

Nghiên cứu tính toán thời gian chiếu xạ tối ưu cho sản xuất Iodine-125 tại Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt

Đoàn Thị Thu Hiền¹, Nguyễn Thế Nghĩa², Vũ Thanh Quang^{3*}

¹Viện Năng lượng Nguyên tử Việt Nam

²Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội

³Bệnh viện Trung ương Quân đội 108

Ngày nhận bài 6/5/2019; ngày chuyển phân biện 9/5/2019; ngày nhận phân biện 12/6/2019; ngày chấp nhận đăng 28/6/2019

Tóm tắt:

Iodine-125 là dược chất quan trọng được sử dụng trong bộ kit chẩn đoán miễn dịch phóng xạ, chụp xạ hình tuyến giáp, điều trị ung thư tuyến tiền liệt và cấy hạt phóng xạ điều trị một số u ác tính và u não. Iodine-125 được sản xuất từ việc chiếu xạ bia khí Xenon bởi dòng neutron nhiệt từ lò phản ứng hạt nhân. Hiện nay, Iodine-125 chưa được sản xuất tại Việt Nam, việc tính toán thời gian chiếu xạ tối ưu là bước quan trọng đầu tiên để triển khai sản xuất thành công loại dược chất phóng xạ này. Trong nghiên cứu này, các tác giả đã tiến hành lập trình tính toán xác định thời gian chiếu xạ tối ưu trong sản xuất Iodine-125 từ bia Xenon tự nhiên và bia Xenon giàu được chiếu xạ bởi dòng neutron nhiệt của Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt.

Từ khóa: bia khí Xenon, neutron nhiệt, sản xuất Iodine-125, thời gian chiếu xạ.

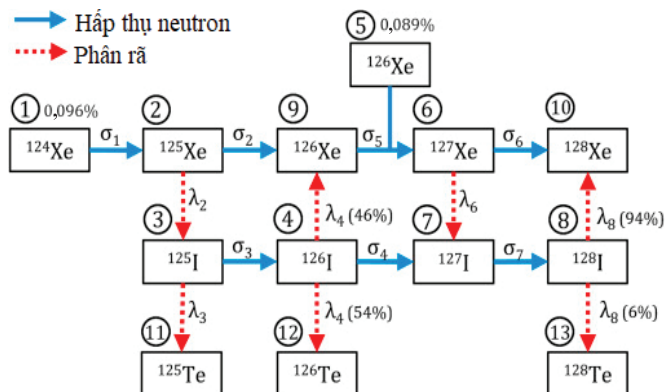
Chỉ số phân loại: 3.2

Đặt vấn đề

Iodine-125 là đồng vị phóng xạ gamma năng lượng thấp với thời gian bán rã 59,4 ngày, rất thuận lợi cho cả chẩn đoán cũng như điều trị. Iodine-125 được sử dụng trong bộ kit chẩn đoán miễn dịch phóng xạ, chụp xạ hình tuyến giáp, trong điều trị ung thư tuyến tiền liệt bằng kỹ thuật cấy hạt phóng xạ và trong xạ trị cấy ghép đối với một số u ác tính và u não [1, 2]. Chiếu xạ bia khí Xenon bởi dòng neutron nhiệt tạo thành Xenon-125 từ phản ứng hạt nhân $^{124}\text{Xe}(n,\gamma)^{125}\text{Xe}$, $T_{1/2}=16,9$ giờ, Xenon-125 phân rã EC (bắt electron) tạo thành Iodine-125 [3]. Có 2 lựa chọn vật liệu bia là Xenon tự nhiên có hàm lượng 0,096% Xenon-124 hoặc Xenon giàu có hàm lượng >99% Xenon-124 [3]. Lựa chọn thứ nhất cần chế tạo được bia chứa khối lượng lớn khí Xenon tự nhiên. Lựa chọn thứ hai cần có thiết bị chiếu xạ tuần hoàn và hệ thống thu hồi khí Xenon giàu vì giá thành khí này khá đắt. Đối với cách thức chiếu xạ: có 2 lựa chọn là chiếu xạ theo mẻ (Batch process) và chiếu xạ vòng tuần hoàn (Loop process).

Trên thế giới đã có các nghiên cứu của Martinho và cộng sự (1984), Joshi và cộng sự (2012), Hai Quan Ho và cộng

sự (2018) về lập kế hoạch chiếu xạ và tính toán tối ưu cho sản xuất Iodine-125 trong lò phản ứng hạt nhân [4-6]. Các nghiên cứu này sử dụng cùng một sơ đồ tạo thành, phân rã (hình 1) và các hằng số hạt nhân (bảng 1) làm cơ sở để lập trình tính toán sự tích lũy ròng của các nhân phóng xạ Iodine và Xenon trong thời gian chiếu xạ và phân rã. Mã nguồn của chương trình được bảo hộ bản quyền, không công bố mở và vì vậy không thể tự do tiếp cận, sử dụng.



Hình 1. Sơ đồ tạo thành và phân rã của các hạt nhân khi chiếu xạ Xenon tự nhiên [5].

*Tác giả liên hệ: Email: vtquang.vie@gmail.com

Study on calculation of optimal irradiation time for Iodine-125 production at Dalat Nuclear Reactor

Thi Thu Hien Doan¹, The Nghia Nguyen², Thanh Quang Vu^{3*}

¹Vietnam Atomic Energy Institute

²University of Science, VNU

³108 Military Central Hospital

Received 6 May 2019; accepted 28 June 2019

Abstract:

Iodine-125 is an important radiopharmaceutical used in radiation immunity diagnostic kits, thyroid radiography, prostate cancer treatment, and brachytherapy to treat some malignant, brain tumors. Iodine-125 is produced from Xenon gas irradiated by thermal neutron in a nuclear reactor. At present, Iodine-125 has not yet been produced in Vietnam. Optimising the irradiation time is the first important step to carry out a successful production. In this work, we have programmed and calculated the optimal irradiation time for production of Iodine-125 from the natural Xenon and the enriched Xenon target irradiated by the thermal neutron of Dalat Nuclear Reactor.

Keywords: Iodine-125 production, irradiation time, thermal neutron, xenon target.

Classification number: 3.2

Bảng 1. Ký hiệu các đồng vị, độ giàu, thời gian bán rã, hằng số phân rã λ , tiết diện phản ứng và tích phân cộng hưởng [5].

Hạt nhân	Số ký hiệu	Độ giàu đồng vị, %	Thời gian bán rã	Hằng số phân rã, λ (s ⁻¹)	Tiết diện phản ứng, σ_0 (bar)	Tích phân cộng hưởng, I (bar)
¹²⁴ Xe	1	Thay đổi	∞	0	128	3600
¹²⁵ Xe	2	-	17 giờ	$1,13 \times 10^{-5}$	5600	0
¹²⁵ I	3	-	60,2 ngày	$1,333 \times 10^{-7}$	894	13730
¹²⁶ I	4	-	13,0 ngày	$6,17 \times 10^{-7}$	5960	40600
¹²⁶ Xe	5,9	0,09	∞	0	4	38
¹²⁷ Xe	6	-	36,41 ngày	$2,203 \times 10^{-7}$	0	0
¹²⁷ I	7	-	∞	0	6,2	147
¹²⁸ I	8	-	24,99 phút	$4,623 \times 10^{-4}$	0	0

Ở Việt Nam, Iodine-125 hiện chưa được sản xuất và phải nhập khẩu từ nước ngoài cho tất cả các nghiên cứu và ứng dụng. Tính toán thời gian chiếu xạ tối ưu là bước đầu tiên quan trọng để triển khai sản xuất thành công, tránh được những rủi ro bức xạ và tốn kém. Nghiên cứu này đưa ra hệ phương trình mô tả sự tích lũy rỗng của các hạt nhân và lập trình tính toán tối ưu cho sản xuất Iodine-125 từ bia khí Xenon chiếu xạ tại kênh chiếu ướt của Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt, có thông lượng neutron trung bình là 9×10^{12} n/cm²/s và thông lượng tại bấy là 2×10^{13} n/cm²/s [7]. Các kết quả tính toán thu được là cơ sở dữ liệu hữu ích cho việc triển khai sản xuất Iodine-125 tại Việt Nam.

Phương pháp tính toán

Từ sơ đồ hình 1, sự tích lũy và phân rã của các hạt nhân trong thời gian chiếu xạ neutron với thông lượng Φ (n/cm²/s) được mô tả bằng hệ phương trình vi phân sau:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dT} &= -\Phi \sigma_1 N_1 \\ \frac{dN_2}{dT} &= \Phi \sigma_1 N_1 - (\lambda_2 + \Phi \sigma_2) N_2 \\ \frac{dN_3}{dT} &= \lambda_2 N_2 - (\lambda_3 + \Phi \sigma_3) N_3 \\ \frac{dN_4}{dT} &= \Phi \sigma_3 N_3 - (\lambda_4 + \Phi \sigma_4) N_4 \\ \frac{dN_5}{dT} &= -\Phi \sigma_5 N_5 \\ \frac{dN_9}{dT} &= \Phi (\sigma_2 N_2 - \sigma_5 N_9) + 0,46 \lambda_4 N_4 \\ \frac{dN_6}{dT} &= \Phi \sigma_5 (N_5 + N_9) - (\lambda_6 + \Phi \sigma_6) N_6 \\ \frac{dN_7}{dT} &= \lambda_6 N_6 + \Phi (\sigma_4 N_4 - \sigma_7 N_7) \\ \frac{dN_8}{dT} &= \Phi \sigma_7 N_7 - \lambda_8 N_8 \end{aligned}$$

trong đó: N_i là số hạt nhân thứ i ($i=1-9$); σ_i là tiết diện phản ứng đối với hạt nhân i ; λ_i là hằng số phân rã của hạt nhân i .

Sự tích lũy của các đồng vị trong thời gian phân rã

$$N_i = N_i(EOI) \times \text{EXP}(-\lambda_i T)$$

trong đó: $N_i(EOI)$ là giá trị của N_i tại thời điểm dừng chiếu xạ (End of Irradiation).

Đặc biệt với $i=3$:

$$N_3 = [N_2(EOI) \times (1 - \text{EXP}(-\lambda_2 T))] + N_3(EOI) \times \text{EXP}(-\lambda_3 T)$$

và khi $i=7$:

$$N_7 = N_7(EOI) + N_6(EOI) \times [1 - \text{EXP}(-\lambda_6 T)]$$

Sơ đồ giải các phương trình vi phân

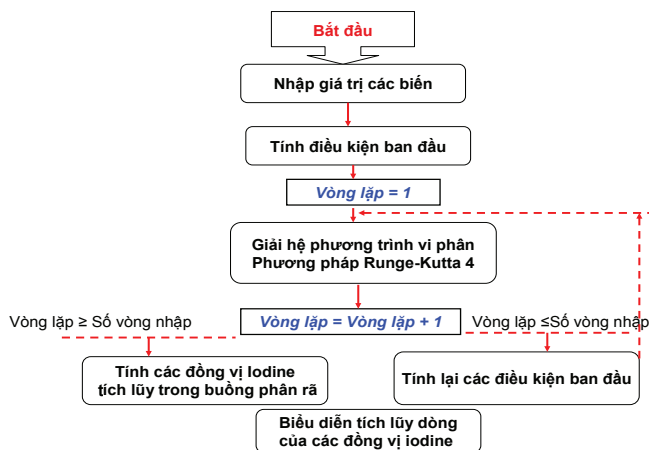
Hệ phương trình vi phân được giải dựa trên phương pháp tích phân số Runge-Kutta bậc 4, chương trình tính toán sử dụng ngôn ngữ lập trình Visual Basic.

Điều kiện đầu: tại thời điểm $t=0$; $N_i(t=0) = W \times \text{abund} \times 6,023 \times 10^{23} / (124)$

$$N_5(t=0) = N_9(0) = W \times 0,09 \times 10^{-2} \times 6,023 \times 10^{23} / (126)$$

$$N_i(t=0) = 0 \quad (i = 2, 3, 4, 6, 7, 8)$$

trong đó: W là khối lượng khí Xenon được chiếu xạ, g ; abund là độ giàu của đồng vị trong khí Xenon, %.



Hình 2. Lưu đồ chương trình tính toán thời gian chiếu xạ tối ưu trong sản xuất đồng vị I-125.

Kết quả và thảo luận

Kiểm chứng kết quả tính toán

Kết quả tính toán đối với 15 g Xenon tự nhiên và 0,4 g Xenon-124 > 99% chiếu xạ bởi dòng neutron nhiệt có thông lượng 5×10^{13} n/cm²/s được lập trình, giải theo lưu đồ thuật toán hình 2 và trình bày trong bảng 2 và bảng 3. Các kết quả nghiên cứu được so sánh với các số liệu công bố của IAEA [3].

Bảng 2. So sánh kết quả tính toán với số liệu của IAEA [3] đối với bia Xenon tự nhiên.

	Kết quả tính toán	IAEA	Kết quả tính toán	IAEA
Thời gian chiếu, giờ	200	200	300	300
Thời gian phân rã, ngày	40	40	45	45
Sản lượng Iodine-125, GBq	29,074	29,15	39,81	40,32
Hàm lượng Iodine -126 sau phân rã, %	0,996	0,77	1,20	0,89
Hoạt độ riêng, GBq/mg	608,70	>600	601,45	>600

Bảng 3. So sánh kết quả tính toán với số liệu của IAEA [3] đối với bia Xenon giàu.

	Kết quả tính toán	IAEA	Kết quả tính toán	IAEA
Thời gian chiếu, giờ	10	10	24	24
Thời gian phân rã, ngày	20	20	20	20
Sản lượng Iodine-125, GBq	53,98	50,71	128,74	121,2
Hàm lượng Iodine-126 sau phân rã, %	0,021	0,02	0,106	0,11
Hoạt độ riêng, GBq/mg	642,25	>600	642,12	>600

Các số liệu trình bày ở bảng 2 và 3 chỉ ra sự tương đồng tốt giữa số liệu của nghiên cứu này và của IAEA. Điều đó chứng tỏ phương pháp tích phân số Runge-Kutta bậc 4 được sử dụng trong nghiên cứu này là đủ chính xác và đáng tin cậy. Sự sai khác không đáng kể giữa 2 bộ số liệu trên có thể là do sự khác nhau về phương pháp tính và về dữ liệu hạt nhân như tiết diện phản ứng (σ); hằng số phân rã (λ); chỉ số neutron trên nhiệt và tích phân cộng hưởng. Trong nghiên cứu này sử dụng số liệu của các hằng số được công bố trong các nghiên cứu trước [4-6].

Xác định thời gian chiếu xạ tối ưu trong sản xuất Iodine-125

Iodine-125 sinh ra từ phân rã của Xenon-125. Sau khi tạo thành Iodine-125 phân rã thành Tellurium-125 bền và bắt neutron với tiết diện phản ứng 894 bar [4] tạo thành Iodine-126. Iodine-126 tiếp tục sinh ra Iodine-127 bền và Iodine-128 phóng xạ. Sự có mặt của Iodine-126 và Iodine-128 được xem là làm nhiễm bản sản phẩm Iodine-125 vì chúng gây ra các bức xạ có hại khi sử dụng trong y tế [3]. Để giảm thiểu sự nhiễm bản của Iodine-126 và Iodine-128 thì thời gian chiếu xạ và thời gian phân rã cần được tính tối ưu. Vì thời gian bán rã của Iodine-128 chỉ là 25 phút, ngắn hơn rất nhiều so với 13 ngày của Iodine-126 [3], nên sự nhiễm bản của Iodine-128 là rất nhỏ. Thời gian chiếu xạ được xem là tối ưu khi đạt hoạt độ cao nhất của Iodine-125 và tỷ lệ tạp nhân $^{126}\text{I}/^{125}\text{I} < 1\%$. Sản xuất Iodine-125 được xem là tối ưu khi đạt công suất lớn nhất trong 1 năm và sản phẩm có chất lượng thỏa mãn điều kiện tỷ lệ $^{126}\text{I}/^{125}\text{I} < 1\%$ [6].

Trường hợp 1- bia Xenon tự nhiên chiếu xạ tại kênh chiếu ướt, $\Phi=9 \times 10^{12}$ n/cm²/s:

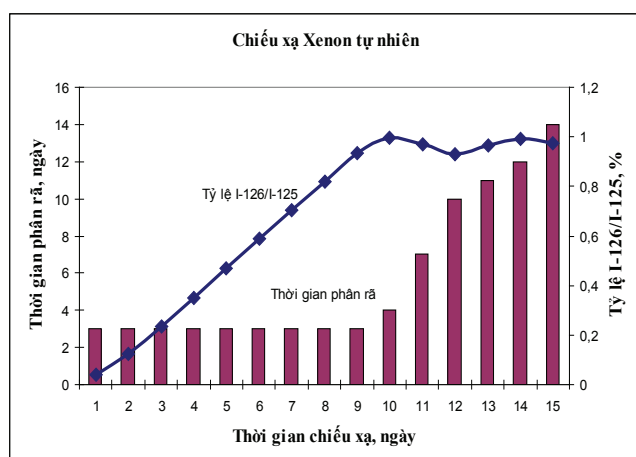
Nạp 50 g Xenon tự nhiên vào bia, chiếu bia trong kênh chiếu ướt của Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt có thông lượng neutron là 9×10^{12} n/cm²/s. Thời gian chiếu xạ là 15 ngày. Sau đó, bia được chuyển vào hotcell chờ phân rã. Cần xác định thời gian phân rã cực tiểu để hoạt độ Iodine-125 đạt cực đại và tỷ lệ $^{126}\text{I}/^{125}\text{I} < 1\%$.

Các kết quả tính toán theo lưu đồ thuật toán hình 2 cho trường hợp n=1 được trình bày ở bảng 4, chỉ ra rằng: với thời gian chiếu xạ như nhau, thời gian phân rã càng tăng thì hoạt độ Iodine-125 càng giảm, hàm lượng tạp chất càng giảm. Thời gian phân rã ít nhất là 14 ngày để hàm lượng tạp chất giảm <1%. Vì vậy, thời gian sản xuất tối ưu là 29 ngày/mẻ.

Giả sử Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt vận hành 120 ngày trong 1 năm cho sản xuất thì số mẻ tối đa là 4 và công suất tối đa là 160 GBq Iodine-125/năm. Tính toán tương tự cho thời gian chiếu xạ khác nhau. Kết quả của những tính toán này được trình bày trong hình 3 và hình 4.

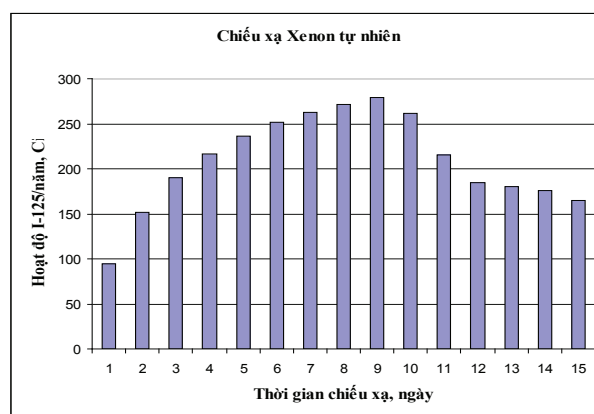
Bảng 4. Thời gian sản xuất tối ưu của một mẻ chiếu xạ 15 ngày.

TT	Thời gian chiếu xạ, ngày	Hoạt độ Iodine-125, GBq	Tỷ lệ $^{126}\text{I}/^{125}\text{I}$, %	Thời gian phân rã, ngày	Thời gian sản xuất, ngày
1	15	44,88	1,547	3	18
2	15	43,51	1,36	6	21
3	15	42,06	1,199	9	24
4	15	40,64	1,058	12	27
5	15	40,17	1,014	13	28
6	15	39,71	0,973	14	29
7	15	39,26	0,933	15	30
8	15	38,81	0,895	16	31



Hình 3. Sự phụ thuộc của tỷ lệ $^{126}\text{I}/^{125}\text{I} < 1\%$ vào thời gian chiếu xạ và thời gian phân rã (đồ thị dạng đường). Sự phụ thuộc của thời gian phân rã để $^{126}\text{I}/^{125}\text{I} < 1\%$ vào thời gian chiếu xạ (đồ thị dạng cột); 50 g Xenon tự nhiên, $\Phi=9 \times 10^{12}$ n/cm²/s.

Số liệu trên hình 3 chỉ ra rằng, với thời gian chiếu xạ từ 1 đến 9 ngày thì thời gian phân rã cực tiểu là 3 ngày để giữ tỷ lệ $^{126}\text{I}/^{125}\text{I} < 1\%$. Khi thời gian chiếu xạ tăng từ 10 đến 15 ngày thì thời gian phân rã tăng nhanh từ 4 đến 14 ngày, thời gian sản xuất 1 mẻ tương ứng tăng từ 14 đến 29 ngày. Vì vậy, số mẻ sản xuất trong 1 năm giảm từ 8 mẻ xuống còn 4 mẻ. Kết quả là sản lượng cả năm cũng giảm nhanh.



Hình 4. Sự phụ thuộc của sản lượng Iodine-125/năm vào thời gian chiếu xạ (50 g Xenon tự nhiên, 9×10^{12} n/cm²/s, thời gian sản xuất 120 ngày).

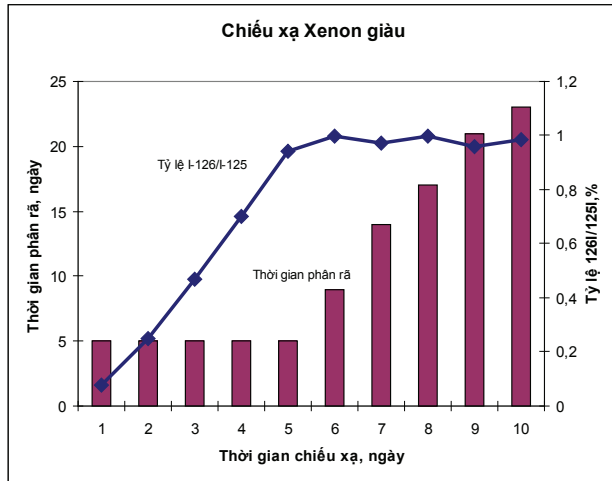
Hình 4 biểu diễn sản lượng Iodine-125 cực đại có thể sản xuất trong 1 năm. Như vậy, thời gian chiếu xạ tối ưu cho sản xuất Iodine-125 dùng bia khí Xenon tự nhiên chiếu xạ tại kênh ướt lò Đà Lạt là 9 ngày; thời gian phân rã sau chiếu xạ là 3 ngày. Nếu khối lượng Xenon tự nhiên/mẻ chiếu xạ là 50 g thì sản lượng cực đại là 278,5 GBq/năm.

Trường hợp 2 - bia Xenon giàu chiếu xạ tại hốc bể neutron, $\Phi=2 \times 10^{13}$ n/cm²/s:

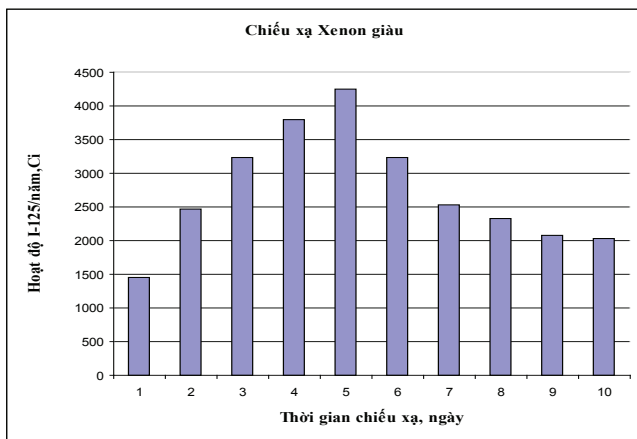
Bể neutron của Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt có thông lượng lớn nhất là khoảng 2×10^{13} n/cm²/s, có thể được sử dụng làm hốc chiếu mẫu. Chiếu xạ Xenon giàu thường được thực hiện ở hốc chiếu có thông lượng neutron lớn nhất để có được sản lượng Iodine-125 cao nhất và thời gian chiếu ngắn nhất nhằm giảm thiểu sự cháy của Xenon-125 và Iodine-125 tạo ra các tạp chất Iodine-126 và Iodine-128. Xác định thời gian chiếu xạ tối ưu đối với bia Xenon giàu được tiến hành tương tự như đối với bia Xenon tự nhiên.

Giả sử nạp 0,5 g Xenon độ giàu đồng vị >99% vào bia và chiếu xạ bia trong hốc chiếu mẫu có 2×10^{13} n/cm²/s. Thời gian chiếu xạ thay đổi từ 1 đến 10 ngày. Thời gian chờ phân rã tối thiểu là 5 ngày để đảm bảo >99% Xenon-125 phân rã thành Iodine-125. Thời gian sản xuất là 120 ngày/năm. Kết quả tính toán được thể hiện trên hình 5 và hình 6 cho thấy rằng: thời gian chiếu xạ tăng từ 1 đến 5 ngày, thời gian phân rã 5 ngày, cho sản lượng Iodine-125 tăng nhanh trong khi chất lượng luôn thỏa mãn yêu cầu $^{126}\text{I}/^{125}\text{I} < 1\%$. Khi thời gian chiếu xạ tăng từ 6 đến 10 ngày thì thời gian phân rã phải tăng nhanh

để đảm bảo chỉ tiêu chất lượng. Vì vậy, thời gian sản xuất 1 mẻ tăng nhanh, số mẻ sản xuất/năm giảm mạnh làm cho sản lượng Iodine-125 liên tục giảm. Cực đại về sản lượng/năm ứng với trường hợp chiếu xạ 5 ngày, chờ phân rã 5 ngày. Thời gian sản xuất tối ưu cho 1 mẻ là 10 ngày. Như vậy sẽ thực hiện được 12 mẻ, thu được 4250 GBq Iodine-125/năm.



Hình 5. Sự phụ thuộc của tỷ lệ $^{126}\text{I}/^{125}\text{I} < 1\%$ vào thời gian chiếu xạ và thời gian phân rã (đồ thị dạng đường). Sự phụ thuộc của thời gian phân rã để $^{126}\text{I}/^{125}\text{I} < 1\%$ vào thời gian chiếu xạ (đồ thị dạng cột).



Hình 6. Sự phụ thuộc của sản lượng Iodine-125/năm vào thời gian chiếu xạ (0,5 g Xenon giàu >99%, $\Phi = 2 \times 10^{13}$ n/cm²/s, thời gian sản xuất 120 ngày/năm).

Kết luận

Sự tương đồng của kết quả tính toán về sự tạo thành và phân rã của Iodine-125 với các số liệu đã công bố của IAEA [3] là minh chứng cho mức độ chính xác cao và đáng tin cậy của các số liệu trình bày trong nghiên cứu này. Kết quả tính toán thời gian chiếu xạ tối ưu cho sản xuất Iodine-125 theo từng mẻ tại kênh chiếu ướt và hốc chiếu tại bể neutron của

Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt như sau:

- Sử dụng bia Xenon tự nhiên chiếu xạ tại kênh chiếu ướt: thời gian chiếu xạ tối ưu là 9 ngày, thời gian chờ phân rã là 3 ngày. Tổng thời gian sản xuất tối ưu cho 1 mẻ là 12 ngày. Sản lượng cực đại tính cho 120 ngày/năm đối với bia chứa 50 g Xenon tự nhiên là 278,5 GBq Iodine-125.

- Sử dụng bia Xenon giàu >99% Xenon-124 chiếu xạ tại hốc bể neutron: thời gian chiếu xạ tối ưu là 5 ngày, thời gian chờ phân rã là 5 ngày. Tổng thời gian sản xuất tối ưu cho 1 mẻ là 10 ngày. Sản lượng cực đại tính cho 120 ngày/năm đối với bia chứa 0,5 g Xenon giàu >99% Xenon-124 là 4250 GBq Iodine-125.

Trong thực tế, sản lượng Iodine-125 của 1 mẻ cũng như của cả năm sẽ ít hơn số liệu tính toán lý thuyết nêu trên vì các nguyên nhân như sự tự che chắn của hệ thống giá bia làm thay đổi thông lượng neutron ở các hốc chiếu, sự ảnh hưởng của chỉ số neutron trên nhiệt và tích phân cộng hưởng làm thay đổi tiết diện phản ứng và hiệu suất thu hồi của các bước xử lý hóa học mẫu đã chiếu xạ. Tuy nhiên, những số liệu tính toán nêu trên là đủ tin cậy và rất cần thiết cho việc dự báo, định hướng triển khai trong thực tế để đạt được hiệu quả sản xuất tốt nhất.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm nghiên cứu xin bày tỏ sự cảm ơn chân thành tới Ban Chủ nhiệm Chương trình KC05/16-20 và sự cảm ơn đặc biệt tới Chủ nhiệm Đề tài KC05.11/16-20 đã trợ giúp rất hiệu quả để chúng tôi hoàn thành nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] John Metyko, William Erwin, Sheldon Landsberger (2016), "Verification of I-125 brachytherapy source strength for use in radioactive seed localization procedures", *Appl. Radiat. Isot.*, **112**, pp.62-68.
- [2] Wang Zhongmin, Chen Kemin (2011), "Clinical application of Image guided Iodine-125 seed implantation therapy in patients with advanced pancreatic cancer", *Reference*, **2**, pp.109-128.
- [3] IAEA TECDOC-1230 (2003), *Manual for Reactor Produced Radioisotopes*.
- [4] Eduardo Martinho, M. Anjos Neves and M. Carno Freitas (1984), "¹²⁵I Production: Neutron Irradiation Planning", *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, **35(10)**, pp.933-938.
- [5] P.V. Joshi, et al. (2012), "Production of ¹²⁵I from neutron irradiation of natural Xe gas and a wet distillation process for radiopharmaceutical applications", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **51**, pp.8575-8582.
- [6] Hai Quan Ho, Yuki Honda, Shimpei Hamamoto, Toshiaki Ishii, Nozomu Fujimoto, Etsuo Ishitsuka (2018), "Feasibility study of large-scale production of iodine-125 at the high temperature engineering test reactor", *Applied Radiation and Isotopes*, **140**, pp.209-214.
- [7] Nguyễn Duy Sang (2012), "Tính toán thông lượng neutron trong Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt với cấu hình nhiên liệu mới sử dụng chương trình mô phỏng Monte Carlo Code MCNP4C2", *Tạp chí Khoa học, Trường Đại học Cần Thơ*, **24b**, tr.123-130.