

Xác định hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng trong thực nghiệm đo hiệu suất ghi cho đầu dò bán dẫn

Trịnh Văn Cường, Trần Tuấn Anh, Hồ Mạnh Dũng, Hồ Văn Doanh, Nguyễn Thị Thọ
Trung tâm Vật lý và Điện tử hạt nhân, Viện nghiên cứu hạt nhân, 01 Nguyễn Tử Lạc, Đà Lạt, Lâm Đồng
Email: trinhvancuong.nri@gmail.com

Tóm tắt

Hiệu suất ghi của đầu dò là đại lượng quan trọng trong các bài toán phân tích hạt nhân. Giá trị hiệu suất ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của kết quả thực nghiệm. Các bộ nguồn chuẩn gamma phát một hoặc nhiều năng lượng như **Cd-109**, **Cs-137**, **Mn-54**, **Co-60**, **Eu-152**, **Ba-133** được sử dụng trong việc xác định hiệu suất theo năng lượng. Tuy nhiên, đối với các nguồn phát từ hai năng lượng trở lên, hiệu ứng trùng phùng thực xuất hiện khi các tia gamma đến đầu dò cùng lúc nhỏ hơn độ phân giải thời gian của hệ phổ kế. Hiệu ứng này càng rõ rệt khi khoảng cách nguồn càng gần đầu dò, do đó giá trị hiệu suất sẽ sai khác đáng kể so với giá trị đúng. Trong bài viết này hiệu ứng trùng phùng được xác định cho các nguồn chuẩn **Eu-152**, **Ba-133**, **Co-57** và **Co-60** theo khoảng cách.

Determination of total coincidence correction factor on measuring of a semiconductor detector experimental efficiency

Cuong Trinh Van, Anh Tran Tuan, Dung Ho Manh, Doanh Ho Van, Tho Nguyen Thi
Centre for nuclear physics and electronics, nuclear research institute, 01 Nguyen Tu Luc, Dalat city, Lamdong province
Email: trinhvancuong.nri@gmail.com

Abstract

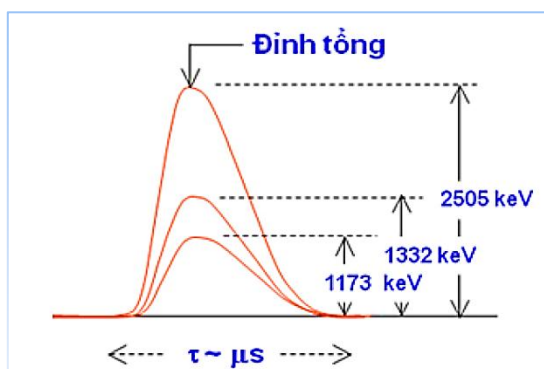
The detector efficiency is significantly important in Neutron spectrum Activation Analysis because it can directly impact on the experimental results. For the determination of the efficiency curve, a set of standard sources including **Cd-109**, **Cs-137**, **Mn-54**, **Co-60**, **Eu-152**, **Ba-133** are used. Some of these emit multiple gamma-rays in form of multi-step cascades, leading therefore to losses of count due to the true coincidences summing effect. Additionally, the closer is the detector to source distance, the stronger is the true coincidences summing effect. The present paper determined the correction factor of the coincidence effect for: **Eu-152**, **Ba-133**, **Co-57** and **Co-60** standard sources.

Keywords: Neutron Activation Analysis, coincidence correction factor, standard source.

I. MỞ ĐẦU

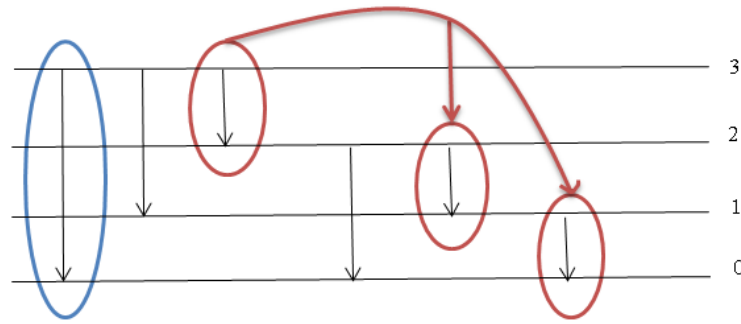
Ghi đo bức xạ gamma sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe là một kỹ thuật ghi đo phóng xạ thông dụng trong các phòng thí nghiệm phân tích kích hoạt neutron, phòng thí nghiệm quan trắc môi trường và phòng thí nghiệm đo mẫu môi trường. Để phép thực nghiệm được chính xác thì bước hiệu chuẩn hệ đo là vô cùng quan trọng, các bước hiệu chuẩn hệ đo bao gồm chuẩn về năng lượng, chuẩn độ phân giải năng lượng và chuẩn hiệu suất ghi. Hiệu suất ghi là một thông số có ý nghĩa quan trọng trong hệ phổ kế gamma, mỗi hệ phổ kế gamma có một hiệu suất ghi khác nhau, phụ thuộc vào nhiều yếu tố như hình học của hệ đo, kích thước và hình học mẫu, góc khối đo và thời gian chết của hệ đo, ngoài ra hiệu suất ghi còn phụ thuộc vào năng lượng của bức xạ. Để chuẩn hiệu suất ghi theo năng lượng của bức xạ gamma cho đầu dò bán dẫn HPGe, các bộ nguồn chuẩn phát một hoặc nhiều năng lượng thường được sử dụng. Đối với sử dụng bộ nguồn chuẩn đơn năng lượng có thể tính toán chính xác giá trị hiệu suất mà không cần phải hiệu chỉnh hiệu ứng trùng phùng, tuy nhiên rất khó chế tạo được bộ nguồn chuẩn mà dải năng lượng rộng nhất lên đến hơn 1200 keV (nguồn đơn Zn-165 phát năng lượng 1115 keV). Đối với trường hợp sử dụng các nguồn chuẩn phát từ hai năng lượng gamma, dải năng lượng tương đối rộng, năng lượng tối đa của nguồn chuẩn lên đến 1408 keV của Eu-152, do đó chỉ cần sử dụng một nguồn chuẩn Eu-152 có thể xác định hiệu suất trong dải năng lượng từ 43 keV đến 1408 keV. Tuy nhiên đối với các nguồn phát nhiều năng lượng, khi đo tại các vị trí gần đầu dò, thì sẽ xảy ra hiệu ứng trùng phùng làm giá trị hiệu suất bị sai lệch với giá trị hiệu suất đúng. Để giải quyết vấn đề đã nêu ở trên trong báo cáo này tập trung nghiên cứu tính toán hiệu chỉnh trùng phùng sử dụng phương pháp đo theo khoảng cách xa gần khác nhau, được trình bày trong phần thực nghiệm.

Hiệu ứng trùng phùng là hiệu ứng khi hai hoặc nhiều hơn tia gamma được phát ra từ nguồn đến detector trong khoảng thời gian phân giải của nó và được ghi nhận như là một xung duy nhất [1]



Hình 1. Minh họa hiệu ứng trùng phùng nguồn Co-60

Trùng phùng được chia làm hai loại là trùng phùng ngẫu nhiên và trùng phùng thực. Trùng phùng ngẫu nhiên là trùng phùng khi 2 tia gamma từ 2 hạt nhân khác nhau, hoặc một phần năng lượng tia gamma tán xạ Compton và tia gamma tới từ hạt nhân trong khoảng phân giải thời gian của hệ phổ kế, đối với trùng phùng này thì xác suất xảy ra rất thấp, do đó có thể bỏ qua trong tính toán thực nghiệm.



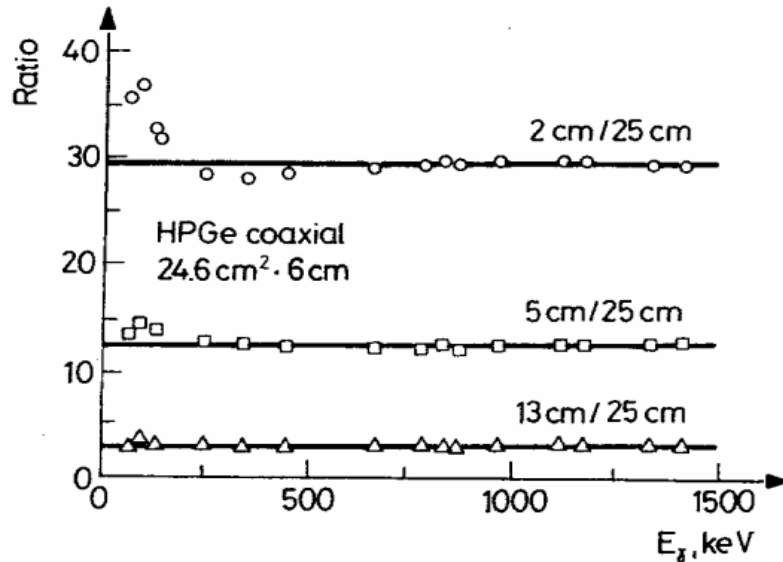
Hình 2. Minh họa hiệu ứng trùng phùng thêm và trùng phùng mất

Trùng phùng thực là hiệu ứng trùng phùng khi hai hoặc nhiều tia gamma phát ra từ một hạt nhân, đến đầu dò cùng lúc trong khoảng thời gian phân giải của hệ phổ kế, do đó có thể tạo ra một đỉnh tổng (Hình 1), hoặc đóng góp số đếm vào các đỉnh gamma được quan tâm khác, do đó làm tăng số đếm diện tích đỉnh (trùng phùng thêm) hoặc giảm số đếm diện tích đỉnh dẫn đến sai khác về giá trị hiệu suất (trùng phùng mất), được minh họa trong hình 2. Có nhiều phương pháp để hiệu chỉnh hiệu ứng trùng phùng thường được sử dụng bao gồm: Phương pháp đường cong P/T (đỉnh trên tổng), phương pháp dịch chuyển ma trận và phương pháp đo qua khoảng cách được trình bày như sau:

Phương pháp hiệu chỉnh trùng phùng Tỉ số theo khoảng cách:

Khi đo tại vị trí càng xa đầu dò thì hiệu ứng trùng phùng tổng xem như không đáng kể đối với các nguồn phát nhiều năng lượng, vì vậy hiệu suất tại đo tại khoảng cách 16.73 cm được lấy làm giá trị hiệu suất quy chiếu để xác định hệ số hiệu chỉnh cho các vị trí đo gần đầu dò.

Theo Kafala (1994)^[2]: Tỉ số hiệu suất đỉnh được đo ở các khoảng cách khác nhau thì không đổi theo năng lượng.



Hình 3. Tỉ số của của hiệu suất đỉnh được theo năng lượng được đo ở các khoảng cách khác nhau^[2]

Ưu điểm của phương pháp đo theo khoảng cách có thể hiệu chỉnh các hạt nhân phát nhiều năng lượng mà không cần quan tâm đến sơ đồ mức của nó. Để hiệu chỉnh trùng phùng trong thực nghiệm người ta thường làm như sau: dùng một nguồn chuẩn kết hợp với nguồn cần hiệu chỉnh trùng phùng và đo hai nguồn này ở cách nhau ở các khoảng cách xa và gần đối với detector.

- Hiệu suất ghi:

$$\epsilon_s = \frac{cps}{A \cdot I_\gamma} = \frac{N_p/t_m}{A \cdot I_\gamma} \quad (1.1) \text{ với } A = A_0 e^{-\ln 2 \cdot \frac{t_d}{T_{1/2}}}$$

Trong đó: A_0 là hoạt độ nguồn tại thời gian xác nhận của nhà sản xuất, A là hoạt độ nguồn tại thời điểm hiện tại, t_d là thời gian rã, $T_{1/2}$ là thời gian bán rã của hạt nhân phóng xạ, I_γ là cường độ phát tuyệt đối (xác suất phát tia gamma quan tâm trên 1 phân rã của hạt nhân phóng xạ). N_p là diện tích đỉnh gamma, t_m là thời gian đo.

Sau khi tính được hiệu suất ghi đối với nguồn chuẩn và nguồn đo, lập tỉ số ở các khoảng cách gần và xa detector ta suy ra được công thức:

$$R_f = \left(\frac{\epsilon_r}{\epsilon_s} \right)_f \quad (1.2) \text{ và } R_n = \left(\frac{\epsilon_r}{\epsilon_s} \right)_n \quad (1.3)$$

Trong đó: ϵ_r : là hiệu suất ghi của nguồn chuẩn không trùng phùng.

ϵ_s : là hiệu suất ghi của nguồn đo cần hiệu chỉnh trùng phùng.

R_n : là tỉ số của tốc độ đo tại vị trí gần đầu dò.

R_f : là tỉ số của tốc độ tại vị trí xa đầu dò.

Với nguồn có trùng phùng xảy ra, tốc độ đếm tại vị trí gần đầu dò sẽ chịu ảnh hưởng của trùng phùng do đó sẽ thấp hơn tốc độ đếm tại vị trí xa. Nếu nguồn chuẩn là nguồn không có trùng phùng thì không có sự mất số đếm do trùng phùng. Khi đó hệ số trùng phùng được định nghĩa như là tỉ số R_n trên R_f đối với cấu hình tương tự nhau:

$$C_f = \frac{R_n}{R_f} \quad (1.4)$$

- $C_f = 1$ khi trùng phùng tổng không đáng kể.

- $C_f \neq 1$ khi trùng phùng tổng đáng kể.

- Hiệu suất ghi sau khi đã hiệu chỉnh hiệu ứng trùng phùng thực:

$$\varepsilon_{hc}(E) = C_f \cdot \varepsilon_v(E) \quad (1.5)$$

Với $\varepsilon_v(E)$, $\varepsilon_{hc}(E)$ lần lượt là hiệu suất ghi trước và sau khi hiệu chỉnh trùng phùng và C_f là hệ số trùng phùng thực.

Sai số hiệu suất ghi của đầu dò:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{\delta I_\gamma^2 + \delta N_p^2 + \delta_A^2} \quad (1.6)$$

Trong đó:

- δI_γ là sai số tương đối của cường độ phát I_γ
- δN_p là sai số tương đối của diện tích đỉnh N_p .
- δ_A là sai số hoạt độ nguồn (với $\delta_A \approx 3\%$).

Tương tự cách tính sai số tương đối của hiệu suất ghi ($\delta\varepsilon_x$) ta tính được sai số tương đối của R_n, R_f, C_f .

$$\delta R_n = \sqrt{\delta\varepsilon_r^2 + \delta\varepsilon_s^2} \quad (1.7) \quad \delta R_f = \sqrt{\delta\varepsilon_r^2 + \delta\varepsilon_s^2} \quad (1.8)$$

Trong đó:

$\delta\varepsilon_r$ là sai số tương đối hiệu suất ghi của nguồn chuẩn không trùng phùng.

$\delta\varepsilon_s$ là sai số tương đối hiệu suất ghi của nguồn đo cần hiệu chỉnh trùng phùng.

$$\delta C_f = \sqrt{\delta R_n^2 + \delta R_f^2} \quad (1.9)$$

II. Thực nghiệm

1. Hệ phổ kế đo Gamma sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe

Đầu dò được sử dụng trong bài viết là đầu dò bán dẫn siêu tinh khiết HPGe (loại đồng trục), các thông số về đầu dò được nêu cụ thể như sau:

Ký hiệu đầu dò : GMX30190 (Hãng sản xuất Ortec)

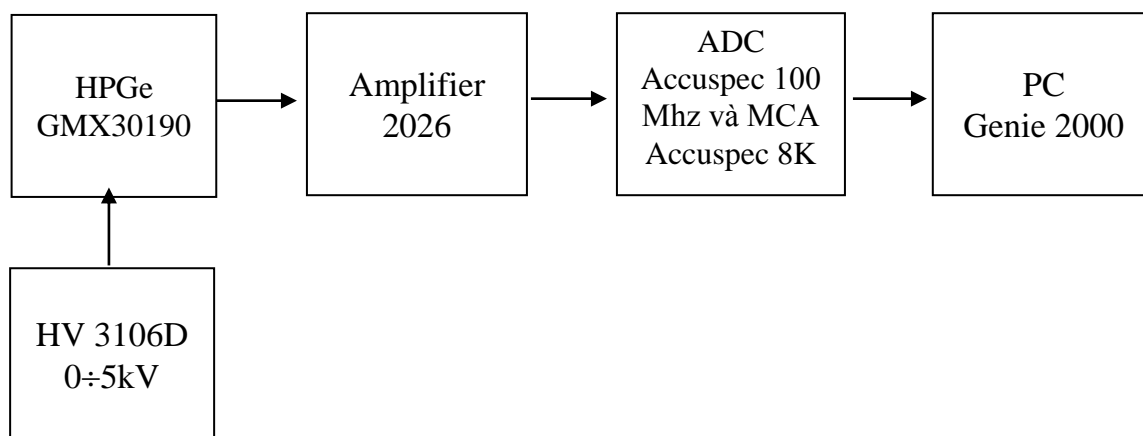
Đường kính tinh thể : 57.0 mm; Độ dài tinh thể : 73.6 mm.

Khoảng cách từ cửa sổ đến mặt tinh thể : 4.0 mm

Bề dày cửa sổ detector : 0.5 mm Beryllium

Độ phân giải **FWHM** = **1.9 keV** tại đỉnh năng lượng 1332 keV của nguồn Co-60.

Cao thế đặt tại giá trị -2.5 KV.



Hình 3: Sơ đồ khối hệ phổ kế gamma được sử dụng trong báo cáo

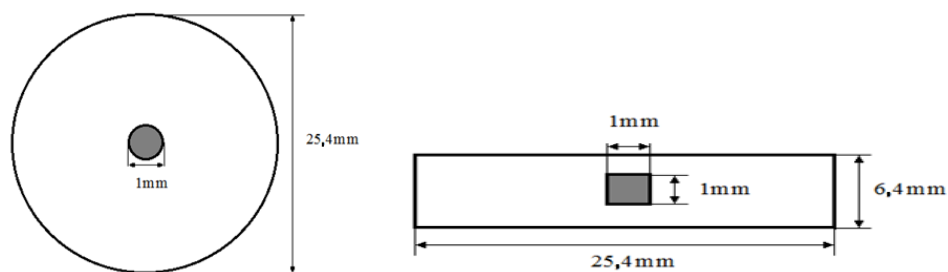
2. Thực nghiệm đo mẫu

Bộ nguồn chuẩn được sử dụng trong phép đo hiệu suất như sau:

Bảng 1. Thông tin bộ nguồn sử dụng trong thí nghiệm

Bộ nguồn chuẩn 1			Bộ nguồn chuẩn 2		
Tên nguồn	Hoạt độ (Bq)	Ngày sản xuất	Tên nguồn	Hoạt độ (Bq)	Ngày sản xuất
Eu-152	304.1	15/5/2002	Ba-133	285.6	15/05/2002
Ba-133	37000	01/12/2014	Cs-137	259.0	15/05/2002
Cd-109	37000	01/12/2014	Co-60	367.0	15/05/2002
Cs-137	37000	01/01/2015			
Co-57	37000	01/12/2014			
Co-60	37000	01/01/2015			

Bộ nguồn Model Cal2601 Gamma Standard sai số khoảng 3%, hình học nguồn có dạng trụ nhỏ, đường kính 1.0 mm, chiều cao 1.0 mm được bao phủ bởi lớp plastic dày 2.7 mm, có đường kính toàn phần 25.4 mm, chiều cao toàn phần 6.4 mm như hình bên dưới.



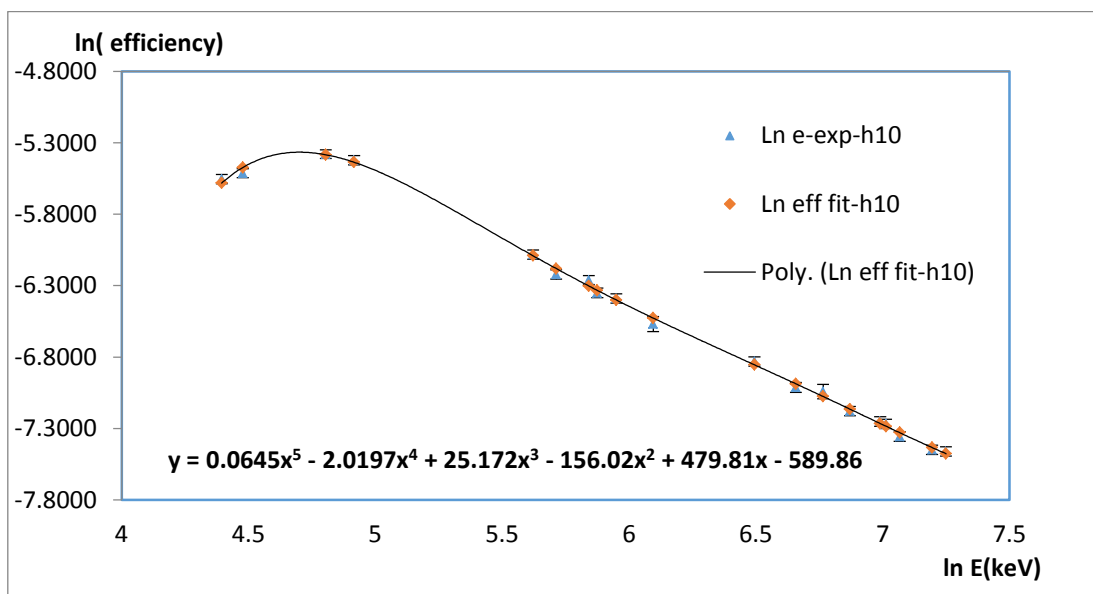
Hình 4. Mặt cắt ngang và mặt cắt dọc bộ nguồn chuẩn.

Các nguồn chuẩn được đo tại các vị trí H1=1.72 cm, H3=4.88 cm, H6=10.45 cm, H8= 13.65 cm, H10=16.73 cm.

Bộ nguồn chuẩn 1 cho mục đích xác định đường cong hiệu suất thực nghiệm và bộ nguồn chuẩn 2 để kiểm chứng lại tính đúng của đường cong hiệu suất trong thực nghiệm.

Phổ gamma thu nhận từ phần mềm Genie2k được xử lý qua phần mềm Fitzpeak để khớp diện tích đỉnh theo dạng hàm Gaus, các giá trị diện tích đỉnh từ phần mềm Fitzpeak được sử dụng tính toán trên phần mềm Excel. Giá trị hiệu suất đo được, được khớp theo dạng hàm đa thức bậc 5, theo phương pháp bình phương tối thiểu, sử dụng các ma trận trọng số, ma trận sai số, ma trận chuyển vị để tính toán các tham số hàm khớp, cũng như nội suy sai số các điểm năng lượng thực nghiệm theo phương pháp bình phương tối thiểu có trọng số.^{[3],[4]}

Để kiểm chứng tính đúng của đường cong hiệu suất đo tại vị trí H10 là chính xác, vì lý do bộ nguồn chuẩn 2 hoạt độ thấp nên trong thí nghiệm sử dụng mẫu chuẩn Nist 2711a đo tại vị trí H10, được chuẩn bị cùng hình học đo với nguồn chuẩn, được chiếu tại vị trí mâm quay lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt. Kết quả tính phân tích hàm lượng của Nist 2711a sử dụng đường cong hiệu suất tại vị trí H10 được biểu thị trong Bảng 2.



Hình 5. Đường cong hiệu suất được khớp tại vị trí H10

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bảng 2. Giá trị phân tích mẫu chuẩn Nist 2711a đo tại vị trí H10

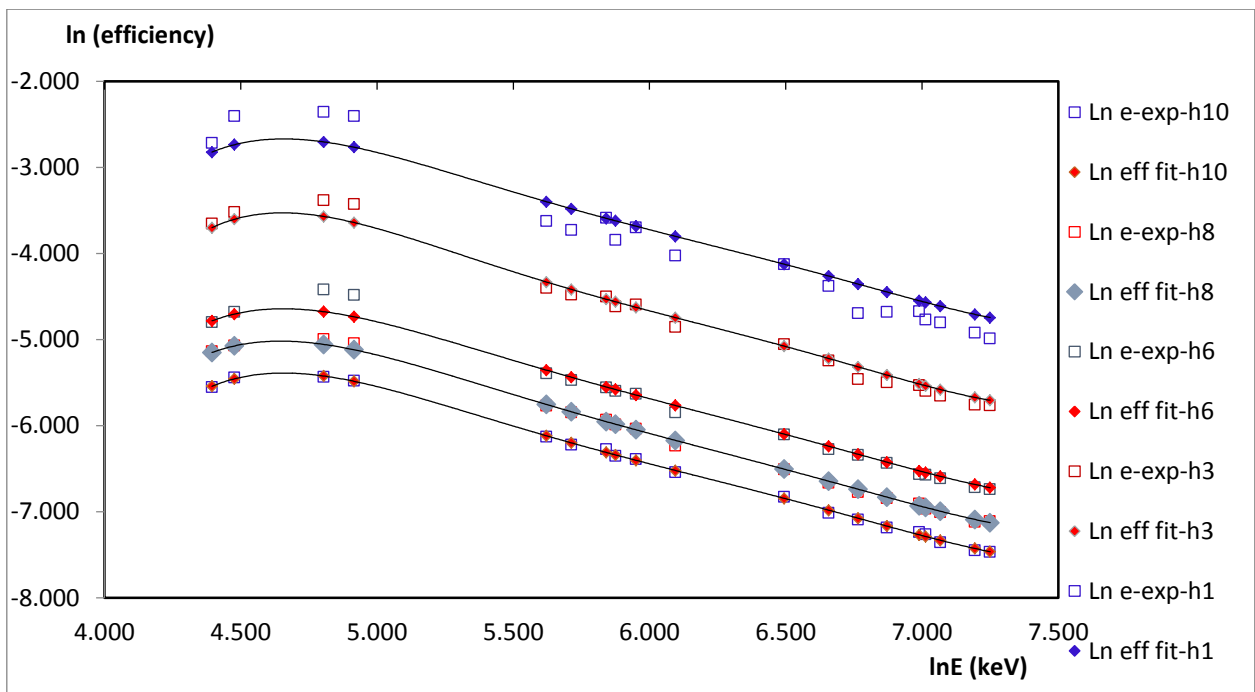
Nguyên tố	Hàm lượng (ppm)	Giá trị xác nhận (ppm) ^[5]	Độ lệch (%)
Sodium	12290	12000	2.00
Scandium	8.63	8.5	1.49
Iron	27710	28200	-1.74
Cobalt	9.89	9.89	0.03
Arsen	102.7	107	-4.02
Rubidium	116.7	120	-2.69
Cerium	66.7	70	-4.76
Samarium	5.98	5.93	0.78
Europium	1.01	1.1	-8.18

Bảng 3. Kết quả giá trị hiệu suất và hệ số trùng phù hợp thực nghiệm vị trí H8 và H6

Số TT	Đồng vị	Năng lượng (keV)	Hiệu suất thực nghiệm H8	Hiệu suất đã hiệu chỉnh H8	Hệ số trùng phù hợp H8	Hiệu suất thực nghiệm H6	Hiệu suất đã hiệu chỉnh H6	Hệ số trùng phù hợp H6
1	Ba-133	81.00	5.922E-03	5.646E-03	0.954	8.828E-03	8.351E-03	0.946
2	Cd-109	88.00	6.291E-03	6.014E-03	1.000	9.274E-03	9.274E-03	1.000
3	Co-57	122.06	6.763E-03	6.579E-03	0.973	1.206E-02	1.018E-02	0.844
4	Co-57	136.47	6.443E-03	6.242E-03	0.969	1.131E-02	9.656E-03	0.854
5	Ba-133	276.40	3.127E-03	3.365E-03	1.076	4.539E-03	5.017E-03	1.105
6	Ba-133	302.85	2.888E-03	3.076E-03	1.065	4.204E-03	4.586E-03	1.091
7	Ba-133	356.01	2.508E-03	2.641E-03	1.053	3.700E-03	3.938E-03	1.064
8	Ba-133	383.85	2.378E-03	2.467E-03	1.038	3.591E-03	3.679E-03	1.024
9	Cs-137	661.66	1.567E-03	1.567E-03	1.000	2.337E-03	2.337E-03	1.000
10	Co-60	1173.20	9.053E-04	9.743E-04	1.076	1.341E-03	1.453E-03	1.084
11	Co-60	1332.50	8.099E-04	8.780E-04	1.084	1.208E-03	1.309E-03	1.083
12	Eu-152	344.29	2.650E-03	2.724E-03	1.028	3.859E-03	4.061E-03	1.052
13	Eu-152	443.89	1.964E-03	2.175E-03	1.107	2.891E-03	3.242E-03	1.121
14	Eu-152	778.92	1.274E-03	1.372E-03	1.077	1.883E-03	2.046E-03	1.086
15	Eu-152	867.38	1.143E-03	1.255E-03	1.099	1.765E-03	1.872E-03	1.061
16	Eu-152	964.11	1.067E-03	1.149E-03	1.077	1.607E-03	1.713E-03	1.066
17	Eu-152	1085.89	1.002E-03	1.039E-03	1.038	1.412E-03	1.550E-03	1.098
18	Eu-152	1112.08	9.426E-04	1.019E-03	1.081	1.400E-03	1.519E-03	1.085
19	Eu-152	1408.00	8.169E-04	8.410E-04	1.029	1.214E-03	1.254E-03	1.033

Bảng 4. Kết quả giá trị hiệu suất và hệ số trùng phùng thực nghiệm vị trí H3 và H1.

Số TT	Đồng vị	Năng lượng (keV)	Hiệu suất thực nghiệm H3	Hiệu suất đã hiệu chỉnh- H3	Hệ số trùng phùng H3	Hiệu suất thực nghiệm H1	Hiệu suất đã hiệu chỉnh H1	Hệ số trùng phùng H1
1	Ba-133	81	2.585E-02	2.344E-02	0.907	6.604E-02	5.774E-02	0.874
2	Cd-109	88	2.961E-02	2.556E-02	1.000	9.201E-02	6.433E-02	0.699
3	Co-57	122.06	3.403E-02	2.689E-02	0.790	9.453E-02	7.037E-02	0.744
4	Co-57	136.47	3.255E-02	2.528E-02	0.777	9.040E-02	6.676E-02	0.739
5	Ba-133	276.4	1.227E-02	1.318E-02	1.074	2.670E-02	3.468E-02	1.299
6	Ba-133	302.85	1.137E-02	1.237E-02	1.088	2.401E-02	3.170E-02	1.321
7	Ba-133	356.01	9.884E-03	1.076E-02	1.088	2.144E-02	2.722E-02	1.270
8	Ba-133	383.85	1.010E-02	9.917E-03	0.982	2.478E-02	2.543E-02	1.026
9	Cs-137	661.66	6.376E-03	6.376E-03	1.000	1.616E-02	1.616E-02	1.000
10	Co-60	1173.2	3.508E-03	3.916E-03	1.116	8.257E-03	1.004E-02	1.216
11	Co-60	1332.5	3.163E-03	3.558E-03	1.125	7.317E-03	9.051E-03	1.237
12	Eu-152	344.29	1.111E-02	1.031E-02	0.928	2.881E-02	2.808E-02	0.975
13	Eu-152	443.89	7.796E-03	8.362E-03	1.073	1.786E-02	2.242E-02	1.255
14	Eu-152	778.92	5.284E-03	5.273E-03	0.998	1.253E-02	1.415E-02	1.128
15	Eu-152	867.38	4.255E-03	4.805E-03	1.129	9.157E-03	1.294E-02	1.413
16	Eu-152	964.11	4.100E-03	4.384E-03	1.069	9.297E-03	1.184E-02	1.274
17	Eu-152	1085.89	3.960E-03	4.172E-03	1.054	9.352E-03	1.072E-02	1.146
18	Eu-152	1112.08	3.712E-03	3.882E-03	1.046	8.501E-03	1.050E-02	1.235
19	Eu-152	1408	3.137E-03	3.256E-03	1.038	6.924E-03	8.669E-03	1.195



Hình 6. Đường cong hiệu suất đã hiệu chỉnh trùng phùng tổng tại các vị trí H1, H3, H6, H8.

Bảng 4. Kết quả tính hoạt độ bộ nguồn chuẩn 2 sử dụng đường cong hiệu suất đã hiệu chỉnh trùng phùng tại vị trí H1 và H3

Vị trí H3					
STT	Nguồn	Giá trị hoạt độ (Bq)	Sai số hoạt độ (Bq)	Giá trị hoạt độ chứng nhận (Bq)	Độ lệch(%)
1	Ba-133	274.3	5.2	285.6	-3.9%
2	Cs-137	256.9	5.8	259.0	-0.8%
3	Co-60	354.5	6.5	367.0	-3.4%
Vị trí H1					
STT	Nguồn	Giá trị hoạt độ (Bq)	Sai số hoạt độ (Bq)	Giá trị hoạt độ chứng nhận (Bq)	Độ lệch (%)
1	Ba-133	273.6	6.0	285.6	-4.2%
2	Cs-137	253.8	6.2	259.0	-2.0%
3	Co-60	368.2	8.0	367.0	0.3%

Tại vị trí H10=16.73 cm, ảnh hưởng của hiệu ứng trùng phùng tổng không đáng kể, tính chính xác của đường cong hiệu suất tại vị trí H10, được minh chứng trong kết quả bảng 2, giá trị phân tích hàm lượng các nguyên tố mẫu chuẩn sử dụng đường cong hiệu suất được khớp tại vị trí H10, độ lệch giữa giá trị hàm lượng tính toán và giá trị do nhà sản xuất cung cấp tương đối phù hợp. Đối với vị trí H1 và H3 các giá trị hiệu suất đã được hiệu chỉnh, cho kết quả xác định giá trị hoạt độ các nguồn chuẩn bộ nguồn chuẩn 2 phù hợp với giá trị hoạt độ chứng nhận do nhà sản xuất cung cấp, qua đó chứng minh được tính tin cậy của phương pháp tính hệ số trùng phùng thực bằng phương pháp đo theo thoáng cách. Ta thấy rằng tại vị trí đo càng gần đầu dò thì giá trị hiệu suất bị sai khác so với giá trị hiệu suất đúng là càng nhiều.

Tài liệu tham khảo:

- [1] Thomas.M. Semkow, Ghazala Methmood, Pravin P. Parekh and Mark Virgil (1990), *Coincidence summing in gamma-ray spectroscopy*, Nuclear Instruments and Methods in Physic Research A20, 437-444.
- [2] S. I. Kafala (1995), *Simple method for true coincidence summing correction*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 105-114.
- [3] Giáo trình xử lý số liệu thực nghiệm, TS Mai Xuân Trung
- [4] Giáo trình hiệu suất ghi, TS Trần Tuấn Anh, Viện nghiên cứu hạt nhân
- [5] <https://www-s.nist.gov/srmors/certificates/2711A.pdf>