



TÍNH TOÁN HIỆU ỨNG TRÙNG PHÙNG TỔNG CỦA ĐẦU DÒ HPGe VÀ HIỆU ỨNG TỰ HẤP THỤ GAMMA TRONG MẪU BẰNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG MONTE CARLO

Phù Chí Hòa¹, Phạm Ngọc Sơn^{2*}, Đỗ Thị Kim Tuyền¹

¹Trường Đại học Đà Lạt

²Viện Nghiên cứu hạt nhân, Đà Lạt

Ngày Tòa soạn nhận được bài: 25-12-2016; ngày phân biên đánh giá: 03-3-2017; ngày chấp nhận đăng: 19-6-2017

TÓM TẮT

Trong bài báo này, chương trình GEANT4 đã được sử dụng để mô phỏng đầu dò HPGe-PGNAA của Viện Nghiên cứu Hạt nhân (Đà Lạt) nhằm xác định hiệu suất ghi, hệ số hiệu chỉnh trùng phùng thực, cũng như sự thay đổi của hiệu suất, hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng theo khoảng cách giữa nguồn và đầu dò đối với nguồn Eu-152 trong vùng năng lượng bức xạ gamma từ 121.8 keV đến 1408 keV. Ngoài ra, chương trình GEANT4 còn được dùng để xác định hệ số tự hấp thụ gamma trong các mẫu nhôm, sắt, đồng, polyethylene với năng lượng gamma bằng 81 keV, 661.6 keV, 1332.5 keV.

Từ khóa: GEANT4, hiệu suất detector HPGe, hệ số trùng phùng thực, tự hấp thụ gamma.

ABSTRACT

Calculations of effects for summing coincidence of HPGe detector and gamma self – absorption in samples by using the Monte Carlo simulation method

In this paper, the GEANT4 toolkit was used to simulate the HPGe detector in the PGNAA spectrometer at the Dalat Nuclear Research Institute for determination of the detector efficiency, summing coincidence correction factors. The simulations were carried out with different distances from source to detector using a Eu-152 standard source for the range of gamma energies from 121.8 keV to 1408 keV. In addition, the GEANT4 toolkit was also used to calculate the gamma self-absorption factors in the aluminum, iron, copper and polyethylene samples within 81 keV, 661.6 keV and 1332.5 keV.

Keywords: GEANT4, HPGe detector efficiency, true coincidence factor, self - absorption.

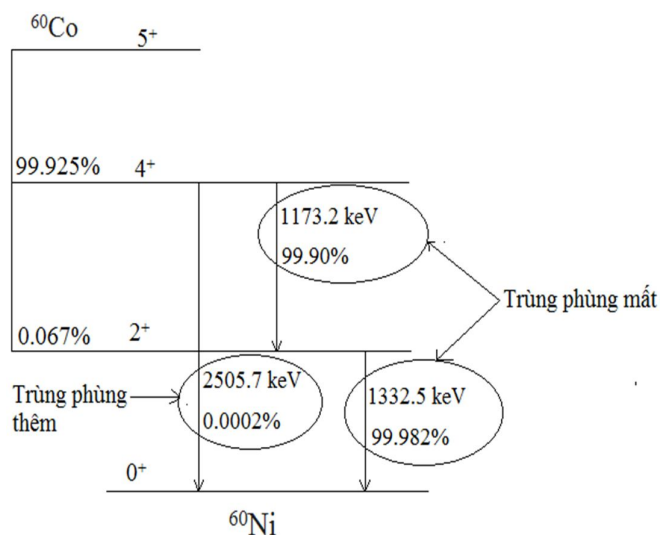
1. Tổng quan

Tính toán mô phỏng Monte Carlo là phương pháp hiệu quả và ít tốn kém để nghiên cứu các quá trình ngẫu nhiên bằng cách thực hiện mô phỏng trên máy tính [1]. Trong lĩnh vực ghi đo bức xạ hạt nhân, tính toán xác định hiệu suất ghi tuyệt đối và các hiệu ứng tự hấp thụ photon, trùng phùng tổng xảy ra trong đầu dò bán dẫn siêu tinh khiết HPGe bằng phương pháp mô phỏng Monte Carlo nhằm nâng cao độ chính xác đối với các hình học đo mẫu khác nhau là yêu cầu đang được đặt ra tại nhiều phòng thí nghiệm của trung tâm vật lí

* Email: pnsn.nri@gmail.com

và điện tử hạt nhân. Xuất phát từ yêu cầu thực tế này, bài viết được thực hiện với mục tiêu tính toán mô phỏng, xác định các tham số hiệu chỉnh hiệu ứng trùng phùng tổng, tự hấp thụ photon và hiệu suất ghi tuyệt đối của đầu dò bán dẫn siêu tinh khiết HPGe bằng chương trình Monte Carlo GEANT4.

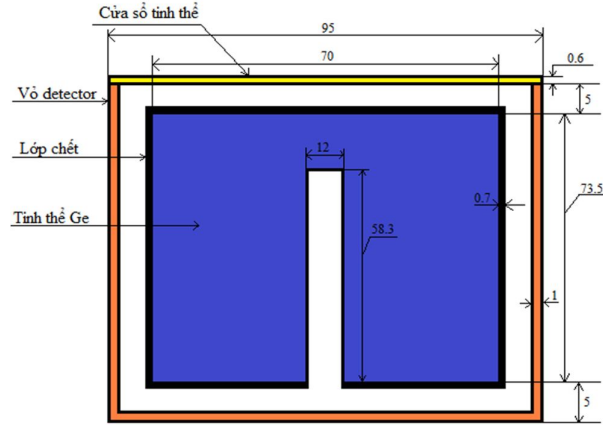
Hiệu ứng trùng phùng tổng xảy ra khi hai hoặc nhiều tia gamma (hoặc tia gamma và tia X) phát ra từ một hạt nhân và được ghi nhận trong thời gian phân giải của đầu dò. Kết quả là, đầu dò không thể phân biệt được giữa các tương tác và xử lý chúng như là một xung duy nhất. Điều này dẫn đến mất số đếm từ các đỉnh năng lượng của từng tia gamma và tăng thêm số đếm tại đỉnh năng lượng tổng của các tia gamma đó. Trùng phùng tổng được chia thành hai loại: Trùng phùng mất (cường độ đỉnh giảm), trùng phùng thêm (cường độ đỉnh tăng) [2], [3], [4].



Hình 1. Sơ đồ phân rã β của ^{60}Co , và hiệu ứng trùng phùng thực

Đối với nguồn thể tích hay mẫu đo có độ dày lớn thì một số tia gamma phát ra bị hấp thụ trong mẫu. Kết quả là số tia gamma được đầu dò ghi nhận giảm. Hiện tượng này gọi là sự tự hấp thụ (hay tự suy giảm) của gamma trong mẫu. Mức độ tự hấp thụ phụ thuộc vào thành phần, mật độ, kích thước của mẫu và năng lượng tia gamma [2], [3], [4].

Đầu dò dùng trong mô phỏng có kí hiệu là GR7023, là loại đầu dò đồng trục loại n có dạng như Hình 2 bao gồm tinh thể Ge hình trụ chữ U có đường kính ngoài 70 mm, chiều cao 73,5 mm. Bên trong tinh thể có một hốc hình trụ đường kính 12 mm, độ sâu của hốc là 58,3 mm.



Hình 2. Thông số kích thước cấu trúc tinh thể detector HPGe model GR7023
(kích thước theo mm)

Nguồn chuẩn điểm ^{152}Eu được đặt trên trục của đầu dò HPGe tại các vị trí: Sát mặt detector đến cách mặt detector 5 cm.

2. Phương pháp tính toán

Hiệu suất ghi tuyệt đối của đầu dò được xác định bằng công thức:

$$\varepsilon_{abs} = \varepsilon_{int} \left(\frac{\Omega}{4\pi} \right) \quad (1)$$

$$\text{Với } \varepsilon_{int} = \frac{N}{N_0} \quad (2)$$

trong đó, ε_{abs} là hiệu suất ghi tuyệt đối, ε_{int} là hiệu suất ghi nội, Ω là góc khối ($\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta)$), θ là góc phân bố (góc thiên đỉnh), N là số bức xạ được đầu dò ghi nhận, N_0 là số bức xạ từ nguồn đến detector theo góc khối Ω .

Sai số thống kê $\delta\varepsilon / \varepsilon$ (%) trong tính toán hiệu suất bằng phương pháp mô phỏng Monte - Carlo được xác định bằng biểu thức:

$$\frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\sqrt{N}}{N} \quad (3)$$

trong đó, N là số photon phát ra từ nguồn để lại toàn bộ năng lượng (hay một phần năng lượng) của nó trong thể tích vùng hoạt của đầu dò.

Hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng được xác định bằng tỉ số giữa hiệu suất ghi tuyệt đối của đầu dò khi sử dụng nguồn chuẩn điểm đơn năng lượng và đa năng lượng:

$$k = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (4)$$

với k : hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng,

ε_1 : hiệu suất ghi tuyệt đối của đầu dò khi sử dụng nguồn đơn năng lượng,

ε_2 : hiệu suất ghi tuyệt đối của đầu dò khi sử dụng nguồn đa năng lượng.

Hệ số hiệu chỉnh tự hấp thụ gamma trong mẫu được xác định bằng tỉ số giữa số đếm thu được khi có sự tự hấp thụ trên số đếm thu được khi không có sự tự hấp thụ:

$$f = \frac{C}{C_0} \quad (5)$$

trong đó, f là hệ số hiệu chỉnh sự tự hấp thụ, C là số đếm tính được khi mẫu có độ dày hữu hạn, C_0 là số đếm tính được khi mẫu có bề dày mỏng lí tưởng.

3. Kết quả và thảo luận

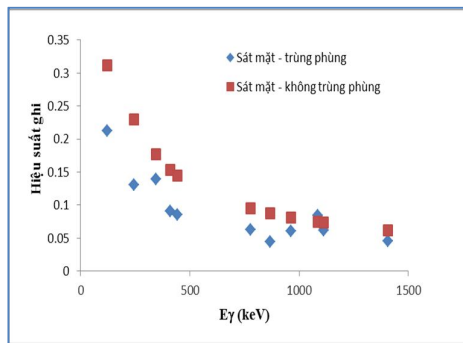
3.1. Hiệu suất ghi, hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng

Bảng 1. Kết quả tính toán hiệu suất ghi và hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng (k)

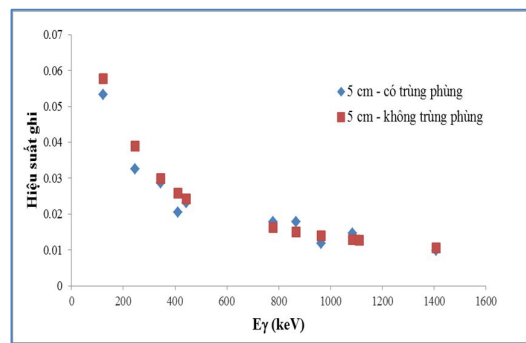
Sát mặt detector				
E_γ (keV)	ε_1	$\delta\varepsilon_1/\varepsilon_1$ (%)	ε_2	k
121.8	0.3112	0.1793	0.2124	1.4656
244.7	0.2302	0.2084	0.1304	1.7660
344	0.1766	0.2380	0.1394	1.2663
411	0.1534	0.2553	0.0908	1.6894
444	0.1442	0.2633	0.0855	1.6859
778.9	0.0950	0.3244	0.0628	1.5128
867.4	0.0877	0.3377	0.0445	1.9699
964	0.0808	0.3519	0.0603	1.3398
1085.8	0.0748	0.3656	0.0841	0.8901
1112	0.0730	0.3700	0.0619	1.1799
1408	0.0612	0.4041	0.0458	1.3367
Cách mặt detector 3 cm				
E_γ (keV)	ε_1	$\delta\varepsilon_1/\varepsilon_1$ (%)	ε_2	k
121.8	0.1053	0.2179	0.0961	1.0952
244.7	0.0696	0.2681	0.0597	1.1653
344.3	0.0526	0.3082	0.0493	1.0674
411.1	0.0455	0.3315	0.0371	1.2261
444	0.0428	0.3419	0.0349	1.2273
778.9	0.0280	0.4223	0.0238	1.1803
867.4	0.0261	0.4374	0.0198	1.3200
964.1	0.0244	0.4529	0.0217	1.1221
1085.8	0.0220	0.4768	0.0238	0.9242
1112.1	0.0217	0.4805	0.0216	1.0046
1408	0.0182	0.5238	0.0179	1.0187

Cách mặt detector 5 cm

E_γ (keV)	ϵ_1	$\delta\epsilon_1/\epsilon_1$ (%)	ϵ_2	k
121.8	0.0577	0.2945	0.0534	1.0806
244.7	0.0390	0.3582	0.0325	1.2009
344	0.0299	0.4089	0.0286	1.0463
411	0.0258	0.4403	0.0206	1.2550
444	0.0242	0.4545	0.0232	1.0423
778.9	0.0163	0.5539	0.0179	0.9111
867.4	0.0151	0.5759	0.0179	0.8417
964	0.0139	0.5999	0.0118	1.1725
1085.8	0.0128	0.6245	0.0147	0.8715
1112	0.0126	0.6299	0.0127	0.9941
1408	0.0106	0.6872	0.0098	1.0822

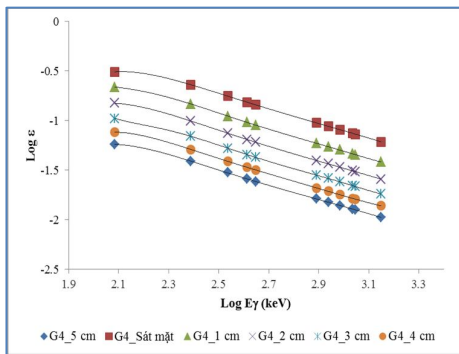


a) Sắt mật detector

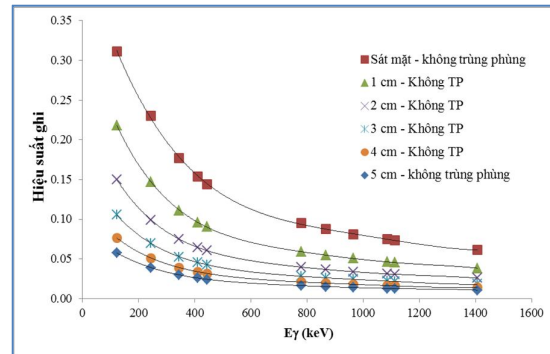


b) Cách mặt detector 5 cm

Hình 3. Kết quả mô phỏng hiệu suất ghi theo chuẩn đơn năng lượng và đa năng lượng

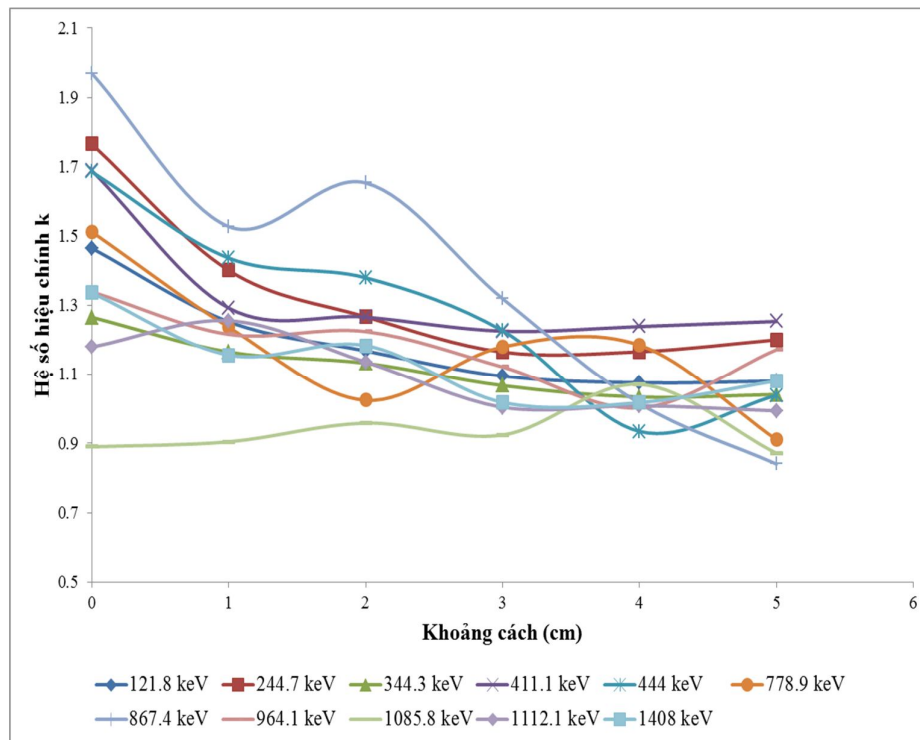


a) Theo thang Logarit



b) Theo giá trị tuyệt đối

Hình 4. Đường cong hiệu suất ghi theo năng lượng sau khi hiệu chỉnh tại sắt mật detector và cách mặt detector 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm và 5 cm



Hình 5. Đồ thị biểu diễn sự thay đổi của hệ số hiệu chỉnh trùng phù hợp tính toán đối với các đường cong hiệu suất tại các khoảng cách khác nhau từ detector đến mẫu

Từ các kết quả thu được cho thấy đường cong hiệu suất theo năng lượng thay đổi khá rõ khi khoảng cách từ nguồn đến đầu dò thay đổi. Hiệu suất càng lớn khi khoảng cách càng gần. Hiệu suất ở khoảng cách sát mặt detector là khác biệt nhiều so với khoảng cách 5 cm. Điều này được giải thích là do khi nguồn để càng xa đầu dò thì góc khối thu nhận bức xạ càng giảm, tia gamma trải qua nhiều tương tác hơn với môi trường xung quanh trước khi đến vùng nhạy của detector và ngoài ra còn do sự hấp thụ bức xạ của không khí trên đường đi.

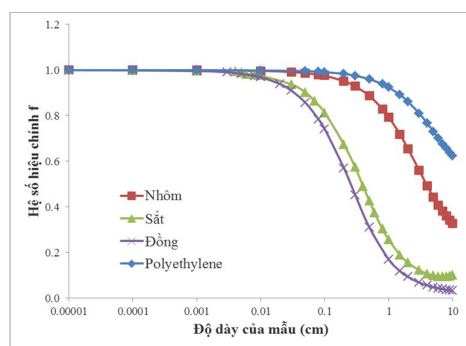
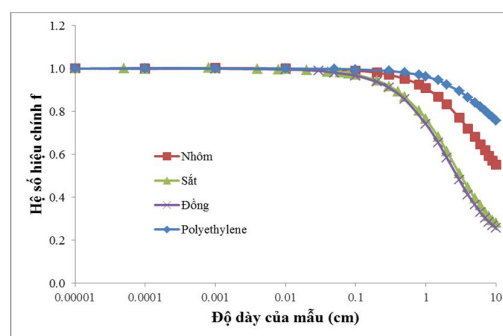
Tại các vị trí gần detector, có sự sai biệt lớn giữa hiệu suất mô phỏng sử dụng nguồn đơn năng lượng và đa năng lượng. Nguyên nhân là do trùng phù hợp tổng của các năng lượng bức xạ gamma, làm mất số đếm tại các đỉnh năng lượng bức xạ gamma. Khoảng cách từ nguồn đến detector càng tăng, sai biệt này càng giảm. Qua khảo sát mô phỏng, khi nguồn ^{152}Eu được đặt cách mặt detector trên 4 cm thì có thể bỏ qua hiện tượng trùng phù hợp tổng.

3.2. Hệ số tự hấp thụ gamma trong mẫu

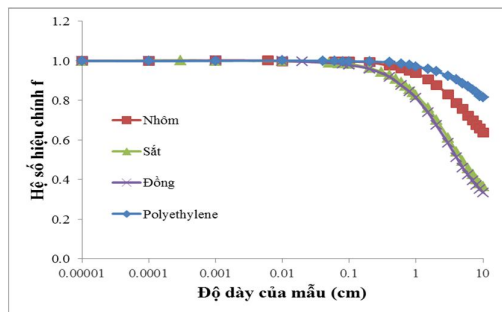
Nguồn chuẩn hình trụ đơn năng với bán kính không đổi 7 mm được đặt trên trục của đầu dò HPGe nhằm khảo sát sự phụ thuộc của hệ số tự hấp thụ gamma theo loại vật liệu (mẫu), độ dày của vật liệu và năng lượng tia gamma.

Bảng 2. Hệ số tự hấp thụ gamma thay đổi theo độ dày của các vật liệu nhôm, sắt, đồng và polyethylene với E_γ bằng 81 keV, 661.6 keV và 1332.5 keV

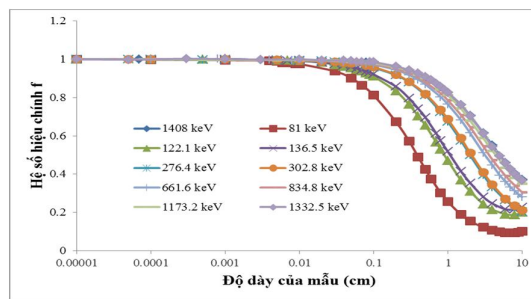
E_γ (keV)	Độ dày của mẫu (cm)	Vật liệu			
		Nhôm	Sắt	Đồng	Polyethylene
81	0.0001	0.9998	0.9987	0.9998	1.0001
	0.001	0.9996	0.9956	0.9967	0.9999
	0.01	0.9970	0.9763	0.9693	0.9988
	0.1	0.9761	0.8133	0.7416	0.9916
	1	0.7944	0.2562	0.1697	0.9247
	10	0.3279	0.1003	0.0320	0.6231
661.6	0.0001	1.0023	0.9992	0.9994	1.0020
	0.001	1.0026	1.0001	0.9996	1.0012
	0.01	1.0001	0.9975	0.9956	1.0004
	0.1	0.9899	0.9724	0.9671	0.9966
	1	0.9099	0.7650	0.7420	0.9630
	10	0.5530	0.2808	0.2587	0.7579
1332.5	0.0001	1.0003	1.0032	1.0003	0.9986
	0.001	1.0030	1.0010	1.0019	1.0001
	0.01	0.9978	0.9995	0.9999	1.0019
	0.1	0.9964	0.9859	0.9790	0.9980
	1	0.9394	0.8276	0.8124	0.9719
	10	0.6383	0.3652	0.3346	0.8157

a) $E_\gamma = 81$ keVb) $E_\gamma = 661.6$ keV

Hình 6 (a,b). Sự phụ thuộc của hệ số hiệu chỉnh f theo độ dày của mẫu với E_γ bằng a) 81 keV, b) 661.6 keV trong các vật liệu nhôm, sắt, đồng và polyethylene



Hình 7. Sự phụ thuộc của hệ số hiệu chỉnh f theo độ dày của mẫu với E_γ bằng 1332.5 keV trong các vật liệu nhôm, sắt, đồng và polyethylene



Hình 8. Sự phụ thuộc của hệ số hiệu chỉnh f theo độ dày của vật liệu sắt trong vùng năng lượng gamma từ 81 keV đến 1408 keV

Bảng 3. Hệ số tự hấp thụ gamma thay đổi theo độ dày của vật liệu sắt trong vùng năng lượng gamma từ 81 keV đến 1408 keV

E_γ (keV)	Độ dày của mẫu (cm)					
	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10
81	0.9987	0.9956	0.9763	0.8133	0.2562	0.1003
122.1	0.9992	0.9958	0.9933	0.9117	0.4715	0.2000
136.5	1.0000	1.0001	0.9917	0.9220	0.5180	0.2277
276.4	0.9995	0.9990	0.9949	0.9568	0.6748	0.2024
302.8	0.9993	0.9999	0.9944	0.9600	0.6868	0.2112
661.6	0.9992	1.0001	0.9975	0.9724	0.7650	0.2808
834.8	1.0012	1.0013	0.9996	0.9771	0.7861	0.3052
1173.2	1.0010	0.9976	0.9950	0.9800	0.8122	0.3491
1332.5	1.0032	1.0010	0.9995	0.9859	0.8276	0.3652
1408	0.9992	1.0024	0.9941	0.9797	0.8258	0.3716

Khi tăng độ dày của mẫu, hiệu ứng tự hấp thụ gamma trong mẫu càng lớn. Nguyên nhân là do số tia gamma bị hấp thụ trong chính vật liệu (mẫu) đó càng nhiều trước khi thoát ra khỏi vật liệu để đến được detector, làm cho số bức xạ gamma được detector ghi nhận giảm.

Với cùng một năng lượng của bức xạ gamma, sắt và đồng hấp thụ năng lượng của bức xạ gamma nhiều hơn nhôm và polyethylene. Nguyên nhân là do sắt và đồng là hai vật liệu có số nguyên tử Z và mật độ ρ của vật chất cao hơn. Polyethylene là vật liệu hấp thụ năng lượng bức xạ gamma kém nhất trong 4 loại vật liệu được khảo sát ở trên do mật độ vật chất thấp nhất ($\rho = 0.94 \text{ g/cm}^3$).

4. Kết luận

Trong bài báo này, chương trình mô phỏng Monte Carlo GEANT4 đã được dùng để khảo sát đường cong hiệu suất đỉnh theo năng lượng của hệ đầu dò HPGe-PGNAA tại Trung tâm Vật lí và Điện tử - Viện Nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt. Các kết quả mô phỏng đã xác định được hiệu suất ghi tuyệt đối, hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng. Ngoài ra, sự phụ thuộc của hệ số tự hấp thụ gamma trong các loại vật liệu khác nhau với độ dày thay đổi theo mật độ và năng lượng bức xạ gamma khác nhau cũng đã được khảo sát.

Các kết quả đạt được có ý nghĩa trong việc hỗ trợ cho người làm thực nghiệm xây dựng đường cong hiệu suất theo năng lượng có độ chính xác tốt trong điều kiện không có nhiều nguồn chuẩn. Hiệu chỉnh hiệu ứng tự hấp thụ gamma trong mẫu hoàn toàn có thể được thực hiện bằng mô phỏng nhằm chính xác hóa kết quả ghi đo bức xạ gamma của hệ phổ kế PGNA.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Geant4 Collaboration, *Geant4 User's Guide for Application Developers*. Version: geant4 10.0, 6 December, 2013.
- [2] K. Debertin and R.G. Helmer, *Gamma And X-Ray Spectrometry With Semiconductor Detectors*. North-Holland, Amsterdam, 1988.
- [3] Nguyễn Xuân Hải, *Đầu dò bán dẫn và ứng dụng*. Viện Năng lượng Nguyên tử Việt Nam, Hà Nội, 2010.
- [4] Sjoerd J. Gelsema, *Advanced γ -ray spectrometry dealing with coincidence and attenuation effects*. Delft University Press, Netherlands, 2001.
- [5] Tim Vidmar, Matjaž Korun, Branko Vodenik, "A method for calculation of true coincidence summing correction factors for extended sources," *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 65, Issue 2, pp.243–246, 2007.