu diễn trong Hình 5 và Hình 6 tương ứng với sự phân bố áp suất và nhiệt độ trong ổ trượt.

Hình 5 biểu diễn áp suất theo hướng chu vi tại mặt phẳng ở vị trí giữa ổ trượt (Hình 5a) và theo hướng dọc trục tại mặt phẳng có áp suất lớn nhất (Hình 5b). Có thể thấy trong Hình 5a, khi độ rộng vết xước tăng lên thì áp suất trong vùng có vết xước giảm xuống. Áp suất giảm xuống gần 60% trong trường hợp bề rộng vết xước 16 mm so với ổ trượt không bị xước. Hình 5b thể hiện rõ ràng rằng sự thay đổi áp suất theo hướng dọc trục là rất lớn.

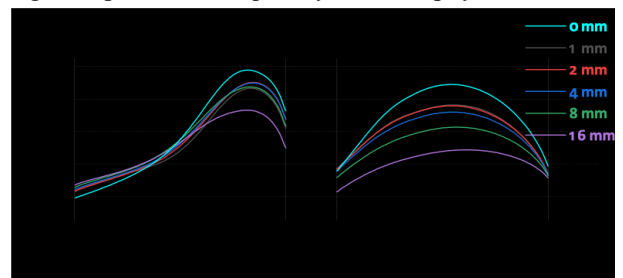
Đối với vết xước hẹp (1 và 2 mm) sự thay đổi về áp suất là không đáng kể; tuy nhiên với những vết xước lớn hơn, phân bố áp suất sẽ thay đổi lớn, cụ thể là áp suất trong vùng bị xước sẽ giảm xuống và áp suất cực đại sẽ tăng lên. Với trường hợp vết xước rộng 16 mm, áp suất cực đại tăng gần

20% so với trường hợp không có vết xước. Điều này có thể được giải thích là do khi chiều rộng vết xước tăng lên thì áp suất trong vùng xước này sẽ giảm xuống, trong khi đó tải trọng tác dụng lên ổ không thay đổi cho nên áp suất phải được tăng lên ở vùng không bị xước để đảm bảo ổ trượt vẫn chịu được tải trọng không đổi đó. Kết quả là áp suất cực đại sẽ tăng lên ở trong vùng phía hai bên vết xước theo hướng dọc trục.



**Hình 5.** So sánh phân bố áp suất với các vết xước có độ rộng khác nhau (0, 1, 2, 4, 8 và 16 mm): (a) xét theo hướng chu vi, tại tiết diện chính giữa ổ; (b) xét theo hướng dọc trục, tại mặt cắt có áp suất lớn nhất

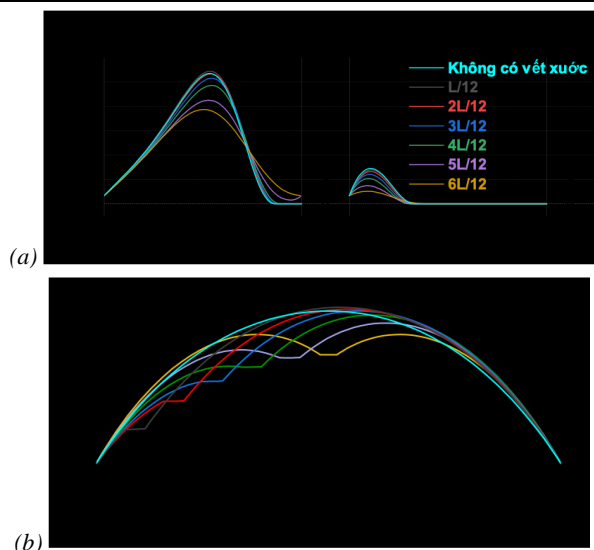
Hình 6 biểu diễn nhiệt độ tại vùng tiếp xúc giữa dầu và lót ổ, theo hướng chu vi tại vị trí đang xét áp suất nêu trên. Có thể thấy, nhiệt độ trong vùng có xu hướng giảm dần khi chiều rộng vết xước tăng lên, ứng với sự giảm xuống tương ứng của áp suất và kết quả này là khá hợp lý.



**Hình 6.** So sánh phân bố nhiệt độ với các vết xước có độ rộng khác nhau (0, 1, 2, 4, 8, và 16 mm), xét theo hướng chu vi, tại tiết diện chính giữa ổ

### 3.3. Ảnh hưởng của vị trí vết xước

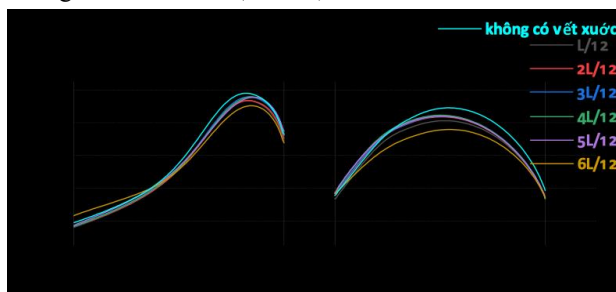
Trong phần này ảnh hưởng của vị trí vết xước sẽ được khảo sát. Ổ trượt được mô phỏng có một vết xước sâu 140  $\mu\text{m}$  (~1C), rộng 2 mm. Điều kiện vận hành của ổ trượt được giữ không đổi với giá trị lực đặt vào ổ là 6000 N và tốc độ quay của trục là 3500 vòng/phút. Vị trí tương đối của vết xước được thay đổi theo hướng dọc trục, từ  $L/12$  đến  $L/2$ , mỗi bước thay đổi  $L/12$  tăng dần, với  $L$  là chiều rộng của ổ. Kết quả mô phỏng được biểu diễn trong Hình 7 và Hình 8 tương ứng với sự phân bố áp suất và nhiệt độ trong ổ.



**Hình 7.** So sánh phân bố áp suất với các vết xước có vị trí khác nhau ( $0, L/12, L/6, L/4, L/3, 5L/12, L/2$ ): (a) xét theo hướng chu vi, tại tiết diện chính giữa ổ; (b) xét theo hướng dọc trục, tại mặt cắt có áp suất lớn nhất

Áp suất trong lớp dầu bôi trơn theo hướng chu vi có xu hướng giảm khi vết xước thay đổi vị trí từ  $L/12$  đến vị trí ở giữa ổ trượt (Hình 7a), trong khi đó theo hướng dọc trục thì áp suất chỉ thay đổi không đáng kể. Điều này có thể giải thích là do khi vị trí của vết xước càng xa vị trí ở giữa ổ trượt thì ảnh hưởng của nó giảm dần do nó nằm trong vùng có áp suất thủy động thấp hơn, vùng áp suất thủy động lớn nằm ở giữa ổ theo phương dọc trục.

Nhiệt độ tại vùng tiếp xúc giữa dầu và lót ổ dường như không bị ảnh hưởng lớn khi thay đổi vị trí vết xước. Nhiệt độ chỉ giảm nhẹ dần khi vết xước di chuyển càng gần vào vị trí giữa của ổ trượt (Hình 8).



**Hình 8.** So sánh phân bố áp suất với các vết xước có vị trí khác nhau ( $0, L/12, L/6, L/4, L/3, 5L/12, L/2$ ) xét theo hướng chu vi, tại tiết diện chính giữa ổ

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu trình bày ảnh hưởng của vết xước đến sự phân bố áp suất và nhiệt độ trong một ổ trượt thủy động bị xước sử dụng một mô hình nhiệt thủy động học. Cụ thể, ba thông số chính của vết xước được nghiên cứu bao gồm: Chiều sâu, độ rộng, và vị trí của xước. Một số kết luận chính được rút ra như sau:

(1) Chiều sâu vết xước ảnh hưởng đáng kể đến hoạt động của ổ đỡ trượt, tùy thuộc vào mức độ: Nếu chiều sâu

vết xước nhỏ hơn  $1C$  thì ảnh hưởng không quá lớn đến áp suất và nhiệt độ trong ổ, nhưng vết xước lớn hơn  $1C$  thì ảnh hưởng rất lớn. Do đó, người sử dụng ổ trượt khi phát hiện vết xước sâu hơn  $1C$  trên ổ thì nên cân nhắc sửa chữa, thay thế ổ, hoặc đơn giản hơn là thay đổi điều kiện vận hành ổ để phù hợp với tình trạng hiện tại của ổ, tránh kéo theo những hư hỏng nghiêm trọng của nhiều bộ phận khác lắp trên máy và hệ thống.

(2) Độ rộng của vết xước cũng làm thay đổi áp suất và nhiệt độ trong ổ đỡ trượt, tuy nhiên ảnh hưởng này chỉ thấy rõ khi vết xước đủ rộng.

(3) Vị trí vết xước không có ảnh hưởng quá lớn đến áp suất và nhiệt độ trong ổ đỡ trượt trong nghiên cứu này. Tuy nhiên vết xước càng xa vị trí giữa ổ theo phương dọc trục thì ảnh hưởng càng nhỏ.

Trong tương lai, những nghiên cứu mở rộng hơn cần được thực hiện trong đó cần cân nhắc đến các yếu tố khác như biến dạng cơ học và biến dạng nhiệt của ổ để kết quả đạt độ chính xác cao hơn.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số T2022-02-03.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lyle Branagan, "Toward a quantitative analysis of journal and bearing scratches Vers une analyse quantitative des rayures dans les paliers", 5th EDF & LMS Poitiers Workshop, May 2006.
- [2] M. B. Dobrica and M. Fillon, "Performance degradation in scratched journal bearings", *Tribol. Int.*, vol. 51, Jul. 2012, pp. 1–10, doi: 10.1016/j.triboint.2012.02.003.
- [3] P. V. Dang, S. Chatterton, P. Pennacchi, A. Vania, and F. Cangioli, "Behavior of Tilting-Pad Journal Bearings With Large Machining Error on Pads", in *Volume 7B: Structures and Dynamics*, Seoul, South Korea, Jun. 2016, p. V07BT31A018. doi: 10.1115/GT2016-56674.
- [4] C. Giraudeau, J. Bouyer, M. Fillon, M. Hélène, and J. Beaurain, "Experimental Study of the Influence of Scratches on the Performance of a Two-Lobe Journal Bearing", *Tribol. Trans.*, vol. 60, no. 5, Sep. 2017, pp. 942–955, doi: 10.1080/10402004.2016.1238528.
- [5] J. Bouyer, M. Fillon, M. Helene, J. Beaurain, and C. Giraudeau, "Behavior of a Two-Lobe Journal Bearing With a Scratched Shaft: Comparison Between Theory and Experiment", *J. Tribol.*, vol. 141, no. 2, Feb. 2019, p. 021702, doi: 10.1115/1.4041363.
- [6] J. Bouyer, Y. Alexandre, and M. Fillon, "Experimental investigation on the influence of a multi-scratched shaft on hydrodynamic journal bearing performance", *Tribol. Int.*, vol. 153, Jan. 2021, p. 106543, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106543.
- [7] R. Ranjan, S. K. Ghosh, and M. Kumar, "Fault diagnosis of journal bearing in a hydropower plant using wear debris, vibration and temperature analysis: A case study", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*, vol. 234, no. 3, Jun. 2020, pp. 235–242, doi: 10.1177/0954408920910290.
- [8] S. Chatterton, P. Pennacchi, A. Vania, M. A. Hassini, and A. Kuczkowiak, "Effect of Scratches on a Tilting-Pad Journal Bearing", in *Volume 10B: Structures and Dynamics*, Virtual, Online, Sep. 2020, p. V10BT29A006. doi: 10.1115/GT2020-14700.
- [9] A. T. Vo, M. Fillon, and J. Bouyer, "Numerical Study of a Journal Bearing with Scratches: Validation with Literature and Comparison with Experimental Data", *Lubricants*, vol. 9, no. 6, Jun. 2021, p. 61, doi: 10.3390/lubricants9060061.
- [10] Vo Tran Anh. *Behavior of scratched hydrodynamic journal bearings: a finite volume numerical analysis*. Diss. Université de Poitiers, 2021.