

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM HỆ THỐNG PHANH SỬ DỤNG

LƯU CHẤT TỪ BIẾN MRF

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF MAGNETORHEOLOGICAL FLUID BRAKE SYSTEMS

Cao Lê Anh Kiệt¹, Nguyễn Xuân Bảo², Lương Văn Vạn¹

¹ Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long;

² Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Đà Nẵng;

Tác giả liên hệ: kietcla@vnlute.edu.vn

Nhận bài(Received): 19/9/2026; Phản biện (Reviewed): 7/1/2026; Chấp nhận(Accepted): 26/3/2026

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu đặc tính đáp ứng động của hệ thống phanh sử dụng lưu chất từ biến (MR brake), cho phép điều chỉnh mô-men hãm linh hoạt thông qua sự thay đổi trạng thái nhanh của chất lỏng MR dưới tác động từ trường. Cơ cấu phanh được thiết kế nhỏ gọn, dễ chế tạo, đồng thời bảo đảm mô-men hãm ổn định, hiệu suất cao và độ tin cậy trong vận hành. Phân tích phần tử hữu hạn (FEMM) được sử dụng để đánh giá phân bố từ trường, trong khi mô hình động học được xây dựng nhằm mô tả phản ứng của hệ thống ở các điều kiện làm việc khác nhau. Kết quả mô phỏng cho thấy mối quan hệ chặt chẽ giữa cường độ từ trường, tính chất lưu biến của chất lỏng MR và mô-men hãm sinh ra. Những kết quả này khẳng định tiềm năng ứng dụng phanh MR trong ô tô, robot, máy công nghiệp và các hệ thống điều khiển thông minh.

Từ khóa: phanh lưu chất từ biến, lưu chất từ biến, phần tử hữu hạn.

ABSTRACT

This study investigates the dynamic response characteristics of a magnetorheological (MR) brake system, which enables flexible modulation of braking torque through the rapid rheological transition of MR fluid under an applied magnetic field. The brake mechanism is designed to be compact and manufacturable, while ensuring stable braking torque, high efficiency, and reliable operation. Finite Element Method Magnetics (FEMM) analysis is employed to evaluate the magnetic field distribution, whereas a dynamic model is developed to describe the system response under various operating conditions. Simulation results reveal a strong correlation between magnetic field intensity, the rheological properties of the MR fluid, and the generated braking torque. These findings demonstrate the potential application of MR brakes in automotive systems, robotics, industrial machinery, and intelligent control systems.

Keywords: Magnetorheological brakes, magnetorheological fluid, finite element method

1. Giới thiệu

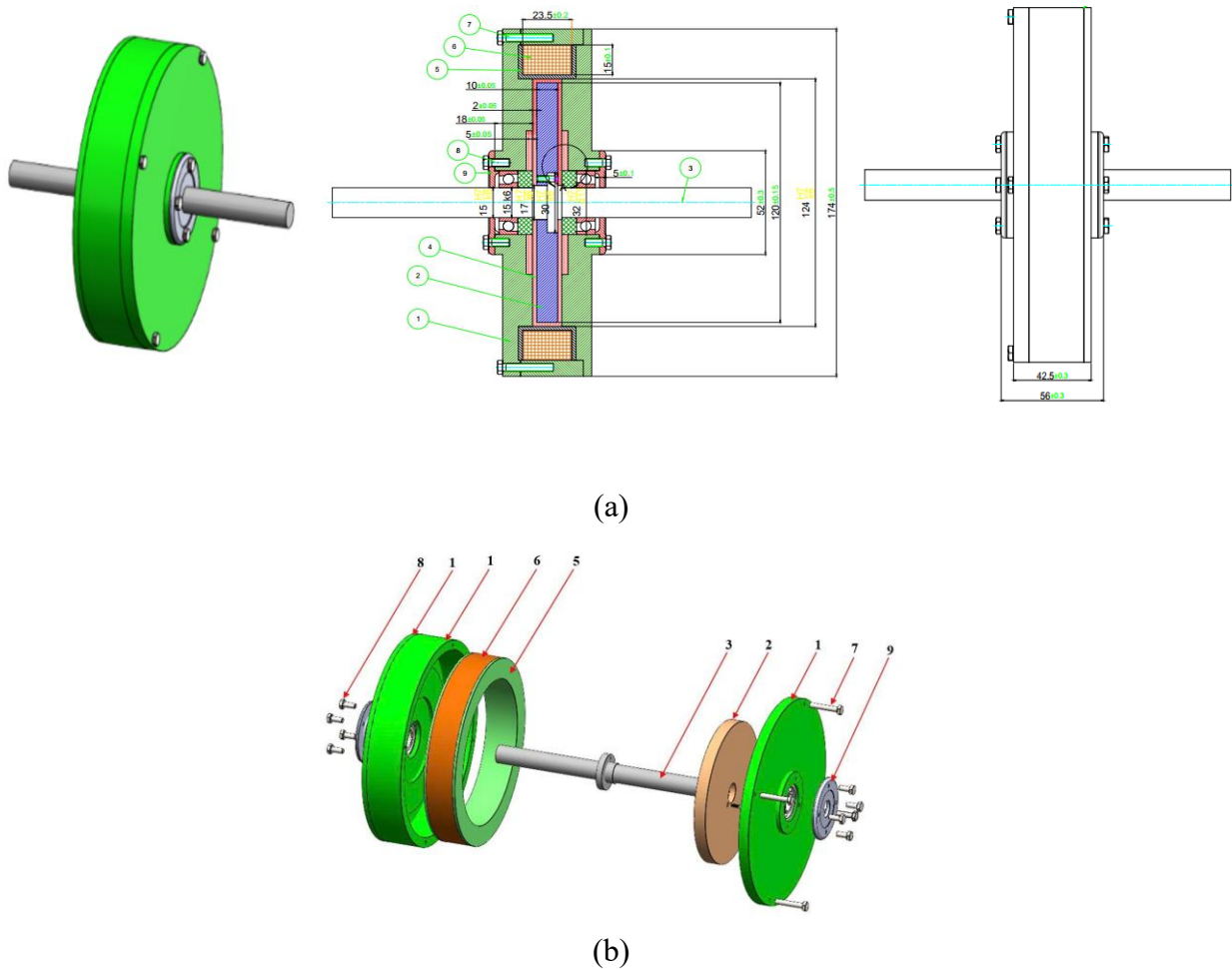
Ngành công nghiệp ô tô cam kết chế tạo những phương tiện an toàn hơn, rẻ hơn và hiệu suất tốt hơn. Ví dụ, một loại phanh mới được giới thiệu cho quá trình phanh và được phân loại là phanh chất lỏng từ tính (MRFB), có tiềm năng mang lại một số lợi thế về hiệu suất so với phanh thông thường. Phanh MR cho phép kiểm soát mô-men xoắn liên tục. Khi không có từ trường, mô-men xoắn được tạo ra bởi độ nhớt của chất lỏng mang, ổ trục và phốt. Sarkar và Hirani [1] đã thiết kế một phanh từ tính màng ép có tính đến ứng suất nén tăng cường của chất lỏng từ tính. Để xác thực thiết kế lý thuyết và phát hiện, một nguyên mẫu của đĩa phim nén MR một tấm phanh đã được phát triển. Thiết lập thử nghiệm thực nghiệm đã giúp minh họa mô-men xoắn phanh dưới các dòng điện điều khiển khác nhau (0,0–1,25 A). Zainard và cộng sự. [2] đã giới thiệu Mô hình hóa và Xác

nhận phản ứng phanh lưu biến từ bằng phương pháp tham số. Áp dụng từ trường làm tăng năng suất sức mạnh của chất lỏng MR nơi chất lỏng này được sử dụng để giảm tốc độ của trục quay. Rossa et al. [3] đã trình bày thiết kế cân nhắc cho phanh lưu biến từ. Mô hình được chỉ định mật độ từ thông mong muốn trên bề mặt chất lỏng. Kích thước mạch từ và công suất cần thiết có thể được tính toán theo hệ quả. Phân tích tập trung vào một đĩa phanh đơn và một tang trống phanh đơn và làm nổi bật sự phụ thuộc lẫn nhau của các biện pháp hiệu suất như một hàm của các kích thước. Park et al. [4] đã giới thiệu đánh giá hiệu suất của thiết kế phanh từ tính ô tô với bộ điều khiển chế độ trượt. Hệ thống phanh được đề xuất bao gồm của các đĩa quay được nhúng trong chất lỏng MR và được bao bọc trong một nam châm điện, trong đó ứng suất chảy của chất lỏng thay đổi theo hàm của từ trường được áp dụng bởi nam châm điện. Li và Du [5] đã thiết kế và thử nghiệm một phanh từ tính lưu biến (MR) mới nguyên mẫu. Đầu tiên, các đặc tính lưu biến của chất lỏng MR, đặc biệt là ứng suất chảy động, đã được nghiên cứu thực nghiệm dựa trên mô hình dẻo Bingham. Cuối cùng, điều này đã tiếp theo là phân tích nam châm điện sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn. Tsubata và Kikuchi [6] đã giới thiệu một chiếc xe đạp mô phỏng với phanh chất lỏng lưu biến từ hình trụ. Họ đã phát triển một bộ biến mô-men xoắn bàn đạp với một bộ vi điều khiển. Theo kết quả, bộ điều khiển được phát triển đã thực hiện đầy đủ mô-men xoắn bàn đạp dựa trên yêu cầu. điều kiện. Poznic và Casniji [7] đã mô tả một phân tích về Phanh chất lỏng lưu biến từ hình trụ. Một phanh quay MR phanh đĩa có đặc tính là mô-men xoắn phanh của nó thay đổi phản ứng nhanh chóng với cường độ từ trường bên ngoài. Những cân nhắc lý thuyết của phương án thiết kế cho phanh chất lỏng MR đơn giản thông thường được đưa vào xem xét. Edward et al. [8] đã nghiên cứu sự phát triển của hệ thống phanh cơ điện mới sử dụng từ lưu biến (MR) chất lỏng. Hệ thống phanh được đề xuất bao gồm các đĩa quay được nhúng trong chất lỏng MR và được bao bọc trong một nam châm điện, nơi mà ứng suất chảy của chất lỏng thay đổi theo hàm của từ trường được áp dụng bởi nam châm điện. Sukwani và Hirani [9] đã mô tả quy trình thiết kế phanh MR và đã thảo luận về tác động của khe hở MR lên mô-men xoắn phanh của nó. Hai phanh, phanh đầu tiên có khe hở MR 1 mm và phanh thứ hai có Khoảng cách MR 2 mm đã được thiết kế và chế tạo. Shrikant et al. [10] đã giới thiệu một mô hình phanh từ tính-lưu biến cần thiết để dừng một chiếc xe hai bánh đang được xem xét. Đầu tiên mô-men xoắn phanh cần thiết để dừng xe đã được tính toán phân tích. Sau đó, các thông số thiết kế phù hợp đã được lựa chọn và một mô hình đã được phát triển trong phần mềm MATLAB để đạt được mô-men xoắn phanh tương tự. Kavlicoglu et al. [11] Tập trung vào thiết kế và đặc điểm của một bán kính ly hợp chất lỏng từ lưu biến (MRF) hai tấm. mô-men xoắn của ly hợp có thể được kiểm soát bằng cách điều chỉnh từ trường ứng dụng. Phân tích phần tử hữu hạn điện từ (FEA) được thực hiện để thiết kế và tối ưu hóa bộ ly hợp. Tan et al. [12] đã phát triển một mô hình toán học của phanh ER và kết quả mô hình hóa được so sánh với phản ứng vận tốc đầu ra thực nghiệm của phanh. Sau khi xác nhận mô hình đã hoàn thành, phanh ER đã chịu nhiều tải trọng khác nhau, trường điện, nhiệt độ chất lỏng và phân số thể tích. Bởi quan sát tác động của từng biến đầu vào, hành vi xu hướng của phản ứng tốc độ phanh ER đã được nghiên cứu trong một nỗ lực để xác định các thông số phù hợp có thể dừng cánh tay robot tại thời gian kéo dài nhanh nhất. Benetti và Dragoni [13] đã nghiên cứu hành vi từ tính phi tuyến tính của một đĩa đa năng 100 Nm, Phanh quay hoặc ly hợp chất lỏng từ tính-lưu biến, sử dụng Phần mềm đa pha COMSOL. Cùng với kết quả của phân tích, ưu điểm và hạn chế đã được tìm thấy trong việc sử dụng phần mềm trong các mô phỏng tương lai của nhiệt và phản ứng cơ học của thiết bị. Poznic et al. [14] đã giới thiệu một bản đánh giá về tất cả các loại phanh từ lưu biến. Dựa trên về tổng thể mô-men xoắn phanh so sánh phân tích cho tất cả các loại phanh từ-lưu biến và các thông số liên quan khác đã được thu được. Một giàn thử nghiệm, sử dụng loại phanh được chọn chứa đầy chất lỏng từ lưu biến – Basonetic 5030 được sản xuất và sau đó được thử nghiệm. Mục

tiêu của công trình hiện tại là nghiên cứu hiệu suất của phanh đĩa thủy lực (MR) trên cả phương diện thực nghiệm và lý thuyết. Một mô hình lý thuyết cho phanh MR sử dụng Navier-Stokes Các phương trình với hệ thống cơ học và chất lỏng Bingham được phát triển và giải bằng phương pháp số. Ảnh hưởng của các thông số thiết kế và điều kiện vận hành được nghiên cứu. So sánh giữa công việc lý thuyết và thực nghiệm cho các điện áp đầu vào cho phanh được trình bày. Một xác nhận của kết quả lý thuyết với mô hình CFD và một mô hình khác do một nhà nghiên cứu khác nghiên cứu cũng được giới thiệu.

2. Thiết kế phanh MR

2.1. Thiết kế và nguyên lý làm việc phanh MR



Hình 2: (a) Phanh sử dụng lưu chất từ biến (MRF) (b) Mô hình lắp ráp các chi tiết phanh

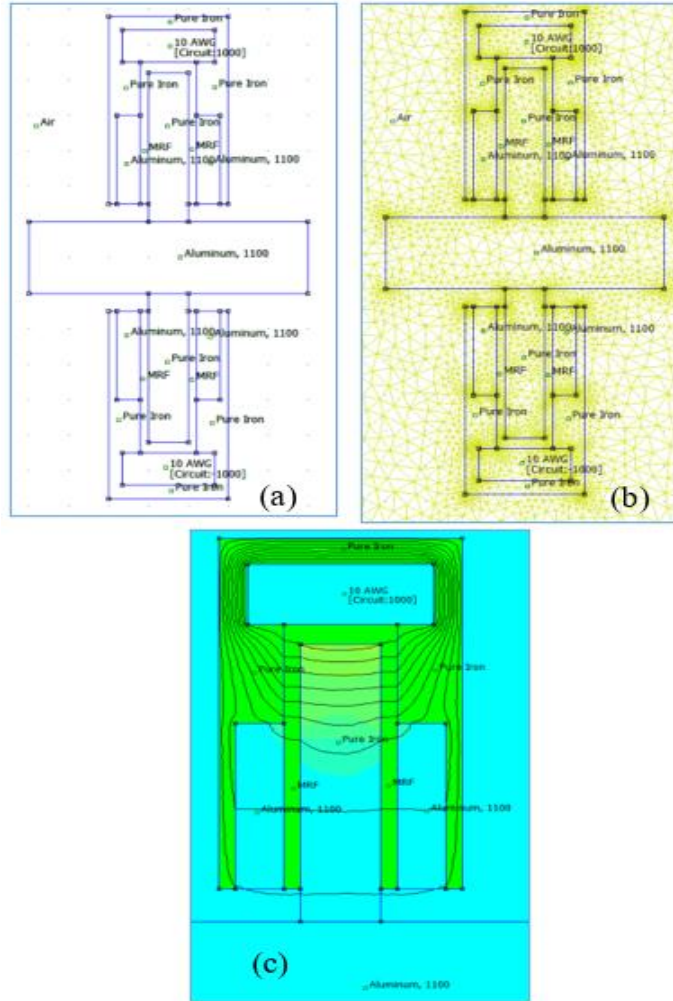
Bảng 1: Cấu tạo và chức năng của từng chi tiết trên phanh MRF

STT	Tên chi tiết	Vật liệu	Số lượng	Chức năng
1	Vỏ phanh	C45	1	Cố định cuộn dây cùng MRF và Chứa MRF cùng cuộn dây
2	Đĩa phanh	C45	1	Kết nối vỏ phanh và cố định cuộn dây

3	Trục	C45	1	
4	MRF	MRF	1	
5	Bobbin	Plastic	1	
6	Cuộn dây	Copper	1	Tạo từ trường
7	Bulong liên kết vỏ phanh M4	CT3	4	
8	Bu long nắp ổ M4	CT3	6	
9	Nắp ổ	C45	2	
10	Vòng bi (6002ZZ)	SUJ2	2	
11	Vòng phốt (15x32x7)	NBR	2	
12	Bulong liên kết đĩa và trục M3	CT3	1	

Phanh sử dụng lưu chất từ biến (MRF) có cấu tạo gồm các bộ phận chính như biểu diễn hình 2(a) gồm: vỏ phanh, vành phanh, dây đồng, bobbin, trục phanh và đĩa phanh. Trong đó, vỏ phanh đóng vai trò cố định cuộn dây và chứa MRF, đồng thời làm khung bảo vệ. Vành phanh nối với vỏ và giữ cố định cuộn dây sinh từ trường. Dây đồng được quấn quanh bobbin để tạo ra lực từ khi có dòng điện đi qua. Bobbin giữ cố định dây đồng tại vị trí thiết kế. Trục phanh đảm nhiệm chức năng truyền chuyển động quay từ nguồn tới đĩa phanh. Đĩa phanh là nơi tiếp xúc với chất lỏng MRF, giúp tạo lực ma sát khi MRF chuyển sang trạng thái rắn hơn do tác động của từ trường. Về nguyên lý hoạt động, khi không có dòng điện, MRF ở trạng thái lỏng cho phép đĩa quay tự do. Khi cấp dòng điện vào cuộn dây, từ trường sinh ra làm tăng độ nhớt của MRF, chuyển sang trạng thái bán rắn, tạo lực cản ma sát lên đĩa phanh, từ đó tạo lực phanh. Mức độ phanh có thể điều chỉnh được thông qua việc điều khiển cường độ dòng điện cấp vào cuộn dây.

Hình 2a minh họa thể hiện mặt cắt ngang cấu trúc của phanh từ MR. Bộ phận này gồm một trục quay chính đường kính 32 mm xuyên qua cụm phanh, hai bên trục được bố trí đối xứng các đĩa phanh cùng với các khe hở chứa lưu chất từ biến. Bên trong vỏ phanh bố trí các cuộn dây điện từ có chiều dày 10 mm, khi được cấp dòng điện sẽ sinh ra từ trường. Từ trường này làm thay đổi độ nhớt của chất lỏng MR trong khe hở, nhờ đó điều chỉnh được lực phanh. Vỏ ngoài của cụm phanh có đường kính 174 mm. Với thiết kế này, mô-men phanh được kiểm soát linh hoạt thông qua việc điều chỉnh đặc tính dòng cắt của lưu chất MR dưới tác động từ trường.



Hình 3: Mô phỏng dòng từ trường đi qua đĩa phanh: (a) mô hình FEMM, (b) chia lưới, (c) kết quả mô phỏng.

Hình 3 minh họa quá trình mô phỏng phân bố từ trường trong đĩa phanh bằng FEMM. Ở hình 3(a), mô hình đối xứng sử dụng lõi sắt và hai cuộn dây đồng 18 AWG đặt đối xứng để tạo từ trường, trong khi vỏ ngoài bằng nhôm (Aluminum 1100) đóng vai trò cách từ. Hình 3(b) cho thấy quá trình chia lưới, còn hình 3(c) là kết quả mô phỏng, trong đó các đường sức từ tập trung ở lõi và đi qua vùng đĩa phanh, chứng tỏ thiết kế có khả năng dẫn từ hiệu quả và định hướng tốt từ thông vào khu vực làm việc của lưu chất từ biến.

2.2. Mô hình toán học của phanh MR

Để xây dựng mô hình mô-men xoắn chính xác cho phanh MR, chất lỏng từ biến được giả định là không nén được và phân bố đồng đều trong kênh dẫn. Do phanh dạng đĩa chủ yếu làm việc trong chế độ cắt, các mô hình Bingham và Herschel–Bulkley thường được sử dụng để mô phỏng đặc tính mô-men xoắn. Điểm khác biệt cơ bản giữa hai mô hình là mô hình Herschel–Bulkley xem xét thêm ảnh hưởng của tốc độ cắt, trong khi mô hình Bingham phù hợp hơn với trường hợp tốc độ cắt trung bình. Dựa trên điều kiện thực tế và để đơn giản hóa quá trình phân tích, bài viết lựa chọn mô hình Herschel–Bulkley để biểu diễn ứng suất cắt của chất lỏng từ biến như sau:

$$\tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n, \quad \text{khi } \tau > \tau_y \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = 0, \quad \text{khi } \tau \leq \tau_y \quad (2)$$

Trong đó τ là ứng suất cắt của lưu chất từ biến, τ_y là ứng suất chảy của lưu chất từ biến thay đổi theo mật độ từ trường, k là độ nhớt dẻo, $\dot{\gamma}$ là tốc độ biến dạng cắt.

Dưới tác động của từ trường, mô-men phanh MR gồm hai phần: mô-men từ do ứng suất cắt tới hạn τ_y và mô-men nhớt do độ nhớt của lưu chất. Mô-men tại khe hở giảm chấn hướng tâm trên bề mặt đĩa được xác định bằng phương pháp phân tử vi phân.

Tốc độ cắt tại mọi điểm trong vùng làm việc của đĩa phanh.

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega r}{t} \quad (3)$$

Trong đó r là bán kính quay của điểm tùy chọn, ω là vận tốc góc của trục và t là độ dày khe hở giảm chấn của phanh.

Phanh MR trên bề mặt vòng từ r_1 đến r_2 có thể thu được như sau:

$$\begin{aligned} T_0 &= \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^2 \tau dr = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} r^2 [\tau(B) + \eta \dot{\gamma}] dr \\ &= \frac{2}{3} \pi \tau(B) (r_2^3 - r_1^3) + \frac{\pi \eta \omega}{2t} (r_2^4 - r_1^4) \end{aligned} \quad (4)$$

Tổng mô men phanh của phanh MR là:

$$T = 2T_0 = \frac{4n}{3} \pi \tau(H) (r_2^3 - r_1^3) + \frac{\pi \eta \omega n}{2t} (r_2^4 - r_1^4) \quad (5)$$

Tổng mô-men phanh T gồm hai thành phần: T_B và T_H . Trong đó, T_B là mô-men có thể điều khiển, sinh ra bởi ứng suất cắt của lưu chất từ biến dưới tác động từ trường và thay đổi theo mật độ từ thông, do đó có thể điều chỉnh bằng dòng điện cấp vào cuộn dây. T_H là mô-men do độ nhớt và các thông số cấu trúc của phanh, chiếm tỷ lệ nhỏ, nên tổng mô-men phanh vẫn được xem là có thể điều khiển. Khi đó, tổng mô-men đầu ra được biểu diễn như sau:

$$T = T_B + T_\eta \quad (6)$$

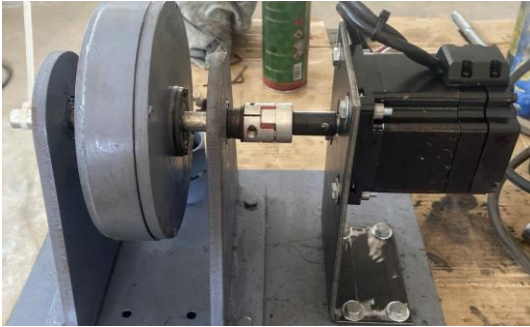
với:

$$T_B = \frac{4n}{3} \pi \tau(H) (r_2^3 - r_1^3) \quad (7a)$$

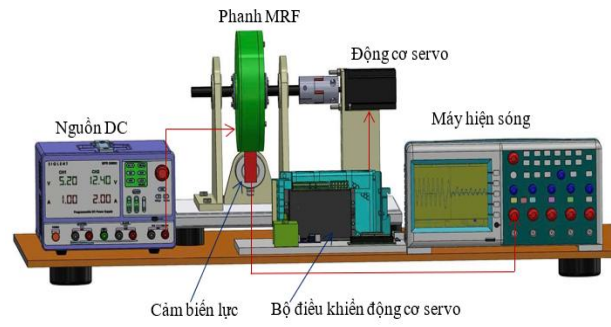
$$T_\eta = \frac{\pi \eta \omega n}{2t} (r_2^4 - r_1^4) \quad (7b)$$

3. Thực nghiệm trên hệ thống phanh MRF

Thực nghiệm trên hệ thống phanh sử dụng lưu chất từ biến (MRF) được tiến hành nhằm kiểm chứng tính hiệu quả của thiết kế và xác nhận kết quả mô phỏng từ trường. Hệ thống gồm cụm phanh MRF đã chế tạo, bộ điều khiển dòng điện cấp cho cuộn dây, cảm biến đo mô men cản, và cơ cấu truyền động quay mô phỏng chuyển động thực tế. Trong quá trình thực nghiệm, dòng điện được điều chỉnh từ 0 đến giá trị định mức để khảo sát khả năng thay đổi lực phanh theo thời gian thực.



(a)



(b)

Hình 4: 4(a) hình ảnh thực tế phanh khi gia công, 4(b) sơ đồ hệ thống thực nghiệm

Trong hình 4(a) là ảnh chụp thực tế cụm động cơ servo – phanh MRF, trong đó phanh được gắn cố định và nối với trục động cơ qua khớp nối mềm để đảm bảo truyền động ổn định, hạn chế rung lắc. Bố trí này gọn gàng, dễ hiệu chỉnh, phù hợp cho thí nghiệm nghiên cứu. Hình 4(b) mô tả sơ đồ tổng thể hệ thống thí nghiệm phanh MRF, gồm: nguồn DC cấp dòng cho cuộn dây phanh, động cơ servo tạo chuyển động quay, bộ điều khiển servo, cảm biến lực đo mô-men hãm và máy hiện sóng phân tích tín hiệu. Cách bố trí này khoa học, trực quan và đáp ứng tốt yêu cầu đánh giá đặc tính phanh trong nghiên cứu và ứng dụng ô tô.

Bảng 2: Kết quả thực nghiệm: (a) 30 vòng/phút, (b) 60 vòng/phút, (c) 100 vòng/phút

(a) Kết quả thực nghiệm khi vận tốc quay trục 30 vòng/phút

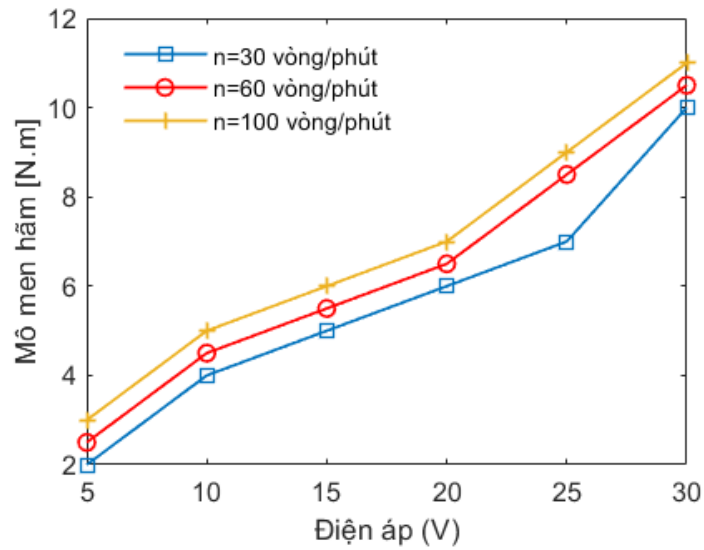
STT	Volt (V)	Ampe (A)	Lực (N)	Momen (N.m)
1	5	0.7	20	2
2	10	1.3	40	4
3	15	1.9	50	5
4	20	2.5	60	6
5	25	3.1	70	7
6	30	3.8	100	10

(b) Kết quả thực nghiệm khi vận tốc quay trục 60 vòng/phút

STT	Volt (V)	Ampe (A)	Lực (N)	Momen (N.m)
1	5	0.7	25	2.5
2	10	1.3	45	4.5
3	15	1.9	55	5.5
4	20	2.5	65	6.5
5	25	3.1	85	8.5
6	30	3.8	105	10.5

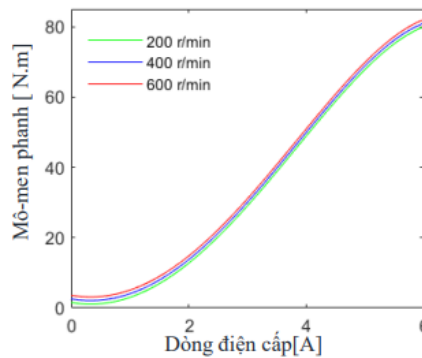
(c) Kết quả thực nghiệm khi vận tốc quay trục 100 vòng/phút

STT	Volt (V)	Ampe (A)	Lực (N)	Momen (N.m)
1	5	0.7	30	3
2	10	1.3	50	5
3	15	1.9	60	6
4	20	2.5	70	7
5	25	3.1	90	9
6	30	3.8	110	11

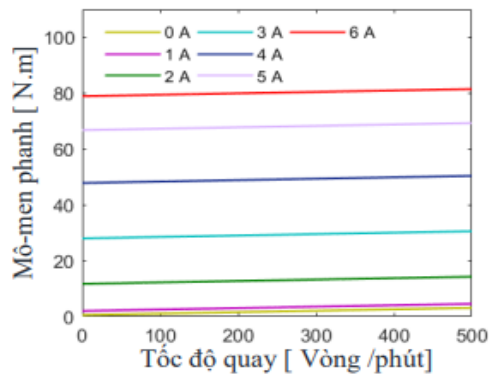


Hình 5: Kết quả đo mô men hãm dưới các giá trị điện áp và tốc độ quay khác nhau

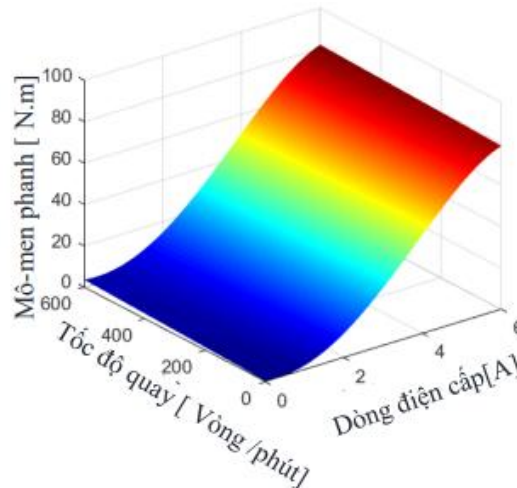
Kết quả thí nghiệm phanh MR ở ba tốc độ (30, 60 và 100 vòng/phút) cho thấy mô-men hãm tăng tỷ lệ với điện áp cấp cuộn dây. Khi điện áp tăng từ 5 V đến 30 V, mô-men tăng từ 2 → 10 N·m (30 vòng/phút), 2.5 → 10.5 N·m (60 vòng/phút) và 3 → 11 N·m (100 vòng/phút). Điều này khẳng định mô-men phanh phụ thuộc trực tiếp vào từ trường do dòng kích từ tạo ra và chịu ảnh hưởng của tốc độ quay.



Hình 6: Đáp ứng mô men hãm trong miền cường độ dòng điện



Hình 7: Đáp ứng moment hãm trong miền tốc độ



Hình 8: Đáp ứng moment hãm phụ thuộc tốc độ và dòng điện

Đặc tính mô-men hãm của phanh MR theo dòng điện và tốc độ được thể hiện trong Hình 6,7,8. Kết quả cho thấy mô-men hãm tăng phi tuyến theo dòng điện, trong khi ảnh hưởng của tốc độ gần như không đáng kể, các đường cong gần trùng nhau. Ở các mức dòng điện khác nhau, mô-men chỉ tăng nhẹ khi tốc độ tăng, chứng tỏ phanh MR chủ yếu phụ thuộc vào dòng điện. Nhìn chung, mô-men hãm có thể điều khiển hiệu quả bằng cách thay đổi dòng điện, với độ nhạy cao, còn tác động của tốc độ quay hầu như không đáng kể trong vùng khảo sát.

4. Kết luận

Kết quả thực nghiệm khẳng định hai đặc tính quan trọng của hệ thống phanh MRF. Trước hết, lực phanh tăng tỷ lệ thuận với điện áp hoặc dòng điện điều khiển: khi tín hiệu kích từ được nâng cao, lực hãm gia tăng rõ rệt ở cả ba tốc độ quay (30, 60 và 100 vòng/phút), chứng tỏ khả năng điều khiển bằng tín hiệu điện rất hiệu quả. Bên cạnh đó, lực phanh hầu như không bị ảnh hưởng bởi tốc độ quay, sai lệch giữa các tốc độ tại cùng một mức kích từ là không đáng kể. Đặc điểm này giúp phanh MRF duy trì lực hãm ổn định, có thể dự đoán trước, và vượt trội so với cơ chế phanh ma sát truyền thống. Nhìn chung, các kết quả thu được hoàn toàn phù hợp với cơ sở lý thuyết, đồng thời cho thấy tiềm năng ứng dụng rộng rãi của phanh MRF trong những hệ thống cần độ chính xác cao và khả năng điều khiển linh hoạt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C. Sarkar, H. Hirani, Design of a squeeze film magnetorheological brake considering compression enhanced shear yield stress of magneto rheological fluid, J. Phys: Conf. Ser. 412 (2013) 012045 (IOP Publishing).
- [2] A.Z. Zainordin, M.A. Abdullah, K. Hudha, Modeling and validation of magnetorheological brake responses using parametric approach, IOP Conf., Series, Materials science and Engineering 50 (2013).
- [3] C. Rossa, A. Jaegy, J. Lozada, Design considerations for magneto rheological brake, IEEE/ASME Trans. Mechatron. 450 (2013).
- [4] E.J. Park, D. Stoikov, L.F. Luz, A. Suleman, A performance evaluation of an automotive magnetorheological brake design with a sliding mode controller, Mechatronics 16 (2006) 405–416.
- [5] W. Li, H. Du, Design and experimental evaluation of a magneto rheological brake, Adv. Manuf. Technol. 21 (2003) 508–515.

- [6] Y. Tsubata, T. Kikuchi, Mô phỏng xe đạp với phanh chất lỏng từ lưu biến hình trụ, *Trans. Control Mech. Syst.* 1 (2012) 300–305.
- [7] A. Poznic, F. Casniji, Phân tích phanh chất lỏng từ lưu biến hình trụ, *J. Mater. Quy trình. Công nghệ. Automot.* 21 (2002).
- [8] Edward J. Park, Luis Falcao da Luz, Afzal Suleman, Tối ưu hóa thiết kế đa ngành của thiết kế phanh từ lưu biến ô tô, *Máy tính và Cấu trúc*, Tập 86. Số (3-5), ElsevierM, 2008, trang 207–216.
- [9] VK Sukwani, H. Hirani, Thiết kế, Phát triển và Đánh giá Hiệu suất của Phanh từ lưu biến tốc độ cao, trong: *Proc. của Viện Kỹ thuật Cơ khí, Phần L, Tạp chí Thiết kế và Ứng dụng Vật liệu*, tập 222 (1), 2008, trang 73–82.
- [10] Kumbhar Shrikant, Patil Aditya, P. Baskar, Mô phỏng phanh lưu biến từ cho ứng dụng ô tô, *Int. J. Anh. Res.* 5 (6) (2016) 462–466.
- [11] BM Kavlicoglu, F. Gordaninejad, CA Evrensel, N. Cobanoglu, Y. Liu, A. Fuchs, Bộ ly hợp chất lỏng từ tính-lưu biến mô-men xoắn cao, Bellingham, Wash, trong: *Biên bản Hội nghị SPIE về Vật liệu và Cấu trúc thông minh*, tháng 3 năm 2002, trang 393–400.
- [12] KP Tan, R. Stanway, WA Bullough, Phản ứng phanh của quán tính/tải trọng bằng cách sử dụng phanh điện lưu biến (ER), *Cơ điện tử* 17 (2007) 277–289.
- [13] M. Benetti, E. Dragoni¹, Phân tích từ tính phi tuyến tính của phanh và ly hợp từ tính-lưu biến đa tâm, *Hội nghị người dùng COMSOL 2006 Milan*.
- [14] A. Poznic, A. Zelic, L. Szabo, Phanh chất lỏng từ tính – thử nghiệm hiệu suất cơ bản với đề xuất cải thiện hiệu suất từ trường, *Hung. J. Ind. Chem. Veszprem* 40 (2) (2012) 113–119.