# NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG MÀNG BÔI TRƠN RẮN POLYSILOXAN-$MoS_2$ CHO VÒNG BI RƠLE PHÂN CỰC MÁY LÁI TÊN LỬA 3M-24E

Nguyễn Thị Hoài Phương*, Lã Đức Dương, Phan Thanh Xuân,
Nguyễn Thị Phượng, Ninh Đức Hà

***Tóm tắt:*** *Màng bôi trơn rắn composite polysiloxane-$MoS_2$ được nghiên cứu bằng kỹ thuật nghiền cơ học. Vật liệu composite được đánh giá đặc trưng bằng kỹ thuật SEM và TGA. Hiệu quả của màng bôi trơn rắn trên cơ sở $MoS_2$ được đánh giá bằng thực nghiệm. Kết quả nghiên cứu cho thấy màng bôi trơn có mối quan hệ giữa sự thay đổi hệ số ma sát đối với hình thái và cấu trúc bề mặt. Khả năng bôi trơn của các chất bôi trơn rắn trong nghiên cứu này có tác dụng giảm mài mòn và do đó kéo dài tuổi thọ hoạt động của các chi tiết kim loại đã được đánh giá toàn diện. Chất bôi trơn trên cơ sở polysiloxan-$MoS_2$ làm giảm hệ số ma sát và cải thiện đáng kể khả năng chống mài mòn.*

**Từ khoá:** Ma sát; Bôi trơn rắn; $MoS_2$; Tên lửa 3M-24E.

## 1. MỞ ĐẦU

Màng bôi trơn rắn được sử dụng cho các máy móc, thiết bị đa dạng trong nhiều máy bay và tên lửa, thay thế vật liệu bôi trơn lỏng hoặc mỡ theo phương pháp truyền thống. Ngoài tính năng bôi trơn như các loại vật liệu bôi trơn khác, màng bôi trơn rắn còn khắc phục những hạn chế của dầu mỡ bôi trơn như không bị nhạy với bức xạ, khoảng nhiệt độ làm việc rộng, không chảy loãng hoặc khô nứt khi chi tiết làm việc ở nhiệt độ cao [1-3].

Bôi trơn màng rắn được hình thành nhờ hỗn hợp các thành phần bao gồm: chất bôi trơn rắn, chất kết dính, các phụ gia và dung môi. Hợp phần này được lựa chọn dựa trên yêu cầu bôi trơn của vật liệu, vật liệu nền sử dụng bôi trơn, điều kiện làm việc của chi tiết bôi trơn, tính tương hợp giữa các thành phần của hệ,… Chất kết dính thường được dùng là epoxy, PU, PI, silicon,… [4-6]. Chất bôi trơn rắn được lựa chọn là các chất có cấu trúc lớp như $MoS_2$, graphit… [2, 3, 7-10].

Công nghệ chế tạo tên lửa là một trong những công nghệ cao, đòi hỏi nhiều yêu cầu khắt khe khi thiết kế và chế tạo. Độ tin cậy và tuổi thọ các chi tiết của hợp phần tên lửa hoạt động trong điều kiện khắc nghiệt như môi trường xâm thực, biên độ dao động nhiệt độ rộng, áp suất cao, tải trọng lớn… luôn được quan tâm khi thiết kế chế tạo. Việc đảm bảo và nâng cao độ chính xác, an toàn và tuổi thọ của chi tiết liên quan đến vấn đề ma sát, mòn và bôi trơn (tribilogy). Vì thế, lựa chọn vật liệu bôi trơn đóng vai trò quan trọng trong chế tạo các hợp phần máy móc, thiết bị. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu chế tạo hệ bôi trơn màng rắn trên cơ sở $MoS_2$ và polysiloxane và thử nghiệm khả năng bôi trơn cho vòng bi rơle phân cực máy lái tên lửa 3M-24E.

## 2. THỰC NGHIỆM

### 2.1. Hoá chất, trang thiết bị

Hoá chất: Poliđimetylsiloxan E2502 của hãng Dow Corning, Hàn Quốc có trọng lượng phân tử $M_w$ ~ 20.000 (n~270); $MoS_2$ (>98%); Toluen; Axeton loại PA của hãng Xilong, Trung Quốc.

Trang thiết bị: Thiết bị siêu âm JY99-IIDN của Trung Quốc; Tủ sấy Ketong 101 của Trung Quốc; Mô hình rơle phân cực trong máy lái tên lửa 3M-24E của Viện Tên lửa chế tạo.

Mẫu tạo màng bôi trơn rắn được thiết lập từ đơn thành phần có tỷ lệ quy theo khối lượng như sau: 10% $MoS_2$, 40% polysiloxane, 50% dung môi hỗn hợp toluene:axetone (1:1 về thể tích). Hệ được phối trộn đồng nhất trên thiết bị nghiền bi trong thời gian 24 giờ.

**2.2. Đánh giá đặc trưng tính chất vật liệu**

*2.2.1. Đánh giá đặc trưng của màng bôi trơn*

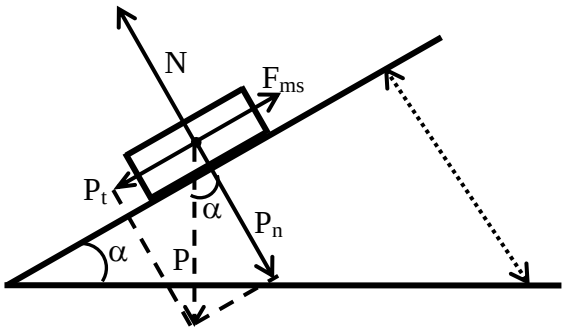
- Phân tích độ bền nhiệt của màng bằng phương pháp phân tích nhiệt vi sai trên máy NETZSCH STA tại Viện Kỹ thuật Hóa học, Đại học Bách khoa Hà Nội với chế độ đo: trong môi trường không khí, tốc độ tăng nhiệt 10 $^oC$/phút.

- Mẫu xác định chiều dày màng được chuẩn bị bằng cách đúc epoxy mẫu đã phun phủ màng. Chiều dày của màng bôi trơn rắn được xác định bằng phương pháp chụp ảnh mặt cắt của mẫu sau khi tẩm thực bằng thiết bị hiển vi quang học Axiovert 40MAT (Carl Zeiss, Đức) tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

- Để quan sát bề mặt màng, người ta sử dụng kỹ thuật chụp ảnh hiển vi điện tử quét SEM trên thiết bị Emax Energy (Horiba) tại Trung tâm COMFA, Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

*2.2.2. Xác định hệ số ma sát và độ bền ăn mòn*

Đánh giá khả năng giảm ma sát của màng bôi trơn rắn đối với các chi tiết, thí nghiệm sử dụng đại lượng trung gian là góc trượt của mẫu có và không có màng. Từ góc trượt có thể gián tiếp đánh giá mức độ giảm ma sát của vật liệu.




***Hình 1.*** *Mô phỏng nguyên lý thiết bị xác định độ giảm ma sát.*

Trong đó, trọng lực $\vec{P} = m.\vec{g}$ (m là khối lượng vật mẫu; g là gia tốc trọng trường) được phân thành hai lực thành phần $\vec{P_n}$ và $\vec{P_t}$.

$$P_n = P.\cos\alpha = m.g.\cos\alpha \quad \text{và} \quad P_t = P.\sin\alpha = m.g.\sin\alpha$$

Phản lực pháp tuyến $\vec{N} = -\vec{P_n}$; Lực ma sát $\vec{F_{ms}} = \mu.\vec{N} = -\vec{P_t}$.

Mặt phẳng nghiêng để làm thí nghiệm được làm từ inox không gỉ. Đặt mẫu thép có màng bôi trơn rắn lên mặt phẳng nghiêng. Thay đổi mặt phẳng nghiêng sao cho góc mở dần trong khoảng $0^o \le \alpha \le 90^o$. Khi mẫu bắt đầu trượt, giữ nguyên độ nghiêng và tiến hành đo góc. Mẫu thử có kích thước 4 cm x 7 cm x 0,2 cm. Tạo màng phủ bằng phương pháp phun áp lực một lớp. Mỗi thí nghiệm được lặp lại 3 lần và lấy giá trị trung bình. Đối chứng với mẫu không có màng bôi trơn. Độ suy giảm hệ số ma sát được xác định theo công thức:

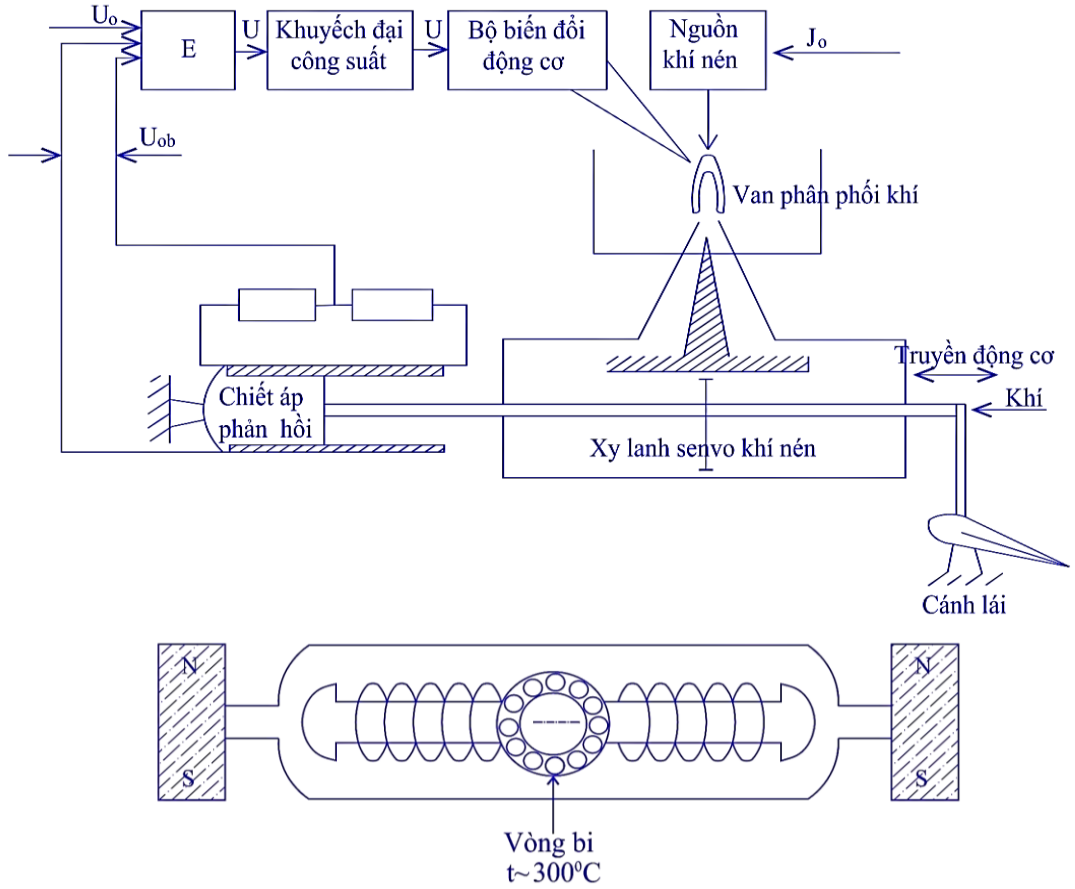
$$\frac{\mu_1}{sin\alpha_1} = \frac{\mu_2}{sin\alpha_2}$$

Trong đó: $\mu_1$, $\mu_2$ lần lượt là hệ số ma sát trượt của mẫu đối chứng và mẫu có phủ màng bôi trơn; $\alpha_1$, $\alpha_2$ là góc trượt tương ứng của mẫu đối chứng và mẫu có phủ màng bôi trơn.

Xác định tính khả năng bảo vệ ăn mòn của màng bôi trơn bằng phép thử ngâm mẫu thép không và có phủ màng bôi trơn trong dung dịch muối ăn NaCl 3,5%. Sau định kỳ 24 giờ nhấc mẫu ra khỏi dung dịch, làm khô bằng giấy thấm và quan sát bề mặt mẫu. Tiếp tục ngâm mẫu nếu không phát hiện thấy vết gỉ. Dừng thí nghiệm khi bề mặt mẫu xuất hiện vết gỉ hoặc màng có hiện tượng bong tróc. Ghi lại số ngày thí nghiệm kết thúc.

**2.3. Thử nghiệm trên chi tiết chịu ma sát trong tổ hợp tên lửa**

Thử nghiệm màng bôi trơn rắn cho vòng bi của rơle phân cực trong máy lái tên lửa 3M-24E thuộc tổ hợp tên lửa URAN-E.




***Hình 2.*** *Sơ đồ nguyên lý hoạt động của máy lái tên lửa 3M24E và mô hình rơle phân cực trong máy lái tên lửa 3M-24E.*

Chi tiết được tiến hành thử nghiệm theo các chế độ sau:

+ Máy lái hoạt động trong hai trường hợp: xung bậc và xung sin.

+ Nhiệt độ tại vòng bi rơle phân cực của máy lái: 260 ÷ 300 $^oC$.

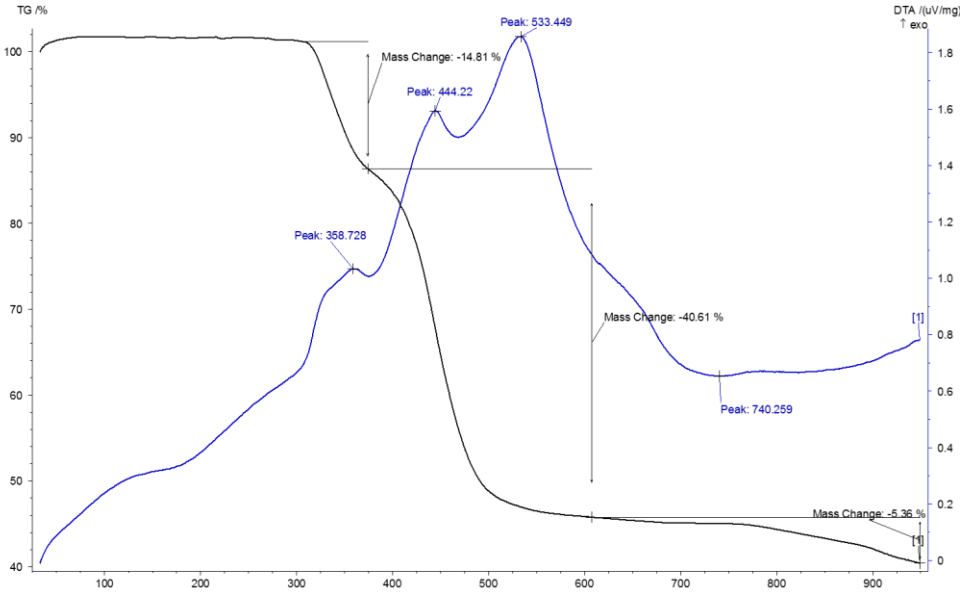
+ Thời gian hoạt động của máy lái: 5 phút.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Đặc trưng tính chất vật liệu bôi trơn màng rắn

*3.1.1. Tính chất nhiệt của màng bôi trơn rắn*

Kiểm tra độ bền nhiệt được thực hiện bằng phép phân tích nhiệt mẫu vật liệu trong môi trường không khí. Giản đồ phân tích nhiệt của mẫu được ghi lại trên hình 3 dưới đây.




***Hình 3.*** *Giản đồ phân tích nhiệt của mẫu màng bôi trơn rắn trong không khí.*

Trên giản đồ nhiệt của mẫu màng bôi trơn, dựa trên hệ polisiloxan và $MoS_2$ cho thấy điểm bắt đầu giảm khối lượng được kéo dài lên đến nhiệt độ ~310 $^oC$ (phản ứng polime hóa) và phản ứng cháy bắt đầu xảy ra ở nhiệt độ khoảng 400 $^oC$. Điều này cho thấy, $MoS_2$ có khả năng làm tăng độ bền nhiệt của polisiloxan trong hệ tạo màng. Nguyên nhân của hiện tượng này có thể là do $MoS_2$ tạo ra môi trường axit nhẹ (pH = 5), làm giảm nồng độ của ion $OH^-$ (tác nhân thúc đẩy phản ứng đề polime hóa) có trong hệ. Mặt khác, nguyên tử oxy trong phân tử polysiloxan có độ âm điện cao (3,5) và còn cặp electron chưa tham gia vào việc hình thành liên kết. Nguyên tử oxy này tạo nên liên kết giả hóa học với nguyên tử Mo trong phân tử $MoS_2$. Đó là lý do tại sao mặc dù polisiloxan được lựa chọn làm chất kết dính chỉ bền đến nhiệt độ 200 $^oC$ nhưng màng bôi trơn rắn trên polysiloxane vẫn có khả năng chịu được đến ~380 $^oC$.

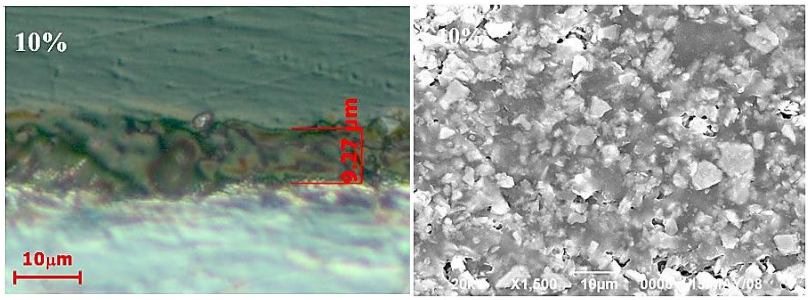
Từ khoảng nhiệt độ 400-500 $^oC$, mẫu màng bôi trơn rắn giảm khối lượng đột ngột. Ở khoảng nhiệt độ này không chỉ phản ứng oxy hóa polisiloxan xảy ra mà còn có phản ứng oxy hóa $MoS_2$ tạo các oxit của molipđen ($MoO_2$, $MoO_3$).

Ở 950 $^oC$, khối lượng màng bôi trơn rắn còn lại ~40%, nghĩa là màng vẫn chưa bị phá hủy hoàn toàn. Tuy nhiên, ở ~530 $^oC$ đối với mẫu màng bôi trơn rắn (hình 3) đã có phản ứng oxy hóa $MoS_2$ mà sản phẩm là các oxit của molipđen, đây là các hợp chất không có tính năng bôi trơn. Chính vì thế, hệ tạo màng bôi trơn rắn này áp dụng được cho các chi tiết làm việc ở nhiệt độ cho phép là <530 $^oC$ và tối ưu là < 360 $^oC$.

*3.1.2. Đặc trưng lớp màng bôi trơn rắn*

Chiều dày màng và hình thái bề mặt của màng bôi trơn rắn được thể hiện trên hình 4

dưới đây cho thấy chiều dày màng khá mỏng < 10 μm với kích thước hạt bôi trơn trung bình $MoS_2$ khoảng 4 μm được tạo màng liên kết đặc sít có cấu trúc dạng lá mỏng cho phép tạo bề mặt phẳng, trơn và có khả năng chống ăn mòn, mài mòn và giảm được ma sát sinh ra trên bề mặt vật liệu nền.




***Hình 4.*** *Chiều dày và ảnh SEM của màng bôi trơn rắn hệ polysiloxane-$MoS_2$.*

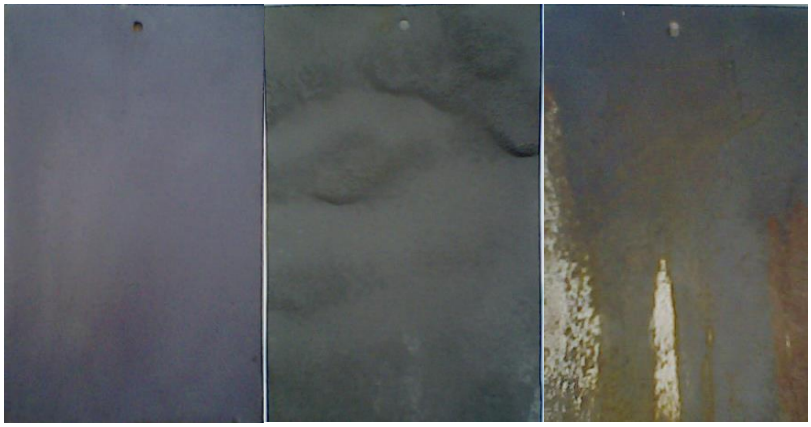
### 3.2. Khả năng giảm ma sát và hiệu quả bảo vệ của màng bôi trơn rắn

*3.2.1. Khả năng giảm ma sát của màng bôi trơn rắn*

Để đánh giá khả năng giảm ma sát của mẫu đã tạo màng được tiến hành như mô tả ở mục 2.2.2 đã đề cập ở phần trên. Góc α đo được tại thời điểm mẫu bắt đầu trượt trên mặt phẳng nghiêng, giá trị góc càng nhỏ thì khả năng giảm ma sát của màng càng cao. Kết quả thu được của mẫu màng bôi trơn được hình thành trên nền kim loại với giá trị góc trượt tương ứng là α đạt $15^o$ so với nền vật liệu chưa phủ màng đạt $42^o$. Theo công thức đã đề xuất áp dụng, độ giảm ma sát được so sánh tương ứng là: $\mu_2 = \frac{\sin\alpha_2}{\sin\alpha_1}\mu_1$ nghĩa là $\mu_2 = 0{,}387\ \mu_1$.

Điều này cho thấy, khả năng giảm ma sát của màng bôi trơn hệ polysiloxane-$MoS_2$ cho nền vật liệu kim loại đạt khoảng 2,58 lần so với nền kim loại chưa phủ màng bôi trơn rắn.

*3.2.2. Hiệu quả bảo vệ ăn mòn của màng bôi trơn rắn*



***Hình 5.*** *Mẫu thử nghiệm trước ngâm, sau ngâm 14 ngày và 18 ngày.*

Hiệu quả bảo vệ vật liệu khỏi quá trình ăn mòn cho vật liệu được tiến hành bằng cách ngâm mẫu vật liệu sau khi phủ màng bôi trơn rắn trong dung dịch NaCl 3,5% là dung dịch gia tốc quá trình ăn mòn. Sau mỗi 24 giờ, nhấc mẫu ra khỏi dung dịch để kiểm tra màng. Kết quả được ghi nhận tại hình 5 dưới đây cho thấy bề mặt màng đến thời điểm

sau 14 ngày vẫn không bị thấm ướt, không xuất hiện gỉ, màng bôi trơn bắt đầu phồng rộp nhẹ. Đến thời gian thử nghiệm là 18 ngày màng không thấm ướt nhưng đã bị phồng rộp, bong tróc, xuất hiện những vết gỉ với từng mảng rộng.

### 3.3. Thử nghiệm trên chi tiết chịu ma sát trong tổ hợp tên lửa

Kết quả thử nghiệm màng bôi trơn rắn trên vòng bi rơle phân cực máy lái tên lửa 3M-24E cho thấy tác dụng của màng bôi trơn cho phép vòng bi hoạt động tốt, đạt các thông số kỹ thuật của máy lái sau:

- Độ trễ của thiết bị $\tau = 30$ ms;
- Thời gian quá độ t = 180 - 220 ms;
- Đường đặc tính của quá trình quá độ thu được không có tín hiệu nhiễu, không có dao động và không có quá chỉnh ($\lambda < 5\%$);
- Độ bền nhiệt của màng bôi trơn nằm trong khoảng nhiệt độ hoạt động của máy lái: $260 \div 300\ ^oC$;
- Thời gian hiệu lực của màng đáp ứng thời gian hoạt động của máy lái: 5 phút;
- Rơle phân cực của máy lái hoạt động tốt.

Kết quả này được đánh giá đối chứng với quá trình hoạt động của thiết bị trong điều kiện không sử dụng màng bôi trơn. Đường đặc tính của thiết bị khi hoạt động không có mặt của màng bôi trơn trong chi tiết vòng bi thu được với tín hiệu nhiễu, quá chỉnh vượt quá mức độ cho phép (> 5%).

Với kết quả này màng bôi trơn rắn hệ polysiloxane-$MoS_2$ cho phép ứng dụng cho vòng bi rơle phân cực là chi tiết chịu ma sát ở nhiệt độ cao trong thiết bị máy lái tên lửa 3M-24E thuộc tổ hợp tên lửa đối hải URAN-E nói riêng và các chi tiết chịu ma sát hoạt động trong điều kiện khắc nghiệt của các tổ hợp trang bị kỹ thuật quân sự khác. Màng bôi trơn cho phép chi tiết chịu ma sát hoạt động trong khoảng nhiệt độ $260 \div 300\ ^oC$ và thời gian là 5 phút (thời gian làm việc theo yêu cầu kỹ thuật của thiết bị) cho đường đặc tính ổn định trong quá trình hoạt động.

## 4. KẾT LUẬN

Hệ tạo màng bôi trơn rắn có thành phần bao gồm: 10% $MoS_2$, 40% polysiloxane, 25% toluen và 25% axeton đã được phối trộn bằng kỹ thuật nghiền cơ hoá học. Hạt bôi trơn $MoS_2$ được lựa chọn trong thành phần hệ có kích thước hạt khoảng 4 μm tạo được màng có chiều dày đủ mỏng (<10 μm) và hình thái bề mặt phù hợp (dạng lá xếp sít chặt) đáp ứng yêu cầu bôi trơn và thiết kế cho các chi tiết làm việc trong điều kiện khắc nghiệt về nhiệt độ, áp suất và tải trọng lớn. Hệ bôi trơn màng rắn được thử nghiệm trên vòng bi rơle phân cực máy lái tên lửa 3M-24E cho thấy máy lái hoạt động tốt, đặc biệt độ trễ của tín hiệu thấp, đảm bảo tính chính xác cho việc truyền điều khiển.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Anurag Singh, Neeraj Verma, T.G. Mamatha, Alok Kumar, Saurabh Singh, Kaushal Kumar, *"Properties, functions and applications of commonly used lubricant additives: A review"*, Materials Today: Proceedings 44 (2021) 5018-5022.

[2]. M. S. Charooa, M. F. Wanib, M. Haniefc, M. A. Rather, *"Tribological Properties of $MoS_2$ Particles as Lubricant Additive on EN31 Alloy Steel and AISI 52100 Steel Ball"*, Materials Today: Proceedings 4 (2017) 9967-9971.

[3]. Panahsadat Fasihi, Olivia Kendall, Ralph Abrahams, Peter Mutton, Quan Lai, Cong Qiu, Wenyi Yan, *"Effect of graphite and $MoS_2$ based solid lubricants for application at wheel-rail interface on the wear mechanism and surface morphology of hypereutectoid rails"*, Tribology International 157 (2021) 106886.

[4]. Julian Somberg, Prabakaran Saravanan, Hari Shankar Vadivel, Kim Berglund, Yijun Shi, Jan Ukonsaari, Nazanin Emami, *"Tribological characterisation of polymer composites for hydropower bearings: Experimentally developed versus commercial materials"*, Tribiology International, Available online 20 May (2021) 107101.

[5]. Meghashree Padhan, Umesh Marathe, Jayashree Bijwe, *"Tribology of Poly(etherketone) composites based on nano-particles of solid lubricants"*, Composites Part B 201 (2020).

[6]. Kian Bashandeh, Vasilis Tsigkis, Pixiang Lan, Andreas A. Polycarpou, *"Extreme environment tribological study of advanced bearing polymers for space applications"*, Tribology International 153 (2021) 106634.

[7]. Unni Krishnana, Manjot Kaura, Kulwinder Singha, Manjeet Kumarb, Akshay Kumar, *"A synoptic review of $MoS_2$: Synthesis to applications"*, Superlattices and Microstructures 128 (2019) 274-297.

[8]. Deepika Gupta, Vishnu Chauhan, Rajesh Kumar, *"A comprehensive review on synthesis and applications of molybdenum disulfide ($MoS_2$) material: Past and recent developments"*, Inorganic Chemistry Communications 121 (2020) 108200.

[9]. Jyoti Prakash Singh, Shiva Singh, Tandra Nandi, Subrata Kumar Ghosh, *"Development of graphitic lubricant nanoparticles based nanolubricant for automotive applications: Thermophysical and tribological properties followed by IC engine performance"*, Powder Technology 387 (2021) 31-47.

[10]. Vineet Sharma, Rajat Joshi, Himanshu Pant, Vipin Kumar Sharma, *"Improvement in frictional behaviour of SAE 15W-40 lubricant with the addition of graphite particles"*, Materials Today: Proceedings 25 (2020) 719-723.

## ABSTRACT

### STUDY ON THE APPLICATION OF POLYSILOSANE-MoS2 FOR SOLID LUBRICANT FOR ROLLER BEARING ON THE STEERING MACHINE OF 3M-24E ROCKET

*In this study, polysiloxane-$MoS_2$ composite has been mixed by mechanical grinding method. As-prepared composite materials were characterized by SEM, and TGA techniques. The effectiveness of $MoS_2$-based solid lubricants were experimentally assessed. This research correlated the evolution of coefficient of tribology to in-depth wear surface morphology and structure. The lubricating potential of these solid lubricants to reduce wear and thereby extend the operation life of rail components was comprehensively evaluated. The polysiloxane-$MoS_2$-based lubricant was able to reduce the coefficient of tribology and improve the wear resistance considerably.*

**Keywords:** Friction; Solid lubrication; $MoS_2$; 3M-24E missile.

*Nhận bài ngày 20 tháng 7 năm 2021*
*Hoàn thiện ngày 22 tháng 9 năm 2021*
*Chấp nhận đăng ngày 24 tháng 9 năm 2021*

*Đơn vị:* Viện Hoá học - Vật liệu, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.
*Email: hoaiphuong.1978@gmail.com.