

Một mô hình tính toán giải tích để tính hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần cho đầu dò dạng trụ sử dụng trong phân tích thùng thải phóng xạ

- Huỳnh Đình Chương
- Lưu Tiểu Dân
- Võ Hoàng Nguyên
- Trần Thiện Thanh
- Châu Văn Tạo

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 25 tháng 09 năm 2015, nhận đăng ngày 14 tháng 04 năm 2016)

TÓM TẮT

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày một mô hình tính toán giải tích được xây dựng dựa trên phương pháp chuyển hiệu suất để tính hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần cho phép đo nguồn phóng xạ dạng điểm bên trong thùng thải bởi đầu dò dạng trụ không có ống chuẩn trực. Đồng thời, một chương trình tính toán được phát triển bằng ngôn ngữ Mathematica để ứng dụng mô hình này. Mô hình tính toán được đánh giá bằng cách so sánh với kết quả mô phỏng MCNP5, đối với các phép đo nguồn điểm bên

Từ khóa: Hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần, MCNP5, thùng thải phóng xạ

trong thùng thải có matrix lần lượt là cao su và bê tông sử dụng đầu dò nhấp nháy NaI(Tl). Độ sai biệt giữa hiệu suất mô phỏng MCNP5 và hiệu suất tính toán bằng chương trình là nhỏ hơn 11%. Điều này cho thấy, mô hình tính toán được xây dựng là đáng tin cậy và có thể áp dụng để tính hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần cho phép đo thùng thải. Bên cạnh đó, thời gian tính toán bằng chương trình nhanh hơn rất nhiều so với mô phỏng bằng chương trình MCNP5.

MỞ ĐẦU

Công việc xử lý chất thải từ hoạt động của nhà máy điện hạt nhân luôn là thách thức lớn bởi vì chúng có thể chứa những đồng vị phóng xạ có hoạt độ khác nhau và chu kỳ bán rã lên đến hàng triệu năm. Do đó, nhằm đảm bảo các quy định về an toàn phóng xạ, chất thải phóng xạ không thể đưa trực tiếp ra môi trường mà cần phải được chứa đựng trong các thùng đóng kín và tuân theo quy trình quản lý nghiêm ngặt. Quy trình quản lý chất thải phóng xạ yêu cầu rằng thành phần đồng vị phóng xạ và hoạt độ của chúng phải được xác định để phân loại cho phù hợp với các quy tắc

quốc gia trước khi vận chuyển, lưu trữ trung gian, hoặc loại bỏ cuối cùng.

Để xác định được hoạt độ của nguồn phóng xạ, một trong những thông số quan trọng cần phải biết đó là hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần (gọi tắt là hiệu suất đỉnh) của đầu dò đối với hình học đo. Tuy nhiên, công việc xác định hiệu suất bằng thực nghiệm đòi hỏi phải chuẩn bị các mẫu chuẩn giống với mẫu phân tích về hình học và matrix. Điều này luôn là một yêu cầu khó thực hiện đối với các phòng thí nghiệm trên thế giới. Sự phát triển của các phương pháp tính toán bán

thực nghiệm và mô phỏng Monte Carlo đã trở thành những công cụ hiệu quả để giải quyết vấn đề nói trên.

Trong đó, phương pháp mô phỏng Monte Carlo mà cụ thể là phần mềm GESPECOR đã được sử dụng để tính toán hiệu suất đỉnh cho hệ đo thùng thải phóng xạ, kết quả cho thấy giá trị tính toán từ cấu hình mô phỏng là phù hợp với thực nghiệm [5].

Chương trình GEANT 3.21 đã được sử dụng để mô phỏng hàm đáp ứng của hệ phổ kế gamma ISOCART (ORTEC) trong phân tích thùng thải phóng xạ [1]. Qua đó, hiệu suất đỉnh và hiệu suất tổng cho các mức năng lượng từ 50-2000 keV được đánh giá.

Một nghiên cứu trước đây của chúng tôi cũng đã chỉ ra rằng kết quả tính toán hiệu suất đỉnh bằng mô phỏng Monte Carlo sử dụng chương trình PENELOPE có thể áp dụng để tính hoạt độ của nguồn phóng xạ cho hai matrix là không khí và cát với độ sai biệt dưới 10 % [6].

Một mô hình tính toán bán thực nghiệm được phát triển dựa trên khái niệm đầu dò dạng điểm và hệ số suy giảm đã được đưa ra để tính toán hiệu suất đỉnh của đầu dò HPGe trong hệ đo thùng thải phóng xạ [4]. Hiệu suất đỉnh cho mẫu thể tích được tính bằng cách lấy tích phân của hiệu suất nguồn điểm trong chân không, với sự hiệu chỉnh hệ số suy giảm và hàm phân bố hoạt độ trên toàn bộ thể tích của mẫu. Kết quả ban đầu cho thấy độ sai biệt giữa hiệu suất thực nghiệm và tính toán bằng mô hình là nhỏ hơn 10 % trong khoảng năng lượng 122-1408 keV.

Một phương pháp số đã được phát triển để tính hoạt độ của các đồng vị phóng xạ bên trong thùng thải có matrix đồng nhất [2]. Với matrix có mật độ trong khoảng 0,5–2,3 g/cm³ thì độ lệch trung bình giữa hoạt độ tính toán và hoạt độ thực là 2,1 % và 4,0 % lần lượt cho nguồn ¹³⁷Cs và ⁶⁰Co. Kết quả này cho thấy sự cải thiện đáng kể so với phương pháp phân tích thông thường có độ sai lệch 14,8 % và 23,3 % .

Trong bài báo này, một mô hình tính toán giải tích được xây dựng dựa trên phương pháp chuyển hiệu suất (Moens và các cộng sự [3]) để tính hiệu suất đỉnh cho phép đo nguồn phóng xạ dạng điểm bên trong thùng thải bởi đầu dò dạng trụ không có ống chuẩn trực. Đồng thời, một chương trình tính toán được phát triển bằng ngôn ngữ Mathematica để ứng dụng mô hình này. Mô hình tính toán được đánh giá bằng cách so sánh với kết quả mô phỏng MCNP5, đối với các phép đo nguồn điểm bên trong thùng thải có matrix lần lượt là cao su và bê tông sử dụng đầu dò nhấp nháy NaI(Tl) kích thước 3 inch x 3 inch. Độ sai biệt giữa hiệu suất mô phỏng MCNP5 và hiệu suất tính toán bằng chương trình là nhỏ hơn 11 %. Điều này cho thấy, chương trình tính toán của chúng tôi phát triển là đáng tin cậy và có thể áp dụng để tính hiệu suất đỉnh cho phép đo thùng thải. Bên cạnh đó, thời gian tính toán bằng chương trình nhanh hơn rất nhiều so với mô phỏng bằng chương trình MCNP5.

PHƯƠNG PHÁP

Cơ sở lý thuyết

Phương pháp chuyển hiệu suất đã được Moens và các cộng sự đưa ra năm 1981 [3] để tính toán hiệu suất đỉnh bằng bán thực nghiệm. Xét 2 cấu hình đo khác nhau, sẽ có:

Hiệu suất đỉnh của cấu hình 1 (cấu hình tham khảo) là:

$$\varepsilon_P^{(1)}(E) = \varepsilon_T^{(1)}(E) \cdot \left(\frac{P}{T}\right)^{(1)} \quad (1)$$

Hiệu suất đỉnh của cấu hình 2 (cấu hình đo) là:

$$\varepsilon_P^{(2)}(E) = \varepsilon_T^{(2)}(E) \cdot \left(\frac{P}{T}\right)^{(2)} \quad (2)$$

Với: $\varepsilon_P^{(1)}$, $\varepsilon_T^{(1)}$ và $\left(\frac{P}{T}\right)^{(1)}$ lần lượt là hiệu suất đỉnh, hiệu suất tổng và tỉ số đỉnh/tổng của

cấu hình tham khảo, $\varepsilon_P^{(2)}$, $\varepsilon_T^{(2)}$ và $\left(\frac{P}{T}\right)^{(2)}$ lần lượt là hiệu suất đỉnh, hiệu suất tổng và tỉ số đỉnh/tổng của cấu hình cần đo.

Lưu ý rằng, hiệu suất tổng và tỉ số đỉnh/tổng ở đây được tính với các photon phát ra từ nguồn đến và được ghi nhận bởi đầu dò và không tính đến các trường hợp tán xạ lên vật liệu xung quanh.

Theo giả thuyết của Moens [3] đưa ra, tỉ số đỉnh/tổng được xem như hằng số $\left(\frac{P}{T} = \text{const}\right)$ đối với các hình học đo khác nhau.

Khi đó ta có:

$$\varepsilon_P^{(2)}(E) = \varepsilon_P^{(1)}(E) \cdot \frac{\varepsilon_T^{(2)}(E)}{\varepsilon_T^{(1)}(E)} \quad (3)$$

Cấu hình tham khảo là cấu hình đo có thể thiết lập đối với điều kiện của phòng thí nghiệm. Như vậy, hiệu suất đỉnh của cấu hình tham khảo có thể dễ dàng xác định bằng thực nghiệm. Từ đó, có thể chuyển từ bài toán tính hiệu suất đỉnh thành bài toán đơn giản hơn đó là tính hiệu suất tổng.

Xét một phép đo với hình học được mô tả như Hình 1, trong đó gốc tọa độ đặt tại điểm O là vị trí trung tâm của bề mặt trước tinh thể đầu dò, trục Oz nằm trên trục đối xứng của tinh thể đầu dò. Tinh thể đầu dò có dạng hình trụ với chiều dài L (cm) và bán kính R (cm), phía trước tinh thể có ba lớp che chắn khác nhau với bề dày lần lượt là a_1 , a_2 , a_3 (cm). Thùng thải có dạng hình trụ với bán kính trong R_T (cm) và bề dày của lớp vỏ thùng d_T (cm), thùng thải được đặt vuông góc với trục đối xứng của đầu dò. Một nguồn điểm đơn năng được đặt tại vị trí $S(r_s, \varphi_s, z_s)$ bên trong thùng thải và $B(r, \varphi, 0)$ là một điểm bất kỳ trên bề mặt tinh thể của đầu dò.

Xét một diện tích vi phân dS trên bề mặt tinh thể bao quanh điểm B. Nguồn phóng xạ nhìn diện tích dS với một góc khối là $d\Omega$.

Gọi N_0 là số bức xạ gamma phát ra từ nguồn S, số bức xạ gamma đến được phần diện tích vi phân dS này là: $dn = \frac{N_0}{4\pi} \cdot d\Omega$ và số bức xạ

gamma xảy ra tương tác với tinh thể đầu dò ứng với vùng diện tích dS là:

$$dN = \frac{N_0}{4\pi} \cdot d\Omega \cdot f_{\text{att}} \cdot f_{\text{abs}} \quad (4)$$

Trong đó: $f_{\text{att}} = e^{-\sum \mu_i \cdot \ell_i}$ là hệ số suy giảm khi đi qua các lớp vật liệu bên ngoài tinh thể,

$f_{\text{abs}} = (1 - e^{-\mu \cdot \ell})$ là xác suất để bức xạ gamma tương tác với tinh thể khi đi được quãng đường ℓ bên trong tinh thể,

μ_i và μ (đơn vị cm^{-1}) lần lượt là hệ số suy giảm tuyến tính (không tính đến tương tác Rayleigh) tương ứng với vật liệu che chắn thứ i và tinh thể,

ℓ_i và ℓ (đơn vị cm) lần lượt là quãng đường di chuyển của bức xạ gamma trong lớp vật liệu che chắn thứ i và tinh thể.

Số bức xạ gamma xảy ra tương tác với tinh thể đầu dò trên toàn diện tích S là:

$$N = \int_S dN = \int_{\Omega} \frac{N_0}{4\pi} \cdot e^{-\sum \mu_i \cdot \ell_i} \cdot (1 - e^{-\mu \cdot \ell}) \cdot d\Omega \quad (5)$$

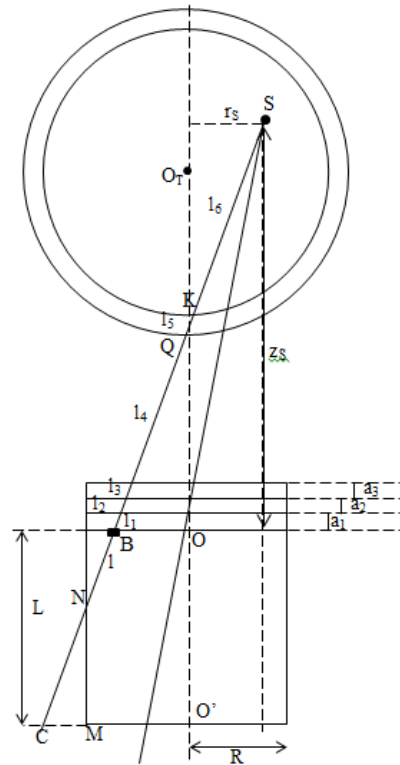
Với Ω là góc khối mà nguồn nhìn toàn bộ diện tích S của bề mặt tinh thể.

Ở đây, chúng tôi chỉ tiến hành lấy tích phân trên bề mặt trước của tinh thể đầu dò vì theo bố trí của phép đo dọc mặt bên của đầu dò được che chắn bởi một lớp chì dày 3 cm. Điều này đã làm hạn chế các tia phóng xạ đến mặt bên của đầu dò.

Khi đó, giá trị hiệu suất tổng được tính toán bằng công thức (6).

$$\varepsilon_T = \frac{N}{N_0} = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} e^{-\sum \mu_i \cdot \ell_i} \cdot (1 - e^{-\mu \cdot \ell}) \cdot d\Omega \quad (6)$$

Như vậy, để tính được hiệu suất tổng, cần phải xác định được độ dài quãng đường di chuyển qua các lớp vật liệu che chắn ℓ_i và bên trong tinh thể ℓ ; hệ số suy giảm tuyến tính của các lớp vật liệu che chắn μ_i và tinh thể μ ; góc khối Ω .



Hình 1. Mặt cắt ngang của mô hình thùng thải và đầu dò dùng trong tính toán

Có các phương trình sau:

$$\Omega = 2z_s \int_0^{\pi} d\varphi \int_0^R \frac{r.dr}{[r^2 + r_s^2 - 2r r_s \cos(\varphi - \varphi_s) + z_s^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

$$l_1 = \frac{a_1}{z_s} \cdot \sqrt{r^2 + r_s^2 + z_s^2 - 2r_s.r.\cos(\varphi - \varphi_s)} \quad (8)$$

$$l_2 = \frac{a_2}{z_s} \cdot \sqrt{r^2 + r_s^2 + z_s^2 - 2r_s.r.\cos(\varphi - \varphi_s)} \quad (9)$$

$$l_3 = \frac{a_3}{z_s} \cdot \sqrt{r^2 + r_s^2 + z_s^2 - 2r_s.r.\cos(\varphi - \varphi_s)} \quad (10)$$

$$l_4 = \left(1 - \frac{(a_1 - a_2 - a_3)}{z_s} - t_o\right) \cdot \sqrt{r^2 + r_s^2 + z_s^2 - 2r_s.r.\cos(\varphi - \varphi_s)} \quad (11)$$

$$l_5 = |t_o - t_k| \cdot \sqrt{r^2 + r_s^2 + z_s^2 - 2r_s.r.\cos(\varphi - \varphi_s)} \quad (12)$$

$$l_6 = |t_k| \cdot \sqrt{r^2 + r_s^2 + z_s^2 - 2r_s.r.\cos(\varphi - \varphi_s)} \quad (13)$$

$$l = BC - \delta(O'C - R) \cdot NC \quad (14)$$

Với $\delta(O'C - R)$ là hàm bước (Unit step function) thỏa mãn điều kiện sau:

$$\delta(O'C - R) = \begin{cases} 0, & \text{khi } O'C - R \leq 0 \\ 1, & \text{khi } O'C - R > 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$BC = \frac{-L}{z_s} \cdot \sqrt{r^2 + r_s^2 + z_s^2 - 2r_s.r.\cos(\varphi - \varphi_s)} \quad (16)$$

$$NC = \left|1 + \frac{L}{z_s} - t_N\right| \cdot \sqrt{r^2 + r_s^2 + z_s^2 - 2r_s.r.\cos(\varphi - \varphi_s)} \quad (17)$$

$$O'C = \sqrt{r_s^2 \left(\frac{L}{z_s}\right)^2 + r^2 \left(1 + \frac{L}{z_s}\right)^2 - 2r_s.r.\cos(\varphi - \varphi_s)} \cdot \left(\frac{L}{z_s}\right) \cdot \left(1 + \frac{L}{z_s}\right) \quad (18)$$

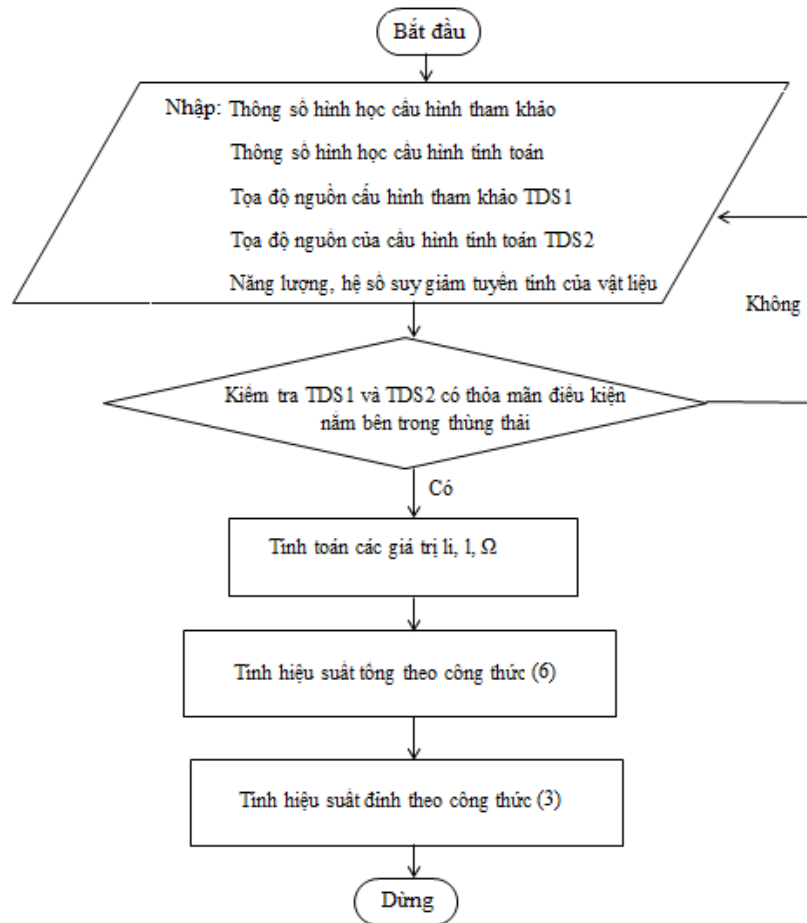
t_Q, t_K, t_N lần lượt là nghiệm của phương trình giao điểm giữa đường thẳng SB và các mặt trụ tương ứng (như mô tả trong Hình 1).

Thế các công thức (7) đến (18) vào (6) sẽ thu được một phương trình tích phân, qua đó có thể giải được bằng phương pháp tích phân số để tính hiệu suất tổng. Khi đó, hiệu suất đỉnh của cấu hình đo có thể tính được theo phương trình (3).

Chương trình tính toán Mathematica

Dựa vào mô hình tính toán đã trình bày ở trên, chúng tôi phát triển một chương trình bằng ngôn ngữ Mathematica để tính hiệu suất đỉnh cho

phép đo nguồn điểm bên trong thùng thải. Hình 2 thể hiện giải thuật tính toán của chương trình Mathematica được xây dựng. Hệ số suy giảm tuyến tính có thể được xác định thực nghiệm trên hệ đo thùng thải phóng xạ bằng phương pháp đo gamma truyền qua hoặc bằng phương pháp tính toán sử dụng cơ sở dữ liệu XCOM của NIST [7] khi đã biết thành phần vật liệu.



Hình 2. Lưu đồ chương trình tính toán hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần.

Mô phỏng MCNP5

Chương trình MCNP phiên bản 5 được sử dụng để mô phỏng quá trình vận chuyển của bức xạ photon bên trong một mô hình được xây dựng

giống với hình học đo. Loại đầu dò nhấp nháy 802 NaI(Tl) của hãng Canberra được sử dụng trong phép đo. Các thông số hình học và vật liệu của đầu dò do nhà sản xuất cung cấp được sử

dụng để mô phỏng. Trong đó: tinh thể NaI(Tl) có đường kính 7,62 cm và chiều dài 7,62 cm; mặt phía trước tinh thể từ ngoài vào trong gồm một lớp nhôm dày 0,05 cm, tiếp đến là một lớp silicon dày 0,11 cm và một lớp phản xạ bằng nhôm oxide 0,16 cm; mặt bên cạnh tinh thể từ ngoài vào trong gồm một lớp nhôm 0,05 cm và một lớp phản xạ bằng nhôm oxide 0,16 cm; mặt phía sau tinh thể là một cửa sổ bằng kính dẫn sáng 0,3 cm và tiếp theo là một ống nhân quang điện được cho là hoàn toàn bằng nhôm dày 3 cm. Dọc xung quanh mặt bên của đầu dò được che chắn bởi một lớp chì dày 3 cm, chiều cao 15,5 cm.

Chúng tôi sử dụng tally F8 [8] để thu được phân bố độ cao xung khi photon tương tác với đầu dò. Bên cạnh đó thẻ FT8 GEB cũng được sử dụng để tạo ra sự giãn nở Gauss cho phổ mô phỏng, với phương trình chuẩn FWHM theo năng lượng như sau:

$$\text{FWHM(MeV)} = -0.009501 + 0.071939\sqrt{E - 0.045034E^2} \text{ (MeV)} \quad (19)$$

Các hệ số trong phương trình (19) được xác định bằng cách làm khớp bộ dữ liệu FWHM theo năng lượng thu được khi đo các nguồn chuẩn ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{22}Na , ^{133}Ba và ^{154}Eu tại khoảng cách 25 cm từ bề mặt đầu dò. Trong quá trình mô phỏng để đảm bảo tính thống kê tốt của kết quả thì số hạt được mô phỏng trong mỗi phép đo là 3×10^9 hạt.

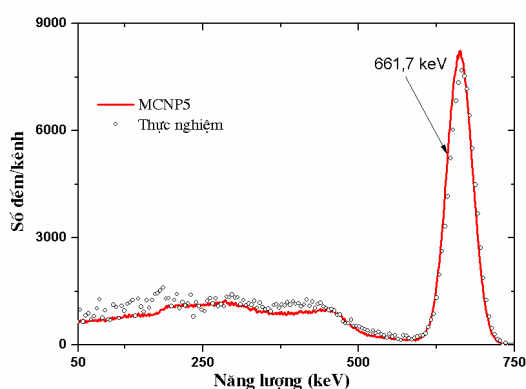
KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Đánh giá độ tin cậy của mô phỏng MCNP5

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng kết quả mô phỏng MCNP5 để so sánh với kết quả tính toán bằng chương trình Mathematica đã xây dựng, với hình học của phép đo thùng thải phóng xạ. Tuy nhiên, trước tiên kết quả mô phỏng

MCNP5 cần phải được kiểm tra để đánh giá độ tin cậy.

Để thực hiện công việc này, chúng tôi tiến hành đo thực nghiệm với các nguồn chuẩn dạng điểm ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{22}Na , ^{133}Ba và ^{154}Eu (hoạt độ xấp xỉ 1 μCi , sản xuất bởi hãng Eckert & Ziegler) sử dụng đầu dò nhấp nháy 802 NaI(Tl), tại khoảng cách 25 cm từ bề mặt đầu dò. Đồng thời, cấu hình mô phỏng MCNP5 cũng được xây dựng giống với thực nghiệm. Khi đó, hàm đáp ứng giữa thực nghiệm và mô phỏng được so sánh với nhau để đánh giá độ tin cậy của cấu hình mô phỏng. Hình 3 biểu diễn sự so sánh giữa phổ thực nghiệm và phổ mô phỏng của phép đo nguồn ^{137}Cs , qua đó cho thấy sự phù hợp tốt trong vùng đỉnh năng lượng toàn phần và nền tán xạ Compton. Bảng 1 trình bày kết quả tính hiệu suất đỉnh bằng mô phỏng MCNP5 với độ sai biệt dưới 5,42 % so với kết quả thực nghiệm, cho các mức năng lượng từ 80 – 1400 keV. Điều này đã chứng minh sự tin cậy trong việc sử dụng mô hình MCNP5 để tính toán hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần trong hệ đo thùng thải phóng xạ thay thế cho quá trình thực nghiệm.



Hình 3. Phổ thực nghiệm và mô phỏng của ^{137}Cs ở khoảng cách 25 cm

Bảng 1. Giá trị hiệu suất đỉnh theo năng lượng ghi nhận từ thực nghiệm và mô phỏng ở khoảng cách 25 cm

Năng lượng (keV)	Hiệu suất thực nghiệm	Hiệu suất MCNP5	Độ sai biệt (%)
81,30	0,005232	0,005455	-4,26
123,07	0,004147	0,004139	0,21
247,93	0,004019	0,003801	5,42
511,00	0,002842	0,002860	-0,62
591,76	0,002683	0,002667	0,60
661,67	0,002040	0,001981	2,92
723,30	0,001567	0,001603	-2,27
834,80	0,001640	0,001562	4,77
1173,00	0,001195	0,001202	-0,59
1274,43	0,001201	0,001203	-0,19
1332,49	0,001124	0,001120	0,39

Đánh giá kết quả tính hiệu suất đỉnh bằng chương trình Mathematica đã xây dựng

Chúng tôi tiến hành tính toán hiệu suất đỉnh bằng chương trình Mathematica và MCNP5 với phép đo như sau: thùng thải có dạng hình trụ với chiều cao 85 cm, đường kính trong là 57,3 cm, lớp vỏ thùng bằng thép dày 0,1 cm và bên trong thùng có chứa chất độn đồng nhất; thùng được đặt vuông góc với trục đối xứng của đầu dò tức trục Oz trong hệ trục tọa độ, trục đối xứng của thùng song song với trục Oy, khoảng cách từ tâm thùng đến bề mặt tinh thể đầu dò là 100 cm; môi trường giữa thùng thải và đầu dò là không khí.

Đối với cấu hình tham khảo, một nguồn phóng xạ dạng điểm đặt tại vị trí trung đoạn trên trục đối xứng của thùng thải với chất độn bên

trong thùng thải là không khí. Đối với cấu hình đo, một nguồn phóng xạ dạng điểm lần lượt đặt tại các vị trí khác nhau bên trong thùng thải với chất độn đồng nhất. Để có thể đánh giá ảnh hưởng của chất độn trong bên trong thùng thải đến giá trị hiệu suất đỉnh ghi nhận được, chúng tôi đã khảo sát trong 2 trường hợp: chất độn có mật độ thấp (cao su - $0,92 \text{ g/cm}^3$) và chất độn có mật độ cao (bê tông - $2,3 \text{ g/cm}^3$). Hiệu suất đỉnh được tính toán đối với hai mức năng lượng 662 keV và 1332 keV.

Kết quả tính toán hiệu suất đỉnh bằng chương trình Mathematica và MCNP5 được trình bày trong Bảng 2 đối với năng lượng 662 keV, Bảng 3 đối với năng lượng 1332 keV.

Bảng 2. So sánh hiệu suất tính toán và MCNP5 của năng lượng 662 keV với chất độn cao su và bê tông

Vị trí nguồn phóng xạ (Ox, Oy, Oz) (cm)	Chất độn cao su			Chất độn bê tông		
	Hiệu suất MCNP5	Hiệu suất tính toán	Độ sai biệt (%)	Hiệu suất MCNP5	Hiệu suất tính toán	Độ sai biệt (%)
(5, 0, 100)	1,66E-05	1,65E-05	-0,09	1,06E-06	9,94E-07	-6,53
(10, 0, 100)	1,76E-05	1,69E-05	-4,35	1,17E-06	1,08E-06	-7,88
(15, 0, 100)	1,89E-05	1,77E-05	-6,56	1,35E-06	1,27E-06	-5,88
(20, 0, 100)	2,10E-05	1,96E-05	-6,93	1,62E-06	1,71E-06	5,65
(25, 0, 100)	2,62E-05	2,40E-05	-8,18	2,84E-06	3,02E-06	6,18
(28, 0, 100)	3,36E-05	3,06E-05	-8,86	6,24E-06	5,92E-06	-5,17
(0, 5, 100)	1,63E-05	1,63E-05	0,02	1,02E-06	9,55E-07	-6,35
(0, 10, 100)	1,61E-05	1,57E-05	-2,72	8,82E-07	9,11E-07	3,30
(0, 15, 100)	1,57E-05	1,49E-05	-4,97	8,88E-07	8,51E-07	-4,12
(0, 20, 100)	1,50E-05	1,40E-05	-6,85	8,42E-07	7,80E-07	-7,46
(0, 25, 100)	1,41E-05	1,30E-05	-7,99	6,57E-07	7,01E-07	6,75
(0, 30, 100)	1,32E-05	1,19E-05	-9,90	6,40E-07	6,20E-07	-3,18
(0, 0, 95)	2,69E-05	2,69E-05	0,15	2,68E-06	2,61E-06	-2,74
(0, 0, 90)	4,45E-05	4,45E-05	-0,10	7,13E-06	7,06E-06	-0,95
(0, 0, 85)	7,38E-05	7,38E-05	-0,04	1,95E-05	1,93E-05	-1,07
(0, 0, 80)	1,23E-04	1,23E-04	0,20	5,25E-05	5,28E-05	0,64
(0, 0, 75)	2,07E-04	2,08E-04	0,25	1,44E-04	1,46E-04	1,76
(0, 0, 72)	2,84E-04	2,85E-04	0,33	2,65E-04	2,70E-04	1,89
(0, 0, 100)	1,64E-05	1,64E-05	0,18	9,66E-07	9,66E-07	0,00

Bảng 3. So sánh hiệu suất tính toán và MCNP5 của năng lượng 1332 keV với chất độn cao su và bê tông

Vị trí nguồn phóng xạ (Ox, Oy, Oz) (cm)	Chất độn cao su			Chất độn bê tông		
	Hiệu suất MCNP5	Hiệu suất tính toán	Độ sai biệt (%)	Hiệu suất MCNP5	Hiệu suất tính toán	Độ sai biệt (%)
(5, 0, 100)	1,85E-05	1,84E-05	-0,56	2,28E-06	2,44E-06	6,98
(10, 0, 100)	1,92E-05	1,84E-05	-3,87	2,69E-06	2,56E-06	-5,02
(15, 0, 100)	2,01E-05	1,89E-05	-6,17	3,02E-06	2,84E-06	-5,90
(20, 0, 100)	2,18E-05	2,00E-05	-8,30	3,77E-06	3,47E-06	-8,03
(25, 0, 100)	2,52E-05	2,28E-05	-9,78	5,60E-06	5,12E-06	-8,62
(28, 0, 100)	3,00E-05	2,68E-05	-10,64	8,76E-06	8,19E-06	-6,42
(0, 5, 100)	1,83E-05	1,82E-05	-0,74	2,44E-06	2,37E-06	-2,77
(0, 10, 100)	1,80E-05	1,75E-05	-2,48	2,38E-06	2,27E-06	-4,50
(0, 15, 100)	1,77E-05	1,67E-05	-5,77	2,27E-06	2,14E-06	-5,74
(0, 20, 100)	1,70E-05	1,57E-05	-7,47	2,15E-06	1,98E-06	-8,08
(0, 25, 100)	1,61E-05	1,46E-05	-9,24	1,95E-06	1,80E-06	-7,69
(0, 30, 100)	1,52E-05	1,35E-05	-11,18	1,73E-06	1,62E-06	-6,34
(0, 0, 95)	2,70E-05	2,68E-05	-0,63	4,96E-06	5,01E-06	0,86
(0, 0, 90)	3,98E-05	3,95E-05	-0,71	1,06E-05	1,05E-05	-0,97
(0, 0, 85)	5,90E-05	5,86E-05	-0,68	2,22E-05	2,22E-05	-0,15
(0, 0, 80)	8,78E-05	8,74E-05	-0,54	4,72E-05	4,72E-05	0,13
(0, 0, 75)	1,32E-04	1,32E-04	-0,25	1,01E-04	1,01E-04	0,57
(0, 0, 72)	1,68E-04	1,68E-04	-0,11	1,59E-04	1,60E-04	0,79
(0, 0, 100)	1,83E-05	1,83E-05	-0,27	2,40E-06	2,40E-06	0,00

Các kết quả đạt được cho thấy, độ sai biệt giữa hiệu suất tính toán bằng chương trình Mathematica và mô phỏng MCNP5 là nhỏ hơn 11 % đối với các vị trí của nguồn bên trong thùng thải. Trong trường hợp nguồn nằm trên trục đối xứng của đầu dò (trục Oz) thì độ sai biệt là dưới 3 %. Tuy nhiên, trong trường hợp nguồn không nằm trên trục đối xứng của đầu dò thì độ sai biệt tăng lên theo khoảng cách lệch trục.

KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã trình bày kết quả minh chứng cho sự phù hợp tốt giữa hàm đáp ứng của mô phỏng bằng chương trình MCNP5 và thực nghiệm đối với phép đo nguồn điểm tại vị trí cách bề mặt đầu dò 25 cm. Điều này cho thấy, MCNP5 là một công cụ đáng tin cậy có thể sử dụng để thay thế cho thực nghiệm trong việc chuẩn hiệu suất của đầu dò. Tuy nhiên, việc mô phỏng Monte Carlo bằng chương trình MCNP5 (hoặc các chương trình khác) đều có hạn chế là thời gian tính toán dài.

Chúng tôi đã trình bày một mô hình tính toán giải tích cho phép tính hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần của phép đo nguồn điểm bên trong thùng thải phóng xạ bởi đầu dò dạng trụ không có ống chuẩn trục. Đồng thời, một chương trình tính toán được phát triển bằng ngôn ngữ Mathematica để ứng dụng mô hình này. Mô hình tính toán được đánh giá bằng cách so sánh với kết quả mô phỏng MCNP5, đối với các phép đo nguồn điểm bên trong thùng thải có matrix lần lượt là cao su và bê tông. Độ sai biệt giữa hiệu suất mô phỏng MCNP5 và hiệu suất tính toán bằng chương trình là nhỏ hơn 11 %. Điều này cho thấy, mô hình tính toán được xây dựng là đáng tin cậy và có thể áp dụng để tính hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần cho phép đo thùng thải. Bên cạnh đó, thời gian tính toán bằng chương trình nhanh hơn rất nhiều so với mô phỏng bằng chương trình MCNP5.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số C2014-18-28.

An analytical calculation model of the full energy peak efficiency for cylindrical detectors used in assays of radioactive waste drums

- **Huynh Dinh Chuong**
- **Luu Tieu Dan**
- **Vo Hoang Nguyen**
- **Tran Thien Thanh**
- **Chau Van Tao**

University of Science, VNU-HCM

ABSTRACT

In this paper, we present an analytical calculation model of full energy peak efficiency for cylindrical detectors without collimator based on efficiency transfer method. A calculation

program by Mathematica language is developed to apply to this model. The validity of the calculation model was checked by comparison with MCNP5 simulated efficiency values for

measurements of point source in the waste drum containing matrix of rubber or concrete. The discrepancy between MCNP5 simulated and calculated efficiencies is smaller 11 %. This shows that the calculation model is reliable and

Keywords: Full energy peak efficiency, MCNP5, radioactive waste drums

can be applied to calculate the full energy peak efficiency for assays of radioactive waste drums. Besides, the calculated time by the this program is much faster than the simulation using MCNP5 program.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. D. Gurau, O. Sima, Simulation studies of the response function of a radioactive waste assay system, *Appl. Radiat. Isot*, 70, 305–308 (2012).
- [2]. T. Krings, C. Genreith, E. Mauerhofer, M. Rossbach, A numerical method to improve the reconstruction of the activity content in homogeneous radioactive waste drums, *Nucl. Inst. Meth.*, A 701, 262–267 (2013).
- [3]. L. Moens, J. De Donder, X. Lin, F. De Corte, A. De Wispelaere, A. Simonits, J. Hoste, Calculation of the absolute peak efficiency of gamma ray detector for different counting geometries, *Nucl. Inst. Meth.*, 187, 451-472 (1981).
- [4]. D. Stanga, D. Radu, O. Sima, A new model calculation of the peak efficiency for HPGe detectors used in assays of radioactive waste drum, *Appl. Radiat. Isot*, 68, 1418–1422 (2010).
- [5]. M. Toma, O. Sima, C. Olteanu, Experimental and simulated studies for the calibration of a radioactive waste assay system, *Nucl. Inst. Meth.A* 58 (2007) 391 – 395 (2007).
- [6]. T.T. Thanh, L.T. Van, T.T.T. Suong, T.T. Tin, Y.T.Y. Hong, V.H. Nguyen, H.D. Chuong, L.T.N. Trang, T.K. Tuyet, L.B. Tran, H.T.K. Trang, H.D. Tam, C.V. Tao, Efficiency calibration of point sources insite radioactive waste drum by Monte Carlo Simulation, *Proceedings of RCMME2014*, 447-481 (2014).
- [7]. NIST (2013) XCOM: photon cross sections database. USA. <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>.
- [8]. X-5 Monte Carlo Team., 2005. A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version5, Volume II, User guide, Los Alamos national Laboratory, LA-CP-03-0245