

NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT TỪ VÀ NHIỆT TỪ TRỊ CỦA HỆ HẠT NANÔ $\text{Co}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$

Phạm Hồng Nam¹, Phạm Thị Hồng Hoa², Vũ Hồng Kỳ¹, Nguyễn Văn Đăng³,
Phạm Thanh Phong⁴, Đỗ Hùng Mạnh^{1,*}

¹Viện Khoa học vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam;

²Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam;

³Trường Đại học Khoa học - ĐH Thái Nguyên;

⁴Viện Tiên tiến Khoa học Vật liệu - Trường Đại học Tôn Đức Thắng;

TÓM TẮT

Tính chất từ của các ferit cấu trúc nano với công thức $\text{A}^{\text{II}}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (A^{II} là các ion hóa trị 2) có thể điều khiển tinh tế cho các ứng dụng riêng. Tuy nhiên, ảnh hưởng của các nguyên tố tại vị trí của A^{II} , kích thước, hình dạng và lớp phủ tới các tính chất từ là khó tiên đoán. Bài báo này tập trung nghiên cứu các tính chất từ và khả năng đốt nóng của 2 mẫu hạt nano: $\text{Co}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($\text{CoFe_Zn}_{0,6}$) được chế tạo bằng phương pháp thủy nhiệt (chưa bọc) và bọc bởi chitosan ($\text{CoFe_Zn}_{0,6}/\text{CS}$). Giảm độ nhiễu xạ tia X và ảnh hiển vi điện tử quét phát xạ trường chỉ ra một cấu trúc spinel cho cả 2 mẫu với kích thước hạt trung bình khoảng 15 nm và độ dày lớp CS khá mỏng. Giá trị độ từ hóa bão hòa (M_s) trung bình tại nhiệt độ phòng của mẫu $\text{CoFe_Zn}_{0,6}/\text{CS}$ là 50 emu/g và khả năng đốt nóng của chất lỏng từ trên mẫu này đã được khảo sát. Công suất hấp thụ riêng (specific absorption rate –SAR) cao nhất khoảng 280 W/g nhận được trên mẫu có nồng độ 1 mg/ml dưới các điều kiện từ trường có cường độ 250 Oe và tần số 290 kHz cho thấy rằng chất lỏng từ này có khả năng ứng dụng cho nhiệt từ trị.

Từ khóa: Nhiệt từ trị; SAR; chất lỏng từ; ferit spinel; $\text{Co}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$;

Ngày nhận bài: 08/10/2019; Ngày hoàn thiện: 31/10/2019; Ngày đăng: 27/11/2019

STUDY OF MAGNETIC PROPERTIES OF $\text{Co}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ NANOPARTICLES FOR ADVANCED MAGNETIC HYPERTHERMIA

Pham Hong Nam¹, Pham Thi Hong Hoa², Vu Hong Ky¹, Nguyen Van Dang³,
Pham Thanh Phong⁴, Do Hung Manh^{1,*}

¹Institute of Materials Science - VAST; ²Graduate University of Science and Technology - VAST;

³University of Science - TNU; ⁴Advanced Institute of Materials Science - Ton Duc Thang University;

ABSTRACT

Magnetic properties of ferrites nanostructural with $\text{A}^{\text{II}}\text{Fe}_2\text{O}_4$ formula (A^{II} is 2^+ ion) can control the subtle for different applications. However, the effect of elements at the position of A^{II} , size, shape and shell on magnetic properties is difficult to predict. This paper focuses on the magnetic properties and heating ability of $\text{Co}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles ($\text{CoFe_Zn}_{0,6}$) were fabricated by hydrothermal method and coated with chitosan ($\text{CoFe_Zn}_{0,6}/\text{CS}$). X-ray diffraction patterns (XRD) and field emission scanning electron microscopy (FESEM) show a spinel structure for both the samples with an average particle size of about 15 nm and a fairly thin CS layer thickness. The saturation magnetization (M_s) at room temperature of $\text{CoFe_Zn}_{0,6}/\text{CS}$ is 50 emu/g and heating ability of magnetic fluid on this sample was investigated. The highest specific absorption rate value of about 280 W/g received on samples with a concentration of 1 mg/ml under magnetic of 250 Oe and frequency 290 kHz. This result shows that the magnetic fluid has an potential application for magnetic hyperthermia.

Keywords: Magnetic hyperthermia; SAR; magnetic fluid; ferrite spinel; $\text{Co}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$;

Received: 08/10/2019; Revised: 31/10/2019; Published: 27/11/2019

* Corresponding author. Email: manhdh.ims@gmail.com

1. Giới thiệu

Tiêu diệt tế bào ung thư bằng phương pháp tăng thân nhiệt đã được chú ý nghiên cứu trong những năm gần đây. Các nguồn năng lượng thường được sử dụng: sóng vô tuyến, sóng vi ba và laser. Phương pháp nhiệt trị giảm tác dụng phụ của các phương pháp điều trị ung thư khác như hóa trị, xạ trị và được xem là phương pháp hứa hẹn cho điều trị ung thư [1-3]. Tuy nhiên, các phương pháp nhiệt trị còn tồn tại một số nhược điểm như độ chọn lọc kém, có thể ảnh hưởng đến các tế bào mạnh khỏe xung quanh, phân bố năng lượng thấp dẫn đến khó đạt được nhiệt độ để tiêu diệt khối u ... [4]. Nhiệt trị là phương pháp điều trị ung thư bằng nhiệt khi đặt các hạt nano từ trong từ trường xoay chiều. Do tính chất sinh nhiệt cục bộ, các tế bào ung thư có thể bị tiêu diệt (khi nhiệt độ đạt tới 46°C và được giữ trong 30 phút) nhưng tế bào mạnh khỏe ít bị ảnh hưởng. Do đó nhiệt trị có thể dùng kết hợp với hóa trị và xạ trị để nâng cao tác dụng điều trị ung thư [5]. Khả năng sinh nhiệt của các hạt nano từ được đặc trưng bởi thông số tốc độ hấp thụ riêng (SAR), là thông số phụ thuộc vào tính chất từ của vật liệu và các điều kiện từ trường (cường độ H và tần số f). Do các tham số từ trường bị hạn chế bởi ngưỡng an toàn cho các thực thể sống ($H \times f \leq 4,85 \times 10^8$ A/m.s) [6]. Vì vậy, các nghiên cứu tập trung tìm kiếm vật liệu/cấu trúc có SAR cao [7, 8]. Bên cạnh đó, tìm kiếm vật liệu có khả năng khống chế nhiệt độ đốt bão hòa (không vượt quá 46°C) bằng cách điều chỉnh nhiệt độ chuyển pha sắt từ-thuận từ T_C cũng được quan tâm [9-12]. Các ferit spinel cấu trúc nano với dạng công thức $A^{II}Fe_2O_4$ (A^{II} là các ion hóa trị 2) là các vật liệu quan trọng cho ứng dụng nhiệt trị. Trong số đó, các hạt nano của ôxít sắt như Fe_3O_4 và γ - Fe_2O_3 được nghiên cứu nhiều nhất do tính chất từ thích hợp, tương thích sinh học và dễ chế tạo. Tuy nhiên, nhiệt độ Curie (T_C) cao và SAR còn tương đối thấp đã hạn chế ứng dụng của chúng.

Ferit Co ($CoFe_2O_4$) pha tạp Zn là một lựa chọn được quan tâm cho ứng dụng nhiệt trị bởi kỳ vọng nâng cao SAR do tính dị hướng cao của ferit Co và khả năng giảm T_C khi tăng tỉ lệ thay thế Co bằng Zn. Tuy đã có một số công bố về mối liên hệ giữa cấu trúc-tính chất từ-SAR của loại vật liệu này [11-14]. Tuy nhiên, mối liên hệ trên phụ thuộc rất lớn vào phương pháp chế tạo. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của các nguyên tố thay thế tại vị trí của A^{II} , kích thước, hình dạng và lớp bọc/phủ tới các tính chất từ là khó tiên đoán.

Trong bài báo này, chúng tôi báo cáo một số kết quả nghiên cứu ban đầu về khả năng sinh nhiệt của các hạt nano $Co_{0,4}Zn_{0,6}Fe_2O_4$ được chế tạo bằng phương pháp thủy nhiệt ($CoFe_{Zn0,6}$) và sau đó được bọc chitosan (CS) ($CoFe_{Zn0,6}/CS$) để tạo chất lỏng từ. Cấu trúc, hình thái và tính chất từ của 2 mẫu nêu trên đã được khảo sát. Khả năng sinh nhiệt của chất lỏng từ chứa các hạt $CoFe_{Zn0,6}/CS$ cũng được nghiên cứu và thảo luận chi tiết. Nghiên cứu chi tiết về ảnh hưởng của sự thay thế Zn cho Co tới tính chất từ và SAR sẽ được chúng tôi báo cáo trong công bố khác.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Tổng hợp hệ hạt nano $CoFe_{Zn0,6}$ và $CoFe_{Zn0,6}/CS$.

Các hệ hạt nano $CoFe_{Zn0,6}$ được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt. Các hóa chất ban đầu được sử dụng gồm: $FeCl_3.6H_2O$, $CoCl_3.6H_2O$, $ZnCl_2$ và dung dịch NaOH. Các muối được pha vào nước cất với tỷ lệ (Co^{2+} , Zn^{2+}) : $Fe^{3+} = 1:2$. Tiếp theo, 6 ml dung dịch các muối được nhỏ từ từ vào 60 ml dung dịch NaOH 1M, trong quá trình nhỏ giọt có sử dụng máy khuấy với tốc độ 650 vòng/phút. Hỗn hợp trên được cho vào bình kín làm bằng thép không gỉ và tăng nhiệt với tốc độ 5°C/phút tới nhiệt độ 180°C và giữ ổn định trong 2 giờ. Sau đó, bình được để nguội tự nhiên đến nhiệt độ phòng. Sản phẩm lấy ra được rửa bằng nước cất và axeton sau đó đem sấy khô. Một phần hệ hạt nano $CoFe_{Zn0,6}$

được sử dụng để bọc CS cho các nghiên cứu đốt từ. Quy trình được tóm tắt như sau: Lấy 50 mg hệ hạt nano $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}$ cho vào dung dịch chứa 50 mg CS. Sử dụng máy rung siêu âm trong 15 phút để CS bao bọc hạt từ. Sau đó, dùng nam châm thu hạt từ và loại bỏ CS. Cuối cùng phân tán lại hạt từ trong môi trường nước với nồng độ khác nhau phù hợp với mục đích nghiên cứu.

2.2. Các phương pháp đặc trưng

Các đặc trưng cấu trúc của hệ hạt được khảo sát bằng cách sử dụng thiết bị nhiễu xạ tia X (XRD) D5000 của hãng SIEMENS, với bức xạ Cu - K α với bước sóng $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$. Kích thước hạt được đánh giá bằng kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường Hitachi S-4800. Các tính chất từ được khảo sát bằng từ kế mẫu rung (VSM). Phân bố kích thước hạt và độ bền của chất lỏng từ được xác định bằng phương pháp tán xạ laser động trên thiết bị Zetasizer – Nano ZS.

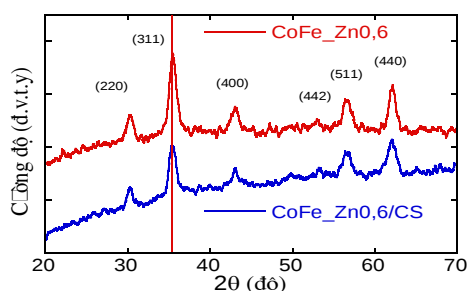
Các phép đo đốt nóng cảm ứng từ được thực hiện trên thiết bị thương mại UHF-20A. Các mẫu chất lỏng từ được hòa tan trong dung dịch nước và được cách nhiệt với môi trường ngoài bởi một vỏ bình thủy tinh được hút chân không đến 10^{-3} - 10^{-4} Torr. Nhiệt độ được đo bằng nhiệt kế quang (GaAs sensor, Opsens) với độ chính xác $0,3^\circ\text{C}$ trong dải $0 - 250^\circ\text{C}$. Giá trị SAR được tính theo công thức [10]:

$$SAR = C \frac{m_s}{m_n} \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Trong đó C là nhiệt dung riêng, m_s là khối lượng của toàn bộ chất lỏng từ, m_n là khối lượng của hệ hạt nano từ, dT/dt là tốc độ tăng nhiệt ban đầu.

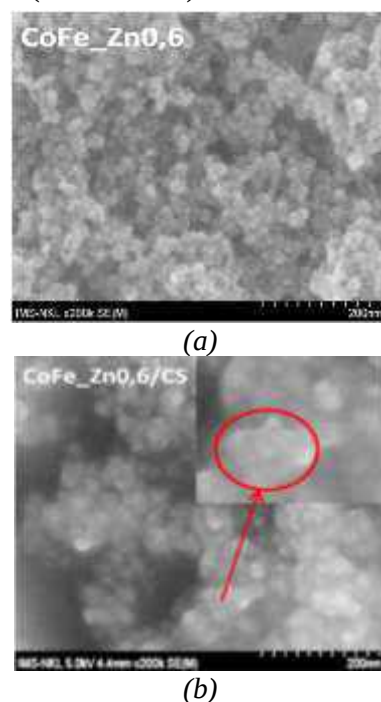
3. Kết quả và thảo luận

Hình 1 trình bày giản đồ XRD của các mẫu $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}$ và $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}/\text{CS}$. Từ giản đồ XRD cho thấy cả 2 mẫu $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}$ và $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}/\text{CS}$ đều có các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng (220), (311), (400), (442), (511) và (440) tương ứng với pha tinh thể spinel cấu trúc lập phương của CoFe_2O_4 theo số thẻ PDF số (221086), phù hợp với công bố cho các mẫu cùng loại [11].



Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của các mẫu $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}$ và $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}/\text{CS}$.

Các ảnh FESEM (Hình 2) tiêu biểu của 2 mẫu $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}$ và $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}/\text{CS}$ cho thấy rằng các mẫu này có kích thước trung bình khoảng 15 nm. Từ sự tương đồng về kích thước của 2 mẫu, chúng tôi giả thiết rằng chiều dày lớp bọc là tương đối mỏng. Mặc dù khả năng bọc hạt có thể quan sát qua ảnh FESEM (xem hình 2b).

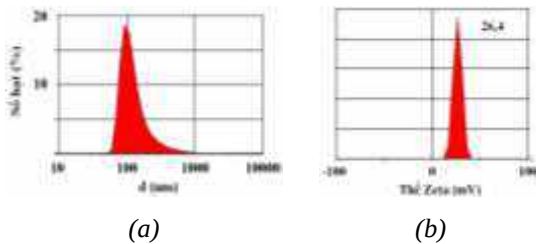


Hình 2. Ảnh FESEM của mẫu $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}$ (a) và $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}/\text{CS}$ (b).

Tuy nhiên, khả năng bọc hạt hay sự tồn tại của cấu trúc vỏ/lõi chưa được kiểm chứng trong bài báo này, điều này chỉ thực hiện được với ảnh hiển vi điện tử truyền qua (TEM) phân giải cao.

Hình 3a là giản đồ phân bố kích thước thủy động của mẫu bọc chitosan phân tán trong

môi trường nước. Kích thước thủy động thu được trung bình là 142 nm với độ rộng phân bố (PDI = 0,317). Để đánh giá độ bền của chất lỏng từ, mẫu chất lỏng được xác định thế Zeta. Hình 3b cho biết thế Zeta của chất lỏng từ là 26,4 eV. Người ta biết rằng khi mẫu chất lỏng có thế Zeta $\geq \pm 30$ eV thì sẽ có độ ổn định tốt. Như vậy, kết quả này phản ánh mẫu CoFe₂Zn_{0,6}/CS sẽ có độ ổn định tương đối tốt [10].



Hình 3. Giản đồ phân bố kích thước thủy động của mẫu CoFe₂Zn_{0,6}/CS phân tán trong nước (a) và thế zeta (b)

Tính chất từ của 2 mẫu CoFe₂Zn_{0,6} và CoFe₂Zn_{0,6}/CS được đo tại nhiệt độ phòng trong dải từ trường từ -11kOe – 11kOe.

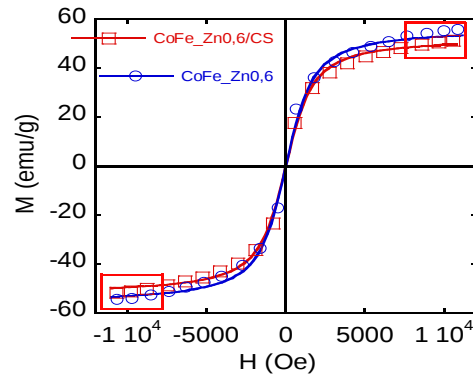
Các đường cong từ độ phụ thuộc vào từ trường $M(H)$ của các mẫu CoFe₂Zn_{0,6} và CoFe₂Zn_{0,6}/CS được thể hiện trên Hình 4. Giá trị độ từ hóa cao nhất tại 12 kOe (được xem như từ độ bão hòa, M_s) được đánh giá là 56 emu/g và 50 emu/g tương ứng cho 2 mẫu. Sự lệch rất nhỏ về M_s cũng chứng tỏ rằng lớp vỏ bọc là mỏng như giả thiết nêu trên. Giá trị M_s của mẫu CoFe₂Zn_{0,6} trong báo cáo này lớn hơn giá trị $M_s = 30$ emu/g của mẫu cùng thành phần chế tạo bằng phương pháp đồng kết tủa [13] nhưng nhỏ hơn giá trị 90 emu/g của mẫu được chế tạo bằng phương pháp phân hủy nhiệt [11]. Điều này chứng tỏ phương pháp chế tạo hạt nano từ có ảnh hưởng rất lớn tới tính chất từ của chúng.

Để hiểu rõ hơn trạng thái từ của các hệ hạt nano CoFe₂Zn_{0,6} và CoFe₂Zn_{0,6}/CS các đường $M(H)$ thực nghiệm được làm khớp với hàm Langevin theo biểu thức sau [10]:

$$M = n\mu L\left(\frac{\mu H}{kT}\right) = n\mu \left[\coth\left(\frac{\mu H}{kT}\right) - \frac{kT}{\mu H} \right] \quad (2)$$

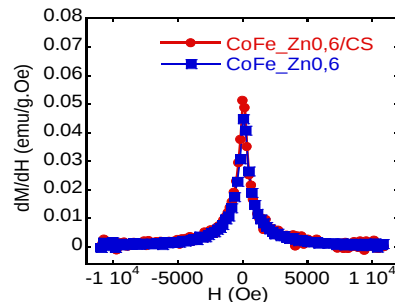
Trong đó $x = \mu H/kT$, H là từ trường, L là hàm Langevin, n là số hạt nano trên một đơn vị thể

tích, μ là mômen từ. Kết quả chỉ ra trên Hình 4 cho thấy đường làm khớp phù hợp với thực nghiệm trong dải từ trường từ -8 kOe đến 8 kOe. Từ đó có thể giả thiết sự tồn tại của tương tác giữa các hạt trong hai hệ CoFe₂Zn_{0,6} và CoFe₂Zn_{0,6}/CS. Thêm vào đó, sự lệch khỏi hàm Langevin của mẫu CoFe₂Zn_{0,6}/CS là rõ ràng hơn so với mẫu CoFe₂Zn_{0,6} liên quan đến cường độ tương tác mạnh hơn [15].



Hình 4. Đường từ độ phụ thuộc vào từ trường của các mẫu CoFe₂Zn_{0,6} và CoFe₂Zn_{0,6}/CS. Đường nét liền được làm khớp hàm Langevin theo công thức (2)

Ảnh hưởng của lớp bọc đến tương tác giữa các hạt cũng có thể được xem xét từ các đường độ cảm từ phụ thuộc nhiệt độ như chỉ ra trên Hình 5. Từ hình này có thể nhận thấy giá trị độ cảm từ của mẫu bọc cao hơn mẫu không bọc trong khoảng từ trường thấp. Điều đó có nghĩa rằng hệ hạt nano được bọc chitosan có tương tác lưỡng cực cao hơn mẫu không được bọc [16]. Tính chất đáp ứng từ tốt trong từ trường thấp của các mẫu đã bọc sẽ rất có ý nghĩa bởi khả năng sinh nhiệt của các hạt nano từ chỉ được thực hiện trong từ trường có cường độ thấp.



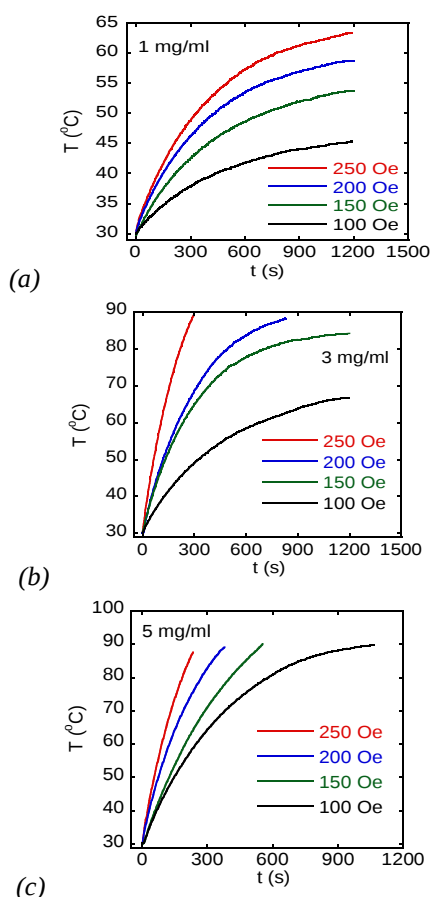
Hình 5. Độ cảm từ ($\chi = dM/dH$) phụ thuộc vào cường độ từ trường.

Các chất lỏng từ chỉ độ ổn định khi được bọc bởi khi đó lớp bọc làm giảm khả năng tích tụ các hạt thành các hơn lớn và qua đó sẽ giảm tính sa lắng do trọng lực. Vì vậy, khả năng đốt nóng chỉ được nghiên cứu cho hệ chất lỏng $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}/\text{CS}$.

Hình 6 là đường đốt từ của mẫu với các nồng độ 1 mg/ml, 3 mg/ml và 5 mg/ml đo ở các từ trường có cường độ khác nhau 100-250 Oe nhưng cùng tần số 290 kHz. Ta nhận thấy, tốc độ tăng nhiệt tăng khi tăng từ trường ngoài.

Bảng 1. Giá trị SAR (W/g) của chất lỏng từ chứa hạt nano $\text{CoFe}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}/\text{CS}$ với cường độ từ trường khác nhau, cùng tần số 290 kHz

Cường độ từ trường (Oe)	Nồng độ (mg/ml)		
	1	3	5
100	117,02	100,14	96,84
150	200,64	183,92	129,58
200	246,62	206,21	168,03
250	280,1	265,86	214,85



Hình 6. Đường đốt từ của mẫu $\text{CoZn}_{0.6}/\text{CS}$ ở các từ trường khác nhau, tần số 290 kHz, nồng độ 1mg/ml (a), 3 mg/ml (b) và 5 mg/ml (c)

Đồng thời, nhiệt độ gần như tăng tuyến tính ở giai đoạn đầu (200s). Từ đường thực nghiệm ở Hình 6, các giá trị SAR được tính toán dựa trên công thức (1) và được đưa ra ở Bảng 1.

Từ Bảng này có thể thấy rằng, SAR đạt giá trị lớn nhất 280,06 W/g ở nồng độ 1 mg/ml ứng với cường độ từ trường 250 Oe, tần số 290 kHz. Khi tăng nồng độ từ 1 – 5 mg ở tất cả các cường độ từ trường thì SAR đều giảm. Kết quả này được giải thích là do sự kết đám tăng khi tăng nồng độ. Hệ quả là tương tác lưỡng cực sẽ tăng lên và do đó giảm SAR. Kết quả này là phù hợp với một số công bố trước đây [14,17,18], trong đó tương tác lưỡng cực tăng đều làm suy giảm SAR.

4. Kết luận

Các hạt nano $\text{Co}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ đã được chế tạo thành công bằng phương pháp thủy nhiệt và bọc bằng chitosan. Các số liệu cấu trúc, kích thước hạt và từ độ bão hòa của hai mẫu không bọc và được bọc đã chứng tỏ bề dày của lớp vỏ bọc khá mỏng. Khả năng sinh nhiệt của chất lỏng từ giảm khi tương tác lưỡng cực tăng được kiểm chứng từ sự suy giảm của SAR khi nồng độ hạt từ tăng từ 1 mg/ml tới 5 mg/ml trong cùng điều kiện cường độ và tần số của từ trường xoay chiều. Chất lỏng từ chứa các hạt ferrit Co pha tạp Zn và được bọc bởi chitosan thể hiện giá trị SAR cao cho thấy tiềm năng ứng dụng của chúng trong nhiệt từ trị.

Lời cảm ơn

Công trình này được thực hiện với sự hỗ trợ về kinh phí đề tài thuộc chương trình vật lý mã số: KHCBVL.03/18-19 do Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam tài trợ (VAST) thực hiện trong giai đoạn (2018-2019).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. T. J. Vogl, P. Farshid, N. N. Naguib and S. Zangos, "Thermal ablation therapies in patients with breast cancer liver metastases: a review", *Eur. Radiol*, Vol. 23, pp. 797–804, 2013.
- [2]. Y. He, H. Ge and S. Li, "Haematoporphyrin based photodynamic therapy combined with hyperthermia provided effective therapeutic vaccine effect against colon cancer growth in mice", *Int. J. Med. Sci*, Vol. 9, pp. 627–633, 2012.

- [3]. C. Hong, J. Kang, H. Kim and C. Lee, "Photothermal properties of inorganic nanomaterials as therapeutic agents for cancer thermotherapy", *J. Nanosci. Nanotechnol*, Vol. 12, pp. 4352–4355, 2012.
- [4]. A. Jordan, P. Wust, R. Scholz, B. Tesche, H. Fahling, T. Mitrovics, T. Vogl, J. Cervos-Navarro and R. Felix, "Cellular uptake of magnetic fluid particles and their effects on human adeno carcinoma cells exposed to AC magnetic fields in vitro", *Int. J. Hyperth*, Vol. 12, pp. 705–722, 1996.
- [5]. S. Beatriz, C. M. Pilar, E. T. Teobaldo, L. F. Monica, I. Ricardo, F. G. Gerardo, "Magnetic hyperthermia enhances cell toxicity with respect to exogenous heating", *Bioma*, Vol. 114, pp. 62–70, 2017.
- [6]. Q. A. Pankhurst, J. Connolly, S. K. Jones, and J. Dobson, "Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine", *J. Phys. D. Appl. Phys*, Vol. 36, pp. R167–R181, 2003.
- [7]. Jae-Hyun Lee, Jung-tak Jang, Jin-sil Choi, Seung Ho Moon Seung-hyun Noh, Ji-wook Kim, Jin-Gyu Kim, Il-Sun Kim, Kook In Park and Jinwoo Cheon, "Exchange-coupled magnetic nanoparticles for efficient heat induction", *Nat. Nanotech*, Vol. 6, pp. 418–422, 2011.
- [8]. N. A. Usov, "Low frequency hysteresis loops of superparamagnetic nanoparticles with uniaxial anisotropy", *J. Appl. Phys*, Vol. 107, pp. 123909 (6 pages), 2010.
- [9]. E. Pollert, K. Knizek, M. Marysko, P. Kaspar, S. Vasseur, E. Duguet, "New T_c -tuned magnetic nanoparticles for self-controlled hyperthermia", *J. Magn. Magn. Mater*, Vol. 316, pp. 122–125, 2007.
- [10]. D. H. Manh, P. T. Phong, P. H. Nam, D. K. Tung, N. X. Phuc, In-Ja Lee, "Structural and magnetic study of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ nanoparticles and AC magnetic heating characteristics for hyperthermia applications", *Phys B*, Vol. 444, pp. 94–102, 2014.
- [11]. V. Mameli, A. Musinu, A. Ardu, G. Ennas, D. Peddis, D. Niznansky, C. Sangregorio, C. Innocenti, Nguyen T. K. Thanh, C. Cannas, "Studying the effect of Zn-substitution on the magnetic and hyperthermic properties of cobalt ferrite nanoparticles", *Nanoscale*, Vol. 8, pp. 10124–10137, 2016.
- [12]. R. A. Bohara, H. M. Yadav, N. D. Thorat, S. S. Mali, C. K. Hong, S. G. Nanaware, S. H. Pawar, "Synthesis of functionalized $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles for biomedical applications", *J. Magn. Magn. Mater*, Vol. 378, pp. 397–401, 2015.
- [13]. S. N. Dolia, S. P Arun, M. S. Dahwan, M. N. Sharma, "Mossbauer study of nanoparticles of $\text{Co}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ", *Indian J. Peru Appl. Phys*, Vol. 45, pp. 286–289, 2007.
- [14]. P. T. Phong, P. H. Nam, D. H. Manh, Lee In-Ja, " $\text{Mn}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles with high intrinsic loss power for hyperthermia therapy", *J. Magn. Magn. Mater*, Vol. 443, pp. 76–83, 2017.
- [15]. D. H Manh, P. T. Phong, T. D. Thanh, D. N. H. Nam, L. V. Hong, N. X. Phuc, "Size effect and interaction in $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ nanoparticles", *J. Alloy. Comp*, Vol. 509, pp. 1373–1377, 2011.
- [16]. P. S. Araújo-Neto, E. L. Silva-Freitas, J. F. Carvalho, T. R. F. Pontes, K. L. Silva, I. H. M. Damasceno, E. S. T. Egito, L. Ana. Dantas, A. Marco. Morales, S. Artur. Carriço, "Monodisperse sodium oleate coated magnetite high susceptibility nanoparticles for hyperthermia applications", *J. Magn. Magn. Mater*, Vol. 364, pp. 72–79, 2014.
- [17]. A. Urtizberea, E. Natividad, A. Arizaga, M Castro, A Mediano, "Specific absorption rates and magnetic properties of ferrofluids with interaction effects at low concentrations", *J. Phys. Chem C*, Vol. 114, pp. 4916–4922, 2010.
- [18]. M. E. Sadat, R. Patel, J. Sookoor, S. L. Bud'ko, R. C. Ewing, J. Zhang, H. Xu, Y. Wang, G. M. Pauletti, D. B. Mast, D. Shi, "Effect of Spatial Confinement on Magnetic Hyperthermia via Dipolar Interactions in Fe_3O_4 Nanoparticles for Biomedical Applications", *Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol Appl*, Vol. 42, pp. 52–63, 2014.