

Tính toán hiệu suất tổng và hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần của đầu dò NaI(Tl) sử dụng mô phỏng Monte Carlo và thực nghiệm

Lê Quang Vương^{1*} và Bùi Minh Lộc²

¹Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh

²Trường Đại học Tôn Đức Thắng

TÓM TẮT

Trong công việc này, chúng tôi khảo sát hiệu suất tổng và hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần của đầu dò NaI(Tl) với nguồn chuẩn phát gamma ^{137}Cs (661.7 keV) mà không sử dụng che chắn phòng môi trường. Nguồn chuẩn đặt tại các vị trí khác nhau trên trục đối xứng của đầu dò, với các khoảng cách từ 0 mm đến 200 mm, mỗi bước tăng 20 mm. Song song đó, cấu trúc hình học của hệ đo thực nghiệm được mô phỏng Monte Carlo bằng chương trình MCNP5. Một sự phù hợp tốt đã đạt được giữa kết quả tính toán bằng mô phỏng và thực nghiệm, với độ sai biệt trung bình 1.8% đối với hiệu suất đỉnh và 13.2% đối với hiệu suất tổng. Cuối cùng, quy trình phân tích hoạt độ bao gồm đường chuẩn hiệu suất đỉnh mô phỏng và hiệu chỉnh trùng phùng được sử dụng để xác định hoạt độ của các đồng vị phóng xạ trong mẫu tham khảo. Các kết quả kiểm định IAEA đều đạt mức "A - Chấp nhận" chứng minh rằng quy trình phân tích là đáng tin cậy.

Từ khóa: đầu dò NaI(Tl), MCNP5, hiệu suất đỉnh, hiệu suất tổng, hoạt độ phóng xạ

1. MỞ ĐẦU

Đầu dò nhấp nháy với tinh thể NaI(Tl) (sodium iodide) được sử dụng rộng rãi trong các phép đo hoạt độ mẫu môi trường [1], mật độ chất lỏng [2], kiểm tra bề dày vật liệu [3],... Trong điều kiện đo nhất định, chất lượng của các kết quả phân tích phụ thuộc vào độ chính xác của đường chuẩn hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần (hiệu suất đỉnh) của đầu dò [4]. Tuy nhiên, các phòng thí nghiệm vừa và nhỏ với số lượng nguồn chuẩn hạn chế thường rất khó xác định đường chuẩn hiệu suất đỉnh bằng các phép đo thực nghiệm. Mô phỏng Monte Carlo với các chương trình máy tính như MCNP5 (Monte Carlo N-Particle) [5], GEANT4 (Geometry And Tracking) [6], Hybrid Monte Carlo (kết hợp Monte Carlo và tính toán giải tích) [7],... là giải pháp thay thế phù hợp.

Amgrou và cộng sự [8] sử dụng MCNP-X (Monte Carlo N-Particle eXtended) để mô phỏng hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò NaI(Tl) cho các phép đo suất liều. Độ chính xác trong các mô phỏng MCNP-X được kiểm tra và chuẩn hóa bằng dữ liệu thực nghiệm với nguồn tham khảo tiêu chuẩn, với một bố trí hình học đo nguồn - đầu dò xác định. Baccouche và cộng sự [9] đã sử dụng GEANT4 để xây dựng đường chuẩn hiệu suất đỉnh cho đầu dò NaI(Tl) và CsI(Tl). Kết quả thể hiện sự phù hợp tốt giữa mô phỏng và thực nghiệm với độ sai biệt tương đối là nhỏ hơn 4%. Tâm và cộng sự [10] nghiên cứu phương pháp Hybrid Monte Carlo để xác định hiệu suất tổng và hiệu suất nội của đầu dò NaI(Tl). Tekin và cộng sự [11] đã sử dụng mô phỏng MCNP-X để xây

Tác giả liên hệ: ThS. Lê Quang Vương
Email: vuonglq@hcmue.edu.vn

dựng đường chuẩn hiệu suất đỉnh của đầu dò NaI(Tl) và đánh giá hệ số suy giảm tuyến tính của mẫu vật liệu xây dựng. Bên cạnh đó, các phép đo hiện trường đòi hỏi phải đơn giản hóa công việc bố trí thiết bị nguồn - đầu dò - che chắn chì nhằm giảm kích thước và trọng lượng của hệ thiết bị. Đối với một phép đo phổ gamma xác định, hiệu suất đỉnh của đầu dò phụ thuộc vào góc khối, khoảng cách nguồn - đầu dò,... Thanh và cộng sự [12] đã nghiên cứu sự phụ thuộc của hiệu suất đỉnh vào góc khối trong phép đo thùng thải. Các phép đo phổ gamma thực nghiệm của nguồn ^{137}Cs được tiến hành với đầu dò NaI(Tl) được bọc xung quanh bởi một khối chì hình trụ nhằm giảm phơi nhiễm môi trường. Mặt trước của đầu dò được chuẩn trực bởi một khe ngang rộng 1.0 cm, dài 8.5 cm có công dụng định vị điểm phát nguồn bức xạ đồng trục với đầu dò, và che đi các đoạn góc thu nhận bức xạ không mong muốn. Hiệu suất đỉnh của đầu dò NaI(Tl) được mô phỏng bằng chương trình MCNP5 và GEANT4 thể hiện sự phù hợp tốt với thực nghiệm. Độ sai biệt lớn nhất giữa mô phỏng và thực nghiệm là nhỏ hơn 30%. Chương và cộng sự [3] tiến hành xác định bề dày các tấm nhôm bằng cách sử dụng đầu dò NaI(Tl) với một khối chì bao bọc xung quanh để che chắn phơi nhiễm môi trường và nguồn chuẩn hoạt độ thấp ^{137}Cs (hoạt độ khoảng $1\mu\text{Ci}$). Nhóm tác giả sử dụng mô phỏng MCNP5 để đánh giá độ tin cậy của phương pháp. Độ sai biệt tương đối là nhỏ hơn 5% giữa kết quả xác định bề dày tính toán từ mô phỏng và thực nghiệm.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi khảo sát hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần và hiệu suất tổng của đầu dò NaI(Tl) với nguồn chuẩn dạng đĩa ^{137}Cs (661.7 keV) đặt tại các vị trí khác nhau, trên trục đối xứng và cách mặt đầu dò từ 0 mm đến 200 mm, không sử dụng cấu hình che chắn phơi nhiễm môi trường. Một sự phù hợp tốt giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng MCNP5 với độ sai biệt trung bình 1.8% và 13.2%, tương

ứng đối với hiệu suất đỉnh và hiệu suất tổng. Tiếp theo, cấu hình mô phỏng này được sử dụng để xây dựng đường chuẩn hiệu suất tổng, hiệu suất đỉnh trong vùng năng lượng từ 46.5 keV đến 1,836.1 keV, và tính toán hệ số hiệu chỉnh trùng phùng cho các đồng vị phóng xạ phát nhiều gamma, bao gồm ^{60}Co (1,173.2 keV; 1,332.5 keV) và ^{22}Na (511 keV; 1,274.5 keV). Cuối cùng, chúng tôi sử dụng quy trình phân tích bao gồm hệ số hiệu chỉnh trùng phùng để xác định hoạt độ của đồng vị phóng xạ trong các mẫu tham khảo. Kết quả tính toán hoạt độ được đánh giá bằng kiểm định IAEA.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

Hệ phổ kế gamma thực nghiệm

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng hệ phổ kế GAMMA-RAD do hãng Amptek sản xuất và cung cấp năm 2007. Tinh thể nhấp nháy NaI(Tl) là một khối trụ có kích thước 760 mm x 760 mm (đường kính và chiều dài) kết nối với ống nhân quang điện (PMT, Photomultiplier tube) thành một khối hoàn chỉnh. Bộ xử lý xung kỹ thuật số DP5G (Digital Pulse Processor) được tối ưu hóa khả năng phân biệt hình dạng xung, nhạy hơn với tín hiệu nhấp nháy. Khối phân tích biên độ đa kênh (MCA, Multi-channel analyzer) được thiết lập với 8,192 kênh để ghi nhận năng lượng đến 3,000 keV. Tại năng lượng 662 keV, độ phân giải danh định theo nhà sản xuất cung cấp là dưới 7% [13]. GAMMA RAD kết nối với máy tính thông qua cáp USB, ống nhân quang điện được cung cấp cao thế làm việc 800 V. Việc thiết lập thông số hoạt động và xử lý tín hiệu ghi nhận được thực hiện bằng phần mềm ADMCA (Analog and Digital Multi-channel Analyzer). Sau một thời gian dài sử dụng thì hệ ống nhân quang điện (PMT) bị suy giảm phẩm chất và giảm hiệu suất thu góp electron từ tinh thể nhấp nháy NaI(Tl) đến các dynode, dẫn đến tăng thời gian chết và ảnh hưởng đến kết quả ghi nhận phổ gamma. Phần mềm ADMCA sẽ tự động hiệu chỉnh thời

gian chết cho phổ gamma.

Nguồn chuẩn và các mẫu tham khảo (ký hiệu S_1 , S_2) được cung cấp bởi Spectrum Techniques (Model RSS 8 EU), tháng 12 năm 2007, có dạng đĩa với đường kính ngoài 25.4 mm, chiều cao ngoài 2.54 mm. Một hốc có đường kính 5.0 mm nằm cách bề mặt 2.0 mm được phủ hợp chất chứa đồng vị phóng xạ và đậy kín bằng vật liệu epoxy. Lớp vỏ ngoài được chế tạo bằng plastic. Nguồn chuẩn (^{137}Cs , hoạt độ $27,845 \pm 835$ Bq tại thời điểm đo tháng 04 năm 2020) và các mẫu tham khảo S_1 (^{60}Co), S_2 (^{22}Na) được đặt trên trục đối xứng của đầu dò ở các khoảng cách từ 0 mm đến 200 mm. Tất cả các phép đo phổ gamma được tiến hành trong 1,800 giây, và đều có thời gian thực (RT, real-time) và thời gian đếm hệ thống (LT, live-time) bằng nhau ($\text{RT} = \text{LT} = 1,800$ s). Điều này cho phép chúng tôi loại trừ ảnh hưởng của thời gian chết (dead-time) lên chất lượng của phổ gamma thực nghiệm. Chương trình Colegram [14] được sử dụng để xử lý phổ, trừ phong môi trường và ROIs (region of interest) đỉnh năng lượng quan tâm.

Mô phỏng Monte Carlo

Bảng 1. Thông số hình học của đầu dò NaI(Tl)

Thông số hình học	Giá trị (mm)
Đường kính tinh thể nhấp nháy NaI(Tl)	760
Chiều dài tinh thể nhấp nháy NaI(Tl)	760
Bề dày lớp cửa sổ nhôm oxit (Al_2O_3)	1.31
Bề dày lớp nhôm oxit mặt bên	1.5
Bề dày lớp silicon	2.0
Bề dày cửa sổ nhôm	1.5

Chương trình MCNP5 (Monte Carlo N-particle) [5] được sử dụng để mô phỏng Monte Carlo cho sự vận chuyển và tương tác

của bức xạ với vật chất đầu dò NaI(Tl). Các thông số hình học của đầu dò NaI(Tl) được trình bày trong Bảng 1. Trong đó, bề dày lớp nhôm oxit (Al_2O_3) đã được tối ưu hóa [15]. Mật độ của tinh thể NaI(Tl), nhôm, nhôm oxit, silicon, lần lượt là 3.67 g.cm^{-3} , 3.97 g.cm^{-3} , 2.33 g.cm^{-3} . Ngoài ra, các chi tiết thực tế của ống nhân quang điện (PMT) rất phức tạp, để đơn giản, PMT được thay thế bằng một khối nhôm hình trụ kích thước 83 mm x 30 mm [16].

Nguồn chuẩn và mẫu tham khảo phát photon được mô phỏng và tính toán hiệu suất đỉnh và hiệu suất tổng trong khoảng năng lượng từ 46.5 keV đến 1,836.1 keV. Mode P được sử dụng để mô tả các quá trình tương tác của photon với vật liệu đầu dò, bao gồm: hiệu ứng quang điện, tán xạ không kết hợp, tán xạ kết hợp, tạo cặp và hủy cặp, ... Đánh giá F8 được sử dụng nhằm thu kết quả phân bố năng lượng bỏ lại bên trong tinh thể đầu dò trên mỗi photon tới, tương ứng với các khe năng lượng trong kết quả cuối cùng của chương trình MCNP5. Năng lượng cực tiểu, cực đại và số kênh năng lượng trong phổ mô phỏng được phân chia tương ứng với các kênh trong phổ gamma thực nghiệm. Cụ thể, có 8,133 khe được chia đều trong khoảng năng lượng từ 1.7 keV đến 2,636.0 keV. Số lịch sử hạt sử dụng trong mô phỏng cho tất cả các hình học đo là 109 để hiệu suất ghi nhận tại khe tương ứng với đỉnh năng lượng quan tâm có sai số thống kê tương đối nhỏ hơn 0.01%.

Tính toán hiệu suất tổng và hiệu suất đỉnh từ phổ gamma thực nghiệm

Hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần thực nghiệm được xác định bằng công thức [4]:

$$\varepsilon_p(E) = \frac{N_p(E)}{A_C \times I_\gamma \times t} \quad (1)$$

Trong đó, $N_p(E)$, $\varepsilon_p(E)$ và I_γ tương ứng là số đếm tại đỉnh năng lượng toàn phần, hiệu

suất đỉnh và cường độ phát gamma của đồng vị phóng xạ, $A_c(Bq)$ là hoạt độ của đồng vị phóng xạ tại thời điểm khảo sát, $t(s)$ là thời gian đo phổ gamma.

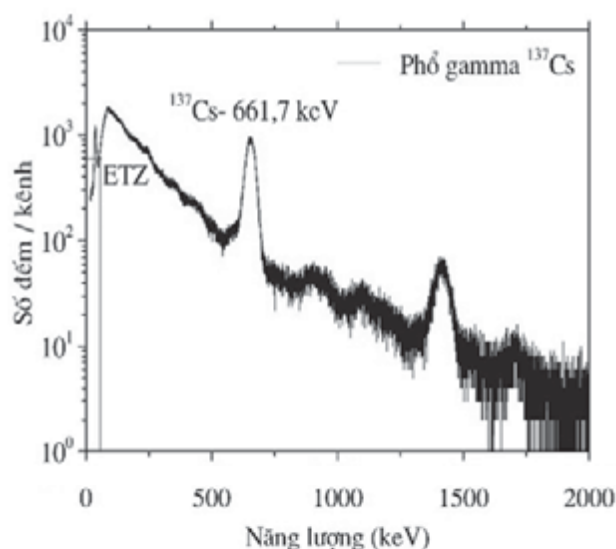
Hiệu suất tổng thực nghiệm $\varepsilon_t(E)$ được xác định bằng công thức [4]:

$$\varepsilon_t(E) = \frac{N_t(E)}{A_c \times I_\gamma \times t} \quad (2)$$

Ở đây, $N_t(E)$ là số đếm tổng và được xác định bằng công thức [17]:

$$N_t(E) = \sum_{i=ETZ}^R C_i + C_{ETZ}^{Avg} \times ETZ \quad (3)$$

Với R là số kênh tương ứng với biên phải của đỉnh năng lượng toàn phần, C_i là số đếm tại kênh thứ i , C_{ETZ}^{Avg} là số đếm trung bình tại vùng ngoại suy về không (ETZ). Vị trí kênh ETZ thường được chọn nằm ở phía trước vùng tia X (Hình 1). Sai số tương đối của hiệu suất đỉnh và hiệu suất tổng được xác định bằng phương pháp truyền sai số [18].



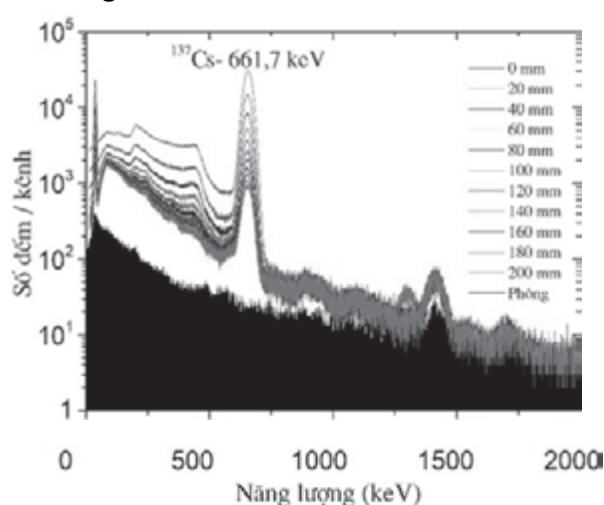
Hình 1. Phổ gamma thực nghiệm của nguồn ^{137}Cs đo tại khoảng cách 200 mm

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Xác định hiệu suất đỉnh và hiệu suất tổng của đầu dò NaI(Tl)

Hình 2 thể hiện phổ gamma thực nghiệm của nguồn ^{137}Cs (661.7 keV, cường độ phát gamma $84.99 \pm 0.2\%$) đo ở các khoảng cách từ 0 mm đến 200 mm. Bởi vì phòng môi trường có sự đóng góp của nhiều loại bức xạ, trong đó có bức xạ vũ trụ và bức xạ phát ra từ đồng vị phóng xạ tự nhiên có trong các chuỗi uranium (^{238}U , ^{235}U và con cháu), thorium (^{232}Th và con cháu), potassium (^{40}K , 1,460.8 keV). Các đồng vị phóng xạ này chủ yếu phát gamma năng lượng từ vài keV đến khoảng 3,000 [4] và đóng góp vào phổ gamma thực nghiệm, đặc biệt là các phép đo không sử dụng che chắn.

Hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần thực nghiệm được xác định bởi công thức (1) và có sai số tương đối nhỏ hơn 4%, chủ yếu là đóng góp từ sai số hoạt độ chuẩn của nguồn phóng xạ. Kết quả tính toán hiệu suất đỉnh và hiệu suất tổng bằng mô phỏng MCNP5 thể hiện sự phù hợp tốt với thực nghiệm (Bảng 2), với độ sai biệt tương đối trung bình là 1.8% cho hiệu suất đỉnh và 13.2% cho hiệu suất tổng.



Hình 2. Phổ gamma thực nghiệm của nguồn ^{137}Cs ở các vị trí từ 0 mm đến 200 mm

Bảng 2. Hiệu suất đỉnh và hiệu suất tổng của đầu dò NaI(Tl) tại 661.7 keV (^{137}Cs)

Khoảng cách (mm)	Hiệu suất đỉnh				Hiệu suất tổng		
	Thực nghiệm $\varepsilon_p^{\text{TN}}$	Mô phỏng $\varepsilon_p^{\text{MC}}$	Độ sai biệt RB (%)		Thực nghiệm $\varepsilon_t^{\text{TN}}$	Mô phỏng $\varepsilon_t^{\text{MC}}$	Độ sai biệt RB (%)
0	0.09977 ± 0.00300	0.10271	-2.9		0.24686 ± 0.00743	0.24866	-0.7
20	0.04855 ± 0.00146	0.04816	0.8		0.12099 ± 0.00364	0.11330	6.4
40	0.02724 ± 0.00082	0.02678	1.7		0.06779 ± 0.00204	0.06198	8.6
60	0.01708 ± 0.00051	0.01683	1.5		0.04297 ± 0.00129	0.03851	10.4
80	0.01181 ± 0.00036	0.01151	2.6		0.02990 ± 0.00090	0.02612	12.7
100	0.00860 ± 0.00026	0.00835	2.9		0.02199 ± 0.00066	0.01884	14.3
120	0.00652 ± 0.00020	0.00633	2.8		0.01693 ± 0.00051	0.01422	16.0
140	0.00510 ± 0.00015	0.00496	2.7		0.01348 ± 0.00041	0.01112	17.5
160	0.00412 ± 0.00012	0.00399	3.0		0.01103 ± 0.00033	0.00893	19.1
180	0.00337 ± 0.00010	0.00328	2.7		0.00912 ± 0.00027	0.00732	19.7
200	0.00282 ± 0.00009	0.00275	2.5		0.00774 ± 0.00023	0.00612	21.0
Độ sai biệt trung bình			1.8		Độ sai biệt trung bình		13.2

Trong đó, độ sai biệt được xác định bằng công thức:

$$\text{RB}(\%) = \frac{\varepsilon_p^{\text{TN}} - \varepsilon_p^{\text{MC}}}{\varepsilon_p^{\text{TN}}} \times 100\%$$

Ngoài ra, giá trị hiệu suất tổng tại 661.7 keV ở khoảng cách 100 mm tính toán từ mô phỏng MCNP5 cũng được so sánh với các tác giả khác (Bảng 3). Kết quả tính toán từ mô hình mô phỏng của chúng tôi có độ sai biệt lớn nhất 7% so với công trình của Yalcin và cộng sự [7]. Điều này có thể giải thích là do các mô phỏng của chúng tôi sử dụng toàn bộ cấu trúc hình học của đầu dò NaI(Tl), bao gồm nhiều lớp che chắn. Các photon khi tương tác với các lớp che chắn có thể bị hấp thụ và không đến được tinh thể nhấp nháy NaI(Tl). Ngược lại, Yalcin và cộng sự tính toán hiệu suất tổng bằng mô hình giải tích trong đó các photon tương tác trực tiếp với khối tinh thể nhấp nháy, bỏ qua sự hấp thụ của các

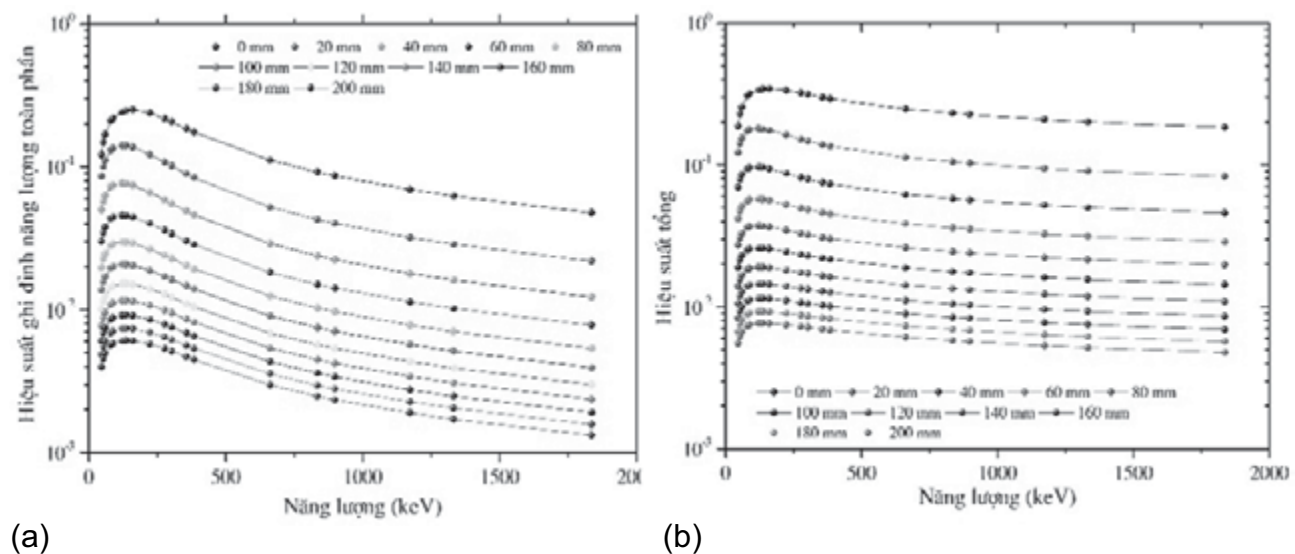
lớp che chắn, dẫn đến kết quả tính toán hiệu suất tổng cao hơn chúng tôi và các tác giả khác.

Bảng 3. Hiệu suất tổng của đầu dò NaI(Tl) với nguồn ^{137}Cs đo tại khoảng cách 100 mm

Kết quả của chúng tôi	Hiệu suất tổng
Thực nghiệm	0.02199 ± 0.00066
Mô phỏng MCNP5	0.01884
Kết quả của các tác giả khác	
Heath (1964) [19]	0.01980
Belluscio et al. (1974) [20]	0.01900 ± 0.0008
Nakamura (1972) [21]	0.01830
Cesana and Terrani (1977) [22]	0.02010
Yalcin (2007) [7]	0.02020
Tam (2014) [10]	0.01910

Hình 3 thể hiện kết quả mô phỏng hiệu suất đỉnh và hiệu suất tổng với các năng lượng gamma đơn năng trong vùng năng lượng từ 46.5 keV đến 1,836.1 keV. Kết quả này được sử dụng như dữ liệu đầu vào để tính toán hệ số hiệu chỉnh trùng phùng cho các đồng vị phóng xạ phát gamma ^{60}Co và ^{22}Na , sử dụng chương trình ETNA. Đây là chương trình cung cấp các giải pháp tính toán nhanh chóng, chính xác và

thường được sử dụng để chuyển hiệu suất và tính toán hệ số trùng phùng của các đồng vị phát nhiều gamma nối tầng [23]. Dữ liệu cần cung cấp cho chương trình ETNA bao gồm cấu trúc hình học của phép đo (kích thước hình học nguồn, đầu dò, vị trí,...), hiệu suất đỉnh, hiệu suất tổng. Trong nghiên cứu này, chúng tôi lựa chọn “Complete computing” để tính hệ số hiệu chỉnh trùng phùng (C_{CSF}).



Hình 3. Hiệu suất đỉnh (hình a) và hiệu suất tổng (hình b) của đầu dò NaI(Tl) mô phỏng bằng MCNP5

Đối với các đồng vị phát gamma nối tầng, độ chính xác của kết quả phân tích thường bị ảnh hưởng bởi sự trùng phùng của các năng lượng gamma phát ra đồng thời từ đồng vị, đặc biệt là trong các bố trí hình học mẫu phân tích gần đầu dò. Bảng 4 thể hiện các tính toán hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tại các năng

lượng gamma của đồng vị ^{60}Co (1,173.2 keV; 1,332.5 keV) và ^{22}Na (511 keV; 1,274.5 keV). Kết quả cho thấy rằng hiệu ứng trùng phùng có ảnh hưởng lớn ở khoảng cách mẫu đặt gần đầu dò, và từ khoảng cách lớn hơn 100 mm, ảnh hưởng của hiệu ứng trùng phùng là thấp hơn 4%.

Bảng 4. Hệ số hiệu chỉnh trùng phùng của đồng vị ^{60}Co và ^{22}Na

Khoảng cách (mm)	^{60}Co		^{22}Na	
	1,173.2 keV	1,332.5 keV	511 keV	1,274.5 keV
0	1.252	1.264	1.256	1.939
20	1.100	1.104	1.101	1.283
40	1.053	1.055	1.054	1.137
60	1.032	1.034	1.033	1.080

80	1.022	1.023		1.022	1.053
100	1.016	1.016		1.016	1.037
120	1.012	1.012		1.012	1.028
140	1.009	1.010		1.009	1.022
160	1.008	1.008		1.008	1.017
180	1.006	1.006		1.006	1.014
200	1.005	1.005		1.005	1.012

Đánh giá quy trình phân tích hoạt độ của đồng vị phóng xạ bằng kiểm định IAEA

Trong nghiên cứu này, mẫu tham chiếu có hoạt độ đã biết của đồng vị phóng xạ ^{60}Co và ^{22}Na được sử dụng để đánh giá độ tin cậy của đường chuẩn hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần. Mẫu tham chiếu được đặt trên giá đỡ plastic, đồng trục với đầu dò và đo phổ gamma ở các khoảng cách từ 0 mm đến 200 mm. Hoạt độ và sai số tương đối hoạt độ của đồng vị phóng xạ được tính toán bởi công thức (4) và (5) [4]:

$$A = \frac{N_p(E)}{\varepsilon_p(E) \times I_\gamma \times t} C_{\text{CSF}} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\Delta N_p(E)}{N_p(E)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon_p(E)}{\varepsilon_p(E)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_\gamma}{I_\gamma}\right)^2} \quad (5)$$

Kết quả tính toán hoạt độ được đánh giá độ chính xác bằng quy trình kiểm định IAEA [24]. Độ sai biệt tương đối (RB) giữa hoạt độ tính toán (A_{tt}) và hoạt độ tham khảo (A_{tk}) được xác định bằng công thức:

$$\text{RB}(\%) = 100\% \times \frac{|A_{\text{tk}} - A_{\text{tt}}|}{A_{\text{tk}}} \quad (6)$$

Phép kiểm tra độ chính xác (Test 1) được tiến hành bằng cách so sánh độ sai biệt tương đối và giá trị lớn nhất được chấp nhận (MARB, Maximum acceptable relative bias). Giá trị

của MARB là 15% đến 30% đối với các đồng vị phát gamma. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng MARB = 20% [25]. Test 1 được xếp "NA - Không chấp nhận" khi $\text{RB} > \text{MARB}$. Nếu kết quả của phép đo vượt qua phép kiểm độ chính xác, thì phép kiểm tính đúng đắn của kết quả đo (Test 2) được tiến hành bằng phép so sánh $\text{Rb} \leq k \times P$ và $P \leq \text{MARB}$, với $k = 2.58$ tương ứng với mức xác suất 99% để quyết định xem kết quả đo có vượt qua bài kiểm tra hay không. P được xác định bởi công thức:

$$P = 100\% \times \sqrt{\left(\frac{\Delta A_{\text{tk}}}{\Delta A_{\text{tk}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A_{\text{tt}}}{\Delta A_{\text{tt}}}\right)^2} \quad (7)$$

Trong đó, ΔA_{tk} và ΔA_{tt} là sai số chuẩn kết hợp của hoạt độ tham khảo và hoạt độ tính toán. Kết quả đánh giá cuối cùng cho tất cả các phép kiểm tra là "A - Chấp nhận" khi Test 1 và Test 2 đều đạt mức "A - Chấp nhận". Ngược lại, khi Test 1 là "A - Chấp nhận" nhưng Test 2 là "W - Cảnh báo" thì kết quả cuối cùng là "W - Cảnh báo" [25].

Bảng 5 thể hiện hoạt độ phóng xạ của ^{60}Co , ^{22}Na trong các mẫu tham chiếu S_1 , S_2 . Tất cả các kết quả đều đạt yêu cầu cho cả hai bài kiểm tra Test 1 và Test 2 của quy trình kiểm định IAEA, với độ sai biệt lớn nhất 8% so với hoạt độ tham khảo từ nhà sản xuất. Do đó, đánh giá cuối cùng cho tất cả các kết quả phân tích là "A - Chấp nhận".

Bảng 5. Kết quả xác định hoạt độ của đồng vị ^{60}Co và ^{22}Na

Khoảng cách (mm)	Mẫu phân tích S ₁						
	Hoạt độ tham khảo A _{tk} (Bq)	^{60}Co (1,173.2 keV)			^{60}Co (1,332.5 keV)		
		Hoạt độ tính toán A _{tt} (Bq)	RB (%)	Kiểm định IAEA [24]	Hoạt độ tính toán A _{tt} (Bq)	RB (%)	Kiểm định IAEA [24]
0	7,329 ± 220	6,800 ± 9	7.22	A	6,914 ± 9	5.66	A
20	7,329 ± 220	6,818 ± 12	6.97	A	7,478 ± 13	2.03	A
40	7,329 ± 220	7,858 ± 16	7.22	A	7,335 ± 16	0.08	A
60	7,329 ± 220	6,815 ± 19	7.01	A	7,526 ± 21	2.68	A
80	7,329 ± 220	6,795 ± 22	7.29	A	7,697 ± 25	5.02	A
100	7,329 ± 220	6,761 ± 26	7.75	A	7,780 ± 29	6.15	A
120	7,324 ± 220	6,959 ± 30	4.98	A	7,855 ± 34	7.25	A
140	7,324 ± 220	7,224 ± 35	1.36	A	7,345 ± 37	0.28	A
160	7,324 ± 220	7,129 ± 38	2.66	A	6,769 ± 39	7.57	A
180	7,319 ± 220	7,294 ± 43	0.33	A	7,284 ± 45	0.47	A
200	7,319 ± 220	7,166 ± 46	2.09	A	7,541 ± 50	3.04	A
Khoảng cách (mm)	Mẫu phân tích S ₂						
	Hoạt độ tham khảo A _{tk} (Bq)	^{22}Na (511 keV)			^{22}Na (1,274.5 keV)		
		Hoạt độ tính toán A _{tt} (Bq)	RB (%)	Kiểm định IAEA [24]	Hoạt độ tính toán A _{tt} (Bq)	RB (%)	Kiểm định IAEA [24]
0	1,331 ± 40	1,365 ± 2	2.52	A	1,276 ± 5	4.17	A
20	1,331 ± 40	1,418 ± 3	6.52	A	1,334 ± 6	0.16	A
40	1,331 ± 40	1,429 ± 4	7.33	A	1,353 ± 7	1.60	A
60	1,331 ± 40	1,404 ± 5	5.47	A	1,314 ± 9	1.31	A
80	1,330 ± 40	1,359 ± 5	2.14	A	1,296 ± 10	2.57	A
100	1,330 ± 40	1,379 ± 6	3.64	A	1,345 ± 12	1.09	A
120	1,330 ± 40	1,430 ± 7	7.50	A	1,293 ± 14	2.78	A
140	1,330 ± 40	1,383 ± 8	3.95	A	1,231 ± 15	7.47	A
160	1,330 ± 40	1,398 ± 9	5.07	A	1,374 ± 17	3.24	A
180	1,279 ± 38	1,363 ± 10	6.60	A	1,176 ± 18	8.00	A
200	1,279 ± 38	1,373 ± 11	7.31	A	1,255 ± 20	1.90	A

Trong đó, A là “Chấp nhận”, $RB(\%) = 100 \times \frac{|A_{tt} - A_{tk}|}{A_{tk}}$

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng mô phỏng MCNP5 để xây dựng đường chuẩn hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần và hiệu suất tổng của đầu dò NaI(Tl). Nguồn chuẩn dạng đĩa phát gamma trong khoảng năng lượng từ 46.5 keV đến 1,836.1 keV được khảo sát tại các vị trí từ 0 mm đến 200 mm so với cửa sổ đầu dò. Tại năng lượng 661.7 keV, kết quả mô phỏng thể hiện sự phù hợp tốt với thực nghiệm, với độ sai biệt tương đối trung bình 1.8% cho hiệu suất đỉnh và 13.2% cho hiệu suất tổng, và có độ sai biệt dưới 7% khi so sánh với các tác giả khác. Điều này chứng minh rằng cấu hình mô phỏng của chúng tôi là đáng tin cậy.

Bên cạnh đó, một quy trình phân tích hoạt độ bao gồm đường chuẩn hiệu suất đỉnh xây dựng từ mô phỏng MCNP5 và hiệu chỉnh hệ số trùng phùng được áp dụng để xác định hoạt độ của đồng vị phát nhiều gamma trong mẫu tham khảo. Kết quả xác định hoạt độ đạt được mức đánh giá "A - Chấp nhận" của kiểm định

IAEA chứng tỏ rằng quy trình phân tích được trình bày là một phương pháp đơn giản, nhanh chóng và có thể áp dụng cho các phép đo mẫu phân tích chứa đồng vị phóng xạ phát nhiều gamma nổi bật.

TUYÊN BỐ XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Nhóm tác giả cam kết không mâu thuẫn quyền lợi và nghĩa vụ của các thành viên.

ĐÓNG GÓP CỦA CÁC TÁC GIẢ

Lê Quang Vương lên ý tưởng nghiên cứu, thiết kế chế tạo các thiết bị thực nghiệm, viết chương trình mô phỏng, đo đạc và phân tích số liệu, viết bài báo.

Bùi Minh Lộc chỉnh sửa bản thảo bài báo.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn PGS.TS. Trần Thiện Thanh đã cung cấp chương trình MCNP5 và ETNA để thực hiện các tính toán trong nghiên cứu này.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, trong khuôn khổ đề tài mã số CS.2019.19.48.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Q. Hung, H. D. Chuong, L. Q. Vuong, T. T. Thanh, and C. Van Tao, "Intercomparison NaI(Tl) and HPGe spectrometry to studies of natural radioactivity on geological samples," *J. Environ. Radioact.*, Vol. 164, pp. 197-201, 2016. Doi: 10.1016/j.jenvrad.2016.07.035.
- [2] H. D. Tam and N. T. M. Le, "An improved method for liquid density measurement using NaI(Tl) detector and low-strength source," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, Vol. 317, No. 1, pp. 161-168, 2018. Doi: 10.1007/s10967-018-5878-1.
- [3] H. D. Chuong, L. T. Ngoc Trang, H. D. Tam, V. H. Nguyen, and T. T. Thanh, "A new approach for determining the thickness of material plate using gamma backscattering method," *NDTE Int.*, Vol. 113, No. 102281, pp. 1-8, 2020, doi:10.1016/j.ndteint.2020.102281.
- [4] G. R. Gilmore, *Practical Gamma-ray Spectrometry* Practical Gamma-ray Spectrometry, 2nd ed. 2008.
- [5] X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory, LA-UR-03-1987.," *Los Alamos Natl. Lab.*, Vol. I: Overview, No. LA-UR-03-1987, 2003.

- [6] S. Agostinelli et al., "GEANT4 - A simulation toolkit," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. A*, Vol. 506, No. 3, pp. 250-303, 2003. Doi: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- [7] S. Yalcin, O. Gurler, G. Kaynak, and O. Gundogdu, "Calculation of total counting efficiency of a NaI(Tl) detector by hybrid Monte-Carlo method for point and disk sources," *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 65, No. 10, pp. 1179-1186, 2007. Doi: 10.1016/j.apradiso.2007.05.003.
- [8] K. Amgarou, C. Domingo, T. Bouassoule, and F. Fernández, "Monte Carlo simulation of the NaI(Tl) detector response to measure gold activated foils," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. B*, Vol. 267, No. 17, pp. 2944-2951, 2009. Doi: 10.1016/j.nimb.2009.06.087.
- [9] S. Baccouche, D. Al-Azmi, N. Karunakara, and A. Trabelsi, "Application of the Monte Carlo method for the efficiency calibration of CsI and NaI detectors for gamma-ray measurements from terrestrial samples," *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 70, No. 1, pp. 227-232, 2012. Doi: 10.1016/j.apradiso.2011.07.008.
- [10] C. V. Tao, H. D. Tam, T. V. Danh, T. T. Thanh, "Determination of total and intrinsic efficiencies of a 3" x 3" NaI(Tl) detector for a thin disc source," *J. Sci. Ho Chi Minh City Univ. Educ.*, No. 58, pp. 114-122, 2014.
- [11] H. O. Tekin, "MCNP-X Monte Carlo Code Application for Mass Attenuation Coefficients of Concrete at Different Energies by Modeling 3 x 3 Inch NaI(Tl) Detector and Comparison with XCOM and Monte Carlo Data," *Sci. Technol. Nucl. Install.*, Vol. 2016, 2016. Doi: 10.1155/2016/6547318.
- [12] T. T. Thanh, L. B. Tran, H. D. Tam, M. T. Quang, T. V. Ton, H. D. Chuong, C. V. Tao, "Validation of radioactive isotope activity measurement in homogeneous waste drum using Monte Carlo codes," *Kerntechnik*, Vol. 82, No. 3, pp. 344-348, 2017. Doi: 10.3139/124.110631.
- [13] GAMMARAD, "https://www.amptek.com/products/gamma-ray-products/gamma-rad5-gamma-ray-detection-system", Accepted April-2020.
- [14] M. C. Lépy, "Presentation of the COLEGRAM software," Note tech. LNHB 04/26, 2004.
- [15] H. D. Tam, H. D. Chuong, T. T. Thanh, and C. Van Tao, "A study of the effect of Al₂O₃ reflector on response function of NaI(Tl) detector," *Radiat. Phys. Chem.*, pp. 88-93, 2016. Doi: 10.1016/j.radphyschem.2016.03.020.
- [16] H. X. Shi, B. X. Chen, T. Z. Li, and D. Yun, "Precise Monte Carlo simulation of gamma-ray response functions for an NaI(Tl) detector," *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 57, No. 4, pp. 517-524, 2002. Doi: 10.1016/S0969-8043(02)00140-9.
- [17] R. Venkataraman, S. Croft, and W. R. Russ, "Calculation of peak-to-total ratios for high purity germanium detectors using Monte-Carlo modeling," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, Vol. 264, No. 1, pp. 183-191, 2005. Doi: 10.1007/s10967-005-0692-y.
- [18] GUM, "Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," *BIPM*, vol. JCGM 100:2, 2008.
- [19] R. L. Heath, *Scintillation spectrometry Gamma-ray spectrum catalogue*, 2nd ed. 1964.

- [20] M. Belluscio, R. De Leo, A. Pantaleo, and A. Vox, "Efficiencies and response functions of NaI(Tl) crystals for gamma rays from thick disk sources," *Nucl. Instruments Methods*, Vol. 118, No. 2, pp. 553-563, 1974. Doi: 10.1016/0029-554X(74)90666-1.
- [21] T. Nakamura, "Monte Carlo calculation of efficiencies and response functions of NaI(Tl) crystals for thick disk gamma-ray sources and its application to Ge(Li) detectors," *Nucl. Instruments Methods*, Vol. 105, No. 1, pp. 77-89, 1972. Doi: 10.1016/0029-554X(72)90496-X.
- [22] A. Cesana and M. Terrani, "Gamma-ray Activity Determination in Large Volume Samples with a Ge-Li Detector," *Anal. Chem.*, Vol. 49, No. 8, pp. 1156-1159, 1977. Doi: 10.1021/ac50016a024.
- [23] M. C. Lépy, M. Bé, F. Piton "ETNA (Efficiency Transfer for Nuclide Activity Measurements): Software for Efficiency Transfer and Coincidence Summing Corrections in Gamma-ray Spectrometry," NoteTech.LNHB/01/09/A, 2004.
- [24] T. T. Thanh, L. Q. Vuong, P. L. Ho, H. D. Chuong, V. H. Nguyen, and C. Van Tao, "Validation of an advanced analytical procedure applied to the measurement of environmental radioactivity," *J. Environ. Radioact.*, Vol. 184-185, pp. 109-113, 2018. Doi:10.1016/j.jenvrad.2017.12.020.
- [25] I. Osvath, C. Galdino, P. McGinnity, M. Pham "Update on IAEA proficiency test exercises," HELCOM MORS Annu. Meet. IAEA Environ. Lab. Monaco, 2020.

Calculation of the total efficiency and full energy peak efficiency for NaI(Tl) detector using Monte Carlo simulation and experimental measured

Le Quang Vuong* and Bui Minh Loc

ABSTRACT

In this work, we investigated the total efficiency (TE) and full energy peak (FEP) efficiency of a scintillation NaI(Tl) detector. The standard disk source ^{137}Cs (661.7 keV) was measured at different positions on the symmetry axis of the detector with a distance from 0 mm to 200 mm and without used lead shielding. Besides, MCNP5 software was used to simulate the experimental measurement and calculated the TE and the FEP efficiency in the energy range of 46.5 - 1,836.1 keV. A good agreement was obtained between the calculated results by the Monte Carlo simulation and experimental results. The comparisons between experimental measurement and simulation showed that the mean relative deviations were 1.8% and 13.2% for FEP efficiency and TE, respectively. Finally, an advanced analytical procedure was applied to calculate radioactivity in the reference samples. It has consisted of the calibration FEP efficiency curve and the coincidence summing correction factor. The results of the

radioactivity using the advanced analytical procedure were received the "A - Accepted" statuses by the IAEA proficiency test.

Keywords: *Nal(Tl) detector, MCNP5, full energy peak efficiency, total efficiency, radioactivity*

Received: 09/04/2021

Revised: 25/05/2021

Accepted for publication: 02/06/2021