

ÁP DỤNG KỸ THUẬT GAMMA TÁN XẠ NGƯỢC ĐỂ XÁC ĐỊNH ĐỘ DÀY CỦA THÀNH BÌNH BẰNG PHƯƠNG PHÁP MONTE CARLO

NGUYỄN THỊ MỸ LỆ^{*}, HOÀNG ĐỨC TÂM^{**},
HUỖNH ĐÌNH CHƯƠNG^{***}, TRẦN THIÊN THANH^{****}, CHÂU VĂN TẠO^{*****}

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, phổ tán xạ của chùm photon phát ra từ nguồn ^{137}Cs tán xạ trên thành bình thép chịu nhiệt C45 được mô phỏng bằng phương pháp Monte Carlo sử dụng chương trình MCNP5. Kết quả cho thấy, trong phổ tán xạ thu được ngoài đỉnh tán xạ đơn còn có sự xuất hiện đỉnh tán xạ đôi như tính toán lí thuyết của Fernández. Sử dụng kĩ thuật gamma tán xạ ngược, độ dày của thành bình có dạng trụ rỗng bên trong chứa không khí được xác định với độ lệch tương đối giữa độ dày tính toán và thực tế là dưới 6,6 %. Kết quả của nghiên cứu này làm cơ sở cho việc bố trí thực nghiệm.

Từ khóa: tán xạ Compton, độ dày của thành bình, phương pháp Monte Carlo, NaI(Tl).

ABSTRACT

The use of gamma backscattering technique for determining the thickness of pipe wall by Monte Carlo method

In this paper, the scattering process of 662keV photon gamma was simulated by Monte Carlo method using the MCNP5 code. The obtained results showed the existence of double scattering peak as presented in Fernández's theoretical research. Based on these simulated spectra, the thickness of C45 heat-resistant steel pipe wall was determined by gamma backscattering technique. The results showed that the determination of thickness of pipe wall is feasible with maximum relative deviation of 6.6%. This work is also the basis of experimental set-up for determining the thickness of pipe wall.

Keywords: Compton scattering, thickness of pipe wall, Monte Carlo method, NaI(Tl).

1. Giới thiệu

Hiện nay, kĩ thuật gamma tán xạ ngược được ứng dụng nhiều trong lĩnh vực công nghiệp như xác định độ dày của vật liệu [2], tìm khuyết tật đường ống [7], xác định độ ăn mòn của vật liệu [5]... Ưu điểm của kĩ thuật này là có thể thực hiện được phép đo ngay cả trong trường hợp đối tượng cần đo chỉ có thể tiếp cận từ một phía. Bên cạnh đó, khi khảo sát độ ăn mòn của thép mềm (mild steel) bằng các kĩ thuật chụp ảnh

^{*} SV, Trường Đại học Sư phạm TPHCM; Email: nguyennmyle6868@gmail.com

^{**} ThS, Trường Đại học Sư phạm TPHCM

^{***} ThS, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG TPHCM

^{****} TS, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG TPHCM

^{*****} PGS TS, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG TPHCM

gamma, chụp ảnh tia X và gamma tán xạ, nghiên cứu của Priyada và cộng sự [5] đã cho thấy rằng độ chính xác của các kỹ thuật này là tương đương nhau càng làm cho tính phổ biến của kỹ thuật này ngày càng rộng rãi.

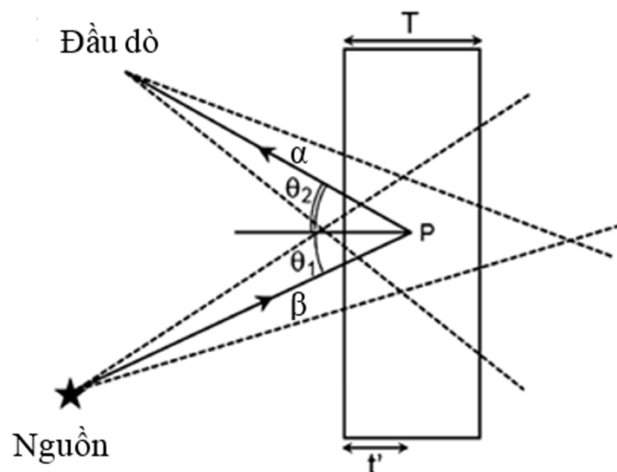
Trong công trình [2], Hoang Duc Tam và cộng sự đã sử dụng kỹ thuật gamma tán xạ ngược để xác định độ dày của bia vật liệu thép C45 bằng đầu dò NaI(Tl). Kết quả nghiên cứu trong [2] đã chỉ ra rằng, có thể sử dụng đầu dò NaI(Tl) để xác định độ dày các tấm vật liệu dạng phẳng với độ lệch tương đối của độ dày đo được với độ dày thực tế là dưới 4%.

Có thể thấy rằng trong nghiên cứu [2], loại bia được sử dụng là các tấm phẳng, do vậy để làm cơ sở cho các phép đo thực nghiệm độ dày của thành bình (hoặc độ dày của thành ống) sử dụng đầu dò NaI(Tl) bằng kỹ thuật gamma tán xạ, trong nghiên cứu này, chúng tôi mô phỏng quá trình tán xạ trên thành bình làm bằng vật liệu thép chịu nhiệt C45 của chùm photon phát ra từ nguồn ^{137}Cs . Cường độ chùm photon tán xạ thu được được sử dụng để xác định độ dày của thành bình. Kết quả của nghiên cứu này là cơ sở để chúng tôi tiến hành bố trí các phép đo trong thực nghiệm.

2. Cơ sở lý thuyết

Quá trình tán xạ của photon lên vật liệu được biểu diễn như trên hình 1 [5]. Năng lượng của photon sau tán xạ E phụ thuộc vào góc tán xạ θ và năng lượng ban đầu E_0 được xác định như sau:

$$E = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (1)$$



trong đó, $m_0c^2 = 511 \text{ keV}$ là năng lượng nghỉ của electron.

Hình 1. Quá trình tán xạ của photon lên vật liệu [5]

Dựa vào cường độ của chùm photon tán xạ trên vật liệu có thể xác định được độ dày của vật liệu [2] theo công thức sau:

$$T' = \frac{1}{a} \ln \left(1 / \left(1 - \frac{N'}{N} (1 - \exp(-aT)) \right) \right) \quad (2)$$

trong đó, N và N' lần lượt là diện tích của đỉnh tán xạ đơn tương ứng với các vật liệu có độ dày T và T' , a được xác định theo công thức:

$$a = \left(\frac{\mu(E_0)}{\rho} \frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{\mu(E)}{\rho} \frac{1}{\cos \theta_2} \right) \rho \quad (3)$$

với ρ là khối lượng riêng của bia (g cm^{-3}), $\frac{\mu(E_0)}{\rho}$ và $\frac{\mu(E)}{\rho}$ ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) là hệ số suy giảm khối tương ứng với năng lượng E_0 và E .

Sai số của độ dày, $s_{T'}$, được xác định theo công thức:

$$s_{T'} = \frac{1 - \exp(-aT)}{aN \left(1 - \frac{N'}{N} (1 - \exp(-aT)) \right)} \sqrt{s_{N'}^2 + \frac{N'^2}{N^2} s_N^2} \quad (4)$$

với $s_N = \sqrt{N}$ và $s_{N'} = \sqrt{N'}$.

Cường độ bão hòa của vật liệu [2] được xác định bởi công thức sau:

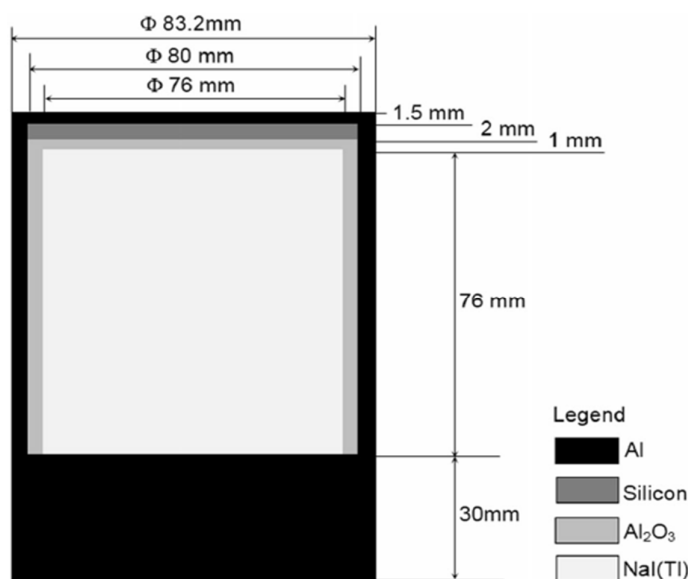
$$I(P) = I_s (1 - \exp(-\mu_{\text{eff}} \rho T)) \quad (5)$$

trong đó, I_s là cường độ bão hòa của chùm photon tán xạ một lần và μ_{eff} là hệ số suy giảm khối hiệu dụng được xác định bởi:

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\mu(E_0)}{\rho} \sec \theta_1 + \frac{\mu(E)}{\rho} \sec \theta_2 \quad (6)$$

Dựa trên công thức (5), chúng tôi sẽ xác định được độ dày bão hòa của vật liệu, từ đó đánh giá được khả năng xác định độ dày của kĩ thuật gamma tán xạ ngược với mô hình thí nghiệm đã được bố trí.

3. Phương pháp Monte Carlo

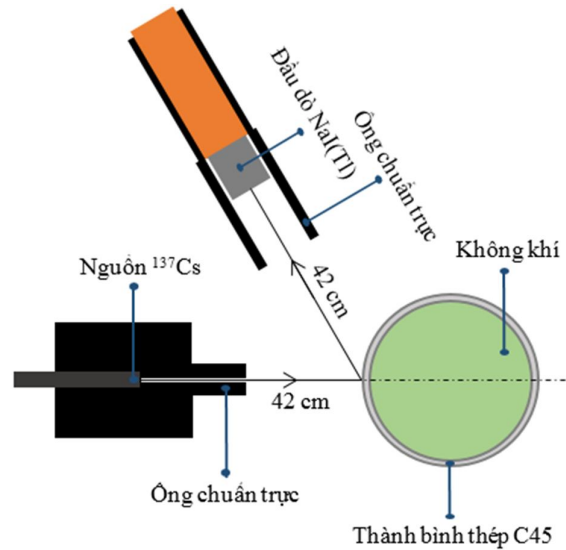


Hình 2. Các thông số kỹ thuật của đầu dò NaI(Tl) dùng trong mô phỏng [2]

Toàn bộ quá trình tán xạ của photon trên thành bình làm bằng vật liệu thép chịu nhiệt C45 được mô phỏng bằng chương trình MCNP5. Thông số đầu vào của chương trình MCNP5 yêu cầu gồm có: thông số kỹ thuật của khối nguồn, của bia vật liệu và của đầu dò. Với đầu dò NaI(Tl), chúng tôi sử dụng các thông số dựa trên các thông số được cung cấp của nhà sản xuất. Mật độ của tinh thể NaI(Tl), nhôm, silicon và ôxít nhôm tương ứng là 3,667, 2,699, 2,329 và 3,970 g/cm³. Gắn với tinh thể NaI(Tl) là ống nhân quang điện, việc mô phỏng các chi tiết của nhân quang điện là khá phức tạp và không thực sự cần thiết vì ảnh hưởng đến kết quả không thực sự rõ ràng. Vì vậy, để khắc phục vấn đề này, chúng tôi mô phỏng ống nhân quang điện như là một ống nhôm hình trụ đặc với đường kính 83,4mm và độ dày 30mm [6]. Chi tiết đầu dò nhấp nháy NaI(Tl) sử dụng trong mô phỏng Monte Carlo được chỉ ra trong hình 2.

Thành bình cần đo độ dày được làm từ thép chịu nhiệt C45 có chiều dài 74cm, đường kính ngoài là 76cm, đường kính trong thay đổi từ 73,46cm đến 75,66cm. Việc mô phỏng quá trình tán xạ của photon lên vật liệu được thực hiện với các độ dày khác nhau từ 3,4 đến 25,4mm. Hàm lượng các nguyên tố trong thép chịu nhiệt C45 được lấy theo tiêu chuẩn [1]: Fe (97,810 %), C (0,450%), Si (0,370 %), Mn (0,650 %), P (0,045 %), S (0,045 %), Ni (0,250 %), Cr (0,250 %), Mo (0,100 %).

Nguồn phóng xạ sử dụng trong mô phỏng là loại nguồn ¹³⁷Cs. Nguồn được chuẩn trực bằng ống chuẩn trực nguồn có chiều dài 20cm và đường kính trong là 1,0cm. Ống chuẩn trực đầu dò có chiều dài là 27cm và đường kính trong là 1,5cm, 3,0cm và 9,5cm. Bố trí hệ đo gamma tán xạ dùng để xác định độ dày của thành bình như được chỉ ra trong hình 3.

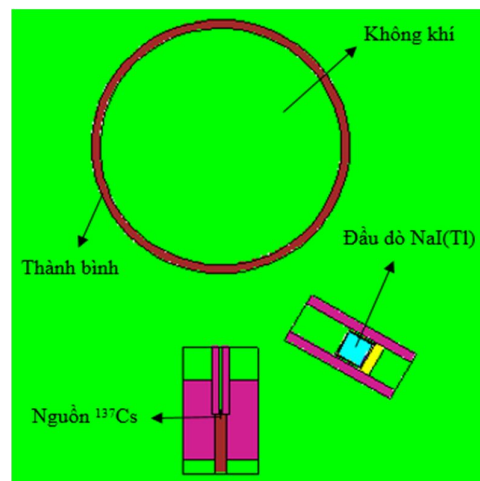


Hình 3. Bố trí mô hình đo bề dày của thành bình trong mô phỏng

Trong phổ thực nghiệm, dữ liệu thu được có phân bố dạng Gauss ứng với các đỉnh năng lượng. Tuy nhiên, chương trình MCNP5 không mô phỏng các quá trình vật lý dẫn đến sự nở rộng phổ. Vì vậy, để phổ thu được giống với phổ thực nghiệm cần phải xét đến độ phân giải phổ bằng cách áp dụng hàm phân bố Gauss. Tùy chọn thẻ FT8 GEB được dùng để mô phỏng và các tính toán giá trị hàm bề rộng một nửa của đỉnh phổ, hàm FWHM theo năng lượng [3] được mô tả như sau:

$$\text{FWHM}(\text{MeV}) = a + b\sqrt{E + cE^2} \quad (7)$$

trong đó, $a = -0,0137257 \text{ MeV}$; $b = 0,0739501 \text{ MeV}^{1/2}$; $c = -0,152982 \text{ MeV}^{-1}$ [2] và E là năng lượng của photon (MeV). Để đảm bảo được phổ phân bố độ cao xung (PHS) về mặt thống kê dưới 1%, chúng tôi thực hiện mô phỏng với số lịch sử hạt là 6.10^9 .



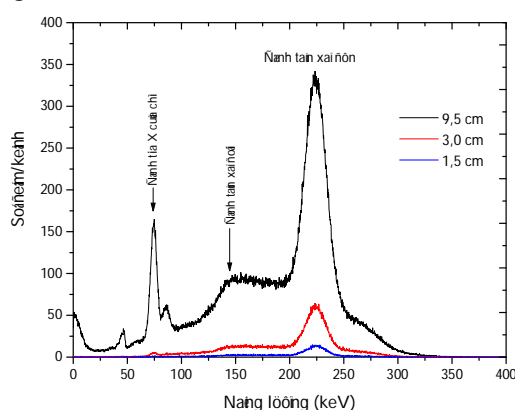
Hình 4. Mô phỏng hệ đo tán xạ trong MCNP5

4. Kết quả

4.1. Khảo sát các đặc trưng của phổ tán xạ

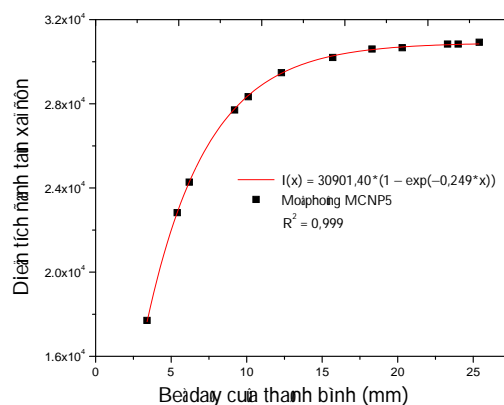
Trong nghiên cứu này, đầu dò được bố trí để ghi nhận chùm photon tán xạ ở góc 120° . Ở góc tán xạ này, năng lượng của photon tán xạ tính theo biểu thức (1) là 224,9 keV.

Hình 5 trình bày phổ tán xạ thu được trong ba trường hợp sử dụng ống chuẩn trực của đầu dò có kích thước lần lượt là 1,5cm, 3,0cm và 9,0cm cho thấy sự thay đổi của phổ gamma theo đường kính của ống chuẩn trực. Theo đó sự đóng góp của thành phần tán xạ nhiều lần (chủ yếu là tán xạ đôi) giảm đáng kể đối với ống chuẩn trực của đầu dò có đường kính trong giảm xuống. Đỉnh tia X hầu như cũng bị hấp thụ hoàn toàn trong trường hợp đường kính trong của ống chuẩn trực đầu dò có kích thước nhỏ 1,5cm và 3,0cm).



Hình 5. Phổ tán xạ thu được đối với chùm photon phát ra từ nguồn ^{137}Cs tán xạ trên thành ống dày 2,54 cm với ống chuẩn trực đầu dò có đường kính trong là 1,5cm, 3,0cm và 9,5cm

Để phân tích phổ tán xạ, chúng tôi áp dụng kỹ thuật phân tích phổ cải tiến [2]. Các kết quả thu được từ việc áp dụng kỹ thuật phân tích này là năng lượng của đỉnh tán xạ đơn và diện tích đỉnh tán xạ đơn. Diện tích đỉnh tán xạ đơn thu được đối với các vật liệu có độ dày khác nhau được làm khớp theo phương trình (3) bằng chương trình Origin (phiên bản 9.0.1) với hệ số $R^2 = 0,999$ như trình bày trong hình 6.



Hình 6. Đường cong bão hòa của thép chịu nhiệt C45 trong trường hợp sử dụng ống chuẩn trực đầu dò có kích thước 9,5cm

Từ đồ thị hình 6 cho thấy, đối với ống chuẩn trực đầu dò có đường kính trong 9,5cm, vùng bão hòa xuất hiện khi vật liệu có độ dày từ 20mm trở lên. Kết quả này cũng phù hợp hoàn toàn với kết quả trong nghiên cứu [2]. Đối với ống chuẩn trực đầu dò có đường kính trong 3,0cm độ dày bão hòa cũng vào khoảng 20mm tuy nhiên với ống chuẩn trực có đường kính trong 1,5cm, độ dày bão hòa thấp hơn vào khoảng 17mm.

Với bố trí thí nghiệm trong mô phỏng, hệ số hấp thụ tuyến tính được tính toán theo [4] là $0,252\text{mm}^{-1}$, trong khi đó giá trị thu được từ kết quả mô phỏng là $0,249\text{mm}^{-1}$ với độ lệch tương đối là 1,19%. Điều đó cho thấy sự phù hợp khá tốt của kết quả mô phỏng và giá trị lí thuyết, từ đó một lần nữa khẳng định độ tin cậy của kĩ thuật này.

Bảng 1. Năng lượng photon tán xạ đơn tính toán theo mô phỏng với ống chuẩn trực đầu dò có đường kính trong là 9,5cm, 3,0cm và 1,5cm

Độ dày thực của thành bình (mm)	Năng lượng photon tán xạ đơn (keV)				
	Thực nghiệm (Ống chuẩn trực đầu dò có đường kính trong 9,5 cm) [2]	Mô phỏng			
		9,5 cm	3,0 cm	1,5 cm	
25,4	217,7	223,8	224,0	224,1	
24,0	217,9	223,8	224,0	224,2	
23,3	219,1	223,8	224,0	224,1	
20,3	217,3	223,8	224,0	224,1	
18,3	217,7	223,8	224,1	224,1	
15,7	–	223,9	224,1	224,2	
12,3	217,7	224,0	224,1	224,3	
10,1	217,5	223,0	223,2	224,3	
9,2	219,3	224,0	224,3	224,4	
6,2	217,9	224,2	224,4	224,5	
5,4	217,9	224,2	224,4	224,6	
3,4	217,7	224,3	224,5	224,7	

Kết quả xác định năng lượng của đỉnh tán xạ đơn từ mô phỏng theo các độ dày thành bình khác nhau được biểu diễn trong bảng 1. Kết quả từ bảng này đã cho thấy rằng, với phổ tán xạ thực nghiệm, độ lệch tương đối giữa năng lượng photon tán xạ tính theo lí thuyết và theo thực nghiệm có giá trị lớn nhất là 3,29% trong khi đó đối với phổ tán xạ mô phỏng độ lệch này lần lượt là 0,49%, 0,40% và 0,36% tương ứng với các đường kính trong của ống chuẩn trực đầu dò là 9,5cm, 3,0cm và 1,5cm. Có thể thấy rằng, độ lệch tương đối của thực nghiệm lớn hơn so với kết quả mô phỏng. Điều này có thể lí giải là do khi tiến hành các phép đo thực nghiệm, đầu dò nhấp nháy NaI(Tl) chịu ảnh hưởng của hiện tượng dịch đỉnh dẫn đến độ sai lệch về vị trí đỉnh năng lượng trong khi đó với mô phỏng hiển nhiên không chịu ảnh hưởng bởi hiện tượng này.

Bảng 2. Giá trị FWHM giữa thực nghiệm [2] và mô phỏng

Độ dày thực của thành bình (mm)	FWHM (keV) Thực nghiệm [2]	FWHM (keV) – Mô phỏng		
		9,5 cm	3,0 cm	1,5 cm
25,4	24,5	22,8	21,1	20,8
24,0	24,0	23,0	21,1	20,7
23,3	24,6	22,8	21,1	20,8
20,3	24,4	22,8	21,1	20,8
18,3	24,2	22,8	21,1	20,8
15,7	---	22,8	21,1	20,8
12,3	24,1	22,8	21,0	20,7
10,1	24,1	22,8	21,1	20,7
9,2	24,9	22,8	21,1	20,7
6,2	24,2	22,9	21,0	20,9
5,4	24,4	22,9	20,9	20,5
3,4	25,1	22,9	20,8	20,5

Kết quả trong bảng 2 cho thấy bề rộng một nửa đỉnh tán xạ có xu hướng giảm dần khi đường kính trong của ống chuẩn trực đầu dò giảm xuống. Kết quả này có thể được giải thích là do khi giảm đường kính trong của ống chuẩn trực đầu dò, đóng góp của thành phần tán xạ nhiều lần giảm xuống dẫn đến sự nở rộng phổ ít hơn.

4.2. Độ dày của thành bình

Sau khi tính toán được diện tích đỉnh tán xạ một lần của phổ tán xạ, độ dày của thành bình được xác định sử dụng công thức (2). Kết quả tính toán độ dày của thành bình được trình bày trong bảng 3.

Bảng 3. Độ dày của thành bình bằng thép C45 xác định từ phổ tán xạ mô phỏng với ống chuẩn trực đầu dò có đường kính trong là 9,5cm, 3,0cm và 1,5cm

Độ dày thực của thành bình (mm) (a)	Mô phỏng					
	9,5 cm		3,0 cm		1,5 cm	
	Độ dày (mm) (b)	RD	Độ dày (mm) (c)	RD	Độ dày (mm) (d)	RD
15,7	15,0 ± 0,17	4,4	–	–	–	–
12,3	12,2 ± 0,06	0,9	11,7 ± 0,14	4,9	–	–
10,1	9,90 ± 0,03	2,3	10,0 ± 0,09	0,6	10,58 ± 0,22	4,7
9,2	9,00 ± 0,02	2,1	9,08 ± 0,07	1,3	9,56 ± 0,17	4,0
6,2	6,10 ± 0,01	1,4	6,01 ± 0,03	3,1	6,61 ± 0,07	6,6
5,4	5,30 ± 0,01	1,4	5,15 ± 0,02	4,7	5,45 ± 0,05	0,9
3,4	3,40 ± 0,00	0,7	3,33 ± 0,01	2,1	3,55 ± 0,03	4,4

$$RD(\%) = \frac{|a-x|}{a} \times 100, \text{ với } x = b, c, d$$

Từ kết quả trong bảng 3, chúng tôi có nhận xét rằng khi sử dụng các ống chuẩn trực với các đường kính trong có kích thước khác nhau, độ dày mà chúng tôi đo được có độ lệch tương đối so với độ dày thực của thành bình là xấp xỉ nhau cho cả ba trường hợp với độ lệch tương đối lớn nhất là 6,6%. Như vậy, đối với kỹ thuật gamma tán xạ sử dụng đầu dò nhấp nháy có thể sử dụng ống chuẩn trực đầu dò với đường kính trong lớn để thực hiện phép đo. Điều này có ý đặc biệt quan trọng vì việc sử dụng ống chuẩn trực có đường kính trong lớn sẽ giúp rút ngắn được thời gian đo kéo theo việc có thể sử dụng nguồn hoạt độ thấp trong đo phổ tán xạ do đó sẽ làm tăng độ an toàn đối với nhân viên thực hiện phép đo. Bên cạnh đó với ống chuẩn trực có đường kính trong lớn, độ dày bảo hòa của vật liệu cũng sẽ lớn hơn do đó phạm vi áp dụng của kỹ thuật cũng sẽ được mở rộng.

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã áp dụng kỹ thuật gamma tán xạ ngược để xác định độ dày của thành bình làm bằng thép chịu nhiệt C45. Kết quả cho thấy rằng có thể áp dụng kỹ thuật trong nghiên cứu [2] để đo độ dày của thành bình. Bên cạnh đó, việc xác định độ dày được thực hiện với ba loại ống chuẩn trực đầu dò có kích thước khác nhau, tuy nhiên kết quả xác định độ dày cho độ lệch tương đối của độ dày xác định được so với độ dày thực tế trong cả ba trường hợp là không có sự khác biệt đáng kể. Do vậy, trong thực nghiệm, có thể sử dụng ống chuẩn trực có đường kính trong lớn để xác định độ dày vật liệu. Điều này giúp rút ngắn thời gian đo qua đó tránh được hiện tượng dịch đỉnh phổ khi đo thời gian dài với đầu dò nhấp nháy NaI(Tl).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. European Steel and Alloy Grades/Number, Accessed 1 Jun 2012, <http://steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=152>.
2. Hoang Duc Tam, Huynh Dinh Chuong, Tran Thien Thanh, Vo Hoang Nguyen, Hoang Thi Kieu Trang, Chau Van Tao (2014), “Advanced gamma spectrum processing technique applied to the analysis of scattering spectra for determining material thickness”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **303**, 693 – 699.
3. Kovaltchouk V., Machrafi R. (2011), “Monte Carlo simulations of response functions for gas filled and scintillator detectors with MCNPX code”, *Annals of Nuclear Energy* **38**, 788 – 793.

4. NIST (2013) XCOM: photon cross sections database, Accessed 6 Nov 2014 <<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>>.
5. Priyada P., Margret M., Ramar R., Shivaramu, Menaka M., Thilagam L., Venkataraman B., Raj B. (2011), “Intercomparison of gamma scattering, gammatography, and radiography techniques for mild steel nonuniform corrosion detection”, *Review of Scientific Instruments* **82**, 035115 (1 – 8).
6. Shi H.-X., Chen B.-X., Li T.-Z., Yun D. (2002), “Precise Monte Carlo simulation of gamma-ray response functions for an NaI(Tl) detector”, *Applied Radiation and Isotopes* **57**, 517 – 524.
7. Silva I.L.M., Lopes R.T., De Jesus E.F.O. (1999), “Tube defects inspection technique by using Compton gamma-rays backscattering”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **422**, 957 – 963.

(Ngày Tòa soạn nhận được bài: 10-3-2015; ngày phản biện đánh giá: 15-4-2015;
ngày chấp nhận đăng: 18-5-2015)