

XÂY DỰNG CẤU HÌNH CHỤP ẢNH CẮT LỚP PHÁT XẠ ĐƠN PHOTON (SPECT) PHỤC VỤ CÁC THÍ NGHIỆM ĐÁNH DẤU NGHIÊN CỨU MÔ HÌNH DÒNG CHẢY

**Nguyễn Văn Chuẩn⁽¹⁾, Nguyễn Thanh Châu⁽¹⁾, Nguyễn Ngọc Nhật Anh⁽¹⁾,
Bùi Trọng Duy⁽¹⁾, Trần Minh Tiến⁽¹⁾, Lê Văn Lộc⁽¹⁾.**

(1) Trung tâm Ứng dụng kỹ thuật hạt nhân trong công nghiệp

Ngày nhận bài: 15/5/2021; Ngày gửi phản biện: 20/5/2021; Chấp nhận đăng: 30/7/2021

Liên hệ Email: chuannv@canti.vn

<https://doi.org/10.37550/tdmu.VJS/2021.05.237>

Tóm tắt

Kỹ thuật đánh dấu phóng xạ thu thập số liệu về phân bố thời gian lưu, kỹ thuật tính toán động học dòng chảy và các kỹ thuật đánh dấu khác nghiên cứu mô hình dòng chảy khác đòi hỏi quá trình tính toán dài với một khối lượng tính toán lớn nhất là với các hệ thống phản ứng hóa học phức tạp, nhiều kết quả tính toán dư thừa, gây khó khăn trong quá trình giải đoán kết quả. Chụp cắt lớp gamma đơn năng phát xạ (Single Photon Emission Computed Tomography – SPECT) là kỹ thuật kết hợp giữa kỹ thuật tái dựng hình ảnh cắt lớp và kỹ thuật đánh dấu phóng xạ. SPECT sử dụng nhiều đầu dò phóng xạ tại một mặt cắt của hệ thống, hình ảnh cắt lớp của phân bố chất đánh dấu tại mặt cắt đó có thể được tái tạo từ bộ số liệu đo đạc với một thuật toán dựng ảnh phù hợp là một phương pháp hữu ích cho phép kiểm chứng kết quả các thí nghiệm trong đánh dấu và nghiên cứu mô hình dòng chảy một cách trực quan. Cấu hình SPECT trong báo cáo này được nghiên cứu và lựa chọn là cấu hình lục giác đều, độ phân giải đạt đến 30mm, thời gian cho một lát cắt 20 giây. Cấu hình SPECT được ứng dụng khảo sát sự phân bố chất đánh dấu trong môi trường chất lỏng.

Từ khóa: công nghiệp, SPECT, CT, đánh dấu, Single Photon Emission Computed Tomography

Abstract

CONSTRUCTION OF SINGLE PHOTON EMISSION COMPUTED TOMOGRAPHY (SPECT) CONFIGURATION FOR SERVING TESTING FLOW MODELS

Both Radiotracer technique to collect residence time distribution and Computational Fluid Dynamics to simulate fluid flow for reaction systems requires complex calculation, sometimes it is difficult to interpret results. Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT), which is a nuclear imaging scan that integrates computed tomography (CT) and a radioactive tracer, is a useful method for visually verifying the results of experiments in studying radiotracer behaviors in the reaction systems. Using multiple radioactive probes

at a cross - section of the system at which the cross-sectional image of the tracer distribution can be reproduced from the measurement data with an appropriate image-rendering algorithm. The SPECT configuration in this report was studied and selected as the hexagonal configuration, the resolution reached 30mm, the time for a slice of 20 seconds. The SPECT configuration is used by the application to investigate the distribution of the tracer in the liquid medium.

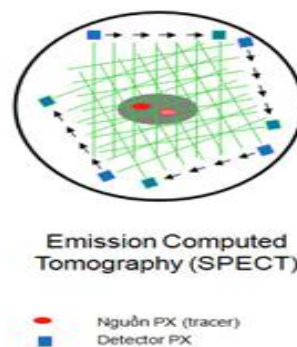
1. Giới thiệu

Chụp cắt lớp gamma đơn năng phát xạ (Single Photon Emission Computed Tomography – SPECT) là kỹ thuật kết hợp giữa kỹ thuật tái dựng hình ảnh cắt lớp giống như chụp cắt lớp điện toán (Computed Tomography – CT) và kỹ thuật đánh dấu phóng xạ. SPECT không cung cấp hình ảnh giải phẫu mà cung cấp hình ảnh trực quan phản ánh chức năng của các bộ phận được kiểm tra. Với đặc trưng như vậy, SPECT không chỉ được ứng dụng trong chẩn đoán y học hạt nhân mà còn được ứng dụng để nghiên cứu trong nhiều lĩnh vực khác như công nghệ hóa học, thu hồi dầu khí, xử lý thải, ... Ví dụ như trong lĩnh vực công nghệ hóa học, các nhà nghiên cứu đã sử dụng SPECT cùng với các kỹ thuật khác như RTD (như (Residence Time Distribution), CFD (Computational Fluid Dynamics) để theo dõi sự vận động của một pha đơn lẻ trong các hệ thống đa pha trong các bình phản ứng giả sôi, sủi tăm, các hệ thống trộn, tách, mẫu lõi, ... trên các mô hình trong phòng thí nghiệm. Với SPECT, bằng cách sử dụng nhiều đầu dò phóng xạ tại một mặt cắt của hệ thống, hình ảnh cắt lớp của phân bố chất đánh dấu tại mặt cắt đó có thể được tái tạo từ bộ số liệu đo đạc với một thuật toán dựng ảnh phù hợp. Với độ phân giải thời gian thích hợp, các hình ảnh SPECT theo thời gian cho phép người sử dụng theo dõi được sự vận động của dòng chảy.

2. Nguyên lý chung

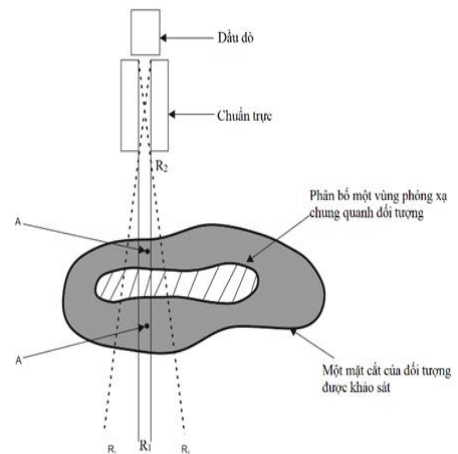
Phương pháp chụp ảnh cắt lớp cho phép xác định phân bố mật độ vật chất hoặc phân bố hoạt độ phóng xạ trong mặt cắt của vật thể dựa trên tính toán tập số liệu các phép đo phóng xạ.

Giả sử chia một lát cắt vật thể thành nhiều đơn vị vật chất với kích thước nhất định. Khi chùm tia photon quét qua lớp vật chất đó (ngang hoặc dọc) thì nó sẽ lần lượt xuyên qua các đơn vị vật chất. Tín hiệu truyền qua mỗi đơn vị vật chất sẽ khác nhau do có độ suy giảm tuyến tính khác nhau, tùy thuộc vào góc, độ lớn của góc nhìn trong mặt phẳng quét và khoảng cách của nó tới đầu dò. Các tín hiệu thu được với các góc khác nhau trong mặt phẳng tương ứng. Các tín hiệu này là cơ sở để tái tạo hình ảnh trên máy tính thông qua phần mềm được hỗ trợ các thuật toán về ma trận.



Hình 1. Nguyên lý chụp cắt lớp điện toán SPECT

Hình 2 mô tả một mặt cắt của đối tượng với một phân bố chất đánh dấu phóng xạ bên trong. Giả sử tại mỗi điểm đo, nguồn phát phóng xạ là một nguồn điểm lý tưởng thì số đếm đo được tại đầu dò tỷ lệ thuận với hoạt độ phóng xạ của điểm phát phóng xạ đó. Nếu khe hở chuẩn trực của đầu dò là lý tưởng (rất hẹp, sâu), thì đầu dò chỉ ghi nhận được bức xạ phát ra dọc theo khe R_1R_2 và số đếm ghi nhận tại mỗi điểm đo cũng được gọi là một tổng tia (ray sum). Bằng kết hợp nhiều tổng tia đo được trên cùng một góc xoay θ , ta thu được số liệu hình chiếu. Biến đổi Radon ngược bộ số liệu hình chiếu để tái tạo lại phân bố phóng xạ bên trong đối tượng khảo sát.

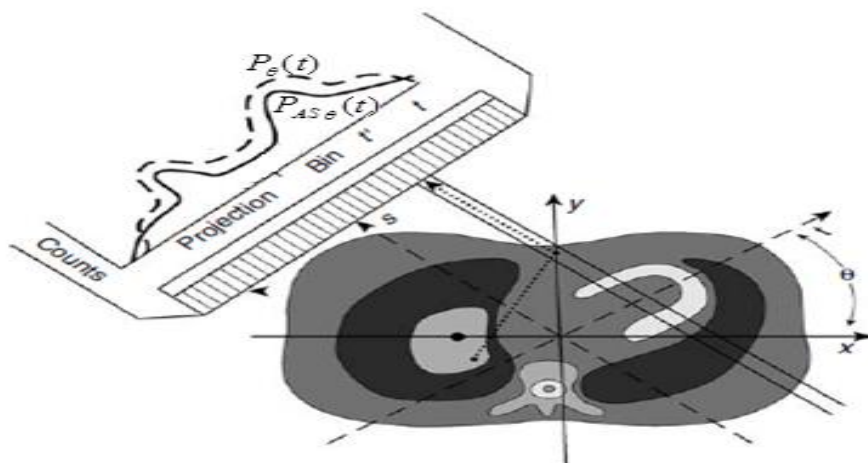


Hình 2. Trong SPECT, phân bố của chất phóng xạ được đo đạc bằng đầu dò chuẩn trực

Trong thực tế chùm bức xạ phát ra từ vị trí phát xạ bị hấp thụ và tán xạ trên đường đi của nó đến đầu dò nên hình chiếu $P_{AS\theta}(t)$ sẽ thấp hơn so với hình chiếu lý tưởng $P_{\theta}(t)$, sự suy giảm này phụ thuộc chủ yếu vào mật độ vật chất giữa nguồn phát và đầu dò bức xạ. Mức độ hấp thụ có thể định tính bằng một hệ số truyền qua $TF(t', s', \theta)$ là một phần của các bức xạ truyền qua một độ dày có hệ số hấp thụ không đồng nhất tại góc xoay θ . Hệ số này được tính toán như sau:

$$TF(t', s', \theta) = \exp \left(- \int_{s'}^{\infty} f(t', s') ds' \right) \quad (1)$$

Với $f(t', s')$ là phân bố của hệ số hấp thụ tuyến tính theo vị trí. Biểu thức (1) chỉ chính xác đối với một chùm bức xạ đơn năng và không bị ảnh hưởng của tán xạ.



Hình 3. Sự ảnh hưởng của hấp thụ đến hình ảnh SPECT

Một phương pháp hiệu chỉnh hấp thụ phổ biến hiện nay là phương pháp của Chang. Phương pháp này được thực hiện bằng cách xác định hệ số hiệu chỉnh $C(x', y')$

cho từng vị trí (x', y') trong hình ảnh SPECT bằng biểu thức sau:

$$C(x', y') = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M TF(t', s', \theta_i) \right]^{-1} \quad (2)$$

Với M là số góc chiếu θ_i .

Giả sử $C_{jk} \sim C(x, y)$ và $f_{jl} \sim f(x, y)$ lần lượt là giá trị hoạt độ của nguồn và giá trị suy giảm tại pixel thứ k thuộc tia thứ j , q_j là tổng số pixel trên tia thứ j . Công thức biến đổi Radon trong trường hợp SPECT được tính như sau:

$$P_{\theta(t)} = \Re\{C(j, k)\} = \int_{k=1}^{q_j} \left\{ C_{jk} \times \exp\left(-\int_{l=1}^k f_{jl} \cdot ds_{jl}\right) \right\} \times ds_{jk} \quad (3)$$

Phương pháp tái tạo và hiệu chỉnh hình ảnh SPECT bằng thuật toán đại số (ART) được thực hiện như sau:

* Bước 1: Ước đoán giá trị C_{jk_old} (ban đầu)

* Bước 2: Tính tổng cường độ phóng xạ đo được tại detector khi có các giá trị ước đoán C_{jk_old} và giá trị suy giảm f của các pixel thuộc tia thứ j :

$$P_{\theta(t)} = \sum_{k=1}^{q_j} \left\{ C_{jk_old} \times \exp\left(-\sum_{l=1}^k f_{jl} \times \Delta s_{jl}\right) \right\} \times \Delta s_{jk} \quad (4)$$

* Bước 3: Tính phân bố nguồn dựa trên công thức tái tạo đại số

$$C_{jk_new}^{z+1} = C_{jk_old}^z + \lambda \cdot \frac{P_{AS\theta(t)} - P_{\theta(t)}}{\sum_{k=1}^{q_j} W_{jk}^2} \cdot W_{jk} \quad (5)$$

* Bước 4: $C_{jk_old}^z = C_{jk_new}^{z+1}$

Với λ và W_{jk} lần lượt là hệ số hồi phục và trọng số đóng góp của pixel thứ k trên tia thứ j .

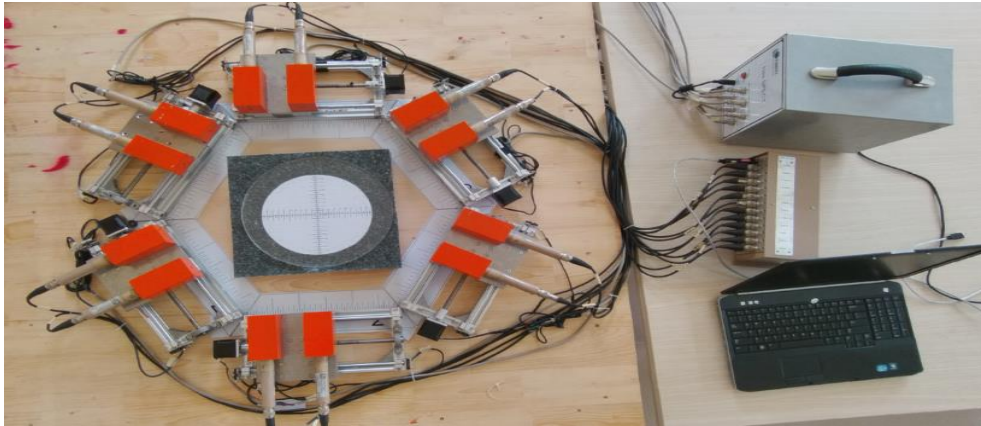
Các bước trên được thực hiện tuần tự từ trên tất cả các hình chiếu. Do đó, mỗi giá trị pixel được tính và hiệu chỉnh qua các giá trị suy giảm f đối với từng hình chiếu.

Như vậy phương pháp tái tạo ảnh SPECT là xác định hoạt độ phóng xạ phân bố trong vật thể thông qua các giá trị hình chiếu đo đạc xung quanh vật thể.

3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Thiết bị chụp ảnh cắt lớp SPECT hình lục giác

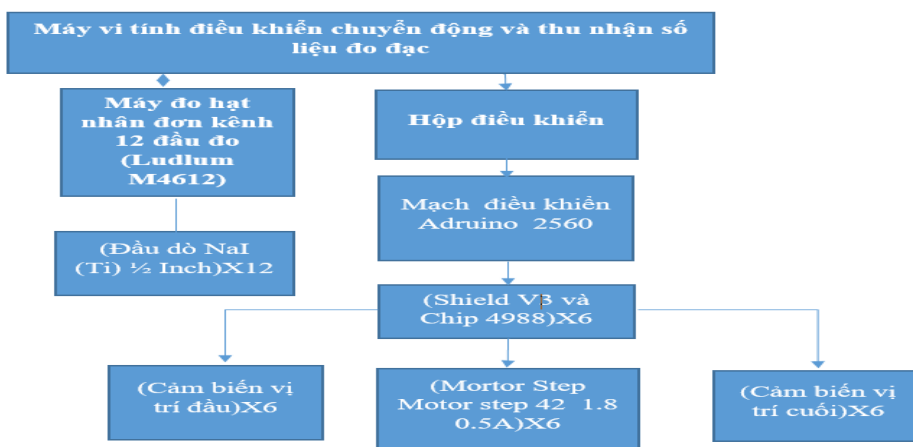
Cấu hình SPECT dưới đây là kết quả của quá trình mô phỏng lựa chọn cấu hình, tính toán hình học và cân nhắc thời gian một phép chụp SPECT cho đối tượng chất đánh dấu di chuyển trong môi trường chất lỏng. Các thành phần của một cấu hình SPECT có thể kể đến: Cấu hình cơ khí hình lục giác bố trí bao quanh vật thể, hệ điều khiển chuyển động và thu nhận số liệu hạt nhân, phần mềm điều khiển thiết lập cấu hình đo, phần mềm dựng ảnh.



Hình 4. Thiết bị chụp ảnh cắt lớp SPECT hình lục giác

Cấu hình cơ khí SPECT hình lục giác: Cấu hình cơ khí SPECT hình lục giác gồm 6 bộ cơ khí và điều khiển tương ứng với 6 cạnh hình lục giác. Mỗi bộ cơ khí được kết nối hệ điều khiển điện tử thông qua motor bước và cảm biến quang điều khiển tịnh tuyến đầu dò. Cấu hình được thiết kế cho đối tượng có đường kính 200mm, độ phân giải hình ảnh 3cm. Trung tâm có 12 đầu dò NaI ½ Inch trong một đế tài nghiên cứu khoa học cấp nhà nước. Với 12 đầu dò của Trung tâm, nhóm nghiên cứu bố trí hai đầu dò trên mỗi cạnh lục giác kèm theo cơ cấu điều khiển dịch chuyển tịnh tuyến tăng số tia chiếu.

Hộp điều khiển và thu nhận số liệu hạt nhân: Cơ cấu điều khiển và thu nhận số liệu hạt nhân gồm máy tính kết nối máy đo hạt nhân đơn kênh 12 đầu dò (Ludlum M4612) qua cổng truyền tín hiệu RS232 thu nhận số liệu hạt nhân đồng thời kết nối hộp điều khiển thông qua cổng USB điều khiển chuyển động tịnh tuyến đầu dò thông qua motor. Máy tính vừa thu nhận số liệu hạt nhân đồng thời điều khiển chuyển động theo số tia mong muốn thông qua chương trình điều khiển trên máy tính.



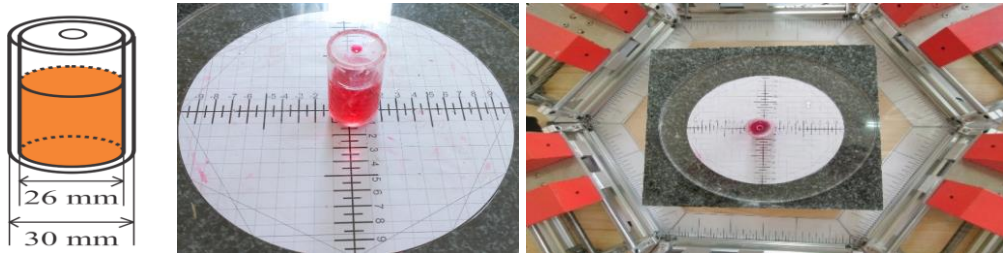
Hình 5. Sơ đồ hộp điều khiển và thu nhận số liệu

Phần mềm điều khiển cấu hình chụp SPECT: Phần mềm cho phép thiết lập cấu hình đo SPECT, kết nối và điều khiển đồng thời chuyển động cấu hình SPECT và thiết bị Ludlum 4612 thu nhận kết quả đo của 12 đầu dò NaI ½ Inch trên máy tính.

Phần mềm tái tạo ảnh: Phần mềm tái tạo hình ảnh được viết bằng ngôn ngữ C# hỗ trợ các thuật toán tái tạo ảnh SPECT: Chiếu ngược có lọc (FBP), Tái tạo đại số (ART), Thống kê (tối đa hóa kỳ vọng – EM) và các thuật toán xử lý hình ảnh khác, có khả năng hiệu chỉnh hấp thụ trên hình ảnh SPECT.

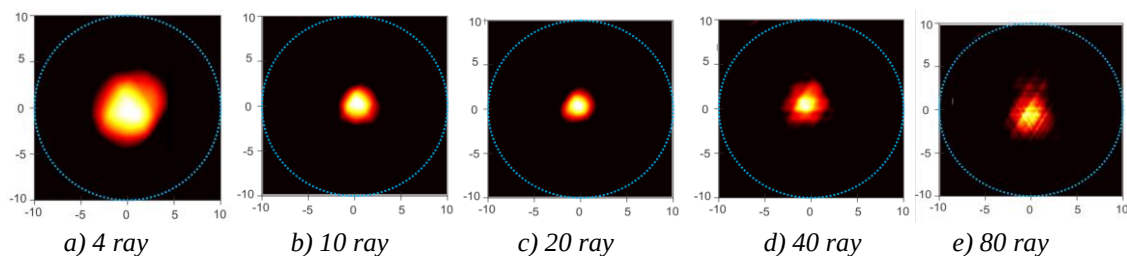
3.2. Thực nghiệm

a. Thí nghiệm tĩnh: Thực hiện chụp mẫu SPECT kính ngoài lần lượt là 3cm dày 2mm cao 5cm (đường kính trong 2.6cm). 1mCi đồng vị phóng xạ I-131 hòa tan trong 15ml nước được cho vào mẫu.



Hình 6. Thí nghiệm trên mẫu tĩnh 30mm tại tâm hệ SPECT

Kết quả: Mẫu tĩnh 3cm đặt tại tâm hệ đo, chụp ảnh SPECT theo các cấu hình đo khác nhau từ 4 ray đến 80 ray (số ray được tính trên một cạnh hình lục giác). Kết quả tái tạo ảnh và kết quả tính toán phân tích cho thấy ảnh SPECT được chụp tốt nhất là khoảng 20ray, độ phân giải không gian tốt có sai số tương đối khoảng 12%, thời gian chụp một ảnh SPECT khoảng 20 giây.



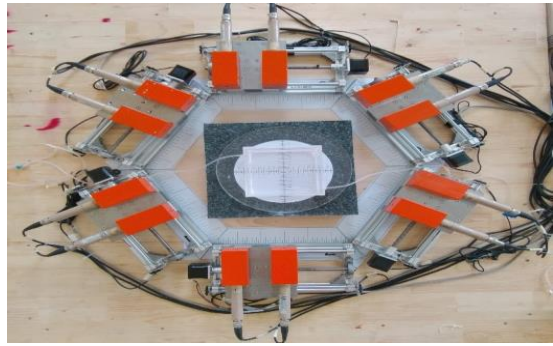
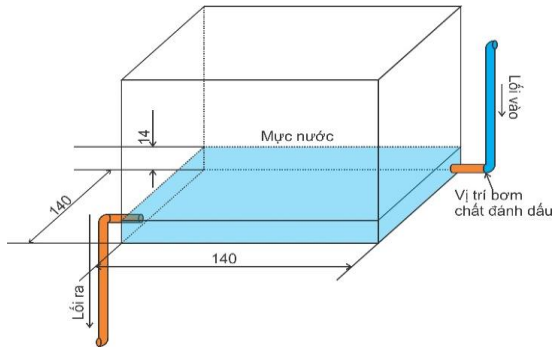
Hình 7. Kết quả dựng ảnh theo cấu hình đo khác nhau

Bảng 1. Kết quả tính toán, phân tích độ phân giải không gian theo các cấu hình khác nhau.

Số tia chiếu (ray)/cạnh	Thời gian đo một ảnh SPECT của 1000ms số đếm (s)	Kích thước đường kính tái tạo ảnh (cm)	Sai số tương đối của ảnh (%)
4	9	6.2	138.4
10	14	3.38	30
20	20	2.92	12.3
40	38	3.1	19.2
80	112	3.2	23.07

b) Thí nghiệm động: Thí nghiệm được thực hiện trên mẫu có kích thước 140mm × 140mm × 100mm như hình bên dưới được bố trí lõi vào, lõi ra và vị trí bơm đồng vị phóng xạ I-131 đã trộn phẩm màu có hoạt độ 3mCi. Mực nước trong mẫu cao 14mm. Van điều chỉnh dòng vào dòng như nhau có lưu lượng 5l/phút. Thực hiện phép chụp cấu hình SPECT với 24 ray thời gian cho mỗi lát cắt 30 giây. Quá trình di chuyển, vận động

của chất đánh dấu được ghi lại bằng video so sánh với kết quả tái tạo ảnh.



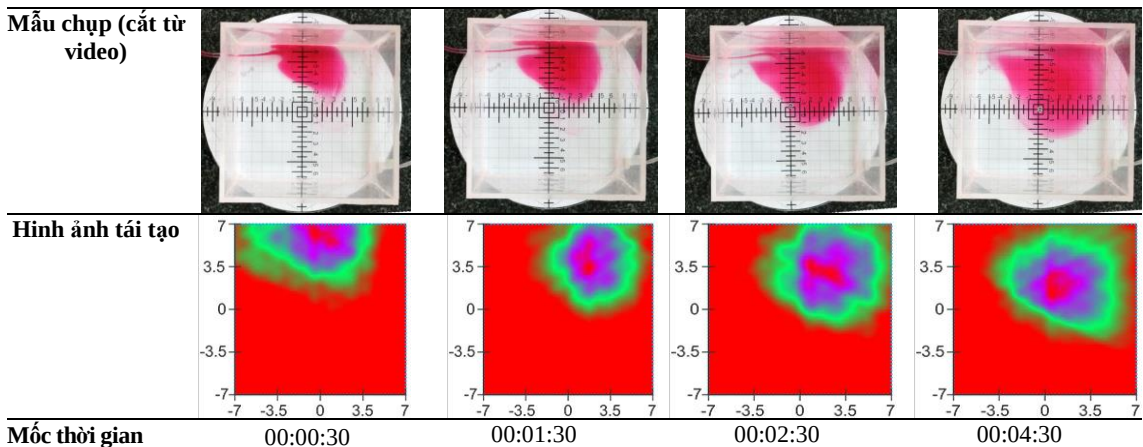
a) Thiết kế mẫu động

b) Chụp SPECT với mẫu động

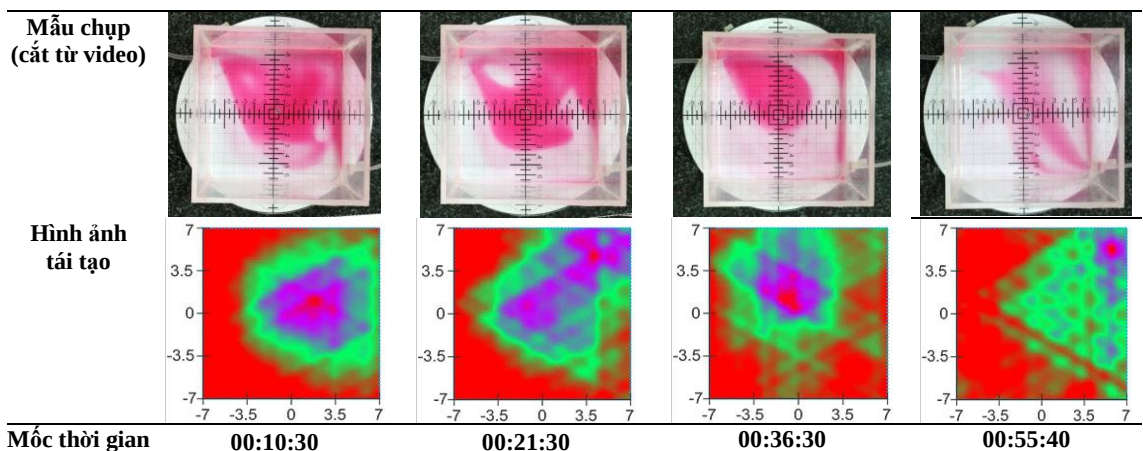
Hình 8. Bản vẽ thiết kế mẫu động và cấu hình chụp SPECT

Kết quả: Bảng 2 và bảng 3 thể hiện kết quả tái tạo ảnh của mẫu động theo từng điểm thời gian. Bằng nhận xét định tính kết quả cho thấy hình ảnh tái tạo thể hiện được rõ sự di chuyển và sự phân bố chất đánh dấu trong môi trường chất lỏng theo các thời điểm khác nhau.

Bảng 2. Kết quả tái tạo ảnh khi chất đánh dấu bắt đầu vào mẫu ở thời điểm (00 giờ:00 phút :00 giây) 5 phút đầu.



Bảng 3. Kết quả tái tạo ảnh khi chất đánh dấu bắt đầu vào mẫu ở thời điểm (00 giờ:00 phút :00 giây) tại các thời điểm khác nhau.



4. Kết luận

Kết quả nguyên cứu trên là kết quả thực hiện đề tài nghiên cứu khoa học và phát triển công nghệ cấp cơ sở “thiết kế, xây dựng cấu hình chụp ảnh cắt lớp phát xạ đơn photon (SPECT) phục vụ các thí nghiệm đánh dấu nghiên cứu mô hình dòng chảy” đã nghiên cứu và tiếp kỹ thuật SPECT trong việc xác định nguyên lý tái tạo ảnh và xây dựng cấu hình hình học cho cấu hình cơ khí.

Kết quả nghiên cứu đã làm rõ cấu hình SPECT hình lục giác có 12 đầu dò NaI ½ Inch phục vụ thí nghiệm đánh dấu nghiên cứu mô hình dòng chảy có ảnh tái tạo độ phân giải không gian 3cm, thời gian một phép chụp ảnh cắt lớp SPECT chưa đến 30 giây.

Với mục tiêu là nghiên cứu tiếp cận kỹ thuật SPECT phục vụ hướng nghiên cứu về hình ảnh hạt nhân của Trung tâm Ứng dụng kỹ thuật hạt nhân trong công nghiệp, xây dựng cấu hình thiết bị và phần mềm tái tạo hình ảnh SPECT, kết quả đề tài đã khẳng định khả năng nắm bắt và làm chủ kỹ thuật cũng như khả năng phát triển ứng dụng để phục vụ cho những đối tượng và bài toán cụ thể phục vụ nghiên cứu và sản xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A.C. Kak and M. Slaney (1991). *Principles of computerized tomographic imaging*.
- [2] Báo cáo đề tài CS/10/06-01: Nghiên cứu phát triển kỹ thuật SPECT/CT trên cơ sở thiết bị CT công nghiệp một nguồn – một detector quy mô phòng thí nghiệm.
- [3] Clinical Applications of SPECT/CT (2008). New Hybrid Nuclear Medicine Imaging System, IAEA – TECDOC – 1597.
- [4] E 1441 – 97 (1998). Guide for Computed Tomography (CT) Imaging. American National Standard.
- [5] Edwin L. Dove (2003). *Notes on Computerized Tomography – Bioimaging Fundamental*.
- [6] Emission Tomography – The Fundamental of PET and SPECT, Miles N. Wernick, Elsevier, 2004.
- [7] IAEA – TECDOC – 1589 (2008). Industrial Process Tomography.
- [8] James A. Patton (2008). SPECT/CT Physical Principles and Attenuation Correction. *J Nucl Med Technol*, 36,1-10.
- [9] Kevin M. Rosenberg (2002). CT Sim 3.5 User Manual.
- [10] Kim Jong Bum (2011). *Development of gamma ray tomographic system for industrial plant inspection* (PhD thesis). KAIST.
- [11] L.De Chiffre (2014). Industrial applications of computed tomography. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63, 655-677.
- [12] LLNL report (2004). CT Scan of NASA booster nozzle.
- [13] Martin Oppermann (2009). X-ray Computed Tomography on Miniaturized Solder Joints for Nano Packaging. *Electronics Packaging Technology Conference*.
- [14] Meaney (2015). *Design and Construction of an X-ray Computed Tomography Imaging System* (Master Thesis). University of Helsinki.