

XÁC ĐỊNH ĐỘ DÀY VẬT LIỆU THÉP CHỊU NHIỆT TẠI VÙNG BỊ ĂN MÒN BẰNG PHƯƠNG PHÁP MONTE CARLO KẾT HỢP VỚI PHƯƠNG PHÁP GIẢI TÍCH

HOÀNG ĐỨC TÂM^{*}, TRẦN THIÊN THANH^{**},
TRỊNH VĂN DANH^{***}, VÕ THỊ THẨM^{***}, CHÂU VĂN TẠO^{****}

TÓM TẮT

Trong công trình này, phương pháp Monte Carlo được sử dụng trong kỹ thuật gamma tán xạ để xác định độ dày bão hòa của vật liệu thép chịu nhiệt. Kết quả chỉ ra rằng độ dày bão hòa khi sử dụng tia gamma năng lượng 662keV là 17mm. Bên cạnh đó, chúng tôi cũng đánh giá khả năng áp dụng của kỹ thuật gamma tán xạ sử dụng đầu dò NaI(Tl) trong việc xác định độ dày ăn mòn bằng cách so sánh độ dày thực tế của vật liệu và độ dày tính toán từ mô phỏng Monte Carlo kết hợp với phương pháp giải tích. Kết quả chỉ ra rằng có thể tính toán được độ dày vật liệu tại vùng bị ăn mòn với độ sai biệt giữa độ dày thực tế và độ dày tính toán dưới 10% khi sử dụng tia gamma năng lượng 662keV.

Từ khóa: gamma tán xạ, ăn mòn, thép chịu nhiệt, NaI(Tl).

ABSTRACT

Determining the thickness of heat-resistant steel at corrosion range using Monte Carlo method combined with analytic method

In this work, Monte Carlo method was used in the gamma backscattering technique in order to determine the saturation thickness of heat-resistant steel. The result showed that the saturation thickness was 17 mm corresponding to gamma rays of 662keV. Besides, we also evaluated the applicability of the gamma scattering technique in corrosion detection by comparing the real thickness of material with calculated thickness from Monte Carlo method and analytical method. The results show that, for gamma rays of 662 keV and with experimental arrangement in our work, the gamma scattering technique can determine the thickness of material at corrosion range with deviation under 10%.

Keywords: gamma scattering, corrosion, heat-resistant steel, NaI(Tl).

1. Giới thiệu

Sử dụng detector NaI(Tl) để phát hiện các khuyết tật trên vật liệu bằng phương pháp gamma tán xạ được nhiều nhóm quan tâm nghiên cứu trong thời gian qua [1, 2, 3, 9]. Priyada và cộng sự [5] bằng cách sử dụng detector bán dẫn HPGGe đã xác định độ ăn mòn đối với các loại thép mềm (Mild Steel). Với độ phân giải năng lượng tốt, đây là

^{*} ThS, Trường Đại học Sư phạm TP HCM

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

^{***} HVCH, Trường Đại học Sư phạm TP HCM

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

loại detector cho kết quả đáng tin cậy trong việc xác định độ dày ăn mòn của vật liệu. Tuy nhiên, nhược điểm của loại detector này là cần được làm lạnh ở nhiệt độ thấp bằng ni-tơ lỏng nên tính linh động không cao trong việc đo các đối tượng ở ngoài hiện trường.

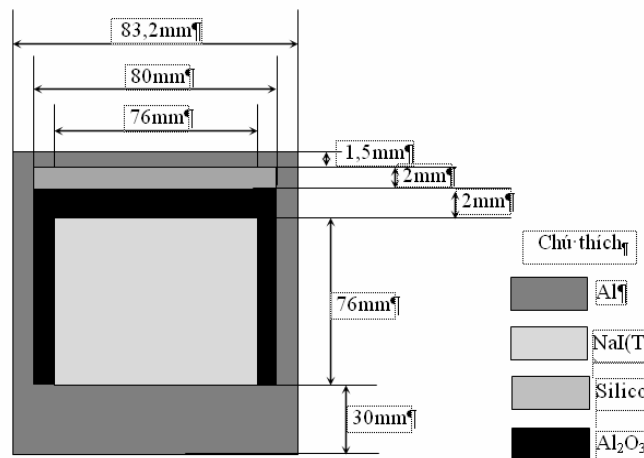
Để khắc phục được nhược điểm này, chúng tôi sử dụng detector NaI(Tl). Loại detector này có thể hoạt động ở nhiệt độ phòng [4] nên có thể mang ra ngoài hiện trường để thực hiện các phép đo trực tiếp.

Để đánh giá khả năng áp dụng detector này trong các phép đo thực nghiệm về xác định độ ăn mòn, chúng tôi tiến hành mô phỏng toàn bộ quá trình xác định độ dày ăn mòn của vật liệu thép chịu nhiệt (một loại vật liệu thường dùng trong các thành lò chịu nhiệt với hàm lượng Các-bon (C) và Sắt (Fe) lần lượt là 3,95% và 96,05%). Kết quả của quá trình mô phỏng này là phổ tán xạ của tia gamma tới năng lượng 662 keV trên vật liệu thép chịu nhiệt ở góc tán xạ 135°. Từ phổ mô phỏng thu được chúng tôi sẽ xác định độ dày bão hòa của vật liệu thép chịu nhiệt đối với tia gamma tới năng lượng 662 keV. Bên cạnh xác định độ dày bão hòa, chúng tôi cũng sử dụng phương pháp giải tích để tính toán độ dày của vật liệu tại điểm tán xạ (còn gọi là độ dày ăn mòn).

2. Phương pháp Monte Carlo

2.1. Mô phỏng bằng chương trình MCNP5

Các thông số về detector NaI(Tl) mà chúng tôi sử dụng để mô phỏng dựa trên các thông số do hãng Amptek cung cấp. Loại detector này sử dụng tinh thể nhấp nháy NaI(Tl) với kích thước tinh thể có đường kính 76 mm và chiều dài 76 mm. Các thông số kỹ thuật của detector NaI(Tl) được trình bày trong hình 1.



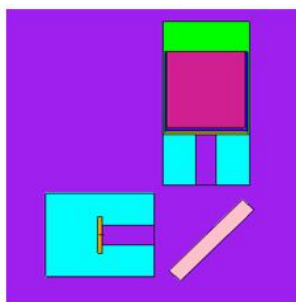
Hình 1. Các thông số kích thước và loại vật liệu của hệ đo NaI(Tl) dùng trong mô phỏng

Phần sau cùng của detector là ống nhân quang điện, tuy nhiên việc mô phỏng các chi tiết của ống nhân quang điện là tương đối phức tạp và thực sự không cần thiết vì ảnh hưởng đến kết quả thu được là không thực sự rõ ràng. Do đó, để khắc phục vấn đề này, trong chương trình mô phỏng, chúng tôi xem ống nhân quang điện như là một ống nhôm hình trụ đặc với độ dày 30 mm. [8]

Mô hình hóa hệ đo để khảo sát phổ tán xạ trên vật liệu gồm ba phần:

Phần 1: Mô hình hóa đầu dò NaI(Tl) và collimator. Hệ đo sử dụng đầu dò NaI(Tl) bao gồm: tinh thể NaI(Tl), nhôm, silicon và nhôm ô-xít (Al_2O_3) có mật độ lần lượt là $3,667 \text{ g cm}^{-3}$, $2,7 \text{ g cm}^{-3}$, $2,329 \text{ g cm}^{-3}$ và $3,970 \text{ g cm}^{-3}$. Để hạn chế được đóng góp tán xạ nhiều lần đồng thời vẫn đảm bảo số đếm mà detector ghi nhận được là đủ lớn, chúng tôi sử dụng collimator bằng chì dạng trụ với độ dài 50 mm, đường kính trong 20 mm, đường kính ngoài 83,2 mm đặt trước detector. Cấu trúc chi tiết đầu dò dùng trong MCNP5 được cho trong hình 1.

Phần 2: Mô hình hóa nguồn ^{137}Cs và collimator nguồn. Nguồn được sử dụng trong mô phỏng là nguồn ^{137}Cs , đây là nguồn có năng lượng đủ lớn dùng trong xác định độ dày vật liệu và có ưu thế là nguồn đơn năng nên dễ dàng kiểm tra được năng lượng của đỉnh tán xạ trong phổ mô phỏng từ lý thuyết tán xạ Compton. Nguồn ^{137}Cs được đặt trong hộp chì với đường kính trong và ngoài của collimator bằng chì đúng bằng đường kính của collimator detector.



Hình 2. Bố trí thí nghiệm đo phổ tán xạ trong MCNP5

Phần 3: Mô hình hóa vật liệu thép chịu nhiệt. Thông thường, các thiết bị cần xác định độ ăn mòn được làm từ loại thép chịu nhiệt. Do đó trong bài toán mô phỏng ở đây, chúng tôi đánh giá phổ tán xạ với loại thép này. Bề mặt tấm thép có dạng hình vuông cạnh 10 cm với độ dày thay đổi được trong mỗi lần khảo sát. Tấm thép được đặt lệch với trục detector và trục của nguồn một góc 45° . Chùm tia tán xạ thu được trong bố trí thí nghiệm ở hình 2 là chùm tia tán xạ ngược.

2.2. Đường cong phân giải năng lượng

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. Do vậy, để phổ thu được giống phổ thực nghiệm hơn, cần phải xét đến độ phân giải phổ bằng cách áp dụng hàm phân bố Gauss. Kỹ thuật này bao gồm sử dụng thẻ FT8 GEB và tính toán giá trị bề rộng một nửa của đỉnh phổ (FWHM). Hàm FWHM theo năng lượng được mô tả bằng hàm bên dưới

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

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 $a = -0,009985 \text{ MeV}$; $b = 0,064966 \text{ MeV}^{1/2}$; $c = -0,163346 \text{ MeV}^{-1}$.

3. Phương pháp giải tích tính độ dày ăn mòn

Quá trình tán xạ của photon lên vật liệu được xem xét qua ba giai đoạn [5, 6].

Giai đoạn 1: Photon từ nguồn đi đến điểm tán xạ P (đường α). Sự suy giảm cường độ được tính

$$I_1 = I_0 e^{-\left(\frac{\mu(E_0)}{\rho}\right)\rho x} \tag{2}$$

ở đây I_0 và I_1 tương ứng là thông lượng tới và thông lượng truyền qua; ρ là mật độ của vật liệu và E_0 là năng lượng của photon tới.

Giai đoạn 2: Sau khi bị tán xạ, thông lượng photon tại điểm P được tính

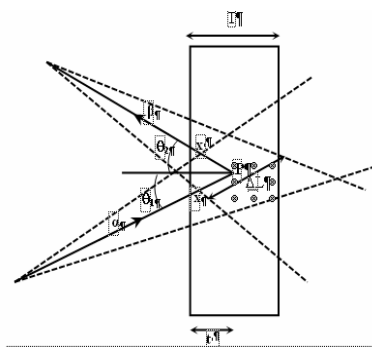
$$I_2 = I_1 \frac{d\sigma(E_0, \Omega)}{d\Omega} S(E_0, \theta, Z) d\Omega \rho_e V \tag{3}$$

$d\sigma(E_0, \Omega)/d\Omega$ là tiết diện tán xạ vi phân được tính theo công thức Klein-

Nishina, $S(E_0, \theta, Z)$ là hàm tán xạ incoherent và $\rho_e = \rho N \frac{Z}{A}$ là mật độ electron tại P.

Giai đoạn 3: Photon sau khi tán xạ tại P đi qua vật liệu và hướng đến detector (đường β)

$$I_3 = I_2 e^{-\left(\frac{\mu(E)}{\rho}\right)\rho x'} \tag{4}$$



Hình 3. Quá trình tán xạ của photon lên vật liệu [5]

Cuối cùng, cường độ tán xạ tại điểm P được tính theo công thức:

$$I(P) = I_0 e^{-\left(\frac{\mu(E_0)}{\rho}\right)\rho x} \frac{d\sigma(E_0, \Omega)}{d\Omega} S(E_0, \theta, Z) d\Omega \rho N \frac{Z}{A} V e^{-\left(\frac{\mu(E)}{\rho}\right)\rho x'} \quad (5)$$

$$\text{Đặt } k = I_0 \frac{d\sigma(E_0, \Omega)}{d\Omega} S(E_0, \theta, Z) d\Omega N \frac{Z}{A} V \quad (6)$$

$$\text{Biểu thức cường độ chùm tán xạ được viết lại: } I(P) = k \rho e^{-\left(\frac{\mu(E_0)}{\rho}\right)\rho x} e^{-\left(\frac{\mu(E)}{\rho}\right)\rho x'} \quad (7)$$

Cường độ mà detector đo được đối với vật liệu có độ dày là T được tính

$$I(P) = k \rho \int_0^T e^{-\left(\frac{\mu(E_0)}{\rho}\right)\rho x} e^{-\left(\frac{\mu(E)}{\rho}\right)\rho x'} dt' = k \rho \frac{1 - e^{-\left(\frac{\mu(E_0)}{\rho}\rho \sec \theta_1 + \frac{\mu(E)}{\rho}\rho \sec \theta_2\right)\rho T}}{\left(\frac{\mu(E_0)}{\rho}\rho \sec \theta_1 + \frac{\mu(E)}{\rho}\rho \sec \theta_2\right)\rho} \quad (8)$$

Với cùng điều kiện đo giống nhau, sự thay đổi cường độ chỉ bắt nguồn từ độ dày vật liệu khác nhau, các thông số khác (thể tích vùng tán xạ, góc θ_1 và θ_2) có thể xem thay đổi không đáng kể nên khi lập tỉ số sẽ loại bỏ được các thông số này.

Đặt $I(P)$ và $I_1(P)$ lần lượt là cường độ chùm tia tán xạ trên vật liệu có độ dày T (chưa bị ăn mòn) và có độ dày T_1 (đã bị ăn mòn). Khi đó biểu thức của T_1 có dạng:

$$T_1 = \frac{1}{a} \ln \left[1 - \frac{I_1(P)}{I(P)} (1 - e^{-aT}) \right] \quad (9)$$

với $a = \left(\frac{\mu(E_0)}{\rho} \frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{\mu(E)}{\rho} \frac{1}{\cos \theta_2} \right) \rho$, $\frac{\mu(E_0)}{\rho}$ và $\frac{\mu(E)}{\rho}$ (cm^2/g) là hệ số suy giảm khối tương ứng với năng lượng E_0 và E , ρ là mật độ của bia tán xạ (vật cần đo độ dày).

Mối quan hệ của E và E_0 được tính theo công thức:

$$E = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (10)$$

Hệ số suy giảm khối và suy giảm tuyến tính toàn phần của các tia gamma trong vật liệu NaI(Tl) được tính bằng chương trình XCOM. [2]

Có thể thấy rằng trong công thức (9), để xác định được độ dày tại vị trí bị ăn mòn của vật liệu (T_1) cần đo được cường độ của chùm tia tán xạ tương ứng với độ dày T_1 và T . Trong công thức (8), khi tính tích phân để tìm cường độ chùm tia tán xạ, chúng tôi chỉ xem cường độ của chùm tia tán xạ thay đổi theo độ dày vật liệu, (chỉ lấy tích phân theo t). Tuy nhiên cường độ chùm tia tán xạ còn phụ thuộc vào các góc θ_1 và θ_2 cũng như thể tích vùng tán xạ. Trong quá trình tính toán, chúng tôi bỏ qua sự phụ thuộc này. Có thể thấy rằng nếu độ dày vật liệu càng lớn thì sự ảnh hưởng của các góc θ_1 , θ_2 và thể tích vùng tán xạ sẽ làm cho kết quả tính toán gặp sai số lớn. Do đó, trong công thức này, chúng tôi sẽ khảo sát các cặp giá trị T và T_1 để việc sử dụng công thức (9) trong tính toán sẽ cho sai số nhỏ.

Sai số của phép đo độ dày ăn mòn (T_1) được tính theo công thức:

$$\sigma_{T_1} = \frac{1 - e^{-aT}}{aI \left[1 - \frac{I_1}{I} (1 - e^{-aT}) \right]} \sqrt{\sigma_{I_1}^2 + \frac{I_1^2}{I^2} \sigma_I^2} \quad (11)$$

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Độ dày bão hòa của vật liệu thép chịu nhiệt đối với năng lượng của tia gamma tới 662 keV

Năng lượng của tia tán xạ Compton với góc tán xạ 135° được tính từ (10) là 288,39 keV.

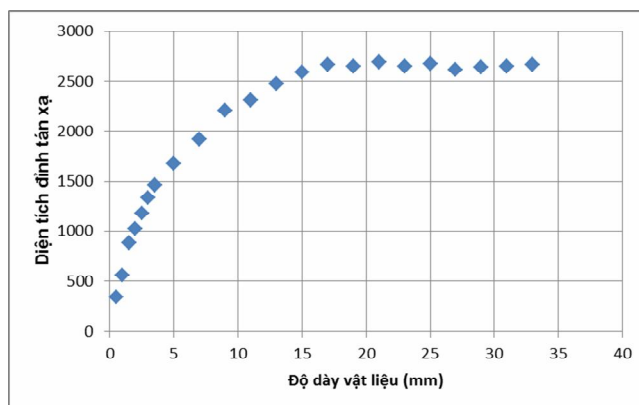
Việc mô phỏng quá trình tán xạ của tia gamma trên vật liệu được thực hiện với các độ dày khác nhau từ 0,5 mm đến 33 mm. Kết quả xác định năng lượng của đỉnh tán xạ được cho trong bảng 1. Các giá trị này nhìn chung lệch nhau trong một khoảng hẹp từ 273,30 keV đến 279,60 keV.

Chương trình Genie 2000 được sử dụng để phân tích phổ và xác định diện tích đỉnh tán xạ (số đếm). Từ các số liệu này, độ dày bão hòa của vật liệu thép chịu nhiệt đối với năng lượng của tia gamma tới 662 keV được xác định là 17 mm. Như vậy, để xác định được độ ăn mòn của vật liệu thép chịu nhiệt dùng tia gamma năng lượng 662 keV chỉ được áp dụng với các tấm thép có độ dày dưới 17 mm.

Bảng 1. Kết quả xác định năng lượng và diện tích đỉnh tán xạ bằng chương trình MCNP5

Phép đo	Độ dày (mm)	Năng lượng (keV) (MCNP)	Diện tích đỉnh tán xạ (N)	Sai số (%)	Phép đo	Độ dày (mm)	Năng lượng (keV) (MCNP)	Diện tích đỉnh tán xạ (N)	Sai số (%)
1	0,5	278,50	343	5,40	12	13,0	274,60	2477	6,73
2	1,0	279,60	556	8,53	13	15,0	274,20	2590	6,45
3	1,5	278,70	882	6,04	14	17,0	274,10	2669	6,27
4	2,0	279,40	1026	6,47	15	19,0	273,80	2649	6,50
5	2,5	279,00	1183	6,68	16	21,0	273,70	2691	6,41
6	3,0	278,50	1340	6,72	17	23,0	273,60	2649	6,69
7	3,5	278,40	1459	6,82	18	25,0	273,50	2673	6,63
8	5,0	277,60	1678	7,75	19	27,0	273,50	2619	6,94
9	7,0	276,60	1920	7,76	20	29,0	273,40	2637	6,90
10	9,0	275,70	2213	7,03	21	31,0	273,40	2650	6,86
11	11,0	275,00	2305	7,21	22	33,0	273,30	2668	6,82

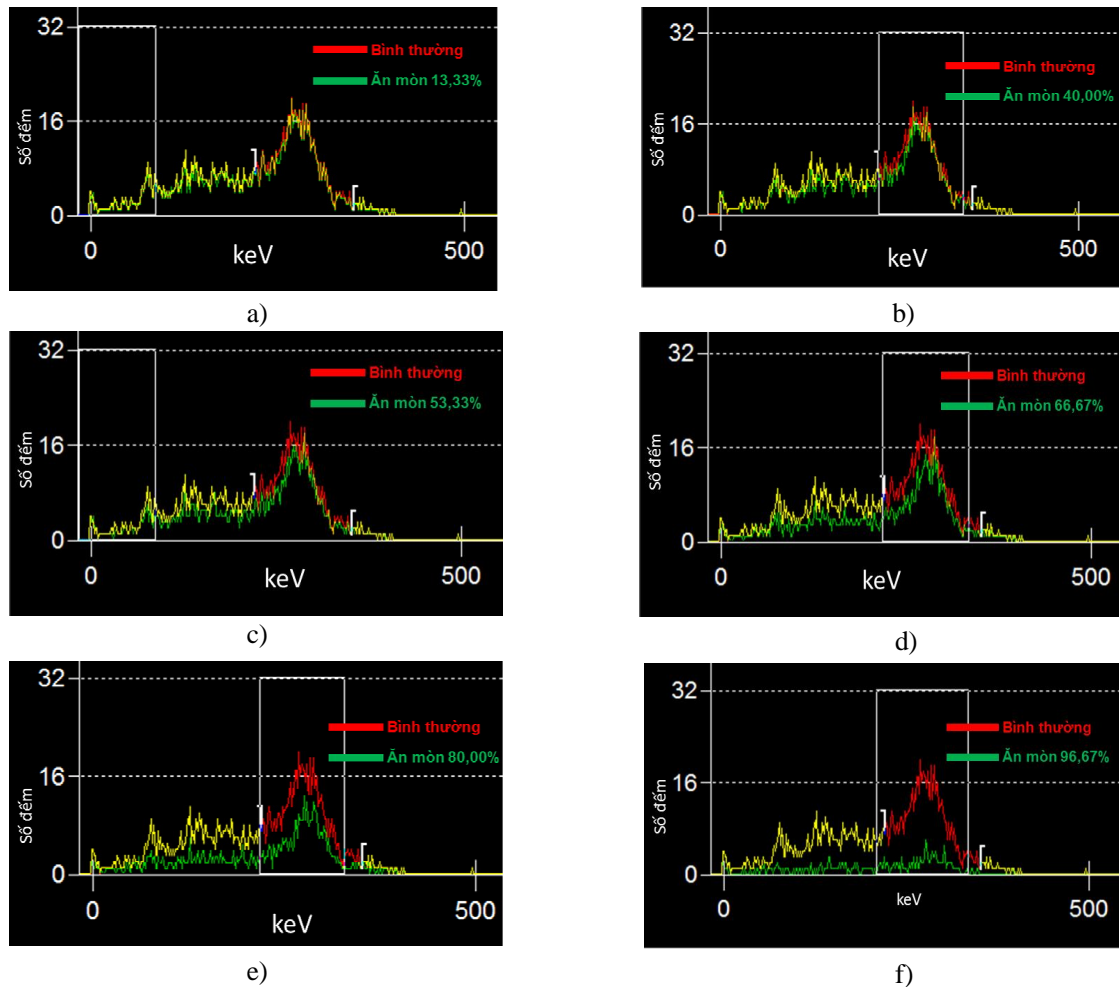
Hình 4 biểu diễn diện tích đỉnh tán xạ tại góc 135° theo độ dày vật liệu đối với tia gamma có năng lượng 662 keV.



Hình 4. Đồ thị biểu diễn diện tích đỉnh tán xạ theo độ dày vật liệu với góc tán xạ 135°

Độ ăn mòn vật liệu

Hình 5a, b, c, d, e, f, g so sánh phổ tán xạ trên vật liệu chưa bị ăn mòn (bình thường) và phổ tán xạ trên vật liệu bị ăn mòn với các giá trị lần lượt là 13,30%, 40,00%, 53,33%, 66,67%, 80,00%, 96,67%



Hình 5. Phổ tán xạ trên vật liệu chưa bị ăn mòn và đã bị ăn mòn các độ ăn mòn 13,33%, 40,00%, 53,33%, 66,67%, 80,00%, 96,67%

Từ các hình 5a, 5b, 5c, 5d, 5e, 5f, có thể thấy rằng, đối với các vật liệu bị ăn mòn 40,00% trở lên, có thể dễ dàng khẳng định được một cách định tính vật liệu bị ăn mòn hay chưa bằng cách quan sát các đỉnh phổ tán xạ. Tuy nhiên, để xác định chính xác vật liệu đó bị ăn mòn bao nhiêu, cần phải tính toán theo công thức (9).

Bảng 2 và 3 trình bày chi tiết kết quả xác định độ dày vật liệu bị ăn mòn với vật liệu chuẩn (vật liệu chưa bị ăn mòn) có các độ dày khác nhau. Dựa trên tỉ số cường độ chùm tán xạ trên vật liệu chuẩn và cường độ chùm tia tán xạ trên vật liệu bị ăn mòn, sử dụng công thức (9) chúng tôi xác định được độ dày còn lại của vật liệu tại vùng bị ăn mòn.

Bảng 2. Kết quả xác định độ dày vật liệu bị ăn mòn với vật liệu chuẩn có độ dày là $T = 1,5 \text{ cm}$ và $T = 1,3 \text{ cm}$

Độ dày của vật liệu chuẩn: $T = 1,5 \text{ cm}$			Độ dày của vật liệu chuẩn: $T = 1,3 \text{ cm}$		
Độ dày thực tế (cm)	Độ dày tính toán (cm)	Độ sai biệt (%)	Độ dày thực tế (cm)	Độ dày tính toán (cm)	Độ sai biệt (%)
0,05	$0,077 \pm 0,007$	54,09	0,05	$0,078 \pm 0,007$	55,63
0,10	$0,130 \pm 0,016$	30,48	0,10	$0,132 \pm 0,016$	31,84
0,15	$0,223 \pm 0,024$	48,60	0,15	$0,225 \pm 0,025$	50,29
0,20	$0,269 \pm 0,031$	34,41	0,20	$0,272 \pm 0,032$	36,00
0,25	$0,323 \pm 0,040$	29,31	0,25	$0,327 \pm 0,041$	30,92
0,30	$0,383 \pm 0,050$	27,76	0,30	$0,388 \pm 0,052$	29,44
0,35	$0,433 \pm 0,060$	23,76	0,35	$0,439 \pm 0,063$	25,47
0,50	$0,538 \pm 0,088$	7,53	0,50	$0,546 \pm 0,092$	9,18
0,70	$0,680 \pm 0,128$	2,90	0,70	$0,692 \pm 0,135$	1,19
0,90	$0,915 \pm 0,209$	1,67	0,90	$0,936 \pm 0,223$	3,97
1,10	$1,014 \pm 0,259$	7,86	1,10	$1,039 \pm 0,279$	5,54
1,30	$1,258 \pm 0,406$	3,23	--	--	--

Bảng 3. Kết quả xác định độ dày vật liệu bị ăn mòn với vật liệu chuẩn có độ dày là $T = 1,1$ cm và $T = 0,9$ cm

Độ dày của vật liệu chuẩn: $T = 1,1$ cm			Độ dày của vật liệu chuẩn: $T = 0,9$ cm		
Độ dày thực tế (cm)	Độ dày tính toán (cm)	Độ lệch (%)	Độ dày thực tế (cm)	Độ dày tính toán (cm)	Độ lệch (%)
0,05	$0,080 \pm 0,008$	59,04	0,05	$0,076 \pm 0,007$	52,95
0,10	$0,135 \pm 0,017$	34,87	0,10	$0,129 \pm 0,016$	29,46
0,15	$0,231 \pm 0,027$	54,05	0,15	$0,221 \pm 0,025$	47,34
0,20	$0,279 \pm 0,034$	39,55	0,20	$0,266 \pm 0,032$	33,22
0,25	$0,336 \pm 0,044$	34,53	0,25	$0,320 \pm 0,041$	28,12
0,30	$0,400 \pm 0,056$	33,22	0,30	$0,380 \pm 0,052$	26,51
0,35	$0,453 \pm 0,068$	29,32	0,35	$0,429 \pm 0,062$	22,50
0,50	$0,565 \pm 0,100$	12,90	0,50	$0,532 \pm 0,090$	6,32
0,70	$0,719 \pm 0,148$	2,73	0,70	$0,671 \pm 0,131$	4,16
0,90	$0,984 \pm 0,255$	9,37	--	--	--

Từ bảng 2 và 3 chúng tôi có nhận xét rằng: với vật liệu chuẩn có các độ dày 1,5 cm, 1,3 cm, 1,1 cm và 0,9, sử dụng công thức (9) để xác định độ dày của vật liệu bị ăn mòn với độ dày của nó còn lại từ 0,5 cm trở trên (xem như bị ăn mòn 66,67%) thì kết quả tính toán độ dày vật liệu có độ sai biệt ở cả bốn trường hợp đều dưới 13% so với độ dày thực tế của nó. Riêng trường hợp sử dụng vật liệu chuẩn có độ dày 1,5 cm, độ sai biệt là dưới 10%. Trong khi đó đối với độ ăn mòn trên 66,67%, việc xác định chính xác độ dày của vật liệu tại vùng bị ăn mòn gặp khó khăn vì sai số lớn (trên 29%). Trong trường hợp này, để có thể đo được độ dày với độ ăn mòn lớn, cần phải giảm đường kính của collimator nguồn và detector. Tuy nhiên, việc này làm giảm số đếm tán xạ ghi nhận được nên nguồn sử dụng để đo cần phải có hoạt độ lớn.

5. Kết luận

Trong công trình này, bằng cách sử dụng phương pháp Monte Carlo, chúng tôi đã tìm được độ dày bão hòa của vật liệu thép chịu nhiệt đối với tia gamma tới năng lượng 662 keV là 17mm. Bên cạnh đó, dựa trên kết quả mô phỏng và tính toán bằng phương pháp giải tích, chúng tôi cũng thấy rằng với mô hình đưa ra trong mô phỏng hoàn toàn có thể dựa vào tỉ số giữa số đếm tán xạ trên vật liệu chuẩn và vật liệu bị ăn mòn để xác định được độ dày của vật liệu bị ăn mòn từ 5 mm trở lên và sai số mắc phải trong trường hợp này là dưới 10%. Kết quả này là cơ sở để chúng tôi thực hiện các nghiên cứu sâu hơn về phương pháp xác định độ dày ăn mòn của vật liệu trong đó chú ý đến các tham số hiệu chỉnh như hiệu chỉnh sự đóng góp của tán xạ nhiều lần vào phổ tán xạ, hiệu chỉnh sự thay đổi thể tích vùng tán xạ do vật liệu có độ dày khác nhau,...

Ngoài ra, từ kết quả của quá trình mô phỏng cũng chỉ ra rằng, bằng cách so sánh phổ tán xạ trên vật liệu chuẩn và vật liệu đã bị ăn mòn có thể thiết kế một hệ đo online chỉ ra được vị trí ăn mòn trên vật liệu với độ ăn mòn từ 40% trở lên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Anjos M.J., Lopes R.T. and Borges J.C. (1989), “Compton scattering of gamma-rays as surface inspection technique”, *Nucl. Inst. Meth.*, A280, pp. 535 – 538.
2. Berger M.J., Hubbell J.H., Seltzer S.M. (1999), Chang J., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S., and Olsen K., XCOM version 3.1, NIST Standard Reference Database 8 (XGAM).
3. Lopes R. T., Valente C. M., De Jesus E. F. O. and Camerini C. S. (1997), “Detection of paraffin deposition inside a draining tubulation by the compton scattering technique”, *Appl. Radiat. Isot.* 48, pp. 1443 – 1450.
4. Perez-Andujar A., Pibida L. (2004), “Performance of CdTe, HPGe and NaI(Tl) detectors for radioactivity measurements”, *Appl. Radiat. Isot.*, 60, pp 41 – 47.
5. 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 .
6. Priyada P., Margret M., Ramar R. (2012), Shivaramu, “Intercomparison of gamma ray scattering and transmission techniques for fluid–fluid and fluid–air interface levels detection and density measurements”, *Appl. Radiat. Isot.*, 70, pp. 462 – 469.

7. Salgado C.M., Brandão L.E.B., Schirru R., Pereira C.M.N.A. (2012), Conti C.C., “Validation of NaI(Tl) detector’s model developed with MCNP-X code”, *Progress in Nuclear Energy* 59, pp. 19–25.
8. Shi Hu-Xia, Chen Bo-Xian, Li Ti-Zhu, Yun Di (2002), “Precise Monte Carlo simulation of gamma-ray response functions for an NaI(Tl) detector”, *Appl. Radiat. Isot.*, 57, pp. 517 – 524,
9. 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: 07-3-2013; ngày phản biện đánh giá: 22-5-2013;
ngày chấp nhận đăng: 21-6-2013)