

# MÔ HÌNH MA SÁT TĨNH CỦA XYLANH KHÍ NÉN TRONG ĐIỀU KIỆN TỐC ĐỘ DỊCH CHUYỂN VÀ NHIỆT - ẨM KHÔNG KHÍ THAY ĐỔI

STATIC FRICTION MODEL OF PNEUMATIC CYLINDERS IN CONDITIONS VARYING VELOCITY AND TEMPERATURE - HUMIDITY AIR

Nguyễn Thùy Dương\*, Phạm Văn Hùng

## TÓM TẮT

Đặc tính ma sát của xy lanh khí nén chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố khác nhau khi làm việc, trong đó có môi trường khí hậu. Môi trường khí hậu có hai yếu tố đặc trưng là nhiệt độ (T) và độ ẩm tương đối (RH), thay đổi theo mùa và vùng địa lý. Do đó, biến thiên của tốc độ dịch chuyển và các yếu tố đặc trưng của khí hậu sẽ làm thay đổi đặc tính ma sát của xy lanh khí nén. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu về ảnh hưởng đồng thời của tốc độ dịch chuyển, nhiệt độ và độ ẩm tương đối của môi trường khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa Việt Nam tới đặc tính ma sát tĩnh của xy lanh khí nén. Các nghiên cứu được tiến hành trên xy lanh khí nén công nghiệp theo quy hoạch thực nghiệm với ba yếu tố đầu vào: Vận tốc (v): 30 ÷ 100mm/s, nhiệt độ (T): 15°C ÷ 49°C và độ ẩm tương đối (RH): 51% ÷ 99%, với hàm mục tiêu là ma sát tĩnh ( $F_s$ ). Kết quả đã xác định mô hình ma sát tĩnh của XLKN có phương trình dạng hàm mũ, phụ thuộc đồng thời vào cả ba yếu tố (v, T, RH). Mô phỏng số cũng cho thấy lực ma sát tĩnh  $F_s$  giảm khi T, RH tăng và tăng theo tốc độ dịch chuyển. Trong đó, ảnh hưởng của tốc độ dịch chuyển là lớn nhất và ảnh hưởng của RH mạnh hơn T đến lực ma sát tĩnh.

**Từ khóa:** Lực ma sát, xy lanh khí nén, đặc tính ma sát, khí hậu nhiệt đới ẩm.

## ABSTRACT

The friction characteristic of the pneumatic cylinder is influenced by many different working factors, including the climate environment. The climatic environment has two characteristic factors: temperature (T) and relative humidity (RH), varying by season and geographic region. Therefore, variations in velocity and climatic specific factors will change the friction characteristic of pneumatic cylinder. This paper presents the results of research on the simultaneous effects of the velocity, temperature and relative humidity of the humid monsoon tropical climate in Vietnam on the static friction properties of pneumatic cylinder. According to the experimental plan, the studies are conducted on the industrial pneumatic cylinder with three input factors: velocity v: 30 ÷ 100mm/s, temperature T: 15°C ÷ 49°C and relative humidity RH: 51% ÷ 99%, with the target function being static friction ( $F_s$ ). The results have determined the static friction model of a pneumatic cylinder, shown through empirical regression equations with exponential form, describing the variation of the static friction  $F_s$  depending on three research factors simultaneously (v, T, RH). The numerical simulation also shows that  $F_s$  static friction force decreases as T, RH increases and increases with the velocity. The influence of velocity is most significant, and the influence of air relative humidity is stronger than the temperature on static friction force.

**Keywords:** Friction force, pneumatic cylinder, characteristic, humid tropical climate.

Viện Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Email: duong.nguyenthuy@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/5/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/6/2021

Ngày chấp nhận đăng: 25/6/2021

## 1. GIỚI THIỆU

Nhiệt độ (T) và độ ẩm tương đối (RH) là các yếu tố đặc trưng của môi trường khí hậu (gọi tắt là nhiệt - ẩm). Những yếu tố quan trọng này ảnh hưởng trực tiếp đến đặc tính Tribology của các kết cấu ma sát là ma sát và mòn khi làm việc không có chất bôi trơn hoặc bôi trơn tới hạn trong môi trường không khí. Trong điều kiện độ ẩm tương đối RH của không khí thay đổi, kết quả các công trình nghiên cứu [1-6] đã cho thấy rằng: Ma sát của các cặp vật liệu khác nhau chịu ảnh hưởng rõ rệt của độ ẩm tương đối không khí, ma sát giảm khi độ ẩm tương đối tăng. Việt Nam là nước có khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa với độ ẩm tương đối (RH) thay đổi theo mùa, trung bình trong khoảng từ 51% đến ~99% và nhiệt độ (T) thay đổi trung bình trong khoảng từ 15°C đến 49°C. Vì vậy, phần lớn các thiết bị vận hành trong điều kiện khí hậu Việt Nam đều bị thay đổi các tính năng kỹ thuật, ảnh hưởng đến chất lượng làm việc của chúng, xy lanh khí nén (XLKN) cũng không nằm ngoài ảnh hưởng chung đó. Đặc trưng của môi trường khí hậu (RH, T) đã ảnh hưởng trực tiếp đến ma sát của XLKN, nguyên nhân quan trọng làm XLKN chuyển động không ổn định. Ma sát này xuất hiện giữa gioăng - cần piston và gioăng piston - xy lanh. Do đó, nhằm cải thiện chất lượng chuyển động của XLKN, cần phải nghiên cứu về ứng xử của ma sát trong các điều kiện làm việc khác nhau bao gồm cả

yếu tố khí hậu. Nghiên cứu của Raparelli đã chỉ ra rằng với áp suất không đổi trong xy lanh, mối quan hệ giữa lực ma sát và vận tốc là một phương trình hàm mũ và ma sát giảm khi piston được bôi trơn [7]. G. Belforte [8] đã cho thấy ma sát phụ thuộc vào vị trí của xy lanh. Đối với các xi lanh có cùng thông số, lực ma sát tăng khi tốc độ và áp suất tăng. Nouri [9] đã thí nghiệm để khảo sát lực ma sát ở cả chế độ dịch chuyển ban đầu và chế độ trượt hoàn toàn của xy lanh khí nén không cần. Ma sát trong giai đoạn dịch chuyển ban đầu chủ yếu phụ thuộc vào dịch chuyển, và trong giai đoạn trượt hoàn toàn chủ yếu phụ thuộc vào tốc độ. Chang - Ho [10] đã khảo sát tổng ma sát của xy lanh khí nén ở hai trạng thái tiếp xúc có và không có chất bôi trơn. Kết quả cho thấy đặc tính ma sát động tuân theo quy luật đường cong Stribeck. Khi được bôi trơn bằng mỡ, lực ma sát giảm đáng kể và hiện tượng trượt bước nhảy Stick-slip xảy ra ở tốc độ thấp. Trong [11] đã nghiên cứu thực nghiệm hành vi rung và ma sát của xi lanh khí nén, cho thấy hiện tượng chuyển động trượt dính xảy ra với tốc độ 0,010m/s. Xuan Bo Tran, Hideki Yanada [12] đã sử dụng mô hình LuGre sửa đổi mới để mô phỏng ứng xử ma sát động trong giai đoạn trượt của XLKN ở các điều kiện vận tốc và áp lực khác nhau. Kết quả cho thấy rằng có hiện tượng trễ ở tốc độ thấp, mối quan hệ lực ma sát - tốc độ - áp suất thay đổi tuyến tính khi tốc độ cao. Niko Heraković [13], đã chỉ ra rằng lực ma sát chịu ảnh hưởng đáng kể vào áp suất và nhiệt độ. Khi tăng nhiệt độ trong phạm vi 20 ÷ 22°C thì lực ma sát giảm, khoảng 2 ÷ 2,5N/1°C. Các kết quả nghiên cứu của Takahiro Kosaki, Manabu Sano cũng đã cho thấy khi nhiệt độ tăng thì lực ma sát trong XLKN giảm và có xu hướng phụ thuộc nhiều vào vận tốc ở tốc độ cao hơn [14]. Nghiên cứu [15, 16] đã cho thấy lực ma sát trong XLKN giảm khi RH tăng từ 51% ÷ 99% đồng thời cũng xác định lực ma sát là một hàm của RH và vận tốc v. Nghiên cứu [17] của Phạm Văn Hưng khi nhiệt độ thay đổi từ 15°C ÷ 49°C lực ma sát trong XLKN giảm 10 ÷ 18%. Mức độ ảnh hưởng đến ma sát tĩnh lớn hơn 1,2 lần so với ma sát động. Như vậy, các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào ứng xử của ma sát trong xi lanh khí nén với các yếu tố thay đổi như p, v, rung động, có - không có bôi trơn, và một vài công trình nghiên cứu đã đề cập đến ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm tương đối đơn lẻ. Có rất ít các công trình nghiên cứu về đặc tính ma sát của XLKN, chịu ảnh hưởng đồng thời của tốc độ dịch chuyển và đặc trưng của môi trường khí hậu. Ma sát tĩnh có ảnh hưởng trực tiếp đến công suất khởi động và thời gian thiết lập của hệ thống cơ điện tử sử dụng XLKN chưa được quan tâm nghiên cứu.

Bài báo này trình bày nghiên cứu về ảnh hưởng đồng thời của tốc độ dịch chuyển và môi trường khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa với hai thông số đặc trưng là RH và T tới một đặc trưng Tribology quan trọng của XLKN đó là đặc tính ma sát tĩnh.

## 2. THIẾT BỊ THỰC NGHIỆM

### 2.1. Thiết kế thực nghiệm

Mục tiêu của nghiên cứu thực nghiệm: Nghiên cứu ảnh hưởng đồng thời của tốc độ dịch chuyển tương đối cùng

với hai thông số đặc trưng của khí hậu là RH và T đến tới một đặc trưng Tribology quan trọng của XLKN là ma sát tĩnh ( $F_s$ ). Để thực hiện được mục tiêu trên thì cần phải quy hoạch thực nghiệm (QHTN) toàn phần với 03 yếu tố đầu vào. Yếu tố đầu vào thứ nhất là tốc độ dịch chuyển tương đối (v) của XLKN thay đổi trong phạm vi 30 ÷ 100mm/s. Hai yếu tố đầu vào còn lại là RH(%) và T (°C) có phạm vi biến thiên phù hợp đặc trưng khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa của Việt Nam: RH thay đổi trong khoảng từ 51 ÷ 99%; T°C thay đổi trong khoảng từ 15 ÷ 49°C. Hàm mục tiêu đầu ra là lực ma sát tĩnh ( $F_s$ ) của XLKN.

Đặc tính ma sát XLKN phụ thuộc phi tuyến vào tốc độ dịch chuyển v [7], độ ẩm tương đối RH và nhiệt độ T [15, 17] nên hàm hồi qui thực nghiệm thông thường là đa thức bậc hai. QHTN toàn phần ba yếu tố đầu vào với hàm hồi qui phi tuyến (đa thức bậc hai) thì cần phải mở rộng thí nghiệm (các yếu tố đầu vào) với hệ số mở rộng  $\alpha = 1,215$ . Đối với yếu tố đầu vào thứ hai là RH, thì không thực hiện mở rộng được với điểm thực nghiệm có RH = 99%. Do đó, lựa chọn hàm hồi qui thực nghiệm lực ma sát  $F_s$  là hàm mũ của tốc độ dịch chuyển tương đối, độ ẩm tương đối và nhiệt độ, có phương trình như sau:

$$F_s = A \cdot v^{b_1} \cdot RH^{b_2} \cdot T^{b_3} \quad (1)$$

Trong đó:

A - Hệ số thực nghiệm;

v - Tốc độ dịch chuyển tương đối (mm/s);

RH - Độ ẩm tương đối của không khí (%);

T - Nhiệt độ của không khí (°C);

$b_1, b_2, b_3$  - Các số mũ thực nghiệm.

Tuyến tính hóa phương trình (1) bằng việc lg hai vế ta có:

$$\lg F_s = b_0 + b_1 \cdot \lg v + b_2 \cdot \lg RH + b_3 \cdot \lg T \quad (2)$$

Thực hiện QHTN tuyến tính dạng  $2k + 1$  theo [18] khi đó các biến thực nghiệm phải được thực hiện trong môi trường logarit. Số thí nghiệm được xác định theo công thức (3):

$$N = 2^k + 1 = 9 \quad (3)$$

Trong đó:

k - Số yếu tố đầu vào;

2 - Số mức thí nghiệm.

Phương trình hồi qui thực nghiệm tuyến tính đối với biến thực đã logarit có dạng:

$$Y = b_0 \cdot X_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 \quad (4)$$

Trong đó:

$b_i$  - Hệ số;

$X_1 = \lg v$  (mm/s);

$X_2 = \lg RH$  (%);

$X_3 = \lg T$  (°C).

Phương trình hồi qui không thứ nguyên có dạng:

$$y = a_0 \cdot x_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 \quad (5)$$

Trong đó:

- $a_i$  - Các hệ số hồi qui thực nghiệm;
- $x_i$  - Biến thực nghiệm thứ  $i$  không thứ nguyên.

Xác định giá trị các yếu tố đầu vào cho QHTN tuyến tính có ba yếu tố như trong bảng 1.

Bảng 1. Các yếu tố ảnh hưởng

Các yếu tố ảnh hưởng	Giá trị mã hóa			
	$x_1$	-1	0	+1
$X_1 = \lg v$ (mm/s)		1,477	1,739	2
$X_2 = \lg$ (RH%)		1,708	1,852	1,996
$X_3 = \lg T$ (°C)		1,176	1,433	1,690

Sau khi mã hóa các biến và tiến hành thí nghiệm, kết quả thực nghiệm như bảng 2.

Bảng 2. Bảng kế hoạch thực nghiệm tương quan giữa mã thực và biến mã hóa

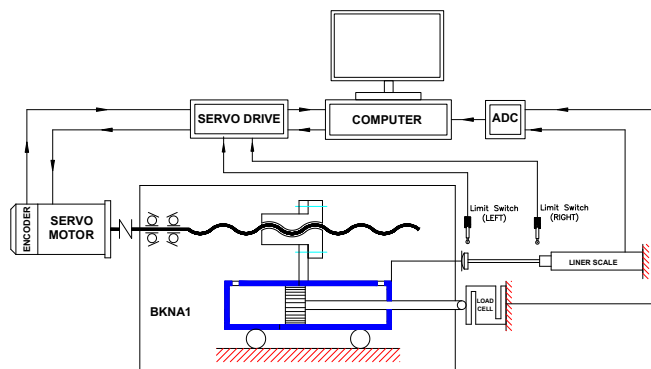
No	Biến thực			lg biến thực			Biến mã hóa				Hàm mục tiêu
	V mm/s	RH%	T °C	$X_1 = \lg V$	$X_2 = \lg RH$	$X_3 = \lg T$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	100	99	49	2	1,996	1,690	+	+	+	+	$y_{s_1}$
2	100	99	15	2	1,996	1,176	+	+	+	-	$y_{s_2}$
3	100	51	49	2	1,708	1,690	+	+	-	+	$y_{s_3}$
4	100	51	15	2	1,708	1,176	+	+	-	-	$y_{s_4}$
5	30	99	49	1,477	1,996	1,690	+	-	+	+	$y_{s_5}$
6	30	99	15	1,477	1,996	1,176	+	-	+	-	$y_{s_6}$
7	30	51	49	1,477	1,708	1,690	+	-	-	+	$y_{s_7}$
8	30	51	15	1,477	1,708	1,176	+	-	-	-	$y_{s_8}$
9	55	71	27	1,739	1,852	1,433	+	0	0	0	$y_{s_9}$

2.2. Thiết bị thực nghiệm

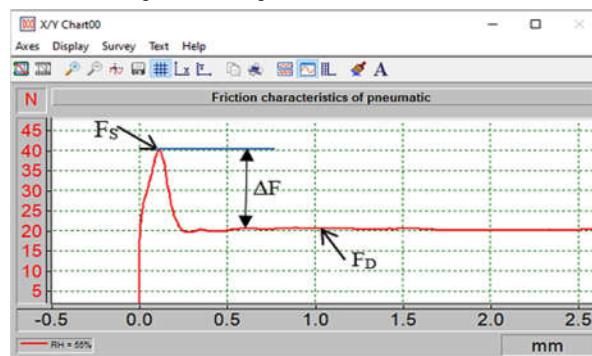
Thiết bị thí nghiệm được thể hiện như trên hình 1. Trong hệ thống thiết bị thí nghiệm, chuyển động của xy lanh được dẫn động bằng động cơ servo thông qua bộ truyền vít me đai ốc bi. Piston được giữ cố định và được nối với cảm biến lực thông qua khớp cầu. Lực ma sát được đo bởi cảm biến lực có độ chính xác 0,02% FS. Dịch chuyển của xy lanh được xác định thông qua thước đo dịch chuyển DTH-A với độ chính xác 0,1% RO. Toàn bộ hệ thống thiết bị cơ khí được đặt trong tủ nhiệt ẩm, nguồn động lực và hệ thống đo được bố trí bên ngoài tủ nhiệt ẩm. Tủ nhiệt ẩm có khả năng thay đổi RH từ 51 ÷ 99% ± 2% và T từ 15 ÷ 49°C ± 1°C. Dữ liệu về dịch chuyển và lực ma sát được xử lý và hiển thị trên màn hình thông qua phần mềm DasyLab 11.0. Giao diện màn hình hiển thị kết quả đo lực ma sát như trên hình 2, bao gồm lực ma sát tĩnh  $F_s$  và lực ma sát động  $F_D$ .

Đặc tính ma sát trong XLKN thu được từ thực nghiệm đồng dạng đồ thị sự phụ thuộc của lực ma sát vào dịch chuyển [19], bao gồm ba giai đoạn: Dịch chuyển ban đầu, gián đoạn và trượt hoàn toàn. Từ đồ thị cho thấy sự chênh lệch giữa ma sát tĩnh và ma sát động là tương đối lớn, nó là

nguyên nhân gây ra hiện tượng trượt bước nhảy. Ma sát tĩnh ảnh hưởng đến giai đoạn khởi động của XLKN.



Hình 1. Hệ thống thiết bị thí nghiệm



Hình 2. Đặc tính ma sát trong XLKN

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Để đánh giá ảnh hưởng (đồng thời) của vận tốc, độ ẩm và nhiệt độ không khí đến tính chất ma sát ( $F_s$ ,  $F_D$ ) của xy lanh khí nén, tiến hành thử nghiệm khóa sát ma sát trong XLKN như trên bảng 2. Vận tốc: 30 ÷ 100mm/s, Độ ẩm: 51 ÷ 99%, Nhiệt độ: 15 ÷ 49°C. Thí nghiệm số 9 ở tâm, tiến hành 3 cuộc thử nghiệm song song với: Vận tốc: 55mm/s, Độ ẩm: 71%, Nhiệt độ: 27°C. Dữ liệu thực nghiệm về ma sát tĩnh của xy lanh khí nén, như trong bảng 3.

Bảng 3. Dữ liệu thực nghiệm về ma sát tĩnh ( $F_s$ ) của XLKN khi vận tốc, độ ẩm và nhiệt độ thay đổi

STN	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$F_s$ (N)	18,75	21,18	21,26	24,21	11,61	14,39	14,41	17,41	17,73
$\bar{y}_{s_i} = \lg F_{s_i}$	1,273	1,326	1,328	1,384	1,065	1,158	1,159	1,241	1,249

Dựa vào bảng số liệu thực nghiệm 2 và 3, phương trình hồi quy thực nghiệm lực ma sát tĩnh trong XLKN được biểu diễn trong phương trình 6.

$$F_s = 19,3165 \cdot v^{0,3263} \cdot RH^{-0,2217} \cdot T^{-0,1359} \tag{6}$$

Từ phương trình hồi qui thực nghiệm (6) cho thấy, hàm hồi qui thể hiện lực ma tĩnh của XLKN chịu ảnh hưởng đồng thời và rõ rệt của tốc độ, độ ẩm tương đối và nhiệt độ không khí:

- Lực ma sát tăng khi tốc độ tăng, hoàn toàn phù hợp với đồ thị nguyên tắc về giá trị lực ma sát tĩnh cũng như các nghiên cứu đã được công bố;

- Khi độ ẩm tương đối tăng từ 51% đến 99% thì lực ma sát tĩnh càng giảm, điều này cho thấy hiện tượng màng hơi ẩm được hình thành trên bề mặt tăng theo độ ẩm và nó đóng vai trò chất bôi trơn;

- Khi nhiệt độ tăng từ 15°C đến 49°C, ma sát tĩnh giảm khi nhiệt độ tăng, điều này cho thấy hiện tượng mềm hóa gioăng xuất hiện khi nhiệt độ tăng và được khuếch đại khi có mặt của màng hơi ẩm trên bề mặt.

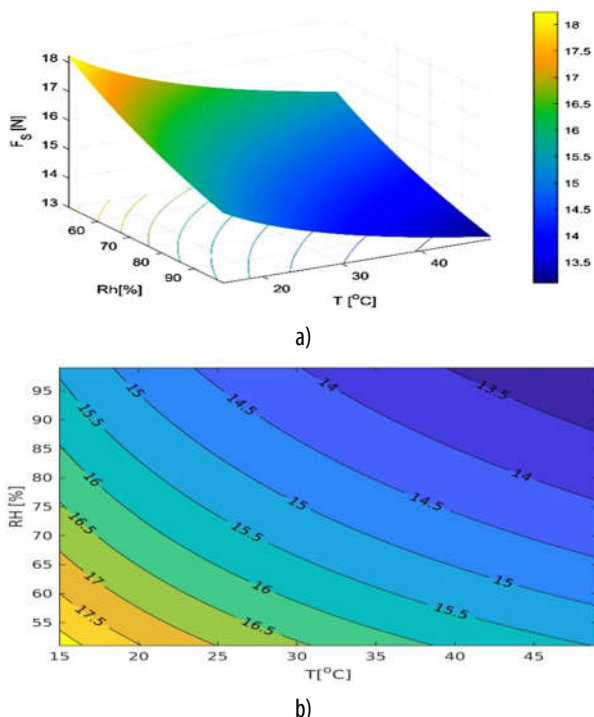
Sự biến thiên của lực ma sát tĩnh khi tốc độ, độ ẩm và nhiệt độ thay đổi đồng thời có thể được giải thích bằng sự xuất hiện của hiệu ứng bôi trơn giới hạn khi màng hơi ẩm ngưng đọng theo độ ẩm tương đối trên bề mặt ma sát. Ứng xử của bôi trơn giới hạn trên bề mặt cần XLKN phụ thuộc nhiều vào chiều dày màng hơi ẩm ngưng đọng trên bề mặt, nó được khuếch đại lên khi tốc độ thay đổi. Tốc độ càng cao thì ảnh hưởng của hiệu ứng bôi trơn đến ma sát tĩnh giảm do thời gian tác động ngắn.

Từ phương trình (6), khi tốc độ không thay đổi xét tại điểm tâm thực nghiệm, thì có phương trình:

$$F_s = A_v \cdot RH^{-0,2217} \cdot T^{-0,1359} \tag{7}$$

Trong đó:  $A_v = 19,3165 \cdot v^{0,3263}$ ,  $v = 55\text{mm/s}$ ,  
 $RH = 51 \div 99\%$ ;  $T = 15 \div 49^\circ\text{C}$ .

Phương trình (7) cho thấy lực ma sát tĩnh sẽ giảm khi độ ẩm tương đối và nhiệt độ tăng. Mức độ ảnh hưởng của độ ẩm tương đối lớn gấp 1,2 lần nhiệt độ tại điểm tâm vận tốc thực nghiệm (55mm/s) và được thể hiện trên đồ thị  $F_s = f(RH, T)$  hình 3a. Các đường đồng mức trên hình 3b thể hiện mức độ ảnh hưởng của RH và T. Mật độ đường đồng mức càng cao thì ảnh hưởng càng lớn.



Hình 3. Ảnh hưởng của RH và T tại tâm thực nghiệm vận tốc đến Static friction  $F_s$

Ở vùng phức hợp nhiệt ẩm thấp ( $T = 15^\circ\text{C}$ ,  $RH = 51\%$ ) lực ma sát  $F_s$  có giá trị lớn nhất và có xu hướng giảm, đạt giá trị nhỏ nhất tại vùng ( $T = 49^\circ\text{C}$ ,  $RH = 99\%$ ). Như vậy, lực ma sát tĩnh chịu ảnh hưởng đồng thời của RH và T, được thể hiện qua các đường đồng mức của  $F_s$ . Khi nhiệt độ và độ ẩm tăng lên, các đường đồng mức có xu hướng dãn xa nhau hơn, có nghĩa là ở chế độ nhiệt độ và độ ẩm tương đối càng lớn, thì ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm đến  $F_s$  giảm dần. Đồ thị 3b cũng cho thấy hiện tượng tăng ảnh hưởng biến thiên của T và RH đến  $F_s$  ở chế độ nhiệt ẩm thấp hơn. Rõ ràng đường đồng mức thể hiện một giá trị cụ thể của  $F_s$  và phụ thuộc đồng thời vào các bộ đôi giá trị RH và T của không khí ẩm. Có thể điều khiển bộ đôi RH và T của không khí ẩm để đạt được giá trị của lực ma sát tĩnh mong muốn trong các điều kiện cụ thể của tốc độ dịch chuyển. Như vậy, khi tốc độ không thay đổi, căn cứ vào cơ chế hiện tượng ngưng đọng màng hơi ẩm và mật độ các đường đồng mức trên biểu đồ trong hình 3b cũng như biến đổi của  $F_s$  có thể rút ra nhận xét như sau:

Ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ và độ ẩm tương đối của môi trường không khí đến  $F_s$  là rõ ràng; Tác động của độ ẩm tương đối đến  $F_s$  mạnh hơn ở nhiệt độ cao; Có thể dùng cặp bộ đôi RH và T trên các đường đồng mức phù hợp để đạt được lực ma sát  $F_s$  mong muốn tại các tốc độ cụ thể.

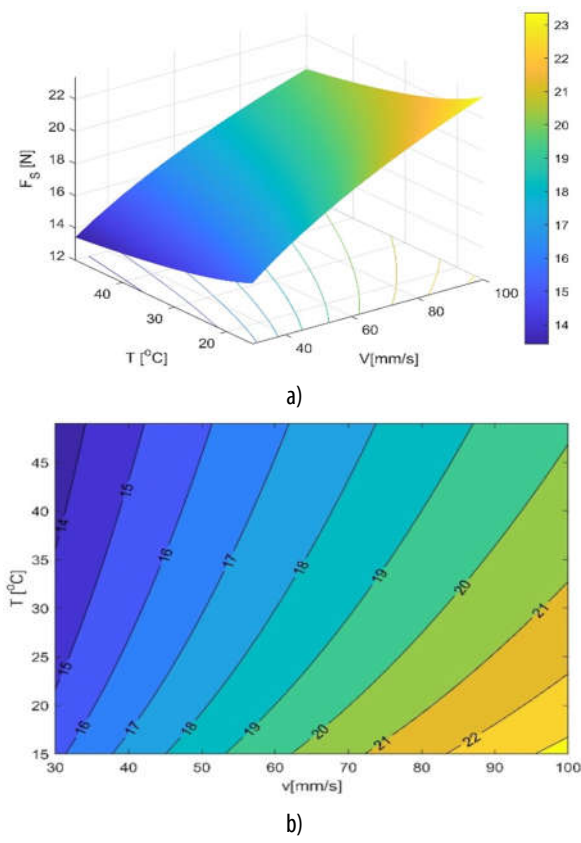
Khi độ ẩm tương đối không đổi xét tại điểm tâm thực nghiệm, phương trình (6) có dạng:

$$F_s = A_{RH} \cdot v^{0,3263} \cdot T^{-0,1359} \tag{8}$$

Trong đó:  $A_{RH} = 19,3165 \cdot RH^{-0,2217}$ ,  $RH = 71\%$ ;  
 $v = 30 \div 100\text{mm/s}$ ;  $T = 15 \div 49^\circ\text{C}$ .

Phương trình (8) cho thấy lực ma sát tĩnh sẽ tăng khi tốc độ tăng và giảm khi nhiệt độ tăng. Mức độ ảnh hưởng của tốc độ lớn hơn 3,5 lần so với nhiệt độ môi trường không khí tại điểm tâm độ ẩm tương đối của thực nghiệm ( $RH = 71\%$ ) và được thể hiện trên đồ thị  $F_s = f(v, T)$  hình 4a. Trên hình 4b các đường đồng mức thể hiện mức độ ảnh hưởng của v và T đến  $F_s$ . Mật độ đường đồng mức càng cao thì mức độ ảnh hưởng càng lớn. Ở vùng có  $v = 30\text{mm/s}$ ,  $T = 49^\circ\text{C}$ , lực ma sát  $F_s$  có giá trị nhỏ nhất và tăng mạnh, đạt giá trị lớn nhất tại vùng có  $v = 100\text{mm/s}$ ,  $T = 15^\circ\text{C}$ . Qua các đường đồng mức của  $F_s$  cho thấy, tốc độ và nhiệt độ tăng lên các đường đồng mức có xu hướng dãn xa nhau hơn, có nghĩa là ở chế độ nhiệt độ và độ ẩm tương đối càng thấp, thì ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm đến  $F_s$  càng lớn. Các đường đồng mức thể hiện các giá trị cụ thể của  $F_s$ , nó phụ thuộc đồng thời vào các bộ đôi giá trị v và T của không khí ẩm. Có thể điều khiển bộ đôi v và T của không khí ẩm để đạt được giá trị của lực ma sát tĩnh mong muốn trong các điều kiện độ ẩm RH cụ thể. Như vậy, khi độ ẩm không thay đổi, có thể rút ra nhận xét như sau:

Ảnh hưởng của tốc độ v và nhiệt độ T của môi trường không khí đến  $F_s$  là rất rõ ràng; Tác động của tốc độ dịch chuyển v đến  $F_s$  mạnh hơn nhiệt độ T; Có thể dùng cặp bộ đôi v và T trên các đường đồng mức phù hợp để đạt được lực ma sát  $F_s$  mong muốn tại các độ ẩm cụ thể.



Hình 4. Ảnh hưởng của v và T tại tâm thực nghiệm độ ẩm đến Static friction  $F_s$ . Khi nhiệt độ không đổi xét tại điểm tâm thực nghiệm, phương trình (9) có dạng:

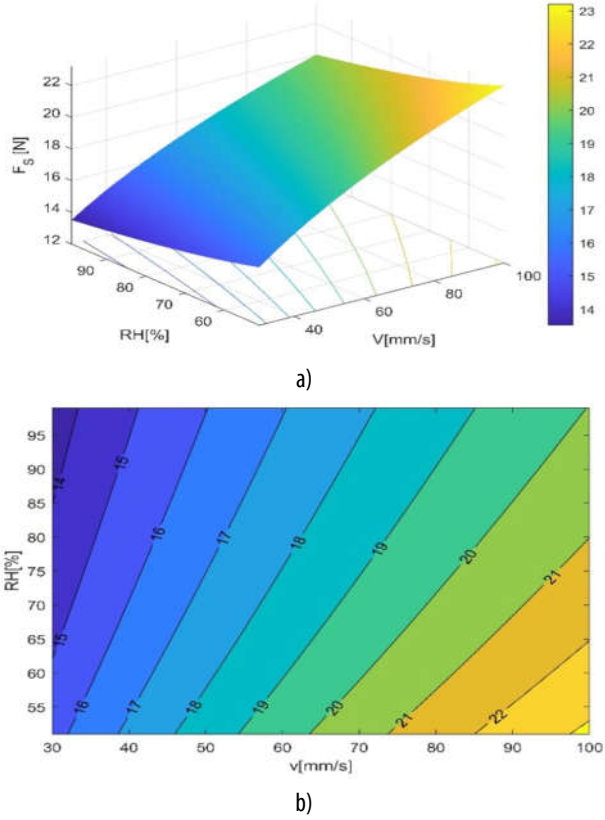
$$F_s = A_T \cdot v^{0,3263} \cdot RH^{-0,2217} \tag{9}$$

Trong đó:  $A_T = 19,3165 \cdot T^{-0,1359}$ ;  $T = 27^\circ\text{C}$ ;  
 $v = 30 \div 100\text{mm/s}$ ;  $RH = 51 \div 99\%$ .

Phương trình (9) cho thấy lực ma sát tĩnh sẽ tăng khi tốc độ tăng và giảm khi độ ẩm tương đối tăng. Mức độ ảnh hưởng của tốc độ lớn hơn khoảng 3,2 lần so với độ ẩm tương đối của môi trường không khí tại điểm tâm nhiệt độ của thực nghiệm ( $T = 27^\circ\text{C}$ ) và được thể hiện trên đồ thị  $F_s = f(v, RH)$  hình 5a. Cho thấy, lực ma sát tĩnh cũng chịu ảnh hưởng đồng thời của v và RH, các đường đồng mức trên hình 5b thể hiện mức độ ảnh hưởng của v và RH đến  $F_s$ . Ở vùng có tốc độ dịch chuyển nhỏ nhất  $v = 30\text{mm/s}$ , độ ẩm tương đối cao  $RH = 99\%$ , lực ma sát  $F_s$  có giá trị nhỏ nhất và có xu hướng tăng nhanh đạt giá trị lớn nhất tại vùng có  $v = 100\text{mm/s}$ ,  $RH = 51\%$ . Qua các đường đồng mức của  $F_s$  cho thấy, mật độ đường đồng mức theo trục v dày hơn theo trục RH cho thấy mức độ ảnh hưởng của v lớn hơn RH rất nhiều. Có thể điều khiển bộ đôi v và RH của không khí ẩm để đạt được giá trị của lực ma sát tĩnh mong muốn trong các điều kiện nhiệt độ T cụ thể. Như vậy, khi nhiệt độ không thay đổi, có thể rút ra nhận xét như sau:

Ảnh hưởng của tốc độ v và độ ẩm RH của môi trường không khí đến  $F_s$  là rất rõ ràng; Tác động của tốc độ dịch chuyển v đến  $F_s$  mạnh hơn độ ẩm RH nhiều lần; Có thể dùng cặp bộ đôi v và RH trên các đường đồng mức phù

hợp để đạt được lực ma sát  $F_s$  mong muốn tại các nhiệt độ cụ thể.



Hình 5. Ảnh hưởng của v và RH tại tâm thực nghiệm nhiệt độ đến Static friction  $F_s$ .

Như vậy, lực ma sát tĩnh  $F_s$  của XLKN chịu ảnh hưởng rõ rệt của tốc độ dịch chuyển, độ ẩm tương đối và nhiệt độ không khí. Tuy nhiên, do đặc thù giai đoạn dịch chuyển ban đầu rất ngắn nên hiệu ứng bôi trơn giới hạn của màng ẩm xuất hiện chưa rõ ràng, giai đoạn này liên quan đến  $F_s$ . Trong giai đoạn trượt hoàn toàn, giai đoạn này liên quan đến ma sát động, quãng đường chuyển động lớn hơn nhiều so với dịch chuyển ban đầu nên hiệu ứng bôi trơn giới hạn của màng ẩm xuất hiện nhanh hơn và có vùng chuyển tiếp sang bôi trơn thủy động, do đó ma sát tĩnh thường lớn hơn nhiều so với ma sát động. Nó ảnh hưởng trực tiếp đến công suất khởi động và thời gian xác lập hệ thống ổn định.

**4. KẾT LUẬN**

Mô hình về ứng xử ma sát tĩnh  $F_s$  của XLKN đã được xác định khi nó chịu ảnh hưởng đồng thời của tốc độ dịch chuyển và các đặc trưng khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa Việt Nam. Từ mô hình này và có thể rút ra được một số kết luận sau:

1. Cả ba yếu tố về tốc độ dịch chuyển tương đối, đặc trưng khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa RH và T đều có ảnh hưởng rõ rệt đến lực ma sát tĩnh  $F_s$  của XLKN. Lực ma sát nhỏ nhất nằm trong vùng có tốc độ v, độ ẩm RH và nhiệt độ T thấp và ngược lại. Mức độ thay đổi của ma sát tĩnh  $F_s$  trung bình khoảng 2,1 lần.

2. Phương trình hồi qui thực nghiệm thể hiện quy luật biến thiên của đặc trưng ma sát ( $F_s$ ) phụ thuộc đồng thời vào sự thay đổi của tốc độ  $v$ , độ ẩm RH và nhiệt độ  $T$  có dạng hàm mũ là phù hợp. Lực ma sát tăng khi tốc độ dịch chuyển tăng và giảm khi độ ẩm và nhiệt độ tăng.

3. Sử dụng mô phỏng số đã đưa ra được các biểu đồ đường đồng mức của lực ma sát "Friction map" khi từng cặp đôi thay đổi trong bộ ba thông số tốc độ  $v$ , độ ẩm RH và nhiệt độ  $T$ . Các đường đồng mức trong mô phỏng số là cơ sở để xác định được từng cặp yếu tố đầu vào phù hợp trong các điều kiện thực nghiệm cụ thể.

4. Biểu đồ đường đồng mức của lực ma sát tính cho thấy mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố trong các cặp đôi của tốc độ  $v$ , độ ẩm RH và nhiệt độ  $T$  tới đặc trưng ma sát. Trong đó tốc độ có ảnh hưởng quyết định, tiếp theo là độ ẩm tương đối và nhiệt độ môi trường không khí.

5. Qui luật biến thiên về ma sát tĩnh  $F_s$  có thể được sử dụng trong việc tính toán công suất khởi động và thời gian xác lập hệ thống của hệ thống cơ điện tử khi sử dụng XLKN trong các điều kiện nhiệt ẩm.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Mohammad Asaduzzaman Chowdhury, Maksud Helalib, 2006. *The Effect of Frequency of Vibration and Humidity on the Coefficient of Friction*. Tribology International, 39, 958-962.
- [2]. Imada Y, 1996. *Effect of humidity and oxide products on the friction and wear properties of mild steel*. J Jpn Soc Tribol, 114, 131-40.
- [3]. J. K. Lancaster, 1990. *A review of the influence of environmental humidity and water on friction, lubrication and wear*. Tribology International, 23(6), 371-389.
- [4]. Mohammad Asaduzzaman Chowdhury, Maksud Helali, 2008. *The Effect of Relative Humidity and Roughness on the Friction Coefficient under Horizontal Vibration*. The Open Mechanical Engineering Journal, 2, 128-135.
- [5]. Mohammad Asaduzzaman Chowdhury, 2012. *Effect of Sliding Velocity and Relative Humidity on Friction Coefficient of Brass Sliding against Different Steel Counterfaces*. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2(2), 1425-1431.
- [6]. Mohammad Asaduzzaman Chowdhury, Md. MaksudHelali, 2007. *The effect of frequency of vibration and humidity on the wear rate*. Wear 262, 198-203.
- [7]. T. Raparelli, A. Manuella Bertetot, L. Mazzat, 1997. *Experimental and numerical study of friction in an elastomeric seal for pneumatic cylinders*. Tribology international, 30(7), 547-552.
- [8]. G. Sc Belforte, G. Mattiazzo, S. Mauro, 2003. *Measurement of Friction Force in Pneumatic Cylinders*. Tribotest Journal. 10, 33-48.
- [9]. B. M. Y. Nouri, 2004. *Friction Identification in Mechatronic Systems*. ISA Transactions, 43(2), 205-216.
- [10]. Ho Chang, Chou-Wei LAN, Chih-Hao Chen, Tsing-Tshih Tsung, Jia-Bin Guo, 2008. *Measurement of frictional force characteristics of pneumatic cylinders under dry and lubricated conditions*. Przegląd Elektrotechniczny, 88 261-264.
- [11]. Yasunori Wakasawa, Yuhi Ito, Hideki Yanada, 2014. *Friction and Vibration Characteristics of Pneumatic Cylinder*. The 3rd International Conference on Design Engineering and Science, ICDES 2014 Pilsen, Czech Republic. 155-159.

[12]. Xuan Bo Tran, Van Lai Nguyen, Khanh Duong Tran, 2019. *Effects of friction models on simulation of pneumatic cylinder*. Mech. Sci., 10, 517-528, 2019.

[13]. Niko Herakovič, Jože Duhovnik, Dragica Noe, 1992. *Friction Force in the Pneumatic Cylinder*. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 38, 279-288.

[14]. Takahiro Kosaki, Manabu Sano, 2001. *Effect of Sliding Surface Temperature on Frictional Force in a Pneumatic Cylinder*. Transactions of the Japan hydraulics & Pneumatics society, 32(4), 98-103.

[15]. Thuy-Duong Nguyen, Van-Hung Pham, 2020. *Study of the effects of relative humidity and velocity on the friction characteristics of pneumatic cylinders*. International Journal of Modern Physics B. 34, 20401391-5.

[16]. V.H. Pham, T.D. Nguyen, T.A. Bui, 2020. *Behavior of Friction in Pneumatic Cylinders with Different Relative Humidity*. Tribology in Industry, 42(3), 400-406.

[17]. Thuy Duong Nguyen, Van Hung Pham, 2021. *Influence of humid air temperature on friction behavior in pneumatic cylinder*. Tribology in Industry, vol 43, no. 1, 131-138, DOI:10.24874/ti.976.10.20.01

[18]. Nguyen Minh Tuyen, 2004. Quy hoạch thực nghiệm. Science and Technics Publishing House, Hanoi.

[19]. I. V. Kragelsky, 1981. *Friction Wear Lubrication. Tribology Handbook*. Pergamon Press, vol 1.

#### AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Thuy Duong, Pham Van Hung**

School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology