

ĐÁNH GIÁ ĐẶC TÍNH CHỐNG MÒN CỦA DẦU BÔI TRƠN CÔNG NGHIỆP TRONG ĐIỀU KIỆN LÀM VIỆC THEO TIÊU CHUẨN ASTM

EVALUATION OF ANTI-WEAR PROPERTIES OF INDUSTRIAL LUBRICANTS UNDER ASTM WORKING CONDITIONS

Bùi Tuấn Anh^{1*}, Đào Tiến Cường¹, Nguyễn Mạnh Toàn¹,
Trần Văn Thực¹, Nguyễn Quốc Dũng²

DOI: <https://doi.org/10.57001/huic5804.2023.108>

TÓM TẮT

Khả năng chống mòn và hư hỏng trên bề mặt chi tiết của dầu bôi trơn là rất quan trọng trong các ứng dụng công nghiệp. Nghiên cứu này trình bày kết quả nghiên cứu, đánh giá tính chống mòn của một số loại dầu bôi trơn công nghiệp (A, B và C) với điều kiện làm việc theo tiêu chuẩn ASTM. Kết quả cho thấy dầu A có hiệu suất chống mòn tốt hơn so với dầu B và C trong cùng điều kiện làm việc. Dầu A cũng cho thấy đặc tính ổn định trong quá trình thử nghiệm, với sự khác biệt rất nhỏ về khối lượng các viên bi trước và sau thí nghiệm. Chiều rộng vết xước trên các viên bi cũng nhỏ nhất. Ngoài ra, các thông số kỹ thuật khác như độ nhớt, chỉ số độ nhớt, và điểm chớp cháy không ảnh hưởng đáng kể đến tính chống mòn của dầu bôi trơn trong điều kiện làm việc này. Nghiên cứu này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc lựa chọn đúng loại dầu bôi trơn để giảm thiểu hư hỏng bề mặt do mòn, góp phần đảm bảo hiệu suất và tuổi thọ của các bộ phận máy móc.

Từ khóa: Dầu bôi trơn, chống mòn, ASTM, máy ma sát bốn bi.

ABSTRACT

The ability of lubricants to prevent surface damage and wear is critical in various industrial applications. This study presents an evaluation of the anti-wear performance of some industrial lubricating oils (A, B, and C) with working conditions according to ASTM standards. The results show that oil A has better anti-wear performance than oil B and C under the same working conditions. Oil A also showed stable characteristics during the testing process, with minimal weight differences and scratch widths of the test ball before and after the experiment. In addition, other specifications such as viscosity, viscosity index, pour point, and flash point do not significantly affect the wear resistance of the lubricating oil under these operating conditions. This research highlighted the importance of selecting the right lubricant to minimize wear surface damage, contributing to the performance and longevity of machine components.

Keywords: Lubricant, anti-wear, ASTM, four-ball machine.

¹Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Trường Cao đẳng Công nghiệp Thái Nguyên

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

Ngày nhận bài: 21/3/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 21/4/2023

Ngày chấp nhận đăng: 15/6/2023

1. GIỚI THIỆU

Dầu bôi trơn có vai trò như một lớp đệm nhớt nằm giữa bề mặt tiếp xúc của các chi tiết máy có chuyển động tương đối, giúp giảm thiểu ma sát và mòn, có khả năng làm mát và chống gỉ sét cho các bề mặt tiếp xúc, tăng hiệu suất vận hành của máy cũng như tuổi thọ và độ tin cậy thiết bị. Trong quá trình hoạt động, dầu bôi trơn phải chịu tác động của nhiệt độ, tốc độ lão hóa dầu, môi trường bên ngoài và những yếu tố khác, ảnh hưởng đến khả năng bôi trơn và tuổi thọ của dầu. Để nâng cao khả năng tải cũng như tính bền nhiệt của dầu bôi trơn người ta đã tiến hành bổ sung các chất phụ gia. Một số nghiên cứu đã công bố trình bày về đặc tính bôi trơn của dầu khi thêm phụ gia nano Al_2O_3 [1, 2]. Việc thêm các vật liệu nano như nano oxit nhôm vào dầu bôi trơn sẽ dẫn đến thay đổi tính chất lưu biến của dầu. Hạt nano oxit nhôm (kích thước khoảng 80nm) đã được thêm vào dầu bôi trơn thương mại [1]. Các tính chất lưu biến nói chung và độ nhớt động lực nói riêng của hỗn hợp nano oxit nhôm và dầu gốc đã được thực hiện ở các tỉ lệ phần trăm phụ gia và nhiệt độ khác nhau. Kết quả của các thí nghiệm chỉ ra rằng phụ gia nano oxit nhôm đã làm thay đổi độ nhớt động của dầu. Kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra các tỉ lệ và nhiệt độ của phụ gia nano oxit nhôm được thêm vào dầu bôi trơn để đảm bảo tính bôi trơn tốt. Mặt khác, hỗn hợp dầu bôi trơn và phụ gia nano oxit nhôm Al_2O_3 cũng là đối tượng để nghiên cứu ảnh hưởng của nó đến áp suất thủy động và khả năng chịu tải của ổ. Các kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng phụ gia nano Al_2O_3 đã tạo ra sự thay đổi đáng kể trong biểu đồ áp suất thủy động xung quanh chu vi của ổ, dẫn đến sự gia tăng đáng kể về khả năng chịu tải của ổ [2]. Năm 2018, Harshkumar Patel và cộng sự đã công bố nghiên cứu ảnh hưởng của các phần tử nano CuO , Fe_2O_3 , NiO và nhiệt độ đến độ nhớt của dầu công nghiệp. Các tác giả tiến hành thí nghiệm với các tỉ lệ nano oxit khác nhau, đồng thời với điều kiện nhiệt độ thay đổi từ 27 - 71°C, với dầu có độ nhớt 77 và 350PaS. Kết quả cho thấy ảnh hưởng của các yếu tố này đến độ nhớt của hỗn hợp dầu, theo đó đã làm giảm độ nhớt của dầu 50 - 70% tùy

theo tỉ lệ nano oxit kim loại [3]. Harshkumar Patel cho rằng, độ nhớt của hỗn hợp dầu nặng giảm sẽ giảm từ 20 - 93% tùy theo tỷ lệ pha trộn dung dịch nhũ tương vào dầu bôi trơn [4]. Trong một nghiên cứu của Yousef Hamed Shokrlu và cộng sự năm 2014, các tác giả chỉ ra sự suy giảm độ nhớt phụ thuộc vào mật độ các các phần tử micro hoặc nano kim loại và kích thước của các phần tử này [5]. Yudong Shen và cộng sự cho rằng các hạt nano SiO₂ có thể gây ra hiện tượng ma sát lẫn trên bề mặt ma sát, làm giảm ma sát [6]. Yashvir Singh và cộng sự đã phát triển một loại dầu thân thiện với môi trường có khả năng bôi trơn tốt hơn. Các tác giả đã thêm vào dầu Madhuca indica oxit SiO₂ để cải thiện tính chất nhiệt lý và hiệu suất ma sát học, giảm hệ số ma sát và tốc độ mòn [7]. Trong một nghiên cứu của Can Wu và cộng sự, các tác giả đã cho thấy một nghiên cứu về việc sử dụng hạt nano composite nhân mềm vỏ cứng (ZnO@SiO₂) được tổng hợp bằng phương pháp hóa học như một phụ gia mới trong mỡ bôi trơn, dẫn đến giảm đáng kể hệ số ma sát và đường kính vết mòn khi thêm vào với tỷ lệ 1% và tạo thành một lớp màng bôi trơn pha rắn - lỏng, qua đó cải thiện các tính chất ma sát học của các loại mỡ truyền thống [8].

Các nghiên cứu đều cho thấy độ nhớt giảm do sự có mặt của các phần tử oxit nano kim loại và các loại oxit này là hậu quả của mài mòn, rơi vào vùng bôi trơn một cách tự nhiên. Ngoài ra, các nghiên cứu [9-14] cũng mô tả ảnh hưởng của các loại phụ gia nano tới một số tính chất bôi trơn của một số loại dầu công nghiệp. Các nghiên cứu đã sử dụng phụ gia oxit kim loại cho dầu bôi trơn công nghiệp đều cho thấy rằng các phụ gia này có thể cải thiện tính chất bôi trơn của dầu và tăng tuổi thọ của các bộ phận máy móc.

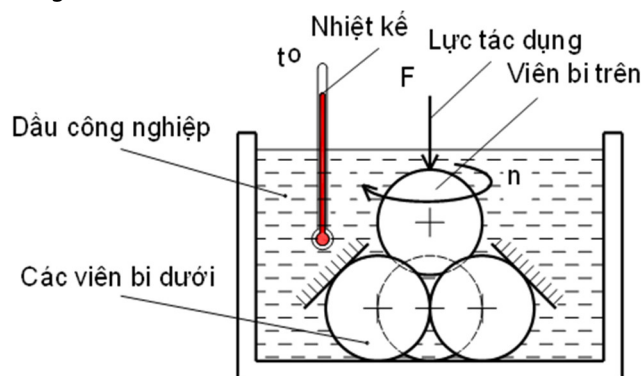
Tiêu chuẩn thử nghiệm đặc tính chống mòn dầu bôi trơn ASTM D-4172 của Mỹ là tiêu chuẩn được sử dụng cho các nhà khoa học, kỹ thuật trong việc nghiên cứu đánh giá khả năng tải của dầu, tính bền nhiệt... thông qua diện tích vết mòn của bốn viên bi trong máy ma sát bốn bi. Thử nghiệm được tiến hành trong điều kiện khắt khe về nhiệt độ, tải tác dụng cũng như thời gian hàn dính các viên bi khi độ nhớt của dầu không còn khả năng tách ly các bề mặt ma sát. Ở nghiên cứu này, tiêu chuẩn ASTM D-4172 phù hợp để làm cơ sở đánh giá đặc tính chống mòn của dầu công nghiệp, để có thể lựa chọn loại dầu bôi trơn phù hợp nhất với điều kiện làm việc nhất định.

2. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

Để đánh giá các tính chất ma sát nhất định của dầu bôi trơn theo tiêu chuẩn ASTM D4172, thiết bị thí nghiệm và các tham số thí nghiệm được chuẩn bị và lập kế hoạch. Các tham số chính được bao gồm: (1) Nhiệt độ dầu được duy trì ổn định ở mức 75°C với sai số cho phép là ±2°C; (2) Tốc độ quay của bi trên là 1200 vòng/phút với sai số cho phép là ±60 vòng/phút; (3) Thời gian thí nghiệm là 60 phút với sai số cho phép là ±1 phút; (4) Tải được áp dụng lên bi là 392 N với sai số cho phép là ±2N. Sơ đồ nguyên lý máy ma sát bốn bi được minh họa trong hình 1.

Mỗi thí nghiệm được thực hiện với bốn viên bi (chất liệu thép cứng với đường kính 12,7mm). Ba viên bi được đặt

trên một mặt phẳng ngang, tiếp xúc với nhau và được cố định trong suốt quá trình thí nghiệm. Viên bi thứ tư được sắp xếp ở phía trên tiếp xúc với ba viên bi dưới. Các viên bi này được ngâm trong dầu thí nghiệm. Thí nghiệm được thực hiện bằng cách gia nhiệt và điều chỉnh ổn định nhiệt độ dầu bằng hệ thống cảm biến nhiệt độ. Tải trọng được tác dụng lên viên bi trên theo hướng từ trên xuống dưới. Một chuyển động quay được truyền cho viên bi trên vuông góc với mặt phẳng được hình thành bởi ba viên bi. Để đảm bảo đủ mẫu cho các thí nghiệm đã được lên kế hoạch từ trước, các viên bi được chuẩn bị đầy đủ về số lượng, được làm sạch và kiểm tra về kích thước cũng như độ cứng bề mặt trước khi lắp đặt vào máy thí nghiệm. Sau mỗi thí nghiệm, các viên bi được phân loại để tiến hành đo đạc các thông số cần thiết.



Hình 1. Nguyên lý hoạt động thiết bị ma sát bốn bi

Dầu thí nghiệm

Dầu công nghiệp được lựa chọn trong các thí nghiệm này có các đặc tính kỹ thuật chính được liệt kê trong bảng 1. Theo đó, để không ảnh hưởng đến danh tiếng của các loại dầu công nghiệp thương mại, ba loại dầu công nghiệp được gán tên tương ứng là A, B và C.

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật chính của dầu A, B và C

Thông số	Phương pháp thử	Đơn vị	Dầu A	Dầu B	Dầu C
Khối lượng riêng ở 15°C	ASTM D4052	g/ml	0,852	0,68	0,890
Độ nhớt động học ở 100°C	ASTM D445	mm ² /s	11,9	14,6	18,1
Độ nhớt động học ở 40°C	ASTM D445	mm ² /s	65	126	165
Chỉ số độ nhớt	ASTM D2270	-	183	117	120
Điểm rót chảy	ASTM D97	°C	-45	-	-24
Cleveland	ASTM D92	°C	234	205	226
Độ tro sun-phát	ASTM D874	%	1,2	0,88	0,9

Như chúng ta đã biết, khi thiết bị làm việc ở môi trường có nhiệt độ thấp, dầu có thể bị đông đặc dẫn tới khó khăn khi khởi động (chi tiết máy ma sát trực tiếp mà không được bôi trơn). Do đó các nhà nghiên cứu đã đưa thêm chất phụ gia đặc biệt giúp giảm sự phụ thuộc độ nhớt dầu bôi trơn vào nhiệt độ môi trường - dầu đa cấp - giúp động cơ có khả năng khởi động ở nhiệt thấp mà vẫn đảm bảo bôi trơn. Quá trình khởi động chỉ là một giai đoạn ngắn trong tổng thể thời gian làm việc của động cơ. Khi động cơ làm việc ở giai

đoạn ổn định (nhiệt độ từ 40°C - 100°C) sự phụ thuộc của độ nhớt vào nhiệt độ được xem là mối quan hệ tuyến tính. Vì vậy, hoàn toàn có thể xác định mối quan hệ độ nhớt vào nhiệt độ của dầu đa cấp là mối quan hệ bậc nhất.

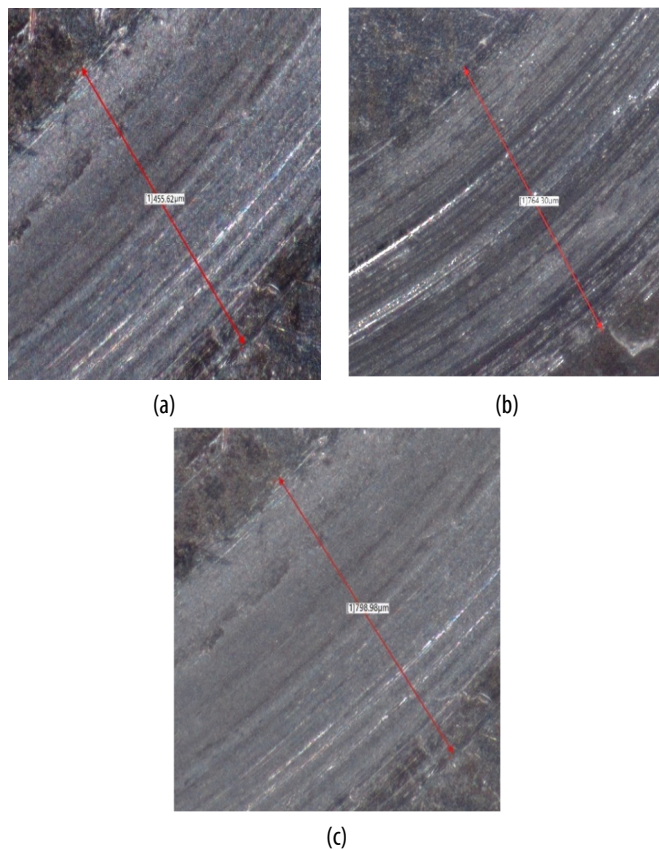
Độ nhớt là một trong những chỉ tiêu mà ảnh hưởng của nó là tương đối quan trọng đến chất lượng bôi trơn, thể hiện qua vết xước trong thí nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM D472. Tuy nhiên, nếu chỉ đánh giá đặc tính bôi trơn trên cơ sở chỉ tiêu về độ nhớt của dầu có thể là một sai lầm bởi nhiều nghiên cứu đã đưa ra ảnh hưởng của chất phụ gia đến đặc tính bôi trơn của dầu - Điều này thể hiện ở sự công bố các thông số dầu đưa ra bởi nhà sản xuất.

Ở nghiên cứu này, mỗi thí nghiệm được thực hiện trong 60 phút với điều kiện làm viẹt theo ASTM được thiết lập trên máy ma sát bốn bi. Sau mỗi thí nghiệm, các viên bi được làm sạch và đo đặc kích thước vết xước trên bề mặt tiếp xúc của các viên bi dưới để đánh giá hiệu quả bôi trơn của dầu. Trình tự thí nghiệm này được lặp lại với mỗi lần thử cho các loại dầu khác nhau.

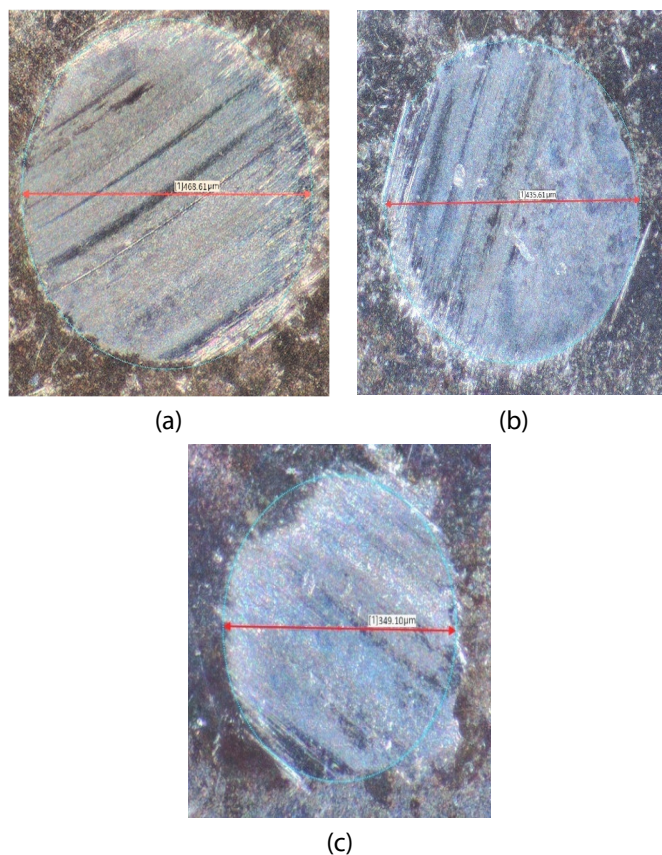
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Tiến hành đo kích thước vết xước các bi trong các thí nghiệm bằng thiết bị đo kính hiển vi. Kết quả kích thước đường kính vết xước của mỗi viên bi dưới trong mỗi thí nghiệm được thống kê lại phục vụ cho việc tính toán và xử lý số liệu. Mỗi thí nghiệm được lặp lại ba lần, do đó, các thông số viên bi trước khi thí nghiệm là giá trị trung bình của các viên bi được chọn cho mỗi thí nghiệm. Kết quả đo sau khi thí nghiệm cũng là giá trị trung bình của các mẫu cần đo. Hình ảnh mô tả kích thước vết xước bi trên và bi dưới cho ba loại dầu A, B và C tương ứng chỉ ra trong hình 2, 3. Theo đó, các thông số về bề rộng vết xước của các viên bi phía trên và đường kính vết xước của các viên bi phía dưới được quan sát và đo đạc nhằm đánh giá khả năng chống mòn vật liệu của các loại dầu bôi trơn.

Để đánh giá đặc tính ma sát trong điều kiện bôi trơn với một số loại dầu công nghiệp theo điều kiện thí nghiệm được mô tả trong tiêu chuẩn ASTM 4172, khối lượng trung bình và độ lệch chuẩn các viên bi trước và sau thí nghiệm được liệt kê trong bảng 2, hình 4 mô tả trực quan hơn khả năng chống mòn của ba loại dầu bôi trơn. Theo đó, có thể thấy rằng, sau khoảng thời gian làm việc, các viên bi sẽ bị mòn và thể hiện ở việc khối lượng các viên bi giảm đi, các viên bi đều giảm khoảng 0,001 - 0,002g. Tuy nhiên, với mỗi loại dầu công nghiệp được sử dụng cho thấy sự phân bố khối lượng cũng khác nhau. Hầu hết các thí nghiệm đều cho thấy, giá trị giảm khối lượng trung bình của các viên bi là 0,001g, trừ trường hợp thực nghiệm với dầu C, khối lượng trung bình cá viên bi đều giảm 0,002g. Điều này có thể do đặc trưng độ nhớt của dầu khác nhau. Theo đó, độ nhớt của dầu C lớn nhất, khả năng ngăn cách giữa các bề mặt ma sát bằng lớp chất bôi trơn ở giai đoạn đầu khó khăn hơn so với các loại dầu có độ nhớt thấp hơn. Có thể là nguyên nhân dẫn đến hiện tượng ma sát trượt giữa các bề mặt, làm tăng tốc độ mòn vật liệu của cặp ma sát.



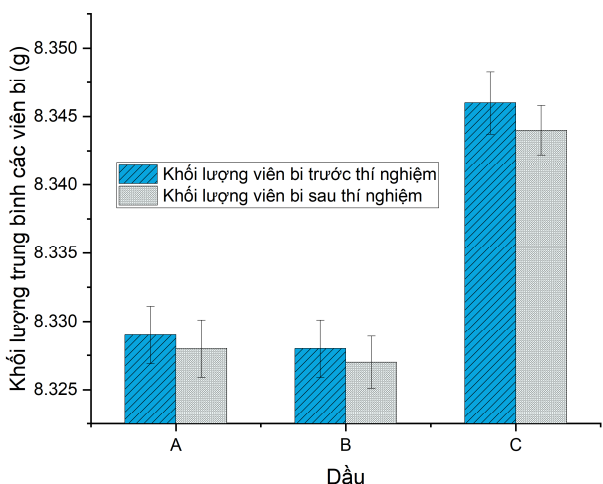
Hình 2. Vết xước viên bi trên: (a) Dầu A; (b) Dầu B; (c) Dầu C



Hình 3. Vết xước viên bi dưới: (a) Dầu A; (b) Dầu B; (c) Dầu C

Bảng 2. Khối lượng trung bình viên bi trước và sau thí nghiệm

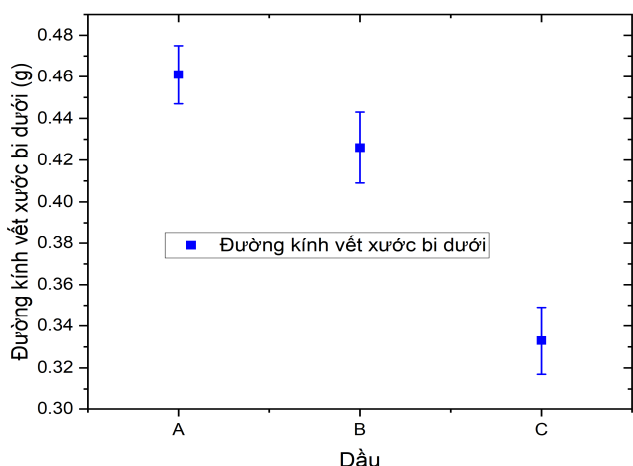
Dầu	Khối lượng viên bi trước thí nghiệm (g)		Khối lượng viên bi sau thí nghiệm (g)	
	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
A	8,329	0,0021	8,328	0,0021
B	8,328	0,0021	8,327	0,0019
C	8,346	0,0023	8,344	0,0018



Hình 4. Khối lượng trung bình các viên bi trước và sau khi thí nghiệm với các loại dầu A, B, C

Bảng 3. Đường kính trung bình vết xước viên bi dưới

Dầu	Đường kính vết xước bi dưới (mm)	Độ lệch chuẩn
A	0,461	0,014
B	0,426	0,017
C	0,333	0,016



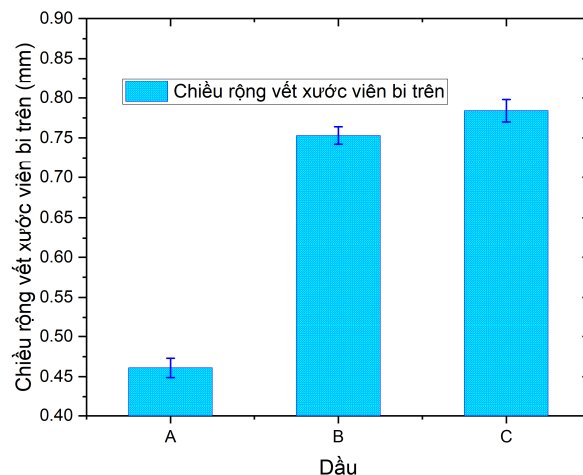
Hình 5. Đường kính vết xước viên bi dưới sau khi thí nghiệm với các loại dầu A, B, C

Để đánh giá tốt hơn khả năng chống mòn bề mặt chi tiết của các loại dầu thông qua việc xem xét các vết xước viên bi trong điều kiện thí nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM.

Kích thước vết xước các bi dưới được xác định là đường kính trung bình và độ lệch chuẩn, được liệt kê trong bảng 3 và mô tả trong hình 5. Tương tự, đối với các bi trên, bề rộng vết xước cũng được đo đạc và tính giá trị trung bình cùng độ lệch chuẩn và liệt kê trong bảng 4 và mô tả trên hình 6.

Bảng 4. Chiều rộng vết xước trung bình các viên bi trên

Dầu	Chiều rộng vết xước (mm)	Độ lệch chuẩn
A	0,461	0,012
B	0,753	0,011
C	0,784	0,014



Hình 6. Chiều rộng vết xước viên bi trên sau khi thí nghiệm với các loại dầu A, B, C

Từ kết quả trong bảng 3 và hình 5, ta thấy rằng khi bôi trơn bằng dầu C cho kích thước vết mòn nhỏ nhất, điều này dường như cho thấy khả năng chống mòn của nó tốt nhất trong số ba loại dầu. Tuy nhiên, kết quả chỉ ra ở bảng 4 và hình 6 về thông số về chiều rộng vết xước và độ lệch chuẩn của vết xước các viên bi trên cần được đánh giá ở khía cạnh khác. Có thể thấy rằng, vết xước viên bi trên trong trường hợp dầu C lại lớn hơn nhiều so với dầu A, mặc dù độ nhớt động học trong vùng nhiệt độ làm việc của dầu A và B không khác nhau nhiều. Nếu xem xét ở góc độ này, có thể thấy dầu A có khả năng chống mòn trong điều kiện làm việc theo tiêu chuẩn ASTM, điều này có thể giải thích rằng, độ nhớt thấp của dầu A làm khả năng điền đầy giữa các bề mặt ma sát tốt hơn trong giai đoạn làm việc ban đầu, dẫn đến khả năng giảm ma sát và mài mòn. Đồng thời, độ lệch chuẩn trong kích thước vết mòn cũng cần được xem xét, vì nó cho thấy sự đồng nhất trong kết quả đo lường. Trong trường hợp này, độ lệch chuẩn của dầu B khi thêm phụ gia tro bay giảm đáng kể, cho thấy kết quả đo lường của dầu A và B là đáng tin cậy hơn. Từ các dữ liệu về dầu liệt kê trong bảng 1 có thể thấy rằng ở nhiệt độ 75°C, tất cả ba loại dầu đều đạt được mức độ nhớt động học mong muốn để sử dụng trong ứng dụng bôi trơn. Tuy nhiên, dầu C có độ nhớt động học cao nhất ở cả 40°C và 100°C, cho thấy khả năng chịu tải và bôi trơn tốt hơn so với hai loại dầu còn lại. Mặt khác, chỉ số độ nhớt của dầu C cũng khá cao, cho thấy tính

ổn định độ nhớt của nó khi hoạt động ở nhiều nhiệt độ khác nhau. Về khả năng chống oxy hóa, độ tro sun phát của dầu B thấp nhất, cho thấy nó có khả năng chống oxy hóa tốt hơn so với hai loại dầu còn lại. Kết quả thí nghiệm trên viên bi cho thấy rằng dầu A có khả năng bôi trơn tốt nhất, vì khối lượng viên bi sau thí nghiệm ít hơn so với khối lượng viên bi trước thí nghiệm. Ngoài ra, dầu A cũng có chiều rộng vết xước trên viên bi nhỏ nhất, cho thấy khả năng chống mòn tốt hơn so với hai loại dầu còn lại. Như vậy, từ các kết quả trên, có thể lựa chọn dầu A làm dầu bôi trơn trong điều kiện làm việc theo ASTM. Khi đó, khả năng chống lại sự mài mòn trên bề mặt chi tiết trong quá trình làm việc được đảm bảo, điều này góp phần làm tăng tuổi thọ và độ tin cậy làm việc của thiết bị, máy móc.

4. KẾT LUẬN

Thông qua việc đánh giá đặc tính chống mòn của một số loại dầu bôi trơn công nghiệp trong điều kiện làm việc theo tiêu chuẩn ASTM, có thể rút ra các kết luận sau: (1) Kết quả thử nghiệm chỉ ra rằng dầu A cho thấy hiệu suất chống mòn tốt hơn so với dầu B và C trong cùng điều kiện làm việc được quy định bởi tiêu chuẩn ASTM; (2) Dầu A cũng cho thấy đặc tính khá ổn định trong quá trình thử nghiệm, theo đó khối lượng viên bi trước và sau thí nghiệm không có sự khác biệt đáng kể và vết xước trên viên bi cũng có chiều rộng nhỏ nhất trong các loại dầu; (3) Các thông số kỹ thuật khác như độ nhớt, chỉ số độ nhớt, điểm rót chảy, độ tro sun-phát không có mối quan hệ trực tiếp với đặc tính chống mòn của dầu bôi trơn trong điều kiện làm việc được quy định bởi tiêu chuẩn ASTM. Tóm lại, dựa trên các kết quả thí nghiệm được đưa ra, có thể khẳng định rằng dầu A là lựa chọn tốt hơn trong ba loại dầu thí nghiệm, sử dụng trong các ứng dụng đòi hỏi tính chống mòn cao trong điều kiện làm việc theo tiêu chuẩn ASTM, góp phần đảm bảo tuổi thọ và độ tin cậy của thiết bị, máy móc trong quá trình làm việc.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo, trong đề tài mã số B2021-BKA-13.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Tuan-Anh Bui, Van-Hung Pham, Ngoc-Tam Bui, Manh-Toan Nguyen, 2020. *Effect of Al₂O₃ nanoparticle on rheological properties of oil*. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, vol. 10.
- [2]. Tuan-Anh Bui, Duc-Do Le, Van-Hung Pham, Ngoc-Tam Bui, Manh-Toan Nguyen, 2020. *A study of Al₂O₃ nanoparticle effect on lubricant to hydrodynamic journal bearing*. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, vol. 10.
- [3]. Harshkumar Patel, Subhash Shah, Ramadan Ahmed, Sezai Ucan, 2018. *Effects of nanoparticles and temperature on heavy oil viscosity*. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 167, pp. 819-828.

- [4]. Harshkumar Patel, 2016. *Effect of nanoparticles and solvent based emulsion on heavy oil viscosity*. University of Oklahoma.
- [5]. Yousef Hamed Shokrlu, Tayfun Babadagli, 2014. *Viscosity reduction of heavy oil/bitumen using micro- and nano-metal particles during aqueous and non-aqueous thermal applications*. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 119, pp. 210-220.
- [6]. Yudong Shen, Wenwu Lei, Wentao Tang, Tiancheng Ouyang, Lizhe Liang, Zhi Qun Tian, Pei Kang Shen, 2022. *Synergistic friction-reduction and wear-resistance mechanism of 3D graphene and SiO₂ nanoblend at harsh friction interface*. Wear, vol. 488-489, pp. 204175.
- [7]. Yashvir Singh, Erween Abd Rahim, Nishant Kumar Singh, Abhishek Sharma, Amneesh Singla, Arkom Palamanit, 2022. *Friction and wear characteristics of chemically modified mahua (madhuca indica) oil based lubricant with SiO₂ nanoparticles as additives*. Wear, vol. 508-509, pp. 204463.
- [8]. Can Wu, Shuaishuai Li, Ying Chen, Lidan Yao, Xinglin Li, Jing Ni, 2023. *Tribological properties of chemical composite and physical mixture of ZnO and SiO₂ nanoparticles as grease additives*. Applied Surface Science, vol. 612, pp. 155932.
- [9]. Yousef Hamed Shokrlu, Tayfun Babadagli, 2010. *Effects of Nano-Sized Metals on Viscosity Reduction of Heavy Oil/Bitumen During Thermal Applications*. Society of Petroleum Engineers - Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference 2010, vol. 3.
- [10]. Christian Alberto, Christian Paternina Ortiz, 2018. *Brief Introduction of effect of size of particles for Dissolution Thermodynamics on Nanoparticles and Its Effect on the Decreasing of Viscosity into Heavy Oil*. DOI:10.13140/RG.2.2.29032.52481
- [11]. Ming Chen, Chen Li, Guo-Rui Li, Yan-Ling Chen, Cheng-Gang Zhou, 2019. *In situ preparation of well-dispersed CuO nanocatalysts in heavy oil for catalytic aquathermolysis*. Petroleum Science, vol. 16, pp. 439-446.
- [12]. Nooshin Taghili, Mehrdad Manteghian, Arezou Jafari, 2020. *Novel preparation of MoO₃/γ-Al₂O₃ nanocatalyst: application in extra-heavy oil visbreaking at atmospheric pressure*. Applied Nanoscience, vol. 10, pp. 1603-1613.
- [13]. Rohan Jadhav, Jitendra Sangwai, 2020. *Interaction of Heavy Crude Oil and Nanoparticles for Heavy Oil Upgrading*. Nanotechnology for Energy and Environmental Engineering, pp 231-255.
- [14]. F. Fako, Harshkumar Patel, Subhash Shah, 2018. *Nanotechnology: Innovative Applications in the Oil & Gas Industry*. International Journal of Global Advanced Materials & Nanotechnology, vol. 1, pp. 16-30.

AUTHORS INFORMATION

**Bui Tuan Anh¹, Dao Tien Cuong¹, Nguyen Manh Toan¹,
Tran Van Thuc¹, Nguyen Quoc Dzung²**

¹School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

²Thainguyen Industrial College, Vietnam