

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**

BÙI VIỆT CHUNG

**TỪ TRƯỜNG CỦA VI CẤU TRÚC TỪ VỚI
BIẾN THIÊN TỪ TRƯỜNG LỚN**

LUẬN VĂN THẠC SĨ VẬT LIỆU VÀ LINH KIỆN NANO

HÀ NỘI - 2016

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**

BÙI VIẾT CHUNG

**TỪ TRƯỜNG CỦA VI CẤU TRÚC TỪ VỚI
BIẾN THIÊN TỪ TRƯỜNG LỚN**

Chuyên ngành: Vật liệu và linh kiện nano

Mã số: Chuyên ngành đào tạo thí điểm

LUẬN VĂN THẠC SĨ VẬT LIỆU VÀ LINH KIỆN NANO

Cán bộ hướng dẫn: PGS. TS. Phạm Đức Thắng

HÀ NỘI - 2016

LỜI CẢM ƠN

Trước hết, tôi xin bày tỏ lòng kính trọng và biết ơn sâu sắc bởi sự hướng dẫn tận tình của PGS. TS. Phạm Đức Thắng. Thầy đã tạo điều kiện cho mọi hoạt động nghiên cứu của tôi trong quá trình thực hiện luận văn. Tôi xin được chân thành cảm ơn ThS. Lê Việt Cường đã giúp đỡ và có các trao đổi nhiệt tình, xin được cảm ơn CN. Nguyễn Doãn Thành, TS. Bùi Đình Tú và các đồng nghiệp công tác tại Khoa Vật lý kỹ thuật và Công nghệ nano, trường Đại học Công nghệ (Đại học Quốc gia Hà Nội) đã động viên và hỗ trợ tôi trong thời gian qua.

Tôi cũng xin gửi lời cảm ơn tới Ban lãnh đạo và các đồng nghiệp tại trường THCS Nhân Chính, phường Nhân Chính, quận Thanh Xuân, Hà Nội nơi tôi công tác.

Luận văn được hoàn thành với sự hỗ trợ một phần từ đề tài 103.02-2015.80 của Quỹ phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia.

Sau cùng, tôi muốn gửi tình cảm yêu thương nhất và sự biết ơn tới bố, mẹ, cũng như tất cả những người thân trong gia đình và bạn bè đã luôn cổ vũ, động viên để tôi vượt qua khó khăn, hoàn thành tốt nội dung nghiên cứu trong bản luận văn này.

Hà Nội, ngày 11 tháng 11 năm 2016

Bùi Viết Chung

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận văn này là kết quả nghiên cứu của tôi đã thực hiện. Các kết quả nghiên cứu của luận văn là trung thực, các tài liệu tham khảo được trích dẫn đầy đủ.

Hà Nội, ngày 11 tháng 11 năm 2016

Học viên

Bùi Viết Chung

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1. 1. Đường cong từ trễ $M(H)$ của vật liệu sắt từ với lực kháng từ H_C , độ từ dư M_R , từ độ bão hòa M_S	10
Hình 1. 2. Đường cong từ trễ của vật liệu từ mềm và vật liệu từ cứng. ..	11
Hình 2. 1. Từ trường do dòng điện tròn bán kính R sinh ra tại điểm P bất kì.....	14
Hình 2. 2. Từ trường do cuộn dây sinh ra tại điểm P bất kì.....	17
Hình 2. 3. Nam châm hình trụ có độ từ dư M với n mô-men từ lưỡng cực μ (a) và các dòng điện tương đương (b).....	18
Hình 2. 4. Nam châm hình trụ với vô số phân tử từ dm (a) và sơ đồ tính toán từ thế do một phân tử từ dm sinh ra tại điểm $P(0; 0; z)$ (b).....	21
Hình 2. 5. Giao diện mô-đun thiết kế (a) và giao diện mô-đun tính toán (b) của phần mềm MacMMems.	23
Hình 2. 6. Giao diện của phần mềm mô phỏng Ansys Maxwell.	24
Hình 3. 1. Cấu hình 1×1 nam châm trụ và vị trí tính toán từ trường, sự biến thiên từ trường.	27
Hình 3. 2. Từ trường thành phần B_z được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	28
Hình 3. 3. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.....	31
Hình 3. 4. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	32
Hình 3. 5. Cấu hình 2×2 nam châm và vị trí tính toán từ trường, sự biến thiên từ trường.....	33
Hình 3. 6. Từ trường thành phần B_z được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	35
Hình 3. 7. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.....	36

Hình 3. 8. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	37
Hình 3. 9. Cấu hình 3×3 nam châm và vị trí tính toán từ trường, sự biến thiên từ trường.	38
Hình 3. 10. Từ trường thành phần B_z được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	39
Hình 3. 11. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	40
Hình 3. 12. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	41
Hình 3. 13. Cấu hình 4×4 (a) và 5×5 (b) nam châm và vị trí tính toán từ trường, sự biến thiên từ trường.	42
Hình 3. 14. Từ trường thành phần B_z được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	43
Hình 3. 15. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	44
Hình 3. 16. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	45
Hình 3. 17. Từ trường thành phần B_z được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	46
Hình 3. 18. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	47
Hình 3. 19. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.	48
Hình 3. 20. Cấu hình 1×1 nam châm và các vị trí khảo sát từ trường bằng phần mềm Ansys Maxwell.	49

Hình 3. 21. Thành phần từ trường B_z được mô phỏng tại các điểm nằm trên trục nam châm cách mặt trên nam châm một khoảng d (a), tại các điểm nằm trên đường thẳng qua mép nam châm và song song với trục nam châm cách mặt trên nam châm một khoảng d (b), tại các điểm nằm trên đường thẳng song song với trục nam châm và cách trục nam châm một khoảng $2R$ (c)..... 50

Hình 3. 22. Không gian từ trường ngay sát bề mặt các nam châm (a), một mặt cắt của không gian từ trường dọc theo khoảng cách d từ bề mặt nam châm (b). 54

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU.....	3
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN.....	3
1.1. Từ trường và các đại lượng cơ bản	5
1.2. Các phương trình cơ bản của từ trường tĩnh.....	5
1.3. Phân loại một số vật liệu từ.....	7
1.3.1. Vật liệu nghịch từ.....	8
1.3.2. Vật liệu thuận từ.....	8
1.4. Đường cong từ trễ	9
1.5. Mục tiêu của luận văn	12
CHƯƠNG 2. MÔ HÌNH LÝ THUYẾT VÀ PHẦN MỀM MÔ PHỎNG	14
2.1. Mô hình lý thuyết.....	14
2.1.1. Mô hình dòng tương đương	14
2.1.2. Mô hình từ tích.....	19
2.2. Phần mềm mô phỏng.....	22
2.2.1. Phần mềm MacMMems.....	23
2.2.2. Phần mềm Ansys Maxwell	24
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN	26
3.1. Kết quả khảo sát từ trường bằng phần mềm MacMMems	26
3.1.1. Cấu hình 1×1 nam châm	26
3.1.2. Cấu hình 2×2 nam châm	33
3.1.3. Cấu hình 3×3 nam châm	38
3.1.4. Cấu hình 4×4 và 5×5 nam châm	42
a) Cấu hình 4×4 nam châm	42
b) Cấu hình 5×5 nam châm.....	46

3.2. So sánh từ trường và sự biến thiên từ trường bề mặt của một số cấu hình nam châm mô phỏng được bằng các phần mềm mô phỏng và tính toán lý thuyết.....	49
3.2.1. Cấu hình 1×1 nam châm	49
3.2.2. Cấu hình 2×2 nam châm	53
KẾT LUẬN	56
TÀI LIỆU THAM KHẢO	57

MỞ ĐẦU

Nam châm và từ trường là những thành phần quan trọng trong nhiều thiết bị kỹ thuật. Ngày nay, nam châm được sử dụng trong nhiều động cơ ô tô, các đầu đọc và ghi thông tin trong lĩnh vực máy tính. Với sự phát triển của công nghệ nano, nhu cầu về các nam châm mạnh và tạo ra được từ trường không đồng nhất (biến thiên) lớn trong không gian nhỏ hơn ngày càng nhiều.

Cho đến nay việc phân tách các đối tượng từ tính và phi từ tính cũng như các truyền động sử dụng lực từ thông thường sử dụng từ trường được tạo ra bởi các cuộn solenoid, các nam châm điện và các nam châm siêu dẫn. Gần đây, một số nhóm nghiên cứu đã thành công trong việc sử dụng các nam châm vĩnh cửu để tạo ra từ trường lớn thay thế các nam châm truyền thống. Từ trường lớn này được tạo ra phù hợp với đặc điểm dị hướng từ mạnh của các vật liệu được sử dụng để làm nam châm vĩnh cửu, thường là hợp chất của vật liệu đất hiếm và kim loại chuyển tiếp. Tuy nhiên, từ trường đồng nhất không phải là thuận lợi vì các phân tách sử dụng từ tính đòi hỏi nguồn từ trường có cường độ lớn và biến thiên mạnh. Bởi vì lực từ tác dụng lên các đối tượng tỉ lệ thuận với độ cảm từ của đối tượng, cảm ứng từ và độ biến thiên của cảm ứng từ. Cụ thể, một phần tử (đối tượng) từ tính khi được đặt trong một môi trường từ không đồng nhất sẽ chịu tác dụng của lực từ cho bởi công thức sau:

$$\vec{F}_m = \frac{V\Delta\chi}{\mu_0} \vec{B} \cdot \nabla \vec{B}$$

với V là thể tích của phần tử từ, $\Delta\chi$ là sự chênh lệch độ thẩm từ của phần tử từ (χ_p) và môi trường (χ_m), B là độ lớn của từ trường.

Tùy thuộc vào giá trị của $\Delta\chi$ mà phần tử từ sẽ chịu tác dụng của lực hút hay lực đẩy do từ trường tác động. Nếu $\Delta\chi > 0$ thì các phần tử sẽ chịu tác động của lực hút và bị hút về những vị trí có lực hút mạnh nhất (thường là các cạnh của nam châm), trong khi các phần tử sẽ bị đẩy ra xa khỏi nguồn từ trường tới những vị trí có lực đẩy nhỏ nhất nếu $\Delta\chi < 0$.

Ngoài ra, khi ở trong dung dịch và được nhả lên các cấu trúc từ, các phần tử còn chịu tác động của các lực khác như: trọng lực (F_g), lực đẩy Archimedes (F_A), lực kéo của dòng chất lỏng... vì thế các phần tử thường có xu hướng di chuyển (magnetophoresis) tới những vị trí ổn định nơi mà tổng các lực tác động lên phần tử có xu hướng cân bằng. Việc tính toán các lực tác dụng lên phần tử từ cho phép chúng ta xác định và tiên đoán được cách mà phần tử từ di chuyển và

vị trí ổn định của chúng khi được đặt vào môi trường từ. Do đó, để tăng được hiệu quả của phân tách từ tính, bên cạnh các yêu cầu khác thì giá trị của tích $\vec{B}\nabla\vec{B}$ cao cũng được yêu cầu.

Theo dự đoán với các kỹ thuật chế tạo các hệ thống vi cơ điện tử và các vi nam châm ngày nay, các cấu trúc từ vĩnh cửu có thể tích hợp được trong các hệ thống phân tích vi lưu, do đó mở rộng các khả năng ứng dụng của nam châm. Một thực tế rõ ràng là các hệ thống phân tách từ này khá phức tạp, đắt tiền và cần nhiều công đoạn cũng như thời gian để chế tạo. Do đó, các phương pháp thiết kế lý thuyết được sử dụng để thu được mô hình hệ thống tối ưu trước khi chế tạo. Công việc đầu tiên và quan trọng nhất của quá trình thiết kế lý thuyết này là mô phỏng từ trường. Vì vậy trong luận văn này, chúng tôi nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng từ trường của một số cấu trúc từ kích thước micro-nano, có tính từ cứng và dị hướng từ lớn theo một trục. Tại viền của các nam châm, từ trường (B) rất mạnh và biến thiên (∇B) lớn được tạo ra, với tích giá trị ($B\nabla B$) có thể đạt $10^3 - 10^5 \text{ T}^2/\text{m}$.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

1.1. Từ trường và các đại lượng cơ bản

Từ trường là môi trường vật chất đặc biệt bao quanh điện tích chuyển động và tác dụng lực lên điện tích chuyển động trong nó. Từ trường có thể sinh ra bằng hai cách: sử dụng các cuộn dây có dòng điện chạy trong dây dẫn hoặc nam châm vĩnh cửu. Trong các nam châm vĩnh cửu không có các dòng điện theo nghĩa thông thường mà chỉ có chuyển động quỹ đạo và chuyển động spin của điện tử. Đó cũng chính là nguồn gốc cơ bản của hiện tượng từ trong vật liệu.

Cảm ứng từ \vec{B} là đại lượng véctơ, đặc trưng cho từ trường về phương diện tác dụng lực.

Cường độ từ trường hay còn gọi là véctơ cường độ từ trường \vec{H} đặc trưng cho độ mạnh yếu của từ trường. Trong chân không hoặc không khí, cường độ từ trường H có chiều giống như chiều của cảm ứng từ B . Chúng liên kết với nhau bởi phương trình [1, 2]:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (1.1)$$

với $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N.A}^{-2}$ là độ từ thẩm của chân không.

Trong các vật liệu từ, mỗi vật liệu từ có một từ trường nội tại (từ độ) \vec{M} nên khi được đặt trong từ trường ngoài \vec{H} , cảm ứng từ B sẽ bao gồm cả thành phần của từ trường ngoài \vec{H} , và từ độ \vec{M} bên trong vật liệu:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.2)$$

Độ cảm từ χ thiết lập mối quan hệ giữa M và H theo phương trình sau:

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (1.3)$$

Từ các phương trình trên, chúng ta có thể thấy:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu\vec{H} \quad (1.4)$$

với $\mu_r = \mu/\mu_0$ là độ từ thẩm tương đối của vật liệu so với chân không.

1.2. Các phương trình cơ bản của từ trường tĩnh

Như chúng ta đã biết điện trường và từ trường đồng thời tồn tại trong không gian tạo thành một trường thống nhất gọi là trường điện từ. Vì vậy để mô tả về trường điện từ, Maxwell đã nêu ra một hệ thống các phương trình sau [20]:

- Dạng vi phân:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.6)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.7)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.8)$$

- Dạng tích phân:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV \quad (1.9)$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (1.10)$$

$$\oint_C \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (1.11)$$

$$\oint_C \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{J} dS + \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} d\vec{S} \quad (1.12)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} \quad (1.13)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} \quad (1.14)$$

trong đó: \vec{E} là véc tơ cường độ điện trường, có đơn vị (V/m)

\vec{H} là véc tơ cường độ từ trường, có đơn vị (A/m)

\vec{D} là độ điện cảm, có đơn vị (C/m²)

ρ là mật độ điện tích, có đơn vị (C/m³)

\vec{B} véc tơ cảm ứng từ, có đơn vị (T)

$d\vec{S}$ véctơ vi phân diện tích có hướng vuông góc với mặt S có đơn vị (m^2)

dV vi phân thể tích V được bao bọc bởi diện tích S , có đơn vị (m^3)

$d\vec{l}$ véctơ vi phân của đường cong tiếp tuyến với đường cong (C) bao quanh diện tích S , có đơn vị (m)

ϵ, μ là hằng số điện môi và từ thẩm của môi trường

Hệ các phương trình Maxwell viết như trên chỉ được áp dụng trong những điều kiện sau:

- Các vật thể đứng yên hoặc chuyển động chậm trong điện từ trường.
- Các đại lượng ϵ, μ đặc trưng cho tính chất điện từ của môi trường không phụ thuộc thời gian và không phụ thuộc các véctơ đặc trưng cho điện từ trường.

Như vậy, hệ phương trình Maxwell cho phép ta xác định được trạng thái của điện từ trường một cách đơn giản. Khi áp dụng hệ phương trình Maxwell cho từ trường tĩnh, ta phải cho các đạo hàm theo thời gian bằng 0 và cho $\vec{j} = 0$ (không có mật độ dòng) do đó các phương trình Maxwell sẽ đơn giản đi nhiều. Từ những điều kiện trên, ta có thể viết lại hệ phương trình Maxwell cho trường tĩnh từ gồm các phương trình sau đây:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.15)$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (1.16)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.17)$$

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \quad (1.18)$$

1.3. Phân loại một số vật liệu từ

Từ trường được định nghĩa bằng các đường sức từ, khi từ trường tương tác với bất kỳ loại vật liệu nào đó, số đường sức từ có thể tăng hoặc giảm. Nguồn từ trường theo đó có thể được khuếch đại hay giảm đi trong vật liệu như là kết quả của sự tương tác. Các chất khác nhau tương tác với từ trường ở mức độ khác nhau. Để biểu diễn mức độ tương tác của vật liệu với từ trường ngoài, người ta dựa vào công thức 1.3. Thông qua công thức này người ta đưa ra khái niệm hệ số từ hóa χ là đại lượng đặc trưng cho mức độ bị từ hóa của vật liệu. Dựa vào giá trị của hệ số này, các vật liệu từ thường được chia làm ba nhóm,

bao gồm vật liệu nghịch từ, thuận từ và sắt từ. Nhóm vật liệu sắt từ có thể được coi là lớp con của thuận từ nhưng vẫn được tách riêng bởi có những tính chất từ quan trọng [1, 2, 20].

1.3.1. Vật liệu nghịch từ

Như ta đã biết, hiệu ứng nghịch từ có ở mọi nguyên tử đặt trong từ trường ngoài. Do đó tính chất nghịch từ có ở mọi chất. Tuy nhiên, tính chất nghịch từ sẽ thể hiện rõ chủ yếu ở những chất mà khi chưa đặt trong từ trường ngoài, tổng mô-men từ nguyên tử (hay phân tử) của chúng bằng 0, nghĩa là mọi mô-men từ quỹ đạo và mô-men từ spin hoàn toàn triệt tiêu lẫn nhau. Đó là những chất khí hiếm (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn) hoặc các ion (Na^+ , Cl^-) có các lớp điện tử giống như khí hiếm. Tính chất nghịch từ cũng thể hiện ở cả một số chất có mô-men từ nguyên tử chiếm ưu thế so với hiệu ứng thuận từ như Cu, Ag, Sb, Bi. Ngoài ra, các chất như Pb, Zn, Si, Ge, S, CO_2 , H_2O , thủy tinh và đa số các hợp chất hữu cơ cũng là các chất nghịch từ. Khi được đặt trong từ trường ngoài, từ độ của các vật liệu này là rất yếu và ngược hướng với từ trường ngoài. Độ cảm từ có giá trị âm nằm trong khoảng từ -10^{-6} tới -10^{-4} và không thay đổi theo nhiệt độ.

1.3.2. Vật liệu thuận từ

Khác với chất nghịch từ, chất thuận từ khi bị từ hóa sẽ sinh ra một từ trường phụ hướng cùng chiều với từ trường ngoài.

Tính chất này thể hiện ở những chất mà khi chưa có từ trường ngoài, mô-men từ nguyên tử (hay phân tử) của chúng khác 0. Đó là những chất như các kim loại kiềm (Na, K,...), Al, NO, Pt, O_2 , N_2 , các nguyên tố đất hiếm,...

Khi chưa đặt khối vật liệu thuận từ vào trong từ trường ngoài, theo lý thuyết Langevin, do chuyển động nhiệt, các mô-men từ nguyên tử sắp xếp hoàn toàn hỗn loạn nên tổng mô-men từ của cả khối thuận từ bằng 0. Khi đặt khối vật liệu thuận từ vào trong từ trường ngoài, các mô-men từ nguyên tử có xu hướng sắp xếp theo hướng của từ trường ngoài. Tuy nhiên chuyển động nhiệt lại có xu hướng làm cho chúng sắp xếp hỗn loạn. Dưới tác dụng đồng thời của cả hai nguyên nhân trên, các mô-men từ nguyên tử sẽ sắp xếp có thứ tự hơn theo hướng của từ trường ngoài, tạo ra một mô-men từ tổng trong khối vật liệu thuận từ, mô-men từ tổng này sẽ biến mất khi từ trường ngoài được loại bỏ. Độ cảm từ của vật liệu thuận từ có giá trị trong khoảng từ 10^{-4} tới 10^{-3} và phụ thuộc vào nhiệt độ, độ cảm từ lớn hơn ở nhiệt độ thấp và giảm dần khi nhiệt độ tăng do dao động nhiệt của các mô-men từ.

1.3.3. Vật liệu sắt từ

Nghịch từ và thuận từ là những vật liệu từ yếu. Sắt từ là một loại vật liệu từ mạnh. Độ cảm từ của vật liệu sắt từ có thể lớn hơn độ cảm từ của vật liệu nghịch từ thuận từ hàng trăm triệu lần. Độ cảm từ của vật liệu sắt từ có giá trị trong khoảng từ 10^2 tới 10^5 [3, 4, 6, 9-11, 14-16, 20-26].

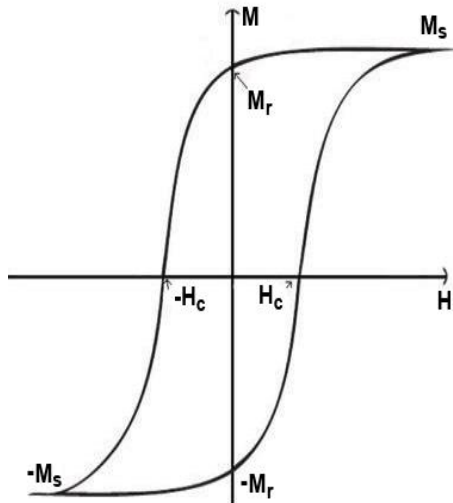
Các nguyên tố hóa học có tính chất sắt từ là Fe, Ni, Co, Gd, một số nguyên tố đất hiếm ở nhiệt độ rất thấp,... Ngoài ra còn một số lượng lớn chất sắt từ là hợp kim của các nguyên tố sắt từ với nhau, hợp kim của các nguyên tố sắt từ với các nguyên tố không sắt từ (như Fe-Ni, Fe-Ni-Al,...) và một số hợp kim của các nguyên tố không sắt từ với nhau (như Cu-Mn-Al),...

Giống vật liệu thuận từ ở chỗ có mô-men từ tĩnh, nhưng các mô-men từ này liên kết chặt chẽ với nhau. Các mô-men từ nguyên tử liên kết và sắp xếp song song và cùng chiều với nhau qua một vùng không gian gọi là miền Weiss (domain). Nhiệt độ tăng trong các chất sắt từ cũng làm giảm mô-men từ tổng của vật liệu bởi dao động nhiệt của các mô-men từ riêng rẽ. Các chất sắt từ mặc dù có từ độ tự phát nhưng mô-men từ tổng cộng vẫn có thể bằng 0 vì mô-men từ tổng của các miền Weiss liên kết ngẫu nhiên với nhau và không có định hướng ưu tiên. Khi vật liệu được đặt trong từ trường ngoài với cường độ tăng dần, các mô-men từ nguyên tử sẽ được sắp xếp cùng hướng với từ trường ngoài cho tới khi đạt trạng thái bão hòa từ (M_S). Khi vật liệu đạt được trạng thái bão hòa từ, nếu từ trường ngoài được loại bỏ thì vật liệu sắt từ vẫn tồn tại một mô-men từ tổng tương ứng với định hướng ưu tiên của các mô-men thành phần sau khi được từ hóa, gọi là từ độ dư (M_R). Lúc này, nếu từ trường ngoài được đưa vào theo hướng ngược lại và tăng dần cường độ để các mô-men từ của vật liệu đạt trạng thái bão hòa một lần nữa thì từ độ của vật liệu là một hàm của từ trường ngoài và có đường về khác đường đi. Đồ thị sự phụ thuộc của từ độ vật liệu sắt từ vào từ trường ngoài gọi là đường cong từ trễ. Đường cong từ trễ là một tính chất quan trọng của vật liệu sắt từ và làm cho vật liệu sắt từ có nhiều tiềm năng ứng dụng mà một trong những ứng dụng cơ bản và điển hình nhất của chúng là dùng để chế tạo nam châm.

1.4. Đường cong từ trễ

Từ trễ (magnetic hysteresis) là hiện tượng bất thuận nghịch giữa quá trình từ hóa và đảo từ ở các vật liệu sắt từ do khả năng giữ lại từ tính của các vật liệu sắt từ. Hiện tượng từ trễ được biểu hiện thông qua đường cong từ trễ (từ độ - từ trường $M(H)$, hay cảm ứng từ - từ trường $B(H)$), được mô tả như sau: sau khi từ

hóa một vật sắt từ đến một từ trường bất kỳ, nếu ta giảm dần từ trường và quay lại theo chiều ngược, thì nó không quay trở về đường cong từ hóa ban đầu nữa, mà đi theo đường khác, và nếu ta đảo từ theo một chu trình kín (thay đổi từ trường ngoài theo hướng ngược lại), thì ta sẽ có một đường cong kín gọi là đường cong từ trễ hay chu trình từ trễ [1, 15] (hình 1.1). Tính chất từ trễ là một tính chất nội tại đặc trưng của các vật liệu sắt từ, và hiện tượng trễ biểu hiện khả năng từ tính của của các chất sắt từ [20].



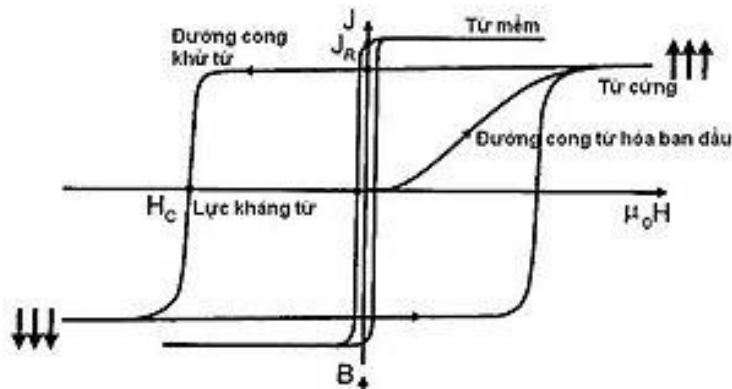
Hình 1. 1. Đường cong từ trễ $M(H)$ của vật liệu sắt từ với lực kháng từ H_C , độ từ dư M_R , từ độ bão hòa M_S .

Trên đường cong từ trễ, ta sẽ xác định được các đại lượng đặc trưng của chất sắt từ như:

- Từ độ bão hòa (M_S): là từ độ đạt được trong trạng thái bão hòa từ, có nghĩa là tất cả các mômen từ của chất sắt từ song song với nhau.
- Từ dư (M_R): là giá trị từ độ khi từ trường ngoài được khử về 0.
- Lực kháng từ (H_C): là từ trường ngoài cần thiết để khử hoàn toàn mômen từ của vật liệu, hay là giá trị để từ độ đổi chiều. Đôi khi lực kháng từ còn được gọi là trường đảo từ.

Nguyên nhân cơ bản của hiện tượng từ trễ là sự tương tác giữa các mômen từ có tác dụng ngăn cản chúng quay theo từ trường ngoài. Có nhiều cơ chế khác nhau tạo nên hiện tượng từ trễ cũng như các dạng đường cong từ trễ khác nhau: cơ chế quay các mômen từ, cơ chế hãm dịch chuyển vách đô men, cơ chế hãm sự phát triển của mầm đảo từ.

Việc phân tích đường cong từ trễ của các vật liệu sắt từ dẫn tới khái niệm vật liệu từ cứng và vật liệu từ mềm (hình 1.2).



Hình 1. 2. Đường cong từ trễ của vật liệu từ mềm và vật liệu từ cứng.

Vật liệu từ mềm là vật liệu dễ từ hóa và dễ khử từ bởi từ trường ngoài có cường độ tương đối thấp. Khi từ trường ngoài được loại bỏ thì vật liệu từ mềm gần như trở về trạng thái cân bằng và không có từ dư sau khi đã được từ hóa tới trạng thái bão hòa. Lực kháng từ H_c thường nhỏ hơn 100Oe ($1\text{Oe} = 1\text{G} = 0.0796\text{ kA/m}$), chu trình trễ hẹp, từ độ bão hòa, độ từ thẩm ($\mu \geq 10^3$) và hệ số từ hóa rất cao. Vật liệu từ mềm thường được dùng làm vật liệu hoạt động trong trường ngoài, ví dụ như lõi biến thế, lõi nam châm điện, các lõi dẫn từ, máy phát điện, role, sensor từ, cuộn cảm, cuộn chấn hay màn chắn từ,...

Vật liệu từ cứng là vật liệu sắt từ khó khử từ và khó từ hóa. Vật liệu từ cứng có nhiều đặc trưng từ học, tính chất từ phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ, độ bền, độ chống ăn mòn,... Các đại lượng vật lý đặc trưng của vật liệu từ cứng là:

- Lực kháng từ H_c lớn nằm trong khoảng $10^2 \div 10^3\text{ kA/m}$. Nguồn gốc của lực kháng từ lớn trong các vật liệu từ cứng chủ yếu liên quan đến đến dị hướng từ tinh thể lớn trong vật liệu. Các vật liệu từ cứng thường có cấu trúc tinh thể có tính đối xứng kém hơn so với các vật liệu từ mềm và chúng có dị hướng từ tinh thể rất lớn [1-4, 6, 9-11, 14-16, 21-26].

- Cảm ứng từ dư hay độ từ dư, thường ký hiệu là B_R hay M_R , là cảm ứng từ còn dư sau khi ngắt từ trường. Vật liệu từ cứng có cảm ứng từ dư M_R đáng kể.

- Tích năng lượng từ cực đại $((BH)_{\max})$ là đại lượng đặc trưng cho độ mạnh yếu của vật liệu từ, được đặc trưng bởi năng lượng từ cực đại có thể tồn trữ trong một đơn vị thể tích vật liệu từ. Đại lượng này có đơn vị là đơn vị của mật độ năng lượng, J/m^3 . Tích năng lượng từ cực đại được xác định trên đường cong từ trễ thuộc về góc phần tư thứ hai trên đường cong từ trễ, là một điểm sao cho

giá trị của tích cảm ứng từ B và từ trường H đạt cực đại. Để có tích năng lượng từ cao, vật liệu cần có lực kháng từ lớn và cảm ứng từ dư cao.

Bảng 1.1 trình bày một số tính chất điển hình của các vật liệu từ cứng phổ biến nhất hiện nay [21, 25, 26]. Trong số các vật liệu từ cứng thì vật liệu NdFeB có cấu trúc tinh thể kiểu tứ giác với lực kháng từ lớn (hơn 10kOe) và từ độ bão hòa cao (tới 1.62T) nên là loại nam châm vĩnh cửu mạnh nhất hiện nay với khả năng cho tích năng lượng từ lớn, nó được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp máy móc, thiết bị truyền thông, hóa học, y học, các lĩnh vực công nghệ cao như hàng không vũ trụ, hàng không, quân sự... hơn nữa, chúng còn được sử dụng trong các ngành công nghiệp mới nổi như ngành công nghiệp năng lượng mới của năng lượng gió. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu cho thấy việc giảm kích thước nam châm NdFeB không làm thay đổi tính chất từ của chúng cho thấy nam châm này có nhiều khả năng tích hợp với các thiết bị và vi hệ thống.

Bảng 1. 1. Nhiệt độ Curie T_C , từ trường dị hướng H_A , từ độ bão hòa M_S , mật độ khối ρ và khả năng chống ăn mòn của các hợp chất kim loại chuyển tiếp-đất hiếm điển hình, FePt ($L1_0$), CoPt ($L1_0$) so với các vật liệu cổ điển $BaFe_{12}O_{19}$, α -Fe [22].

Vật liệu	M_S (T)	H_A (T)	$(BH)_{max, th}$ (kJ/m ³)	T_C (K)	ρ (g/cm ³)	Khả năng chống ăn mòn
Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.61	7.6	514	585	7.6	Kém
SmCo ₅	1.05	40.0	220	1000	8.6	Kém
Sm ₂ Co ₁₇	1.30	6.4	333	1173	8.7	Kém
Sm ₂ Fe ₁₇ N ₃	1.54	21.0	472	749	7.7	Kém
FePt- $L1_0$	1.43	11.6	407	750	15.1	Tốt
CoPt- $L1_0$	1.00	4.9	200	840	15.2	Tốt
α -Fe	2.16	-	-	1043	7.9	Kém
BaFe ₁₂ O ₁₉	0.48	1.8	-	742	5.3	Tốt

1.5. Mục tiêu của luận văn

Chúng ta thấy rằng từ tính là một thuộc tính cơ bản và quan trọng của vật liệu. Về cơ bản, dù nhiều hay ít thì mọi vật liệu đều biểu hiện tính chất từ. Các vật liệu từ ngày nay được ứng dụng nhiều trong khoa học kỹ thuật và cuộc sống. Trong tất cả các ứng dụng, các vật liệu từ được sử dụng đều có một hình dạng, kích thước và tính chất từ nhất định phù hợp với mục tiêu ứng dụng. Tất cả các thông số liên quan đều hướng tới việc tạo ra một không gian từ trường như

mong muốn. Vì vậy trước khi chế tạo, người ta thường tiến hành mô phỏng để có thể thu được vật liệu từ với hình dạng và tính chất hợp lý.

Một trong những ứng dụng được quan tâm nghiên cứu hiện nay là khả năng bắt giữ các phần tử kích thước nhỏ dựa vào tính chất từ của chúng của các vật liệu, cấu trúc từ nhờ sự phân bố không đồng nhất của từ trường trên bề mặt các vật liệu từ và cấu trúc từ. Bằng việc sử dụng các vật liệu từ có kích thước, hình dạng, trật tự và tính chất từ phù hợp, chúng ta có thể tạo ra được không gian có cường độ từ trường lớn và sự biến thiên từ trường mạnh qua đó tác dụng được lực lớn lên các phần tử kích thước nhỏ.

Mục tiêu chính của luận văn là:

- Luận văn này được thực hiện với mục đích tính toán, khảo sát lý thuyết sự phân bố của từ trường trên một số nam châm từ cứng hình trụ NdFeB có cấu trúc micro bằng các mô hình lý thuyết và phần mềm mô phỏng.

- Các giá trị thu được bằng tính toán và mô phỏng được so sánh với nhau, qua đó cho thấy mức độ chính xác và đáng tin cậy của các mô hình lý thuyết cũng như phần mềm mô phỏng từ trường.

- Các kết quả tính toán và mô phỏng thu được sẽ làm cơ sở cho các nghiên cứu, chế tạo các vi cấu trúc từ thực tế có từ trường và sự biến thiên từ trường phù hợp cho một số ứng dụng liên quan tới việc bắt giữ hạt từ và phân tử sinh học.

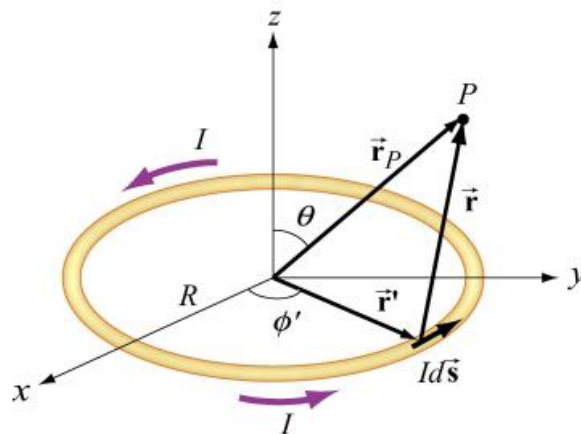
CHƯƠNG 2. MÔ HÌNH LÝ THUYẾT VÀ PHẦN MỀM MÔ PHỎNG

Các mô hình tính toán lý thuyết về từ trường của các nam châm được dựa trên nền tảng các phương trình Maxwell và các định luật về từ trường. Hai mô hình được sử dụng phổ biến hiện nay để nghiên cứu về từ trường và sự biến thiên từ trường trong không gian xung quanh các nam châm là mô hình dòng tương đương và mô hình từ tích. Tùy thuộc vào đặc điểm vật liệu của nam châm và các thông số đầu vào cũng như mục đích nghiên cứu người ta sẽ lựa chọn mô hình phù hợp để thực hiện tính toán nhằm thu được các kết quả mong muốn và để hỗ trợ cho các nghiên cứu thực nghiệm.

2.1. Mô hình lý thuyết

2.1.1. Mô hình dòng tương đương

Mô hình dòng tương đương hay còn gọi là mô hình dòng Ampere [7, 8, 12, 13, 18]. Trong mô hình này, để tính toán từ trường được sinh ra bởi các nam châm có từ độ M người ta coi nam châm là một cuộn dây hoặc một số cuộn dây có hình dạng phù hợp với nam châm sao cho mô-men từ tổng do các cuộn dây sinh ra tương đương với mô-men từ dư của các nam châm.



Hình 2. 1. Từ trường do dòng điện tròn bán kính R sinh ra tại điểm P bất kì.

Ví dụ, xét một nam châm hình trụ có bán kính R , chiều cao L và vectơ từ độ dư $\mu_0 M_R$ hướng theo trục của nam châm. Để xác định từ trường trong không gian xung quanh nam châm, người ta sẽ coi từ trường cho nam châm sinh ra tương đương với từ trường do một cuộn dây có bán kính R gồm N vòng dây, chiều cao L có dòng điện I chạy qua sinh ra (xem hình 2.1). Để tính từ trường do

cuộn dây này sinh ra, trước hết chúng ta xét từ trường do vòng dây bán kính R , tâm $O(0; 0; 0)$ có dòng điện I chạy qua sinh ra tại điểm P có tọa độ $(z; y; x)$.

Để tính được từ trường do vòng dây sinh ra tại điểm P , ta chia vòng dây thành vô số phần tử dòng $Id\vec{s}$ và xét phần tử dòng tại vị trí có tọa độ là vectơ $\vec{r}'(R\cos\phi'; R\sin\phi'; 0)$, phần tử dòng này có thể viết lại như sau:

$$Id\vec{s} = I \left(\frac{d\vec{r}}{d\phi'} \right) d\phi' = IRd\phi'(-\sin\phi'\vec{i} + \cos\phi'\vec{j} + 0\vec{k}) \quad (2.1)$$

Vị trí tương đối giữa điểm P và phần tử dòng điện $Id\vec{s}$ là:

$$\vec{r} = \vec{r}_p - \vec{r}' = (x - R\cos\phi'; y - R\sin\phi'; z) \quad (2.2)$$

Vecto đơn vị của vectơ \vec{r} là:

$$\vec{r}_u = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} = \frac{1}{R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2R(x\cos\phi' + y\sin\phi')} (x - R\cos\phi'; y - R\sin\phi'; z) \quad (2.3)$$

Ta có:

$$\begin{aligned} d\vec{s} \times \vec{r}_u &= \frac{Rd\phi'}{R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2R(x\cos\phi' + y\sin\phi')} (Rz\cos\phi'; Rz\sin\phi'; R^2 - Rxcos\phi' - Rysin\phi') \end{aligned} \quad (2.4)$$

Từ trường do phần tử dòng $Id\vec{s}$ sinh ra tại điểm P tính theo định luật Biot-Savart là:

$$\begin{aligned} d\vec{B} &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \vec{r}_u}{r^2} \\ &= \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \frac{Rz\cos\phi'\vec{i} + Rz\sin\phi'\vec{j} + (R^2 - Rxcos\phi' - Rysin\phi')\vec{k}}{(R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2R(x\cos\phi' + y\sin\phi'))^{3/2}} d\phi' \end{aligned} \quad (2.5)$$

Suy ra từ trường tổng cộng tại điểm P do cả vòng dây sinh ra là:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Rz \cos\phi' \vec{i} + Rz \sin\phi' \vec{j} + (R^2 - Rx \cos\phi' - Ry \sin\phi') \vec{k}}{(R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2R(x \cos\phi' + y \sin\phi'))^{3/2}} d\phi' \quad (2.6)$$

Như vậy, các thành phần từ trường tại điểm P lần lượt là:

- Thành phần từ trường theo trục Ox:

$$B_x = \frac{\mu_0 IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\phi'}{(R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2R(x \cos\phi' + y \sin\phi'))^{3/2}} d\phi' \quad (2.7)$$

- Thành phần từ trường theo trục Oy:

$$B_y = \frac{\mu_0 IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin\phi'}{(R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2R(x \cos\phi' + y \sin\phi'))^{3/2}} d\phi' \quad (2.8)$$

- Thành phần từ trường theo trục Oz:

$$B_z = \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R - x \cos\phi' - y \sin\phi'}{(R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2R(x \cos\phi' + y \sin\phi'))^{3/2}} d\phi' \quad (2.9)$$

+ Trường hợp điểm P nằm trên trục của vòng dây, tức điểm P có tọa độ (0; 0; z):

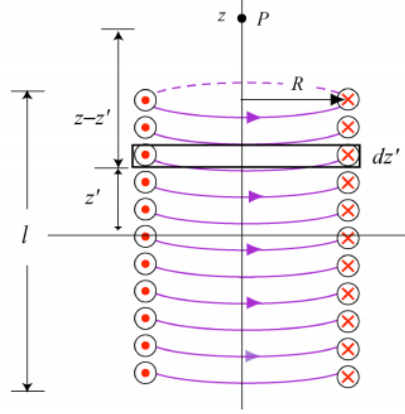
$$B_x = \frac{\mu_0 IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\phi'}{(R^2 + z^2)^{3/2}} d\phi' = 0 \quad (2.10)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin\phi'}{(R^2 + z^2)^{3/2}} d\phi' = 0 \quad (2.11)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R}{(R^2 + z^2)^{3/2}} d\phi' = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2.12)$$

Tiếp theo, chúng ta xem xét từ trường do cuộn dây có bán kính R gồm N vòng dây, chiều dài l có dòng điện I chạy qua sinh ra tại điểm P có tọa độ $(x; y; z)$ (hình 2.2). Để tính từ trường do cuộn dây sinh ra, ta chia cuộn dây thành vô số vòng dây có chiều dày dz' , mỗi vòng dây sẽ mang dòng điện:

$$dI = I \frac{N}{l} dz' \quad (2.13)$$



Hình 2.2. Từ trường do cuộn dây sinh ra tại điểm P bất kì.

Xét vòng dây tại vị trí z' , từ trường do vòng dây này sinh ra tại điểm P bất kỳ là:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 R dI}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Rz \cos\phi' \vec{i} + Rz \sin\phi' \vec{j} + (R^2 - Rx \cos\phi' - Ry \sin\phi') \vec{k}}{(R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2R(x \cos\phi' + y \sin\phi'))^{3/2}} d\phi' \quad (2.14)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 R N I}{4\pi l} dz' \int_0^{2\pi} \frac{Rz \cos\phi' \vec{i} + Rz \sin\phi' \vec{j} + (R^2 - Rx \cos\phi' - Ry \sin\phi') \vec{k}}{(R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2R(x \cos\phi' + y \sin\phi'))^{3/2}} d\phi' \quad (2.15)$$

Suy ra từ trường do cả cuộn dây sinh ra tại điểm P là:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 R N I}{4\pi l} \int_0^{2\pi} \frac{Rz \cos\phi' \vec{i} + Rz \sin\phi' \vec{j} + (R^2 - Rx \cos\phi' - Ry \sin\phi') \vec{k}}{(R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2R(x \cos\phi' + y \sin\phi'))^{3/2}} d\phi' \int_{-l/2}^{l/2} dz' \quad (2.16)$$

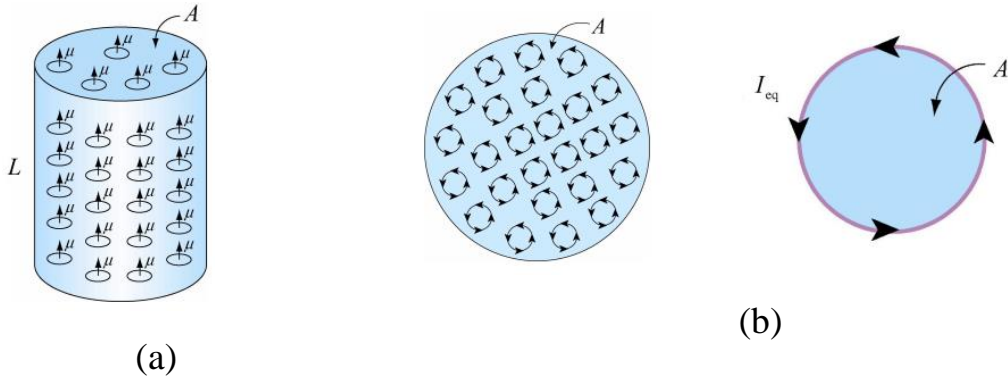
+ Trường hợp điểm P nằm trên trục của cuộn dây, tức điểm P có tọa độ (0; 0; z):

$$B_z = \frac{\mu_0 R^2 NI}{2l} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dz'}{[(z - z')^2 + R^2]^{3/2}}$$

$$= \frac{\mu_0 NI}{2l} \left[\frac{\left(\frac{l}{2}\right) - z}{\sqrt{\left(z - \frac{l}{2}\right)^2 + R^2}} + \frac{\left(\frac{l}{2}\right) + z}{\sqrt{\left(z + \frac{l}{2}\right)^2 + R^2}} \right] \quad (2.17)$$

Tiếp theo, xét nam châm hình trụ có chiều cao L , bán kính R , diện tích đáy A và từ độ dư \vec{M} hướng theo trục của nam châm như hình 2.3. Gọi n là số mô-men từ lưỡng cực $\vec{\mu}$ có trong nam châm. Từ độ \vec{M} của nam châm là:

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum \vec{\mu} = \frac{n\vec{\mu}}{AL} \quad (2.18)$$



Hình 2.3. Nam châm hình trụ có độ từ dư \vec{M} với n mô-men từ lưỡng cực $\vec{\mu}$ (a) và các dòng điện tương đương (b).

Theo mô hình dòng, mỗi mô-men từ lưỡng cực tương ứng với một dòng điện tròn, do đó cả nam châm sẽ gồm n dòng điện tròn giống nhau. Ở phía bên trong nam châm, dòng điện của một vòng xác định bị triệt tiêu bởi các dòng ngược chiều của các vòng lân cận. Vì vậy, chỉ ở viền của nam châm sự triệt tiêu dòng không xảy ra. Do đó trong khi dòng trung bình bên trong nam châm bị triệt tiêu thì ở viền của nam châm xuất hiện dòng điện I_{eq} chạy xung quanh nam châm tương đương về độ lớn với từ độ \vec{M} của nam châm.

$$I_{eq}A = n\mu \quad (2.19)$$

$$I_{eq} = \frac{n\mu}{A} = LM \quad (2.20)$$

Như vậy để có thể tính được từ trường do nam châm sinh ra, theo mô hình dòng chúng ta hoàn toàn có thể coi nam châm có từ độ M như một cuộn dây có dòng điện I_{eq} tương đương với từ độ \vec{M} theo công thức (2.20) chạy xung quanh cuộn dây. Áp dụng công thức tính từ trường do cuộn dây sinh ra trong công thức (2.16), chúng ta rút ra được công thức tính từ trường do nam châm sinh ra như sau:

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \frac{\mu_0 RNM}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Rz\cos\phi'\vec{i} + Rz\sin\phi'\vec{j} + (R^2 - Rx\cos\phi' - Ry\sin\phi')\vec{k}}{(R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2R(x\cos\phi' + y\sin\phi'))^{3/2}} d\phi' \int_{-L/2}^{L/2} dz' \end{aligned} \quad (2.21)$$

Trong trường hợp điểm P có tọa độ là $(0; 0; z)$ thì công thức (2.21) trở thành:

$$B_z = \frac{\mu_0 NM}{2} \left[\frac{\left(\frac{L}{2}\right) - z}{\sqrt{\left(z - \frac{L}{2}\right)^2 + R^2}} + \frac{\left(\frac{L}{2}\right) + z}{\sqrt{\left(z + \frac{L}{2}\right)^2 + R^2}} \right] \quad (2.22)$$

2.1.2. Mô hình từ tích

Theo mô hình này, để tính từ trường do một nam châm sinh ra tại một điểm bất kì xung quanh nam châm người ta coi từ trường là tập hợp của các mô-men từ lưỡng cực \vec{m} , mỗi mô-men từ lưỡng cực này sẽ sinh ra tại điểm cần xét một từ thế [5, 7, 12, 13, 17, 18, 19, 20]:

$$dA(\vec{x}) = \frac{1}{4\pi} \frac{\vec{m} \cdot \vec{n}}{|\vec{x}|^2} \quad (2.23)$$

với \vec{n} là vecto đơn vị theo hướng của \vec{x} .

Từ thế do cả nam châm sinh ra tại điểm đang xét là:

$$A(\vec{x}) = \int_{\text{nam ch\hat{a}m}} dA(\vec{x}) \quad (2.24)$$

Từ trường do nam châm sinh ra tại điểm đang xét là:

$$\vec{B} = -\mu_0 \nabla A(\vec{x}) \quad (2.25)$$

Ví dụ để tính từ trường do nam châm hình trụ bán kính R , chiều cao L , có mô-men từ độ $\vec{M} = M\vec{k}$ nằm theo trục của hình trụ (như hình 2.4) sinh ra tại điểm P nằm trên trục z , theo mô hình từ tích chúng ta chia nam châm thành vô số phần tử từ, mỗi phần tử chứa một lượng mô-men từ $d\vec{m} = \vec{M} \cdot dV$ (dV là thể tích của phần tử từ).

Xét mô-men từ $d\vec{m}$ tại vị trí \vec{r}' , mô-men từ này sinh ra tại điểm P một từ thế có giá trị:

$$\begin{aligned} dA &= \frac{1}{4\pi} dm \frac{\cos\theta'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} = \frac{1}{4\pi} M dV \frac{z - z'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \\ &= \frac{M}{4\pi} \frac{z - z'}{[(z - z')^2 + \rho'^2]^{3/2}} \rho' d\rho' dz' d\theta' \end{aligned} \quad (2.26)$$

Từ thế do cả nam châm sinh ra tại P là:

$$A = \frac{M}{4\pi} \int_{\text{nam ch\hat{a}m}} \frac{z - z'}{[(z - z')^2 + \rho'^2]^{3/2}} \rho' d\rho' dz' d\theta'$$

suy ra:

$$A = \frac{M}{2} \int_0^L (z - z') dz' \int_0^R \frac{\rho' d\rho'}{[(z - z')^2 + \rho'^2]^{3/2}}$$

suy ra:

$$A = \frac{M}{2} \int_0^L (z - z') dz' \left(-\frac{1}{\sqrt{(z - z')^2 + \rho'^2}} \Big|_{\rho'=0}^{\rho'=R} \right)$$

suy ra:

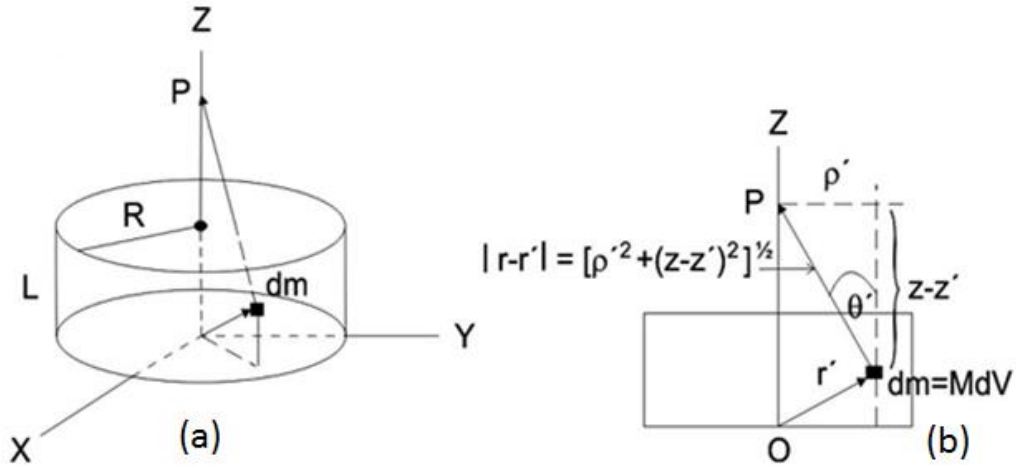
$$A = \frac{M}{2} \sqrt{(z - z')^2 + \rho'^2} \Big|_{z=0}^{z=L} \Big|_{\rho'=0}^{\rho'=R}$$

suy ra:

$$A = \frac{M}{2} (\sqrt{(z-L)^2 + R^2} - \sqrt{z^2 + R^2}) \quad (2.27)$$

Vậy từ trường do nam châm sinh ra tại điểm P là:

$$B_z = -\mu_0 \nabla A = \frac{\mu_0 M}{2} \left(\frac{z+L}{\sqrt{(z-L)^2 + R^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right) \quad (2.28)$$



Hình 2. 4. Nam châm hình trụ với vô số phân tử từ $d\vec{m}$ (a) và sơ đồ tính toán từ thế do một phân tử từ $d\vec{m}$ sinh ra tại điểm P (0; 0; z) (b).

Để dàng thấy rằng hai phương trình (2.22) và (2.29) tương đương nhau, chỉ sai khác nhau hệ số N (số vòng dây). Thực vậy, xét điểm P nằm tại tâm của mặt trên của nam châm, thì phương trình (2.22) trở thành:

$$B_z = \frac{\mu_0 NM}{2} \left[\frac{\left(\frac{L}{2}\right) - \left(\frac{L}{2}\right)}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2}\right)^2 + R^2}} + \frac{\left(\frac{L}{2}\right) + \left(\frac{L}{2}\right)}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + \frac{L}{2}\right)^2 + R^2}} \right] = \frac{\mu_0 NM}{2} \frac{L}{\sqrt{L^2 + R^2}} \quad (2.29)$$

và phương trình (2.28) trở thành:

$$B_z = \frac{\mu_0 M}{2} \left(\frac{0}{\sqrt{0^2 + R^2}} - \frac{0-L}{\sqrt{(0-L)^2 + R^2}} \right) = \frac{\mu_0 M}{2} \frac{L}{\sqrt{(L)^2 + R^2}} \quad (2.30)$$

2.2. Phần mềm mô phỏng

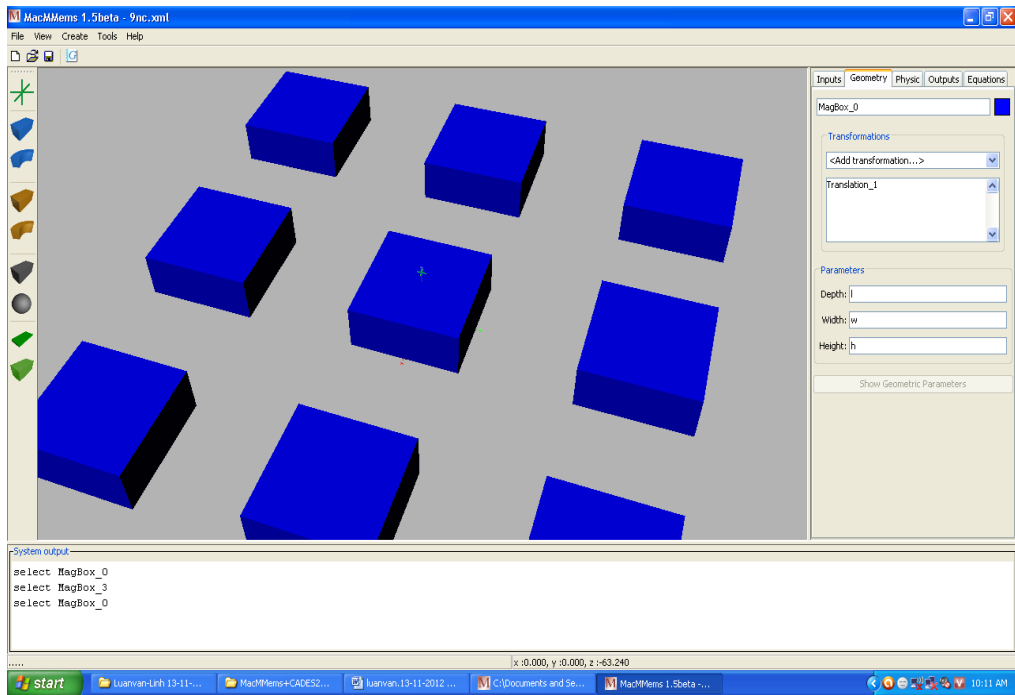
Chúng ta thấy rằng mô hình dòng tương đương và mô hình từ tích có thể là tương đương nhau xét về mặt để xác định từ trường do các nam châm sinh ra như đã phân tích ở trên. Dựa vào các mô hình này chúng ta có thể tính được giá trị từ trường tại những điểm xác định do mỗi nam châm đơn lẻ tạo ra. Trong trường hợp một tập hợp các nam châm, chúng ta cũng có thể tính được từ trường thành phần do mỗi nam châm sinh ra rồi áp dụng nguyên lý chồng chất từ trường để xác định từ trường tổng do các nam châm sinh ra. Bằng cách tính toán từ trường của một tập hợp các nam châm tại các điểm khác nhau trong không gian xung quanh các nam châm, chúng ta có thể khảo sát được sự phân bố của từ trường cũng như tính được sự biến thiên của từ trường trên bề mặt của các nam châm.

Tuy nhiên việc tính toán số cho tập hợp nhiều nam châm là rất phức tạp và mất nhiều thời gian. Chính vì vậy phần mềm tính toán, mô phỏng từ trường đã được xây dựng và phát triển nhanh chóng. Nhìn chung, các phần mềm này đều được xây dựng trên cơ sở sử dụng một trong hai mô hình lý thuyết tính toán từ trường như đã trình bày ở phần 2.1, hoặc sử dụng đồng thời cả hai mô hình để tăng thêm lựa chọn tính toán cho người dùng. Trong các phần mềm này, việc giải các phương trình tích phân của từ trường, được thực hiện và có thể áp dụng cho các vật liệu từ có tính chất khác nhau để thu được những giá trị số cụ thể tương ứng. Một số phần mềm tính toán, mô phỏng có thể kể đến như:

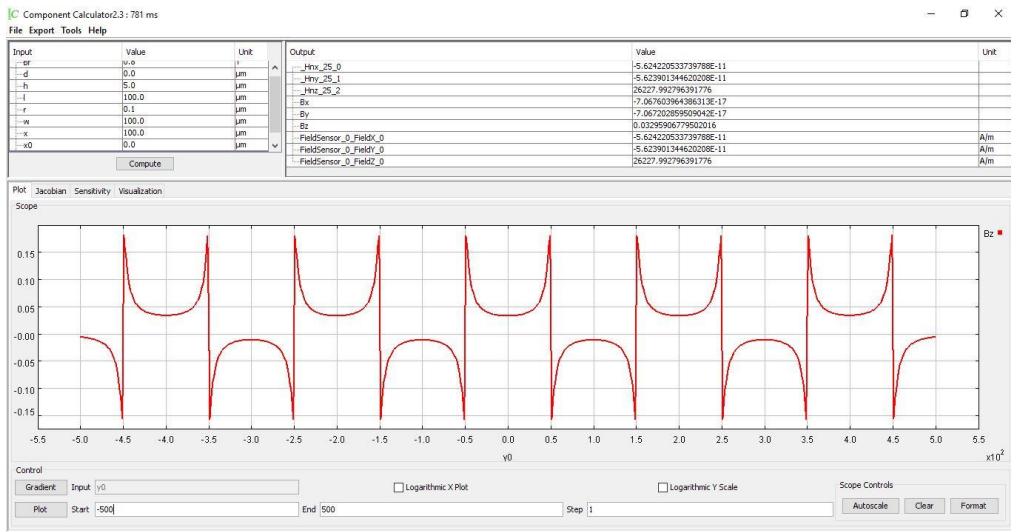
- Infolytica MagNet (www.infolytica.com)
- Flex PDE 3.0 (www.pdesolutions.com)
- Ansys Maxwell (www.ansys.com/products/electronics/ANSYS-Maxwell)
- Lisa (www.lisa-fet.com)
- FEMLAB (www.femlab.com)
- FEMM (www.femm.foster-miller.net/wiki/HomePage)
- MacMMems (www.forge-mage.g2elab.grenoble-inp.fr/project/macmmems)

Các phần mềm mô phỏng này đều có những ưu điểm riêng và hướng tới những đối tượng người dùng khác nhau. Hai phần mềm được sử dụng trong luận văn này để tính toán từ trường của một hệ các vi nam châm hình trụ là phần mềm MacMMems và phần mềm Ansys Maxwell.

2.2.1. Phần mềm MacMMems



(a)



(b)

Hình 2.5. Giao diện mô-đun thiết kế (a) và giao diện mô-đun tính toán (b) của phần mềm MacMMems.

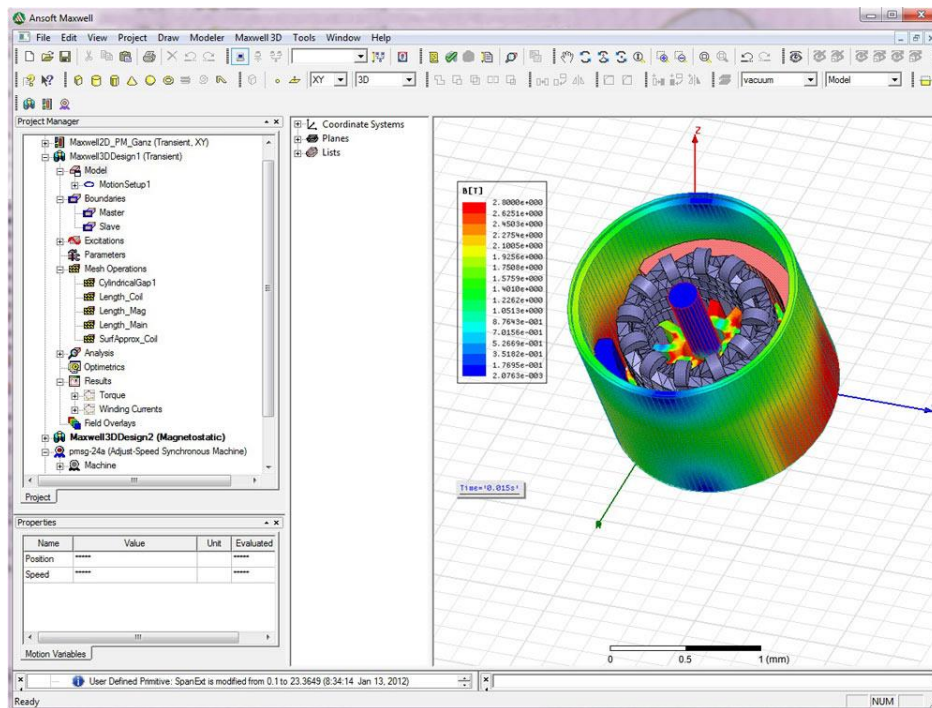
MacMMems là một phần mềm mở được xây dựng dựa trên mô hình dòng tương đương với giao diện khá đơn giản cho phép người dùng xác định được cường độ từ trường, cảm ứng từ do một số nam châm có hình dạng đơn giản (hình trụ, hình hộp chữ nhật, hình móng ngựa,...) sinh ra. Ngoài ra phần mềm cũng cho phép xác định lực tương tác từ giữa các nam châm với nhau hoặc giữa

nam châm với các phần tử có từ tính. Phần mềm có các mô-đun riêng biệt giúp cho việc thiết kế và tính toán, tối ưu hóa thời gian tính toán ngắn.

- Mô-đun thiết kế (hình 2.5a) cho phép thiết kế các nam châm với các thông số về hình dạng, kích thước, vị trí, thuộc tính vật lý ban đầu (phụ thuộc vào vật liệu nghiên cứu) có thể thay đổi như mong muốn. Ngoài ra mô-đun này cũng cho phép người dùng thiết lập các thông số đầu ra mong muốn từ dữ liệu có sẵn trong mô-đun hoặc định nghĩa các thông số đầu ra mới bằng cách nhập các phương trình tính toán đơn giản.

- Mô-đun tính toán (hình 2.5b) cho phép thu được các kết quả tính dưới dạng đồ thị và bảng số liệu, ví dụ giá trị từ trường theo các phương tọa độ x,y,z... Có thể quan sát sự thay đổi của kết quả tính toán thu được một cách dễ dàng bằng cách thay đổi các thông số đầu vào đã được định nghĩa sẵn trong mô-đun thiết kế.

2.2.2. Phần mềm Ansys Maxwell



Hình 2.6. Giao diện của phần mềm mô phỏng Ansys Maxwell.

Ansys Maxwell là một trong những phần mềm thương mại phức tạp và tốt nhất hiện nay cho phép tính toán, mô phỏng từ trường và các đại lượng liên quan tới từ trường của cả từ trường tĩnh và từ trường biến thiên theo thời gian. Phần mềm được xây dựng trên cơ sở hệ thống các phương trình Maxwell, tức là sử dụng mô hình từ tích để xác định từ trường do các nam châm sinh ra.

Phần mềm này cho phép mô phỏng từ trường dưới dạng 2D hoặc 3D của nhiều loại nam châm với hình dạng phức tạp và vật liệu khác nhau. Giao diện thiết kế và tính toán được tích hợp làm một cho phép hiển thị hình ảnh mô phỏng không gian từ trường trực tiếp xung quanh các nam châm. Tuy nhiên phần mềm có cấu trúc khá phức tạp, khó sử dụng và cần nhiều thời gian để thực hiện quá trình tính toán, mô phỏng.

Hình khối trụ tròn là một dạng hình học có sự đối xứng cao. Xét về mặt ứng dụng, hình khối trụ tròn được ứng dụng nhiều trong các chi tiết máy, các thiết bị kỹ thuật... với nam châm hình khối trụ, chúng ta có thể thiết kế để chế tạo các nam châm có từ trường đều trong lòng khối trụ tròn cho các ứng dụng như trong động cơ điện... Trong luận văn này, chúng tôi chọn vi nam châm có dạng hình khối trụ tròn để khảo sát vì đây là hình dạng chưa được nghiên cứu trong nước. Bên cạnh đó việc sử dụng các mô hình tính toán và phần mềm mô phỏng đã nêu, chúng tôi sẽ khảo sát về từ trường và sự biến thiên từ trường trên bề mặt của một đối tượng vi nam châm kích thước micro cụ thể, ở đây là vật liệu từ cứng NdFeB.

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong luận văn này, chúng tôi đã mô phỏng và tính toán từ trường trong không gian xung quanh một số vi nam châm NdFeB hình trụ với bán kính $R = 25 \mu\text{m}$, chiều cao $h = 5 \mu\text{m}$ và có cảm ứng từ dư $B_r = 1.2 \text{ T}$ dọc theo trục của nam châm. Giá trị từ dư này chỉ có thể đạt được trong các nam châm vĩnh cửu cấu trúc nano [1, 2, 6, 26]. Các kết quả thu được cho biết từ trường và sự biến thiên từ trường trên bề mặt các nam châm cũng như sự thay đổi của các đại lượng này khi thay đổi số lượng vi nam châm.

3.1. Kết quả khảo sát từ trường bằng phần mềm MacMMems

Trong phần này chúng tôi sử dụng phần mềm mô phỏng MacMMems để khảo sát từ trường thành phần B_z và sự biến thiên của thành phần từ trường này trên bề mặt các vi nam châm trụ NdFeB. Đầu tiên là cấu hình 1×1 nam châm để khảo sát sự phân bố từ trường xung quanh nam châm. Sau đó là các cấu hình 2×2 , 3×3 , 4×4 và 5×5 nam châm, đây là cấu hình gồm các nam châm giống hệt nhau sắp xếp trật tự và tuần hoàn. Việc nghiên cứu, khảo sát từ trường trong không gian xung quanh các cấu hình này cho phép chúng ta hiểu được sự phụ thuộc của từ trường và sự biến thiên từ trường vào số lượng nam châm.

Trong tất cả các cấu hình, cảm ứng từ dư \vec{B} của nam châm đều được giả sử nằm theo trục của nam châm (hướng theo trục Oz), chính vì vậy các tính toán và mô phỏng dưới đây đều tập trung vào thành phần từ trường B_z là thành phần song song với trục Oz và vuông góc với bề mặt nam châm.

3.1.1. Cấu hình 1×1 nam châm

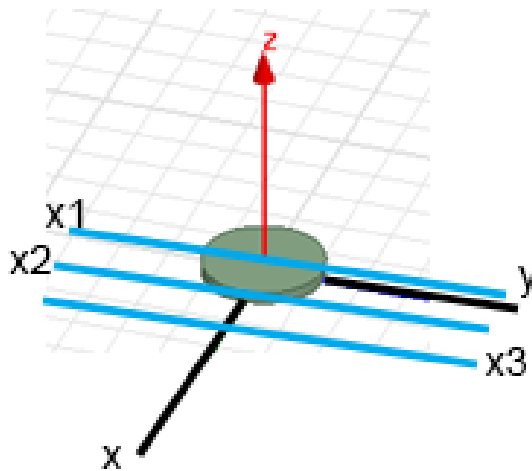
Trước hết, chúng tôi khảo sát sự phân bố từ trường trên bề mặt của một nam châm hình trụ. Để thực hiện khảo sát này, chúng tôi thực hiện tính toán các giá trị B_z tại các vị trí:

- Dọc theo đường thẳng đi qua tâm mặt trên và song song với mặt trên của nam châm (đường x_1 trong hình 3.1).

- Dọc theo đường thẳng đi qua mép mặt trên của nam châm và song song với đường x_1 (đường x_2 trong hình 3.1).

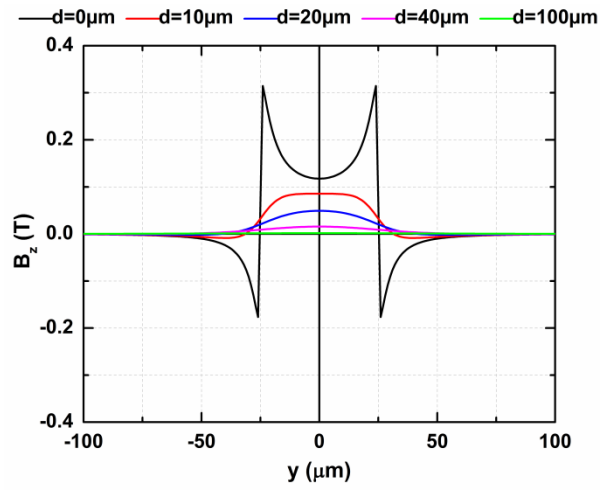
- Dọc theo đường thẳng song song với đường x_1 và cách x_1 một khoảng $2R$ tại một số độ cao d cách bề mặt trên nam châm những khoảng 0, 10, 20, 40 và $100 \mu\text{m}$. Các kết quả thu được gồm thành phần từ trường B_z , sự biến của

thành phần này dọc theo các đường x_1 , x_2 và x_3 (dB_z/dy) và sự biến thiên của thành phần này dọc theo trục z (dB_z/dz) được biểu diễn dưới dạng đồ thị.

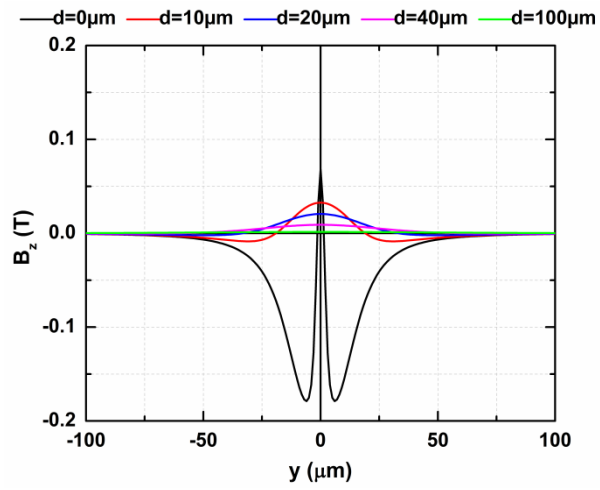


Hình 3. 1. Cấu hình 1×1 nam châm trụ và vị trí tính toán từ trường, sự biến thiên từ trường.

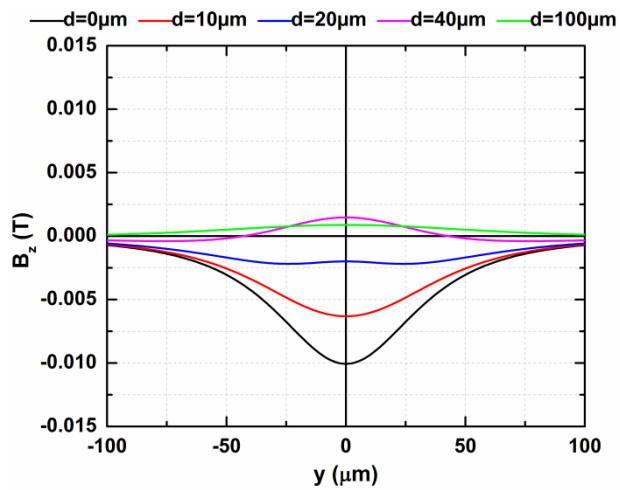
Kết quả khảo sát từ trường dọc theo đường cả ba đường quét cho thấy từ trường giảm dần khi ta tăng khoảng cách d từ bề mặt nam châm. Theo hình 3.2b tại ngay bề mặt của nam châm ($d = 0 \mu\text{m}$), tính từ trục của nam châm đi ra mép của nam châm thì từ trường tăng dần và đạt giá trị cực đại ngay sát mép trong nam châm ($y = \pm 24 \mu\text{m}$) $B_{z \max} \sim 0.32 \text{ T}$ và cũng đạt giá trị cực tiểu ngay tại vùng gần mép ngoài nam châm ($y = \pm 26 \mu\text{m}$) $B_{z \min} \sim -0.18 \text{ T}$. Điều này được giải thích bởi đường sức từ do nam châm sinh ra là những đường cong khép kín đi ra từ mặt trên nam châm và đi vào mặt dưới nam châm, do đó tại mép của nam châm có mật độ đường sức từ lớn. Ở phí trong nam châm, các đường sức có hướng đi lên (đi ra khỏi mặt trên nam châm) nên B_z đạt cực đại, trong khi ở phía ngoài nam châm, các đường sức có hướng đi xuống để trở về mặt dưới nam châm tạo thành những đường sức khép kín nên B_z đạt cực tiểu. Tại những khoảng cách d cao hơn, chúng ta thấy rằng từ trường ở khu vực phía trong nam châm lớn và ổn định trong khi ở ngoài mép nam châm thì từ trường giảm gần như ngay về 0 T . Điều này được giải thích rằng khi đi ra xa mặt trên nam châm thì các đường sức thưa dần và gần song song với nhau cho nên ở những vị trí gần đường kéo dài của trục nam châm thì đường sức từ vẫn còn tồn tại, còn những vị trí xa trục của nam châm thì hầu như không tồn tại đường sức từ vì ở gần mép nam châm các đường sức từ đã khép kín nên không đi ra xa khỏi bề mặt nam châm được.



(a)



(b)



(c)

Hình 3. 2. Từ trường thành phần B_z được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.

Các kết quả khảo sát dọc theo đường quét x_2 (hình 3.2b) cho thấy từ trường lớn nhất tại điểm tiếp xúc ($y = 0 \mu\text{m}$) với nam châm và giảm dần khi đi xa điểm này cả về hai phía. Điều này phù hợp với thực tế các đường sức từ chỉ tập trung ở sát mép (viền) nam châm, còn ở những vị trí xa mép nam châm theo các hướng trong mặt phẳng Oxy thì đường sức từ không tồn tại. Tại những vị trí ngay sát bề mặt nam châm ($d = 0 \mu\text{m}$), từ trường cực đại $B_{z \max} \sim 68.4 \text{ mT}$ tại vị trí có thành phần tọa độ $y = 0$ và từ trường cực tiểu $B_{z \min} \sim -178 \text{ mT}$ tại vị trí có thành phần tọa độ $y = \pm 6$. Trên hình, chúng ta thấy khoảng cách giữa điểm cực đại và điểm cực tiểu ngày càng tăng, trong khi biên độ giữa hai giá trị cực đại và cực tiểu ngày càng giảm khi tăng khoảng cách d .

Hình 3.2c cho thấy một kết quả thú vị, đó là có sự thay đổi điểm cực tiểu thành điểm cực đại tại những điểm có thành phần tọa độ $y = 0$ dọc theo đường quét x_3 tại các độ cao d khác nhau. Tại những vị trí có d thấp thì từ trường gây ra tại điểm có thành phần tọa độ $y = 0$ chủ yếu do sự đóng góp của các đường sức từ cong mạnh và hướng xuống dưới gần mép nam châm sinh ra do đó những điểm này có từ trường cực tiểu, còn những ở vị trí có d cao thì trường gây ra lại do sự đóng góp của các đường sức từ thẳng ở gần trục nam châm sinh ra do đó những điểm có thành phần tọa độ $y = 0$ trở thành những vị trí có từ trường cực đại. Nói chung, các kết quả khảo sát từ trường xung quanh nam châm hình trụ thu được trong trường hợp này phù hợp với sự phân bố thực tế của các đường sức từ xung quanh nam châm trụ và phù hợp với lý thuyết về từ trường.

Để kiểm tra độ chính xác của các kết quả thu được từ phần mềm cũng như sự phù hợp giữa phần mềm mô phỏng MacMMems và mô hình lý thuyết dòng tương đương, chúng tôi đã sử dụng công thức (2.22) để tính giá trị lý thuyết của thành phần từ trường B_z tại một số điểm nằm trên trục của nam châm.

$$B_z = \frac{\mu_0 NM}{2} \left[\frac{\left(\frac{L}{2}\right) - z}{\sqrt{\left(z - \frac{L}{2}\right)^2 + R^2}} + \frac{\left(\frac{L}{2}\right) + z}{\sqrt{\left(z + \frac{L}{2}\right)^2 + R^2}} \right]$$

Trong công thức trên, gốc tọa độ được đặt tại trục của hình trụ và ở chính giữa hình trụ. Vì vậy khi áp dụng công thức này với cấu hình nam châm của chúng ta cần lưu ý chuyển đổi tham số độ cao d trong cấu hình mô phỏng với tham số z trong công thức (2.22) cho phù hợp. Cụ thể với $d = 0 \mu\text{m}$ thì $z = L/2 \mu\text{m}$, $d = 10 \mu\text{m}$ thì $z = (L/2 + 10) \mu\text{m}, \dots$ Ngoài ra trong công thức trên thì L chính là chiều dày của nam châm, tức là $L = h = 5 \mu\text{m}$ và $\mu_0 M$ chính là cảm ứng từ dư của nam châm hướng theo trục z , tức là $\mu_0 M = B_R = 1.2 \text{ T}$. Hệ số N trong

công thức trên là số vòng dây của cuộn dây có dòng điện tương đương với cảm ứng từ dư của nam châm nhưng vì chiều dày của nam châm nhỏ hơn đường kính của nam châm 10 lần nên ta có thể lấy $N = 1$.

Kết quả tính toán lý thuyết giá trị B_z tại các điểm nằm trên trục của nam châm và cách mặt trên của nam châm một khoảng d được tính cụ thể như sau:

+ $d = 0 \mu\text{m}$:

$$B_z(2.5) = \frac{1.2}{2} \left[\frac{\left(\frac{5}{2}\right) - 2.5}{\sqrt{\left(2.5 - \frac{5}{2}\right)^2 + 25^2}} + \frac{\left(\frac{5}{2}\right) + 2.5}{\sqrt{\left(2.5 + \frac{5}{2}\right)^2 + 25^2}} \right] \approx 0.11766 \text{ T}$$

+ $d = 10 \mu\text{m}$:

$$B_z(12.5) = \frac{1.2}{2} \left[\frac{\left(\frac{5}{2}\right) - 12.5}{\sqrt{\left(12.5 - \frac{5}{2}\right)^2 + 25^2}} + \frac{\left(\frac{5}{2}\right) + 12.5}{\sqrt{\left(12.5 + \frac{5}{2}\right)^2 + 25^2}} \right] \approx 0.085434 \text{ T}$$

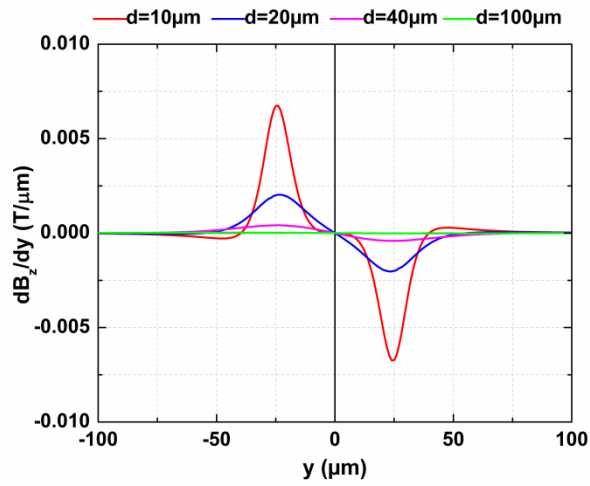
+ $d = 20 \mu\text{m}$:

$$B_z(22.5) = \frac{1.2}{2} \left[\frac{\left(\frac{5}{2}\right) - 22.5}{\sqrt{\left(22.5 - \frac{5}{2}\right)^2 + 25^2}} + \frac{\left(\frac{5}{2}\right) + 22.5}{\sqrt{\left(22.5 + \frac{5}{2}\right)^2 + 25^2}} \right] \approx 0.04915 \text{ T}$$

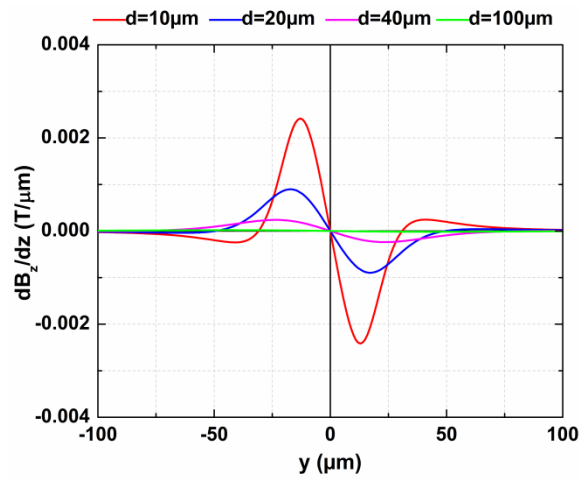
Bảng 3. 1. So sánh kết quả tính toán lý thuyết thành phần từ trường B_z bằng mô hình dòng với kết quả mô phỏng.

$d (\mu\text{m})$	Kết quả B_z (mT)	
	Phần mềm MacMMems	Mô hình dòng
0	117.52	117.66
10	85.45	85.43
20	49.15	49.15

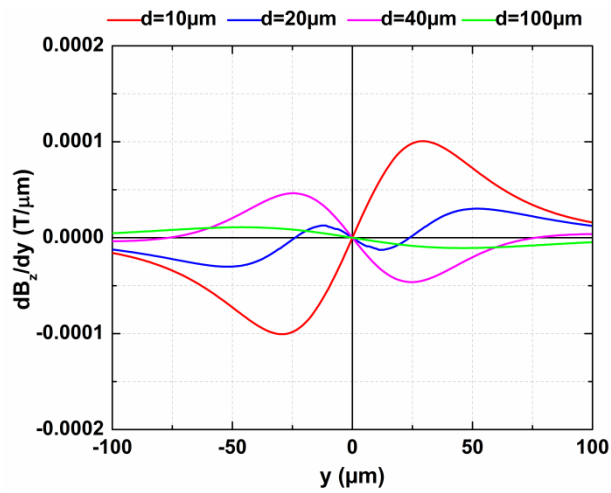
Các kết quả tính toán lý thuyết này được so sánh với các giá trị thu được từ phần mềm mô phỏng và được tổng kết trong bảng 3.1. Từ bảng so sánh ta thấy kết quả tính toán từ mô hình dòng tương đương và kết quả mô phỏng từ phần mềm MacMMems là giống nhau, qua đó cho thấy sự chính xác của phần mềm mô phỏng so với mô hình lý thuyết.



(a)

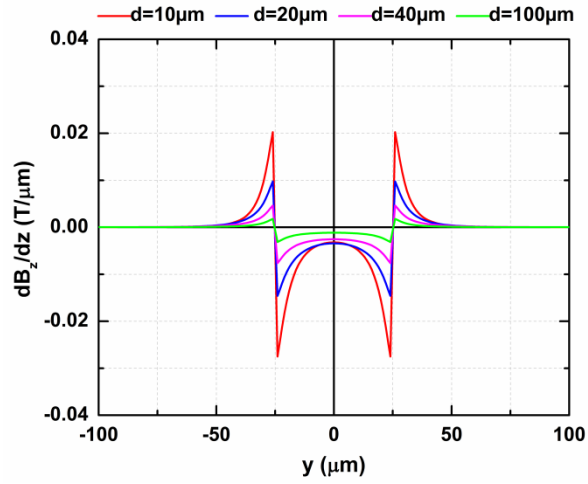


(b)

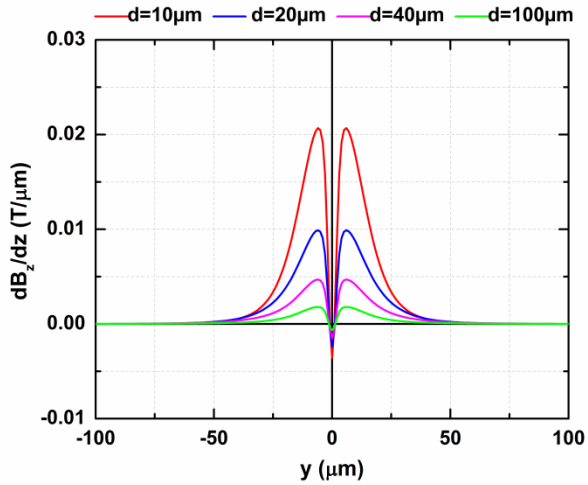


(c)

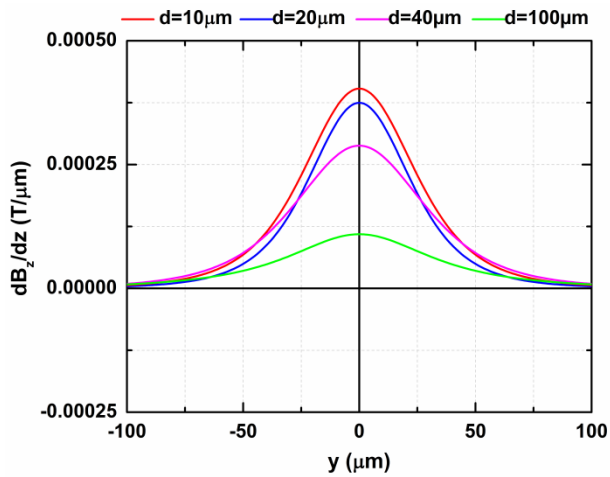
Hình 3. 3. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)



(b)

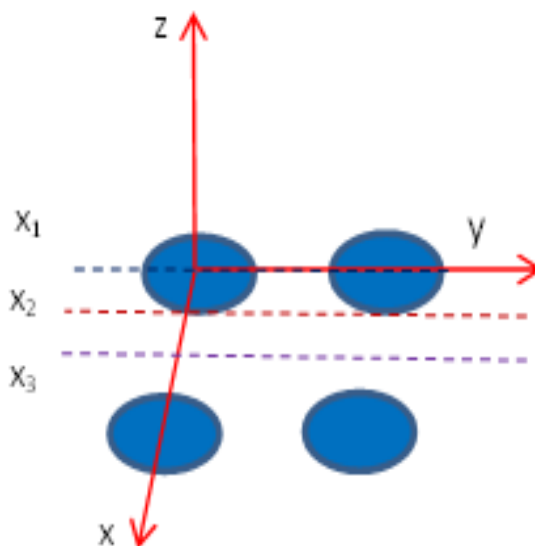


(c)

Hình 3. 4. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.

Các kết quả khảo sát sự biến thiên thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) và theo z (dB_z/dz) thu được từ phần mềm mô phỏng được biểu diễn trong hình 3.3 và 3.4. Phù hợp với sự phân bố của mật độ dòng sức từ là nhiều tại mép của nam châm và phù hợp với các giá trị từ trường B_z khảo sát được ở trên, sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y và theo z lớn nhất ở mép nam châm trong trường hợp khảo sát theo đường quét x_1 và đường quét x_2 . Cụ thể với đường quét x_1 thì dB_z/dy và dB_z/dz đều đạt giá trị lớn nhất và nhỏ nhất tại mép nam châm và lân cận mép nam châm trong khi ở chính giữa mặt nam châm thì các giá trị này bằng 0 hoặc xấp xỉ 0. Tại $d = 10 \mu\text{m}$, $dB_z/dy_{\text{max}} \sim 6.7 \times 10^3 \text{ T/m}$ và $dB_z/dz_{\text{max}} \sim 2 \times 10^4 \text{ T/m}$. Với đường quét x_2 thì cả dB_z/dy và dB_z/dz đều bằng 0 tại vị trí mép nam châm, sau đó tại những điểm lân cận mép nam châm về cả hai phía thì giá trị dB_z/dy và dB_z/dz đạt cực đại hoặc cực tiểu nhưng sau đó lại nhanh chóng giảm về 0 khi tiếp tục đi xa mép nam châm về 2 phía. Tại $d = 10 \mu\text{m}$, $dB_z/dy_{\text{max}} \sim 2.4 \times 10^3 \text{ T/m}$ và $dB_z/dz_{\text{max}} \sim 2 \times 10^4 \text{ T/m}$. Còn trong trường hợp khảo sát theo đường quét x_3 , tại các điểm có thành phần tọa độ $y = 0$ thì $dB_z/dy = 0$ và dB_z/dz là lớn nhất. Từ các kết quả khảo sát, chúng ta có thể thấy từ trường B_z và sự biến thiên của B_z của nam châm tập trung chủ yếu tại mép và lân cận mép nam châm trong không gian ngay sát nam châm, còn ở không gian xa nam châm thì từ trường B_z chủ yếu tập trung ở trục của nam châm và hầu như không có sự biến thiên của B_z .

3.1.2. Cấu hình 2×2 nam châm



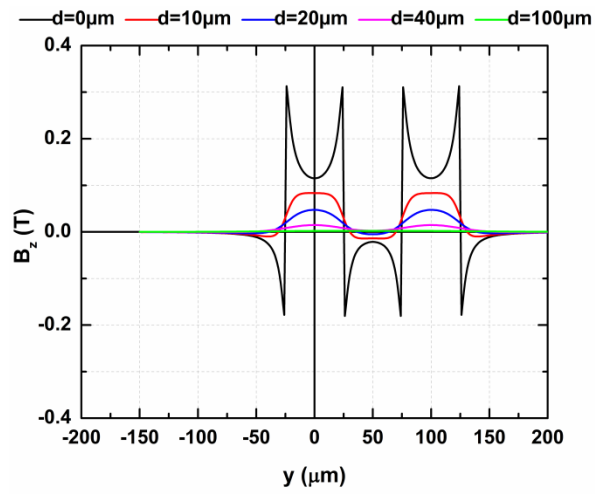
Hình 3. 5. Cấu hình 2×2 nam châm và vị trí tính toán từ trường, sự biến thiên từ trường.

Tiếp theo chúng tôi mô phỏng và khảo sát từ trường cùng với sự biến thiên từ trường xung quanh các cấu hình nhiều nam châm hơn. Nguyên tắc của các cấu hình này là chỉ tăng số lượng nam châm theo cả hai chiều, khoảng cách giữa các nam châm bằng chiều rộng của các nam châm và không thay đổi bất kỳ các thông số nào liên quan tới kích thước, thuộc tính từ của từng nam châm. Việc khảo sát này nhằm nghiên cứu sự ảnh hưởng của số lượng nam châm lên từ trường và sự biến thiên từ trường trong không gian xung quanh các nam châm.

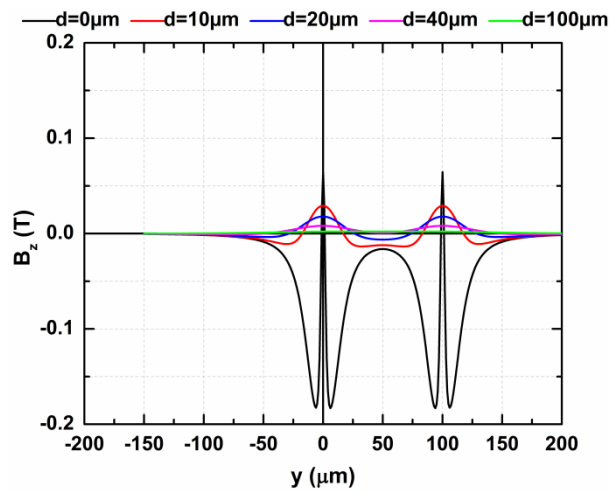
Trước hết, chúng tôi khảo sát từ trường xung quanh cấu hình gồm 2×2 nam châm hình trụ sắp xếp tuần hoàn (hình 3.5). Các tính toán, mô phỏng giá trị từ trường B_z và sự biến thiên của nó theo y (dB_z/dy) và theo z (dB_z/dz) bằng phần mềm được thực hiện dọc theo các đường quét x_1 , x_2 , x_3 như trong hình 3.5 tại các độ cao d (khoảng cách tính từ bề mặt nam châm) khác nhau.

Các kết quả thu được được biểu diễn bằng các đồ thị trong hình 3.6, 3.7 và 3.8. Các kết quả cho thấy giá trị của từ trường B_z và giá trị của sự biến thiên của B_z dọc theo đường quét x_1 và x_2 tại các vị trí tương ứng với cấu hình 1×1 nam châm cũng như hình dáng đồ thị không có gì thay đổi so với các đồ thị trong hình 3.2, 3.3 và 3.4. Các đồ thị này trong cấu hình 2×2 nam châm đều xuất hiện thêm các đỉnh cực đại, cực tiểu phù hợp với sự sắp xếp tuần hoàn của các nam châm. Riêng các kết quả thu được dọc theo đường quét x_3 trong cấu hình 2×2 nam châm có sự thay đổi rõ rệt so với các kết quả thu được trong cấu hình 1×1 nam châm. Cụ thể với giá trị B_z , dB_z/dy và dB_z/dz tại các vị trí dọc đường quét x_3 thu được trong cấu hình 2×2 nam châm lớn gấp đôi giá trị B_z tương ứng trong cấu hình 1×1 nam châm. Điều này được cho là do có sự tổng hợp rõ rệt hơn của từ trường thành phần của bốn nam châm trong cấu hình dọc theo đường quét x_3 . Các đồ thị dB_z/dy trong hình 3.7c có một độ dốc nhất định, điều này được cho là do có sự đóng góp bất đối xứng của các thành phần từ trường của các nam châm vào từ trường tổng ở hai đầu đồ thị.

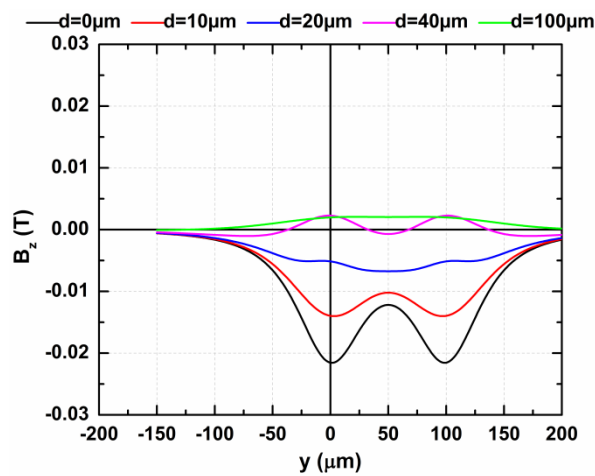
Nhìn chung, trong cấu hình 2×2 nam châm, từ trường và sự biến thiên từ trường trong không gian xung quanh các nam châm và mép các nam châm không có sự thay đổi so với cấu hình 1×1 nam châm. Tại những vị trí trong khoảng trống giữa bốn nam châm, từ trường và sự biến thiên từ trường tăng gấp đôi so với các vị trí tương ứng trong cấu hình 1×1 nam châm. Không gian từ trường xung quanh cấu hình 2×2 nam châm cũng xuất hiện nhiều vùng biến thiên từ trường hơn so với cấu hình 1×1 nam châm.



(a)

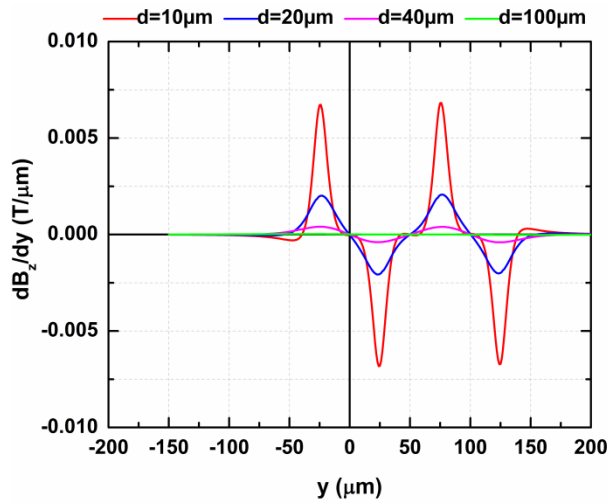


(b)

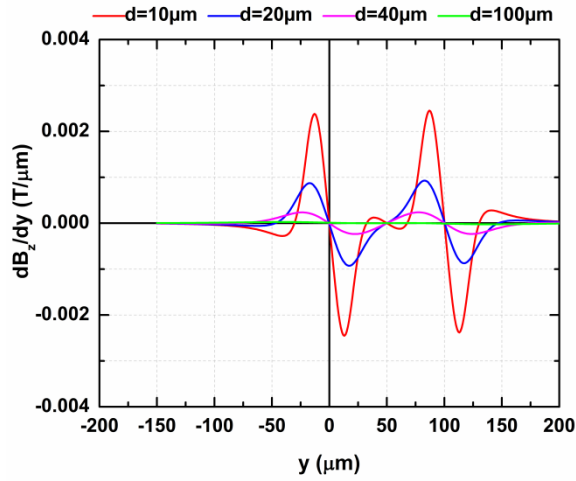


(c)

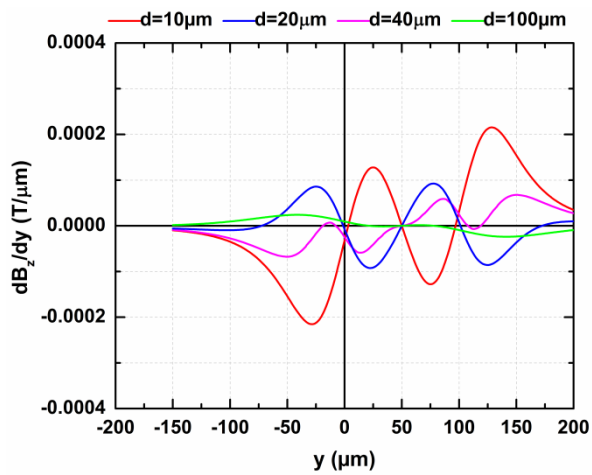
Hình 3. 6. Từ trường thành phần B_z được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)

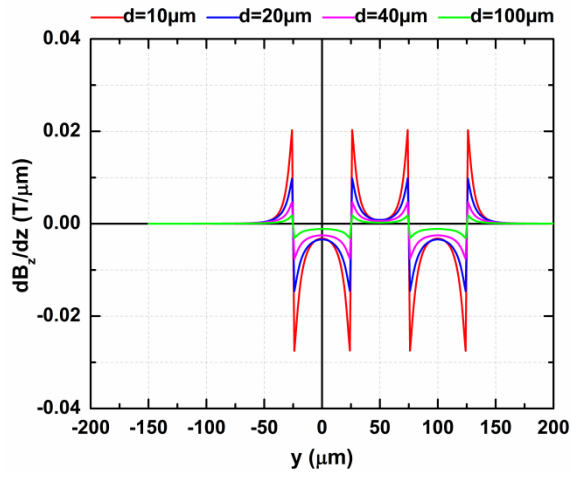


(b)

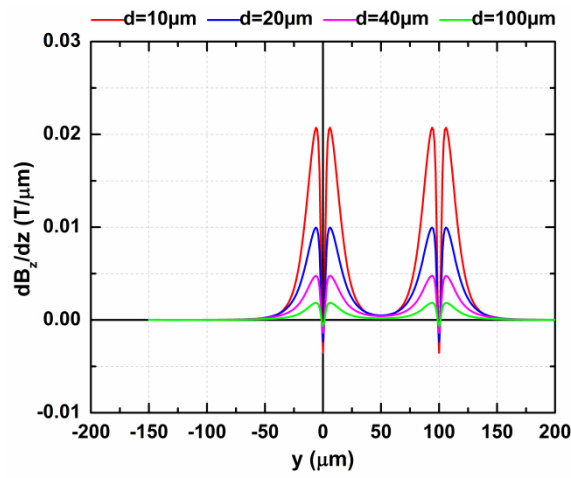


(c)

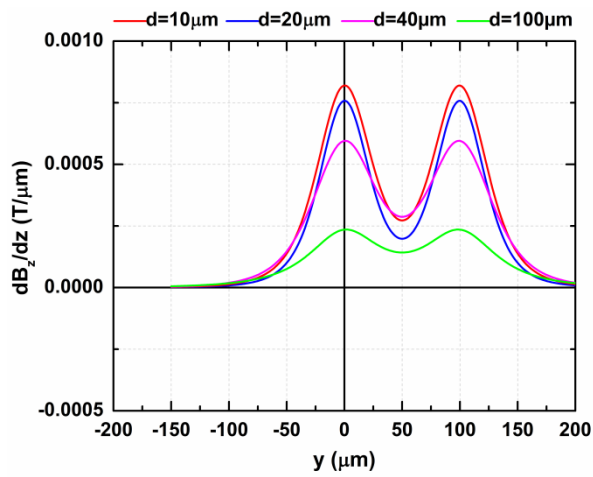
Hình 3. 7. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)



(b)

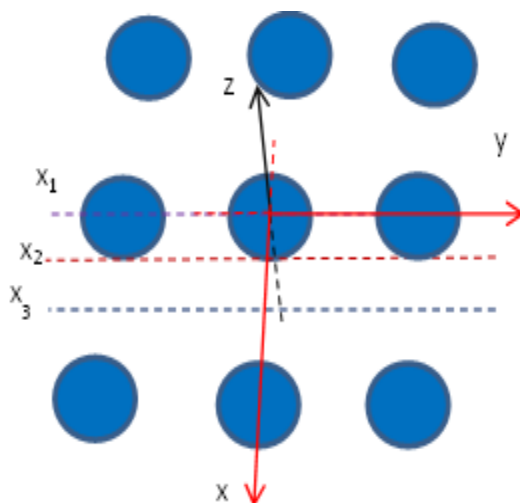


(c)

Hình 3. 8. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.

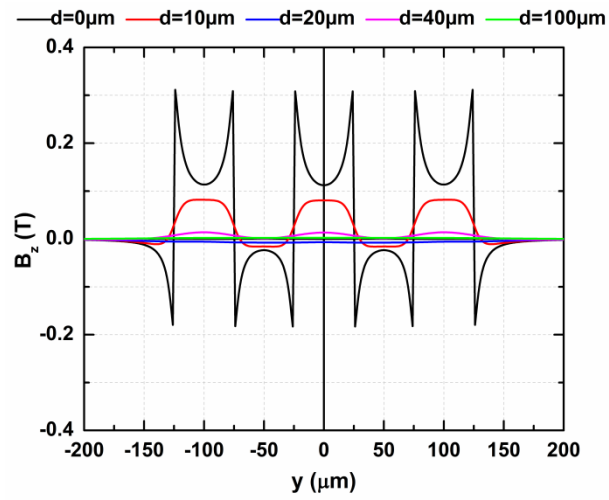
3.1.3. Cấu hình 3×3 nam châm

Tiếp theo chúng tôi khảo sát từ trường và sự biến thiên từ trường trong không gian xung quanh cấu hình 3×3 nam châm như hình 3.9. Các khảo sát được tiến hành dọc theo các đường quét x_1 , x_2 và x_3 tại một số độ cao d tương tự như trong cấu hình 1×1 nam châm và cấu hình 2×2 nam châm.

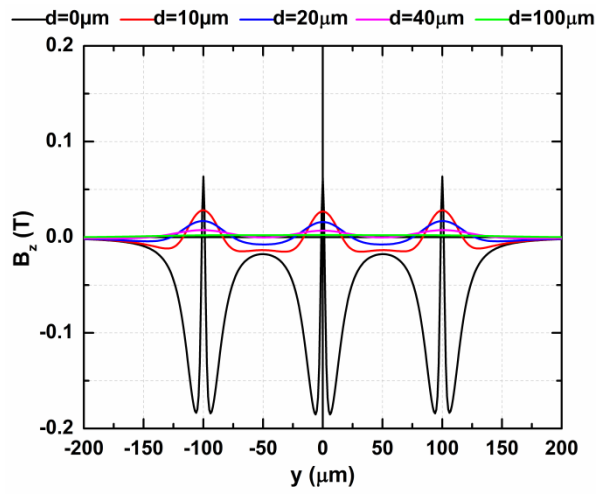


Hình 3. 9. Cấu hình 3×3 nam châm và vị trí tính toán từ trường, sự biến thiên từ trường

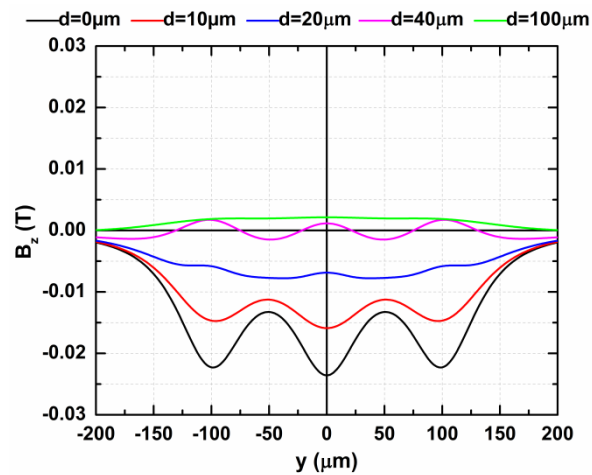
Các kết quả khảo sát thu được được thể hiện bằng các đồ thị trong hình 3.10, 3.11 và 3.12. Về cơ bản các đồ thị thu được không thay đổi gì cả về hình dạng lẫn giá trị so với các đồ thị tương ứng thu được trong cấu hình 2×2 nam châm. Thực vậy, từ các đồ thị chúng ta có thể thấy từ trường B_z , sự biến thiên từ trường dB_z/dy và dB_z/dz dọc theo đường quét x_1 đều đạt giá trị cực đại và cực tiểu tại những vị trí lân cận các mép nam châm. Tại khoảng cách $d = 10 \mu\text{m}$ so với bề mặt nam châm dọc theo đường quét x_1 , $B_{z \text{ max}} \sim 80 \text{ mT}$, $dB_z/dy_{\text{max}} \sim 6.7 \times 10^3 \text{ T/m}$, $dB_z/dz_{\text{max}} \sim 2 \times 10^4 \text{ T/m}$. Dọc theo đường quét x_2 tại các độ cao d khác nhau, từ trường B_z , sự biến thiên từ trường dB_z/dy và dB_z/dz cũng đạt giá trị cực đại và cực tiểu tại các vị trí ngay sát mép nam châm, vị trí điểm cực đại và điểm cực tiểu là rất gần nhau. Tại khoảng cách $d = 10 \mu\text{m}$ so với bề mặt nam châm dọc theo đường quét x_1 , $B_{z \text{ max}} \sim 30 \text{ mT}$, $dB_z/dy_{\text{max}} \sim 5 \times 10^3 \text{ T/m}$, $dB_z/dz_{\text{max}} \sim 1 \times 10^4 \text{ T/m}$. Tương tự, tại khoảng cách $d = 10 \mu\text{m}$ so với bề mặt nam châm dọc theo đường quét x_3 , $B_{z \text{ max}} \sim -11.25 \text{ mT}$, $dB_z/dy_{\text{max}} \sim 1.2 \times 10^2 \text{ T/m}$, $dB_z/dz_{\text{max}} \sim 7.5 \times 10^2 \text{ T/m}$. Như vậy, không gian từ trường xung quanh cấu hình 3×3 nam châm không thay đổi về cường độ và mức độ biến thiên mà chỉ xuất hiện thêm các vùng biến thiên.



(a)

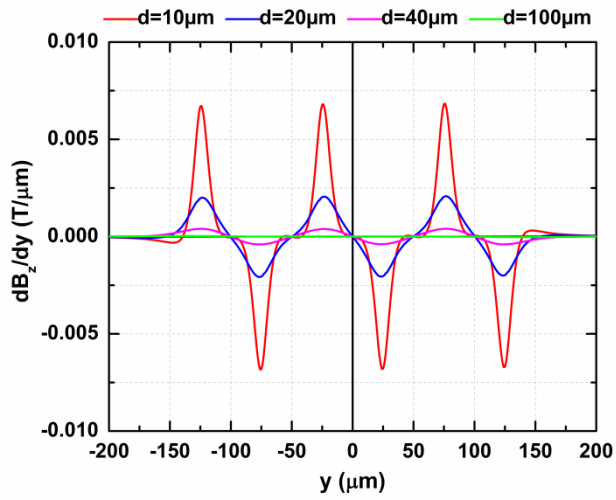


(b)

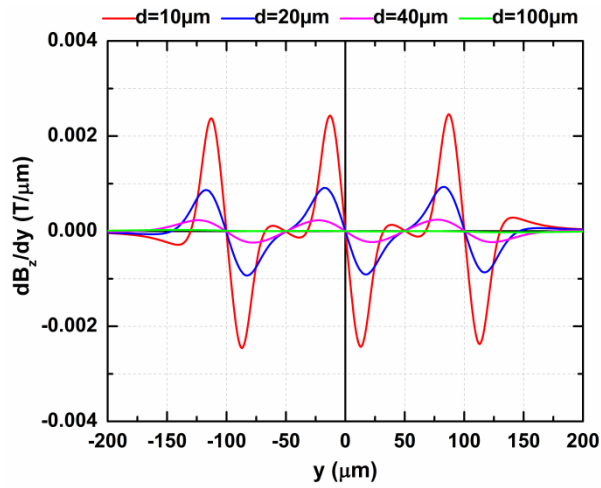


(c)

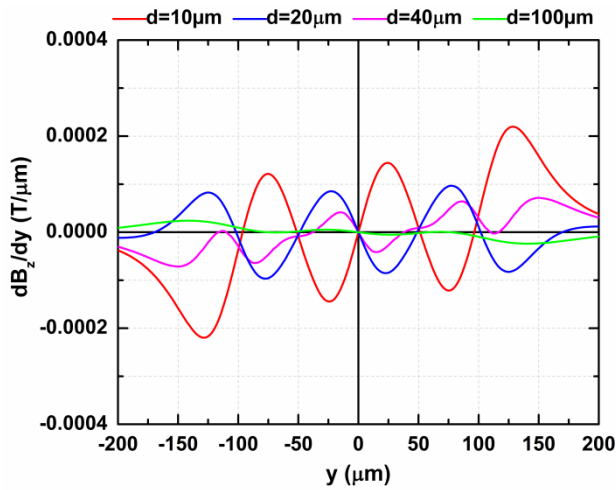
Hình 3. 10. Từ trường thành phần B_z được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)

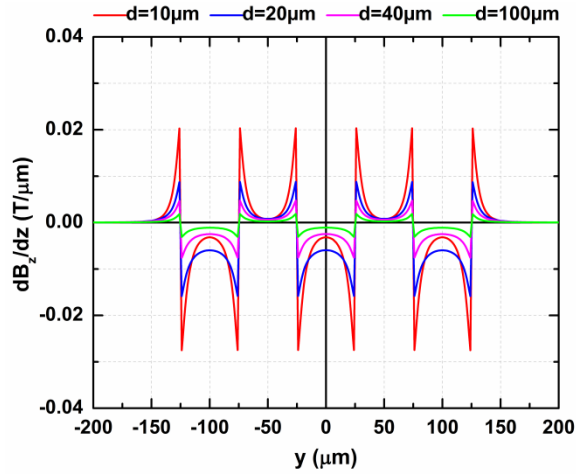


(b)

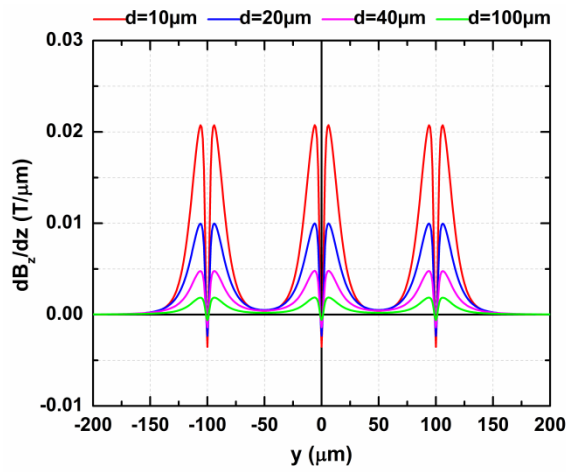


(c)

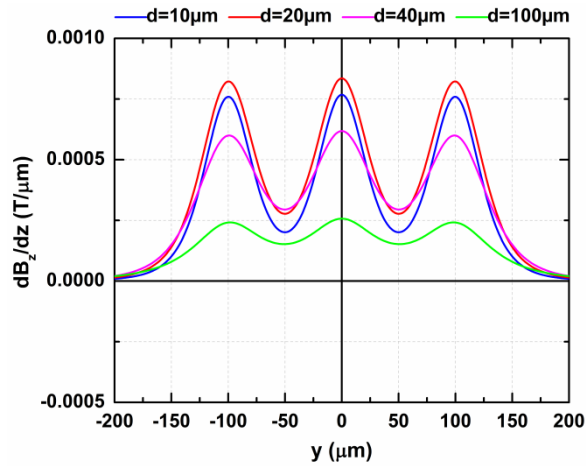
Hình 3. 11. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)



(b)



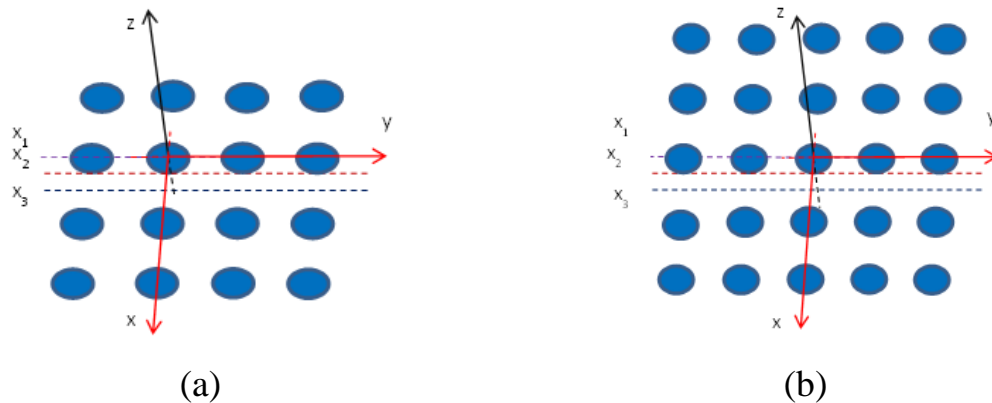
(c)

Hình 3. 12. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.

3.1.4. Cấu hình 4×4 và 5×5 nam châm

Tiếp theo chúng tôi khảo sát từ trường và sự biến thiên từ trường trong không gian xung quanh cấu hình 4×4 và 5×5 nam châm như hình 3.13. Các khảo sát được tiến hành dọc theo các đường quét x_1 , x_2 và x_3 tại một số độ cao d tương tự như trong cấu hình 1×1, 2×2 và 3×3 nam châm.

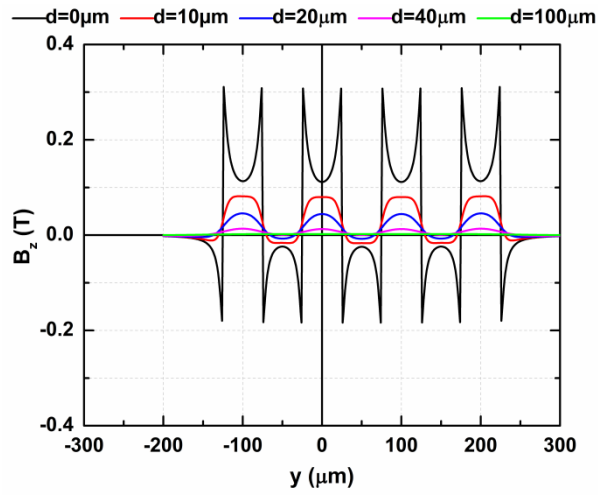
Các kết quả khảo sát thu được đối với cấu hình 4×4 nam châm được trình bày trong các hình 3.14, 3.15 và 3.16, các kết quả khảo sát thu được đối với cấu hình 5×5 nam châm được trình bày trong các hình 3.17, 3.18 và 3.19 hoàn toàn tương tự với các cấu hình nam châm đã mô phỏng ở trên.



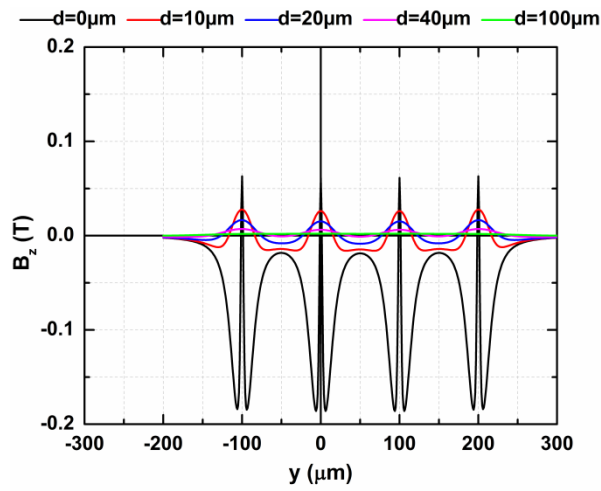
Hình 3. 13. Cấu hình 4×4 (a) và 5×5 (b) nam châm và vị trí tính toán từ trường, sự biến thiên từ trường.

a) Cấu hình 4×4 nam châm

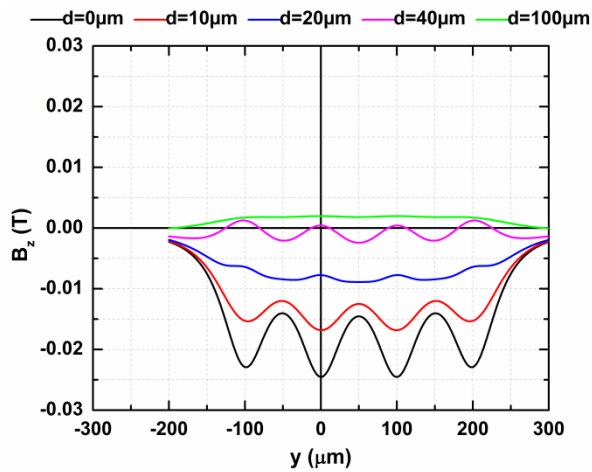
Các kết quả mô phỏng cho thấy, vị trí, cường độ cũng như khoảng cách giữa các điểm có giá trị từ trường cực đại ($B_{z \max}$), giá trị từ trường cực tiểu ($B_{z \min}$) trong cấu hình 4×4 nam châm là không thay đổi so với các cấu hình đã mô phỏng ở trên. Tại khoảng cách $d = 10 \mu\text{m}$ dọc theo đường quét x_1 , $B_{z \max} \sim 80 \text{ mT}$ tại những vị trí ở trong mép nam châm, cách mép nam châm khoảng $15 \mu\text{m}$, $B_{z \min} \sim 20 \text{ mT}$ tại những vị trí ở ngoài mép nam châm, cách mép nam châm $5 \mu\text{m}$. Giá trị cực đại của sự biến thiên từ trường theo y , dB_z/dy_{\max} , giá trị cực tiểu dB_z/dy_{\min} cũng như giá trị cực đại của sự biến thiên từ trường theo z , dB_z/dz_{\max} , giá trị cực tiểu dB_z/dz_{\min} cũng không hề thay đổi so với các kết quả tương ứng thu được trong các mô hình khác đã mô phỏng ở trên. Ví dụ, tại khoảng cách $d = 10 \mu\text{m}$ dọc theo đường quét x_1 , $dB_z/dy_{\max} \sim 6.7 \times 10^3 \text{ T/m}$, $dB_z/dy_{\min} \sim -6.8 \times 10^3 \text{ T/m}$ tại những vị trí ngay sát mép nam châm, $dB_z/dz_{\max} \sim 2 \times 10^4 \text{ T/m}$ tại những vị trí ở ngoài mép nam châm, cách mép nam châm $1 \mu\text{m}$, $dB_z/dz_{\min} \sim -2.7 \times 10^4 \text{ T/m}$ tại những vị trí ở trong mép nam châm, cách mép nam châm $1 \mu\text{m}$.



(a)

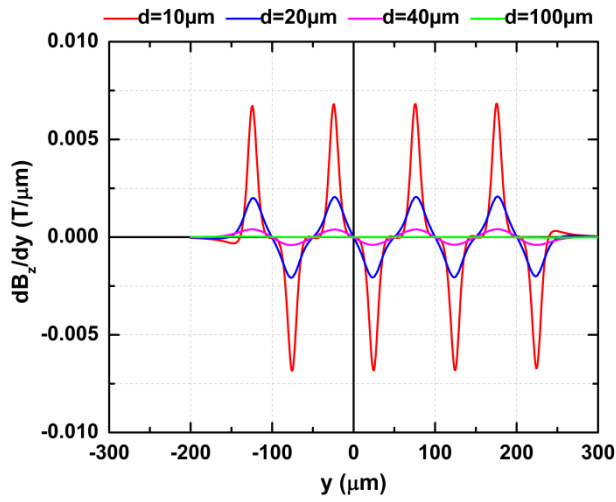


(b)

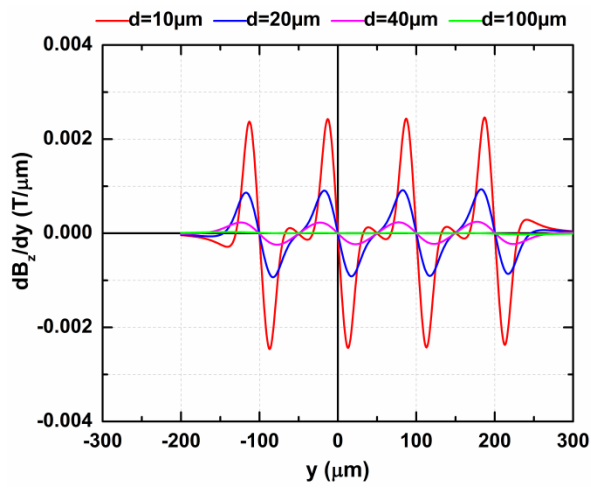


(c)

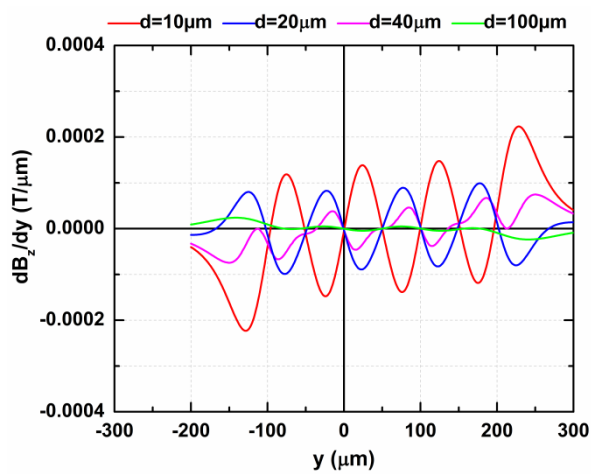
Hình 3. 14. Từ trường thành phần B_z được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)

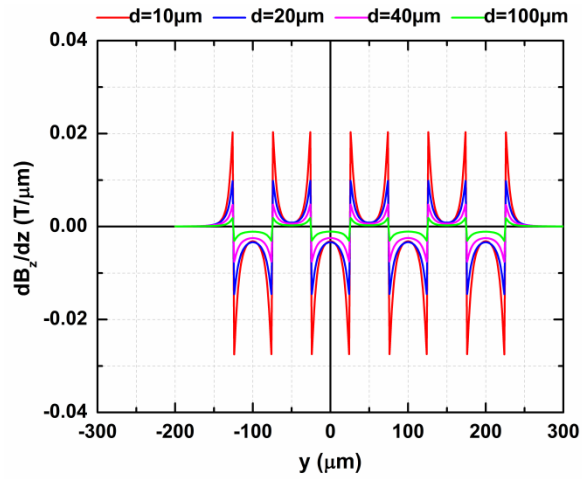


(b)

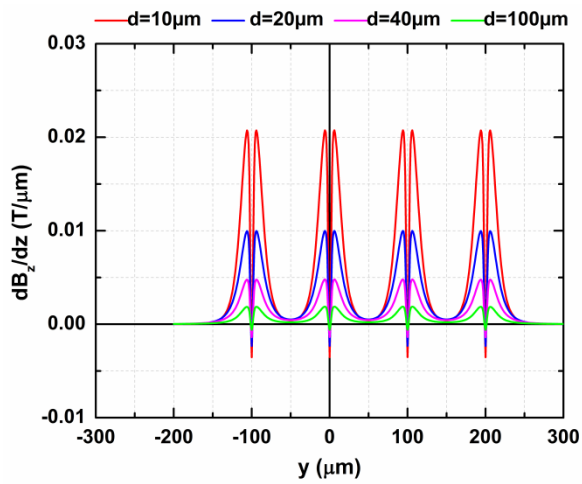


(c)

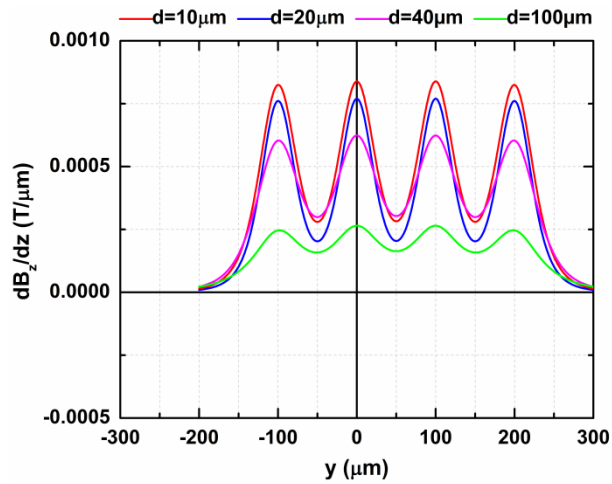
Hình 3. 15. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)



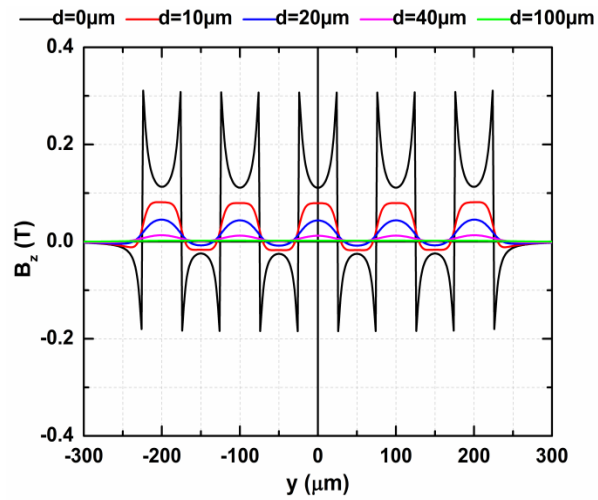
(b)



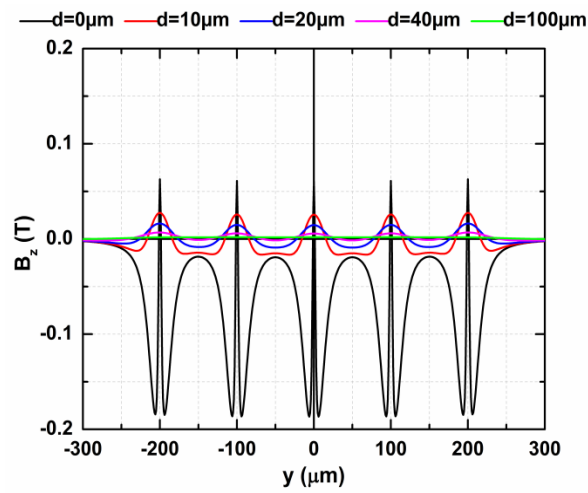
(c)

Hình 3. 16. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.

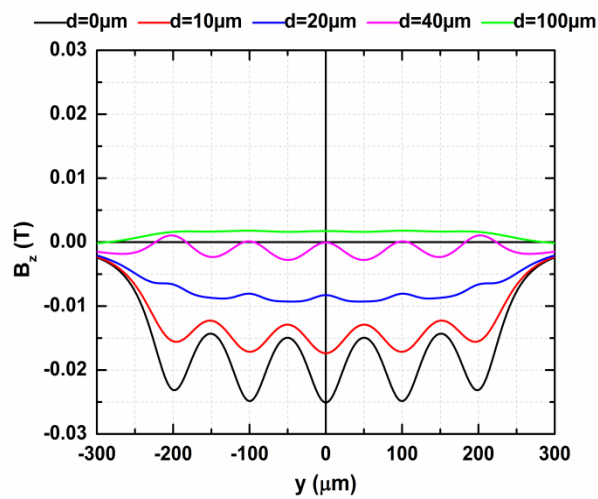
b) Cấu hình 5×5 nam châm



(a)

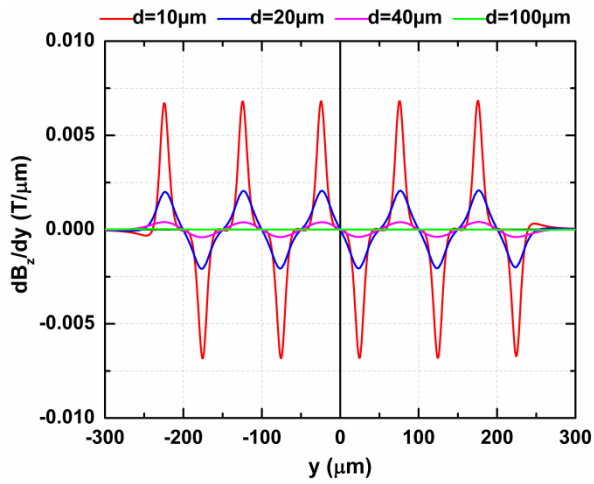


(b)

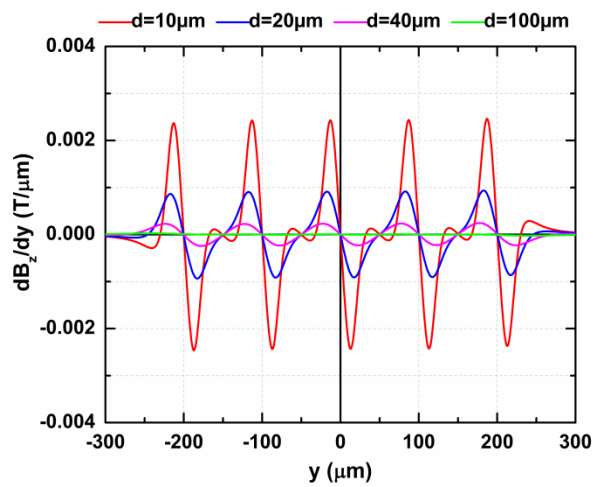


(c)

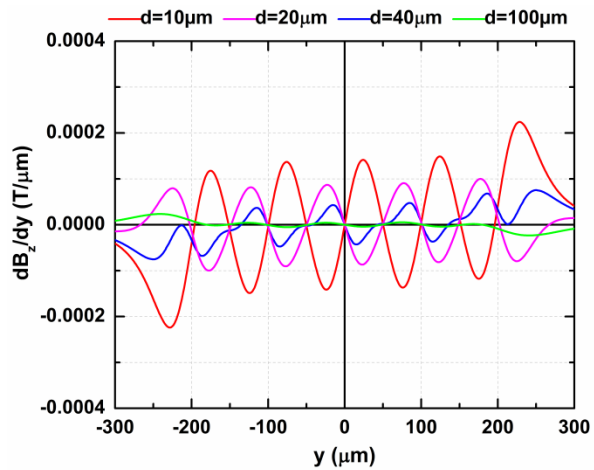
Hình 3. 17. Từ trường thành phần B_z được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)

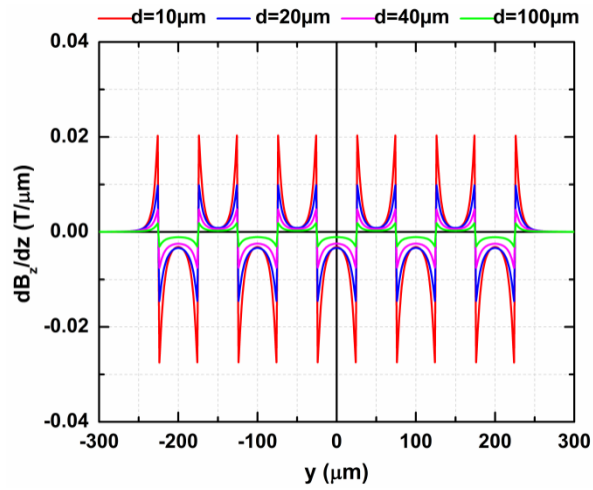


(b)

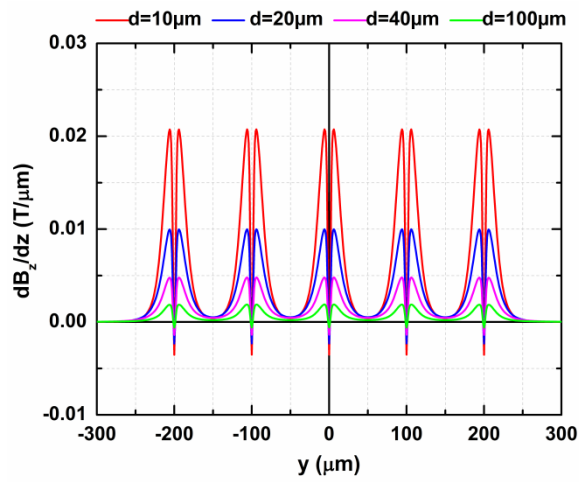


(c)

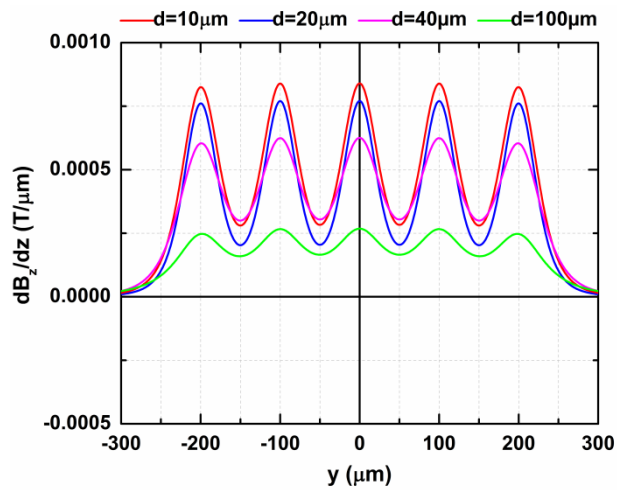
Hình 3. 18. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)



(b)



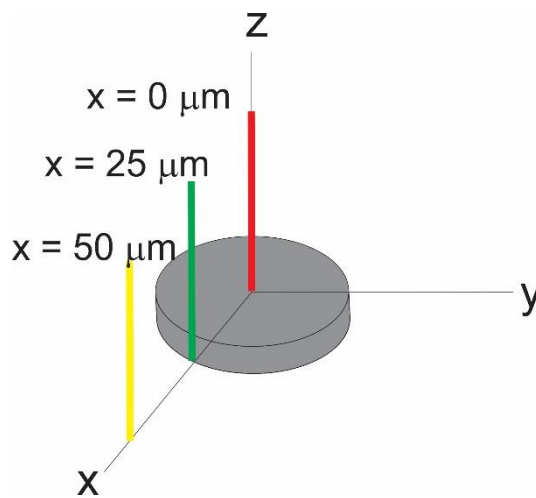
(c)

Hình 3. 19. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) được mô phỏng dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.

Các kết quả mô phỏng thu được cho thấy, việc tăng số lượng nam châm mà không thay đổi bất kỳ thông số nào về hình dạng, kích thước cũng như thuộc tính từ của nam châm chỉ góp phần giúp cho không gian từ trường xung quanh các nam châm có thêm nhiều vùng từ trường biến thiên qua đó làm tăng thêm các vị trí có thể làm vị trí ổn định cho các đối tượng từ tính nếu ở trong không gian xung quanh các nam châm này.

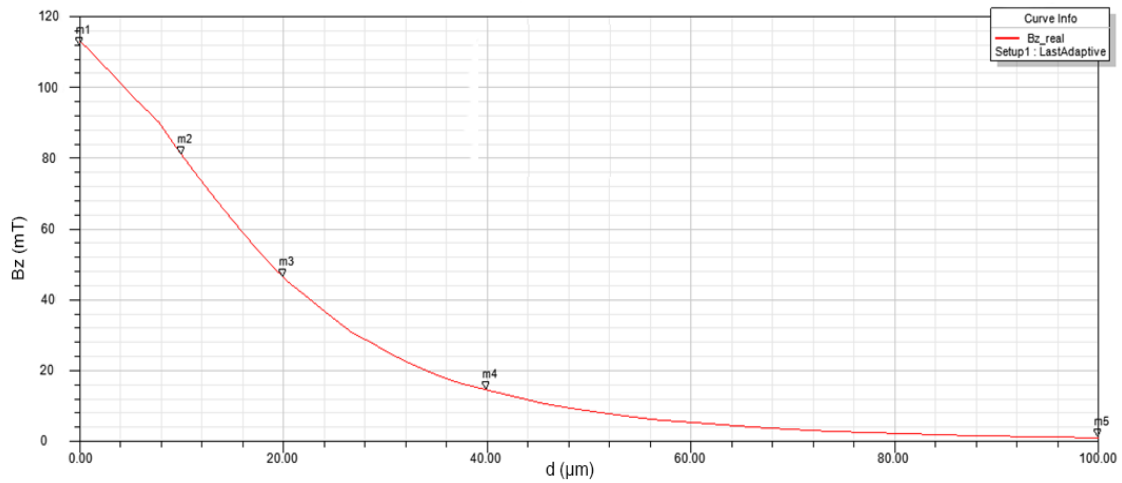
3.2. So sánh từ trường và sự biến thiên từ trường bề mặt của một số cấu hình nam châm mô phỏng được bằng các phần mềm mô phỏng và tính toán lý thuyết

3.2.1. Cấu hình 1×1 nam châm

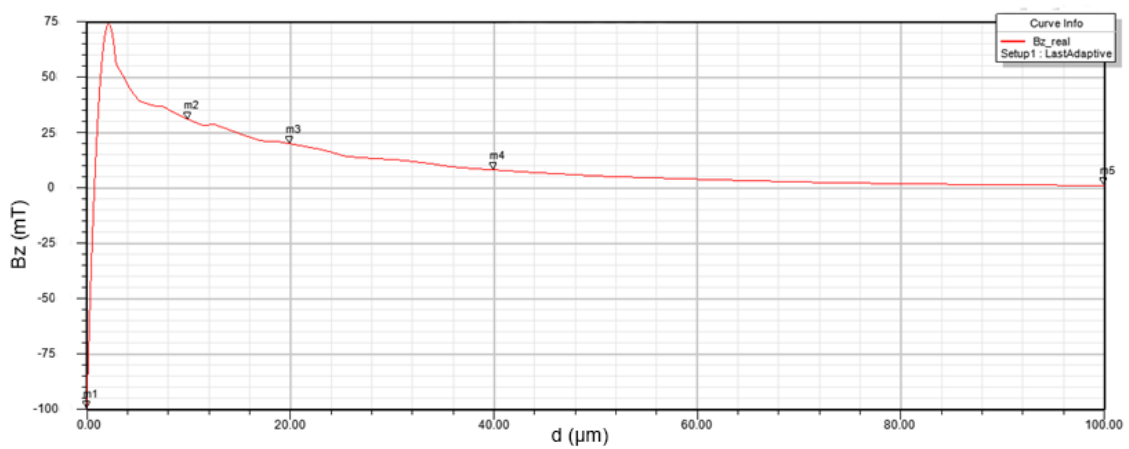


Hình 3. 20. Cấu hình 1×1 nam châm và các vị trí khảo sát từ trường bằng phần mềm Ansys Maxwell.

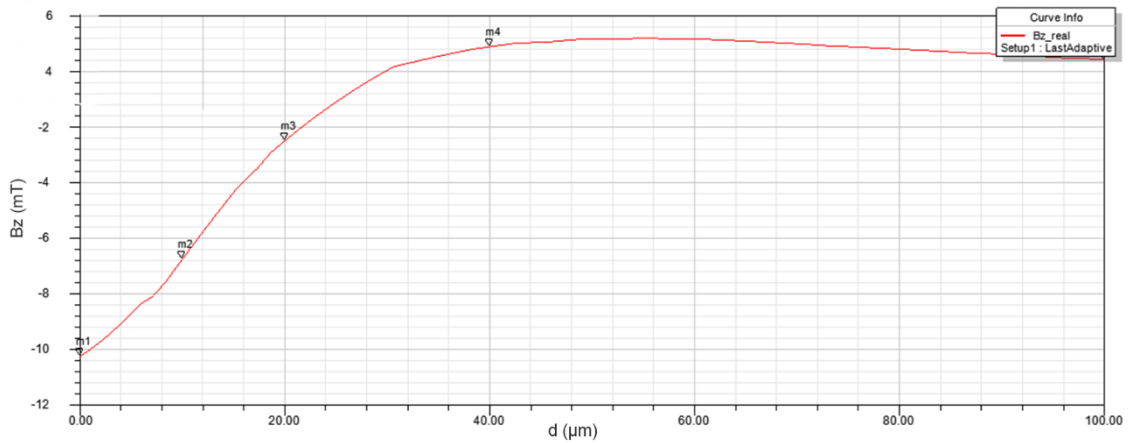
Trước hết, chúng tôi thực hiện mô phỏng lại từ trường xung quanh cấu hình 1×1 nam châm hình trụ như trong phần 3.1.1 bằng phần mềm mô phỏng Ansys Maxwell sử dụng mô hình từ tích. Trong phần này chúng tôi khảo sát thành phần từ trường B_z tại một số điểm đặc trưng nằm trên trục nam châm ($x = 0 \mu\text{m}$), nằm trên đường thẳng song song với trục nam châm tại mép nam châm ($x = 25 \mu\text{m}$) và nằm trên đường thẳng song song với trục nam châm, cách nam châm một khoảng $2R$ ($x = 50 \mu\text{m}$) theo các khoảng cách d khác nhau (hình 3.20). Kết quả thu được được biểu diễn bằng các đồ thị trong hình 3.21. Đồ thị trong hình 3.21a cho thấy giá trị của từ trường B_z tại các điểm nằm trên trục của nam châm giảm khi khoảng cách với bề mặt nam châm tăng. Giá trị của từ trường B_z tại các điểm trên đường tiếp tuyến với nam châm và song song với trục nam châm có một điểm cực đại ($B_{z \max} \sim 75 \text{ mT}$) ở độ cao $\sim 2.5 \mu\text{m}$ so với bề mặt nam châm (hình 3.21b). Giá trị của từ trường B_z tại các điểm trên đường



(a)



(b)



(c)

Hình 3. 21. Thành phần từ trường B_z được mô phỏng tại các điểm nằm trên trục nam châm cách mặt trên nam châm một khoảng d (a), tại các điểm nằm trên đường thẳng qua mép nam châm và song song với trục nam châm cách mặt trên nam châm một khoảng d (b), tại các điểm nằm trên đường thẳng song song với trục nam châm và cách trục nam châm một khoảng $2R$ (c).

$x = 50 \mu\text{m}$ tăng dần trong dải khoảng cách d đang xét. Có thể thấy rằng, các kết quả mô phỏng thu được trong phần này là hoàn toàn tương đồng với các kết quả mô phỏng ở những vị trí tương đương trong cấu hình 1×1 nam châm ở phần 3.1.1.

Bảng 3. 2. So sánh giá trị của từ trường B_z tính toán được bằng mô hình dòng và mô hình từ tích với giá trị B_z mô phỏng được bằng các phần mềm tại một số điểm nằm trên trục của nam châm hình trụ dây $5 \mu\text{m}$, đường kính $50 \mu\text{m}$ và độ từ dư 1.2 T dọc theo trục nam châm.

d (μm)	B_z tính toán lý thuyết (mT)		B_z mô phỏng bằng phần mềm (mT)	
	Mô hình từ tích	Mô hình dòng	MacMMems	Ansys Maxwell
0	117.66	117.66	117.53	111.85
10	85.43	85.43	85.45	81.00
20	49.15	49.15	49.15	46.42

Để so sánh kết quả mô phỏng thu được với kết quả tính toán lý thuyết bằng mô hình từ tích chúng tôi đã sử dụng công thức 2.31 để tính giá trị từ trường thành phần B_z tại một số điểm nằm trên trục nam châm và cách mặt trên nam châm một khoảng d .

$$B_z = \frac{\mu_0 M}{2} \left(\frac{z + L}{\sqrt{(z + L)^2 + R^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right)$$

Áp dụng công thức trên vào cấu hình nam châm của chúng tôi, với $\mu_0 M$ là cảm ứng từ dư B_R theo trục z của nam châm, L là chiều cao của nam châm và $(z + 5)$ chính là khoảng cách d tính từ mặt trên nam châm (vì trong mô hình 3.20 gốc tọa độ O nằm ở tâm mặt dưới của nam châm). Như vậy, từ trường thành phần B_z tính được tại một số điểm nằm trên trục nam châm là:

+ $d = 0 \mu\text{m}$, tức $z = 5 \mu\text{m}$:

$$B_{z=5} = \frac{1.2}{2} \left(\frac{0 + 5}{\sqrt{(0 + 5)^2 + 25^2}} - \frac{0}{\sqrt{0^2 + 25^2}} \right) \approx 0.11766 \text{ T}$$

+ $d = 10 \mu\text{m}$, tức $z = 15 \mu\text{m}$:

$$B_{z=15} = \frac{1.2}{2} \left(\frac{10 + 5}{\sqrt{(10 + 5)^2 + 25^2}} - \frac{10}{\sqrt{10^2 + 25^2}} \right) \approx 0.085434 \text{ T}$$

+ $d = 20 \text{ } \mu\text{m}$, tức $z = 25 \text{ } \mu\text{m}$:

$$B_{z=25} = \frac{1.2}{2} \left(\frac{20 + 5}{\sqrt{(20 + 5)^2 + 25^2}} - \frac{20}{\sqrt{20^2 + 25^2}} \right) \approx 0.04915 \text{ T}$$

Bảng 3. 3. So sánh các giá trị B_z tại một số điểm trên bề mặt nam châm thu được bằng phần mềm mô phỏng.

Tọa độ x (μm)	Độ cao d (μm)	Từ trường B_z (mT)		Sai số (%)
		Ansys Maxwell	MacMMems	
0	0	111.85	117.53	4.8
	10	81.00	85.45	5.2
	20	46.42	49.15	5.5
	40	14.60	15.61	6.5
	100	1.13	1.59	29
25	0	-99.69	68.43	245
	10	30.71	32.60	5.8
	20	19.76	20.49	3.5
	40	8.03	9.00	10.7
	100	0.94	1.36	30.8
50	0	-10.24	-10.06	1.7
	10	-6.75	-6.31	6.9
	20	-2.50	-1.99	25.6
	40	0.87	1.47	40.8
	100	0.43	0.87	50.5

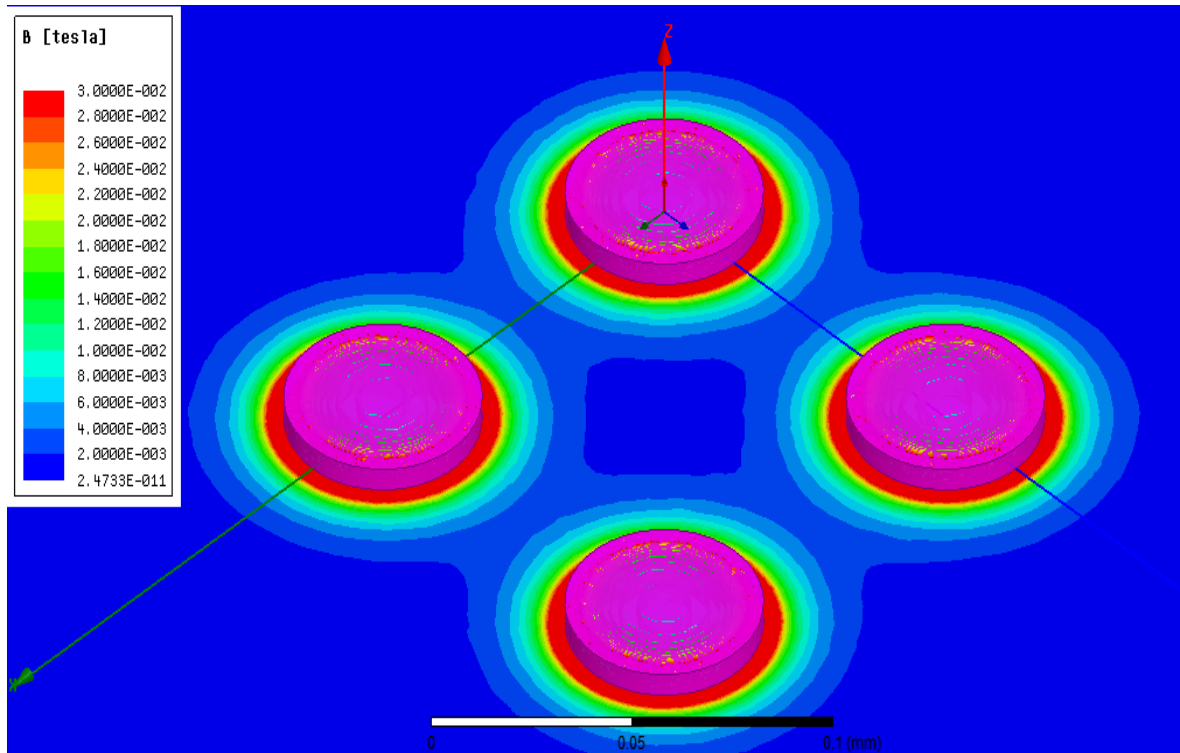
Như vậy, có thể thấy các kết quả tính toán này hoàn toàn phù hợp với các kết quả tính toán bằng mô hình dòng tương đương và kết quả mô phỏng bằng phần mềm MacMMems ở trên (bảng 3.2).

Từ bảng 3.2 chúng ta thấy rằng các kết quả mô phỏng được bằng phần mềm Ansys Maxwell sai số trung bình khoảng 5.9% trừ một số vị trí đặc biệt so với các kết quả mô phỏng được bằng phần mềm MacMMems và các kết quả tính được từ mô hình lý thuyết. Sự sai khác này không có thể do việc quy định các thuộc tính vật lý cho nam châm trong phần mềm là chưa thực sự chính xác, cũng như các khoảng chia lưới trong phần mềm là chưa phù hợp tốt.

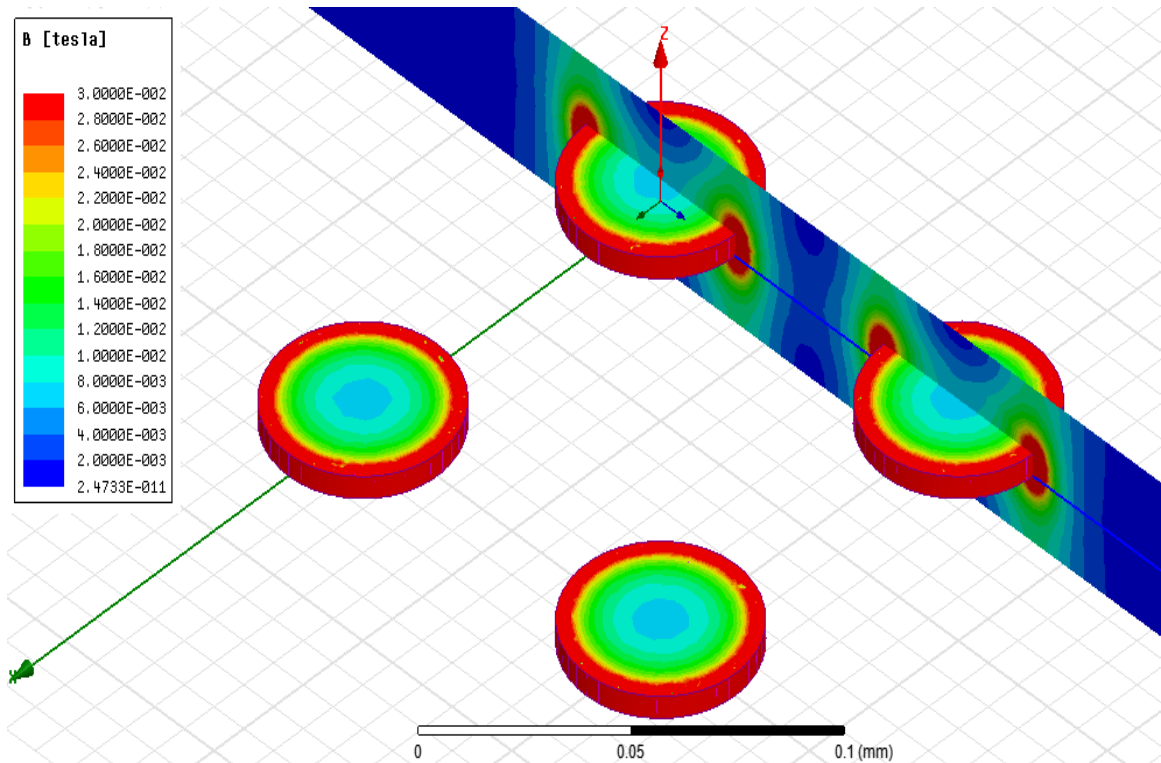
Bảng 3.3 cũng cho thấy hầu hết các giá trị B_z thu được bằng các phần mềm mô phỏng sai khác nhau trung bình 5.9%. Điều này cho thấy giữa các phần mềm có một sự sai khác nhất định phù hợp với thực tế rằng các phần mềm mô phỏng được xây dựng trên các mô hình lý thuyết khác nhau. Tuy nhiên sự sai khác này hoàn toàn có thể thu hẹp lại bằng cách điều chỉnh các thông số tính toán phù hợp cho quá trình mô phỏng. Như vậy nhờ có các phần mềm mô phỏng cũng như các giá trị tính toán lý thuyết chúng ta hoàn toàn có thể xác định được từ trường, sự biến thiên từ trường do nam châm sinh ra tại những điểm xác định với độ chính xác cao.

3.2.2. Cấu hình 2×2 nam châm

Tiếp theo chúng tôi sử dụng phần mềm mô phỏng Ansys Maxwell để mô phỏng từ trường trong không gian xung quanh cấu hình 2×2 nam châm như phần 3.1.2. Các kết quả thu được được thể hiện dưới dạng các hình ảnh 3D trong hình 3.22. Hình 3.22a mô phỏng không gian từ trường ngay sát bề mặt nam châm (khoảng cách $d = 0 \mu\text{m}$). Hình 3.22b mô phỏng một mắt cắt của không gian từ trường theo mặt phẳng Oyz. Từ hình ảnh thu được, chúng ta thấy rằng từ trường chủ yếu tập trung ở mép của các nam châm và nhanh chóng suy giảm khi đi xa nam châm theo mọi hướng. Trong không gian xung quanh các nam châm ($d = 0 \mu\text{m}$) tồn tại một vùng từ trường ổn định ($B_z \sim 0 \text{ T}$) đó là khu vực giữa bốn nam châm, phù hợp với thực tế các đường sức từ là các đường cong khép kín ngay sát bề mặt nam châm nên các đường sức này không thể đi ra xa mép nam châm. Từ các kết quả mô phỏng thu được, chúng tôi đã rút ra giá trị của từ trường B_z tại một số điểm trong cấu hình này để so sánh với các kết quả tương ứng trong phần 3.1.2. Kết quả so sánh được trình bày trong bảng 3.3 và cho thấy sự phù hợp của các kết quả mô phỏng được bằng hai phần mềm.



(a)



(b)

Hình 3. 22. Không gian từ trường ngay sát bề mặt các nam châm (a), một mặt cắt của không gian từ trường dọc theo khoảng cách d từ bề mặt nam châm (b).

Bảng 3. 4. So sánh các giá trị B_z tại một số điểm trên bề mặt nam châm trong cấu hình 2×2 nam châm thu được bằng phần mềm mô phỏng.

Tọa độ x (μm)	Độ cao d (μm)	Từ trường B_z (mT)		Sai số (%)
		Ansys Maxwell	MacMMems	
0	0	108.27	115.18	6
	10	78.97	83.27	5.2
	20	45.04	47.30	4.8
	40	13.75	14.63	6.1
	100	1.38	1.97	30
25	0	-109.07	64.51	170
	10	29.08	29.11	0.1
	20	17.22	17.84	3.5
	40	7.31	8.08	9.5
	100	1.41	2.02	30.1
50	0	-21.34	-21.54	0.93
	10	-13.92	-13.96	0.3
	20	-5.27	-5.14	2.5
	40	1.57	2.27	30.9
	100	1.29	1.97	4.6

KẾT LUẬN

Trong luận văn đã thu được một số kết quả nghiên cứu chính như sau:

- Nghiên cứu các mô hình lý thuyết dòng tương đương và mô hình từ tích để tính toán từ trường trên bề mặt vật liệu từ và nghiên cứu các phần mềm mô phỏng từ trường tương ứng.

- Mô phỏng sự phân bố từ trường trên bề mặt các nam châm từ cứng dạng trụ NdFeB có cấu trúc micro-nano, khảo sát ảnh hưởng của số lượng vi nam châm, so sánh giữa các kết quả mô phỏng sử dụng các mô hình cũng như kiểm tra bằng việc tính toán lý thuyết.

- Khi tăng số lượng nam châm thì sẽ có thêm các vùng từ trường biến thiên với giá trị cực tiểu giảm trong khi giá trị cực đại ít thay đổi, giúp cho sự biến thiên của từ trường, cụ thể số hạng $\vec{B}\nabla\vec{B}$ (trong công thức tính lực từ) tăng lên. Kết quả nghiên cứu cho thấy $\vec{B}\nabla\vec{B}$ có thể đạt giá trị $\sim 6 \times 10^5 \text{ T}^2/\text{m}$ tại những vị trí ngay sát mép các vi nam châm. Thành phần B_z của từ trường và sự biến thiên của thành phần này theo phương song song với bề mặt nam châm (dB_z/dy) giảm mạnh ở những độ cao cách bề mặt nam châm (d) lớn, còn biến thiên của B_z theo phương vuông góc với bề mặt nam châm (dB_z/dz) thay đổi ít ở những độ cao d khác nhau. Như vậy bằng việc tăng số lượng nam châm sẽ cho phép thành phần lực từ tạo ra theo phương vuông góc với bề mặt các nam châm được duy trì ở những độ cao cách bề mặt nam châm lớn, là điều kiện cần để hút hoặc đẩy các đối tượng từ tính ngay cả khi đối tượng ở xa bề mặt các nam châm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

- [1]. Nguyễn Phú Thùy, *Vật lý các hiện tượng từ*, NXB Đại học Quốc gia Hà Nội, 2003.
- [2]. Thân Đức Hiền, Lưu Tuấn Tài, *Từ học và vật liệu từ*, NXB Đại học Bách khoa Hà Nội, 2006.

Tiếng Anh

- [3]. O. Akdogan, W. Li and G. Hadjipanayis, “High coercivity of Alnico thin films: effect of Si substrate and the emergence of a novel magnetic phase”, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 14, 2012, pp. 891.
- [4]. G. Allaedinil, S. M. Tasirinl, P. Aminayi, “Magnetic properties of cobalt ferrite synthesized by hydrothermal method”, *Int Nano Lett*, Vol. 5, 2015, pp. 183–186.
- [5]. H. Allag, J. Yonnet, M. E. H. Latreche, H. Boucekara, “Coulombian model for 3D analytical calculation of the torque exerted on cuboidal permanent magnets with arbitrarily oriented polarizations”, *International Conference on Linear Drives for Industry Applications*, Vol. 8, 2011, pp. 102-108.
- [6]. L. Castaldi, H. A. Davies, M. R. J. Gibbs, “Growth and characterization of NdFeB thin films”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 242-245, 2002, pp. 1284-1286.
- [7]. O. Chadebec, J. L. Coulomb, F. Janet, “A review of magnetostatic moment method”, *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 42, 2006, pp. 515-520.
- [8]. S. Chigirinsky, M. Kustov, N. Dempsey, C. Ndao and R. Grechishkin, “Calculations and measurements of the magnetic field of patterned permanent magnetic films for lab on chip applications”, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, Vol. 20, 2009, pp. 85-91.
- [9]. J. A. Christodoulides, Y. Zhang, G. C. Hadjipanayis, I. Panagiotopoulos and D. Niarchos, “CoPt and FePt Thin Films For High Density Record Media”, *NATO Advanced Research Workshop on Nanostructured Films and Coatings*, Series 3, Vol 78, 2004, pp. 1326-1348.

- [10]. A. Itabashi, M. Ohtake, S. Ouchi, F. Kirino and M. Futamoto, “FePd, FePt, and CoPt alloy epitaxial thin films with flat surface grown on MgO(111) substrate”, *EPJ Web of Conferences*, Vol. 75, 2014, pp. 6008.
- [11]. S. Jeong, Y. Hsu, D. E. Laughlin, and M. E. McHenry, “Magnetic Properties of Nanostructured CoPt and FePt Thin Films”, *IEEE Transactions On Magnetic*, Vol. 36, 2000, pp. 2336-2338.
- [12]. A. L. Gassner, M. Abonnenc, H. X. Chen, J. Morandini, J. Josserand, J. S. Rossier, J. M. Busnel and H. H. Girault, “Magnetic forces produced by rectangular permanent magnets in static microsystem”, *Lab Chip*, Vol. 9, 2009, pp. 2356-2363.
- [13]. T. Mikolanda, M. Kosek, A. Richter, “3D magnetic field measurement, visulisation and modeling”, *Proceeding of the 7th International Conference*, Slovakia, 2009, pp. 306-309.
- [14]. F. Mohseni, M. J. Pereira, N. M. Fortunato, J. S. Amaral, “Magnetic and morphologic properties of Alnico-based rare-earth free permanent magnets”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 46, 2013, pp. 23.
- [15]. V. Neu, S. Melcher, U. Hannemann, S. Fähler and L. Schultz, “Growth, microstructure and magnetic properties of highly textured and highly coercive Nd-Fe-B films”, *Phys. Rev*, Vol. 70, 2009, pp. 144418.
- [16]. D. Pătroi, M. M. Codescu, E. A. Pătroi, V. Marinescu, “Structural and magnetic behaviour of DC sputtered Alnico type thin films”, *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*, Vol. 5, 2011, p. 1130-1133.
- [17]. H. L. Rakotoarison, J. P. Yonnet, “Using Coulombian Approach for Modeling Scalar Potential and Magnetic Field of a Permanent Magnet With Radial Polarization”, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 43, 2007, pp. 1261-1264.
- [18]. R. Ravaud and G. Lemarquand, “Synthesis about Analytical Approaches for Calculating the Magnetic Field Produced by Permanent Magnets of Various Topologies”, *PIERS Proceedings, Cambridge*, Vol. 11, 2010, pp.281-297.
- [19]. R. Ravaud and G. Lemarquand, “Magnetic field produced by a parallelepipedic magnet of various and uniform polarization”, *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 98, 2009, pp. 207-219.

- [20]. I. B. Roth, "Characterization and use of permanent magnets with extremely strong field gradients", *Master thesis*, Department of Physics University of Oslo, 2009, pp. 125.
- [21]. K. E. B. Serrona, A. Sugimura, R. Fujisaki, T. Okuda, N. Adachi, H. Ohsato, I. Sakamoto, A. Nakanishi, M. Motokawa, "Magnetic and structural properties of NdFeB thin film prepared by step annealing", *Materials Science and Engineering* Vol. 97, 2003, pp. 59-63.
- [22]. K. E. B. Serrona, A. Sugimura, N. Adachi, T. Okuda, H. Ohsato, and I. Sakamoto, "Structure and magnetic properties of high coercive NdFeB films with a perpendicular anisotropy", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 82, 2003, pp.1751.
- [23]. A. B. Shinde, "Structural and Electrical Properties of Cobalt Ferrite Nanoparticles", (*IJITEE*) ISSN, Vol. 3, 2013, pp. 2278-3075.
- [24]. P. D. Thang, G. Rijnders, D. H. A. Blank, "Stress-induced magnetic anisotropy of CoFe_2O_4 thin films using pulsed laser deposition", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 310, 2007, pp. 2621-2623.
- [25]. P. Vaishnava, U. Senaratne, E. Buc, P. Boolchand, "Magnetic properties of cobalt-ferrite nanoparticles embedded in polystyrene resin", *Journal Of Applied Physics* Vol. 99, 2006, pp.702-708.
- [26]. A. Walther, C. Marcoux, B. Desloges, R. Grechishkin, D. Givord, N. M. Dempsey, "Micro-patterning of NdFeB and SmCo magnet films for integration into micro-electro-mechanical-systems", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 321, 2009, pp. 590-594.