ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HCM TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

LÊ QUANG VƯƠNG

NGHIÊN CỨU VÀ CHUẨN HÓA PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH HOẠT ĐỘ PHÓNG XẠ MÃU MÔI TRƯỜNG DẠNG RẮN SỬ DỤNG HỆ PHỔ KẾ GAMMA ĐỘ PHÂN GIẢI CAO

Ngành: Vật lý nguyên tử và hạt nhân Mã số ngành: 62440501

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Tp. Hồ Chí Minh, năm 2025

Công trình được hoàn thành tại: Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM

Người hướng dẫn khoa học: 1. PGS.TS. Trần Thiện Thanh 2. PGS.TS. Lê Công Hảo

Phản biện 1: PGS.TS. Nguyễn Xuân Hải

Phản biện 2: PGS.TS. Đỗ Quang Bình

Phản biện 3: PGS.TS. Phạm Đức Khuê

Phản biện độc lập 1: PGS.TS. Nguyễn Xuân Hải

Phản biện độc lập 2: PGS.TS. Phạm Đức Khuê

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án họp tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM vào lúc ... ngày ... tháng ... năm 2025

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Khoa học Tổng hợp Tp.HCM
- Thư viện Trường Đại học Khoa học Tự Nhiên
- Thư viện Trung tâm ĐHQG-HCM

MỞ ĐẦU

Hiện nay, hệ phổ kế gamma phông thấp với đầu dò bán dẫn siêu tinh khiết (HPGe) được sử dụng phổ biến trong nhiều lĩnh vực như: vật lý hạt nhân [1], đánh giá dược chất phóng xạ [2], theo dõi rò rỉ phóng xạ [3-5], điều tra phân bố phóng xạ môi trường [6], đánh giá niên đại của mẫu trầm tích [7, 8], xác định các nguy cơ ảnh hưởng đến sức khỏe do bức xạ phát ra từ các đồng vị phóng xạ có trong môi trường [9-14]. Xuất phát từ những khó khăn trong phân tích hoạt độ, tác giả cùng với nhóm nghiên cứu lựa chọn đề tài **"Nghiên cứu và chuẩn hóa phương pháp phân tích hoạt độ phóng xạ mẫu môi trường dạng rắn sử dụng hệ phổ kế gamma độ phân giải cao"**. Mục tiêu của luận án là chuẩn hóa phương pháp tích hoạt độ của đồng vị phóng xạ tự nhiên (²³⁸U, ²³²Th và ⁴⁰K) trong các mẫu môi trường dạng rắn sử dụng hệ phổ kế gamma. Nội dung chính của luận án được trình bày trong ba chương:

Chương 1: tổng quan các nghiên cứu trong phân tích phổ gamma, bao gồm: hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần (FEPE), hiệu ứng trùng phùng tổng (CSF), tự hấp thụ (C_{abs}), sự chồng chập đỉnh phổ. Chương 1 cũng chỉ rõ các vấn đề liên quan đến luận án nhằm chuẩn hóa phương pháp phân tích nhanh hoạt độ ²³⁸U và ²³⁵U.

Chương 2: mô tả cấu hình hệ phổ kế gamma thực nghiệm và mô phỏng Monte Carlo (MCNP-CP) để tính toán hệ số CSF và C_{abs} . Chương này cũng trình bày các bước của quy trình phân tích hoạt độ và Tiêu chuẩn kiểm định của IAEA.

Chương 3: trình bày kết quả đạt được của luận án bao gồm tính toán CSF, C_{abs}, xây dựng đường chuẩn FEPE, kết quả đánh giá phương pháp phân tích theo tiêu chuẩn IAEA. Cuối cùng, chương 3 trình bày các kết quả áp dụng phương pháp để đánh giá nguy cơ bức xạ từ vật liệu xây dựng đối với cư dân cư ngụ trong nhà.

Chương 1. TỔNG QUAN

1.1. Tổng quan các vấn đề nghiên cứu liên quan đến phân tích phóng xạ tự nhiên

Mục này trình bày các nghiên cứu liên quan đến phân tích hoạt độ phóng xạ tự nhiên sử dụng hệ phổ kế gamma, tầm quan trọng của chúng đối với an toàn phóng xạ và sức khỏe cộng đồng. Các nghiên cứu tiêu biểu được nêu ra, phân tích ưu điểm và hạn chế nhằm chỉ rõ các vấn đề liên quan đến luận án.

1.1.1. Tình hình nghiên cứu trên thế giới

Mục này trình bày một số nghiên cứu xác định hoạt độ của ²³⁸U thông qua sự cân bằng hoạt độ với sản phẩm phân rã trong chuỗi của nó. Trong đó, các phương pháp xác định trực tiếp hoạt độ phóng xạ ²³⁸U thông qua ^{234m}Pa, ²³⁴Th và ²²⁶Ra có nhiều ưu điểm và ngày càng có nhiều công trình nghiên cứu để nâng cao độ chính xác của kết quả phân tích.

1.1.2. Tình hình nghiên cứu tại Việt Nam

Mục này trình bày các nghiên cứu tiêu biểu tại Việt Nam (giai đoạn 2012 – 2023) về đánh giá hoạt độ của đồng vị phóng xạ tự nhiên có trong vật liệu môi trường dạng rắn như đất [4, 5, 9, 11, 74], tro bay [14], vật liệu xây dựng [13]. Ngoài ra, mục này cũng đề cập đến một số nghiên cứu cải tiến phương pháp, nâng cao độ chính xác của kết quả phân tích hoạt độ phóng xạ riêng sử dụng hệ phổ kế gamma.

1.2. Những vấn đề liên quan đến luận án

Luận án đã thực hiện để giải quyết một số vấn đề sau: (i) Mô phỏng hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò HPGe bằng chương trình MCNP-CP. Kết quả mô phỏng được sử dụng để xác định hệ số CSF và C_{abs}; (ii) Đánh giá ảnh hưởng của đỉnh 186,2 keV (²²⁶Ra) đến kết quả xây dựng đường chuẩn FEPE; (iii) Chuẩn hóa phương pháp phân tích hoạt độ ²³⁸U và ²³⁵U sử dụng hệ phổ kế gamma; (iv) Áp dụng phương pháp phân tích để đánh giá nguy cơ ảnh hưởng của đồng vị phóng xạ tự nhiên trong môi trường sống của cư dân gây ra bởi vật liệu xây dựng.

1.3. Các hiệu chỉnh quan trọng

Đối với phương pháp phổ gamma môi trường, các hiệu chỉnh quan trọng được trình bày ở các tiểu mục như sau: 1.3.1. Hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần; 1.3.2. Hiệu chỉnh trùng phùng tổng; 1.3.3. Hiệu chỉnh hiệu ứng tự hấp thụ; 1.3.4. Đánh giá sự chồng chập đỉnh phổ.

1.4. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu

1.4.1. Mục tiêu nghiên cứu

Các mục tiêu cụ thể gồm có: (1) Xây dựng đường chuẩn FEPE cho đầu dò HPGe sử dụng mẫu chuẩn RGU dạng trụ; tính toán hệ số CSF, C_{abs}, đóng góp tại đỉnh chồng chập; (2) Đánh giá độ tin cậy, độ chính xác của phương pháp phân tích sau khi chuẩn hóa; (3) Áp dụng phương pháp phân tích cho các mẫu thực tế nhằm xem xét khả năng áp dụng thực tiễn của phương pháp mà luận án đề xuất.

1.4.2. Nội dung nghiên cứu

Các nội dung triển khai trong luận án bao gồm: (1) Xây dựng đường chuẩn FEPE cho đầu dò HPGe loại p (mã GEM50) sử dụng mẫu chuẩn RGU. Mô phỏng MCNP-CP để tính toán hệ số CSF, C_{abs}; (2) Sử dụng phương pháp phân tích mà luận án đề xuất để xác định hoạt độ của các đồng vị phóng xạ trong mẫu CRM; (3) Đánh giá nguy cơ ảnh hưởng của đồng vị phóng xạ tự nhiên trong môi trường sống của cư dân gây ra bởi vật liệu xây dựng.

1.5. Tóm tắt Chương 1

Mục này nêu tóm tắt những ý chính đã trình bày ở Chương 1. Chương 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ THỰC NGHIỆM 2.1. Mô tả hệ phổ kế gamma thực nghiệm Mục này trình bày các thông số cấu trúc hình học của hệ phổ kế gamma với đầu dò HPGe loại p đặt tại Viện Y tế công cộng Tp. HCM, hiệu suất tương đối danh định 50% (model GEM50, được cung cấp bởi ORTEC, Hoa Kỳ). Tinh thể đầu dò GEM50 có đường kính 65,9 mm và chiều cao 77,0 mm (Bảng 2.1); FWHM tại 122 keV (⁵⁷Co) là 0,9 keV; tại 1332 keV (⁶⁰Co) là 1,9 keV. Hệ phổ kế được đặt trong phòng có kiểm soát nhiệt độ, độ ẩm, được bảo trì và hiệu chuẩn định kỳ theo tiêu chuẩn ISO/IEC 17025:2017 [100].

2.2. Thông tin mẫu chuẩn và mẫu tham chiếu

Mục này trình bày xuất xứ và thông số hàm lượng phóng xạ của các mẫu CRM: RGU, IAEA-447, IAEA-434, RGTh (Bảng 2.2, Bảng 2.3). **Bảng 2.2.** Thông tin mẫu chuẩn RGU

Thông tin mâu	Chuối phóng xạ	Đông vị	Hảm lượng phóng xạ (Bq/kg)				
Khối lượng sử dụng: 130 g	_	²³⁸ U	4940 ± 90				
Mật độ khối: 1,55 g/cm ³	238 T T	²¹⁴ Pb	5130 ± 130				
	0	²¹⁴ Bi	4905 ± 125				
		²¹⁰ Pb	4887 ± 124				
	²³⁵ U	²³⁵ U	230 ± 3				
Bảng 2.3. Thông tin ca	ác mẫu tham ch	niếu CRN	1				
Thông tin mẫu	Chuỗi phóng xạ	Đồng vị	Hàm lượng phóng xạ (Bq/kg)				
		²³⁸ U	$22,2 \pm 0,8$				
	-	²³⁴ Th	$25,5 \pm 3,0$				
	²³⁸ U	²²⁶ Ra	$25,1 \pm 2,0$				
Mẫu IAEA-447 [120]		²¹⁴ Pb	$26,0 \pm 2,0$				
Khối lượng sử dụng: 108 g	-	²¹⁴ Bi	$24,8 \pm 2,0$				
Mật độ khổi: 1,29 g/cm ³	-	²¹⁰ Pb	424 ± 20				
		²²⁸ Ac	37 ± 2				
	²³² Th	²¹² Pb	$37,0 \pm 1,5$				
	-	²⁰⁸ Tl	$13,0 \pm 0,5$				
Mẫu IAEA-434 [112]		²³⁸ U	120 ± 6				
Khối lượng sử dụng: 76 g	²³⁸ U	²²⁶ Ra	780 ± 31				
Mật độ khối: 0,91 g/cm ³		²¹⁰ Pb	680 ± 29				
Mẫu RGTh [110]	²³⁸ U	²³⁸ U	78 ± 3				
Khối lượng sử dụng: 119 g	²³² Th	²³² Th	3250 ± 90				
Mật độ khổi: 1,42 g/cm ³	²³⁵ U	²³⁵ U	$3,6 \pm 0,3$				

2.3. Thông tin mẫu nghiên cứu vật liệu môi trường dạng rắn

Các mẫu nghiên cứu được thu thập ngẫu nhiên tại các cửa hàng buôn bán vật liệu xây dựng và các công trình xây dựng tại khu vực Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam (Bảng 2.4). Tất cả các mẫu sau khi thu thập sẽ được xử lí bởi cùng một quy trình (Hình 2.2) theo Tiêu chuẩn Việt Nam về "Hướng dẫn lấy mẫu và đo hoạt độ phóng xạ của mẫu môi trường" [106]. Các kim loại nặng trong mẫu được xác định bằng hệ thiết bị phân tích huỳnh quang tia X (mã sản phẩm EDX-8000). Tỉ lệ phần trăm (%) của oxy được tính bằng cách loại trừ tổng đóng góp của các nguyên tố khác có trong mẫu (Bảng 2.5).

Tên mẫu	Nơi thu thập	Khối lượng (g)	Mật độ khối (g/cm³)	
Đá tự nhiê	$n_1 = 5$			
S1		145	1,74	
S2	Liôn đoàn địa chất	144	1,72	
S3	Lien doan dia cha	152	1,82	
S4	cung cap	138	1,65	
S5		118	1,40	
Xi măng ($n_2 = 4)$			
S 6		114	1,40	
S 7	Cửa hàng VLXD	118	1,45	
S 8	Tp.HCM	123	1,51	
S9		111	1,36	
Gạch đỏ (1	$n_3 = 4)$			
S10		85	1,05	
S11	Cửa hàng VLXD	100	1,23	
S12	Tp.HCM	91	1,12	
S13		130	1,59	
Cát $(n_4 = 9)$	9)			
S14		152	1,87	
S15		158	1,94	
S16		143	1,76	
S17	Cửa hòng VI VD	145	1,78	
S18	Th HCM	154	1,89	
S19	тр.псм	162	1,99	
S20		157	1,92	
S21		152	1,86	
S22		155	1,90	

Bång 2	.4. Thông	tin mẫu	nghiên ci	ứu vật liệu	môi trường dạng	g rắn
~						2.

Các mẫu được giữ trong phòng thí nghiệm ít nhất 30 ngày để đạt trạng thái cân bằng thế kỉ giữa ²²⁶Ra và con cháu. Mẫu đo phổ gamma được đặt trên bề mặt cửa sổ của đầu dò, đồng trục với trục đối xứng của đầu dò. Thời gian ghi nhận phổ gamma từ 24 giờ đến 48 giờ.

2.4. Mô phỏng Monte Carlo

Mục này trình bày mô hình mô phỏng đầu dò, buồng chì, hộp chứa mẫu bằng chương trình MCNP-CP phiên bản 3.2 [84], chạy trên nền của MCNP phiên bản 6.1 [109] (Hình 2.3). Số lịch sử hạt cho mỗi mô phỏng là 10⁹ hạt nhằm đảm bảo sai số thống kê nhỏ hơn 0,01%. Tệp đầu vào của mô phỏng được trình bày ở phụ lục 7.



Hình 2.3. Mô phỏng Monte Carlo hệ phổ kế gamma HPGe.

2.5. Hiệu chỉnh trùng phùng tổng và hiệu chỉnh tự hấp thụ2.5.1. Hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng

Mục này trình bày phương pháp xác định hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng bằng mô phỏng MCNP-CP (Hình 2.4). Mô phỏng thứ nhất mô tả phổ không có hiệu ứng trùng phùng (CPS -1), trong đó mỗi hạt phát ra từ đồng vị phóng xạ được theo dõi bởi một lịch sử riêng biệt. Mô phỏng thứ hai mô tả sự phát hạt tương tự như sơ đồ phân rã của đồng vị phóng xạ và tất cả các hạt phát ra được theo dõi trong cùng một lịch sử hạt (phổ có trùng phùng). Hệ số trùng phùng tổng là tỉ lệ kết quả mô phỏng của phổ thứ nhất và phổ thứ hai (Công thức (2.1)).



Hình 2.4. Phổ mô phỏng MCNP-CP đồng vị ²¹⁴Bi đối với mẫu RGU.
2.5.2. Hệ số tự hấp thụ

Mục này trình bày phương pháp xác định hệ số hiệu chỉnh tự hấp thụ (C_{abs}) bằng tính toán lý thuyết từ dữ liệu XCOM [136] (công thức (2.2)) và mô phỏng MCNP-CP (công thức (2.3). Bảng 2.6 thể hiện kết quả tính toán C_{abs} tại các năng lượng gamma trong khoảng 63,3 keV đến 969,0 keV của các đồng vị phóng xạ có trong các mẫu RGTh, IAEA-434 và IAEA-447. Kết quả tính toán bằng chương trình mô phỏng MCNP-CP thể hiện C_{abs} là từ 0,92 đến 1,02. Ngoài ra, kết quả tính toán C_{abs} tại 63,3 keV được so sánh với kết quả đo thực nghiệm từ công trình nghiên cứu của Trần Thiện Thanh và các cộng sự [72], kết quả thể hiện độ sai biệt 5,8% đối với mẫu IAEA-434 và 3,2% đối với mẫu IAEA-447. Điều này chứng minh rằng phương pháp xác định hệ số tự hấp thụ thông qua mô phỏng Monte Carlo bởi chương trình MCNP-CP là đáng tin cậy.

2.6. Đường chuẩn hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần

Bảng 2.7 thể hiện kết quả xác định FEPE thực nghiệm tại 16 năng lượng gamma phát ra từ các đồng vị phóng xạ của chuỗi ²³⁸U. Đường chuẩn FEPE được làm khớp với dạng hàm đa thức *log – log* bằng chương trình ACORES [146]. Hai đường chuẩn được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của giá trị FEPE thực nghiệm tại đỉnh năng lượng 186,2 keV vào kết quả xây dựng đường chuẩn hiệu suất ghi, bao gồm: (1) sử dụng 15 giá trị FEPE tại các năng lượng gamma của các đồng vị ²¹⁰Pb, ²³⁴Th, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi và không sử dụng giá trị FEPE tại năng lượng 186,2 keV của ²²⁶Ra; (2) sử dụng 16 giá trị FEPE của các đồng vị trên, trong đó, FEPE tại 186,2 keV được hiệu chỉnh đóng góp 57,2% [CTTG.1]. Kết quả đánh giá được trình bày ở mục 3.2 (Chương 3).

Đầng	Năng lương	Xác suất p	hát gamma [49]	Giá trị FEPE		
vį	E (keV)	I_{γ} (%)	ΔI_{γ} (%)	$\varepsilon_{\rm P}({\rm E_i})$	$\Delta \varepsilon_{\rm P}(\%)$	
²¹⁰ Pb	46,5	4,25	0,04	0,00240	1,74	
²³⁴ Th	63,3	3,75	0,08	0,01914	2,27	
²³⁴ Th	92,5	4,33	0,38	0,04804	8,80	
²²⁶ Ra	186,2	3,555	0,019	0,06001	0,84	
²¹⁴ Pb	242,0	7,268	0,022	0,05307	0,71	
²¹⁴ Pb	295,2	18,414	0,036	0,04703	0,65	
²¹⁴ Pb	351,9	35,6	0,070	0,04224	0,65	
²¹⁴ Bi	609,3	45,49	0,190	0,02859	0,75	
²¹⁴ Bi	768,4	4,892	0,016	0,02449	0,81	
²¹⁴ Bi	934,1	3,10	0,010	0,02124	0,89	
²¹⁴ Bi	1120,3	14,91	0,030	0,01924	0,70	
²¹⁴ Bi	1238,1	5,831	0,014	0,01766	0,80	
²¹⁴ Bi	1281,0	1,435	0,006	0,01721	1,18	
²¹⁴ Bi	1764,5	15,31	0,050	0,01335	0,75	
²¹⁴ Bi	2204,2	4,913	0,023	0,01069	0,96	
²¹⁴ Bi	2447,9	1,548	0,007	0,00967	1,32	

Bảng 2.7. Giá trị FEPE thực nghiệm của đầu dò GEM50 với mẫu RGU

2.7. Giới hạn phát hiện hoạt độ

Trong trường hợp phổ gamma có đỉnh trên nền phông, giới hạn phát hiện hoạt độ (MDA, Minimum detectable activity) tại mỗi năng lượng được tính toán bằng công thức (2.5) [15, 147]:

$$MDA = w \times \frac{k^2 + 2k\sqrt{B + B\frac{N}{2n}}}{1 - (k \times \sigma_w)^2}$$
(2.5)

Trong đó, B là số đếm nền phông của N kênh; Vùng ROI đỉnh để xác định số đếm của B là bốn lần FWHM cộng với hai kênh trái và hai kênh

phải của vùng quan tâm,
$$w = \frac{1}{\varepsilon_{P}(E_{i}) \times I_{\gamma}(E_{i}) \times m \times t}$$
, $k = 1,645$.

2.8. Xác định hoạt độ của đồng vị phóng xạ ²³²Th, ²³⁸U, ²³⁵U



Hình 2.9. Sơ đồ các bước phân tích hoạt độ 238 U và 235 U.

Hoạt độ của đồng vị phóng xạ được tính toán bởi công thức [52]:

$$A_{i} = \frac{N_{p}(E_{i})}{I_{\gamma}(E_{i}) \times \varepsilon_{p}(E_{i}) \times m \times t} \prod C_{j}$$
(2.6)

Số đếm tại đỉnh 63,3 keV (234Th) được tính toán bằng công thức:

$$N_{234}^{63,3} = N_{total}^{63} - N_{232}^{63,8} = N_{total}^{63} - \frac{A_{232}}{\Pi} \times \mathcal{E}_{63,8} \times I_{232}^{63,8} \times m \times t}{\prod C_{i}^{63,8}}$$
(2.7)

Hoạt độ của 232 Th ($A_{^{232}Th}$) được tính bằng trung bình hoạt độ của các đồng vị con cháu 228 Ac và 208 Tl [45]. Hình 2.9 trình bày sơ đồ các bước

phân tích hoạt độ của ²³⁸U và ²³⁵U thông qua năng lượng 63,3 keV và 185,7 keV sau khi loại trừ đóng góp của đỉnh chồng chập [CTTG.2]. Số đếm của ²³⁵U tại 185,7 keV được xác định bởi công thức [CTTG.2]:



$$N_{235_{\rm U}}^{185,7} = N_{\rm total}^{186} - N_{226_{\rm Ra}}^{186,2} = N_{\rm total}^{186} - \frac{A_{226_{\rm Ra}} \times \mathcal{E}_{186,2} \times I_{232_{\rm Th}}^{180,2} \times m \times t}{\prod C_{\rm t}^{186,2}}$$
(2.10)

Hình 2.10. Tiêu chuẩn đánh giá IAEA.

Tiêu chuẩn đánh giá IAEA (Hình 2.10) bao gồm độ chính xác (Accuracy test) và độ đúng (Precision test). Ở đây, k = 2,58 tương ứng với khoảng tin cậy 99%; MARB nằm trong khoảng từ 15% đến 30% khi đánh giá đồng vị phát gamma [37]. Giá trị RB và độ đúng P được xác định bằng công thức (2.11) và (2.12):

$$RB(\%) = \frac{|A_{tt} - A_{tk}|}{A_{tk}} \times 100$$
 (2.11)

$$P(\%) = \sqrt{\left(\frac{u_{A_{tt}}}{A_{tt}}\right)^{2} + \left(\frac{u_{A_{tk}}}{A_{tk}}\right)^{2}} \times 100$$
(2.12)

2.9. Tóm tắt chương 2

Mục này nêu lại các ý chính đã trình bày trong chương 2.

Chương 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả xác định các thông số chuẩn hóa phương pháp, xác định các thông số hiệu chỉnh của phương pháp

3.1.1. Kết quả xác định hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng bằng MCNP-CP

Hình 3.1 thể hiện kết quả tính toán hệ số trùng phùng tổng trong khoảng từ 0,92 đến 1,21 (số liệu trình bày ở Phụ lục 2).

3.1.2. Kết quả xác định hệ số tự hấp thụ bằng MCNP-CP

Hình 3.2 thể hiện kết quả tính toán hệ số tự hấp thụ trong khoảng từ 0,79 đến 1,08 (số liệu trình bày ở Phụ lục 3).



3.1.2. Kết quả hiệu chỉnh ảnh hưởng của đỉnh 186,2 keV đối với đường chuẩn hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần

Hình 3.3 thể hiện các giá trị FEPE thực nghiệm và các đường chuẩn FEPE, bao gồm: đường chuẩn hiệu suất 1 (màu xanh) được xây dựng bởi 15 giá trị FEPE thực nghiệm, không sử dụng giá trị của đỉnh 186,2 keV (²²⁶Ra); đường chuẩn hiệu suất 2 (màu đỏ) được làm khớp bằng cách sử dụng 16 giá trị hiệu suất ghi đỉnh thực nghiệm, trong đó, giá trị hiệu suất ghi của đỉnh 186,2 keV được hiệu chỉnh đóng góp số đếm của

²²⁶Ra (tương đương 57,2% tổng số đếm tại đỉnh 186 keV). Các giá trị FEPE nội suy từ đường chuẩn 1 và 2 được trình bày ở Phụ lục 4.



Hình 3.3. Đường chuẩn hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần (FEPE) của đầu dò GEM50 với mẫu chuẩn RGU.



Hình 3.4. MDA và hoạt độ riêng tham chiếu của các mẫu CRM.

Công thức (2.5) được sử dụng để xác định giới hạn phát hiện hoạt độ đối với các mẫu tham chiếu CRM (Hình 3.4). MDA-I được xác định từ đường chuẩn 1, MDA-II được xác định từ đường chuẩn 2. Đối với ²³⁴Th (63,3 keV) của mẫu RGTh, MDA-I lớn hơn hàm lượng phóng xạ tham khảo và MDA-II cải thiện 35,5% so với MDA-I. Các kết quả thể hiện đường chuẩn 2 phù hợp hơn so với đường chuẩn 1.

3.2. Kết quả đánh giá sự ảnh hưởng của phương pháp phân tích ²³⁸U, ²³²Th, và ²³⁵U trong mẫu tham chiếu (CRM)

3.2.1. Xét yếu tố ảnh hưởng của giá trị FEPE và các hệ số hiệu chỉnh

Ånh hưởng của FEPE và các hệ số hiệu chỉnh đến kết quả phân tích hoat đô được đánh giá bằng cách so sánh hai phương pháp: Phương pháp 1: hoạt độ được xác định bằng các tính toán sử dụng đường chuẩn 1, hoat đô của ²³⁴Th không loại trừ đóng góp của ²³²Th tai 63 keV. Phương pháp 2: hoat đô được xác đinh bằng cách sử dung đường chuẩn 2, hoat đô ²³⁴Th được loại trừ đóng góp của ²³²Th. Bảng 3.1 và Bảng 3.2 thể hiện kết quả phân tích hoạt đô phóng xa riệng của ²²⁶Ra (186,2 keV), ²¹⁴Pb (295,2 keV và 351,9 keV), ²¹⁴Bi (609,3 keV), ²¹²Pb (238,6 keV), ²²⁸Ac (338,3 keV; 911,2 keV; 969,0 keV) và ²⁰⁸Tl (583,2 keV), sử dụng Phương pháp 1 và phương pháp 2, đạt mức "A, Chấp nhận" theo quy trình kiểm đinh của IAEA. Tai năng lương 186,2 keV, các kết quả tính toán hoat đô của ²²⁶Ra sử dung phương pháp 1 thể hiện đô sai biệt tương đối là 4,6%, 1,8%, 5,4% lần lượt cho các mẫu IAEA-434, IAEA-447, RGTh (Bång 3.1); trong khi sử dụng phương pháp 2 thể hiện độ sai biệt tương ứng là 1,0%, 1,6%, 2,2% (Bảng 2.2). Điều này chứng minh rằng đường chuẩn FEPE có đóng góp ảnh hưởng đến kết quả xác đinh hoat đô tai 186,2 keV.

Bảng 3.1 thể hiện kết quả hoạt độ riêng của ²³⁴Th tính toán bởi phương pháp 1 có độ sai biệt so với giá trị tham chiếu từ IAEA lần lượt

là 35,7%, 34,3%, 127,0% đối với IAEA-434, IAEA-447, RGTh. Do đó, kết quả đánh giá cuối cùng là "**N, không chấp nhận**". Bảng 3.2 thể hiện các kết quả tính toán hoạt độ riêng sử dụng phương pháp 2, có độ sai biệt cao nhất là 9% so với giá trị tham chiếu từ IAEA. Trạng thái cuối cùng nhận được là "**A, chấp nhận**" cho tất cả kết quả. Điều này xác nhận rằng phương pháp phân tích là phù hợp và đáng tin cậy.

Bảng 3.1. Kết quả hoạt độ riêng 232Th và 238U trong mẫu IAEA-434,

Tên mẫu	Chuỗi phóng xạ	Đồng vị	Năng lượng (keV)	Hoạt độ riêng A _{tc} (Bq/kg)	MDA-I (Bq/kg)	Hoạt độ riêng A _{tt} (Bq/kg)	RB (%)	Kết quả đánh giá
		²³⁴ Th	63,3	120 ± 6	75,84 ± 2,57	163 ± 6	35,7	Ν
		²²⁶ Ra	186,2	_	$16,\!82 \pm 0,\!42$	744 ± 10	4,6	А
IAEA-	238 1 T	21401	295,2	790 + 21	$4,\!47 \pm 0,\!10$	719 ± 6	7,9	А
434	0	Pb	351,9	780 ± 31	$2,\!65\pm0,\!06$	729 ± 6	6,5	А
		²¹⁴ Bi	609,3	_	$2,\!03\pm0,\!07$	748 ± 7	4,2	А
		²²⁶ Ra tru	ng bình			731 ± 4	6,4	А
		²¹² Pb	238,6		$0,75 \pm 0,03$	$36,2 \pm 0,6$	2,2	А
		²⁰⁸ T1	583,2		$0,\!70\pm0,\!03$	$39,8\pm0,6$	7,5	А
	232Th		338,3	37 ± 2	$3,05 \pm 0,16$	$37,8 \pm 1,5$	2,3	А
	111	²²⁸ Ac	911,2		$1,39 \pm 0,11$	$37,9 \pm 1,3$	2,5	А
IAEA- 447			969,0		$2{,}78\pm0{,}20$	$36,8 \pm 1,4$	0,5	А
		²³² Th tru	ng bình			$37,8 \pm 0,4$	2,1	А
		²³⁴ Th	63,3	$22,2 \pm 0,8$	$20,82 \pm 1,26$	$29,8 \pm 2,6$	34,3	Ν
		²²⁶ Ra	186,2		$8,\!39 \pm 0,\!28$	$24,7 \pm 0,7$	1,8	А
	238I I	²¹⁴ Pb	295,2	-25+2	$2,\!62 \pm 0,\!07$	$25,9 \pm 0,4$	3,0	А
	0		351,9	25 ± 2	$1,\!60 \pm 0,\!04$	$25,5 \pm 0,4$	1,7	А
		²¹⁴ Bi	609,3		$1,03 \pm 0,05$	$26,3 \pm 0,4$	4,7	А
		²²⁶ Ra tru	ng bình			$25,8 \pm 0,2$	3,0	А
		²¹² Pb	238,6	_	$5,19 \pm 0,09$	3124 ± 44	3,9	А
		²⁰⁸ T1	583,2	_	$3,\!84 \pm 0,\!05$	3387 ± 30	4,2	А
	232Th		338,3	3250 ± 90	$8,11 \pm 0,31$	3263 ± 117	0,4	А
	111	²²⁸ Ac	911,2	-	$19,13 \pm 0,69$	3332 ± 105	2,5	А
			969,0			3281 ± 106	1,0	А
DCTh		²³² Th tru	ng bình			3304 ± 23	1,7	А
KUIII		²³⁴ Th	63,3	_	$92,59 \pm 2,36$	177 ± 12	127	Ν
		²²⁶ Ra	186,2	_	$23{,}18\pm0{,}57$	74 ± 2	5,4	А
	238 1 I	⁸ U ²¹⁴ Pb	295,2	78 ± 3	$12,50 \pm 0,16$	77 ± 1	1,6	А
	U		351,9		$6,\!79\pm0,\!09$	79 ± 1	1,8	Α
		²¹⁴ Bi	609,3		$6,14 \pm 0,10$	83 ± 1	6,1	Α
		²²⁶ Ra tru	ng bình			80 ± 1	2,0	А

IAEA-447, RGTh sử dụng phương pháp 1

3.2.2. So sánh hiệu quả của phương pháp đo mẫu trực tiếp và phương pháp đo sau cân bằng phóng xạ

Phương pháp	Phương	Hàm lượng	Đường chuẩn hiệu suất 1		Đường chuẩn hiệu suất 2	
	án	A _{tc} (Bq/kg)	Hàm lượng A _{tt} (Bq/kg)	Kết quả đánh giá	Hàm lượng A _{tt} (Bq/kg)	Kết quả đánh giá
Trực tiếp	1				$3,70 \pm 0,27$	А
Cân bằng	2	$3,6 \pm 0,3$	$3,\!18 \pm 0,\!08$	А	$3,50 \pm 0,09$	А
Cân bằng	3		$2,97 \pm 0,08$	Ν	$3,\!49 \pm 0,\!09$	А

Bảng 3.3. Hàm lượng phóng xạ ²³⁵U của mẫu RGTh

Các kết quả phân tích hoat đô riêng ²³⁵U đều lớn hơn MDA-I và MDA-II. Hoat đô riêng 235U của mẫu RGTh được xác đinh với ba phương án khác nhau, bao gồm: (i) Phương pháp trực tiếp: loại trừ đóng góp của ²²⁶Ra thông qua sự cân bằng hoat đô với ²³⁴Th (goi là phương án 1, hình 2.9); (ii) **Phương pháp cân bằng**: hoat đô riêng ²³⁵U được xác định tại năng lượng 185,7 keV với sự loại trừ đóng góp của ²²⁶Ra thông qua sự cân bằng hoat đô với ²¹⁴Pb (gọi là phương án 2, hình 2.9) và ²¹⁴Bi (gọi là phương án 3, hình 2.9). Bảng 3.3 thể hiện kết quả phân tích hoạt độ riêng ²³⁵U từ phương án 2 có trạng thái đánh giá là "A, Chấp nhận" cho cả hai đường chuẩn hiệu suất, tuy nhiên, cần giả đinh sư cân bằng hoat đô của 226Ra với con cháu (214Pb và 214Bi) cho từng loại mẫu môi trường cu thể khác nhau [33, 68, 148]. Ngược lại, các kết quả tính toán hoạt độ riêng ²³⁵U theo phương án 1 sử dụng đường chuẩn hiệu suất 2 có đô sai biệt nhỏ hơn 3% so với giá tri tham chiếu và kết quả đánh giá là "A, Chấp nhận". Điều này xác nhân rằng phương pháp phân tích là đáng tin cây và có thể được áp dung để xác đinh hoat đô ²³⁵U trong các mẫu rắn bằng cách sử dung hê phổ kế gamma.

3.3. Xác định hoạt độ ²³²Th, ²³⁸U, ²³⁵U trong mẫu dạng rắn

Các kết quả phân tích hoạt độ riêng được công bố trong [CTTG.2, CTTG.3] và được trình bày chi tiết ở phụ lục 5. Độ sai biệt tương đối

giữa kết quả hoạt độ riêng ²¹²Pb, ²²⁸Ac, ²⁰⁸Tl và trung bình hoạt độ riêng ²³²Th là thấp hơn 7% (Hình 3.5a). Đa số các mẫu phân tích có hoạt độ riêng ²³²Th nhỏ hơn hoạt độ riêng trung bình của thế giới (Hình 3.5b).



 Giá trị trung bình hoạt độ phóng xạ riêng ²³Ra (Bq/kg)

 Mẫu phản tích

 Hình 3.6. Kết quả xác định hoạt độ riêng ²³⁴Th, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi (Hình 3.6a), so sánh ²²⁶Ra và trung bình thế giới (Hình 3.6b).

0

10 20

30

40 50 60 70

Hình 3.6 thể hiện kết quả xác định hoạt độ riêng của ²³⁴Th, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi với độ sai biệt tương đối so với trung bình ²²⁶Ra là dưới 6% (Hình 3.6a). Hoạt độ riêng ²³⁴Th của các mẫu phân tích trong khoảng từ 4,91 \pm 0,7 (Bq/kg) đến 51,6 \pm 3,6 (Bq/kg), đa số thấp hơn giá trị trung bình của thế giới, tuy nhiên, các mẫu S5, S6, S9, S10, S11, S13 có hoạt độ riêng cao hơn mức trung bình thế giới (Hình 3.6b).



Bảng 3.4. Kết quả xác định hoạt độ riêng của ²³²Th, ²²⁶Ra, và ⁴⁰K trong các mẫu môi trường [CTTG.3]

VI	Loại mẫu môi	Hoạt độ riêng (
Khu vực	trường	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Trung bình thế giới [36]		35	30	400
Khu vực châu Á				
Trung Quốc [149-151]	Đá, VLXD	10,7 - 233,1	11,6 - 53,6	249,6 - 981,2
Saudi Arabia [152]	Trầm tích	5,2-29,3	5,3 - 58,9	325 - 1133
Ân Độ [155, 156]	Đá, VLXD	2 - 89	25 - 359	103 - 634
Iran [40, 42]	Đất, đá, VLXD	7 - 118	6 - 118	29 - 1190
Iraq [157]	VLXD	33 - 179	1,9 - 17,4	108,7 - 977,8
Nhật Bản [158]	VLXD	1 - 320	0,4 - 200	1 - 1100
Khu vực ngoài châu Á				
Ai Cập [153, 154]	Đá, VLXD	3 - 212	3 - 171	7 - 3382
Spain [142]	VLXD	2 - 181	4 - 185	67 - 4530
Poland [159]	Đá	5,2-52,6	2,4 - 71,6	520 - 1560
Canada [160]	Đất	28	28	641
Viật Nam (luận án)		$(4,4\pm 0,1)$ –	$(5,8\pm0,1)$ –	$(14,9 \pm 0,8) -$
việt Nam (luận an)		$(53,5 \pm 0,4)$	$(83,6 \pm 0,8)$	$(664, 9 \pm 10, 6)$
Môi trường tự nhiên	Đá, cát tự nhiên	$(4,9 \pm 0,7) -$	$(5,7\pm 0,1) -$	$(14,9 \pm 0,8) -$
Noi truong tụ ninen	$(n_1+n_4=14 \text{ mẫu})$	$(41, 2 \pm 2, 6)$	$(77, 7 \pm 0, 8)$	$(467, 7 \pm 7, 6)$
Sản phẩm vật liệu xây	Xi măng, gạch	$(25,0\pm 0,8) -$	$(19,5\pm 0,3) -$	$(94,7\pm 2,5) -$
dựng	$(n_2+n_3=8 m \tilde{a} u)$	$(51, 6 \pm 2, 8)$	$(83,5 \pm 0,8)$	$(600, 1 \pm 10, 4)$

Hoạt độ riêng ⁴⁰K của các mẫu phân tích trong khoảng từ $14,9 \pm 0,8$ (Bq/kg) đến $664,9 \pm 10,6$ (Bq/kg), đa số thấp hơn giá trị trung bình của thế giới ngoại trừ các mẫu S5, S10, S11, S12, S13, S18 (Hình 3.7). Bảng 3.4 thể hiện kết quả phân tích hoạt độ riêng ²³²Th, ²²⁶Ra, và ⁴⁰K của các mẫu môi trường phù hợp với dữ liệu đã công bố ở một số quốc gia. Hình 3.8 thể hiện kết quả hoạt độ riêng của ²³⁵U và trung bình ²³⁵U, với độ

sai biệt từ 0,1% đến 5,9%. Tỉ lệ 235 U/ 238 U trong các mẫu phân tích là từ 0,0442 ± 0,0052 đến 0,0601 ± 0,0124. Kết quả cho thấy trong các mẫu không có sự mất cân bằng uranium [36, 145, 161].

3.4. Áp dụng mô hình đánh giá nguy cơ ảnh hưởng của đồng vị phóng xạ tự nhiên trong môi trường sống của cư dân gây ra bởi vật liệu xây dựng

3.4.1. Hoạt độ tương đương radium

Hình 3.10 thể hiện các kết quả hoạt độ tương đương radium (Ra_{eq}) từ 14,3 ± 2,2 đến 209,6 ± 15,5 (Bq/kg), thấp hơn ngưỡng an toàn thế giới (370 Bq/kg). Giá trị Ra_{eq} trung bình là 91,1 ± 6,8 (Bq/kg), thấp hơn một số kết quả nghiên cứu khác như [142, 150, 151, 154, 156, 163].



3.4.2. Các chỉ số nguy hiểm do chiếu xạ ngoài và chiếu xạ trong

Hình 3.11 thể hiện kết quả tính toán các chỉ số H_{ex}, H_{in}, I_y, và I_a (số liệu được trình bày ở Bảng 6A, phụ lục 6). Chỉ số nguy cơ phóng xạ bên ngoài (H_{ex}) và chỉ số nguy cơ phóng xạ bên trong (H_{in}) có giá trị lần lượt trong khoảng từ 0,038 ± 0,006 đến 0,566 ± 0,042 và 0,052 ± 0,008 đến 0,702 ± 0,052. Chỉ số I_Y và I_a có giá trị từ 0,050 ± 0,008 đến 0,758 ± 0,056 và 0,025 ± 0,003 đến 0,258 ± 0,018. Tất cả các chỉ số H_{ex}, H_{in}, I_y, và I_a đều thấp hơn giá trị giới hạn theo quy định UNSCEAR [48] và Tiêu chuẩn Việt Nam [164].

3.4.3. Suất liều hấp thụ và liều hiệu dụng hàng năm

Hình 3.12 thể hiện kết quả xác định liều hiệu dụng hàng năm (AED) từ $0,059 \pm 0,009$ đến $0,881 \pm 0,065$ (mSv/y) (số liệu được trình bày ở Bảng 6B, phụ lục 6). Giá trị AED trong tất cả các mẫu phân tích đều thấp hơn giá trị khuyến nghị [48, 164].





3.5. Tóm tắt chương 3

Mục này nêu tóm tắt lại những ý chính đã trình bày trong chương 3

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết quả nghiên cứu đạt được của luận án

Luân án đã giải quyết những mục tiêu đề ra và đạt được những kết quả sau: (i) Chuẩn hóa phương pháp phân tích phổ gamma: Phương pháp phân tích phổ gamma đã được chuẩn hóa để xác định hoạt độ của đồng vi phóng xa tư nhiên có trong mẫu môi trường dang rắn. Hê phổ kế gamma sử dung đầu dò HPGe được mô phỏng Monte Carlo với chương trình MCNP-CP để tính toán hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng và hệ số tự hấp thụ tại các năng lượng gamma phát ra từ các đồng vị phóng xa trong chuỗi ²³⁸U, ²³²Th, và ²³⁵U [CTTG.2]; Xây dưng đường chuẩn hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần (FEPE) cho đầu dò HPGe. Phổ gamma thực nghiệm của mẫu chuẩn RGU được sử dụng để xác đinh FEPE trong khoảng năng lương từ 46,5 keV đến 2447,9 keV [CTTG.1, CTTG.2, CTTG.3, CTTG.5]; (ii) Xác nhân phương pháp phân tích: Phương pháp phân tích sau khi chuẩn hóa được áp dụng để xác đinh hoat đô ²³⁸U trong các mẫu IAEA-434, IAEA-447, và RGTh [CTTG.2]; Các kết quả tính toán hoat đô ²³⁸U thông qua phép đo cân bằng với hoat đô 234Th (63,3 keV), có tính đến hê số hiệu chỉnh tư hấp thụ và loại bỏ sự đóng góp của 232Th (63,8 keV) có độ sai biệt nhỏ hơn 3% so với hoat đô tham chiếu từ IAEA [CTTG.2]; Hoat đô ²³⁵U trong mẫu RGTh được xác đinh thông qua phép đo đỉnh năng lượng 185,7 keV có sư hiệu chỉnh đóng góp của 226Ra tại năng lượng 186,2 keV. Phương pháp này sử dụng giả định cân bằng hoat đô của 234 Th – 226 Ra. do đó, mẫu phân tích có thể đo ngay sau khi chuẩn bị mẫu mà không cần thời gian chờ đơi sư cân bằng của ²²⁶Ra và con cháu (²¹⁴Pb và ²¹⁴Bi) [CTTG.2]; (iii) Úng dung phương pháp đã chuẩn hóa để phân tích hoat độ của đồng vị phóng xạ tự nhiên trong mẫu môi trường: Phương pháp phân tích được áp dụng để xác định hoạt độ 238U, 232Th, và 235U trong các mẫu môi trường dạng rắn. Kết quả thể hiện sự phù hợp tốt với kết quả nghiên cứu ở một số quốc gia khác trên thế giới [CTTG.2, CTTG.3]; Cuối cùng, kết quả hoạt độ đồng vị phóng xạ tự nhiên được sử dụng để ước lượng các nguy cơ bức xạ ảnh hưởng đến người trưởng thành cư trú trong môi trường nhà ở [CTTG.3].

2. Những điểm mới của luận án

(i) Luân án đã nghiên cứu tỉ lê đóng góp của ²²⁶Ra và ²³⁵U trong phổ gamma của mẫu phân tích có sư cân bằng hoat đô 238U - 226Ra và tỉ lê uranium tự nhiên (235U / 238U). Kết quả tính toán thể hiện số đếm tổng tai vùng năng lương 186 keV bao gồm 57,2% của 226 Ra (186,2 keV) và 42,8% của ²³⁵U (185,7 keV). Những tính toán này được sử dung để xác định nhanh chóng hoạt độ 238U và 235U bằng phép đo trực tiếp năng lương 186 keV của mẫu môi trường dang rắn. Kết quả được công bố trong [CTTG.1]; (ii) Luân án đã nghiên cứu xây dưng và chuẩn hóa phương pháp xác định hoạt độ ²³⁸U và ²³⁵U sử dụng hệ phổ kế gamma với đầu dò HPGe. Hê số hiệu chỉnh trùng phùng tổng và hê số tư hấp thu được xác đinh bằng chương trình mô phỏng Monte Carlo với phần mềm MCNP-CP. Ảnh hưởng của sự chồng châp đỉnh phổ tại vùng năng lương 63 keV và 186 keV cũng được khảo sát và loại trừ. Phương pháp này cho phép xác định trực tiếp và nhanh chóng hoat đô của ²³⁸U thông qua đỉnh 63.3 keV (²³⁴Th) và hoat đô của ²³⁵U thông qua đỉnh 185.7 keV. Tiêu chuẩn kiểm đinh IAEA xác nhân phương pháp phân tích là phù hợp để áp dụng cho nhiều loại mẫu phân tích khác nhau như mẫu giàu thorium, mẫu cân bằng hoặc mất cân bằng uranium. Kết quả nghiên cứu đã được công bố trong [CTTG.2]; (iii) Áp dung phương pháp phân tích mà luân án đã phát triển để xác đinh hàm lượng phóng xa của ²³⁸U, ²³²Th, và ⁴⁰K trong một số mẫu mội trường dang rắn. Kết quả được sử dung để đánh giá các chỉ số nguy cơ bức xa như: hoat đô

tương đương radium, chỉ số nguy hiểm do chiếu xạ ngoài, chỉ số nguy hiểm do chiếu xạ trong, chỉ số I_{γ} và I_{α} , suất liều hấp thụ và liều hiệu dụng hàng năm. Kết quả được đăng tải trong [CTTG.3].

3. Những vấn đề còn bỏ ngỏ và đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo

(i) Kiểm chứng thực nghiệm hệ số tự hấp thụ tại năng lượng 63,3 keV (²³⁴Th): luân án đã triển khai tính toán hê số tư hấp thu tai 63,3 keV bằng MCNP-CP và các kết quả tính toán khá phù hợp với một số nghiên cứu trước đó đã công bố, nhưng chưa có kết quả thực nghiệm kiểm chứng. Do vậy, trong tương lai cần thực hiện các công trình nghiên cứu tiếp theo nhằm đo đạc thực nghiệm hệ số tự hấp thụ tại năng lượng này nhằm xác minh và cải tiến các mô hình tính toán; (ii) Khảo sát hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần (FEPE) và hiệu suất tổng (TE): luân án chỉ xây dựng đường chuẩn FEPE cho mẫu dang hình học tru sử dụng mẫu chuẩn RGU nhằm mục đích phân tích hoạt đô đồng vi phóng xa. Tuy nhiên, để đánh giá ảnh hưởng của cấu trúc hình học đo đến hiệu suất ghi của đầu dò, cần khảo sát đường cong FEPE và TE với các nguồn điểm chuẩn đơn năng lương. Từ đó, đường cong hiêu chỉnh hiêu suất có thể được sử dung để so sánh, đánh giá với kết quả khi sử dung mẫu chuẩn RGU; (iii) Mở rộng phân tích đối với các loại mẫu khác nhau: vì han chế về thời gian và năng lực, luân án chỉ tập trung xây dưng phương pháp phân tích cho các mẫu môi trường dạng rắn. Do vậy, cần thực hiên phân tích, đánh giá trên nhiều loại mẫu khác nhau (ví du như mẫu lỏng, mẫu thực vật, mẫu thực phẩm,...) để kiểm chứng và cải tiến phương pháp phân tích; (iv) Cải thiện thời gian đo và hiệu quả kinh tế: một han chế của nghiên cứu này là mất nhiều thời gian đo phổ gamma (24 giờ đến 48 giờ) dẫn đến khả năng áp dụng trong thực tiễn chưa mang lại hiệu quả kinh tế. Do đó, cần có nghiên cứu tiếp theo nhằm cải thiên giới han phát hiên và rút ngắn thời gian đo.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ

1. Các bài báo liên quan đến luận án

- [CTTG.1] Le Quang Vuong, Huynh Dinh Chuong, Vo Hoang Nguyen, Nguyen Quoc Hung, Tran Thien Thanh, Chau Van Tao (2017). Revision of nuclear data of ²³⁵U and ²²⁶Ra for the 186-keV gammaray peak for the determination of activity in environmental samples, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 314 (2), 1273-1277
- [CTTG.2] Le Quang Vuong, Tran Thien Thanh, Phan Long Ho, Le Cong Hao, Chau Van Tao (2023). Simultaneous correction of the coincidence summing and self-absorption for radioactivity measurement in solid samples by MCNP-CP code, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 332 (2), 423-434
- [CTTG.3] Le Quang Vuong, Huynh Dinh Chuong, Lam Duy Nhat, Hoang Duc Tam, Tran Thien Thanh, Vu Tuan Minh, Le Dinh Hung, Phan Long Ho, and Chau Van Tao (2023). Assessing radiation hazards associated with natural radioactivity in building materials in Ho Chi Minh City, Vietnam, Nuclear Technology and Radiation Protection, 38, 30-38.

2. Các công trình khác

- [CTTG.4] Le Quang Vuong, Vo Hoang Nguyen, Huynh Dinh Chuong, Lau Minh Phuc, Tran Thien Thanh, Chau Van Tao (2017). Study of the minimum detectable activity in gamma-ray spectrometer for various shielding configurations, Science & Technology Dvelopment, 20 (T4-2017), 56 – 62
- [CTTG.5] Tran Thien Thanh, <u>Le Quang Vuong</u>, Phan Long Ho, Huynh Dinh Chuong, Vo Hoang Nguyen, Chau Van Tao (2018). Validation of an advanced analytical procedure applied to the measurement of environmental radioactivity, Joural of Environmental Radioactivity, 184-185, 109-113
- [CTTG.6] Lê Quang Vương, Phan Long Hồ, Lê Công Hảo, Trần Thiện Thanh, Châu Văn Tạo (2020). Đánh giá hiệu ứng trùng phùng bằng chương trình ETNA và mô phỏng MCNP-CP. Kỷ yếu hội nghị những tiến bộ trong vật lý kỹ thuật và ứng dụng - lần VI, ISBN: 978-604-9985-13-3, trang 314 – 320.