

**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

TÓM TẮT LUẬN VĂN THẠC SĨ VẬT LIỆU VÀ LINH KIỆN NANO

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

HÀ NỘI - 2016

MỞ ĐẦU

Vật liệu từ cứng nói chung và nam châm nói riêng được dùng phổ biến trong nhiều thiết bị kỹ thuật. Nam châm được sử dụng trong các bộ phận của 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 kích thước nhỏ, đủ mạnh và có từ trường không đồng nhất 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. Do đó, để tăng được hiệu quả của phân tách từ tính, giá trị của tích $\vec{B}\nabla\vec{B}$ cao 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 trên $10^3 - 10^4 \text{ T}^2/\text{m}$.

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}

Cường độ từ trường \vec{H}

Độ cảm từ χ

$\mu_r = \mu/\mu_0$ là độ từ thẩm tương đối

1.2. Các phương trình cơ bản của từ trường tĩnh

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

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.

1.3.2. Vật liệu thuận từ

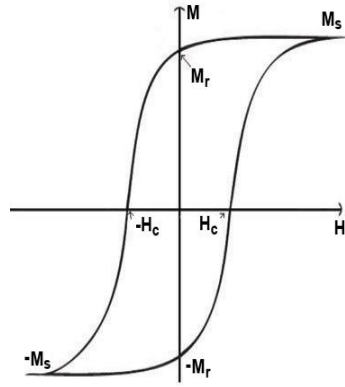
Khác với chất nghịch từ, chất thuận từ khi bị từ hóa sẽ sinh ra một từ trường phụ hướng cùng chiều với từ trường ngoài.

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].

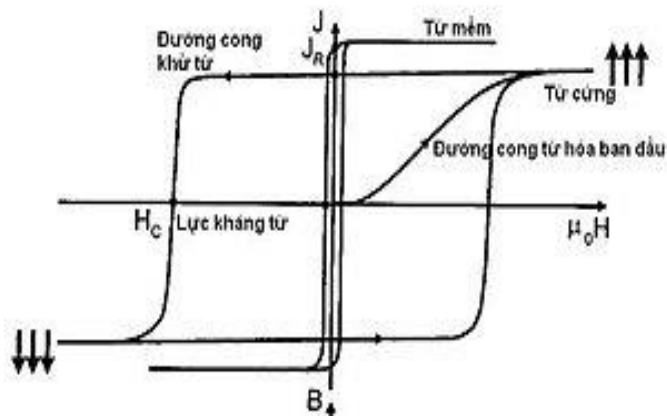
1.4. Đường cong từ trễ

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.



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 .

- Từ độ bão hòa (M_S)
- Từ dư (M_R)
- Lực kháng từ (H_C)



Hình 1.2. Đường cong từ trễ của vật liệu từ mềm và vật liệu từ cứng.

Vật liệu từ mềm

Vật liệu từ cứng

- Lực kháng từ H_C .
- Cảm ứng từ dư B_R
- Tích năng lượng từ cực đại $((BH)_{max})$

1.5. Mục tiêu của luận văn

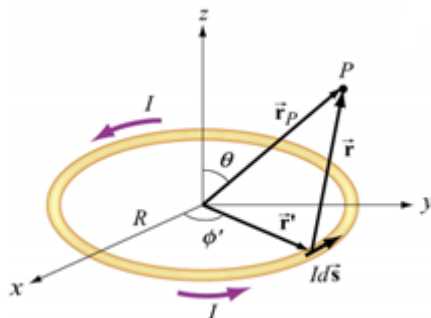
Luận văn này được thực hiện với mục đích tính toán, khảo sát lý thuyết sự phân bố của từ trường trên một số nam châm từ cứng hình trụ NdFeB có cấu trúc micro bằng các mô hình lý thuyết và phần mềm mô phỏng. Các giá trị thu được bằng tính toán và mô phỏng được so sánh với nhau, qua đó cho thấy mức độ chính xác và đáng tin cậy của các mô hình lý thuyết cũng như phần mềm mô phỏng từ trường.

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

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 $(z; y; z)$.

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

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

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

- Thành phần từ trường theo trục Ox :

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

- Thành phần từ trường theo trục Oy :

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

- Thành phần từ trường theo trục Oz :

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

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

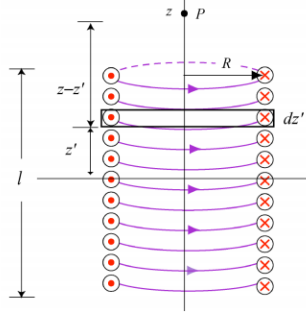
$$B_x = \frac{\mu_0 IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\phi'}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} d\phi' = 0 \quad (2.10)$$

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

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

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 dài 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.

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

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

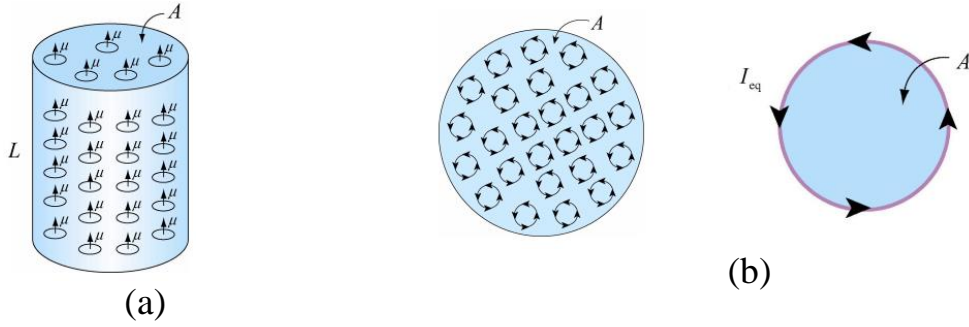
+ Trường hợp điểm P nằm trên trục của cuộn dây, tức điểm P có tọa độ $(0; 0; z)$:

$$B_z = \frac{\mu_0 R^2 NI}{2l} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dz'}{[(z - z')^2 + R^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.17)$$

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

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 mômen 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).

Từ trường do nam châm sinh ra như sau:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 R N M}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R z \cos\phi' \vec{i} + R z \sin\phi' \vec{j} + (R^2 - R x \cos\phi' - R y \sin\phi') \vec{k}}{(R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2R(x \cos\phi' + y \sin\phi'))^{3/2}} d\phi' \quad (2.21)$$

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

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

2.1.2. Mô hình từ tích

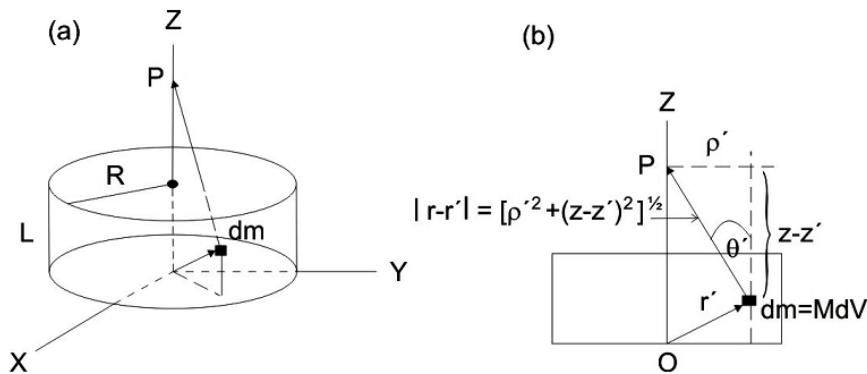
Theo mô hình này, để tính từ trường do một nam châm sinh ra tại một điểm bất kì xung quanh nam châm người ta coi từ trường là tập hợp của các mô-men từ lưỡng cực \vec{m} , mỗi mô-men từ lưỡng cực này sẽ sinh ra tại điểm cần xét một từ thế [5, 7, 12, 13, 17, 18, 19, 20]:

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

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

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 phần tử từ $d\vec{m}$ (a) và sơ đồ tính toán từ thế do một phần 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

2.2.1. 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.

2.2.2. Phần mềm AnsysMaxwell

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.

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. 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 mô hình gồm các nam châm giống hệt nhau sắp xếp trật tự và tuần hoàn. Trong tất cả các mô hình, cảm ứng từ dư 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.

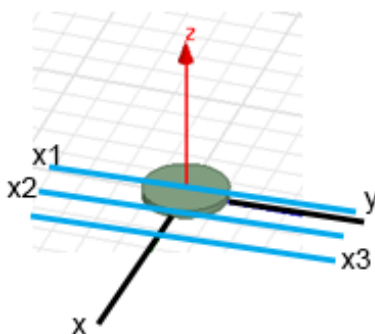
3.1.1. Cấu hình 1×1 nam châm

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).

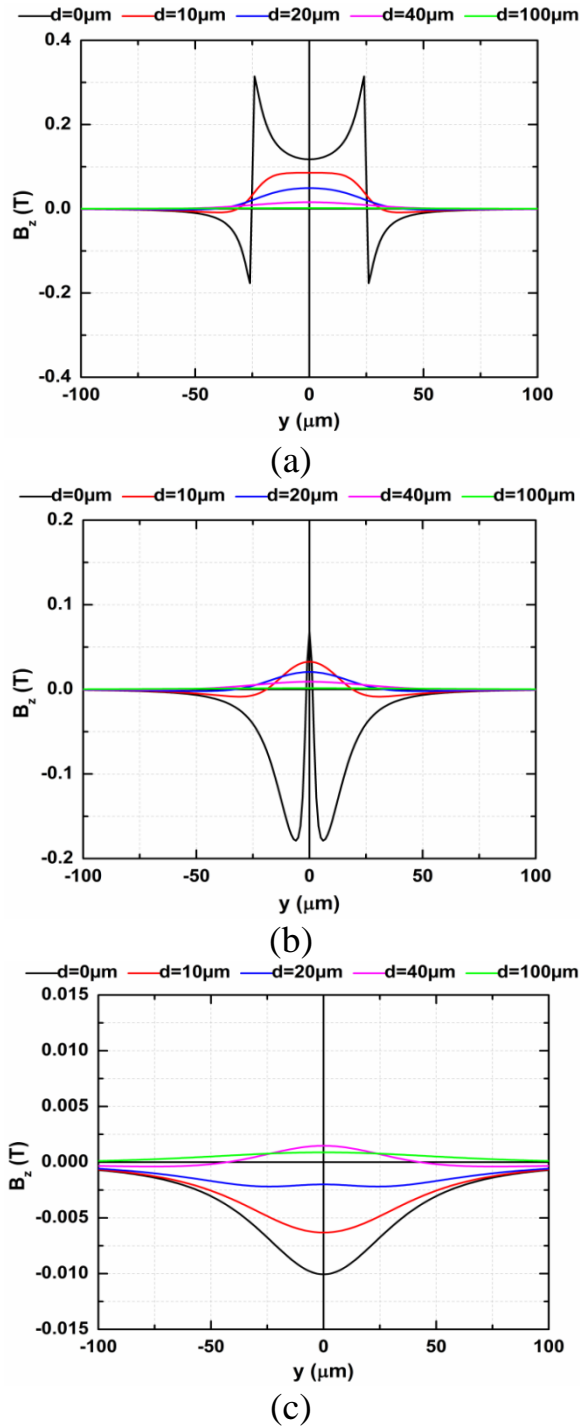
-Dọc theo đường thẳng đi qua mép mặt trên của nam châm và song song với đường x_1 (đường x_2 trong hình 3.1).

-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



Hình 3.2. Từ trường thành phần B_z mô phỏng được dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.

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 phía 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 về 0 T. Điều này được giải thích rằng khi đi ra xa mặt trên nam châm thì các đường sức thưa

dẫn 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.

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 (viên) 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 mô hình nam châm của chúng ta cần lưu ý chuyển đổi tham số độ cao d trong mô 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:

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

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

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

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

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

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

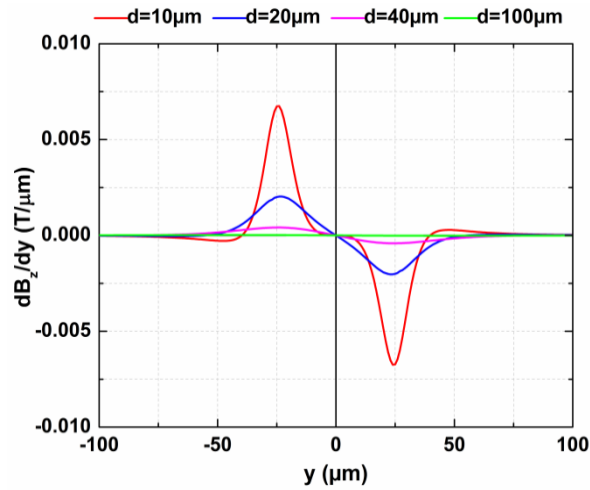
Bảng 3.1. So sánh kết quả tính toán lý thuyết thành phần từ trường B_z bằng mô hình dòng với kết quả mô phỏng.

$d (\mu\text{m})$	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

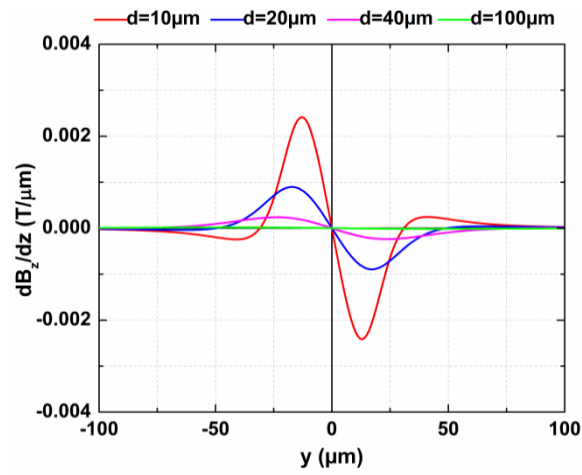
Các kết quả tính toán lý thuyết này được so sánh với các giá trị thu được từ phần mềm mô phỏng và được tổng kết trong bảng 3.1. Từ bảng so sánh ta thấy kết quả tính toán từ mô hình dòng tương đương và kết quả mô phỏng từ phần mềm MacMMems là giống nhau, qua đó cho thấy sự chính xác của phần mềm mô phỏng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

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

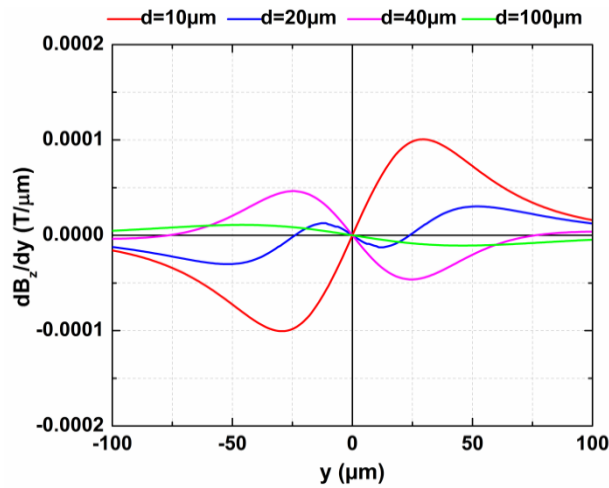
trung chủ yếu tại mép và lân cận mép nam châm trong không gian ngay sát nam châm, còn ở không gian xa nam châm thì từ trường B_z chủ yếu tập trung ở trục của nam châm và hầu như không có sự biến thiên của B_z .



(a)

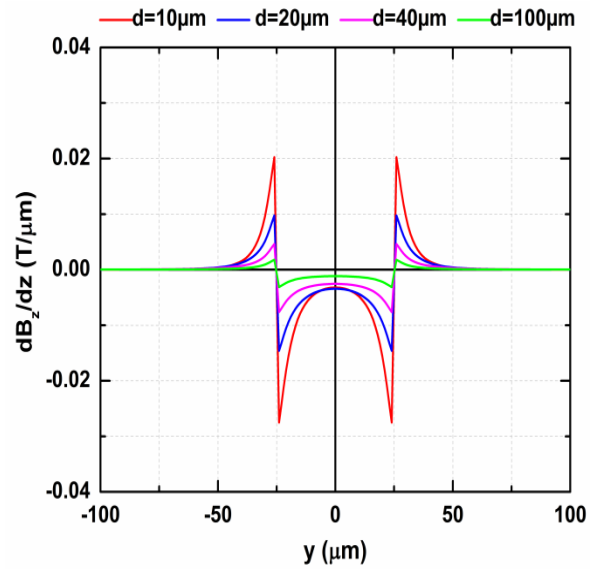


(b)

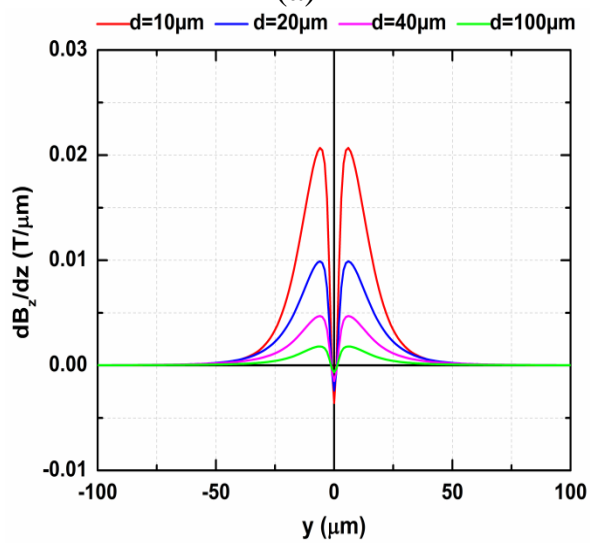


(c)

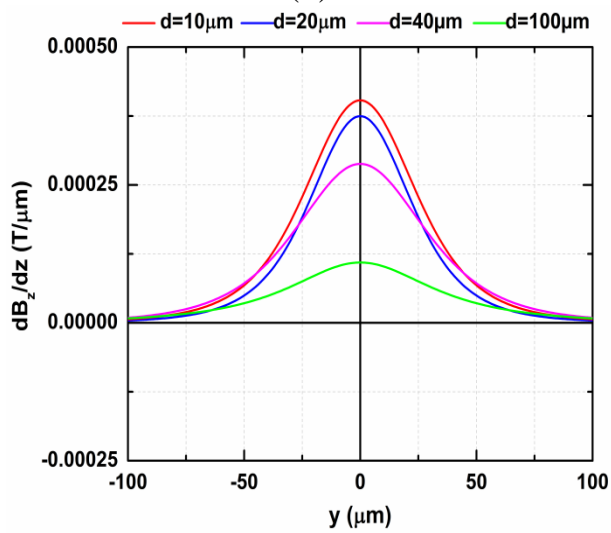
Hình 3.3. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) mô phỏng được dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)



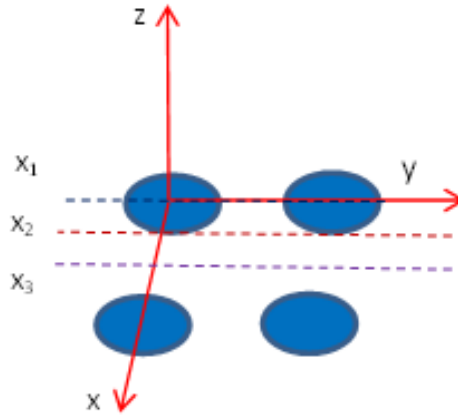
(b)



(c)

Hình 3.4. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) mô phỏng được dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.

3.1.2. Cấu hình 2×2 nam châm

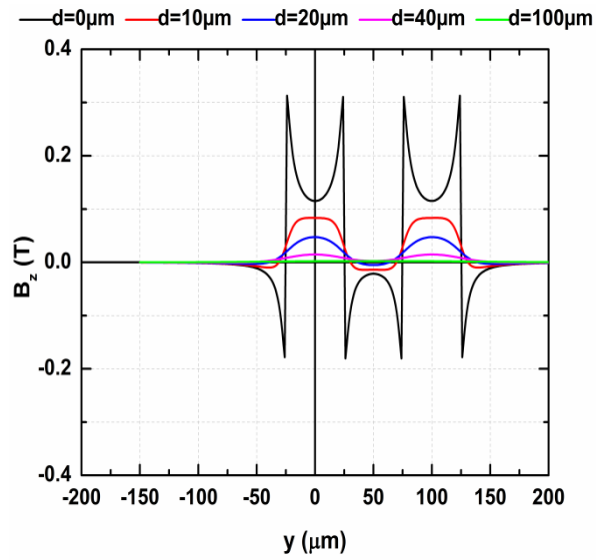


Hình 3.5. Cấu hình 2×2 nam châm và vị trí tính toán từ trường, sự biến thiên từ trường.

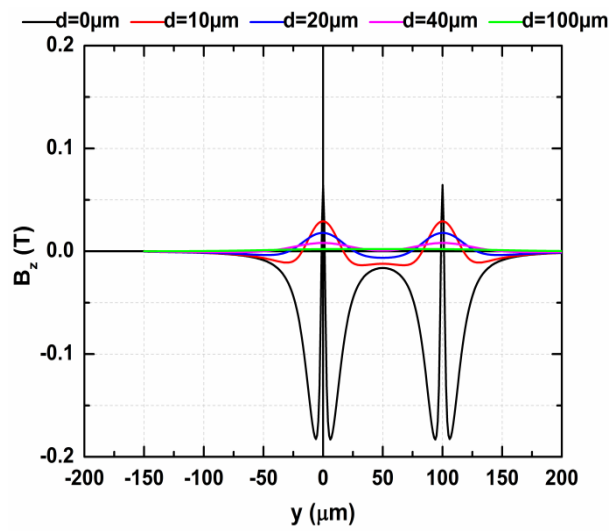
Trước hết, chúng tôi khảo sát từ trường xung quanh cấu hình gồm 2×2 nam châm hình trụ sắp xếp tuần hoàn (hình 3.5). Các tính toán, mô phỏng giá trị từ trường B_z và sự biến thiên của nó theo y (dB_z/dy) và theo z (dB_z/dz) bằng phần mềm được thực hiện dọc theo các đường quét x_1 , x_2 , x_3 như trong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

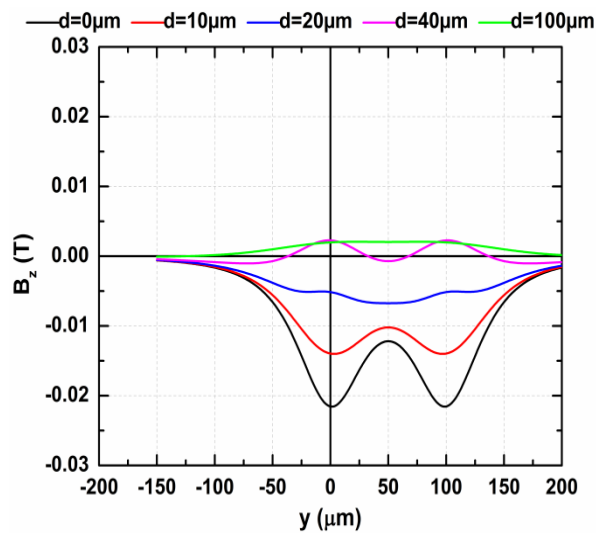
Nhìn chung, trong cấu hình 2×2 nam châm, từ trường và sự biến thiên từ trường trong không gian xung quanh các nam châm và mép các nam châm không có sự thay đổi so với cấu hình 1×1 nam châm. Tại những vị trí trong khoảng trống giữa bốn nam châm, từ trường và sự biến thiên từ trường tăng gấp đôi so với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

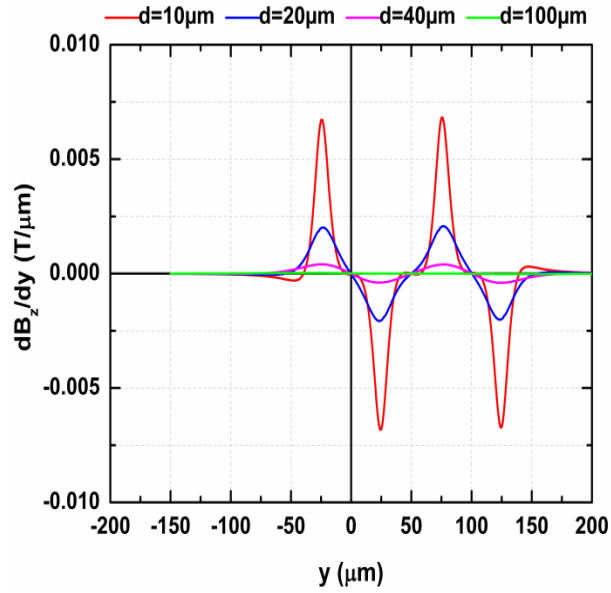


(b)

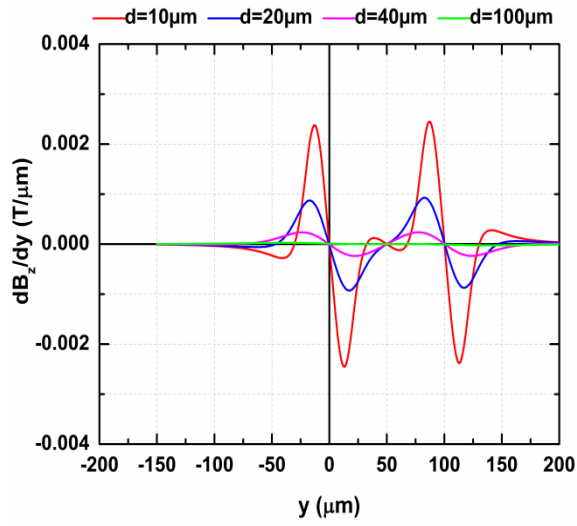


(c)

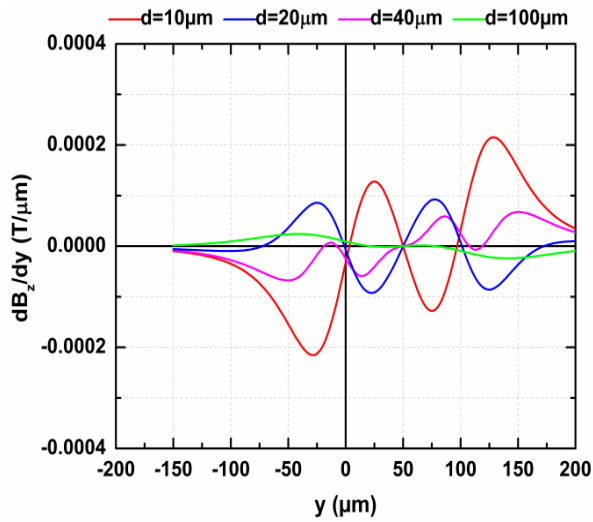
Hình 3.6. Từ trường thành phần B_z mô phỏng được dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)

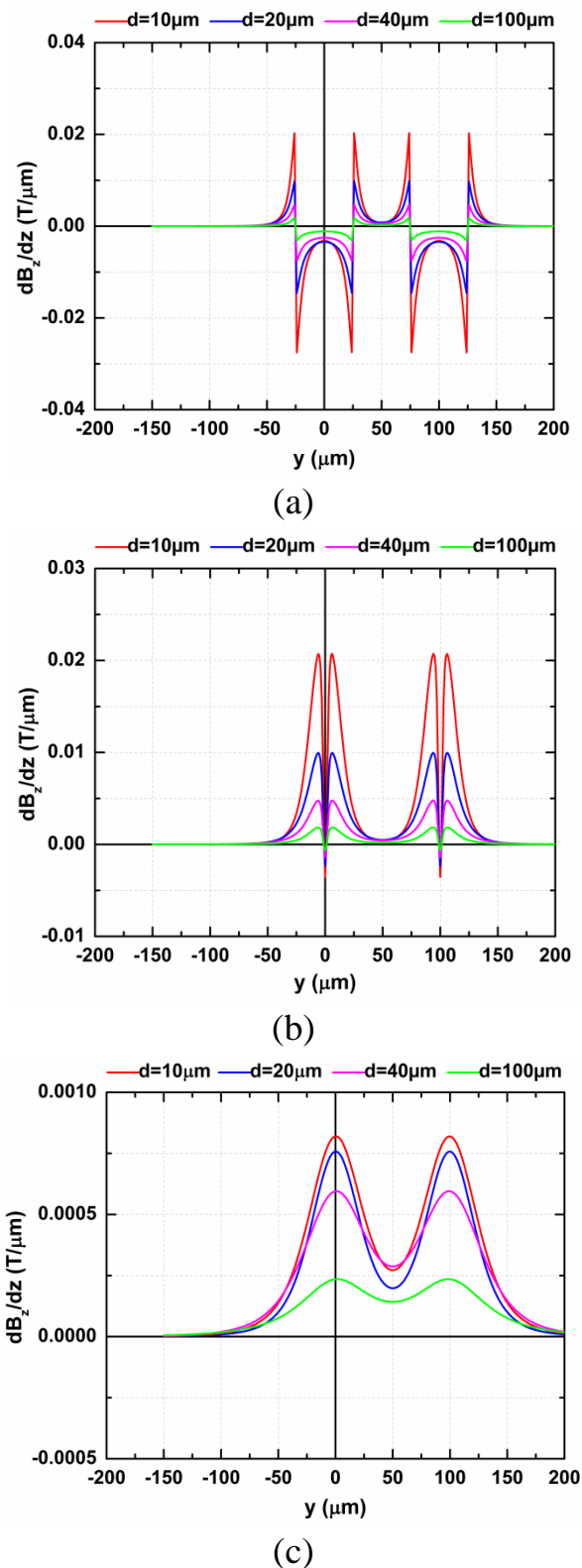


(b)



(c)

Hình 3.7. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) mô phỏng được dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



Hình 3.8. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) mô phỏng được 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

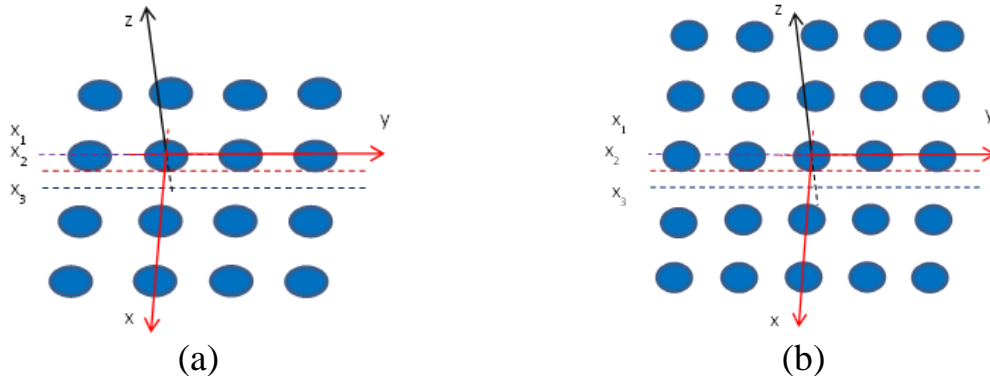
Các kết quả khảo sát thu được được thể hiện bằng các đồ thị trong hình 3.10, 3.11 và 3.12. Về cơ bản các đồ thị thu được không thay đổi gì cả về hình dạng lẫn giá trị so với các đồ thị tương ứng thu được trong cấu hình 2×2 nam châm. Thực vậy, từ các đồ thị chúng ta có thể thấy từ trường B_z , sự biến 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.

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.

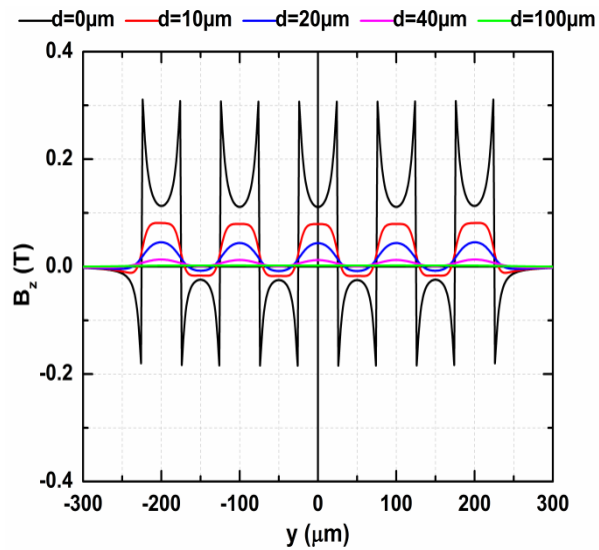


Hình 3.9. Cấu hình 4×4 (a) và 5×5 (b) nam châm và vị trí tính toán từ trường, sự biến thiên từ trường.

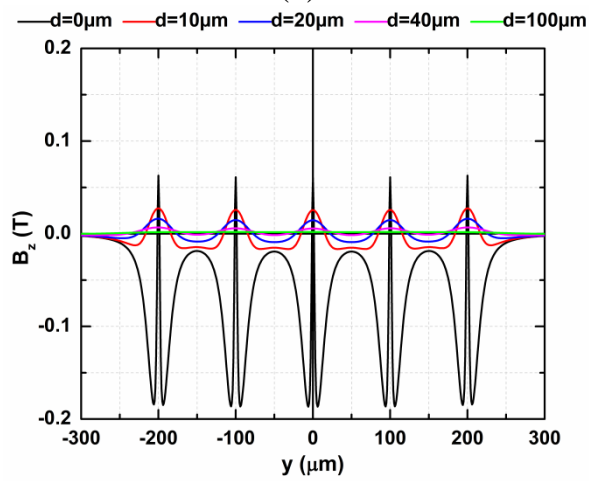
a) Cấu hình 4×4 nam châm

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 ($B_z \text{ max}$), giá trị từ trường cực tiểu ($B_z \text{ min}$) 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 , $B_z \text{ max} \sim 80 \text{ mT}$ tại những vị trí ở trong mép nam châm, cách mép nam châm khoảng $15 \mu\text{m}$, $B_z \text{ min} \sim 20 \text{ mT}$ 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 , $dB_z/dy_{\text{max}} \sim 6.7 \times 10^3 \text{ T/m}$, $dB_z/dy_{\text{min}} \sim -6.8 \times 10^3 \text{ T/m}$ tại những vị trí ngay sát mép nam châm, $dB_z/dz_{\text{max}} \sim 2 \times 10^4 \text{ T/m}$ tại những vị trí ở ngoài mép nam châm, cách mép nam châm $1 \mu\text{m}$, $dB_z/dz_{\text{min}} \sim -2.7 \times 10^4 \text{ T/m}$ tại những vị trí ở trong mép nam châm, cách mép nam châm $1 \mu\text{m}$.

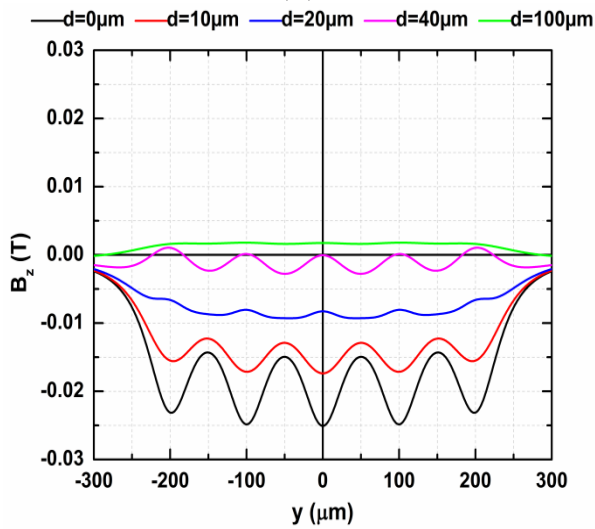
b) Cấu hình 5×5 nam châm



(a)

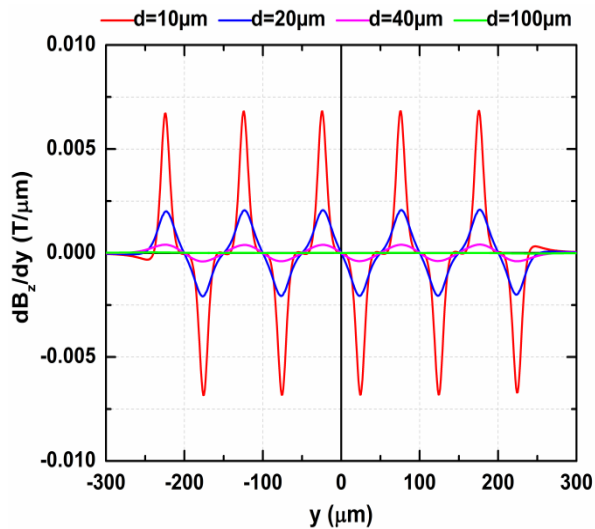


(b)

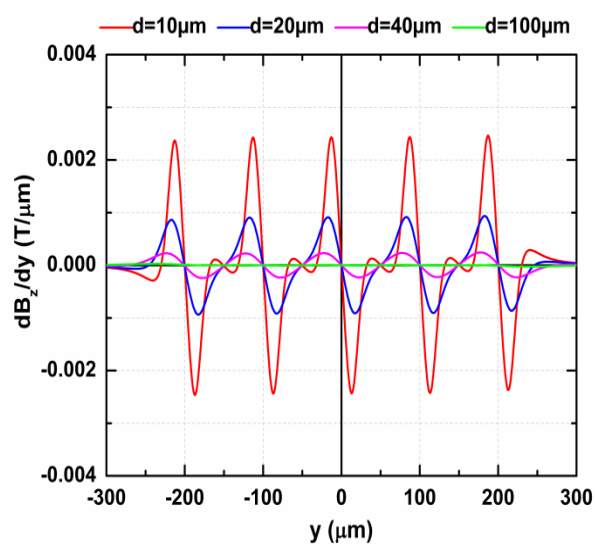


(c)

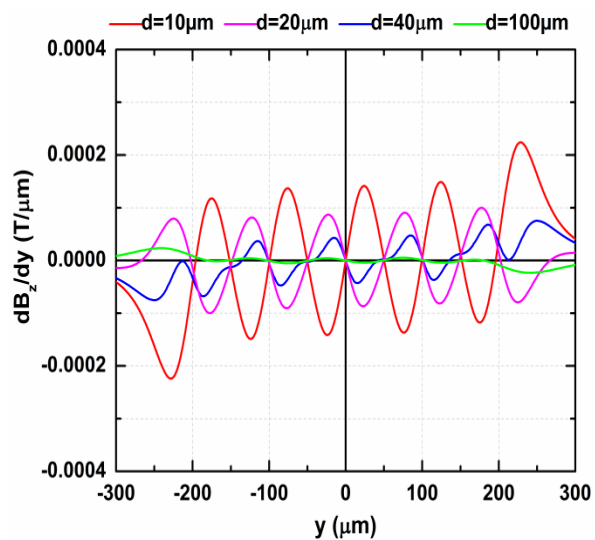
Hình 3.10. Từ trường thành phần B_z mô phỏng được dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)

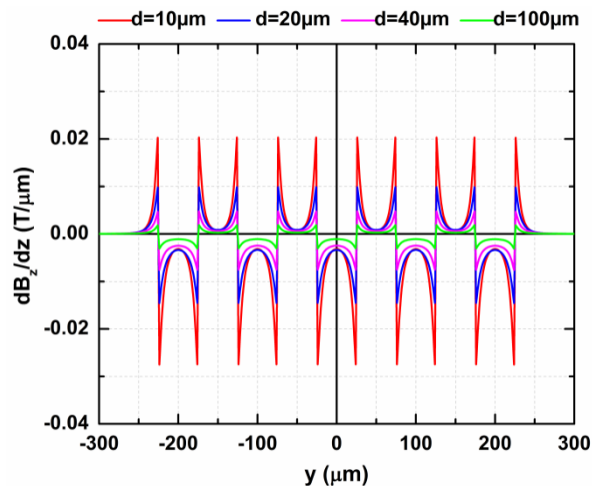


(b)

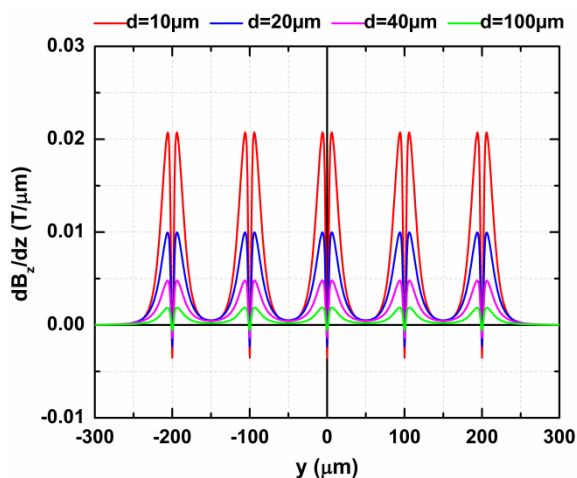


(c)

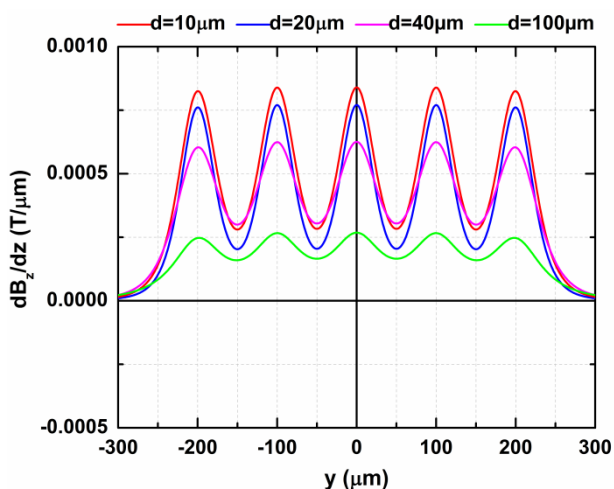
Hình 3.11. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo y (dB_z/dy) mô phỏng được dọc theo các đường quét x_1 (a), x_2 (b) và x_3 (c) tại các độ cao d khác nhau.



(a)



(b)



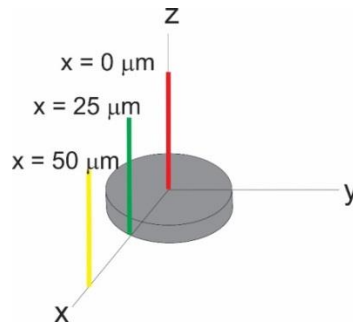
(c)

Hình 3.12. Sự biến thiên của thành phần từ trường B_z theo z (dB_z/dz) mô phỏng được 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 3.13. Cấu hình 1×1 nam châm và các vị trí khảo sát từ trường bằng phần mềm Ansys Maxwell.

Trước tiên, 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 $x = 50 \mu\text{m}$ 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.

$d \text{ (}\mu\text{m)}$	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	117.52	108.27
10	85.43	85.43	85.45	78.97
20	49.15	49.15	49.15	45.04

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 $z = 15 \mu\text{m}$:

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

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

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

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 khác khoảng 9% 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 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 thể 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 2x2 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 2x2 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 mặt 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 mô 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.

Bảng 3.3. 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)	
		Ansys Maxwell	MacMMems
0	0	108.271	115.18
	10	78.97	83.27
	20	45.04	47.30
	40	13.75	14.63
	100	1.38	1.97
25	0	-109.07	64.51
	10	29.08	29.11
	20	17.22	17.84
	40	7.31	8.08
	100	1.41	2.02
50	0	-21.34	-21.54
	10	-13.92	-13.96
	20	-5.27	-5.14
	40	1.57	2.27
	100	1.29	1.97

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.