



Original Article

Evaluation of the Capacity and the Effectiveness of Covering in Preventing Thoron Exhalation from Earthen Dwelling Materials

Nguyen Thuy Duong¹, Nguyen Thi Anh Nguyet²,
Nguyen Hong Quan¹, Nguyen Dinh Thai¹, Tran Thi Dung¹,
Nguyen Thi Huyen Trang¹, Nguyen Thi Hong¹, Nguyen Van Huong^{1,*}

¹*VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam*

²*Institute of Science and Technology for Energy and Environment,
Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam*

Received 13th September 2025

Revised 7th October 2025; Accepted 30th October 2025

Abstract: High indoor thoron (Rn-220) concentrations have been recorded in earthen dwellings in Northern Vietnam, posing potential health risks to residents. No specific medical studies on the health effects of radon gas and its isotopes in indoor environments have been investigated in Vietnam. This study aims to evaluate the capacity and effectiveness of selected surface covering in reducing thoron exhalation from earthen dwelling materials. Earthen walls were simulated using soil bricks made from local construction soil collected in Yen Minh District, with similar geotechnical properties to traditional earth walls. Covering materials were selected based on their availability and affordability. Thoron exhalation rates were determined experimentally by measuring thoron concentration in an accumulation chamber using the SARAD[®] RTM 2200 device at two time points: immediately after production and after 18 months of natural exposure. Results indicate that all tested covering materials reduced thoron release to varying degrees. However, the effectiveness of certain materials significantly declined over time, with some losing nearly all barrier function. Among the materials examined, paints and asphalt coatings provided the highest and most stable performance. Wrapping paper combined with common adhesive was identified as a practical, low-cost solution suitable for the socio-economic conditions of earthen dwelling residents.

Keywords: Thoron, exhalation, covering materials, soil bricks.

* Corresponding author.

E-mail address: huongtectonics@vnu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5381>

Đánh giá khả năng và hiệu quả ngăn sự thoát khí thoron từ đất làm nhà trình tường của các vật liệu che phủ

Nguyễn Thuỳ Dương¹, Nguyễn Thị Ánh Nguyệt²,
Nguyễn Hồng Quân¹, Nguyễn Đình Thái¹, Trần Thị Dung¹,
Nguyễn Thị Huyền Trang¹, Nguyễn Thị Hồng¹, Nguyễn Văn Hường^{1,*}

¹Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,
334 Nguyễn Trãi, phường Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

²Viện Khoa học công nghệ Năng lượng và Môi trường, Viện Hàn lâm Khoa học Công nghệ Việt Nam,
18 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 13 tháng 9 năm 2025

Chỉnh sửa ngày 7 tháng 10 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 30 tháng 10 năm 2025

Tóm tắt: Nồng độ khí thoron (Rn-220) trong không khí trong nhà trình tường ở miền Bắc – Việt Nam được ghi nhận ở mức cao đến rất cao, tiềm ẩn nguy cơ ảnh hưởng đến sức khỏe của cư dân. Tuy nhiên, hiện chưa có nghiên cứu y tế cụ thể nào ở Việt Nam về ảnh hưởng của khí radon và các đồng vị của nó trong môi trường không khí trong nhà. Nghiên cứu này nhằm đánh giá khả năng và hiệu quả của một số vật liệu che phủ trong việc ngăn cản sự thoát khí thoron từ đất làm nhà trình tường. Tường đất nhà trình tường được mô phỏng bằng gạch đất (được làm từ chính đất xây nhà trình tường ở huyện Yên Minh – cũ) có tính chất cơ lý tương tự tường đất thực tế. Các vật liệu che phủ được lựa chọn dựa trên tiêu chí phổ biến và có giá thành hợp lý. Tốc độ thoát khí thoron được xác định thông qua thực nghiệm đo nồng độ khí thoron trong hộp tích lũy chứa gạch đất bằng thiết bị SARAD® RTM 2200 tại hai thời điểm: khi vừa được chế tạo và sau 18 tháng tiếp xúc với môi trường tự nhiên. Kết quả cho thấy, các vật liệu che phủ thử nghiệm đều có khả năng hạn chế sự thoát khí thoron ở các mức độ khác nhau. Tuy nhiên, hiệu suất che phủ của một số vật liệu suy giảm rõ rệt theo thời gian, thậm chí gần như không còn khả năng ngăn khí thoron thoát vào không khí. Trong số các vật liệu khảo sát, các loại sơn và nhựa đường cho hiệu quả tốt nhất. Giải pháp dùng giấy gói đồ kết hợp keo dán phổ thông được đánh giá là hiệu quả, dễ thực hiện và phù hợp với điều kiện kinh tế-xã hội của người dân sinh sống trong nhà trình tường.

Từ khóa: thoron, tốc độ thoát khí, vật liệu che phủ, gạch đất.

1. Mở đầu

Radon là khí phóng xạ tự nhiên, xuất hiện ở khắp mọi nơi trên bề mặt trái đất, và có mặt chủ yếu trong thành phần của đất, đá và vật liệu xây dựng có nguồn gốc từ tự nhiên. Trong môi trường không khí trong nhà, khí radon có nguồn

gốc chính từ vật liệu xây dựng và chiếm ~50 % liều chiếu tính từ năng lượng phóng xạ có nguồn gốc từ tự nhiên và nhân tạo ảnh hưởng đến cơ thể sống [1-3]. Khí radon có khả năng ảnh hưởng tới sức khỏe con người gồm hai đồng vị chính: Rn-222 (còn gọi là ‘radon’, có chu kỳ bán rã 3,83 ngày và mức năng lượng bán rã là 5,59 Mev) và

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: huongtectonics@vnu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuces.5381>

Rn-220 (còn gọi là thoron, có chu kỳ bán rã 55,6 giây và mức năng lượng bán rã là 6,29 MeV). Trong nhiều năm, chỉ radon (Rn-222) được xem như vai trò chính để đánh giá về rủi ro phóng xạ trong không khí, trong khi thoron thường bị bỏ qua và chỉ mới bắt đầu được chú ý đến trong một vài năm gần đây. Việc tiếp xúc với thoron có chu kỳ bán rã ngắn hơn rất nhiều so với radon, nhưng lại có mức năng lượng ở mỗi chu kỳ bán rã cao hơn trong thời gian dài có thể là rủi ro sức khỏe tiềm tàng không thể bỏ qua. Ủy ban khoa học liên hợp quốc về tác động bức xạ nguyên tử (UNSCEAR) đã xác nhận, thoron đóng góp trung bình 10-20% tổng liều bức xạ của khí radon trong không khí nhà ở [4], tuy nhiên, tỷ lệ có thể thay đổi phụ thuộc vào đặc điểm địa chất vị trí làm nhà và vật liệu xây dựng.

Nồng độ thoron cao được phát hiện trong các công trình xây dựng từ vật liệu tự nhiên, như tuff và pozzolan ở Italia [5]; và trong các nhà đất truyền thống ở Trung Quốc [6, 7], Nhật Bản [8, 9], CHLB Đức [10], Kenya [11] và cả ở Việt Nam [12, 13], thậm chí, ở một số trường hợp, nồng độ thoron trong nhà cao hơn cả radon. Một số nghiên cứu đã chỉ ra thoron chiếm tới 35 % liều chiếu hiệu dụng từ khí radon trong môi trường không khí nhà ở [14, 15]. Ở Việt Nam, trong môi trường không khí nhà trình tường (nhà được xây dựng hoàn toàn từ đất tại chỗ ở khu vực miền núi phía bắc), thoron có thể chiếm tới > 80 % liều chiếu hiệu dụng trung bình theo năm đối với cư dân sinh sống [12, 13]. Thoron trong môi trường không khí nhà ở có nguồn gốc chủ yếu từ vật liệu xây dựng, và thường tập trung ở gần nguồn thoát (tường và nền trong nhà) [16].

Hiện tại, ở Việt Nam, có khoảng ~10 triệu cư dân vẫn đang sinh sống trong nhà trình tường ở vùng núi phía bắc. Đây là kiểu nhà truyền thống lâu đời của nhiều cộng đồng dân tộc, có thể xây dựng trong thời gian ngắn và mức chi phí thấp khi sử dụng hoàn toàn đất tại chỗ làm vật liệu xây dựng, phù hợp với điều kiện kinh tế - xã hội còn khó khăn ở những khu vực vùng núi xa xôi. Đáng chú ý, cùng với việc công nhận Công viên Địa chất toàn cầu UNESCO Cao nguyên đá Đồng Văn, nhà trình tường được đánh giá là một di sản văn hoá vật thể cần được giữ gìn và bảo

tồn. Ở trong nhà trình tường, cư dân sử dụng trực tiếp tường và nền đất thô (sau khi được nén trực tiếp từ đất tự nhiên), và không có bất kỳ vật liệu nào phủ lên bề mặt. Người dân có thói quen sinh hoạt ngồi thấp, gần nền đất, và đặc biệt, giường ngủ thường được kê ở các góc nhà, sát với tường đất. Những thói quen này đã vô tình làm tăng nguy cơ rủi ro sức khoẻ trước năng lượng bức xạ từ khí radon. Trước thực trạng đó, cần thiết phải có giải pháp kỹ thuật nhằm giảm thiểu nồng độ các đồng vị khí radon trong nhà trình tường, đặc biệt là khí thoron, đáp ứng yêu cầu giữ nguyên kiến trúc nhà trình tường và phù hợp với điều kiện kinh tế - xã hội còn khó khăn của người dân.

Nghiên cứu này sẽ thực hiện thí nghiệm các vật liệu che phủ trên các mô hình gạch đất, mô phỏng cho tường đất của nhà trình tường, để xác định khả năng và đánh giá hiệu quả ngăn sự thoát khí thoron từ đất làm nhà trình tường vào môi trường không khí. Từ đó, đề xuất giải pháp kỹ thuật phù hợp có thể áp dụng lên tường và nền đất của nhà trình tường, nhằm làm giảm nồng độ khí thoron trong nhà và đáp ứng được các yêu cầu về bảo tồn kiểu nhà truyền thống này cũng như phù hợp với điều kiện kinh tế - xã hội ở các vùng núi xa xôi.

2. Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

2.1. Mẫu

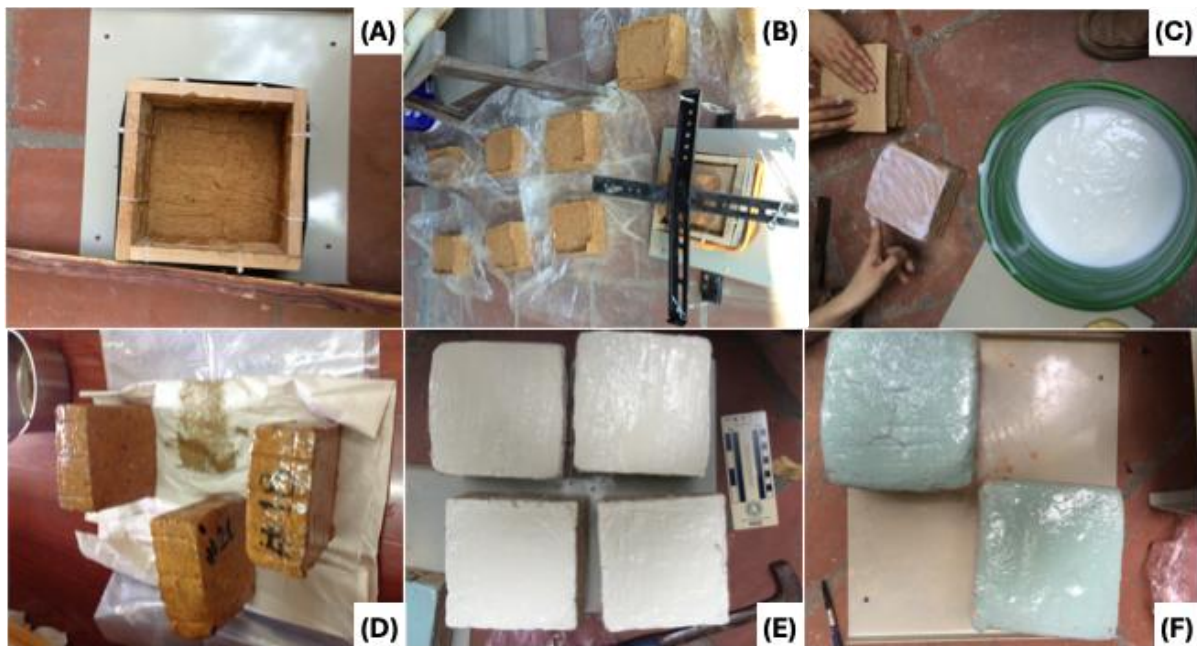
Mẫu đất sử dụng trong nghiên cứu được thu thập từ lớp vỏ phong hoá (bao gồm đất thổ nhưỡng và trầm tích deluvi) tại vị trí có tọa độ 23,1833 B và 105,0500 Đ. Đây là loại đất đặc trưng được người dân địa phương sử dụng để xây dựng nhà trình tường tại xã Bạch Đích, huyện Yên Minh, tỉnh Hà Giang (cũ). Mẫu đất được lấy từ cùng tầng đất với tổng khối lượng ~200 kg nhằm đảm bảo tính đại diện. Sau khi mang về, đất được loại bỏ rác, sạn, cuội, mùn và rễ cây, đánh toại và trộn đều để đảm bảo tính đồng nhất phục vụ thí nghiệm. Mẫu đất được trộn với nước sạch để chế tạo các viên gạch đất, nhằm mô hình lại đặc tính của tường đất nhà trình tường. 11 viên gạch đất được nén vào khuôn gỗ có kích thước 13*13*7 cm³ và để khô tự nhiên (theo quy

trình làm nhà trình tường của người dân địa phương). Các viên gạch đất hoàn thiện có đặc tính tương tự với tường đất của nhà trình tường

[17] với bề mặt có các lỗ rỗng và khe nứt nhỏ, hàm lượng nước 12-15%, dung trọng trung bình $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ ($1,46-1,69 \text{ g cm}^{-3}$) (Bảng 1, Hình 1).

Bảng 1. Kích thước và dung trọng các viên gạch đất

STT	Kích thước gạch đất (cm)			Dung trọng (g cm^{-3})
	Chiều dài	Chiều rộng	Chiều cao	
1	13,0	13,4	6,0	1,58
2	13,0	13,0	7,5	1,54
3	13,0	13,0	7,0	1,69
4	13,0	13,0	7,0	1,56
5	13,0	13,0	7,5	1,58
6	13,0	13,0	7,0	1,61
7	13,0	13,0	6,7	1,46
8	13,0	13,2	6,8	1,54
9	13,0	13,0	7,5	1,54
10	13,0	13,0	7,0	1,48
11	13,0	13,0	7,2	1,52



Hình 1. Quy trình chế tạo gạch đất và che phủ bằng các vật liệu.

- (A) Khuôn gạch; (B) Gạch đất nguyên bản sau khi được nén bằng đất làm nhà trình tường; (C) Phủ hỗn hợp bartolin-borac trước khi bao bọc bằng giấy gói; (D) Lớp phủ bằng bột thạch và sơn latex; (E) Lớp phủ thủy tinh lỏng; (F) Lớp phủ sơn dầu.

Ngay sau khi hoàn thiện, các viên gạch đất được xác định sự thoát khí thoron bằng cách đo nồng độ thoron trong hộp tích lũy (được trình

bày ở phần tiếp theo), nhằm kiểm soát tính đồng nhất của gạch đất áp dụng trong thực nghiệm. Sau đó, từng viên gạch đất lần lượt được bao bọc

bằng các vật liệu phủ (gồm các loại sơn - sơn latex, sơn dầu, bột thạch cao, xi măng, cát, nhựa đường - asphalt, thủy tinh lỏng) và vật liệu che (giấy gói đồ kết hợp với các loại keo dán phổ thông, như hồ thủ công, hỗn hợp bột sắn-nước vôi, hỗn hợp bartolin-borac). Các vật liệu che phủ được lựa chọn áp dụng lên gạch đất trong nghiên cứu này đáp ứng tiêu chí: phổ thông trong xây dựng, sẵn có trên thị trường, có mặt ở khắp

nơi và chi phí hợp lý. Đặc tính của từng vật liệu được mô tả chi tiết trong Bảng 2.

Sự thoát khí thoron từ gạch đất nguyên bản và được bao bọc bằng các vật liệu che phủ được xác định trong điều kiện vừa chế tạo và sau 18 tháng theo phương pháp được trình bày trong tiêu mục 2.2. Các viên gạch đất được bảo quản trong điều kiện nhiệt độ và độ ẩm phòng (20-25 °C và 50-80%) trong thời gian 18 tháng.

Bảng 2. Đặc tính một số vật liệu che và phủ áp dụng trong thực nghiệm

Vật liệu	Đặc tính vật liệu
Sơn latex	Có thành phần chính là nhựa vinyl-acrylic hoặc polymer tổng hợp nên sau khi khô tạo lớp màng mềm, đàn hồi, khả năng bám dính bề mặt tốt, sơn có thể bị bong tróc khi gặp nhiệt độ và độ ẩm cao, thường được sử dụng trên các bề mặt tường trong nhà.
Sơn dầu	Có thành phần chính là nhựa alkyd có độ che phủ và bám dính tốt, độ bền cao, nhanh khô và tuổi thọ cao, được sử dụng trong nhiều loại bề mặt vật liệu khác nhau.
Bột thạch cao	Có cấu trúc hạt mịn, nhẹ, khả năng hút nước tốt, tạo thành hỗn hợp có độ sệt, keo khi trộn với nước, dễ tạo hình và đông cứng nhanh, độ bền kém trong điều kiện ẩm ướt.
Nhựa đường	Là hỗn hợp của asphaltene và dầu, có độ dẻo, độ nhớt cao, có độ bền cao và có tính kết dính linh hoạt nhiều loại vật liệu khác nhau. Đây là vật liệu có khả năng chống thấm và không hòa tan trong nước, dễ bị giòn và nứt khi nhiệt độ thấp, dễ chảy dẻo ở nhiệt độ cao.
Xi măng đen	Là hỗn hợp bột mịn từ nhiều loại vật liệu (đất sét, đá vôi và một số chất phụ gia). Khi pha trộn với nước theo tỷ lệ nhất định, chúng có thể tạo thành một hỗn hợp sử dụng chống thấm bề mặt tốt. Vật liệu có độ bền cao, chống chịu được tác động của thời tiết.
Cát hạt mịn	Có cấp hạt < 1 mm, với thành phần khoáng vật chủ yếu là thạch anh và mica. Cát hạt mịn thường được trộn với xi măng tạo thành hỗn hợp có độ sệt vừa phải, tạo thành vữa trát. Sau khi khô, hỗn hợp tạo thành một bề mặt đông cứng, chống chịu tốt.
Tinh bột than	Có cấu trúc dạng bột mịn, màu đen, xốp, nhẹ, diện tích tiếp xúc bề mặt lớn, khả năng hấp phụ tốt các chất hữu cơ, khí,...
Thủy tinh lỏng	Có thành phần chủ yếu là keo natri silicat, có độ nhớt cao, tan trong nước, dễ kết tủa và dễ bị phân hủy trong các axit. Bề mặt khô có tính dòn.
Bartoline	Là keo dán có độ bám dính cao, chuyên được sử dụng làm vật liệu thi công dán giấy dán tường, có độ, kết cấu keo mịn, khô nhanh, chống thấm nước, chống ẩm mốc, độ bền cao.
Borax (hàn the)	Có dạng tinh thể màu trắng hoặc trong suốt, dễ tan trong nước, dễ hút ẩm.
Keo dán	Có dạng lỏng, đặc vừa, khô nhanh, kết dính tốt chủ yếu là giấy, độ nhớt thấp.
Tinh bột sắn	Khi được hòa với nước và nấu chín tạo thành hỗn hợp dạng sệt, có độ kết dính tốt chủ yếu là giấy, nhanh khô. Có thể kết hợp với nước vôi để ngăn côn trùng gặm nhấm.
Giấy gói đồ	Là loại giấy có độ bền cao, chịu lực tốt, chống thấm tốt, giấy được làm từ bột gỗ tự nhiên nên dễ dàng phân hủy và tái chế.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Thiết lập thí nghiệm và đo nồng độ khí thoron

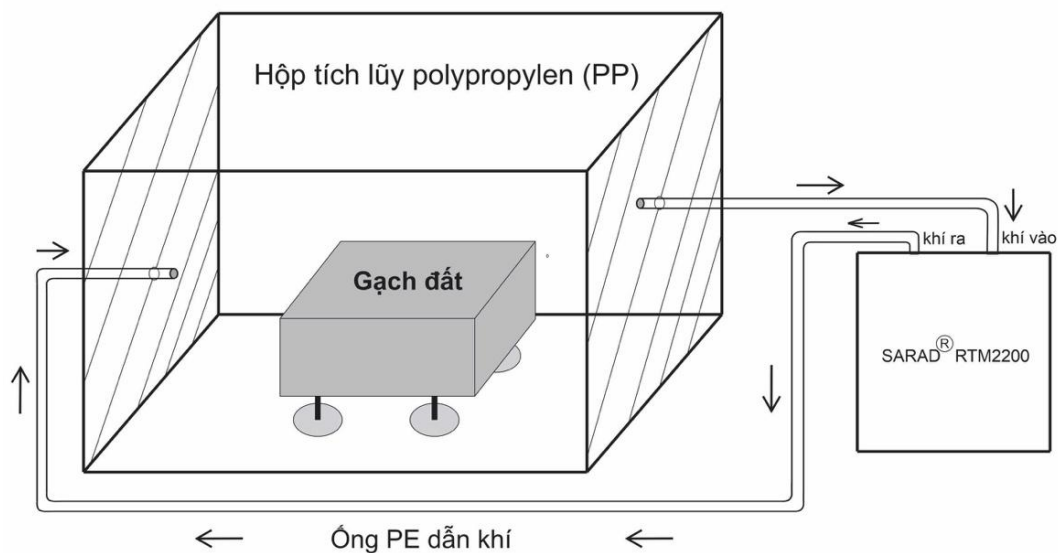
Nghiên cứu tốc độ thoát khí thoron từ các viên gạch đất được thực hiện bằng cách xác định nồng độ thoron theo kỹ thuật hộp kín (còn gọi là hộp tích lũy) [18] và đo bằng thiết bị SARAD[®]

RTM 2200 (SARAD GmbH, Dresden, Germany) đã được hiệu chuẩn theo quy chuẩn. SARAD[®] RTM 2200 có thể xác định nồng độ các đồng vị khí radon bằng cách tính tổng hạt alpha giải phóng trong quá trình phân rã của các đồng vị Po-218 và Po-216. Khí thoron đặc biệt nhạy đối với thiết bị và được xác định dựa trên sự phân rã của Po-216. Dựa vào chu kỳ bán rã

rất ngắn của thoron (Rn-220) (~56 giây) và Po-216 (~0,15 giây), nồng độ thoron đạt trạng thái cân bằng nhanh chóng trong hộp tích lũy, và do đó, giá trị thiết bị ghi được có thể đảm bảo độ tin cậy với mỗi chu kỳ đo 10 phút.

Hộp tích lũy được sử dụng là hộp nhựa polypropylen (PP) có kích thước 28*18*14 cm³ (khảo sát lúc vừa chế tạo) và 35*23*15 cm³ (khảo sát sau 18 tháng), bề dày thành hộp ~2 mm. Các vật liệu nhựa polymer (như polyetylen-PE, polypropylen-PP,...) có bề dày >0,4 mm được xác nhận có khả năng chống chịu các bức xạ với năng lượng 1-10 kGy, trong đó nhựa PE và PP có khả năng chống chịu bức xạ với năng lượng lần lượt ~ 10 kGy và 40 kGy trong khoảng thời gian ~700 ngày [19]. Hộp tích lũy PP được nối với thiết bị SARAD[®] RTM 2200

bằng 2 ống nhựa PE (bề dày thành ống 0,8 mm), tương ứng 1 đầu khí vào và 1 đầu khí ra hộp tích lũy và hệ thống dò, đọc tín hiệu của thiết bị (Hình 2). Tầng viên gạch đất được đặt lần lượt trong hộp tích lũy PP với các thanh kê bằng nhựa PP nhằm đảm bảo các mặt của viên gạch tiếp xúc với không khí trong hộp. Nồng độ thoron của mỗi viên gạch đất trong hộp tích lũy PP được đo trong khoảng thời gian tối thiểu 60 phút và lấy giá trị trung bình của các chu kỳ đo. Sau phép đo cho mỗi viên gạch, hộp nhựa PP được làm sạch bằng cồn 90° và để khô tự nhiên ~1 giờ, trước khi thiết lập thí nghiệm với viên gạch tiếp theo. Nồng độ thoron nền của hộp nhựa PP cũng được đo trước và xen giữa các thí nghiệm nhằm đảm bảo tính riêng biệt của các phép đo giữa các viên gạch đất.



Hình 2. Thiết kế thí nghiệm đo nồng độ khí thoron trong hộp tích lũy PP.

2.2.2. Xác định tốc độ thoát khí thoron

Tốc độ thoát khí thoron từ gạch đất được xác định theo công thức:

$$E_{Tn} = \frac{C_{Tn} * V * \lambda_{Tn}}{A}$$

Trong đó: E_{Tn} : tốc độ thoát khí thoron (Bq m⁻² h⁻¹; [18, 20]); C_{Tn} : nồng độ đồng vị khí thoron trong hộp tích lũy (Bq m⁻³); V : thể tích không

không khí xung quanh viên gạch đất trong hộp tích lũy (m³); A : diện tích các bề mặt gạch đất tiếp xúc với không khí trong hộp tích lũy (m²); λ : hằng số phân rã của đồng vị khí thoron (45,37 h⁻¹ hoặc 0,0126 s⁻¹). Dựa vào chu kỳ bán rã của khí thoron ngắn, ảnh hưởng của hệ số rò rỉ và khếch tán ngược gần như không đáng kể, do đó các tham số này được bỏ qua trong tính toán tốc độ thoát khí thoron [18].

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Tốc độ thoát khí thoron từ gạch đất

Các mẫu gạch (nguyên bản và sau khi được phủ vật liệu) lần lượt được khảo sát tốc độ thoát khí thoron (E_{Tn}) trong hộp tích lũy và kết quả tính toán được thể hiện ở Bảng 3. E_{Tn} từ gạch đất nguyên bản có giá trị cao, 2,11 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$ đối với gạch mới được chế tạo và 1,50 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$ sau 18 tháng. Các giá trị này cao hơn nhiều so với các vật liệu xây dựng phổ biến (0,01-0,42 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$; [16]), và tương đương với gạch không nung của Hàn Quốc (1,01-3,16 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$; [21]).

Gạch đất được bao bọc bởi các vật liệu che phủ có tốc độ thoát khí thoron dao động lớn, 0,05-1,88 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$ đối với gạch mới được chế tạo và 0,05-1,36 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$ đối với gạch sau 18 tháng. Ở các viên gạch mới được chế tạo, gạch đất được phủ sơn dầu, nhựa đường và thủy tinh

lông đều có E_{Tn} tương đương giá trị của vật liệu xây dựng phổ biến (tương ứng 0,20; 0,08 và 0,05 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$). Gạch được phủ bột thạch cao-sơn latex, hỗn hợp bột thạch cao-bột than và giấy kết hợp với hỗn hợp bartoline-borac đều có giá trị $E_{Tn} > 1,00\ Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$ (tương ứng 1,64; 1,88 và 1,31 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$). Gạch đất phủ các vật liệu còn lại có đều có giá trị $E_{Tn} < 1,00\ Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$, gồm gạch đất phủ sơn latex, hỗn hợp xi măng-cát và giấy gói đồ được dán kín bằng hồ. Tuy nhiên, sau 18 tháng, tốc độ thoát khí thoron có sự thay đổi đáng kể. Gạch đất có E_{Tn} tương tự với vật liệu xây dựng phổ biến chỉ còn các viên gạch đất phủ sơn dầu và nhựa đường (tương ứng 0,30 và 0,05 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$), E_{Tn} của gạch đất phủ thủy tinh lông có xu hướng tăng cao (1,27 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$), tương tự với gạch đất nguyên bản (1,50 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$). Bên cạnh các viên gạch đất phủ sơn latex và hỗn hợp xi măng-cát có giá trị $E_{Tn} < 1,00\ Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$, gạch đất phủ vật liệu còn lại đều có giá trị $E_{Tn} > 1,00\ Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$.

Bảng 3. Tốc độ thoát khí thoron trung bình của các viên gạch đất theo thời gian (gạch đất vừa chế tạo và sau 18 tháng được đo trong hộp tích lũy PP có kích thước lần lượt 28*18*14 cm^3 và 35*23*15 cm^3 ;
 E_{Tn} : tốc độ thoát khí thoron trung bình; thứ tự gạch đất tương tự trong bảng 1)

TT	Mẫu gạch đất được phủ vật liệu	Ký hiệu	E_{Tn} ($Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$)	
			Vừa chế tạo	Sau 18 tháng
1	Nguyên bản	Ori.	2,11 ± 0,21	1,50 ± 0,51
2	Sơn latex	Lat.1	0,43 ± 0,15	0,53 ± 0,17
3	Bột thạch cao-sơn latex	Lat.2	1,64 ± 0,85	1,20 ± 0,26
4	Sơn dầu	O.P.	0,20 ± 0,09	0,30 ± 0,14
5	Nhựa đường	Asp.	0,08 ± 0,04	0,05 ± 0,04
6	Hỗn hợp xi măng-cát mịn	Cem.	0,50 ± 0,11	0,84 ± 0,26
7	Hỗn hợp bột thạch cao-bột than	C.Gyp.	1,88 ± 1,08	1,31 ± 0,24
8	Thủy tinh lông	SS.	0,05 ± 0,00	1,27 ± 0,32
9	Giấy gói đồ (dán mép bằng hồ)	Pap.1	0,54 ± 0,13	1,04 ± 0,15
10	Giấy gói đồ bọc ngoài lớp phủ hỗn hợp bartoline-borac	Pap.2	1,31 ± 0,21	1,36 ± 0,49
11	Giấy gói đồ (dán mép bằng hỗn hợp bột sắn-nước vôi)	Pap.3	0,79 ± 0,11	1,07 ± 0,33

Đáng chú ý, các viên gạch đất được phủ bằng hỗn hợp bột thạch cao kết hợp một số vật liệu đều có tốc độ thoát khí thoron cao, ở cả điều kiện mới chế tạo và sau 18 tháng, tương ứng 1,64 và 1,20 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$ của gạch phủ bột thạch cao-sơn latex; 1,88 và 1,31 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$ của gạch phủ hỗn hợp bột thạch cao-bột than. Trong khi, gạch chỉ phủ sơn latex có E_{Tn} thấp, 0,43 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$ ở điều kiện vừa chế tạo và 0,53 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$ sau 18 tháng. Tốc độ thoát khí thoron của vật liệu bột thạch cao

có giá trị 0,40-0,42 $Bq\ m^{-2}\ s^{-1}$ [22, 23], do vậy, bước đầu có thể nhận định bột thạch cao có thể là nguyên nhân làm tăng tốc độ thoát khí Rn-220 của gạch đất được phủ bằng bột thạch cao kết hợp với các vật liệu phủ khác.

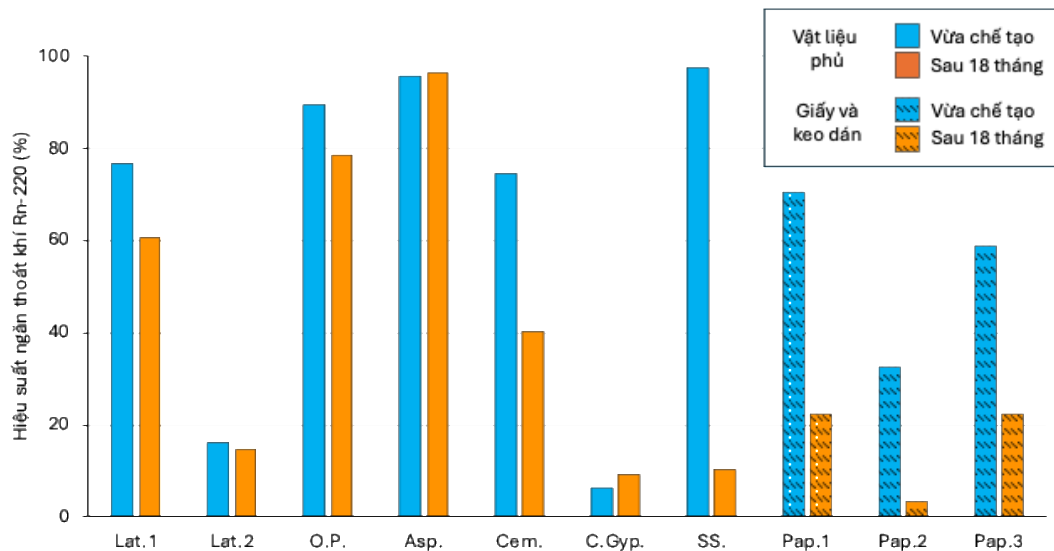
3.2. Khả năng và hiệu quả ngăn thoát khí thoron

Kết quả khảo sát E_{Tn} ở các viên gạch đất được bao bọc cho thấy các vật liệu che phủ đều

có khả năng làm giảm tốc độ khí thoron thoát ra ngoài môi trường không khí ở các mức độ khác nhau (Hình 3). Tốc độ thoát khí thoron của từng viên gạch đất được bao bọc bằng các vật liệu che phủ được đối sánh với E_{Tn} của gạch đất nguyên bản ở điều kiện vừa chế tạo và sau 18 tháng nhằm đánh giá hiệu suất ngăn sự thoát khí Rn-220.

Ở điều kiện vừa chế tạo, sơn dầu, nhựa đường và thủy tinh lỏng đều có khả năng ngăn được > 80% khí thoron giải phóng từ gạch đất. Đây là các vật liệu có độ dẻo và độ nhớt cao, nên dễ dàng đi vào trong các khe nứt trên bề mặt, do đó có khả năng che phủ, tạo thành lớp màng kín ngăn khí thoron thoát ra ngoài không khí. Tiếp sau đó, sơn latex và hỗn hợp xi măng-cát cũng

đạt hiệu suất ~80% khả năng ngăn sự thoát khí thoron. Ở các vật liệu phủ, hiệu suất thấp nhất là hỗn hợp của bột thạch cao với sơn latex, < 20%, và với bột than, < 10%. Giấy gói đồ kết hợp với các vật liệu bít lỗ rỗng cũng mang lại hiệu suất ngăn sự thoát khí thoron đáng kể. Ngay khi vừa chế tạo, giấy bao bọc gạch đất và dính kết các mép bằng hồ thủ công (Pap. 1) và hỗn hợp bột sắn-nước vôi (Pap. 3) có khả năng ngăn được từ ~60% trở lên, trong khi gạch đất được phủ bằng hỗn hợp bartoline-borac rồi mới bao bọc giấy gói bên ngoài lại có hiệu suất ~30%. Có thể thấy, giấy gói có khả năng làm giảm sự thoát khí thoron từ gạch đất với điều kiện các mép giấy được gắn kết đủ.



Hình 3. Hiệu suất ngăn thoát khí thoron của gạch đất được bao bọc bằng các vật liệu che phủ (Kí hiệu gạch đất được che phủ tương tự Bảng 3).

Tuy nhiên, sau 18 tháng, các viên gạch đất được bao bọc bằng các vật liệu che phủ có xu hướng giảm hiệu suất ngăn sự thoát khí thoron ở các mức độ khác nhau (Hình 3). Nhựa đường vẫn giữ được hiệu suất ngăn thoát khí > 90%, trong khi sơn dầu giảm hiệu suất, từ 90% xuống còn ~80%. Các vật liệu phủ có hiệu suất ngăn thoát khí tốt, như sơn latex và hỗn hợp xi măng-cát, cũng có có mức giảm hiệu suất 25-35%. Đáng chú ý, thủy tinh lỏng ở điều kiện mới chế tạo có hiệu suất ngăn thoát khí 98%, nhưng đã giảm

mạnh sau 18 tháng xuống còn ~10%. Các viên gạch đất được bao bọc bằng giấy gói cũng có mức giảm hiệu suất ngăn thoát khí lớn, 30-50%. Gạch đất được bao bọc bằng bột thạch cao với sơn latex và bột than vẫn duy trì hiệu suất ngăn thoát khí thấp, tương tự ở điều kiện mới chế tạo. Như vậy, khả năng thoát khí thoron phụ thuộc vào độ bền của vật liệu che phủ theo thời gian.

Các đồng vị khí radon giải phóng ra ngoài môi trường không khí từ vật liệu phụ thuộc vào một số yếu tố, như hàm lượng và sự phân bố của

đồng vị phóng xạ, kích thước và hình dạng hạt vật liệu, nhiệt độ và độ ẩm, độ xốp và tính thấm [24-26]. Trong đó, tính thấm là tham số đóng vai trò chi phối khả năng và tốc độ thoát khí [24]. Các vật liệu phủ, có độ dẻo và độ nhớt cao (như thủy tinh lỏng, sơn dầu, sơn latex, nhựa đường, hỗn hợp xi măng-cát), có thể dễ dàng đi vào lấp kín các khe nứt và lỗ rỗng trên bề mặt gạch đất. Hơn nữa, các vật liệu này còn có tính thấm thấp (0,3-7 perm) (Bảng 4, [27]), nên có thể tạo thành lớp chắn kín, và do vậy có khả năng ngăn sự thoát khí thoron thoát ra từ gạch đất. Bột thạch cao có cấu trúc hạt mịn, dễ tạo hình phẳng trên các bề mặt, nên thường được áp dụng trước khi phủ sơn trong xây dựng. Tuy nhiên, do có khả năng hút nước tốt, lớp vữa thạch cao thường có độ bền kém trong điều kiện môi trường có độ ẩm cao. Lớp vữa thạch cao với bề dày ~12 mm có tính thấm (~75 perms) cao hơn lớp phủ sơn latex gấp ~20 lần và lớp vữa từ hỗn hợp xi măng-cát gấp ~15 lần (Bảng 4, [27]). Bột than có cấu trúc rỗng và xốp, có khả năng hấp phụ hơi ẩm và vật chất, nên khi kết hợp cùng với bột thạch cao, khả

năng hút hơi ẩm càng được tăng cao. Kết quả là tính thấm của hỗn hợp có thể không những không giảm mà còn tăng, và làm cho khí thoron có thể dễ dàng thoát ra ngoài không khí từ gạch đất.

Giấy gói đồ, được chế tạo từ bột gỗ chưa qua xử lý, có khả năng chống thấm tốt (tính thấm của vỏ gỗ ~ 4 perms) (Bảng 4, [27]) cũng là vật liệu che có hiệu quả. Bằng cách kết hợp với vật liệu bít lỗ rỗng, hỗn hợp bartolin-borac, và một số loại keo (hồ dán, hỗn hợp bột sắn-nước vôi) để gắn kết mép giấy, các viên gạch đất được bao bọc bằng giấy gói đồ đều thể hiện khả năng ngăn khí thoron thoát ra ở các mức độ khác nhau (Hình 3). Chênh lệch hiệu suất này có thể từ mức độ và khả năng khép kín mép giấy. Ở điều kiện mới chế tạo, hồ thủ công hoặc hỗn hợp bột sắn-nước vôi gắn kết tốt các mép giấy, và do vậy ngăn được sự thoát khí từ gạch đất. Viên gạch được bao bọc bằng giấy gói bên ngoài lớp phủ hỗn hợp bartoline-borac có thể không khép kín được mép giấy, và do đó hiệu suất ngăn thoát khí chỉ bằng nửa hiệu suất của các viên gạch đất được bao bọc giấy gói có dán mép.

Bảng 4. Độ thấm của một số vật liệu che phủ

Vật liệu che phủ	Bề dày vật liệu (mm)	Độ thấm (perms)
Màng polyethylen	0,10-0,15	0,03
Giấy dán tường vinyl	0,89-1,27	0,09
Sơn dầu	3 lớp	0,3-1,0
Sơn latex	-	2-6
Xi măng	200	2-3
Vỏ gỗ (chưa xử lý)	-	4
Vữa trát (hỗn hợp xi măng-cát)	20	4-7
Vữa vôi	25	17
Vữa thạch cao	12	75

(Nguồn: [27]).

Sau 18 tháng, độ bền vững của các vật liệu che phủ có xu hướng thay đổi. Lớp giấy bao bọc gạch đất xuất hiện các lỗ nhỏ li ti trên bề mặt và mép giấy được gắn kết bằng các loại vật liệu dán có dấu hiệu bị bong tróc, làm hiệu suất ngăn sự thoát khí của các viên gạch này giảm mạnh. Đáng chú ý, các viên gạch có lớp phủ bị nứt vỡ, như lớp phủ thủy tinh lỏng, còn có tốc độ thoát khí tương tự gạch đất nguyên bản (Bảng 3). Các

vật liệu phủ, gồm sơn latex, sơn dầu, nhựa đường, có độ bền tương đối tốt và tính thấm ổn định theo thời gian, do vậy hiệu suất ngăn thoát khí giảm nhẹ hoặc gần tương tự như điều kiện mới chế tạo. Lớp phủ hỗn hợp xi măng-cát có thể bị co ngót trong điều kiện thời tiết có độ ẩm, nên xuất hiện khe nứt nhỏ trên bề mặt, làm tăng tốc độ giải phóng khí từ gạch đất.

Các vật liệu phủ thường được áp dụng trong xây dựng, như sơn latex, sơn dầu, hỗn hợp xi măng-cát, có khả năng ngăn sự thoát khí thoron từ gạch đất. Xét về hiệu quả, các vật liệu này có thể áp dụng che phủ bề mặt tường đất của nhà trình tường. Tuy nhiên, chi phí cho những vật liệu che phủ bề mặt này lại tương đối lớn so với chi phí xây dựng một ngôi nhà trình tường. Nhựa đường cũng là vật liệu có khả năng che phủ tốt, hiệu quả che phủ ổn định theo thời gian, và chi phí tương đối thấp, có thể phù hợp với điều kiện kinh tế của cư dân ở các vùng núi. Hạn chế của nhựa đường là lớp phủ gây mùi khó chịu và chỉ có màu đen. Các vật liệu sử dụng cùng giấy gói đồ đều là vật liệu phổ biến, dễ kiếm và chi phí thấp. Chẳng hạn như hồ dán thủ công là một trong các công cụ học tập của học sinh từ bậc phổ thông; bột sắn là thực phẩm sắn có của đồng bào ở vùng cao, được nấu chín với nước sôi giúp ngăn mối mọt và các loài côn trùng, gặm nhấm tác động; bartolin và borac là vật liệu xây dựng phổ thông và kinh tế. Nhược điểm của phương thức sử dụng vật liệu che này là không bền theo thời gian, do vậy muốn sử dụng hiệu quả cần thay lớp che phủ định kỳ và thường xuyên kiểm tra độ bền mối liên kết giữa các mép giấy. Như vậy, về tổng thể, sử dụng giấy gói đồ kết hợp với vật liệu dán kín mép thông dụng là phương án nên được cân nhắc để áp dụng lên bề mặt tường đất nhà trình tường. Bên cạnh đó, có thể tính toán chi phí để áp dụng các loại sơn và vữa xi măng-cát lên bề mặt tường đất ở những khoảng không gian nhỏ, như phòng ngủ, của nhà trình tường nhằm đảm bảo hiệu quả ngăn thoát khí thoron lâu dài.

4. Kết luận

Nghiên cứu thực hiện các thí nghiệm che phủ bề mặt trên các mô hình gạch đất, mô phỏng cho tường đất của nhà trình tường, bằng các vật liệu được áp dụng phổ biến trong xây dựng và trong đời sống. Kết quả cho thấy các vật liệu che phủ đều có khả năng giảm thiểu sự thoát khí thoron từ gạch đất ra môi trường không khí ở các mức độ khác nhau. Ở điều kiện vừa chế tạo, hầu hết các vật liệu che phủ thực nghiệm đều có khả năng ngăn khí thoron tương đối tốt, với hiệu suất

> 60%, ngoại trừ các lớp phủ của hỗn hợp bột thạch cao với sơn latex và với bột than, và giấy gói đồ bọc ngoài lớp phủ của hỗn hợp bartolin-borac. Tuy nhiên, sau 18 tháng, các vật liệu che phủ đều có xu hướng giảm hiệu suất ngăn khí thoron, với mức giảm mạnh nhất của lớp phủ thủy tinh lỏng và giấy bao bọc lớp phủ hỗn hợp bartolin-borac xuống gần tương tự tốc độ thoát khí của gạch nguyên bản. Các loại sơn (sơn latex và sơn dầu) và nhựa đường vẫn giữ được hiệu suất ngăn khí >60%, do có độ bền tốt và tính thấm ổn định theo thời gian.

Phân tích khả năng, hiệu quả ngăn sự thoát khí thoron của các vật liệu che phủ và bước đầu đánh giá chi phí, so với xây dựng 1 ngôi nhà trình tường, phương án sử dụng giấy gói đồ kết hợp với các loại keo dán phổ thông, sẵn có (hồ thủ công, hỗn hợp bột sắn-vôi nước) được xem tương đối khả thi, có thể áp dụng lên tường đất của nhà trình tường. Giải pháp sử dụng các loại sơn và hỗn hợp xi măng-cát cũng có thể được cân nhắc tính toán chi phí trong trường hợp áp dụng trong các không gian nhỏ (phòng ngủ).

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 105.99-2021.49.

Tài liệu tham khảo

- [1] O. Meisenberg, J. Tschiersch, Specific Properties of a Model of Thoron and its Decay Products in Indoor Atmospheres, *Nukleonika*, Vol. 55, 2010, pp. 463-469.
- [2] U. Cevik, A. Kara, N. Celik, M. Karabidak, A. Celik, Radon Survey and Exposure Assessment in Karaca and Çal Caves, Turkey, *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. 214, 2011, pp. 461-469, <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0437-6>.
- [3] R. Trevisi, C. Nuccetelli, S. Risica, Screening Tools to Limit the use of Building Materials with Enhanced/Elevated Levels of Natural Radioactivity: Analysis and Application of Index Criteria, *Construction and Building Materials*, Vol. 49, 2013, pp. 448-454, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.059>.

- [4] UNSCEAR, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, 2016.
- [5] G. Sciocchetti, M. Bovi, G. Cotellessa, P.G. Baldassini, C. Battella, I. Porcu, Indoor Radon and Thoron Surveys in High Radioactivity Areas of Italy, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 45, 1992, pp. 509-514, <https://doi.org/10.1093/rpd/45.1-4.509>.
- [6] B. Shang, B. Chen, Y. Gao, Y.W. Wang, H. X. Cui, Z. Li, Thoron Levels in Traditional Chinese Residential Dwellings, *Radiation Environmental Biophysics*, Vol. 44, 2005, pp. 193-199, <https://doi.org/10.1007/s00411-005-0020-5>.
- [7] J. Tschiersch, W. B. Li, O. Meisenberg, Increased Indoor Thoron Concentrations and Implication to Inhalation Dosimetry, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 127, 2007, pp. 73-78, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm341>.
- [8] M. Doi, S. Kobayashi, K. Fujimoto, A Passive Measurement Technique for Characterisation of High-Risk Houses in Japan Due to Enhanced Levels of Indoor Radon and Thoron Concentrations, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 45, 1992, pp. 425-430, <https://doi.org/10.1093/rpd/45.1-4.425>.
- [9] Q. Guo, M. Shimo, Y. Ikebe, S. Minato, The Study of Thoron and Radon Progeny Concentrations in Dwellings in Japan, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 45, 1992, pp. 357-359, <https://doi.org/10.1093/rpd/45.1-4.357>.
- [10] S. Gierl, O. Meisenberg, P. Feistenauer, J. Tschiersch, Thoron and Thoron Progeny Measurements in German Clay Houses, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 160, 2014, pp. 160-163, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu076>.
- [11] M. Chege, N. Hashim, A. Merenga, O. Meisenberg, J. Tschiersch, Estimation of Annual Effective Dose Due to Radon and Thoron Concentrations in Mud Dwellings of Mrima Hill, Kenya, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 167, Iss. 1-3, 2015, pp. 139-142, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv231>.
- [12] D. N. Thuy, H. N. Van, J. P. Schimmelmman, T. A. N. Nguyen, K. Doiron, A. Schimmelmman, ²²⁰Rn (thoron) Geohazard in Room Air of Earthen Dwellings in Vietnam, *Geofluids*, Vol. 4, 2019, pp. 1-11, <https://doi.org/10.1155/2019/7202616>.
- [13] H. N. Van, D. N. Thuy, T. A. N. Nguyen, T. Streil, J. Schimmelmman, K. Doiron, T. N. Dinh, H. N. Thi, A. Schimmelmman, Excessive Radon-based Radiation in Indoor Air Caused by Soil Building Materials in Traditional Homes on Dong Van Karst Plateau, Northern Vietnam, *Chemosphere*, Vol. 257, 2020, pp. 127-119, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127119>.
- [14] G. D. With, P. D. Jong, CFD Modelling of Thoron and Thoron Progeny in the Indoor Environment, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 145, 2011, pp. 138-144, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr056>.
- [15] G. D. With, P. D. Jong, Impact from Indoor Air Mixing on the Thoron Progeny Concentration and Attachment Fraction, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 158-159, 2016, pp. 56-63, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.019>.
- [16] G. De With, G. Venoso, A. Maiorana, C. Di Carlo, O. Meisenberg, Q. Guo, M. Janik, E. D. Nugraha, O. M. Bobbo, C. Kranrod, M. Hosoda, S. Tokonami, B. K. Sahoo, S. D. Kanse, J. Tschiersch, Thoron Exhalation Rate Measurement – Findings from A Large Worldwide Intercomparison Study, *Radiation Measurements*, Vol. 187, 2025, pp. 107471, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2025.107471>.
- [17] N. T. A. Nguyen, D. N. Thuy, H. N. Van, N. N. Hai, A. Schimmelmman, Radioactive Thoron ²²⁰Rn Exhalation from Unfired Mud Building Material into Room Air of Earthen Dwellings, *Frontiers in Earth Science*, Vol. 9, 2021, pp. 629241, <https://doi.org/10.3389/feart.2021.629241>.
- [18] P. Tuccimei, M. Moroni, D. Norcia, Simultaneous Determination of ²²²Rn and ²²⁰Rn Exhalation Rates from Building Materials Used in Central Italy with Accumulation Chambers and A Continuous Solid State Alpha Detector: Influence of Particle Size, Humidity And Precursors Concentration, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 64, No. 2, 2006, pp. 254-263, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2005.07.016>.
- [19] G. V. White, R. Tandon, L. Serna, M. Celina, R. Bernstein, An Overview of Basic Radiation Effects on Polymers, Sandia National Laboratories, US Department of Energy. SAND2013-8003P, 2013, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1671997> (accessed on: September 1st, 2025).
- [20] S. D. Kanse, B. K. Sahoo, B. K. Sapra, J. J. Gawarea, Y. S. Mayya, Powder Sandwich Technique: A Novel Method for Determining the Thoron Emanation Potential of Powders Bearing High ²²⁴Ra Content, *Radiation Measurements*, Vol. 48, 2013, pp. 82-87, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.10.014>.
- [21] A. C. Syuryavin, S. Park, M. M. Nirwono, S. H. Lee, Indoor Radon and Thoron from Building

- Materials: Analysis of Humidity, Air Exchange Rate, and Dose Assessment, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 52, Iss. 10, 2020, pp. 2370-2378, <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.03.013>.
- [22] G. D. With, P. D. Jong, A. Rottger, Measurement of Thoron Exhalation Rates from Building Materials, Health Physics, Vol. 107, No. 3, 2014, pp. 206-212, <https://doi.org/10.1097/HP.000000000000105>.
- [23] G. D. With, T. Kovács, A. Csordás, J. Tschiersch, J. Yang, S. W. Sadler, O. Meisenberg, Intercomparison on the Measurement of the Thoron Exhalation Rate from Building Materials, Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 228, 2021, pp. 106510, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106510>.
- [24] N. M. Hassan, M. Hosoda, T. Ishikawa, A. Sorimachi, S. K. Sahoo, S. Tokonami et al., Radon Migration Process and its Influence Factors; Review, Japanese Journal of Health Physics, Vol. 44, 2009, pp. 218-231, <https://doi.org/10.5453/jhps.44.218>.
- [25] A. Sakoda, Y. Ishimori, K. Yamaoka, A Comprehensive Review of Radon Emanation Measurements for Mineral, Rock, Soil, Mill Tailing and Fly Ash, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 69, 2011, pp. 1422-1435, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.06.009>.
- [26] A. Sakoda, Y. Ishimori, K. Hanamoto, T. Kataoka, A. Kawabe, K. Yamaoka, Experimental and Modeling Studies of Grain Size and Moisture Content Effects on Radon Emanation, Radiation Measurements, Vol. 45, 2010, pp. 204-210, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.01.010>.
- [27] S. Richford, Permeance – can Walls Dry Through Plastered Surface? Technician’s Advisory (British Damage Management Association-BDMA), Vol. 18, No. 2, 2017, <https://bdma.org.uk/wp-content/uploads/2017/06/Permeance–Drying-through-plaster-TA18-2.pdf> (accessed on: September 1st, 2025).