

Bài báo nghiên cứu

NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ HOẠT ĐỘ RADON
TRONG NHÀ SỬ DỤNG HỆ PHỔ KẾ GAMMA

Lê Quang Vương^{1,2*}, Nguyễn Huỳnh Khánh Duyên¹,
Huỳnh Đình Chương², Hoàng Đức Tâm¹, Trần Thiện Thanh², Châu Văn Tạo²

¹Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

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

Ngày nhận bài: 16-8-2023; ngày nhận bài sửa: 07-9-2023; ngày duyệt đăng: 10-9-2023

TÓM TẮT

Theo Tổ chức Y tế thế giới (WHO), khí radon trong nhà là một trong những nguyên nhân gây ung thư phổi và cần được giám sát. Trong nghiên cứu này, chúng tôi trình bày một phương pháp đánh giá hoạt độ radon (^{222}Rn) trong nhà dựa trên phép đo phổ gamma của đồng vị ^{214}Bi , là sản phẩm phân rã của ^{222}Rn trong chuỗi ^{238}U . Đầu tiên, hoạt độ ^{222}Rn trong năm căn phòng có kích thước khác nhau được đo bằng hệ thiết bị RAD7. Tiếp theo, hoạt độ ^{214}Bi được xác định bằng hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò NaI(Tl) kết hợp với mô phỏng MCNP6. Hàm làm khớp tuyến tính thể hiện mối tương quan tốt giữa kết quả hoạt độ ^{214}Bi và ^{222}Rn ($R^2 = 0,998$). Phương pháp này có thể cho kết quả dự đoán nhanh chóng hoạt độ ^{222}Rn trong nhà, hỗ trợ điều tra giám sát các khu vực có hàm lượng ^{222}Rn bất thường.

Từ khóa: radon trong nhà; MCNP; đầu dò NaI(Tl); RAD7; hoạt độ phóng xạ

1. Giới thiệu

Đồng vị radon (^{222}Rn , chu kỳ bán rã $T_{1/2} = 3,82$ ngày) là chất khí, được hình thành do sự phân rã của Radium (^{226}Ra) trong môi trường. Radon thường hiện diện trong không khí ngoài trời với hàm lượng thấp và ít gây ra nguy cơ về sức khỏe. Tuy nhiên, khi radon tồn tại bên trong không gian nhà ở, nó có thể tích tụ ở hàm lượng cao (Azeez et al., 2021). Sau khi hít phải khí radon, một lượng lớn hạt alpha ion hóa được sinh ra từ sự phân rã radon và con cháu (^{218}Po và ^{214}Po) có thể tương tác với các mô sinh học trong cơ thể dẫn đến tổn thương DNA (WHO, 2009). Theo nghiên cứu của Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (Environmental Protection Agency, 2016), radon là nguồn gây ung thư phổi nhiều thứ hai sau thuốc lá, với khoảng 21.000 ca tử vong mỗi năm.

Radon trong nhà có thể đo trực tiếp bằng buồng khuếch tán thụ động (Gulan et al., 2023; Petermann & Bossew, 2021), sử dụng tấm plastic CR-39 (To et al., 2013; Hosoda et

Cite this article as: Le Quang Vuong, Nguyen Huynh Khanh Duyen, Huynh Dinh Chuong, Hoang Duc Tam, Tran Thien Thanh, & Chau Van Tao (2023). Assessment of indoor radon activity concentration by using the gamma spectrometry. *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, 20(12), 2081-2094.

al., 2021; Kaur, et al., 2021; Lee et al., 2014; Trevisi et al., 2012), hoặc tắm hấp thụ radon thụ động (Barba-Lobo et al., 2023)... Tuy nhiên, phương pháp này cần thời gian chờ đợi từ 3-6 tháng, yêu cầu xây dựng chính xác đường chuẩn hiệu suất, phương pháp xử lý hóa học phức tạp... Một số nghiên cứu thể hiện mối tương quan giữa hàm lượng radon trong nhà và hoạt độ uranium trong cấu tạo địa chất tại cùng khu vực. Nhóm tác giả Hosoda và các cộng sự (Hosoda et al., 2021) tiến hành xác định hoạt độ radon trong 47 ngôi nhà. Kết quả thể hiện sự tương đồng với hoạt độ radon khu vực xung quanh các ngôi nhà ấy. Ngoài ra, các phép đo hoạt độ của đồng vị phóng xạ tự nhiên (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) bằng hệ phổ kế gamma cũng được thực hiện. Kết quả xác định hoạt độ của ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K trong môi trường thể hiện mối tương quan thuận với hoạt độ radon. Nhóm tác giả Park và các cộng sự (Park et al., 2019) trình bày một phương pháp lập bản đồ phân bố hoạt độ radon trong nhà. Nhóm nghiên cứu đánh giá các hệ số liên quan gồm hoạt độ radon trong nhà, hoạt độ Radi trong lớp đất bề mặt, hàm lượng sỏi và cấu tạo địa chất, tốc độ phát radon từ các vết đứt gãy. Kết quả thể hiện ở các khu vực có hoạt độ Radi cao thì cũng có mức radon cao tương ứng. Nhóm tác giả Berens và các cộng sự (Berens et al., 2017) đã sử dụng đầu dò NaI(Tl) để khảo sát tổng bức xạ gamma phát ra từ đồng vị phóng xạ tự nhiên tại 402 vị trí của bang Georgia, Hoa Kỳ. Phương pháp phân tích phương sai một chiều (ANOVA) được sử dụng để so sánh kết quả khảo sát chỉ số gamma với dữ liệu hoạt độ radon trong nhà của 1351 địa điểm trong cùng khu vực. Kết quả đánh giá thống kê thể hiện rằng ở các vị trí có tổng gamma cao thì radon cũng cao và ngược lại. Các nghiên cứu trên chứng minh rằng, chỉ số gamma có thể đại diện cho một phép đo khảo sát ban đầu về hoạt độ radon trong nhà (Awhida et al., 2016; Barba-Lobo et al., 2023; Lee et al., 2014; Liu et al., 2016; Taylor-Lange et al., 2014; Yarmoshenko et al., 2014). Từ đó đưa ra các cảnh báo nguy cơ cũng như có biện pháp hạn chế mức radon trong nhà bằng cách lót thêm một lớp vật liệu hấp thụ radon phát ra từ vật liệu xây dựng (Olsthoorn et al., 2022), hoặc nâng cao hiệu quả của hệ thống thông gió để giảm liều bức xạ từ radon và các sản phẩm con cháu (Gulan et al., 2023).

Trong nghiên cứu này, hoạt độ ^{222}Rn trong các căn phòng có kích thước khác nhau được khảo sát bằng hệ thiết bị RAD7. Kết quả thể hiện sự tương đồng với số liệu nghiên cứu của nhiều quốc gia khác trên thế giới, thấp hơn hoạt độ giới hạn theo Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 10759:2016 (Vietnam standard, 2016a) và quy định của thế giới (Environmental Protection Agency, 2016; UNSCEAR, 2000; WHO, 2009). Bên cạnh đó, hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò NaI(Tl) kết hợp với các mô phỏng Monte Carlo sử dụng chương trình MCNP6 cũng được triển khai để xác định hoạt độ ^{214}Bi trong các căn phòng. Kết quả hoạt độ ^{214}Bi thể hiện mối tương quan tuyến tính với hoạt độ ^{222}Rn đo bởi hệ RAD7. Giá trị nội suy hoạt độ ^{222}Rn từ đường làm khớp có độ sai biệt tương đối thấp hơn 10% so với hoạt độ ^{222}Rn đo thực nghiệm. Điều này chứng minh rằng hàm làm khớp tuyến tính là đáng tin cậy để áp dụng cho các đánh giá nhanh chóng hoạt độ ^{222}Rn mà không cần sử dụng thiết bị đo trực tiếp ^{222}Rn , đặc biệt phù hợp cho các khảo sát phóng xạ trong nhà với kiến trúc hạ tầng sử dụng vật liệu mới như tro bay, cấu trúc mới tiết kiệm năng lượng.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Hệ thiết bị RAD7

Trong nghiên cứu này, thiết bị RAD7 do nhà sản xuất DURRIDGE cung cấp được sử dụng để xác định hoạt độ radon (^{222}Rn) trong các căn phòng. Độ chính xác hiệu chuẩn của thiết bị theo nhà sản xuất là trên 95% (DURRIDGE, 2009). Thiết bị có khả năng phát hiện được hoạt độ của radon trong khoảng từ 3,7 (Bq m^{-3}) đến 740 000 (Bq m^{-3}). Buồng đo của RAD7 hình bán cầu với một đầu dò silic đặt tại tâm. Điện trường bên trong buồng đo được tạo bởi điện thế cao (khoảng 2000-2500 V) có tác dụng kéo các hạt mang điện dương đến đầu dò. Sau đó, các hạt mang điện dương trên bề mặt đầu dò được chuyển đổi thành tín hiệu điện và được ghi nhận, sắp xếp vào các cửa sổ dựa trên năng lượng của chúng. Trong đó, cửa sổ A hiển thị thông tin về việc ghi nhận ^{218}Po (chu kỳ bán rã $T_{1/2} = 3,071 \pm 0,022$ phút, xem như cân bằng với ^{222}Rn) trong quá trình đo mẫu phân tích. Thiết bị có ba bước vận hành chính: làm sạch, làm khô và phân tích. Ở bước làm sạch, máy bơm được cài đặt chế độ tự động (Auto) để có thể bơm sạch khí tồn đọng trong buồng đo. Tiếp theo, đầu vào và đầu ra của ống dẫn khí được kết nối với ống hút ẩm loại lớn để làm khô buồng đo. Theo khuyến cáo của nhà sản xuất, quá trình làm khô buồng đo có thể hoàn thành khi độ ẩm đạt $\text{RH} < 10\%$. Cuối cùng, không khí trong phòng kín được đưa vào buồng đo của RAD7 và đo trong 30 phút /chu kỳ. Chu trình đo được thực hiện ở chế độ đo 1 ngày đêm (48 chu kỳ) và lấy kết quả trung bình hoạt độ radon. Vị trí đặt thiết bị và quy trình đo được thực hiện theo hướng dẫn của TCVN 10759:2016 (Vietnam standard, 2016b).

2.2. Hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò NaI(Tl)

Hệ phổ kế GAMMA-RAD5 (Amptek Inc., 2008) sử dụng đầu dò NaI(Tl) với tinh thể nhấp nháy hình trụ, kích thước 76 x 76 mm, độ phân giải danh định (FWHM) nhỏ hơn 7% tại năng lượng 662 keV (^{137}Cs). GAMMA-RAD5 là một hệ thống hoàn chỉnh bao gồm tinh thể, ống nhân quang (PMT), bộ tiền khuếch đại, bộ xử lý xung kỹ thuật số và bộ phân tích biên độ đa kênh (MCA). Tất cả các linh kiện được gia cố chắc chắn và được bọc một lớp chống sóc cơ học, rung động giúp cho hệ phổ kế dễ dàng di chuyển, lắp đặt và vận hành, phù hợp cho các phép đo phòng thí nghiệm và các ứng dụng hiện trường. Phần mềm ADMCA (ADMCA software, 2023) được sử dụng để thiết lập các thông số cấu hình hoạt động, thu nhận và xử lý tín hiệu phổ gamma thực nghiệm. Ngoài ra, phần mềm này còn có thể tự động hiệu chỉnh thời gian chết cho phổ gamma.

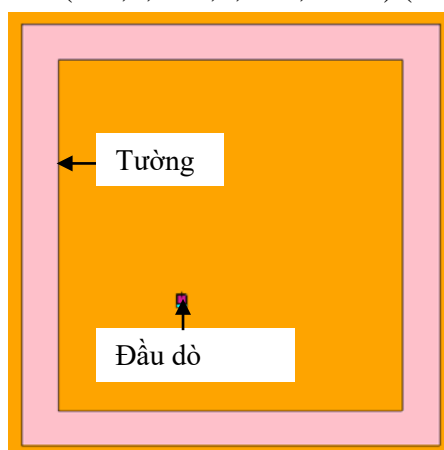
Trong nghiên cứu này, hệ phổ kế được bố trí theo hướng dẫn đo radon trong nhà của TCVN 10759:2016 (Vietnam standard, 2016b), với vị trí đo cách mặt đất 100 cm, cách tường 100 cm. Các căn phòng có kích thước khác nhau (Bảng 1), được đóng kín cửa trong khoảng thời gian hơn 3 ngày nhằm đảm bảo sự ổn định nhiệt độ, áp suất và sự phân bố radon. Thời gian đo phổ gamma thực nghiệm là 86.400 giây.

Bảng 1. Thông tin kích thước các căn phòng

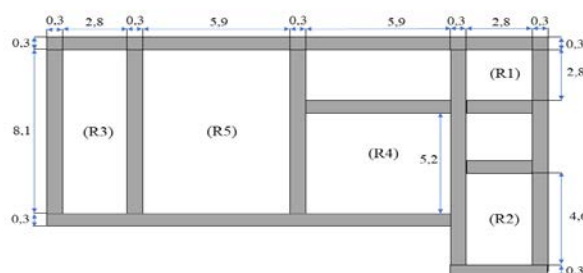
Tên phòng	Chiều dài (m)	Chiều rộng (m)	Chiều cao (m)	Thể tích (m ³)
R1	3,1	3,0	3,0	27,9
R2	3,1	4,9	3,0	45,6
R3	3,1	8,4	3,0	77,7
R4	6,2	5,5	3,0	101,4
R5	6,2	8,4	3,0	155,3

2.3. Mô phỏng Monte Carlo

Mô phỏng Monte Carlo với chương trình MCNP6 phiên bản 6.1 (Pelowitz, 2013) được sử dụng để xây dựng đường chuẩn hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần (FEPE) cho đầu dò NaI(Tl). Các thông số hình học của đầu dò được tham khảo từ nhà sản xuất. Trong đó, tinh thể nhấp nháy NaI(Tl) hình trụ có đường kính và chiều cao 7,6 x 7,6 cm, mật độ 3,667 (g cm⁻³) được kết nối với ống nhân quang điện thông qua một lớp dẫn sáng. Thông số của lớp cửa sổ nhôm oxit (Al₂O₃) (bề dày 0,131 cm và mật độ 3,97 (g cm⁻³)) tham khảo từ kết quả nghiên cứu tối ưu hóa cấu hình đầu dò NaI(Tl) của nhóm tác giả Hoàng Đức Tâm và các cộng sự (Hoang, Huynh, Tran, & Chau, 2016). Ngoài ra, để đơn giản các mô tả hình học nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác của kết quả phân tích, ống nhân quang điện (PMT) được thay thế bằng một khối nhôm hình trụ kích thước 8,3 x 3,0 cm (Shi, Chen, Li, & Yun, 2002). Đường chuẩn hiệu suất ghi của đầu dò NaI(Tl) được xây dựng trong khoảng năng lượng từ 59,5 keV đến 2614,5 keV, bao gồm 38 giá trị năng lượng phát ra từ các đồng vị phóng xạ ²⁴¹Am (59,5 keV), ²²⁶Ac (209,3; 270,3; 338,3; 463; 911,2; 969 keV), ²¹⁴Bi (609,3; 768,4; 934,1; 1120,3; 1238,1; 1281; 1764,5; 2204,2 keV), ¹³⁴Cs (569,3; 604,7; 795,9 keV), ¹³⁷Cs (661,7 keV), ⁴⁰K (1460,8 keV), ²¹²Pb (238,6; 300,1 keV), ²¹²Bi (328; 727,3 keV), ²¹⁴Pb (241,9; 295,2; 351,9; 2447,9 keV), ²²⁶Ra (186,2 keV), ²³⁴Th (63,3; 92,5 keV), ²⁰⁸Tl (277,4; 583,2; 860,5; 2614,5 keV), ²³⁵U (143,8; 163,4; 205,3 keV) (LNHB Nucléide-Lara).



(Hình 1a)



(Hình 1b)

Hình 1. Mô phỏng MCNP6 cấu hình hệ đo phổ gamma sử dụng đầu dò NaI(Tl) (Hình 1a), vị trí và kích thước các căn phòng (Hình 1b), đơn vị trong hình 1b là mét (m)

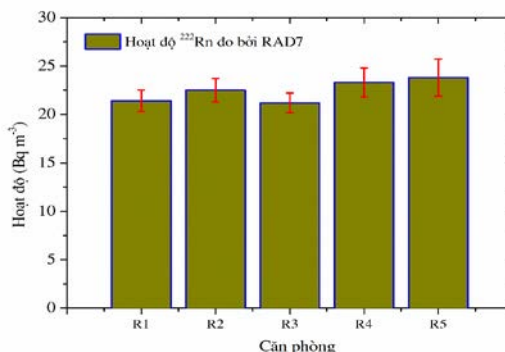
Trong các mô phỏng MCNP6, đánh giá F8 được sử dụng để mô tả phân bố năng lượng bị hấp thụ khi photon tương tác với vật liệu đầu dò và được ghi nhận vào các khe (bin) năng lượng tương ứng. Đối với mô hình mô phỏng phép đo phổ gamma các căn phòng (Hình 1a), cấu trúc hình học của căn phòng được mô tả theo sơ đồ bản vẽ của tòa nhà (Hình 1b). Vật liệu xây dựng (cát xây dựng, đá, xi măng) được mua tại các cửa hàng ở miền Nam, Việt Nam. Thành phần nguyên tố của các vật liệu được xác định bằng phương pháp phân tích huỳnh quang tia X với thiết bị EDX-8000 (Shimadzu, 2022) (Bảng 2). Theo QCVN 16:2019/BXD (Vietnamese Standard, 2019), vật liệu xây dựng có mật độ $2,35 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$ với 9,8% xi măng, 22,9% cát và 67,2% đá xây dựng.

Bảng 2. Thành phần nguyên tố của các vật liệu xây dựng

Tên mẫu	Thành phần nguyên tố (%)
Xi măng	CaO (68,17), SiO ₂ (17,044), Al ₂ O ₃ (5,521), SO ₃ (3,637), Fe ₂ O ₃ (2,527), MgO (2,011), K ₂ O (0,522), TiO ₂ (0,352), MnO (0,08), SrO (0,058), CuO (0,022), ZnO (0,021), ZrO ₂ (0,015), V ₂ O ₅ (0,012), Y ₂ O ₃ (0,004), Rb ₂ O (0,004)
Cát	CaO (2,264), SiO ₂ (84,86), Al ₂ O ₃ (8,135), SO ₃ (0,212), Fe ₂ O ₃ (2,595), K ₂ O (1,543), TiO ₂ (0,265), MnO (0,078), SrO (0,01), ZnO (0,004), Y ₂ O ₃ (0,001), Rb ₂ O (0,003), Cr ₂ O ₃ (0,03)
Đá	CaO (3,805), SiO ₂ (62,785), Al ₂ O ₃ (21,085), SO ₃ (0,351), Fe ₂ O ₃ (5,613), MgO (3,09), K ₂ O (2,447), TiO ₂ (0,647), MnO (0,076), SrO (0,018), ZnO (0,006), ZrO ₂ (0,026), V ₂ O ₅ (0,03), Y ₂ O ₃ (0,004), Cr ₂ O ₃ (0,017)

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Xác định hoạt độ radon trong nhà sử dụng hệ thiết bị RAD7



Hình 2. Kết quả hoạt độ radon của các căn phòng được đo bởi RAD7

Kết quả xác định hoạt độ ^{222}Rn của các căn phòng (R1, R2, R3, R4, R5) trong khoảng từ $21,2 \pm 1,0$ (Bq m $^{-3}$) đến $23,8 \pm 1,9$ (Bq m $^{-3}$) (Hình 2). Hoạt độ ^{222}Rn trung bình là $22,4 \pm 2,5$ (Bq m $^{-3}$) và tương đồng với các nghiên cứu tại một số quốc gia khác như Ấn Độ (Kumar et al., 2014), Italy (Trevisi et al., 2012), Hàn Quốc (Lee et al., 2014; Lee et al., 2017; Park et al., 2019), Hi Lạp (Psichoudaki & Papaefthymiou, 2008), thấp hơn ở Pháp (Demoury et al., 2013), Đức (Petermann & Bossew, 2021), Serbia et al., 2014), Indonesia (Hosoda et al., 2021), bang Punjab (Ấn Độ) (Kaur et al., 2021) (Bảng 3). Ngoài ra, các kết quả khảo sát ^{222}Rn trong nghiên cứu này thấp hơn kết quả đánh giá ^{222}Rn trong nhà của 12 đô thị lớn tại Việt Nam (Chan et al., 2007), thấp hơn quy định về hàm lượng radon tự nhiên trong nhà theo TCVN (Vietnam standard, 2016a) và thế giới (Environmental Protection Agency, 2016; UNSCEAR, 2000; WHO, 2009).

Bảng 3. So sánh kết quả hoạt độ ^{222}Rn trong nghiên cứu này và các nghiên cứu khác

Kết quả nghiên cứu	Hoạt độ (Bq m $^{-3}$)
Nghiên cứu này	(21,2 ± 1,0) – (23,8 ± 1,9)
Ấn Độ (Kumar et al., 2014)	7-34
Pháp (Demoury et al., 2013)	30,9-190,6
Italy (Trevisi et al., 2012)	21-1608
Hàn Quốc (Lee et al., 2014; Lee et al., 2017; Park et al., 2019)	4,4-2810
Đức (Petermann & Bossew, 2021)	27-68
Hi Lạp (Psichoudaki & Papaefthymiou, 2008)	12-129
Serbia (Bossew et al., 2014)	30-607
Indonesia (Hosoda et al., 2021)	124-1015
Bang Punjab (Ấn Độ) (Kaur et al., 2021)	49,5-94,4
Trung bình thế giới (Environmental Protection Agency, 2016)	40

3.2. Khảo sát radon trong nhà bằng phép đo ^{214}Bi sử dụng hệ phổ kế gamma

3.2.1. Khảo sát số lịch sử hạt tối ưu cho mô phỏng MCNP6

Bởi vì kết quả mô phỏng Monte Carlo là giá trị trung bình của những đóng góp từ nhiều lịch sử trong suốt quá trình tương tác của photon và vật chất môi trường, MCNP6 đưa ra hai đại lượng quan trọng hỗ trợ người dùng đánh giá chất lượng của kết quả mô phỏng (Pederson et al., 1997; Pelowitz, 2013), bao gồm:

- **Sai số tương đối R (Relative Error):** gọi ε_i là kết quả mô phỏng của số lịch sử hạt thứ i và N là tổng số lịch sử hạt của tiến trình mô phỏng. Khi N đủ lớn thì sai số tương đối R được định nghĩa như tỉ số của độ lệch chuẩn $S_{\bar{\varepsilon}}$ và trị trung bình $\bar{\varepsilon}$:

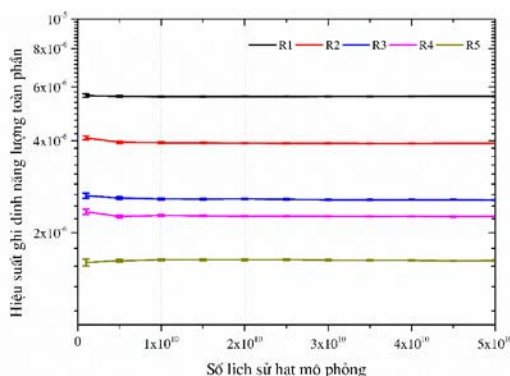
$$R = \frac{S_{\bar{\varepsilon}}}{\bar{\varepsilon}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N} - \left(\frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i}{N}\right)^2}}{\frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i}{N}} \quad (1)$$

- **Tiêu chuẩn FOM (Figure of Merit):** được xác định bởi công thức:

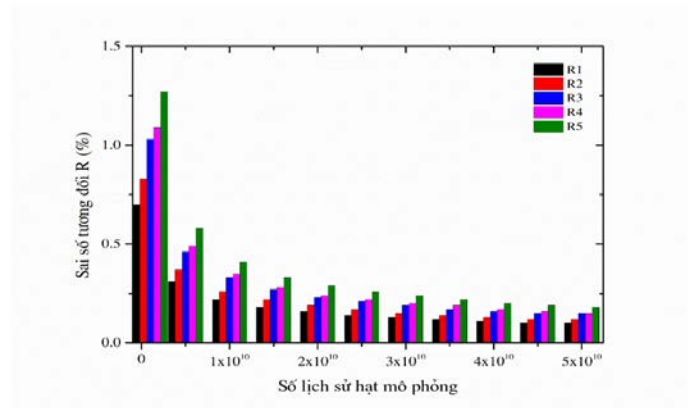
$$\text{FOM} = \frac{1}{R^2 T} \quad (2)$$

trong đó, T (phút) là thời gian chạy mô phỏng. Một kết quả mô phỏng có độ tin cậy thống kê tốt khi FOM là hằng số và $R < 0,05$.

Hình 3 thể hiện kết quả mô phỏng MCNP6 với các kích thước phòng khác nhau (R1 – R5). Photon mang năng lượng 0,1 MeV được mô phỏng phát ra từ các bức tường, trần nhà và sàn nhà, có số lịch sử hạt tăng dần từ 10^9 đến 50×10^9 hạt. Với số lịch sử 20×10^9 hạt, sai số thống kê tương đối của hiệu suất ghi đỉnh là dưới 0,6% (Hình 3a), sai số tương đối $R < 0,003$ (Hình 3b), và FOM là 5,2; 3; 2,8; 3,2; 2,3 tương ứng với cấu hình phòng R1; R2; R3; R4; R5. Điều này chứng minh rằng với số lịch sử 20×10^9 hạt, các mô phỏng cấu hình căn phòng là phù hợp để xây dựng đường chuẩn hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần cho đầu dò NaI(Tl).



(Hình 3a)

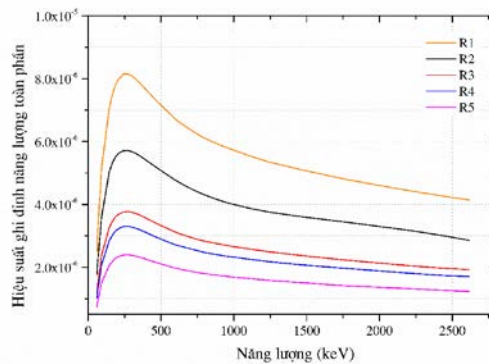


(Hình 3b)

Hình 3. Khảo sát số lịch sử hạt tối ưu của cấu hình mô phỏng MCNP6

3.2.2. Xây dựng đường chuẩn hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần

Đường chuẩn hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần của đầu dò NaI(Tl) được xây dựng bằng mô phỏng MCNP6 với 38 giá trị năng lượng từ 59,5 keV đến 2614,5 keV (Hình 4). Sai số tương đối của hiệu suất ghi đỉnh là nhỏ hơn 1,0%. Kết quả mô phỏng thể hiện rằng tại giá trị năng lượng xác định, hiệu suất ghi đỉnh tỉ lệ nghịch với thể tích không gian phòng. Điều này có thể giải thích là do với căn phòng có thể tích lớn, các bức tường ở xa đầu dò NaI(Tl) hơn, photon phát ra từ các bức tường này cần một quãng đường di chuyển dài trong không khí và dễ dàng bị hấp thụ bởi các nguyên tử khí và không đến được đầu dò.



Hình 4. Đường chuẩn hiệu suất ghi của đầu dò NaI(Tl)

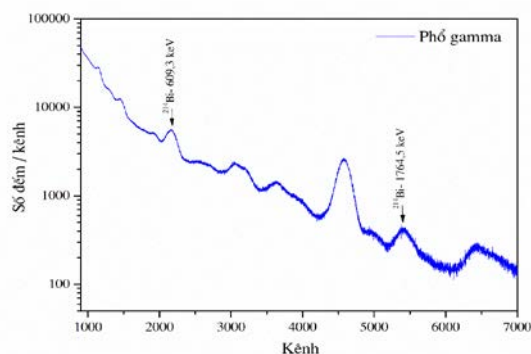
3.3.3. Xác định hoạt độ ²¹⁴Bi

Hoạt độ và sai số hoạt độ được xác định bởi công thức (Gilmore, 2008):

$$A = \frac{N_p(E)}{\epsilon_p(E) \times I_\gamma(E) \times t} \tag{3}$$

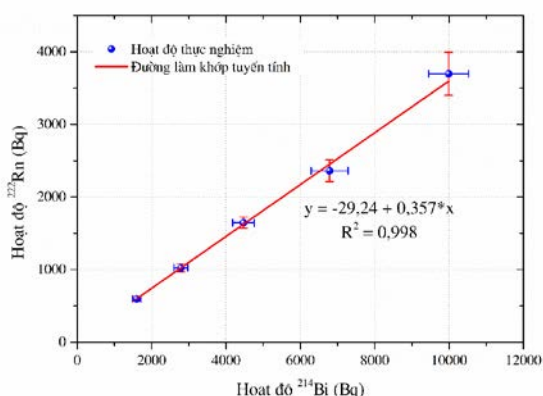
$$\Delta A = \sqrt{\left(\frac{\Delta N_p(E)}{N_p(E)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon_p(E)}{\epsilon_p(E)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_\gamma(E)}{I_\gamma(E)}\right)^2} \tag{4}$$

trong đó, A là hoạt độ (Bq), $I_\gamma(E)$ là cường độ phát gamma, ΔA , $\Delta I_\gamma(E)$ lần lượt là các sai số tương ứng, t là thời gian đo phổ gamma thực nghiệm (s). Giá trị hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần ($\varepsilon_p(E)$) được nội suy từ đường làm khớp dạng đa thức $\ln - \ln$. Số đếm tại đỉnh năng lượng quan tâm ($N_p(E)$) được xác định bằng chương trình Colegram (Ménèsguen & Lépy, 2021).



Hình 5. Phổ gamma thực nghiệm của phòng R1 đo bởi đầu dò NaI(Tl)

Hoạt độ ^{214}Bi được xác định tại năng lượng 609,3 keV (cường độ phát gamma $45,49 \pm 0,19 \%$) và 1764,5 keV (cường độ phát gamma $15,31 \pm 0,05 \%$) (Hình 5). Kết quả tính toán hoạt độ có độ sai biệt tương đối nhỏ hơn 7% so với trung bình hoạt độ ^{214}Bi . Sai số tương đối của hoạt độ là dưới 10%. Một số nghiên cứu chứng minh rằng thành phần chính đóng góp vào phổ gamma của đồng vị ^{214}Bi trong nhà là sự phân rã ^{222}Rn trong không khí và bức xạ gamma phát ra từ vật liệu xây dựng (Awhida et al., 2016; Barba-Lobo et al., 2023). Do đó, các kết quả xác định hoạt độ ^{214}Bi sử dụng hệ phổ kế gamma thường cao hơn kết quả đo trực tiếp ^{222}Rn từ 2 đến 5 lần, phụ thuộc vào điều kiện nhiệt độ (Gulan et al., 2023), bề dày tường, cấu trúc không gian phòng, sự lưu thông khí trong phòng (Meisenberg et al., 2017; Yarmoshenko et al., 2016). Trong nghiên cứu này, các căn phòng được đóng kín cửa hơn 3 ngày, các phép đo radon và phổ gamma được thực hiện trong điều kiện nhiệt độ phòng duy trì trong khoảng 20°C đến 22°C . Kết quả xác định hoạt độ ^{214}Bi bởi hệ phổ kế gamma thể hiện mối tương quan tuyến tính tốt với kết quả đo hoạt độ ^{222}Rn bởi thiết bị RAD7. Tỷ lệ hoạt độ $^{214}\text{Bi}/^{222}\text{Rn}$ là từ 2,7 đến 2,9. Hàm làm khớp tuyến tính thể hiện giá trị hiệu chỉnh của R^2 (Adj. R-square) đạt 0,998 (Hình 6). Giá trị nội suy hoạt độ ^{222}Rn từ đường làm khớp có độ sai biệt tương đối lớn nhất là dưới 10% so với giá trị hoạt độ ^{222}Rn đo bởi RAD7. Điều này chứng minh rằng một phép đo phổ gamma của ^{214}Bi có thể cho kết quả đánh giá ban đầu về cảnh báo mức hoạt độ ^{222}Rn trong nhà. Từ đó, giúp tiến hành các bước lập kế hoạch hành động nhằm giảm hàm lượng ^{222}Rn trong nhà bằng cách lót thêm các lớp vật liệu xây dựng mới hấp thụ radon (Yarmoshenko et al., 2014) hoặc cải tiến hệ thống thông gió của căn phòng (Meisenberg et al., 2017; Tsutsumi et al., 2001).



Hình 6. Đánh giá tương quan tuyến tính kết quả hoạt độ ^{222}Rn và hoạt độ ^{214}Bi

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, hoạt độ radon (^{222}Rn) trong nhà được khảo sát bởi hệ thiết bị RAD7. Các căn phòng được chọn khảo sát có thể tích vùng không gian từ 27,9 m³ đến 155,3 m³. Kết quả hoạt độ ^{222}Rn có giá trị từ $21,2 \pm 1,0$ (Bq m⁻³) đến $23,8 \pm 1,9$ (Bq m⁻³) và tương đồng với kết quả nghiên cứu ở một số quốc gia khác trên thế giới và nằm trong giới hạn an toàn theo quy định của Việt Nam và thế giới.

Bên cạnh đó, phương pháp xác định hoạt độ ^{214}Bi (609,3 keV và 1764,5 keV) bằng cách sử dụng hệ phổ kế gamma với đầu dò NaI(Tl) cũng được triển khai. Đường chuẩn hiệu suất ghi đỉnh năng lượng toàn phần của đầu dò NaI(Tl) được mô phỏng bằng chương trình MCNP6, trong khoảng năng lượng từ 59,5 keV đến 2614,5 keV. Kết quả xác định hoạt độ ^{214}Bi thể hiện mối tương quan tuyến tính tốt với kết quả đo ^{222}Rn trong các căn phòng. Phương pháp này có thể được sử dụng để đánh giá nhanh hoạt độ ^{222}Rn trong các căn phòng mà không cần sử dụng thiết bị đo ^{222}Rn , đặc biệt phù hợp trong các khảo sát phóng xạ trong nhà với các cấu trúc mới tiết kiệm năng lượng (Yarmoshenko et al., 2014) hoặc kiến trúc hạ tầng sử dụng vật liệu mới như tro bay hoặc melatin (Taylor-Lange et al., 2014).

- ❖ **Tuyên bố về quyền lợi:** Các tác giả xác nhận hoàn toàn không có xung đột về quyền lợi.
- ❖ **Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Nguồn ngân sách khoa học và công nghệ Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh trong đề tài mã số CS.2021.19.46.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- ADMCA software. (2023). *DP5 Digital Pulse Processor Based Software*. <https://www.amptek.com/software/dp5-digital-pulse-processor-software/dppmca-display-acquisition-software>
- Amptek Inc. (2008). *GAMMA RAD5 Advance product information*. https://amptek.emf-japan.com/products/pdf/10_GAMMA-RAD5.pdf
- Awhida, A., Ujić, P., Vukanac, I., Đurašević, M., Kandić, A., Čeliković, I., Lončar, B., & Kolarž, P. (2016). Novel method of measurement of radon exhalation from building materials. *Journal of Environmental Radioactivity*, 164, 337-343. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.08.009>
- Azeez, H. H., Mohammed, M. A., & Abdullah, G. M. (2021). Measurement of radon concentrations in rock samples from the Iraqi Kurdistan Region using passive and active methods. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, Article 572. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06937-3>
- Barba-Lobo, A., Gutiérrez-Álvarez, I., San Miguel, E. G., & Bolívar, J. P. (2023). A methodology to determine ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{214}Pb and ^{214}Bi in atmospheric aerosols; Application to precisely obtain aerosol residence times and Rn-daughters' equilibrium factors. *Journal of Hazardous Materials*, 445, Article 130521. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130521>
- Berens, A. S., Diem, J., Stauber, C., Dai, D., Foster, S., & Rothenberg, R. (2017). The use of gamma-survey measurements to better understand radon potential in urban areas. *Science of The Total Environment*, 607-608, 888-899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.022>
- Bosrew, P., Žunić, Z.S., Stojanovska, Z., Tollefsen, T., Carpentieri, C., Veselinović, N., Komatina, S., Vaupotič, J., Simović, R.D., Antignani, S., & Bochicchio, F. (2014). Geographical distribution of the annual mean radon concentrations in primary schools of Southern Serbia – application of geostatistical methods. *Journal of Environmental Radioactivity*, 127, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.09.015>
- Chan, N. N., Phong, L. T., & Ngan, N. B. (2007). Radon in the air: Its influence on the human health and some results of radon emanometry serving the survey and evaluation of the environment. *Journal of Geology*, A(7-8), 72-75.
- Demoury, C., Ielsch, G., Hemon, D., Laurent, O., Laurier, D., Clavel, J., & Guillevic, J. (2013). A statistical evaluation of the influence of housing characteristics and geogenic radon potential on indoor radon concentrations in France. *Journal of Environmental Radioactivity*, 126, 216-225. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.08.006>
- DURRIDGE. (2009). *RAD7 Radon Detector User Manual*. <https://www.manualslib.com/manual/1158422/Durridge-Rad7.html>
- Environmental Protection Agency. (2016). *A Citizen's Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family From Radon*. Washington, DC, USA: EPA402/K-12/002.
- Gilmore, R. G. (2008). *Practical gamma-ray spectrometry*. Chichester Hoboken (N.J.): Wiley.
- Gulan, L., Stajic, J. M., Spasic, D., & Forkapic, S. (2023). Radon levels and indoor air quality after application of thermal retrofit measures—a case study. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 16(2), 363-373. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01278-w>
- Hoang, D. T., Huynh, D. C., Tran, T. T., & Chau, V. T. (2016). A study of the effect of Al_2O_3 reflector on response function of NaI(Tl) detector. *Radiation Physics and Chemistry*, 125, 88-93. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.03.020>

- Hosoda, M., Nugraha, E. D., Akata, N., Yamada, R., Tamakuma, Y., Sasaki, M., Kelleher, K., Yoshinaga, S., Suzuki, T., Rattanapongs, C. P., Furukawa, M., Yamaguchi, M., Iwaoka, K., Sanada, T., Miura, T., Kusdiana, Dadong Iskandar, Pudjadi, E., Kashiwakura, I., & Tokonami, S. (2021). A unique high natural background radiation area – Dose assessment and perspectives. *Science of The Total Environment*, 750, Article 142346. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142346>
- Kaur, R., Shikha, D., Kaushal, A., Gupta, R., Singh, S. P., Chauhan, R. P., & Mehta, V. (2021). Measurement of indoor ^{222}Rn , ^{220}Rn and decay products along with naturally occurring radionuclides in some monuments and museums of Punjab, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 330(3), 1357-1364. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07996-2>
- Kumar, A., Chauhan, R. P., Joshi, M., & Sahoo, B. K. (2014). Modeling of indoor radon concentration from radon exhalation rates of building materials and validation through measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*, 127, 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.10.004>
- Lee, E. R., Chang, B. U., Kim, H. J., Song, M. H., & Kim, Y. J. (2014). Geographical distribution of indoor radon and related geological characteristics in Bonghwa County, a provisional radon-prone area in Korea. *Radiation Protection Dosimetry*, 167(4), 620-625. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu326>
- Lee, E. R., Chang, B. U., & Kim, Y. J. (2017). Radon survey in school and estimation of effective dose using corrected radon concentration. *Radiation Protection Dosimetry*, 179(2), 101-107. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncx216>
- Liu, H., Wang, N., Chu, X., Li, T., Zheng, L., Yan, S., & Li, S. (2016). Mapping radon hazard areas using ^{238}U measurements and geological units: a study in a high background radiation city of China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 309(3), 1209-1215. <https://doi.org/10.1007/s10967-016-4717-5>
- LNHB Nucléide-Lara. (2022). <http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>
- Meisenberg, O., Mishra, R., Joshi, M., Gierl, S., Rout, R., Guo, L., Agarwal, T., Kanse, S., Irlinger, J., Sapra, B. K., & Tschiersch, J. (2017). Radon and thoron inhalation doses in dwellings with earthen architecture: Comparison of measurement methods. *Science of The Total Environment*, 579, 1855-1862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.170>
- Ménesguen, Y., & Lépy, M. C. (2021). COLEGRAM, a flexible user-friendly software for processing of ionizing radiation spectra. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1003, Article 165341. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165341>
- Olsthoorn, B., Rönqvist, T., Lau, C., Rajasekaran, S., Persson, T., Månsson, M., & Balatsky, A. V. (2022). Indoor radon exposure and its correlation with the radiometric map of uranium in Sweden. *Science of The Total Environment*, 811, Article 151406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151406>
- Park, N. W., Kim, Y., Chang, B. U., & Kwak, G. H. (2019). County-level indoor radon concentration mapping and uncertainty assessment in South Korea using geostatistical simulation and environmental factors. *J Environ Radioact*, 208-209, Article 106044. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106044>

- Pederson, S. P., Forster, R. A., & Booth, T. E. (1997). Confidence Interval Procedures for Monte Carlo Transport Simulations. *Nuclear Science and Engineering*, 127(1), 54-77. <https://doi.org/10.13182/NSE97-A1921>
- Pelowitz, P. (2013). *MCNP6TM User's manual, Version 1.0*. Los Alamos National Laboratory report LA-CP-13-00634.
- Petermann, E., & Bossew, P. (2021). Mapping indoor radon hazard in Germany: The geogenic component. *Science of The Total Environment*, 780, Article 146601. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146601>
- Psichoudaki, M., & Papaefthymiou, H. (2008). Natural radioactivity measurements in the city of Ptolemais (Northern Greece). *J Environ Radioact*, 99(7), 1011-1017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.12.001>
- Shi, H. X., Chen, B. X., Li, T. Z., & Yun, D. (2002). Precise Monte Carlo simulation of gamma-ray response functions for an NaI(Tl) detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 57(4), 517-524. [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(02\)00140-9](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(02)00140-9)
- Shimadzu. (2022). *EDX-7000/8000/8100*. https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim_document_file/brochure_s/10371/c142-e049_edx-8100.pdf
- Taylor-Lange, Sarah C., Juenger, Maria C. G., & Siegel, Jeffrey A. (2014). Radon emanation fractions from concretes containing fly ash and metakaolin. *Science of The Total Environment*, 466-467, 1060-1065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.005>
- To, T. H., Nguyen, N. T., & Huy, Duong, H. H. (2013). Construction a process to measurement the indoor radon concentration. *VNUHCM Journal of Science and Technology Development*, 16, 53-60.
- Trevisi, R., Leonardi, F., Simeoni, C., Tonnarini, S., & Veschetti, M. (2012). Indoor radon levels in schools of South-East Italy. *J Environ Radioact*, 112, 160-164. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.05.030>
- Tsutsumi, M., Oishi, T., Kinouchi, N., Sakamoto, R., & Yoshida, M. (2001). Simulation of the Background for Gamma Detection System in the Indoor Environments of Concrete Buildings. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 38(12), 1109-1114. <https://doi.org/10.1080/18811248.2001.9715143>
- UNSCEAR. (2000). *United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation, sources and effects of ionizing radiation*. New York: United Nations.
- Vietnam standard. (2016a). Measurement of radioactivity in the environment - Air: radon-222 - Part 1: Origins of radon and its short-lived decay products and associated measurement methods. In *10759-1:2016*. Vietnam.
- Vietnam standard. (2016b). Measurement of radioactivity in the environment - Air: radon-222 - Part 8: Methodologies for initial and additional investigations in buildings. In *10759-8:2016* (Vol. 10759-8:2016). Vietnam.
- Vietnamese Standard. (2019). *QCVN 16:2019/BXD - National Technical Regulations on Products, Goods of Building Materials*. Vietnam.
- WHO. (2009). *WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

- Yarmoshenko, I. V., Vasilyev, A. V., Onishchenko, A. D., Kiselev, S. M., & Zhukovsky, M. V. (2014). Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings. *Radiation Protection Dosimetry*, 160(1-3), 53-56. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu110>
- Yarmoshenko, I., Vasilyev, A., Malinovsky, G., Bossew, P., Žunić, Z. S., Onischenko, A., & Zhukovsky, M. (2016). Variance of indoor radon concentration: Major influencing factors. *Science of The Total Environment*, 541, 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.077>

**ASSESSMENT OF INDOOR RADON ACTIVITY CONCENTRATION
BY USING THE GAMMA SPECTROMETRY**

**Le Quang Vuong^{1,2*}, Nguyen Huynh Khanh Duyen¹,
Huynh Dinh Chuong², Hoang Duc Tam¹, Tran Thien Thanh², Chau Van Tao²**

¹Ho Chi Minh City University of Education, Vietnam

²University of Science, Vietnam National University of Ho Chi Minh City, Vietnam

*Corresponding author: Le Quang Vuong – Email: vuonglq@hcmue.edu.vn

Received: August 16, 2023; Revised: September 07, 2023; Accepted: September 10, 2023

ABSTRACT

The World Health Organization (WHO) considers indoor radon an air pollutant due to its carcinogenic effects. In this study, the activity concentration radon (^{222}Rn) was calculated based on the activity of ^{214}Bi by using gamma spectrometry. Firstly, ^{222}Rn activities for five rooms were measured by the RAD7 system. Secondly, ^{214}Bi activities were also determined by gamma spectrometry. Simulation Monte Carlo with the MCNP6 code was used to establish the full energy peak efficiency calibration curves for the NaI(Tl) detector in the energy range from 59.5 keV to 2614.5 keV. The linear fit function linked the results of ^{214}Bi to ^{222}Rn activities (Adjusted R-squared $R^2 = 0.998$), which presented a good agreement with a maximum relative deviation of 10%. This shows that the advanced analytical procedure can be applied to determine the indoor radon.

Keywords: indoor radon; MCNP; NaI(Tl) detector; RAD7; radioactivity