

NGHIÊN CỨU SỰ PHỤ THUỘC CƯỜNG ĐỘ CHÙM TIA GAMMA TÁN XẠ NGƯỢC VÀO THỂ TÍCH TÁN XẠ BẰNG PHƯƠNG PHÁP MONTE CARLO

HOÀNG ĐỨC TÂM*,
HUỠNH ĐÌNH CHƯƠNG**, DƯƠNG THÁI ĐƯƠNG***,
LÊ TÂN PHÚC****, TRẦN THIÊN THANH*****, CHÂU VĂN TẠO*****

TÓM TẮT

Trong bài báo này, phương pháp Monte Carlo được sử dụng để khảo sát sự phụ thuộc cường độ chùm tia gamma tán xạ ngược vào thể tích tán xạ. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng cường độ chùm tia gamma tán xạ ngược phụ thuộc tuyến tính vào thể tích tán xạ với hệ số tương quan R^2 khi khớp hàm bằng 0,951. Kết quả này làm cơ sở cho các bố trí thực nghiệm sao cho việc ghi nhận được cường độ chùm tia tán xạ là lớn nhất trong kỹ thuật gamma tán xạ ngược có sử dụng đồng thời collimator nguồn và collimator detector.

Từ khóa: thể tích tán xạ, gamma tán xạ ngược, phương pháp Monte Carlo.

ABSTRACT

A study on the dependence of the intensity of a bunch of Gamma backward diffusion rays on the diffusion volume using the Monte Carlo method

In this paper, the Monte Carlo method was used to study the intensity of a bunch of Gamma backward diffusion rays on the diffusion volume. The results showed that the intensity of a bunch of Gamma backward diffusion rays on the diffusion volume in a linear way and the correlation is 0.951. The result will serve as a base for all the experiment arrangements so as to the record of diffusion intensity is maximum in the Gamma backward diffusion technique using both a collimator source and a collimator detector.

Keywords: diffusion volume, gamma backward diffusion, Monte Carlo method.

1. Giới thiệu

Kỹ thuật gamma tán xạ ngược hiện nay được sử dụng nhiều trong lĩnh vực ứng dụng hạt nhân trong công nghiệp như kiểm tra khuyết tật vật liệu, đo độ ăn mòn vật liệu,... [3]. Kỹ thuật này có nhiều ưu điểm như có thể đo trong các điều kiện khắc nghiệt như nhiệt độ, áp suất cao; và đặc biệt có thể tiến hành mà không cần phải dùng

* ThS, Trường Đại học Sư phạm TPHCM

** ThS, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG TPHCM

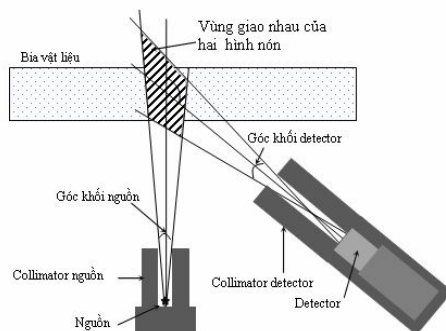
*** SV, Trường Đại học Sư phạm TPHCM

**** HVCH, Trường Đại học Sư phạm TPHCM

***** TS, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG TPHCM

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

hoạt động của thiết bị. Những ưu điểm trên làm cho kỹ thuật gamma tán xạ ngược được sử dụng phổ biến.



Hình 1. Bố trí thí nghiệm trong kỹ thuật tán xạ ngược

Trong kỹ thuật gamma tán xạ ngược (Hình 1), thông thường chỉ có collimator nguồn được sử dụng, còn đối với detector, tùy vào mục đích đo đạc mà có thể sử dụng collimator hoặc không. Trong trường hợp chỉ cần phát hiện khuyết tật của vật liệu, người ta có thể không cần dùng đến collimator detector nhằm mục đích tăng cao cường độ chùm tia tán xạ ghi nhận được [4]. Tuy nhiên, đối với các phép đo như xác định độ dày vật liệu, đo độ dày tại vùng bị ăn mòn,... [1, 3] việc sử dụng collimator detector là cần thiết để nâng cao độ chính xác của kết quả.

Trong công trình [1], các tác giả đã chỉ ra rằng nếu đặt mẫu (bia vật liệu) ngoài vùng giao nhau giữa hai chùm tia tới và chùm tia tán xạ (dạng hình nón) thì số đếm thu được là rất ít do sự tán xạ xảy ra chủ yếu trên các phân tử của không khí.

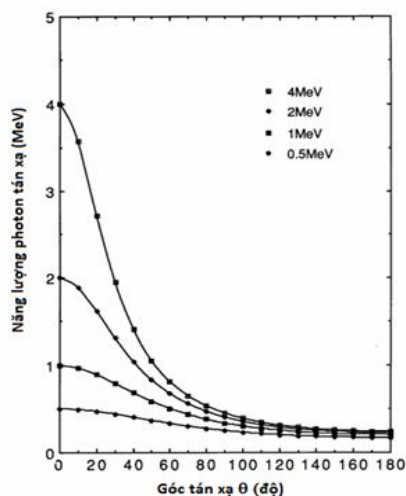
Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng phương pháp Monte Carlo để tìm ra vị trí đặt mẫu tối ưu bằng cách khảo sát sự thay đổi của diện tích đỉnh tán xạ mà detector ghi nhận được theo sự thay đổi của thể tích vùng tán xạ trong trường hợp có sử dụng cả collimator detector và collimator nguồn. Detector được sử dụng trong nghiên cứu này là loại detector NaI(Tl), bia vật liệu là thép chịu nhiệt C45. Từ phổ mô phỏng thu được, chúng tôi sẽ xác định khoảng vị trí đặt bia tối ưu trong kỹ thuật gamma tán xạ ngược.

2. Tán xạ Compton của photon trên bia vật liệu

Trong tán xạ Compton, năng lượng của photon bị tán xạ E_s phụ thuộc vào năng lượng của photon tới E_i và góc tán xạ theo công thức sau:

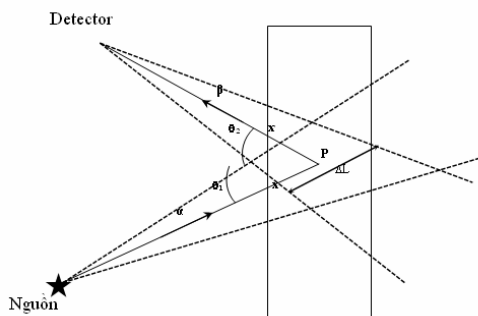
$$E_s = \frac{E_i}{1 + \frac{E_i}{m_0c^2}(1 - \cos \theta)} \tag{1}$$

ở đây, E_i là năng lượng của photon tới, E_s là năng lượng của tia gamma bị tán xạ, m_0c^2 là năng lượng nghỉ của electron và θ là góc tán xạ.



Hình 2. Năng lượng photon tán xạ Compton thay đổi theo góc tán xạ trong vùng năng lượng 0,5 – 4 MeV

Hình 2 chỉ ra sự phụ thuộc của năng lượng photon tán xạ vào góc tán xạ đối với các năng lượng khác nhau của photon tới trong khoảng 0,4 – 4 MeV [2]. Cũng có thể thấy được từ Hình 2 rằng, với các góc tán xạ trên 120°, năng lượng tán xạ xấp xỉ bằng 250 keV và gần như không thay đổi theo góc tán xạ.



Hình 3. Tán xạ của photon lên vật liệu [4]

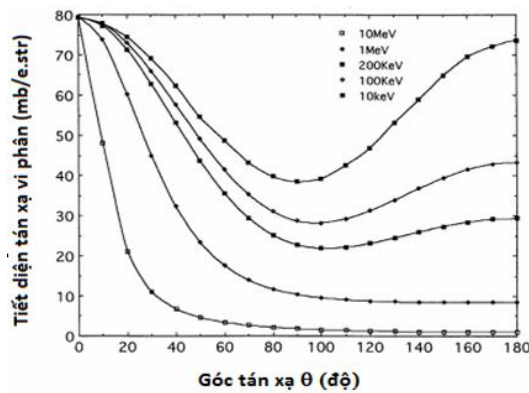
Trong phương pháp gamma tán xạ, có thể xem quá trình tán xạ của photon trên vật liệu theo ba giai đoạn (Hình 3): giai đoạn 1 – chùm photon bị suy giảm cường độ khi đi vào vật liệu (theo đường α); giai đoạn 2 – chùm photon bị tán xạ (tại P) và giai đoạn 3 – chùm photon bị suy giảm cường độ khi đi ra khỏi vật liệu (theo đường β). Đối với chùm tia gamma tới được chuẩn trực có cường độ I_0 , cường độ của chùm tia tán xạ trên vùng thể tích tán xạ (voxel) được ghi nhận bởi detector được xác định bởi

$$I(P) = I_0 e^{-\left(\frac{\mu(E_0)}{\rho}\right)\rho x} \frac{d\sigma(E_0, \Omega)}{d\Omega} S(E_0, \theta, Z) d\Omega \rho_e V e^{-\left(\frac{\mu(E)}{\rho}\right)\rho x} \quad (2)$$

ở đây, $\frac{d\sigma(E_0, \Omega)}{d\Omega}$ là tiết diện tán xạ vi phân trên electron được xác định theo công thức Klein – Nishina:

$$\frac{d\sigma(E_0, \Omega)}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1 + \cos^2 \theta}{[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]^2} \left(1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \theta)^2}{[1 + \cos^2 \theta][1 + \alpha(1 - \cos \theta)]} \right) \quad (3)$$

với $r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = 2,88 \times 10^{-15} \text{ m}$ là bán kính electron cổ điển.



Hình 4. Tiết diện tán xạ vi phân trên electron tại các giá trị năng lượng photon tới 10, 100, 200 keV và 1, 10MeV

Hình 4 chỉ ra sự phụ thuộc của tiết diện tán xạ vi phân trên electron đối với các photon tới có năng lượng trong khoảng giữa 10keV và 10MeV [2]. Ở vùng năng lượng thấp, tiết diện này là đối xứng ở khoảng 90°. Tuy nhiên, với năng lượng trên 200keV, đường cong tiết diện có xu hướng bất đối xứng về phía góc tán xạ lớn.

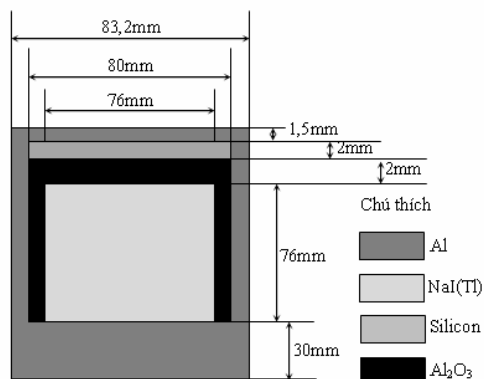
Trong công thức (2), rõ ràng rằng có sự phụ thuộc của cường độ chùm tia tán xạ vào mật độ electron trên bia và thể tích vùng tán xạ. Như vậy, về mặt lí thuyết, nếu bia được đặt lệch ra khỏi vùng giao nhau của hai hình nón – vùng tán xạ (Hình 1) thì cường độ chùm tia tán xạ thu được là rất nhỏ và điều này gây ra sai số lớn cho các phép tính liên quan do không đảm bảo về mặt thống kê số đếm ghi nhận được. Do vậy, trong nghiên cứu này chúng tôi sẽ sử dụng chương trình MCNP5 để khảo sát vùng đặt bia tối ưu sao cho cường độ chùm tia tán xạ thu được là lớn nhất.

3. Mô phỏng Monte Carlo quá trình tán xạ Compton

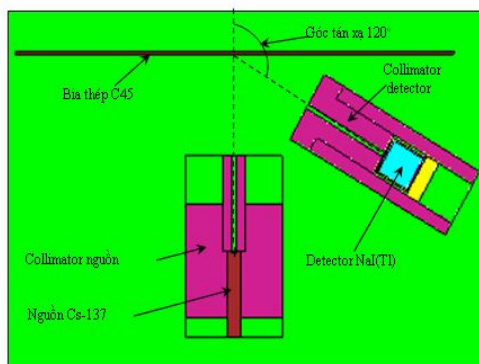
3.1. Mô phỏng bằng chương trình MCNP5

Để tìm vị trí đặt bia tối ưu trong kĩ thuật gamma tán xạ ngược, chúng tôi mô phỏng toàn bộ quá trình tán xạ của photon trên vật liệu bằng chương MCNP5.

Loại detector được sử dụng trong nghiên cứu này là detector NaI(Tl) do hãng Amptek cung cấp. Detector NaI(Tl) sử dụng tinh thể nhấp nháy NaI(Tl) với kích thước tinh thể có đường kính 76mm và chiều dài 76mm. Thông số của detector được cho trong Hình 5.



Hình 5. Các thông số kích thước và loại vật liệu của detector NaI(Tl) dùng trong mô phỏng



Hình 6. Bố trí hệ đo tán xạ trong MCNP5

Vật liệu được sử dụng trong mô phỏng là thép chịu nhiệt C45 với hàm lượng các nguyên tố: Sắt – 97,81%, Các-bon – 0,45%, Silic – 0,37%, Mangan – 0,65%, Phốt-pho – 0,045%, Lưu huỳnh – 0,045%, Niken – 0,25%, Crôm – 0,28%, Môlipden – 0,1%. Vật liệu thép C45 có độ dày 0,5cm bề mặt tấm thép hình vuông. Tấm thép được đặt thẳng góc với trục của nguồn và lệch góc 60° so với trục detector để tạo góc tán xạ 120° . Dịch chuyển tấm thép theo trục Oz với bước dịch chuyển 0,25cm để thay đổi thể tích tán xạ.

Trong mô phỏng này, chúng tôi sử dụng nguồn ^{137}Cs (một đỉnh năng lượng 662keV). Collimator nguồn được làm bằng chì có đường kính trong 1cm. Collimator detector được làm bằng chì có chiều dài 20cm, đường kính trong 1cm được đặt trước detector để hạn chế đóng góp của tán xạ nhiều lần. Để đảm bảo được phổ phân bố độ

cao xung (PHS – Pulse Height Spectrum) về mặt thống kê, chúng tôi thực hiện mô phỏng với số lịch sử hạt là $6 \cdot 10^6$.

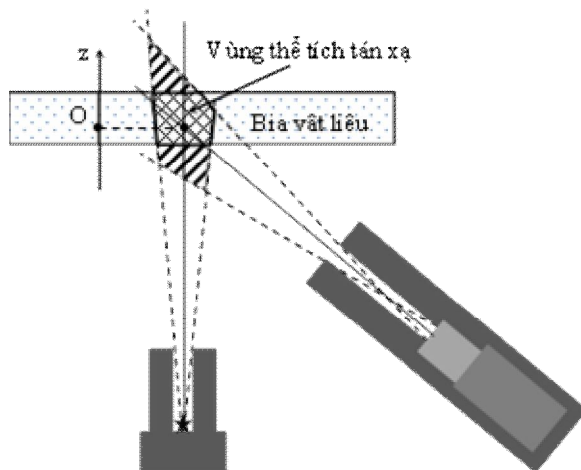
Hàm bề rộng một nửa theo năng lượng (FWHM) dùng trong mô phỏng có dạng

$$FWHM = a + b\sqrt{E + cE^2} \tag{1}$$

trong đó, các hệ số a, b, c thu được bằng cách khớp hàm FWHM với các giá trị thực nghiệm. Các giá trị mà chúng tôi thu được $a = -0,0118058419427652 \text{ MeV}$; $b = 0,0685518173013359 \text{ MeV}^{1/2}$; $c = -0,0815038633863655 \text{ MeV}^{-1}$.

3.2. Xác định thể tích vùng tán xạ

Để khảo sát được sự thay đổi cường độ chùm tia tán xạ theo thể tích tán xạ, cần phải xác định được thể tích vùng tán xạ. Vùng tán xạ được xem là vùng giao nhau của hai hình nón và vật liệu (Hình 7). Để xác định được thể tích này chúng tôi sử dụng phương pháp Monte Carlo với ngôn ngữ lập trình Fortran.



Hình 7. Thể tích vùng tán xạ sẽ thay đổi theo các vị trí đặt bia

Việc dịch chuyển vị trí bia dọc theo trục Oz sẽ làm thay đổi thể tích vùng tán xạ. Kết quả tính toán thể tích vùng tán xạ tại các vị trí đặt bia khác nhau được cho trong Bảng 1.

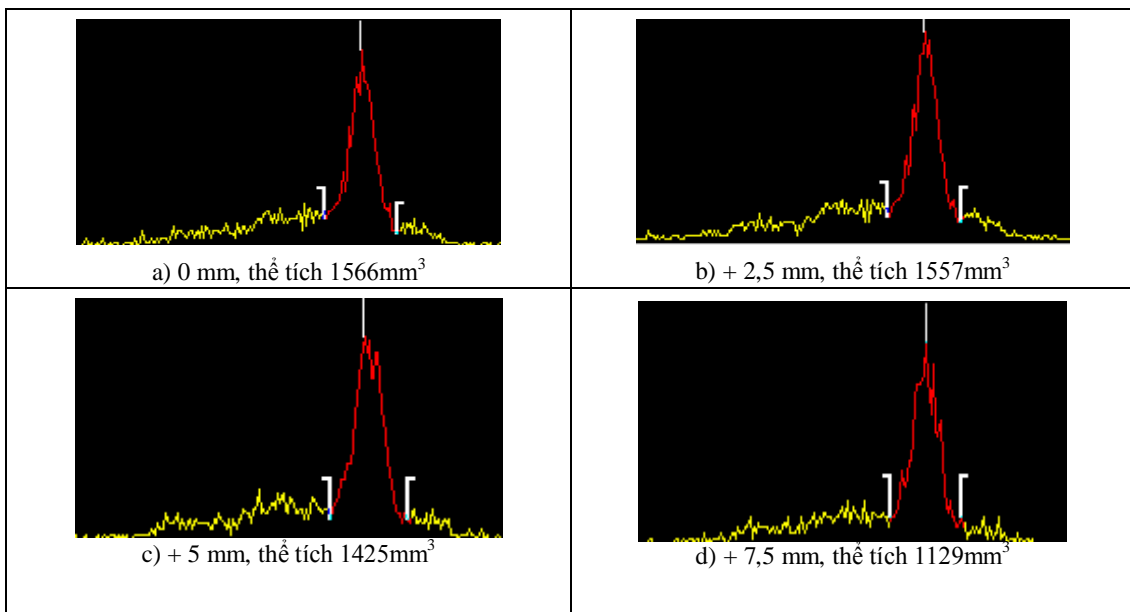
Bảng 1. Thể tích vùng tán xạ tại các vị trí đặt bia khác nhau

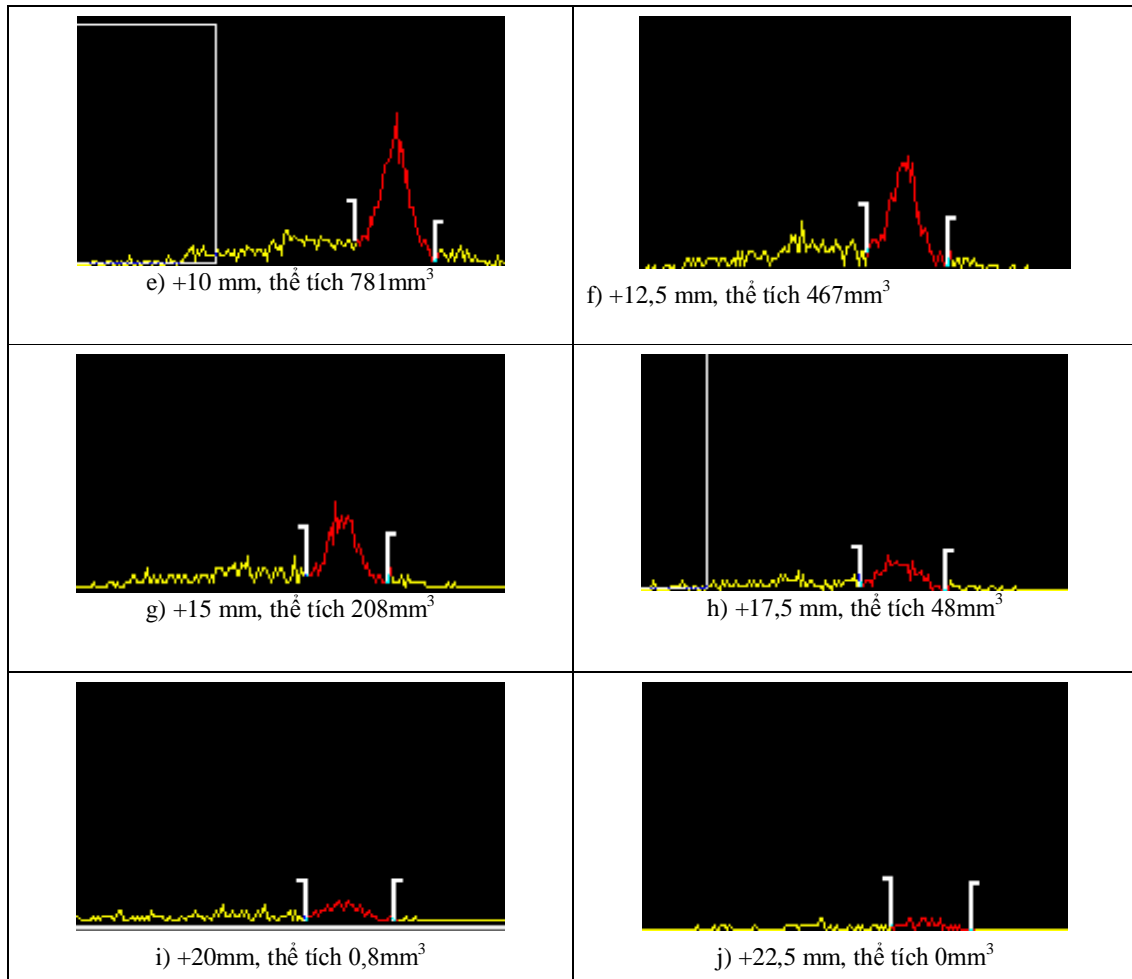
Vị trí đặt bia z (mm)	Thể tích tán xạ (mm ³)
-20,0	0
-17,5	10,88
-15,0	112,12
-12,5	352,17
-10,0	685,85

-7,5	1071,26
-5,0	1386,83
-2,5	1528,83
0,0	1566,93
2,5	1557,12
5,0	1425,34
7,5	1129,78
10,0	781,58
12,5	467,98
15,0	208,32
17,5	48,79
20,0	0,82
22,5	0,00
25,0	0,00

4. Kết quả và thảo luận

Hình 8 a, b, c, d, e, f, g, h, i, j biểu diễn các đỉnh phổ tán xạ của photon năng lượng 662 keV trên vật liệu thép C45 ở góc tán xạ 120° . Đỉnh phổ quan sát được đối với các thể tích vùng tán xạ lớn là rõ ràng và có phân bố dạng Gauss. Tuy nhiên, ở các thể tích tán xạ nhỏ, độ cao đỉnh có xu hướng giảm dần đúng như dự đoán của lý thuyết.





Hình 8. Phổ tán xạ thu được từ mô phỏng

Chương trình Genie - 2000 được sử dụng để xác định diện tích các đỉnh tán xạ này. Kết quả thu được từ quá trình mô phỏng là sự thay đổi của số đếm phụ thuộc vào thể tích tán xạ được trình bày trong Bảng 2.

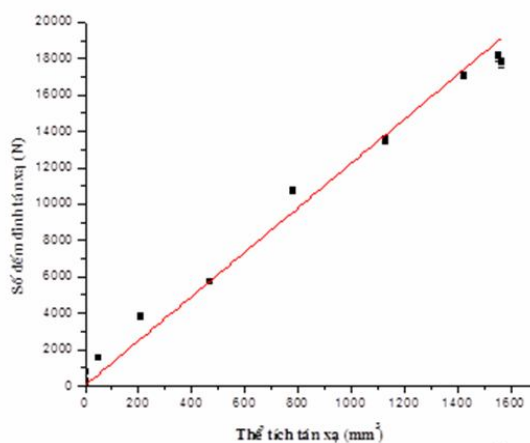
Bảng 2. Kết quả xác định diện tích đỉnh tán xạ

Vị trí đặt bia – z (mm)	Thể tích tán xạ (mm ³)	Số đếm (N)	Sai số số đếm (%)
-20,0	0	421	4,87
-17,5	10,88	670	11,15
-15,0	112,12	2352	4,33
-12,5	352,17	5303	2,67
-10,0	685,85	9969	1,68

-7,5	1071,26	13732	1,54
-5,0	1386,83	17029	1,34
-2,5	1528,83	17578	1,45
0,0	1566,93	17771	1,54
2,5	1557,12	18092	1,38
5,0	1425,34	17083	1,23
7,5	1129,78	13539	1,54
10,0	781,58	10730	1,51
12,5	467,98	5759	2,81
15,0	208,32	3811	2,48
17,5	48,79	1533	5,25
20,0	0,82	803	3,53
22,5	0,00	300	5,77
25,0	0,00	80	11,18

Số liệu trong Bảng 2 cho thấy rằng diện tích đỉnh tán xạ lớn khi thể tích tán xạ lớn, ở những vị trí có thể tích tán xạ nhỏ hơn thì số đếm ở đỉnh tán xạ nhỏ và khi vật liệu được đặt ở các vị trí mà thể tích tán xạ bằng không thì số đếm đỉnh tán xạ gần như không đáng kể. Mặt khác sai số của số đếm diện tích đỉnh tán xạ mắc phải ở những vị trí có thể tích tán xạ nhỏ là khá lớn (trên 10%) do sự thăng giáng thống kê lớn ở vùng này.

Sự thay đổi của số đếm theo thể tích tán xạ được trình bày ở Hình 9. Đồ thị này cho thấy sự thay đổi của số đếm theo thể tích tán xạ gần như tuyến tính với hệ số tương quan là 0,951.



Hình 9. Sự phụ thuộc của diện tích đỉnh tán xạ vào thể tích tán xạ

Từ kết quả nghiên cứu trên, khi sử dụng kỹ thuật gamma tán xạ ngược trong đó có sử dụng cả collimator detector và collimator nguồn, việc bố trí thí nghiệm cần phải chú ý đến vị trí đặt bia sao cho thể tích tán xạ là lớn nhất. Tất nhiên rằng, ứng với mỗi cấu hình bố trí hệ thí nghiệm sẽ có được vị trí đặt bia sao cho thể tích tán xạ thu được là lớn nhất. Việc tính toán thể tích vùng tán xạ đã được chúng tôi viết code trên nền tảng Fortran sử dụng phương pháp Monte Carlo.

Nghiên cứu này là cơ sở cho việc bố trí thực nghiệm trong đó cả collimator detector và collimator nguồn đều được sử dụng với các phép đo xác định độ dày vật liệu, đo độ ăn mòn bằng kỹ thuật gamma tán xạ ngược mà chúng tôi đang thực hiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Hoàng Đức Tâm, Trịnh Văn Danh, Võ Thị Thắm, Trần Thiện Thanh, Châu Văn Tạo (2013), “Xác định độ dày vật liệu thép chịu nhiệt tại vùng ăn mòn bằng phương pháp Monte Carlo kết hợp với phương pháp giải tích”, *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Sư phạm TP Hồ Chí Minh*, 47 (81), tr.172 - 182.
2. Asa'd Z., Asghar M., Imrie D. C. (1997), “The measurement of the wall thickness of steel sections using Compton backscattering”, *Meas. Sci. Technol.* 8, pp.377 - 385.
3. Priyada P., Margret M., Ramar R., Shivaramu, Menaka M., Thilagam L. (2011), “Intercomparison of gamma scattering, gammatography, and radiography techniques for mild steel nonuniform corrosion detection”, *Rev. Sci. Instrum.* 82, 035115.
4. Silva I.L.M., Lopes R.T., De Jesus E.F.O. (1999), “Tube defects inspection technique by using Compton gamma-rays backscattering”, *Nucl. Inst. Meth*, A422, pp.957 – 963.

(Ngày Tòa soạn nhận được bài: 05-9-2013; ngày phản biện đánh giá: 30-9-2013;
ngày chấp nhận đăng: 16-10-2013)