

Nghiên cứu sự phụ thuộc khả năng phân biệt xung nơtron/gamma vào kích thước của đầu dò nhấp nháy EJ-301

Nguyễn Xuân Hải¹, Phan Bảo Quốc Hiếu^{1,*}, Vũ Thị Thanh Quý², Phan Văn Chuân³, Nguyễn Năng Hải³, Lê Văn Tùng³, Nguyễn Quang Hưng^{4,5}, Nguyễn Ngọc Anh⁶, Đinh Tiến Hùng⁷, Phạm Đình Khang¹



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu ứng dụng phương pháp mô phỏng Monte Carlo để khảo sát sự phụ thuộc của hiệu suất ghi và khả năng phân biệt xung nơtron/gamma vào kích thước của đầu dò sử dụng chất nhấp nháy EJ-301, phục vụ thiết kế chế tạo đầu dò ghi đo nơtron. Chúng tôi đã xây dựng và khảo sát 08 mô hình đầu dò hình trụ có chiều dài và đường kính khác nhau bằng công cụ Geant4. Các mô hình đầu dò được mô phỏng bao gồm khối nhấp nháy ghép với ống dẫn sáng và ống nhân quang (PMT). Các tín hiệu xung mô phỏng thu được từ mỗi mô hình đầu dò đã được phân tích để đánh giá khả năng phân biệt nơtron/gamma bằng phương pháp tích phân điện tích (DCI), đồng thời hiệu suất ghi nơtron cũng được xác định tại từng ngưỡng năng lượng khác nhau. Các kết quả phân biệt xung nơtron/gamma được đánh giá dựa trên chỉ số phẩm chất hình ảnh (FoM). Kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng phân biệt nơtron/gamma và hiệu suất ghi nơtron đều phụ thuộc rõ rệt vào kích thước của đầu dò, cụ thể là sự thay đổi chiều dài và đường kính. Kết quả này có ý nghĩa quan trọng, hỗ trợ nghiên cứu tối ưu thiết kế đầu dò nơtron sử dụng chất nhấp nháy hữu cơ EJ-301 hoặc các chất nhấp nháy tương tự, nhằm nâng cao hiệu quả phân biệt xung nơtron/gamma và hiệu suất ghi nhận nơtron.

Từ khoá: nhấp nháy EJ-301, phân biệt nơtron/gamma, mô phỏng Geant4, tích phân điện tích

¹Viện Nghiên cứu hạt nhân, 01 Nguyễn Tử Lực, Đà Lạt, Lâm Đồng, Việt Nam

²Trường Cao đẳng Đà Lạt, 109 Yersin, Đà Lạt, Lâm Đồng, Việt Nam

³Trường Đại học Đà Lạt, 01 Phù Đổng Thiên Vương, Đà Lạt, Lâm Đồng, Việt Nam

⁴Viện Nghiên cứu Khoa học cơ bản và Ứng dụng, Trường Đại học Duy Tân, TP Hồ Chí Minh, Việt Nam

⁵Khoa Khoa học tự nhiên, Trường Đại học Duy Tân, TP Đà Nẵng, Việt Nam

⁶Viện Nghiên cứu tiên tiến, Trường Đại học PHENIKAA, Yên Nghĩa, Hà Đông, Hà Nội, Việt Nam

⁷Viện Kỹ thuật hoá học và môi trường quân sự, Hà Nội, Việt Nam

Liên hệ

Phan Bảo Quốc Hiếu, Viện Nghiên cứu hạt nhân, 01 Nguyễn Tử Lực, Đà Lạt, Lâm Đồng, Việt Nam

Email: hieupbq@dnri.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 19-7-2024
- Ngày sửa đổi: 4-11-2024
- Ngày chấp nhận: 10-3-2025
- Ngày đăng: 31-3-2025

DOI:

<https://doi.org/10.32508/stdjns.v8i4.1400>



GIỚI THIỆU

EJ-301 (hay BC501A)¹ là một trong những chất nhấp nháy hữu cơ được sử dụng phổ biến trong các đầu dò ghi đo nơtron nhanh, do có hiệu suất ghi nhận cao và đặc trưng của xung ánh sáng cho phép nhận dạng bức xạ nơtron với gamma trên một đầu dò. Tuy nhiên, nhược điểm chính của EJ-301 là cũng rất nhạy với bức xạ gamma và khả năng nhận dạng kém ở các xung biên độ thấp². Do đó, các hệ đo nơtron sử dụng đầu dò nhấp nháy EJ-301 cần có sự hỗ trợ của các phương pháp phân biệt xung nơtron/gamma nhằm tăng cường độ chính xác trong ghi nhận nơtron. Hiệu quả nhận dạng xung nơtron/gamma cho các đầu dò nhấp nháy đã được nghiên cứu theo các hướng chính là phát triển các phương pháp phân biệt dạng xung (Pulse Shape Discrimination, PSD), nghiên cứu phát triển vật liệu nhấp nháy và đầu dò trong đó có đánh giá khả năng phân biệt dựa trên kích thước đầu dò tương ứng với các chất nhấp nháy. Các nghiên cứu phương pháp PSD đã cho thấy hiệu quả phân biệt nơtron/gamma tương đối tốt ở vùng năng lượng cao, nhưng kém trong vùng năng lượng dưới 200 keVee (kilo electron Volt electron equivalent)²⁻⁴. Một số nghiên cứu hiệu suất ghi và hiệu quả phân biệt xung nơtron/gamma đã được thực nghiệm trên các đầu dò

nhấp nháy có kích thước khác nhau. Trong nghiên cứu của P. Christopher và các đồng nghiệp, bốn tinh thể EJ-299-34 có kích thước khác nhau ghép nối với PMT đã được đánh giá⁴. Bên cạnh đó, một số mô hình đầu dò sử dụng chất nhấp nháy hữu cơ cũng đã được xây dựng và mô phỏng trong phần mềm Geant4⁵. Trong nghiên cứu của N. Patronis và các đồng nghiệp, mô hình đầu dò BC501A đã được xây dựng trong Geant4 để đánh giá hàm đáp ứng biên độ với các nguồn nơtron khác nhau⁶. Nghiên cứu của Z. S. Hartwig và các đồng nghiệp đã xây dựng hai mô hình đầu dò EJ-301 để đánh giá hiệu suất ghi và hiệu quả nhận dạng nơtron/gamma⁷. Các nghiên cứu này đã cho thấy, có sự phụ thuộc của hiệu suất ghi và hiệu quả phân biệt nơtron/gamma vào kích thước của đầu dò. Tuy nhiên, số lượng các mô hình được khảo sát còn rất hạn chế, kích thước chất nhấp nháy mới chỉ được khảo sát theo chiều dài. Hơn nữa, các nghiên cứu này đều sử dụng mô hình đánh giá trực tiếp từ các xung nhấp nháy mà chưa tính đến các ảnh hưởng của quá trình chuyển đổi quang - điện và mạch điện tử dùng khuếch đại tín hiệu - những bộ phận không thể thiếu trong thiết bị ghi nhận nơtron.

Do vậy, để hỗ trợ cho thiết kế đầu dò nơtron gắn với thực tế, 08 mô hình đầu dò với kích thước khối nhấp

Trích dẫn bài báo này: Hải N X, Hiếu P B Q, Quý V T T, Chuân P V, Hải N N, Tùng L V, Hưng N Q, Anh N N, Hùng D T, Khang P D. **Nghiên cứu sự phụ thuộc khả năng phân biệt xung nơtron/gamma vào kích thước của đầu dò nhấp nháy EJ-301.** *Sci. Tech. Dev. J. - Nat. Sci.* 2025; 9(1):3257-3266.

Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



nháy EJ-301 khác nhau được xây dựng và mô phỏng với sự hỗ trợ của Geant4. Tín hiệu xung từ mô hình mô phỏng được phân biệt bằng phương pháp DCI, hệ số FoM được sử dụng làm tiêu chí đánh giá sự phụ thuộc của khả năng phân biệt dạng xung vào kích thước của chất nhấp nháy. Kết quả thu được không chỉ phục vụ nghiên cứu tối ưu thiết kế kích thước nhấp nháy của đầu dò EJ-301 mà còn cung cấp các mô hình mô phỏng ứng dụng cho thiết kế tối ưu các đầu dò nhấp nháy đo neutron khác.

PHƯƠNG PHÁP VÀ VẬT LIỆU

Mô hình đầu dò

Mô hình đầu dò được xây dựng bao gồm đầu nhấp nháy, ống dẫn sáng, PMT, và tiền khuếch đại (TKĐ) dựa theo mô hình thực tế được thiết lập². Các cấu hình đầu nhấp nháy, ống dẫn sáng, PMT và các tham số liên quan đến hình thành xung được thiết lập trong các lớp của chương trình Geant4. Đầu nhấp nháy EJ-301 cấu tạo gồm lớp vỏ, khối nhấp nháy, và cửa sổ dẫn sáng. Lớp vỏ hình trụ rỗng làm bằng nhôm, dày 1,5 mm. Khối nhấp nháy chứa chất nhấp nháy lỏng EJ-301 với thể tích khác nhau theo kích thước trên Bảng 1 và minh họa trên Hình 1. Cửa sổ dẫn sáng làm từ thủy tinh hữu cơ, phù hợp để ghép với ống dẫn sáng hoặc PMT.

Ống dẫn sáng bằng vật liệu thủy tinh hữu cơ (acrylic) được mô phỏng gồm hai loại hình trụ và hình nón cắt có chiều dài 50 mm, đường kính phù hợp với kích thước cửa sổ PMT và kích thước cửa sổ dẫn sáng của các khối nhấp nháy như trên Bảng 1 và Hình 1.

EJ-301 là chất nhấp nháy lỏng (xylen) có công thức hóa học (C_8H_{10}), các đặc trưng vật lý được trình bày trong Bảng 2. Hiệu suất phát quang tốt (12000 photon/1 MeVee) và ánh sáng nhấp nháy được tạo từ 3 thành phần phân rã với tỉ lệ khác nhau tùy thuộc vào loại bức xạ. Đặc tính này của chất nhấp nháy EJ-301 cho phép tạo ra các xung ánh sáng nhấp nháy (xung nhấp nháy) có hình dạng đuôi xung khác nhau đối với bức xạ neutron và gamma làm cơ sở cho các phương pháp phân biệt bức xạ dựa trên hình dạng xung. Khi bức xạ tương tác với khối nhấp nháy EJ-301, phần năng lượng để lại trong khối nhấp nháy được chuyển đổi thành xung ánh sáng với 3 thành phần phân rã được mô tả như phương trình (1).

$$V_s(t) = Ae^{-t/\tau_F} + Be^{-t/\tau_M} + Ce^{-t/\tau_L} \quad (1)$$

Trong đó: A, B, C tương ứng là cường độ ban đầu của 3 thành phần phân rã; τ_F , τ_M , τ_L tương ứng là 3 thời hằng phân rã (gồm: nhanh, trung bình, và chậm) của chất nhấp nháy EJ-301.

Xung nhấp nháy được chuyển đổi thành xung điện thông qua bộ PMT. Việc chuyển đổi được mô tả thông qua hàm đáp ứng đặc trưng của PMT. Mô hình đáp ứng của PMT đối với 1 photon đơn lẻ đã được trình bày trong nghiên cứu⁸ có dạng như phương trình (2).

$$G_{PMT}(t) \sim \frac{t}{\tau_{PMT}} e^{-t/\tau_{PMT}} \quad (2)$$

Trong đó τ_{PMT} là thời gian đáp ứng của PMT. Trong nghiên cứu này, sử dụng PMT R9420 của Hamamatsu có thời gian đáp ứng $\tau_{PMT} = 0,55$ ns, hệ số nhân quang $5,5 \times 10^5$ ⁹ được lựa chọn để xây dựng mô hình. Đó đó, hàm đáp ứng của mô hình PMT R9420 được mô tả như phương trình (3).

$$G_{PMT}(t) = G_{PMT} \frac{t}{0,55} e^{-t/0,55} \quad (3)$$

Trong đó: G_{PMT} là hệ số chuyển đổi quang – điện.

Giả sử anode của PMT R9420 kết nối với điện trở tải $R_L = 50 \Omega$; hệ số chuyển đổi quang – điện được tính là $G_{PMT} = 5,5 \times 10^5 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 50 \times 10^9 = 0,0044$.

Tín hiệu sau PMT R9420 cần được khuếch đại và lọc nhiễu để có được dạng xung phù hợp cho các quá trình xử lý xung tiếp theo. Một TKĐ thường bao gồm bộ khuếch đại biên độ (A lần) kết hợp với bộ lọc thông thấp và một tầng phối hợp trở kháng. Trong nghiên cứu này, một mô hình TKĐ gồm bộ lọc Sallen-key thông thấp có hệ số khuếch đại biên độ A, kết hợp với tầng phối hợp trở kháng RC. Hàm đáp ứng của TKĐ dạng này được mô tả bằng hàm ảnh trong miền Laplace như phương trình (4)¹⁰.

$$G_{TKD}(s) = \frac{A}{\tau_1^2 s^2 + \tau_1(3-A)s + 1} \cdot \frac{1}{\tau_2 s + 1} \quad (4)$$

Trong đó: τ_1 là hằng số thời gian của mạch lọc Sallen-key, τ_2 là hằng số thời gian của mạch phối hợp trở kháng và s là biến phức trong biến đổi Laplace.

Sử dụng các tham số trong nghiên cứu¹⁰: A = 1,59, $\tau_1 = 7,05$ ns, $\tau_2 = 10$ ns, hàm đáp ứng của mô hình TKĐ có dạng như (5).

$$G_{TKD}(s) = \frac{0,0032}{s^3 + 0,3s^2 + 0,04s + 0,002} \quad (5)$$

Hàm đáp ứng của TKĐ trong miền thời gian thu được từ biến đổi Laplace ngược của (5), kết quả thu được phương trình (6).

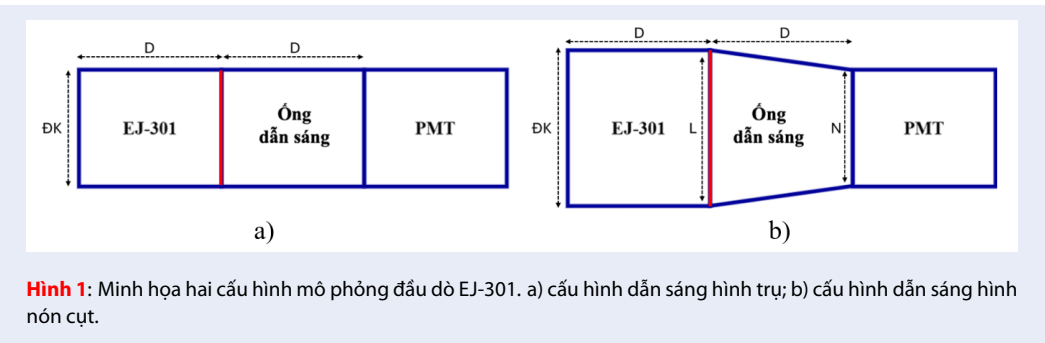
$$V_{TKD}(t) = L^{-1} \left\{ \frac{0,0032}{s^3 + 0,3s^2 + 0,04s + 0,002} \right\} \approx 0,32e^{-0,1t} - 0,16e^{-0,1t} (e^{-0,1jt} - e^{0,1jt}) \quad (6)$$

Xung đầu ra của mô hình đầu dò là tích chập giữa xung nhấp nháy với các hàm đáp ứng của PMT và

Bảng 1: Kích thước khối nhấp nháy EJ-301 và ống dẫn sáng.

Mô hình đầu dò	Kích thước nhấp nháy (ĐK×D) (mm)	Kích thước ống dẫn sáng (L×N×D) (mm)
Det 1	34×25	34×34×50
Det 2	34×50	34×34×50
Det 3	50×50	50×50×50
Det 4	50×100	50×50×50
Det 5	75×50	75×50×50
Det 6	75×100	75×50×50
Det 7	100×50	100×50×50
Det 8	100×100	100×50×50

Ghi chú: ĐK- đường kính, D-dài, L-dây lớn, N-dây nhỏ



Hình 1: Minh họa hai cấu hình mô phỏng đầu dò EJ-301. a) cấu hình dẫn sáng hình trụ; b) cấu hình dẫn sáng hình nón cụt.

Bảng 2: Các đặc trưng của chất nhấp nháy EJ-301 ¹

Thuộc tính	Giá trị
Hiệu suất nhấp nháy (số photon/ 1 MeVee)	12000
Bước sóng phát quang cực đại (nm)	425
Các hằng số thời gian phân rã (ns)	3,16; 32; 270
Khối lượng riêng (g/cm ³)	0,874
Chiết suất	1,505
Tỉ số H/C	1,21

TKĐ, được mô tả như phương trình (7).

$$V_{Out}(t) = \left(e^{t/\tau_F} + B e^{-t/\tau_M} + C e^{t/\tau_L} \right) * G_{PMT} \frac{t}{0,55} e^{\frac{t}{0,55}} * \left(0,32 e^{-0,1t} - 0,16 e^{-0,1t} \left(e^{-0,1jt} - e^{0,1jt} \right) \right) \tag{7}$$

Mô phỏng xung neutron và gamma từ đầu dò EJ-301

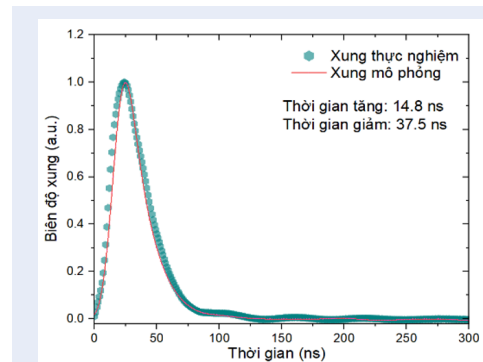
Biên độ xung phụ thuộc số photon phát ra trong chất nhấp nháy, và tỉ lệ với năng lượng mà bức xạ để lại trong chất nhấp nháy. Hình dạng xung nhấp

nháy phụ thuộc tỉ lệ các thành phần phân rã đối với bức xạ đến. Các đặc trưng phân rã này của chất nhấp nháy được khai báo trong lớp cấu trúc vật liệu “DetectorConstruction()” và khai báo tương tác vật lý “PhysicsList()” của đầu dò. Thời gian phân rã photon của chất nhấp nháy EJ-301 gồm hai thành phần chính: thành phần phân rã nhanh ~ 3,2 ns và thành phần phân rã chậm ~ 32,4 ns¹. Biên độ của xung mô phỏng phụ thuộc vào số photon sinh ra khi năng lượng điện tử bị hấp thụ trong chất nhấp nháy. Tất cả các thông số trên đều được thiết lập trong lớp “PhysicsList()” và “DetectorConstruction()”.

Các tương tác chính của gamma với nhấp nháy EJ-301 gồm hiệu ứng quang điện, tán xạ Compton và tạo cặp được khai báo trong lớp “*PhysicsList()*”. Do thành phần nguyên tố của chất nhấp nháy EJ-301 gồm hydro và carbon, nên các phổ thu được từ mô phỏng cũng thể hiện chủ yếu là các phân bố Compton. Các tương tác của neutron với chất nhấp nháy EJ-301 gồm tán xạ đàn hồi và tán xạ không đàn hồi được khai báo thông qua lớp “*G4HadronElasticProcess()*” và lớp “*G4NeutronInelasticProcess()*”. Bên cạnh đó, phản ứng bắt neutron được khai báo thông qua lớp “*G4HadronCaptureProcess()*”; và phản ứng phân hạch trong quá trình hấp thụ neutron được khai báo thông qua lớp “*G4HadronFissionProcess()*”.

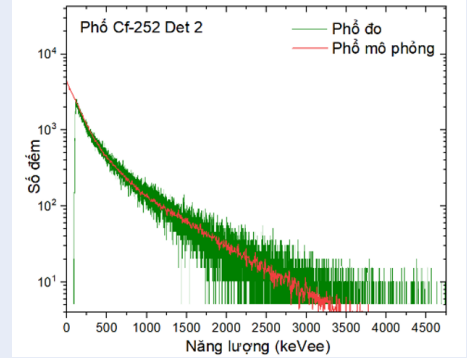
Hiệu lực hóa mô hình

Mô hình mô phỏng được so sánh với thực nghiệm để hiệu chỉnh các tham số. Hình 2 là kết quả so sánh xung gamma giữa thực nghiệm và mô phỏng với mô hình Det 2 sau khi hiệu chỉnh. Thời gian tăng của xung mô phỏng khoảng 14,8 ns so với giá trị trung bình của xung thực nghiệm là 14,3 ns và thời gian giảm của xung mô phỏng đạt 37,5 ns so với giá trị trung bình của xung thực nghiệm là 38,5 ns.



Hình 2: So sánh xung gamma mô phỏng của Det 2 và thực nghiệm sau khi hiệu chỉnh mô hình.

Hình 3 so sánh giữa phổ mô phỏng và thực nghiệm với nguồn ^{252}Cf hoạt độ 429 MBq (19/05/2011), ngưỡng > 50 keVee. Cấu hình ghi phổ thực nghiệm được thiết lập gồm đầu dò có kích thước nhấp nháy $\Phi 24 \times 50$ mm kết hợp với PMT R9420 và mạch TKĐ. Các xung đầu ra được số hóa và phân tích biên độ bằng bộ lấy mẫu DRS4. Đầu dò được đặt cách nguồn ^{252}Cf khoảng 100 cm và 1.000.000 xung đã được phân tích. Phổ thực nghiệm có thăng giáng lớn hơn do đóng góp của nhiễu điện tử trên mạch đo, phần này đã được đơn giản hóa trong mô hình^{11,12} nhưng hình dạng phổ vẫn cho thấy sự phù hợp giữa mô hình với thực nghiệm.



Hình 3: So sánh phổ ^{252}Cf mô phỏng của Det 2 và thực nghiệm sau khi hiệu chỉnh mô hình.

Xử lý số liệu

Hiệu suất ghi và đường chuẩn năng lượng

Hiệu suất ghi nội của đầu dò, ϵ_i , được xác định bởi tỉ số giữa các sự kiện được ghi nhận và tổng số sự kiện đi vào thể tích ghi nhận của đầu dò theo biểu thức (8)².

$$\epsilon_i = \frac{\text{Số sự kiện ghi được}}{\text{Số sự kiện đi vào đầu dò}} \quad (8)$$

Đường chuẩn năng lượng được xác định theo cạnh Compton tương ứng với năng lượng của các nguồn gamma dùng để chuẩn. Trong nghiên cứu này, các nguồn chuẩn ^{22}Na hoạt độ 333 kBq (12/2000), ^{137}Cs hoạt độ 407 kBq (05/2011), và ^{60}Co hoạt độ 407 kBq (12/2000) phát gamma năng lượng tương ứng là 511,0 keV, 661,66 keV, và 1332,49 keV đã được sử dụng để chuẩn năng lượng cho các mô hình đầu dò. Mối liên hệ giữa năng lượng cạnh Compton và năng lượng nguồn gamma xác định theo biểu thức (9)².

$$E_c = \frac{2E_\gamma^2}{2E_\gamma^2 + m_e} \quad (9)$$

Trong đó: E_γ là năng lượng của nguồn gamma, m_e là khối lượng của electron, E_c là năng lượng tại cạnh Compton tương ứng. Các cạnh Compton sẽ phụ thuộc vào thể tích đầu dò nên đường chuẩn sẽ được xác định cho từng cấu hình cụ thể.

Tính tham số phân biệt

Khi tương tác với chất nhấp nháy, các xung neutron có sườn sau giảm chậm hơn so với xung gamma có cùng biên độ, nên diện tích phần đuôi các xung neutron sẽ lớn hơn so với xung gamma. So sánh diện tích đuôi xung là một trong các phương pháp phân biệt xung neutron/gamma hiệu quả, và được ứng dụng trong nhiều nghiên cứu¹²⁻¹⁴. Trong nghiên cứu này, tham số phân biệt được tính là tỉ số giữa diện tích đuôi xung S_{tail} với biên độ xung A_{max} theo công thức (10).

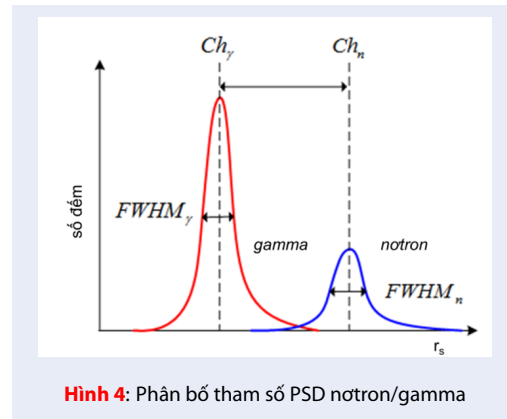
$$r_s = S_{tail}/A_{max} \quad (10)$$

Trong đó: $S_{tail} = \sum_{k=T_1}^{T_2} v(k) \cdot T$, T_1 là thời điểm bắt đầu tính diện tích đuôi xung và T_2 là thời điểm kết thúc tính diện tích đuôi xung.

Giá trị r_s cho các tập xung từ mô hình đầu dò được kỳ vọng sẽ phân bố thành hai nhóm, phân cách nhau bởi một ngưỡng, r_{ng} . Các xung có r_s nhỏ hơn ngưỡng r_{ng} được xếp loại là gamma, còn các xung có r_s lớn hơn r_{ng} được xếp loại là neutron.

Đánh giá hiệu quả phân biệt

Khả năng phân giải giữa neutron/gamma được đánh giá theo chỉ số phẩm chất hình ảnh FoM tính theo công thức (11)^{3,15} sử dụng số liệu thống kê PSD tính từ công thức (10) như mô tả ở Hình 4.



Hình 4: Phân bố tham số PSD neutron/gamma

$$FoM = \frac{|Ch_n - Ch_\gamma|}{FWHM_n + FWHM_\gamma} \quad (11)$$

Trong đó: Ch_n, Ch_γ lần lượt là vị trí đỉnh phân bố tham số phân biệt dạng xung của neutron và gamma; $FWHM_n, FWHM_\gamma$ lần lượt là độ rộng nửa chiều cao của phân bố tham số phân biệt dạng xung của neutron và gamma. Khi giá trị $FoM \geq 1,0$, hai phân bố trở nên tách biệt rõ ràng, những phân bố có FoM trên giá trị này được xem là tốt; ngược lại $FoM < 1$ và càng tiến gần đến 0 thì hiệu quả phân biệt càng tối.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Sự phụ thuộc của đường chuẩn năng lượng và hiệu suất

Kết quả khảo sát sự tuyến tính theo năng lượng và hiệu suất ghi của 08 mô hình đầu dò được trình bày trong Hình 5.

Trong đó, Hình 5a thể hiện sự phụ thuộc của biên độ xung theo năng lượng của từng mô hình đầu dò sử dụng các cạnh Compton có năng lượng lần lượt

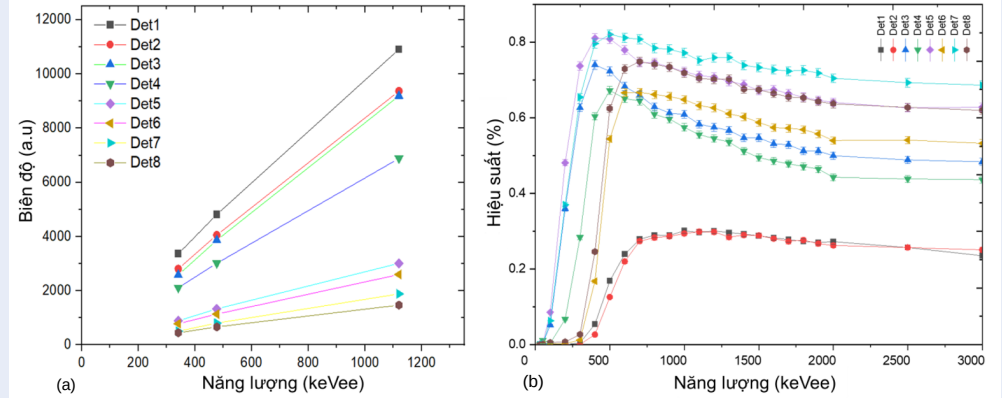
là 341 keV, 1060 keV, và 1120 keV tương ứng với năng lượng gamma của các nguồn ^{22}Na (511,0 keV), ^{137}Cs (661,66 keV) và ^{60}Co (1332,49 keV), trong khi Hình 5b cho thấy sự thay đổi của hiệu suất ghi theo ngưỡng năng lượng neutron của từng mô hình đầu dò. Kết quả khảo sát chỉ ra rằng hiệu suất ghi tỷ lệ thuận với đường kính đầu dò và có thể chia thành ba nhóm cơ bản: (i) Nhóm 1: Det 1 và Det 2 có hiệu suất nhỏ nhất và tương đồng, mặc dù Det 2 có chiều dài lớn hơn Det 1; (ii) Nhóm 2: gồm Det 3 và Det 4 (đường kính 50 mm), và Det 6 (đường kính 75 mm), có hiệu suất lớn hơn nhóm 1; (iii) Nhóm 3: gồm Det 5 (đường kính 75 mm), Det 7 và Det 8 (đường kính 100 mm), có hiệu suất ghi cao nhất.

Kết quả thu được trên các đường chuẩn năng lượng, thể hiện trên Hình 5a cho thấy các đầu dò có kích thước nhỏ, đường chuẩn năng lượng có độ dốc lớn hơn. Trong khi các đầu dò có kích thước lớn, độ dốc của đường chuẩn năng lượng nhỏ hơn. Điều này là do trong các đầu dò nhỏ, số photon bị tán xạ thoát ra khỏi đầu dò nhiều hơn so với các đầu dò thể tích lớn. Hình 5b thể hiện sự phụ thuộc của hiệu suất ghi theo năng lượng bức xạ neutron bị hấp thụ đối với các đầu dò có kích thước khác nhau từ Det 1 đến Det 8. Kết quả cho thấy hiệu suất ghi của tất cả các đầu dò đều có xu hướng giảm ở vùng ngưỡng năng lượng thấp dưới 500 keV do khả năng phân biệt kém. Hiệu suất cũng phụ thuộc kích thước, các đầu dò có đường kính nhỏ như Det 1 và Det 2, hiệu suất ghi thấp hơn đáng kể so với các đầu dò có đường kính lớn hơn do đầu dò nhận được nhiều bức xạ hơn. Đối với các đầu dò có cùng đường kính, hiệu suất ghi không thuận tuý tăng tỉ lệ với chiều dài chất nhấp nháy (hiệu suất ghi tỉ lệ với $1 - e^{-D/\lambda}$ với D là chiều dài nhấp nháy, λ là quãng chạy tự do trung bình của neutron hoặc gamma), do khi chiều dài của khối nhấp nháy tăng lên, xác suất các photon nhấp nháy bị hấp thụ hoặc thoát ra ngoài khối trên đường đến được cực âm của PMT cũng tăng theo. Kết quả là biên độ xung nhấp nháy bị giảm, nằm bên dưới ngưỡng ghi nhận của hệ đo, do đó hiệu suất của các đầu dò có chiều dài lớn cũng bị suy giảm.

Khả năng phân biệt neutron/gamma trên các đầu dò EJ-301

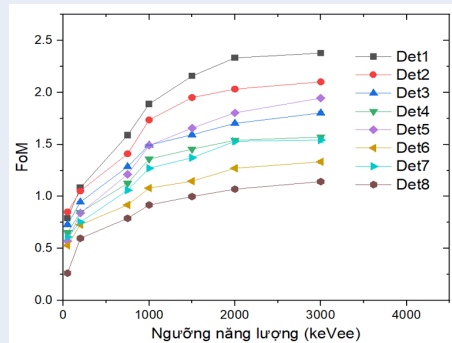
Phân bố tham số phân biệt dạng xung tương ứng với các cấu hình mô phỏng với ^{252}Cf được trình bày trên Hình 6.

Giá trị FoM trong dải năng lượng 50-3000 keV tương ứng với các cấu hình đầu dò được trình bày trên Bảng 3, đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của FoM theo năng lượng tương ứng với từng đầu dò được trình bày trên Hình 7. Bảng 3 cho thấy giá trị FoM của tất cả



Hình 5: (a) Sự thay đổi biên độ xung theo kích thước đầu dò và năng lượng hấp thụ trong đầu dò; (b) Sự thay đổi hiệu suất ghi theo kích thước đầu dò và ngưỡng năng lượng bị hấp thụ của neutron.

các đầu dò đều tăng dần khi năng lượng tăng do tín hiệu có năng lượng cao thường dễ phân biệt hơn. Ở ngưỡng năng lượng thấp (50 keV), FoM dao động từ 0,26 đến 0,85, ở các ngưỡng năng lượng cao (>200 keV), FoM có thể đạt các giá trị lớn hơn 1,0 (1,14 đến 2,38). Trong số các đầu dò được nghiên cứu, Det 1 có kích thước nhỏ nhất, đạt giá trị FoM cao nhất tại hầu hết các mức năng lượng, trong khi Det 8, có kích thước lớn nhất lại có giá trị FoM thấp nhất.



Hình 7: Phân bố giá trị FoM theo ngưỡng năng lượng của các đầu dò EJ-301

KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã khảo sát hiệu suất ghi neutron và khả năng phân biệt neutron/gamma của 08 mô hình đầu dò EJ-301 với kích thước khác nhau ghép với PMT Hamamatsu R9420. Với cấu hình bố trí đầu dò vuông góc với chùm bức xạ, hiệu suất ghi neutron tăng theo

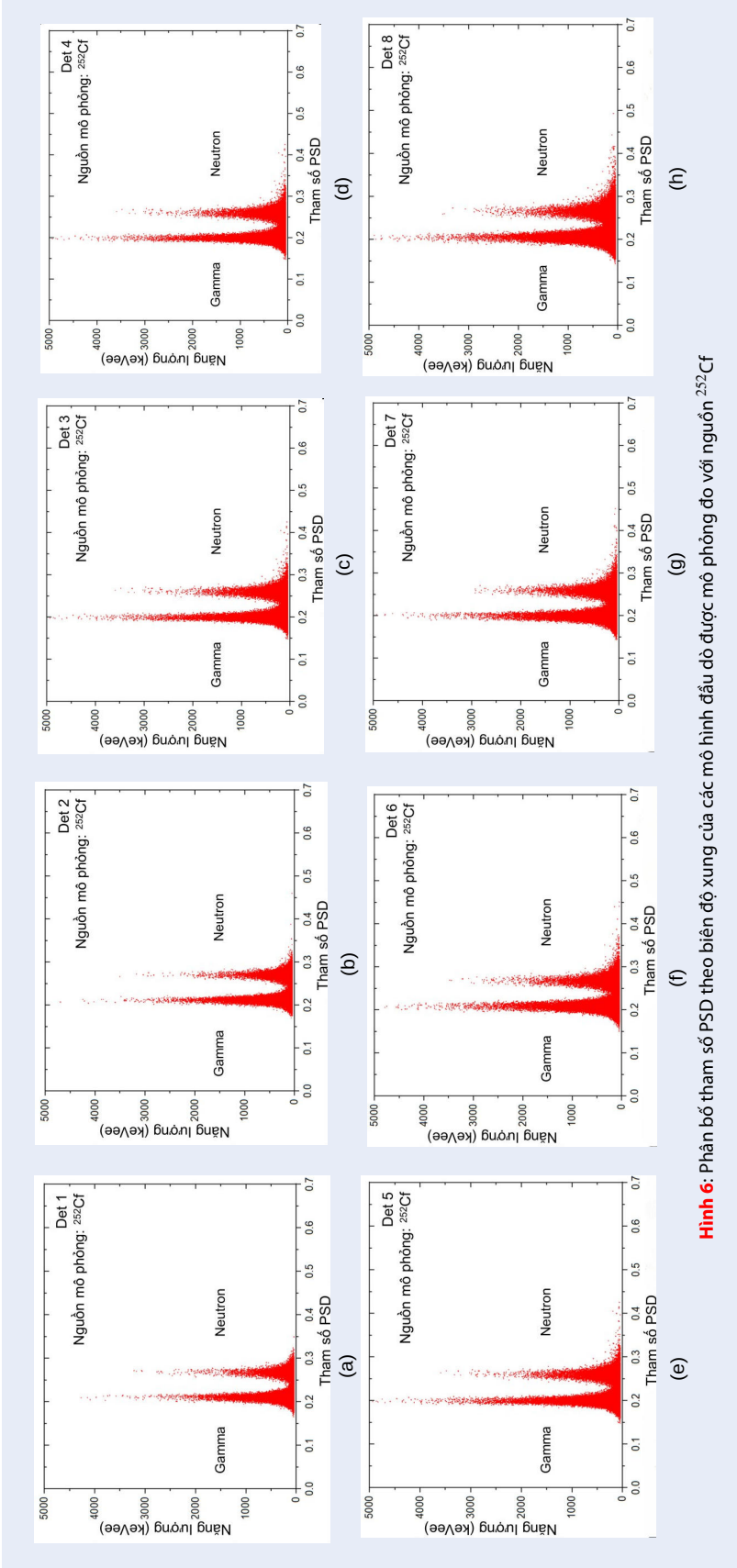
bán kính đầu dò, ít phụ thuộc vào chiều dài đối với đầu dò nhỏ, nhưng giảm đáng kể với đầu dò có thể tích lớn. Trong các cấu hình thực nghiệm bố trí đầu dò vuông góc với chùm bức xạ, chiều dài chất nhấp nháy làm giảm hiệu suất của đầu dò do khả năng phân biệt neutron/gamma giảm khi kích thước chiều dài khối nhấp nháy tăng. Một kích thước đầu dò phù hợp là sự hài hòa giữa khả năng phân biệt và hiệu suất ghi. Trong nghiên cứu này kích thước đầu dò $\Phi 50 \times 50$ mm là sự lựa chọn tốt nhất. Nghiên cứu cũng đã xây dựng được mô hình mô phỏng đầu dò nhấp nháy hoàn chỉnh trên Geant4, mô hình không chỉ được ứng dụng trong lựa chọn thiết kế tối ưu đầu dò nhấp nháy EJ-301 ghép PMT R9420 đo neutron mà còn có thể mở rộng ứng dụng trong thiết kế các đầu dò đo bức xạ khác sử dụng các chất nhấp nháy.

ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Nguyễn Xuân Hải xử lý số liệu và viết bản thảo. Phan Bảo Quốc Hiếu, Phan Văn Chuân và Nguyễn Ngọc Anh hỗ trợ xử lý số liệu và chỉnh sửa bản thảo. Vũ Thị Thanh Quý, Nguyễn Năng Hải, Lê Văn Tùng, Đinh Tiến Hùng thực hiện thí nghiệm, tính toán mô phỏng và chỉnh sửa bản thảo. Nguyễn Quang Hưng, Phạm Đình Khang định hướng nghiên cứu, chỉnh sửa bản thảo.

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 NCUD.02-2022.38.



Hình 6: Phân bố tham số PSD theo biên độ xung của các mô hình đầu dò phỏng mô phỏng với nguồn ^{252}Cf

Bảng 3: Kết quả tính FoM của các mô hình đầu dò với các ngưỡng năng lượng khác nhau

Năng lượng (keVee)	FoM	Det 1	Det 2	Det 3	Det 4	Det 5	Det 6	Det 7	Det 8
50		0,79 ± 0,01	0,85 ± 0,01	0,73 ± 0,01	0,65 ± 0,01	0,57 ± 0,01	0,53 ± 0,01	0,61 ± 0,01	0,26 ± 0,01
200		1,08 ± 0,02	1,05 ± 0,01	0,95 ± 0,01	0,85 ± 0,01	0,84 ± 0,01	0,73 ± 0,01	0,75 ± 0,01	0,60 ± 0,01
750		1,59 ± 0,01	1,41 ± 0,01	1,29 ± 0,01	1,12 ± 0,01	1,21 ± 0,01	0,92 ± 0,01	1,06 ± 0,01	0,79 ± 0,01
1000		1,89 ± 0,01	1,74 ± 0,01	1,49 ± 0,01	1,36 ± 0,01	1,49 ± 0,01	1,08 ± 0,01	1,27 ± 0,01	0,92 ± 0,01
1500		2,16 ± 0,01	1,95 ± 0,01	1,59 ± 0,01	1,45 ± 0,01	1,66 ± 0,01	1,15 ± 0,01	1,37 ± 0,01	1,00 ± 0,01
2000		2,33 ± 0,01	2,03 ± 0,01	1,70 ± 0,01	1,54 ± 0,01	1,80 ± 0,01	1,27 ± 0,01	1,53 ± 0,01	1,07 ± 0,01
3000		2,38 ± 0,01	2,10 ± 0,02	1,80 ± 0,02	1,57 ± 0,01	1,95 ± 0,01	1,33 ± 0,02	1,54 ± 0,02	1,14 ± 0,01

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. EJ-301, EJ-309 - Neutron/Gamma PSD Liquid Scintillators - Eljen Technology [Internet]. [cited 2024 Jul 14]; Available from: <https://eljentechnology.com/products/liquid-scintillators/ej-301-ej-309>.
2. Chuan PV, Hoa ND, Hai NX, Anh NN, Dien NN, Khang PD. A scintillation detector configuration for pulse shape analysis. *Nuclear Engineering and Technology* 2018;50:1426–32.
3. Phan VC, Nguyen XH. Evaluating four neutron-gamma discrimination methods with EJ-301 scintillator. *Analog Integr Circ Sig Process* 2019;98:75–84.
4. Stevanato L, Cester D, Nebbia G, Viesti G. Neutron detection in a high gamma-ray background with EJ-301 and EJ-309 liquid scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 2012;690:96–101.
5. Agostinelli S, Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H, Arce P, et al. Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 2003;506:250–303.
6. Patronis N, Kokkoris M, Giantsoudi D, Perdikakis G, Papadopoulos CT, Vlastou R. Aspects of GEANT4 Monte-Carlo calculations of the BC501A neutron detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 2007;578:351–5.
7. Hartwig ZS, Gumplinger P. Simulating response functions and pulse shape discrimination for organic scintillation detectors with Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 2014;737:155–62.
8. Choong WS. The timing resolution of scintillation-detector systems: Monte Carlo analysis. *Phys. Med. Biol.* 2009;54:6495.
9. R9420_TPMH1296E.pdf [Internet]. [cited 2024 Sep 4]; Available from: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/R9420_TPMH1296E.pdf.
10. Chuan PV, Tung LV, Hai NN, Duy TH, Phuc NT, Phong MX, et al. A Study on the Impact of Pulse Shaping Parameters on Zero-Crossing Method Performance for Neutron/Gamma Discrimination. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 2023;70:2464–70.
11. ths3202.pdf [Internet]. [cited 2024 Jul 18]; Available from: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ths3202.pdf>.
12. Jastaniah SD, Sellin PJ. Digital techniques for n/γ pulse shape discrimination and capture-gated neutron spectroscopy using liquid scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 2004;517:202–10.
13. Polack JK, Flaska M, Enqvist A, Sosa CS, Lawrence CC, Pozzi SA. An algorithm for charge-integration, pulse-shape discrimination and estimation of neutron/photon misclassification in organic scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 2015;795:253–67.
14. Černý J, Doležal Z, Ivanov MP, Kuzmin ES, Švejda J, Wilhelm I. Study of neutron response and n–γ discrimination by charge comparison method for small liquid scintillation detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 2004;527:512–8.
15. Arahmane H, Hamzaoui EM, Ben Maissa Y, Cherkaoui El Moursli R. Neutron-gamma discrimination method based on blind source separation and machine learning. *NUCL SCI TECH* 2021;32:18.

The dependence of neutron/gamma discrimination efficiency on demenstion of EJ-301 scintilator

Nguyen Xuan Hai¹, Phan Bao Quoc Hieu^{1,*}, Vu Thi Thanh Quy², Phan Van Chuan³, Nguyen Nang Hai³,
Le Van Tung³, Nguyen Quang Hung^{4,5}, Nguyen Ngoc Anh⁶, Đinh Tien Hung⁷, Pham Đình Khang¹



Use your smartphone to scan this
QR code and download this article

¹Dalat Nuclear Research Institute, 01
Nguyen Tu Luc, Dalat, Lamdong,
Vietnam

²Dalat College, 109 Yersin, Dalat,
Lamdong, Vietnam

³Dalat University, Dalat, Lamdong,
Vietnam

⁴Institute of Fundamental and Applied
Sciences, Duy Tan University, Ho Chi
Minh city, 700000, Vietnam

⁵Faculty of Natural Sciences, Duy Tan
University, Danang City, 550000,
Vietnam.

⁶Phenikaa Institute for Advanced Study
(PIAS), Phenikaa University, Hanoi
12116, Viet Nam

⁷Military Institute of Chemical and
Environmental Engineering (MICEE),
Hanoi, Vietnam

Correspondence

Phan Bao Quoc Hieu, Dalat Nuclear
Research Institute, 01 Nguyen Tu Luc,
Dalat, Lamdong, Vietnam

Email: hieupbq@dnri.vn

History

- Received: 19-7-2024
- Revised: 4-11-2024
- Accepted: 10-3-2025
- Published Online: 31-3-2025

DOI :

<https://doi.org/10.32508/stdjns.v8i4.1400>



Copyright

© VNUHCM Press. This is an open-
access article distributed under the
terms of the Creative Commons
Attribution 4.0 International license.



ABSTRACT

This paper presents the results of research on the application of the Monte Carlo simulation method to investigate the dependence of neutron detection efficiency and neutron/gamma pulse discrimination capabilities on the size of a detector using the EJ-301 scintillator, supporting the design and development of neutron detectors. We constructed and evaluated eight cylindrical detector models with varying lengths and diameters using the Geant4 toolkit. The simulated detector models consist of a scintillator coupled with a light guide and a photomultiplier tube (PMT). The simulated pulse signals obtained from each model were analyzed to assess neutron/gamma discrimination using the digital charge integration (DCI) method, and neutron detection efficiency was determined at various energy thresholds. The neutron/gamma discrimination results were evaluated based on the Figure of Merit (FoM). The results showed that both neutron/gamma discrimination and neutron detection efficiency are significantly dependent on the detector size, particularly the variations in length and diameter. These findings are crucial for optimizing the design of neutron detectors using organic scintillators like EJ-301 or similar materials, aiming to enhance neutron/gamma discrimination and neutron detection efficiency.

Key words: EJ-301 scintillator, neutron/gamma discrimination, Geant4 simulation, charge integration

Cite this article : Hai N X, Hieu P B Q, Quy V T T, Chuan P V, Hai N N, Tung L V, Hung N Q, Anh N N, Hung D T, Khang P D. **The dependence of neutron/gamma discrimination efficiency on demenstion of EJ-301 scintilator.** *Sci. Tech. Dev. J. - Nat. Sci.* 2025; 9(1):3257-3266.