

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA HÌNH HỌC ỐNG MAO DẪN ĐẾN ÁP SUẤT Ổ THỦY TĨNH BẰNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG SỐ

INVESTIGATING THE INFLUENCE OF CAPILLARY TUBE GEOMETRY ON HYDROSTATIC HEAD PRESSURE USING NUMERICAL SIMULATIONS

Nguyễn Trọng Thanh<sup>1</sup>, Trần Thế Hùng<sup>1</sup>,  
Bùi Tuấn Anh<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Quốc Dũng<sup>2</sup>

DOI: <http://doi.org/10.57001/huic5804.2024.212>

## TÓM TẮT

Cụm trục chính là bộ phận quan trọng trong máy công cụ, chịu trách nhiệm dẫn động và truyền lực cho dao cắt, đồng thời đảm bảo độ chính xác của quá trình gia công. Việc nghiên cứu và phát triển các công nghệ tiên tiến cho cụm trục chính là cần thiết để nâng cao hiệu suất và độ chính xác trong gia công cơ khí. Ổ thủy tĩnh, loại ổ đỡ sử dụng chất lỏng để giảm ma sát và mài mòn, có độ chính xác cao và khả năng chịu tải trọng lớn, được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao. Nghiên cứu này phân tích ảnh hưởng của hình học ống mao dẫn đến áp suất trong ổ thủy tĩnh bằng phương pháp mô phỏng số. Kết quả cho thấy tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm giảm khi tỷ số  $l/d_c$  tăng, và  $\beta$  tăng khi đường kính ống mao dẫn  $d_c$  tăng. Với phạm vi giá trị đường kính mao dẫn từ 0,3mm đến 0,6mm, có thể chọn được tỷ số mao dẫn  $l/d_c$  phù hợp với yêu cầu  $0,4 < \beta < 0,7$ . Cơ chế hình thành màng dầu bằng ống mao dẫn cho thấy các thông số hình học của ống mao dẫn có tác động trực tiếp đến tỷ lệ áp suất giữa buồng dầu và áp suất bơm để đảm bảo điều kiện làm việc, đặc biệt là giới hạn khe hở của ổ. Các cặp giá trị đường kính mao dẫn và tỷ số mao dẫn ( $d_c; l/d_c$ ) tương ứng là (0,3; 33), (0,4; 78), (0,5; 152), (0,6; 200) được xác định là thích hợp để đảm bảo khe hở của ổ trong giới hạn cho phép. Nghiên cứu này góp phần nâng cao hiểu biết về ảnh hưởng của hình học ống mao dẫn đến hiệu suất của ổ thủy tĩnh. Kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng để thiết kế và tối ưu hóa các hệ thống ổ thủy tĩnh hiệu quả hơn, đặc biệt trong các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao như máy mài tròn ngoài.

**Từ khóa:** Cụm trục chính, máy công cụ, ổ thủy tĩnh, thông số hình học ống mao dẫn, mô phỏng số, áp suất.

## ABSTRACT

The spindle unit is a critical component in machine tools, responsible for driving and transmitting power to the cutting tool while ensuring machining accuracy. Research and development of advanced technologies for spindle assemblies are essential to enhance performance and precision in mechanical processing. Hydrostatic bearings, which use liquid to reduce friction and wear, offer high accuracy and load-bearing capacity, and are widely used in applications requiring high precision. This study analyzes the impact of capillary tube geometry on the pressure in hydrostatic bearings using numerical simulation methods. Results indicate that the pressure ratio between the oil chamber and the pump decreases as the  $l/d_c$  ratio increases, and  $\beta$  increases with the capillary tube diameter  $d_c$ . Within the capillary diameter range of 0.3mm to 0.6mm, an appropriate  $l/d_c$  ratio can be selected to meet the requirement of  $0.4 < \beta < 0.7$ . The oil film formation mechanism through capillary tubes shows that the geometric parameters of the capillary tube directly affect the pressure ratio between the oil chamber and the pump, ensuring operational conditions, particularly the bearing clearance limits. The pairs of capillary diameter and capillary ratio ( $d_c; l/d_c$ ) corresponding to (0.3; 33), (0.4; 78), (0.5; 152), (0.6; 200) are identified as suitable to maintain the bearing clearance within permissible limits. This research contributes to a deeper understanding of the influence of capillary tube geometry on the performance of hydrostatic bearings. The findings can be used to design and optimize more efficient hydrostatic bearing systems, especially in high-precision applications such as external cylindrical grinding machines.

**Keywords:** Spindle unit, machine tools, hydrostatic bearing, capillary tube geometry, numerical simulation, pressure.

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

<sup>2</sup>Trường Cao đẳng Công nghiệp Thái Nguyên

\*Email: anh.buituan@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/4/2024

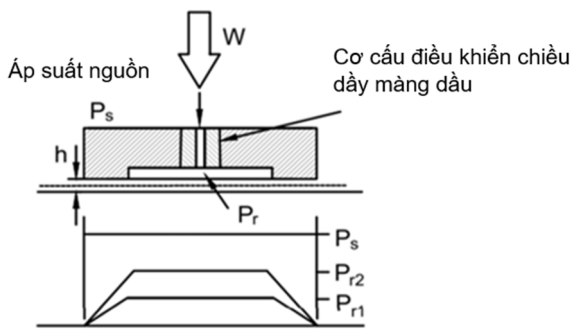
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/6/2024

### 1. GIỚI THIỆU CHUNG

Cụm trục chính trong máy công cụ là một trong những bộ phận quan trọng nhất, quyết định năng suất cắt gọt cũng như chất lượng bề mặt của chi tiết gia công. Ổ trục chính được sử dụng có những yêu cầu khắt khe về khe hở, biến dạng cũng như khả năng chịu tải và duy trì điều kiện làm việc ổn định. Trên thực tế, ổ đỡ trục chính có thể là ổ lăn hoặc ổ trượt, mỗi loại đều có ưu, nhược điểm và phạm vi ứng dụng khác nhau. Đối với các máy công cụ gia công tinh, các loại ổ đỡ trục chính phổ biến phải kể đến là ổ thủy động và ổ thủy tĩnh, với những ưu điểm về khả năng tải cũng như độ ổn định tâm trục cao. Tuy nhiên, để hình thành màng dầu phân tách hoàn toàn giữa trục và bạc, cần thiết phải có kết cấu cũng như chế độ làm việc trong phạm vi cho phép.

Độ cứng vững của cụm trục chính là một chỉ tiêu kỹ thuật quan trọng của máy công cụ. Độ cứng vững càng lớn thì cấp chính xác của máy càng cao, chi tiết gia công càng chính xác. Độ cứng vững cụm ổ trục chính thủy tĩnh không chỉ phụ thuộc vào các thông số hình học của ổ: số buồng dầu, khe hở hướng kính, chiều dài và chiều rộng ổ... mà còn phụ thuộc vào các thông số bôi trơn thủy tĩnh: lưu lượng, áp suất và khe hở ổ thủy tĩnh [1-3]. Trong đó, áp suất nguồn và lưu lượng là một thông số đặc trưng quan trọng của ổ thủy tĩnh. Áp suất và lưu lượng trong buồng dầu có quan hệ tỷ lệ với nhau, do đó cần kiểm soát lưu lượng để áp suất màng dầu tăng hoặc giảm theo tải trọng tác dụng. Lưu lượng dầu cấp vào ổ có thể được điều chỉnh thông qua các cơ cấu điều khiển như ống mao dẫn, van tiết lưu hay vòi phun. Do đó điều chỉnh lưu lượng dầu vào sẽ điều chỉnh được chiều dày màng dầu trong ổ thủy tĩnh hay vị trí tâm trục. Hình 1 thể hiện nguyên tắc điều khiển chiều dày màng dầu cũng như phân bố áp suất trong ổ thủy tĩnh.



Hình 1. Ảnh hưởng của cơ cấu điều khiển lưu lượng tới áp suất buồng dầu [3]

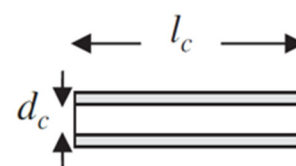
$p_s$  - Áp suất nguồn dầu cấp vào ổ;  $p_r$  - Áp suất thực trong buồng dầu;  $p_{r1}, p_{r2}$  - Áp suất thực trong buồng dầu ở chế độ tải trọng nhỏ/lớn;  $h$  - Chiều dày màng dầu;  $W$  - Tải trọng đặt lên trục.

Cơ cấu điều khiển chiều dày màng dầu bằng ống mao dẫn được sử dụng phổ biến do tính gia công đơn giản và chi phí tương đối rẻ. Ống mao dẫn được chế tạo bằng một số biện pháp phổ biến như sử dụng ống mao dẫn có kích thước tiêu chuẩn được gia công sẵn có đường kính lỗ/ chiều dài phù hợp hoặc gia công tia lửa điện EDM tạo lỗ sâu trên thành bạc ổ kết nối với buồng dầu. Với cơ cấu điều khiển này độ cứng màng

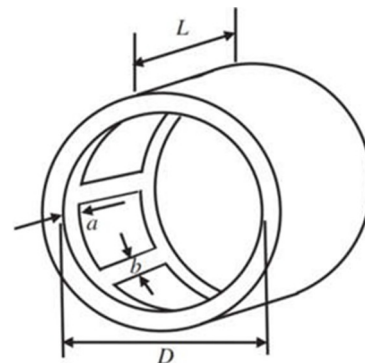
dầu tuyến tính hơn trong phạm vi tải trọng và có độ ổn định cao, độ cứng vững màng dầu không phụ thuộc vào độ nhớt và nhiệt độ của dầu bôi trơn. Một số nghiên cứu thiết kế ổ thủy tĩnh thay thế cho các dạng ổ đỡ khác trên trục chính của máy công cụ như nghiên cứu của He Qiang và cộng sự đã đề xuất việc thay thế ổ lăn bằng ổ đỡ thủy tĩnh [4], hay nghiên cứu của nhóm tác giả Phạm Văn Hùng và cộng sự đã đề xuất giải pháp thiết kế ổ thủy tĩnh thay thế cho ổ thủy động trên trục chính máy mài tròn ngoài 3K12 [5]. Năm 2014, W. Chen và cộng sự đã trình bày một hệ thống thiết kế mới cho trục chính thủy tĩnh, tích hợp phân tích phần tử hữu hạn để tối ưu hóa hiệu suất làm việc. Hệ thống này không chỉ phân tích và xác định độ cứng vững và nhiệt độ tăng của ổ đỡ thủy tĩnh mà còn tối ưu hóa hiệu suất động của nó, đảm bảo độ chính xác cao trong các công cụ gia công siêu chính xác [6]. Ngoài ra, các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng làm việc của ổ cũng như cụm trục chính phải kể đến dầu bôi trơn. Dầu phải được lựa chọn phù hợp với điều kiện làm việc cũng như đảm bảo điều kiện làm việc ổn định dưới tác động của nhiệt độ... [7-11]. Mặt khác, các hệ thống thí nghiệm để đánh giá các đặc tính của ổ trục chính cũng cần được nghiên cứu và đề xuất. Nghiên cứu của S. Uberti và cộng sự đã trình bày thiết kế và phát triển một hệ thống kiểm tra chuyên dụng để đánh giá ổ đỡ thủy tĩnh trong trục chính dưới các điều kiện thử nghiệm khác nhau [12].

Do vậy, việc nghiên cứu ảnh hưởng của hình học ống mao dẫn đến áp suất ổ thủy tĩnh bằng phương pháp mô phỏng số không chỉ mang lại những hiểu biết sâu sắc về lý thuyết và ứng dụng, mà còn mở ra những cơ hội mới trong việc phát triển và cải tiến các hệ thống kỹ thuật liên quan. Đây chính là nhiệm vụ mà bài báo này đang hướng tới, góp phần nâng cao hiệu quả và độ chính xác của các hệ thống ổ thủy tĩnh trong các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao.

### 2. CÁC THÔNG SỐ HÌNH HỌC ỐNG MAO DẪN TRONG Ổ THỦY TĨNH



Hình 2. Thông số hình học ống mao dẫn [3]



Hình 3. Sơ đồ kết cấu ổ thủy tĩnh không có rãnh thoát dầu [3]

Hình 2 mô tả các thông số hình học của ống mao dẫn, bao gồm  $d_c$  và  $l_c$ . Ngoài ra, các thông số cơ bản của ổ thủy tĩnh cũng được mô tả trên hình 3.

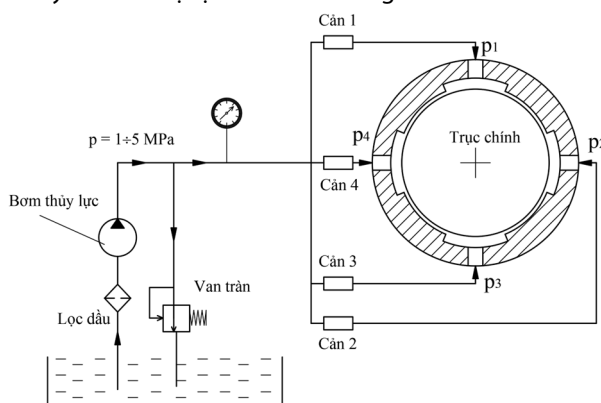
Cụm ổ thủy tĩnh trục chính máy mài tròn ngoài với kết cấu có 4 buồng dầu và không có rãnh thoát dầu. Cụm ổ trục chính thủy tĩnh làm việc dựa vào áp suất dầu bên ngoài đủ để nâng trục và đảm bảo bôi trơn ướt giữa trục và bạc. Cụm ổ thủy tĩnh có áp suất không đổi có sơ đồ và nguyên lý làm việc được thể hiện trong hình 4. Bơm dầu tạo ra áp suất dầu nhất định ( $p_s$ ) và bơm vào trong buồng dầu với áp suất ( $p_r$ ) lưu lượng dầu chảy vào buồng dầu được điều khiển bởi ống mao dẫn sao cho đảm bảo ổn định chiều dày màng dầu trong ổ. Khi kể đến trọng lượng của trục, tải ngoài ( $P$ ) và diện tích hữu ích của buồng dầu là  $F$  với độ lệch tâm là  $e$ , có phương trình cân bằng lực:

$$W = (p_3 - p_1) \cdot F \tag{1}$$

Trong đó:  $F$ : Diện tích hữu ích của buồng dầu;  $p_1, p_3$ : Áp suất buồng dầu;

$$W = P + Q, Q: \text{Trọng lượng trục.}$$

Trên thực tế với cụm ổ thủy tĩnh trục chính và giả thiết của Reynold thì độ lệch tâm  $e$  thường rất nhỏ.



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý bôi trơn thủy tĩnh cụm trục chính máy mài tròn ngoài 3K12 [1]

### 3. ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ MAO DẪN ĐẾN ÁP SUẤT Ổ THỦY TÍNH

Như đã trình bày ở phần trên, các thông số hình học ống mao dẫn trong ổ thủy tĩnh của trục chính máy công cụ bao gồm  $l_c$  và  $d_c$ . Trên thực tế, để hình thành hiện tượng mao dẫn, tỉ lệ  $l_c/d_c$  cần được kiểm soát chặt chẽ. Ở nghiên cứu này, ảnh hưởng của tỉ lệ  $l_c/d_c$  đến áp suất ổ thủy tĩnh được phân tích kỹ lưỡng trên cơ sở kết quả mô phỏng số. Trong đó, tỉ số áp suất dầu buồng dầu với áp suất bơm  $\beta$  sẽ là đại lượng đặc trưng cho áp suất ổ thủy tĩnh trong nghiên cứu này.

Cơ cấu điều khiển lưu lượng dạng mao dẫn sẽ tạo ra dòng chảy tầng của chất bôi trơn vào trong buồng dầu. Các thông số hình học của ống mao dẫn bao gồm chiều dài mao dẫn  $l_c$  và đường kính mao dẫn  $d_c$  là hai thông số quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến hệ số mao dẫn  $K_c$  và tỉ số áp lực dầu buồng dầu với áp lực bơm thể hiện qua công thức:

$$\beta = \frac{p_r}{p_s} = \frac{1}{(1 + B_n K_c h^3)} \tag{2}$$

Trong đó:

$B_n$  - Hệ số ảnh hưởng của biên dạng ổ tới lưu lượng dầu, với ổ đỡ không có rãnh thoát dầu dọc trục:  $B_n = \frac{\pi D}{6a}$ ;  $K_c$  - Hệ

số mao dẫn:  $K_c = \frac{128 l_c}{\pi d_c^4}$ ;  $a$  - Chiều rộng mép ổ (mm);

$D$  - Đường kính trong bạc (mm);  $d_c$  - Đường kính ống mao dẫn;  $l_c$  - Chiều dài ống mao dẫn;  $h$  - Chiều dày màng dầu.

Khi thay đổi thông số hình học  $l_c/d_c$  của ống mao dẫn sẽ thay đổi tỉ số áp lực dầu buồng dầu với áp lực bơm  $\beta$  dẫn đến thay đổi độ cứng vững màng dầu. Để đảm bảo khả năng chịu tải của ổ trục chính thủy tĩnh máy mài tròn ngoài, giới hạn dưới của khe hở  $h_o(L) = 15\mu m$  và khe hở giới hạn trên là  $h_o(U) = 22,5\mu m$ . Theo kinh nghiệm áp suất dầu cấp  $p_s$  vào trong phạm vi  $3 \div 5 MPa$  để hạn chế các biến dạng nhiệt trong ổ.

Thông thường để hình thành mao dẫn dầu, các thông số hình học  $d_c$  thay đổi trong khoảng 0,1 - 1mm và tỉ số  $l_c/d_c$  trong khoảng từ 20 - 200 [2] thì tỉ số áp suất  $\beta$  sẽ thay đổi như thế nào và cần được phân tích kỹ lưỡng. Ở trạng thái ổn định chiều dày màng dầu bằng khe hở giới hạn  $h = h_o$ . Để khảo sát đặc tính làm việc của ổ thủy tĩnh theo thông số hình học ống mao dẫn, từ công thức tỉ số giữa áp suất buồng dầu và áp suất bơm, sau khi thay các hệ số ảnh hưởng của biên dạng ổ tới lưu lượng dầu  $B_n$  và hệ số mao dẫn  $K_c$  và biến đổi về biến số  $l_c/d_c$  ta được:

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{64 \cdot D \cdot h_o^3}{3a \cdot d_c^3} \left( \frac{l_c}{d_c} \right)} \tag{3}$$

Trên cơ sở đó, bài toán mô phỏng được thực hiện trên phần mềm Matlab để đánh giá ảnh hưởng của các thông số hình học ống mao dẫn đến tỉ lệ áp suất buồng dầu và áp suất bơm.

### 4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Có thể thấy tỉ số giữa áp suất buồng dầu và áp suất bơm phụ thuộc vào thông số hình học ống mao dẫn và khe hở giới hạn. Khi tỉ số  $l_c/d_c$  tăng hoặc khe hở giới hạn  $h_o$  tăng đều làm giảm  $\beta$  và ngược lại,  $\beta$  lại tăng khi đường kính ống mao dẫn tăng lên thể hiện qua các hình 5 - 14, tương ứng với đường kính ống mao dẫn từ 0,1mm đến 1mm.

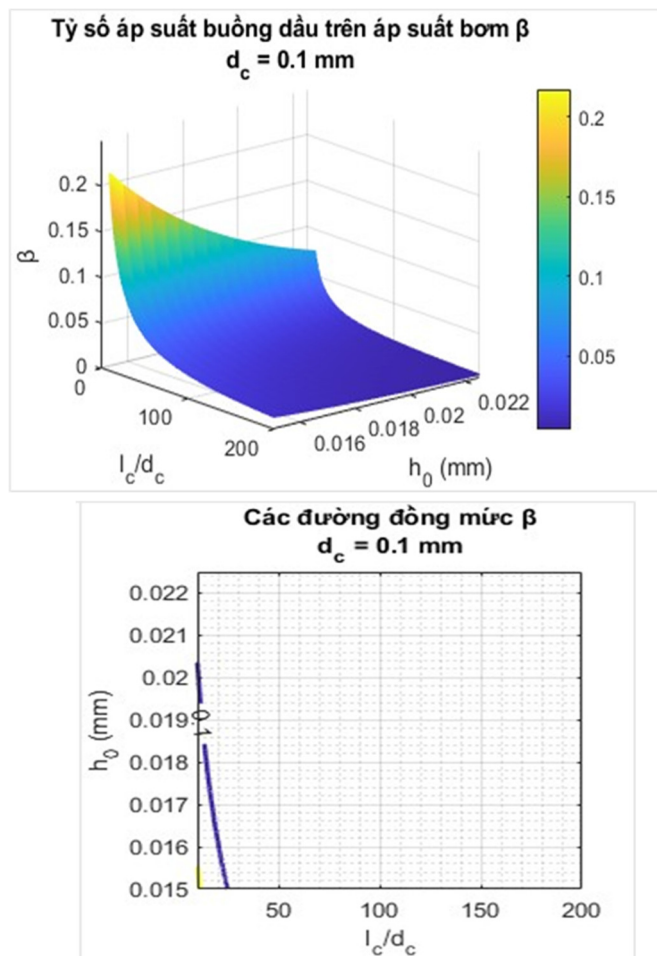
Nhìn chung có thể thấy, khi khe hở nhỏ, ống mao dẫn kiểm soát dòng chảy của dầu vào khe hở ổ trục dẫn đến hạn chế lưu lượng dầu chảy ra ngoài làm tích tụ áp suất cao trong buồng dầu qua đó làm tỉ số  $\beta$  tăng lên. Sự tăng áp suất này cũng dẫn đến độ cứng của màng dầu cao hơn. Ở cùng giá trị khe hở, khi đường kính ống mao dẫn tăng, tiết diện ống dẫn tăng làm tăng lưu lượng dầu chảy qua dẫn đến áp suất trong buồng dầu cao hơn theo đường kính mao dẫn cao hơn. Trong bài toán mô phỏng này, kết quả cho thấy khi tăng tỉ số  $l_c/d_c$ , việc giảm áp suất buồng dầu trên áp suất bơm làm giảm khả năng duy trì áp suất cao trong buồng dầu, do đó  $\beta$  giảm. Tuy nhiên, với đường kính ống mao dẫn lớn hơn, tiết diện tăng dẫn đến tăng lưu lượng dầu và do đó áp suất

buồng dầu cũng tăng lên, làm  $\beta$  tăng. Điều này cho thấy tầm quan trọng của việc lựa chọn kích thước ống mao dẫn phù hợp để đạt được tỷ số  $\beta$  tối ưu. Cụ thể trong nghiên cứu này, dựa trên cơ sở đường đồng mức thì miền giá trị của  $\beta$  sẽ tăng dần lên theo đường kính mao dẫn tăng lên, với miền khảo sát  $l_c/d_c$  trong khoảng từ 20 - 200, điều này được thể hiện ở bảng 1.

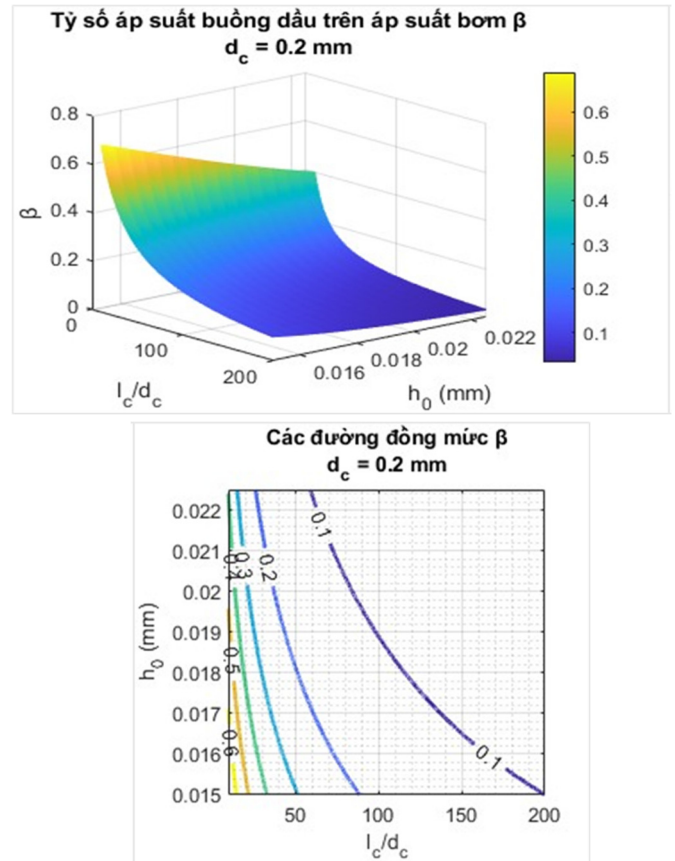
Bảng 1. Miền giá trị  $\beta$  khi  $d_c = 0,1 - 1$ ;  $l_c/d_c = 20 - 200$ ;  $h_0 = 15 - 22,5\mu\text{m}$

$d_c$ (mm)	Miền giá trị $\beta$
0,1	0 - 0,12
0,2	0,03 - 0,53
0,3	0,10 - 0,79
0,4	0,21 - 0,90
0,5	0,34 - 0,95
0,6	0,47 - 0,97
0,7	0,59 - 0,98
0,8	0,68 - 0,99
0,9	0,75 - 0,99
1	0,80 - 0,99

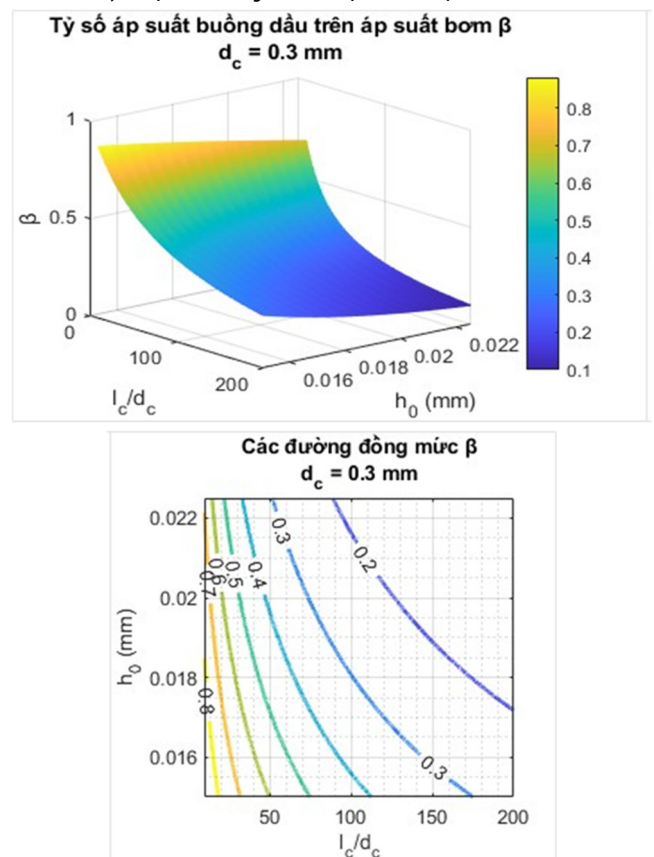
Có thể thấy, ở mọi giá trị khe hở, khi giá trị  $d_c < 0,3$  thì tỷ số  $\beta$  luôn  $< 0,5$  và ở giá trị  $d_c > 0,6$  thì tỷ số  $\beta$  luôn  $> 0,6$ .



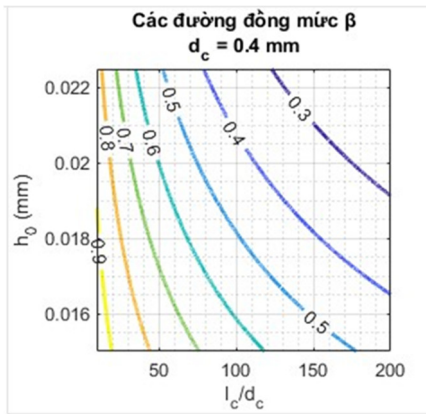
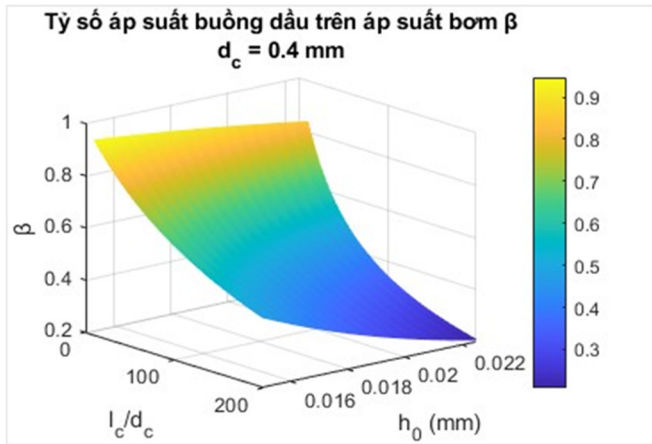
Hình 5. Tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm  $\beta$ , khi  $d_c = 0,1\text{ mm}$



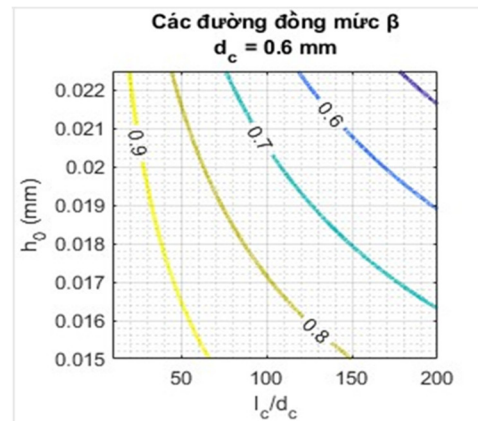
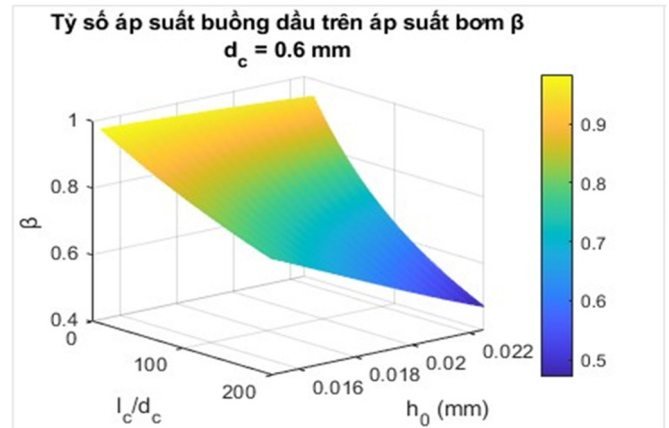
Hình 6. Tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm  $\beta$ , khi  $d_c = 0,2\text{ mm}$



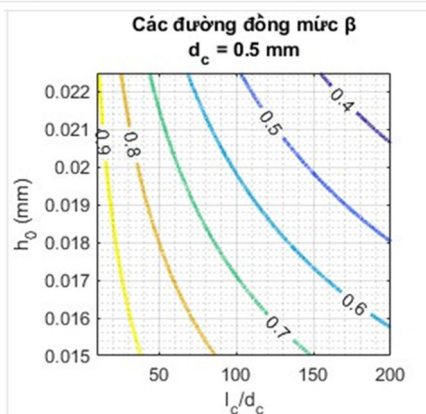
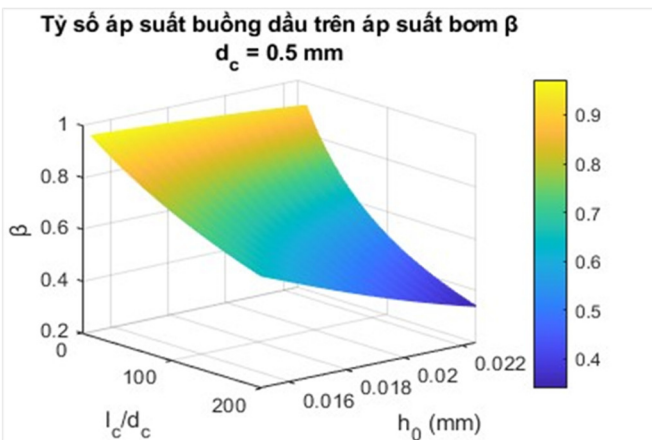
Hình 7. Tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm  $\beta$ , khi  $d_c = 0,3\text{ mm}$



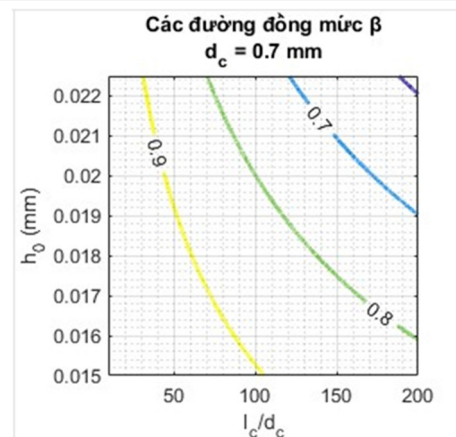
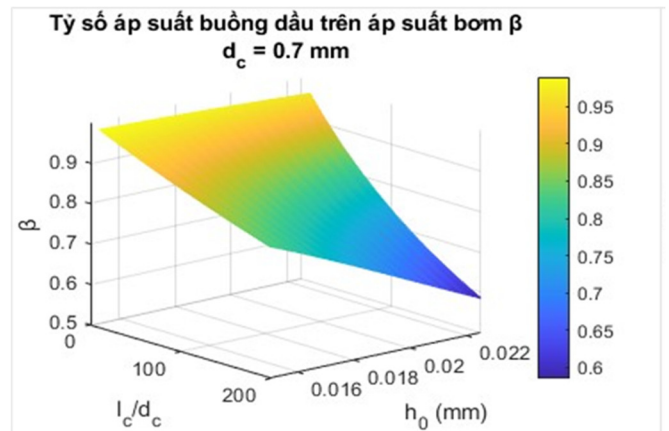
Hình 8. Tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm  $\beta$ , khi  $d_c = 0,4\text{mm}$



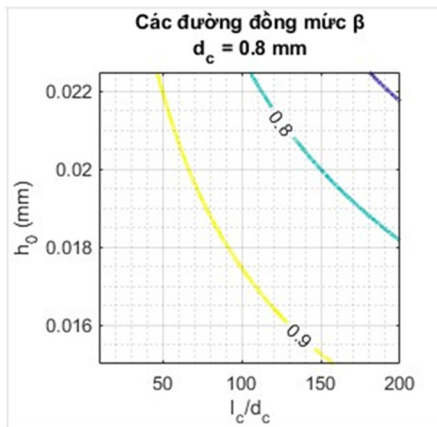
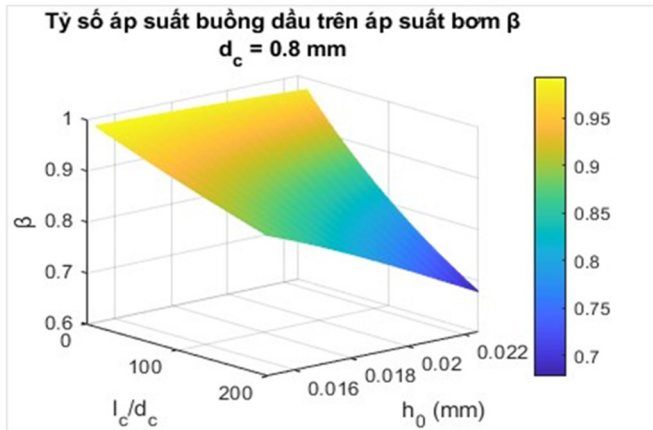
Hình 10. Tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm  $\beta$ , khi  $d_c = 0,6\text{mm}$



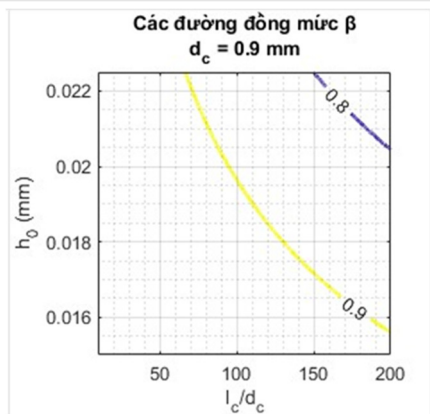
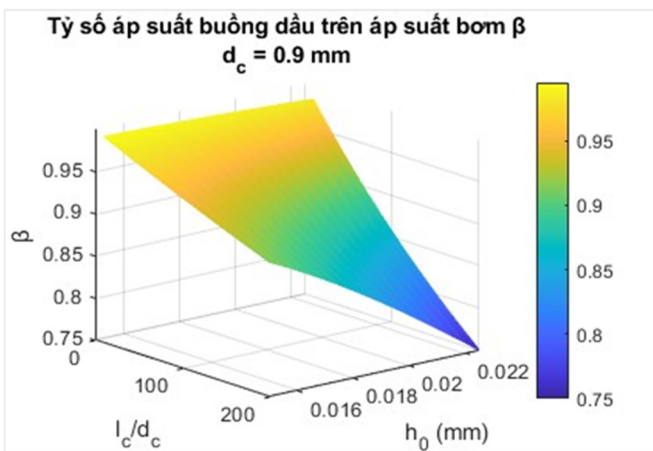
Hình 9. Tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm  $\beta$ , khi  $d_c = 0,5\text{mm}$



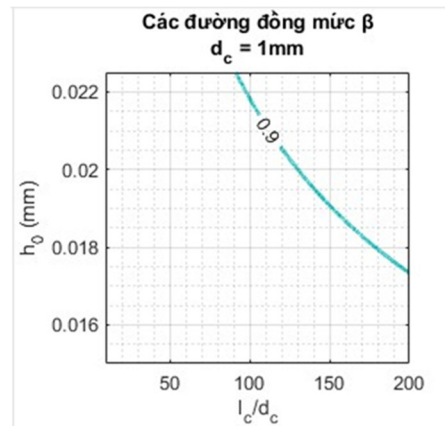
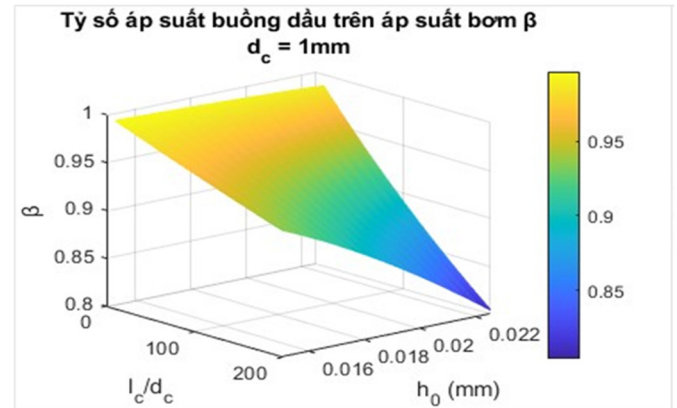
Hình 11. Tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm  $\beta$ , khi  $d_c = 0,7\text{mm}$



Hình 12. Tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm  $\beta$ , khi  $d_c = 0,8\text{mm}$



Hình 13. Tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm  $\beta$ , khi  $d_c = 0,9\text{mm}$



Hình 14. Tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm  $\beta$ , khi  $d_c = 1\text{mm}$

Mặt khác, để phạm vi chịu tải của ổ là lớn nhất,  $\beta$  được khuyến cáo nằm trong phạm vi từ 0,4 đến 0,7. Điều này có nghĩa là cơ cấu điều khiển chiều dầy màng dầu bằng ống mao dẫn sẽ tạo ra tỷ số áp suất tối đa ở khe hở giới hạn dưới dẫn đến tỷ số áp suất tối thiểu ở khe hở giới hạn trên [3]. Cụ thể trong bài toán mô phỏng này, để tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm  $\beta \approx 0,4$  ở khe hở giới hạn trên và  $\beta \approx 0,7$  ở khe hở giới hạn dưới, dựa trên cơ sở đường đồng mức  $\beta$ , có thể lựa chọn tỷ số  $l_c/d_c$  tương ứng để  $\beta$  phù hợp nhất trong phạm vi khảo sát, các giá trị này được chỉ ra trong bảng 2.

Bảng 2. Giá trị  $l_c/d_c$  phù hợp để  $\beta \approx 0,4 - 0,7$  tương ứng với các giá trị  $d_c = 0,1 - 1$

$d_c$ (mm)	Giá trị $\beta$		$l_c/d_c$ phù hợp
	Khi $h_0 = 22,5\mu\text{m}$	Khi $h_0 = 15\mu\text{m}$	
0,1	0,04	0,12	20
0,2	0,25	0,53	20
0,3	0,4	0,7	33
0,4	0,4	0,7	78
0,5	0,4	0,7	152
0,6	0,47	0,75	200
0,7	0,59	0,83	200
0,8	0,68	0,88	200
0,9	0,75	0,91	200
1	0,8	0,93	200

Từ những khảo sát trên dễ dàng nhận thấy, khi giá trị  $d_c < 0,3\text{mm}$  hoặc  $d_c > 0,6\text{mm}$ , tỷ số áp suất buồng dầu trên

áp suất bơm  $\beta$  không đáp ứng yêu cầu phạm vi từ 0,4 đến 0,7 trong toàn bộ phạm vi khảo sát. Với giá trị  $0,3\text{mm} < d_c < 0,6\text{mm}$ , có thể chọn được thông số hình học ống mao dẫn phù hợp với yêu cầu thiết kế.

Ngoài ra, khi tăng đường kính ống mao dẫn  $d_c$ , sự gia tăng lưu lượng dầu dẫn đến áp suất buồng dầu cao hơn. Điều này cải thiện độ cứng của màng dầu, giúp ổ trục chịu tải tốt hơn và duy trì độ chính xác gia công. Tuy nhiên, cần chú ý rằng việc tăng tỷ số  $l/d_c$  cũng đồng nghĩa với chiều dài ống mao dẫn lớn, gây khó khăn trong việc gia công các lỗ mao dẫn đường kính nhỏ với chiều sâu lớn trên thân bạc thủy tinh, như dung sai độ tròn và độ nhám bề mặt lỗ.

Kết quả này không chỉ nâng cao hiểu biết về ảnh hưởng của hình học ống mao dẫn đến hiệu suất của ổ thủy tinh mà còn cung cấp cơ sở để thiết kế và tối ưu hóa các hệ thống ổ thủy tinh hiệu quả hơn. Kết quả nghiên cứu có thể được áp dụng trong các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao như máy mài tròn ngoài, nơi mà yêu cầu về độ cứng và độ chính xác của màng dầu là cực kỳ quan trọng. Điều này góp phần quan trọng trong việc nâng cao chất lượng và hiệu suất của các máy công cụ hiện đại. Hơn nữa, việc áp dụng các kết quả này trong thiết kế và sản xuất ổ thủy tinh không chỉ giúp cải thiện hiệu suất mà còn giảm thiểu chi phí bảo trì và tăng tuổi thọ của thiết bị. Điều này là đặc biệt quan trọng trong ngành công nghiệp gia công cơ khí, nơi mà độ chính xác và độ tin cậy của máy móc đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm và tối ưu hóa quy trình sản xuất.

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày phương pháp mô phỏng số để phân tích ảnh hưởng của hình học ống mao dẫn đến áp suất ổ thủy tinh. Kết quả cho thấy tỷ số áp suất buồng dầu trên áp suất bơm giảm khi tỷ số  $l/d_c$  tăng và ngược lại,  $\beta$  tăng khi đường kính ống mao dẫn  $d_c$  tăng lên. Đặc biệt, với phạm vi giá trị đường kính mao dẫn từ 0,3mm đến 0,6mm, có thể chọn được tỷ số mao dẫn  $l/d_c$  phù hợp với yêu cầu  $0,4 < \beta < 0,7$ .

Cơ cấu điều chỉnh chiều dày màng dầu bằng ống mao dẫn cho thấy các thông số hình học của ống mao dẫn có tác động trực tiếp đến tỷ lệ áp suất giữa buồng dầu và áp suất bơm để đảm bảo điều kiện làm việc, đặc biệt trong phạm vi khe hở cho phép. Qua quá trình tính toán mô phỏng, xác định các cặp giá trị đường kính mao dẫn và tỷ số mao dẫn ( $d_c$ ;  $l/d_c$ ) tương ứng là (0,3; 33), (0,4; 78), (0,5; 152), (0,6; 200) thích hợp để đảm bảo khe hở của ổ trong giới hạn cho phép. Điều này phù hợp với điều kiện thực tế của ổ trục thủy tinh trong máy mài tròn ngoài.

Tuy nhiên, việc tăng tỷ số  $l/d_c$  đồng nghĩa với chiều dài ống mao dẫn sẽ lớn điều này gây khó khăn trong việc chế tạo lỗ mao dẫn đường kính nhỏ có chiều sâu lớn trên thân bạc thủy tinh như dung sai độ tròn và nhám bề mặt lỗ. Do đó, việc lựa chọn các thông số mao dẫn dựa trên điều kiện sản xuất chế tạo thực tế.

Nghiên cứu này góp phần nâng cao hiểu biết về ảnh hưởng của hình học ống mao dẫn đến hiệu suất của ổ thủy tinh. Kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng để thiết kế và

tối ưu hóa các hệ thống ổ thủy tinh hiệu quả hơn, đặc biệt là trong các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao như máy mài tròn ngoài.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. V. H. Pham, M. T. Nguyen, T. A. Bui, "Oil pressure and viscosity influence on stiffness of the hydrostatic spindle bearing of a medium-sized circular grinding machine," *International Journal of Modern Physics B*, 34, 22n24, 2040156, 2020. doi: 10.1142/s0217979220401566.
- [2]. W. B. Rowe, "Chapter 2 - Basic Flow Theory," in *Hydrostatic, Aerostatic and Hybrid Bearing Design*, W. B. Rowe Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 25-48, 2012.
- [3]. W. B. Rowe, "Chapter 5 - Flow Control and Restrictors," in *Hydrostatic, Aerostatic and Hybrid Bearing Design*, W. B. Rowe Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 283-113, 2012.
- [4]. Qiang He, Li Lili, Ren Fengzhang, Volinsky Alex, "Numerical Simulation and Experimental Study of the Hydrostatic Spindle with Orifice Restrictors," *The Open Mechanical Engineering Journal*, 1293-1303, 2015.
- [5]. V. H. Pham, T. A. Bui, T. D. Nguyen, "Study on identifying several geometric parameters of hydrostatic spindle bearing on external cylindrical grinding machine based on ability of manufacturing technology," in *The First International Conference on Fluid Machinery and Automation Systems 2018*, pp. 289-295, 2018.
- [6]. W. Chen, Y. Sun, Y. Liang, Q. Bai, P. Zhang, H. Liu, "Hydrostatic spindle dynamic design system and its verification," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 228, 1, 149-155, 2014. doi: 10.1177/0954405413497006.
- [7]. D. D. Le, T. A. Bui, "Analyzing the Effects of Lubrication Techniques on CNC Spindle Bearing Heat: An Experimental Investigation," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13, 5, 11581-11585, 2023. doi: 10.48084/etasr.6146.
- [8]. D. D. Le, V. H. Pham, T. A. Bui, "Computational and Experimental Investigation of Thermal Generation in CNC Milling Machine Spindle Bearing with the Oil-Air Lubrication Method," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14, 1, 12900-12905, 2024. doi: 10.48084/etasr.6603.
- [9]. T. A. Bui, D. D. Le, D. T. Tran, M. T. Nguyen, V. T. Tran, N. T. Bui, "Analyzing the Impact of Fly Ash Additive Ratio on Lubricant Properties," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13, 5, 11547-11554, 2023. doi: 10.48084/etasr.6114.
- [10]. B. Belahcene, A. Mansri, A. Benmoussat, "Investigation on the Rheological Behavior of Multigrade Oil under the Effect of Organic and Inorganic Impurities," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 4, 6, 711-713, 2014. doi: 10.48084/etasr.513.
- [11]. B. S. Kim, G. T. Bae, G. N. Kim, H. M. Moon, J. P. Noh, S. C. Huh, "A study on the thermal characteristics of the grinding machine applied hydrostatic bearing," *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 39, 3, 717-728, 2015. doi: 10.1139/tcsme-2015-0057.
- [12]. S. Uberti, "Study & design of a special test bench for hydrostatic spindle housings," in *In Proceedings of DESIGN 2010, the 11th International Design Conference Dubrovnik, Croatia*, 1729-1740, 2010.

## AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Trong Thanh<sup>1</sup>, Tran The Hung<sup>1</sup>, Bui Tuan Anh<sup>1</sup>,  
Nguyen Quoc Dzung<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Technology, Vietnam

<sup>2</sup>Thai Nguyen Industrial College, Vietnam