

# TỐI ƯU HÓA THIẾT BỊ PHANH DẦU TỪ TRƯỜNG ĐA CỰC TỪ SỬ DỤNG NHIỀU LỚP DẦU

## OPTIMIZATION DESIGN FOR MULTIPOLE MAGNETO-RHEOLOGICAL BRAKE USING MULTILAYER

*Nguyen Anh Ngoc, Lê Văn Anh, Lê Hồng Quân*

*Hanoi University of Industry, Hanoi, Vietnam*

*<sup>a</sup>ngocbk46@gmail.com*

### TÓM TẮT

Bài báo này đề cập tới vấn đề tối ưu hóa thiết kế cũng như phân tích từ của thiết bị phanh dầu từ trường (phanh MR) đa cực từ mới sử dụng nhiều lớp dầu từ trường (dầu MR). Phanh MR là một loại thiết bị phanh sử dụng vật liệu thông minh là dầu MR có thể cung cấp mô men cản với độ trễ thấp và có thể điều khiển được một cách dễ dàng và nhanh chóng. Để tăng mô men phanh mà không cần tăng thể tích quá nhiều, một thiết bị phanh MR đa cực từ với nhiều lớp dầu MR được thiết kế và đánh giá trong nghiên cứu này. Mô men phanh cực đại của phanh MR phụ thuộc rất nhiều vào độ lớn của cường độ từ trường đi qua các lớp dầu MR theo phương pháp tuyến. Bên cạnh đó, kích thước hình học của các cơ cấu trong thiết bị phanh MR cũng ảnh hưởng không nhỏ tới mô men phanh. Do đó, để hoàn thiện thiết kế các thông số trên được đưa vào làm biến chạy trong chương trình tối ưu hóa với mục tiêu là mô men phanh lớn nhất. Để so sánh các thiết bị phanh khác nhau không cùng loại cũng như cùng kích thước thì hệ số tỉ lệ giữa mô men phanh cực đại và thể tích (TVR) là khá phù hợp. Kết quả mô phỏng cho thấy mô men phanh cực đại tăng đáng kể so với các thiết bị phanh đã thiết kế. Thêm nữa, hệ số TVR của thiết bị phanh mới cũng vượt trội hơn so với các thiết bị phanh MR trước.

**Từ khóa:** *Phanh dầu từ trường, Dầu từ trường, Phanh đa cực từ nhiều lớp.*

### ABSTRACT

This paper presents the optimization design and magnetic analysis of a new multi-pole magneto-rheological brake (MR brake) with multiple fluid layers. MR brake is a device using the MR fluid, a kind of smart material, to provide fast and controllable resistant torque. The maximum torque of MR brake depends upon the magnetic field strength perpendicular with MRF layer. Besides, the dimensions of parts structured MR brake also affect braking torque majorly. Consequently, to complete the structure design of multipole MR brake the mentioned factors were set as subject of optimal function with the objective of maximum braking torque. In comparison between different kind and size of MR brake devices fairly, the torque-to-volume ratio (TVR) is used. The simulation results showed that the braking torque of the new design of proposed multipole multilayer MR brake was increased significantly. Moreover, the TVR is also higher than the previous design of MR brakes.

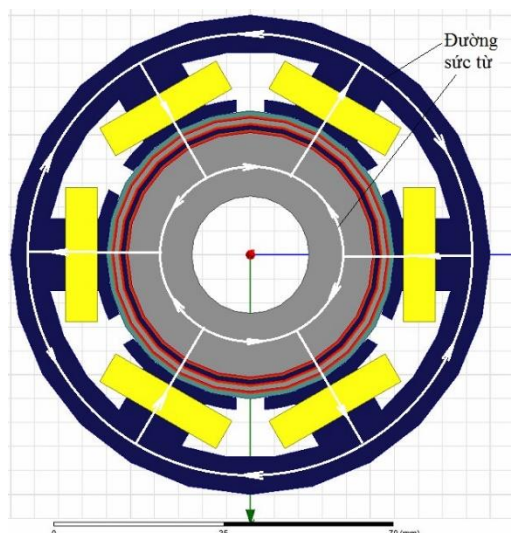
**Keywords:** *Magnetorheological Brake, Magnetorheological Fluid, Multipole Multilayer Brake.*

### 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Dầu từ trường MR là một loại vật liệu thông minh với sự thay đổi độ lớn ứng suất trong từ không đến cực đại chỉ trong vòng vài phần nghìn giây [1] dưới sự tác động của từ trường bên ngoài. Bên cạnh đó, phanh dầu từ trường là một trong những thiết bị đang được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi nhất trong các lĩnh vực như xe hơi, rô bốt công nghiệp cũng như trang thiết bị y tế [2-5].

Rất nhiều loại phanh dầu MR đã được nghiên cứu chế tạo và ứng dụng thành công trong thập kỷ vừa qua. Những loại phanh cũ thường có chỉ số mô men đầu ra cực đại nhỏ và kích thước cũng như khối lượng lớn. Để cải thiện các đặc tính đó, cơ cấu phanh từ với đa cực từ đã được nghiên cứu và chế tạo thử nghiệm. Ý tưởng ban đầu về loại phanh này do nhóm nghiên cứu của ông Shiao [6] với 10 cực từ và đạt được mô men xoắn chỉ khoảng 0,4 N. Sau đó, nhóm nghiên cứu tiếp tục cải thiện các đặc tính của thiết bị phanh này với sáu cực từ và một lớp dầu [7]. Kết quả đạt được là khả quan hơn với mô men xoắn cực đại là 19,9 Nm và tỉ số mô men trên thể tích (TVR) đạt được là 13,1 Nm/dm<sup>3</sup>. Mới nhất, nhóm nghiên cứu đã tiếp tục cải thiện thiết kế với hai lớp dầu từ trường và sáu cực từ. Kết quả đạt được rất khả quan với mô men cực đại đạt 27,5 Nm và tỉ số TVR đạt 25,8 Nm/dm<sup>3</sup> [8].

Do đó, để nâng cao hơn nữa đặc tính làm việc của cơ cấu phanh dầu từ trường đặc biệt này, nghiên cứu này tập trung vào việc nâng cao hơn nữa mô men phanh ra cực đại bằng cách tăng số lớp dầu MR làm việc lên ba lớp. Để thuận tiện, nhóm nghiên cứu giữ nguyên số cực từ là sáu và thay đổi số lớp dầu làm việc lên ba như trong hình vẽ số 1. Trong hình vẽ này, đường màu trắng biểu thị phương của đường sức từ đi vào và ra ở mỗi cực. Lưu ý rằng chiều của dòng điện trong mỗi cuộn dây kế tiếp là ngược nhau để tạo ra các cực từ bắc nam N-S xen kẽ nhau.

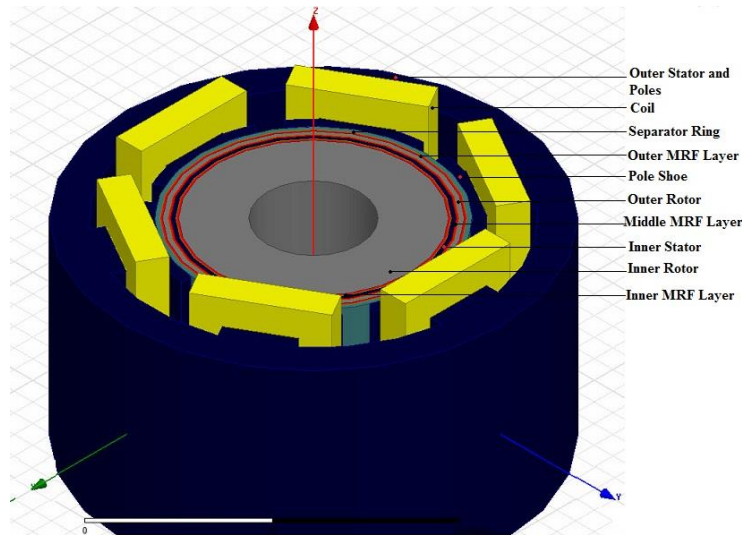


Hình 1. Sơ đồ nguyên lý làm việc của cơ cấu phanh dầu đa cực từ với ba lớp dầu

Trong nghiên cứu này, đầu tiên thiết kế cơ khí được đề xuất sao cho thuận tiện nhất trong việc chế tạo, lắp ráp cũng như tận dụng được tối đa lực ma sát sinh ra giữa các lớp dầu. Sau đó, thiết kế ban đầu đó được đưa vào mô hình để tiến hành mô phỏng từ. Cuối cùng, chương trình tối ưu hóa được sử dụng với hàm mục tiêu là tối đa mô men phanh sinh ra với hàm ràng buộc là kích thước bao của cơ cấu phanh. Như vậy, quá trình thiết kế được hoàn thiện với kết quả đạt được là mô men phanh sinh ra đạt giá trị tối đa trong giới hạn của kích thước. Do đó sẽ làm tăng tỉ số mô men riêng của cơ cấu phanh mới thiết kế và sẵn sàng cho quá trình gia công, lắp ráp và thử nghiệm thực tế. Góp phần rất lớn trong việc đáp ứng nhu cầu thiết kế, chế tạo các cơ cấu gây tải trong các hệ thống cơ khí trong tương lai.

## 2. THIẾT KẾ CƠ CẤU PHANH DẦU BA CỰC TỪ LOẠI MỚI

Cơ cấu phanh MR loại mới có sáu cực nam châm điện và ba lớp dầu từ trường được đặt giữa stator và các vòng rô to để tạo ra mô men phanh lớn hơn. Trong thiết kế này, stator và các cực từ được đặt bên ngoài và rô to được đặt trong. Mô hình mô phỏng 3D được thiết kế với kích thước các chi tiết có thể thay đổi được để phục vụ cho chương trình tối ưu hóa như trong hình vẽ số 2.



Hình 2. Mô hình 3D cơ cấu phanh dầu đa cực từ

Để đạt được mô men phanh lớn, loại dầu từ trường MRF-140CG với ứng suất chảy dẻo lớn [9]. Cơ cấu phanh mới đề xuất này thuộc dạng cơ cấu phanh tang trống do đó mô men sinh ra do một lớp dầu từ trường được tính theo công thức [7]:

$$T_{MR} = R_{MR}^2 \int_{A_w} \tau dA_w \quad (1)$$

Trong đó,  $R_{MR}$  là bán kính trung bình của lớp dầu. Theo mô hình lý thuyết đàn hồi của Bingham, ứng suất trong của lớp dầu từ trường,  $\tau$ , được tính theo công thức sau [10]:

$$\tau = \tau_y \text{sign} \left( \frac{du}{dy} \right) + \eta \frac{du}{dy} \quad (2)$$

Trong đó,  $\tau_y$  là ứng suất chảy dẻo;  $du/dy$  là tỉ số dòng chảy tương đối và  $\eta$  là độ nhớt động học của dầu trong trường hợp chưa chịu tác dụng của từ trường ngoài.

Với khe chứa dầu có kích thước tương đối nhỏ ( $g$ ), tổng ứng suất cắt sinh ra bên trong lớp dầu được tính theo công thức:

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{R_{MR} \omega}{g} \quad (3)$$

Trong đó  $\omega$  là vận tốc góc của rô to trong cơ cấu phanh.

Thế phương trình (3) vào (1), với  $z$  là chiều cao của lớp dầu từ trường, mô men phanh sinh ra được tính theo phương trình:

$$T_{MR} = R_{MR}^2 \int_{A_w} \tau_y dA_w + \frac{2\pi\eta\omega}{g} z R_{MR}^3 \quad (4)$$

Thành phần đầu tiên của vế phải phương trình (4) được gọi là mô men phanh trong trường hợp kích hoạt dòng từ trường với độ lớn phụ thuộc vào sức mạnh từ trường  $H_{MR}$ . Thành phần thứ hai được gọi là mô men không phụ thuộc vào độ lớn từ trường mà chỉ phụ thuộc vào vận tốc góc cũng như độ nhớt của dầu.

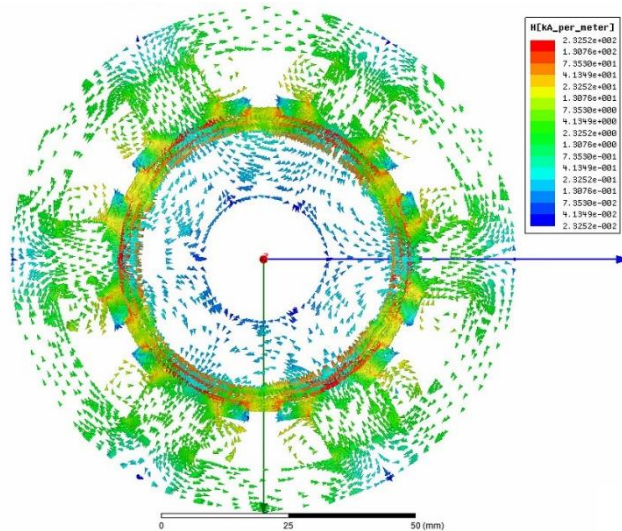
Để tính toán mô men phanh tổng cộng sinh ra cho cả ba lớp dầu, mô men của từng lớp, lớp trong ( $T_{MRi}$ ), lớp giữa ( $T_{MRm}$ ) và lớp ngoài ( $T_{MRo}$ ), được tính toán và cộng tổng lại như sau:

$$T_{MRB} = T_{MRi} + T_{MRm} + T_{MRo} + T_{fr} = R_{MRi}^2 \int_{A_{wi}} \tau_y dA_{wi} + R_{MRm}^2 \int_{A_{wm}} \tau_y dA_{wm} + R_{MRo}^2 \int_{A_{wo}} \tau_y dA_{wo} + \frac{2\pi\eta\omega}{g} z \left( R_{MRi}^3 + R_{MRm}^3 + R_{MRo}^3 \right) + T_{fr} \quad (5)$$

Trong đó,  $R_{MRi}$ ,  $A_{wi}$ ,  $R_{MRm}$ ,  $A_{wm}$ ; và  $R_{MRo}$ ,  $A_{wo}$  lần lượt là bán kính, tiết diện làm việc của lớp dầu bên trong, giữa và lớp ngoài của cơ cấu phanh này.

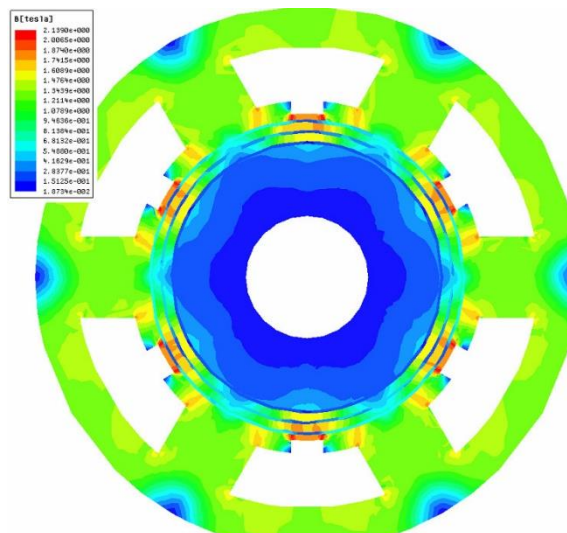
### 3. MÔ PHỎNG TỪ VÀ TỐI ƯU HÓA THIẾT KẾ

Trước tiên, mô hình mô phỏng được thiết lập và chạy mô phỏng từ trường để lấy kết quả ban đầu phục vụ cho việc phân tích. Mật độ điện trường được cho trên hình vẽ 3. Lực điện trường cung cấp cho mô hình là 200 vòng-Ampe và chiều của dòng điện được cấp không giống nhau ở hai cực nam châm điện liền kề như trong Hình 1. Kết quả của mật độ điện trường ở dạng véc tơ được cho trong hình 3 ứng với các đường sức từ tạo thành các vòng kín và đi vuông góc với các lớp dầu. Màu đỏ ứng với mật độ điện trường cực đại với giá trị vào khoảng 232 kA/m.



Hình 3. Mật độ điện trường của cơ cấu phanh dầu từ trường

Hình vẽ 4 thể hiện kết quả mô phỏng của cơ cấu phanh dầu dưới dạng độ lớn của mật độ điện trường B với giá trị cực đại là 2,13 tesla. Khu vực màu đỏ là khu mà độ lớn mật độ điện trường đạt cực đại cũng chính là khe hở giữa các má cực.



Hình 4. Cường độ từ trường của cơ cấu phanh dầu từ trường

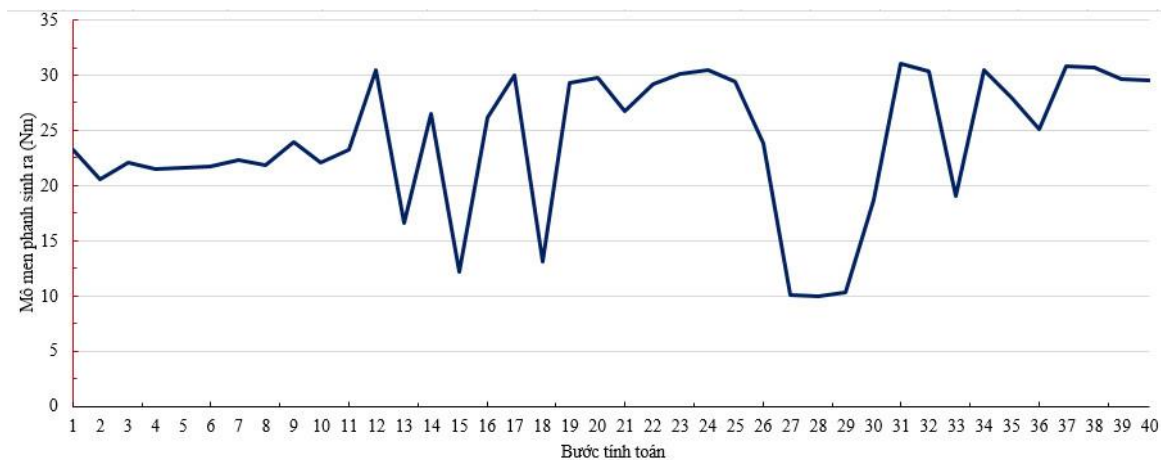
Để đạt được mô men phanh tối ưu trong giới hạn của kích thước của cơ cấu phanh, chương trình tối ưu hóa phi tuyến liên tục (sequential nonlinear programming, SNLP) được sử dụng. Với hàm mục tiêu là mô men tổng cộng trong khi các hàm ràng buộc là các kích thước hình học chính của các chi tiết trong cơ cấu phanh như chiều dài và rộng của các cực từ; khe

hở giữa các má cực; cũng như các bề dày của các chi tiết. Càng nhiều kích thước ràng buộc được sử dụng thì kết quả trả ra của hàm tối ưu càng chính xác với thực tế. Do đó, trong nghiên cứu này tám thông số ràng buộc được sử dụng để đưa vào chương trình tối ưu với mục tiêu đạt được mô men phanh cao nhất có thể. Kết quả sau quá trình tối ưu hóa được cho trong hình vẽ số 5 với mô men phanh cực đại là 31,04 Nm đạt được ở bước tính thứ 31.

Với tám biến số trong hàm tối ưu với mục tiêu mô men phanh sinh ra cực đại, mô men phanh sinh ra tối đa được cho trong bảng 1. Các giá trị tối ưu của các biến số sẽ được làm tròn và điều chỉnh một chút để phù hợp với quá trình gia công và lắp ráp về sau này.

Bảng 1. Các biến số của hàm tối ưu

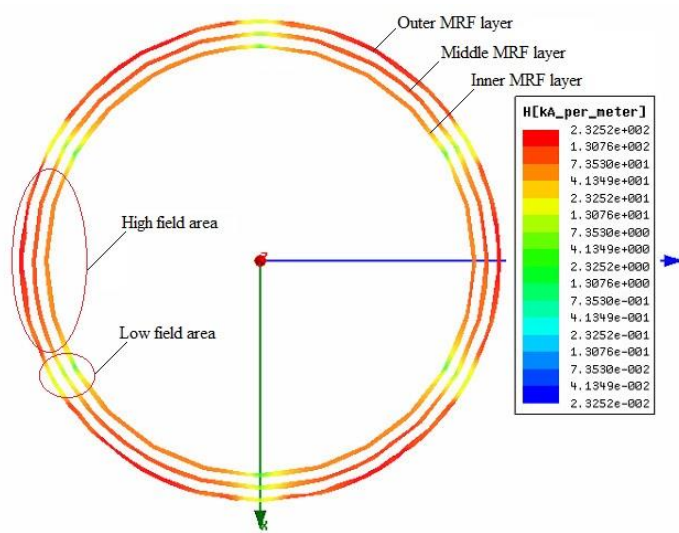
Thông số thiết kế (mm)	Giá trị tối ưu
Mô men phanh cực đại	31,04
Chiều dài cực từ	14,87
Chiều rộng cực từ	14,93
Khe hở giữa các má cực	6,44
Độ dày rô to	6,97
Độ dày rô to lớp giữa	1,00
Độ dày má cực	2,66
Độ dày stator lớp trong	5,23
Độ dày stator lớp giữa	1,48



Hình 5. Kết quả của quá trình tính toán tối ưu hóa

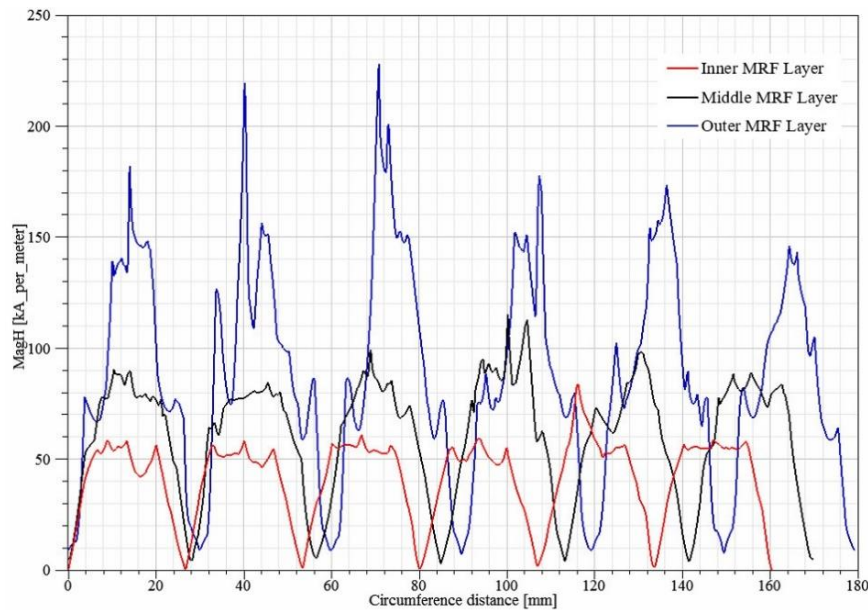
#### 4. PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Theo lý thuyết, nếu đường sức từ chạy toàn bộ từ một cực từ này sang cực từ bên cạnh đi qua tất cả các lớp dầu từ trường thì cường độ từ trường chạy qua các lớp dầu sẽ bằng nhau hoặc chỉ lệch nhau một ít. Tuy nhiên, giữa hai lớp dầu còn có các lớp vách ngăn cũng như các vòng rô to và stator trung gian nên sẽ có một số lượng không nhỏ từ trường chạy qua theo đường này. Do đó, cường độ từ trường ở các lớp dầu bên ngoài sẽ lớn hơn so với các lớp dầu phía giữa và phía trong. Hình vẽ 6 chỉ ra rằng, ở lớp ngoài cường độ từ trường ở lớp ngoài là 232 kA/m trong khi lớp trong chỉ đạt xấp xỉ 41 kA/m. Bên cạnh đó, ở những khu vực có các má dẫn từ thì cường độ từ trường lớn hơn (khu vực màu đỏ) so với những khu vực là khe hở giữa các má cực (khu vực màu xanh và vàng nhạt) ở trong hình vẽ.



Hình 6. Cường độ từ trường tại từng lớp dầu

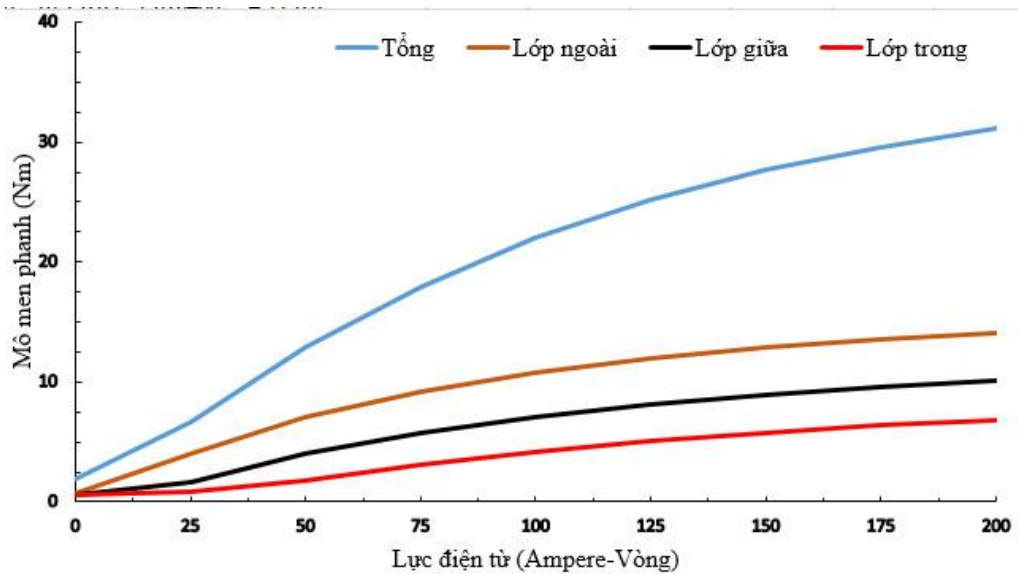
Giá trị cường độ từ trường chi tiết tại các lớp dầu theo chiều chu vi đường tròn được thể hiện trong hình vẽ số 7. Nhìn vào hình vẽ cũng cho thấy rằng cường độ từ trường của lớp ngoài cùng là lớn nhất và trong cùng là nhỏ nhất. Đồng thời mật độ này cũng không đồng nhất theo khoảng cách chu vi đường tròn bao. Vì bán kính các đường tròn là không bằng nhau nên các đỉnh cực tiểu và cực đại của mỗi lớp là lệch nhau không nhiều.



Hình 7. Cường độ từ trường theo chu vi

Mô men xoắn cực đại sinh ra của cơ cấu phanh loại mới này được tính toán và thể hiện trên hình vẽ 8. Với những giá trị khác nhau của lực điện từ, mô men sinh ra do lớp dầu phía ngoài là lớn nhất trong khi lớp dầu phía trong chỉ đạt độ lớn xấp xỉ một nửa. Tại giá trị lớn nhất của lực điện từ là 200 ampere-vòng thì mô men tổng cộng sinh ra cũng đạt giá trị cực đại là 30.8 Nm. Sự khác biệt này so với kết quả tính toán tối ưu hóa là 31.04 Nm là do quá trình làm tròn các giá trị trong bảng 1.

Để đánh giá chất lượng của cơ cấu phanh mới thiết kế, kết quả đạt được sẽ được so sánh với các cơ cấu phanh truyền thống cùng loại. Bảng 2 thể hiện kết quả so sánh giữa các loại phanh cùng có sáu cực từ nhưng khác nhau về số lượng các lớp dầu. Kết quả cho thấy với kích thước thiết kế nhỏ nhất thì mô men phanh sinh ra lại đạt giá trị lớn nhất. Do vậy mà tỉ số mô men riêng cũng đạt giá trị lớn nhất với 56,1 Nm/dm<sup>3</sup>. Tuy nhiên, giá trị mô men phanh khi chưa cấp dòng điện vào cũng còn tương đối lớn đạt 1,9 Nm.

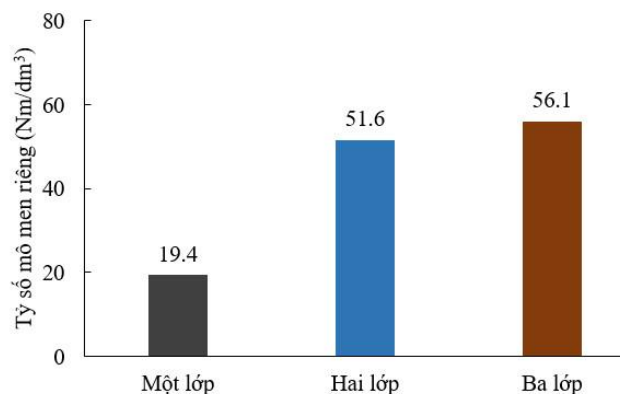


Hình 8. Mô men tổng và của từng lớp dầu sinh ra

Bảng 2. So sánh đặc tính của các loại phanh dầu từ trường với số lớp dầu khác nhau

Các thông số chính	Loại một lớp dầu	Loại hai lớp dầu	Loại ba lớp dầu
Mô men phanh cực đại (Nm)	22,4	30,4	30,8
Mô men phanh khi không cung cấp dòng điện (Nm)	1	2	1,9
Kích thước thiết kế R x L (mm)	70x75	50x75	50x70
Tỉ số mô men riêng TRV (Nm/dm <sup>3</sup> )	19,4	51,6	56,1

Hình 9 thể hiện rõ hơn đồ thị cột giữa các giá trị tỉ số mô men phanh riêng trên một đơn vị thể tích. Như nhìn thấy trong hình 9, mô men phanh riêng của cơ cấu phanh mới đề xuất là lớn nhất. Qua đó có thể kết luận rằng cơ cấu phanh mới thiết kế này đã đạt được yêu cầu đề ra với mục tiêu tăng mô men phanh sinh ra. Với các kết quả khả quan này, hướng nghiên cứu mở rộng của đề tài là thiết kế chế tạo, sản xuất lắp ráp và chạy thử nghiệm cơ cấu phanh dầu từ trường loại mới với ba lớp dầu này. Trong tương lai, kết quả của nhóm nghiên cứu mở ra các hướng ứng dụng vào thực tiễn đặc biệt là trong các lĩnh vực cơ khí ô tô, cơ khí chế tạo, rô bốt, y tế và nhiều lĩnh vực khoa học khác để phục vụ cho con người.



Hình 9. Tỷ số mô men phanh trên một đơn vị thể tích của các loại phanh

## 5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đề ra một thiết kế cơ cấu phanh dầu từ trường mới với đa cực từ và ba lớp dầu từ trường được đặt phía bên trong stator. Từ trường bên trong cơ cấu phanh này đã được mô phỏng và phân tích tính toán. Mô hình tối ưu hóa cũng đã được xây dựng để xác định mô men phanh tối đa dưới sự ràng buộc của các thông số kích thước.

Kết quả chỉ ra rằng, mật độ từ trường lớn nhất đi qua lớp dầu từ trường phía ngoài nằm gần các cực điện từ hơn so với các lớp dầu phía trong. So sánh với các cơ cấu phanh đa cực từ ở các nghiên cứu trước thì cơ cấu phanh ba lớp dầu mới này hơn hẳn cả về mô men phanh sinh ra cũng như tỷ số mô men phanh riêng.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Park J H and Park O O 2001 "Electrorheology and magnetorheology" *Korea-Australia Rheology Journal* **13** 1 pp. 13-17
- [2]. Nguyen Q H and Choi S-B 2008 "Optimal design of a vehicle magnetorheological damper considering the damping force and dynamic range" *Smart Materials and Structures* **18**
- [3]. Shiao Y, Nguyen Q-A and Lai C-C 2013 "A Novel Design of Semi-Active Suspension System Using Magneto-Rheological Damper on Light-Weight Vehicle " *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering* **37** 3
- [4]. Choi S-H, Kim S, Kim P, Park J and Choi S-B 2015 "A new visual feedback-based magnetorheological haptic master for robotassisted minimally invasive surgery" *Smart Mater. Struct.* **24** 065015
- [5]. Park J, Yoon G-H, Kang J-W and Choi S-B 2016 "Design and control of a prosthetic leg for above-knee amputees operated in semiactive and active modes" *Smart Mater. Struct.* **25** 085009
- [6]. Shiao Y-J, Nguyen Q-A and Zhang Z-Y 2015 "Design and experiment of a new magnetorheological brake" *Intl. J. App. Electr. Mecha.* **48** 309-326
- [7]. Shiao Y and Nguyen Q-A 2013 "Development of a multi-pole magnetorheological brake" *Smart Mater. Struct.* **22**
- [8]. Shiao Y, Ngoc N A and Lai C-H 2016 "Optimal design of a novel multi-pole bi-layer magnetorheological brake" *Smart Mater. Struct.* **25** 115015
- [9]. Lord Technical Data 2012 "MRF-140CG Magneto-Rheological Fluid" [www.lord.com](http://www.lord.com)
- [10]. Dimock G A, Yoo J-H and Wereley N M 2002 "Quasi-steady Bingham Biplastic Analysis of Electrorheological and Magnetorheological Dampers" *J. Intel. Mater. Syst. Struct.* **00** 1-10