



KHẢO SÁT THÔNG LƯỢNG NEUTRON NHIỆT CỦA Lò PHẢN ỨNG HẠT NHÂN OPR1000 VỚI HỆ MÔ PHỎNG CoSi OPR1000

Nguyễn An Sơn, Trần Trung Nguyên, Nguyễn Thị Minh Sang, Trần Quốc Tuấn*

Trường Đại học Đà Lạt

Ngày Tòa soạn nhận được bài: 17-10-2016; ngày phân biên đánh giá: 03-12-2016; ngày chấp nhận đăng: 24-3-2017

TÓM TẮT

Lò phản ứng hạt nhân OPR1000 là loại lò nước áp lực, dùng neutron nhiệt duy trì phản ứng phân hạch. Do đó, thông lượng neutron nhiệt rất được quan tâm trong quá trình nghiên cứu, thiết kế xây dựng và vận hành nhà máy điện hạt nhân. Bài báo này trình bày kết quả khảo sát thông lượng neutron nhiệt thay đổi theo thời gian khi lò phản ứng hạt nhân OPR1000 ở trạng thái dưới tới hạn, tới hạn và trên tới hạn. Mô phỏng thực nghiệm được tiến hành trên hệ Core Simulator OPR1000. Kết quả tính toán lý thuyết và mô phỏng có sự tương đồng tốt với độ lệch nhỏ hơn 2,1%.

Từ khóa: thông lượng neutron nhiệt, lò phản ứng hạt nhân OPR1000, hệ Core Simulator OPR1000.

ABSTRACT

Survey of thermal neutron flux of opr 1000 nuclear reactor by CoSi OPR1000 simulator

OPR1000 nuclear reactor is pressurized water reactor, which uses thermal neutron to keep up nuclear fission. Therefore, thermal neutron flux is very important for investigating the design, construction and operation of such type of nuclear reactor. This paper introduces some research results of thermal neutron flux calculation and simulation of OPR1000 nuclear reactor at sub-critical, critical and super-critical operating states. Simulated results have been carried out on OPR1000 Core Simulator. The results showed a good correlation between the theoretical calculation and the simulation with the deviation smaller than 2,1%.

Keywords: thermal neutron flux, OPR1000 nuclear reactor, Core Simulator OPR1000.

1. Tổng quan

Trải qua hơn 60 năm phát triển, điện hạt nhân đã trở thành nguồn năng lượng quan trọng của thế giới. Hiện nay, điện hạt nhân cung cấp khoảng 11% [1] nguồn điện trên thế giới, điện hạt nhân được đánh giá là nguồn năng lượng sạch và gần như vô tận. Công nghệ

* Email: sonna@dlu.edu.vn

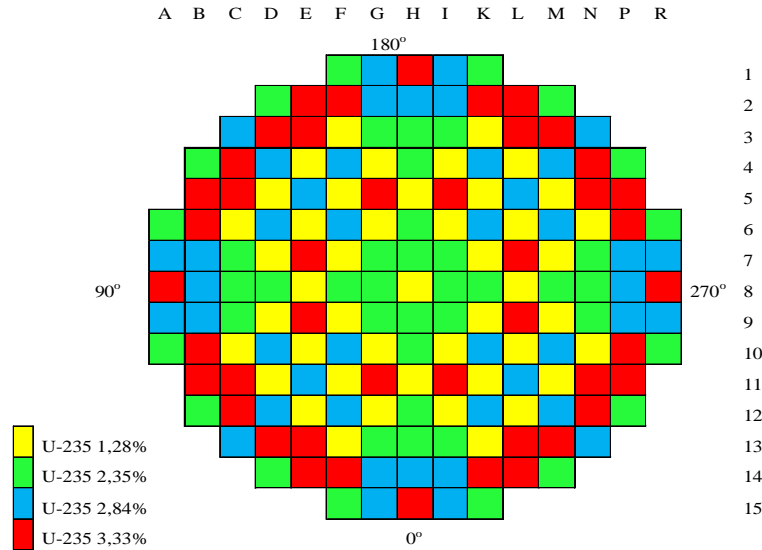
chế tạo ngày càng hiện đại đảm bảo tính an toàn ngày càng cao. Do đó, nhiều nước trên thế giới đang quan tâm tới phát triển điện hạt nhân nhằm đáp ứng nhu cầu năng lượng giải quyết vấn đề môi trường cũng như bài toán kinh tế.

Hàn Quốc là một trong những quốc gia phát triển điện hạt nhân từ đầu thập niên 70 của thế kỉ XX. Nhà máy điện hạt nhân đầu tiên của Hàn Quốc là loại lò phản ứng nước áp lực (PWR – Pressurized Water Reactor) do Công ti Westinghouse (Mỹ) chế tạo. Đến những năm 1980, Hàn Quốc bắt đầu triển khai chương trình nội địa hóa thiết bị nhà máy điện hạt nhân với mục đích chủ động công nghệ, tăng hiệu suất sử dụng và giảm thiểu tác động tới môi trường. Trong quá trình nội địa hóa nhà máy điện hạt nhân, Hàn Quốc đã phát triển thành công loại lò cải tiến OPR1000 (Optimized Power Reactor 1000) do Công ti Thủy điện và Điện hạt nhân Hàn Quốc (KHNP - Korea Hydro and Nuclear Power Company Limited) chế tạo [2]. Lò OPR1000 là loại lò PWR có công suất là 1000 MWe, sử dụng nước thường để làm mát lõi lò phản ứng. Bảng 1 trình bày một số thông số của lò OPR1000 [2, 3].

Bảng 1. Một số thông số của lò phản ứng OPR1000

Stt	Đặc tính	Thông số	Stt	Đặc tính	Thông số
1	Chiều cao tòa nhà lò (ft)	216	9	Nhiên liệu	UO ₂
2	Đường kính tòa nhà lò (ft)	144	10	Khối lượng 1 viên nhiên liệu (g)	5,5
3	Công suất nhiệt (MW _{th})	2815	11	Đường kính viên nhiên liệu (inch)	0,325
4	Áp suất vận hành (psia)	2250	12	Chiều cao viên nhiên liệu (inch)	0,390
5	Nhiệt độ nước làm mát đi vào lò (°F)	564,5	13	Số viên nhiên liệu trong lõi lò	5000000
6	Nhiệt độ nước làm mát đi ra lò (°F)	621,2	14	Chiều cao nhiên liệu (inch)	150
7	Số bó nhiên liệu	177	15	Đường kính bên trong của lõi lò (inch)	123
8	Kiểu bó nhiên liệu	16×16			

Ở lò OPR1000, việc sắp xếp các bó nhiên liệu được thực hiện quanh hình trụ, theo vòng tròn đồng tâm, độ giàu của các bó nhiên liệu khác nhau. Hình 1 mô tả cách sắp xếp [3].



Hình 1. Phân bố và độ giàu các bó thanh nhiên liệu của lò phản ứng OPR1000

Lò phản ứng OPR1000 có 177 bó thanh nhiên liệu, trong đó 45 bó thanh nhiên liệu có độ giàu 1,28%, 44 bó thanh nhiên liệu có độ giàu 2,35%, 44 bó thanh nhiên liệu có độ giàu 2,84%, và 44 bó thanh nhiên liệu có độ giàu 3,33%. Việc sắp xếp, phân bố các bó thanh nhiên liệu có độ giàu khác nhau dẫn tới mỗi lò phản ứng có các thông số như thông lượng neutron, phân bố công suất... khác nhau ở từng vị trí bên trong lò phản ứng.

Core Simulator OPR1000 (CoSi OPR1000) là hệ thống mô phỏng đã được phát triển để nâng cao kỹ năng chuyên gia quản lý hoạt động lò OPR1000 với các quy trình thử nghiệm vật lý tại công suất không (Zero Power Physics Test - ZPPT). ZPPT cơ bản bao gồm ba quy trình thử nghiệm chính là: xác định mức boron tới hạn (boron end point - BEP), xác định nhiệt độ phản ứng để đo hệ số đẳng nhiệt (isothermal coefficient - ITC), xác định giá trị của các nhóm thanh điều khiển và an toàn. Các kết quả thực nghiệm trên Core OPR1000 nhằm tham chiếu, so sánh với số liệu vận hành lò OPR1000 [7].

Để khuyến cáo khi vận hành lò phản ứng và giảm chi phí vận hành, mỗi loại nhà máy điện hạt nhân luôn có một hệ mô phỏng, tính toán các thông số vật lý của lò phản ứng. Với loại lò phản ứng OPR1000, Công ty Điện lực Hàn Quốc KEPCO (Korea Electric Power Corporation) và Công ty KHNP đã thiết kế, chế tạo hệ mô phỏng lõi lò OPR1000 - Core Simulator OPR1000 (CoSi OPR1000). Các thông số, số liệu của CoSi OPR1000 được lấy từ số liệu vận hành (số liệu thực) của hai nhà máy điện hạt nhân Shin-Kori 1 và 2 [4]. Đến nay, thiết bị CoSi OPR1000 đã cải tiến qua 4 giai đoạn nhằm tiến gần đến giá trị vận hành thực của Lò OPR1000. Ngoài việc khuyến cáo an toàn khi vận hành Lò OPR1000, hệ CoSi OPR1000 còn làm nhiệm vụ nâng cao trình độ vận hành cho các nhân viên của nhà máy điện hạt nhân.

Tại Việt Nam, trong khuôn khổ hợp tác giữa Hiệp hội Hạt nhân Hàn Quốc (KNA - Korea Nuclear Association) với Trường Đại học Đà Lạt, hệ mô phỏng CoSi thế hệ thứ 4 đã được tài trợ, đây là hệ duy nhất hiện có tại Việt Nam.

2. Cơ sở lý thuyết và mô phỏng thực nghiệm

2.1. Cơ sở lý thuyết

Để phân tích sự phụ thuộc của dòng neutron trong lò phản ứng và các đánh giá cần thiết trong thực tế vận hành lò phản ứng, thường sử dụng nghiệm của hệ phương trình động học đối với một nhóm các neutron trễ và các neutron tức thời [5, 6]:

$$\Phi(t) = A_0 \exp(\omega_0 t) + A_1 \exp(\omega_1 t) \quad (1)$$

Ở đây: A_0, A_1 là các hằng số tích phân tùy ý, được xác định từ các điều kiện ban đầu. Dạng tường minh $A_0, A_1, \omega_0, \omega_1$ trong phép gần đúng động học điểm và cho một nhóm neutron trễ, đúng cho $\rho \leq 0,9\beta$:

$$\frac{\Phi(t)}{\Phi_0} \cong \left[\frac{\beta}{\beta - \rho} \exp\left(\frac{\lambda \rho}{\beta - \rho} t\right) - \frac{\rho}{\beta - \rho} \exp\left(-\frac{\beta - \rho}{l_{t,t}} t\right) \right] \quad (2)$$

Ở đây: $\Phi_0, \Phi(t)$ tương ứng là thông lượng neutron nhiệt tính trung bình trong toàn bộ thể tích lõi lò phản ứng tại thời điểm khi bắt đầu xét ($t = 0$) và tại thời điểm t , ρ là độ phản ứng, $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$, β_i là tỉ phần riêng của các neutron trễ thứ i . $\lambda = \frac{\beta}{\sum_{i=1}^6 (\beta_i / \lambda_i)}$, λ_i là hằng số phân rã của neutron trễ thứ i , $l_{t,t}$ là thời gian sống của neutron tức thời [5, 6]. Với lò phản ứng OPR1000, các tham số $\beta_i, \lambda_i, l_{t,t}$ cho ở Bảng 2.

Bảng 2. Một số tham số động học lò phản ứng OPR1000 [7]

Nhóm neutron trễ	β_i	λ_i (1/giây)	$l_{t,t}$ (giây)
1	$0,24207 \times 10^{-3}$	$0,12730 \times 10^{-1}$	
2	$0,14310 \times 10^{-2}$	$0,31744 \times 10^{-1}$	
3	$0,13105 \times 10^{-2}$	$0,11791 \times 10^0$	
4	$0,28801 \times 10^{-2}$	$0,31749 \times 10^0$	$28,2 \times 10^{-6}$
5	$0,10248 \times 10^{-2}$	$0,14025 \times 10^1$	
6	$0,71304 \times 10^{-2}$	$0,39224 \times 10^1$	

Công suất lò phản ứng được xác định bởi công thức sau [5, 6]:

$$P = E \Sigma_f \int \phi dV \quad (3)$$

Thông lượng neutron nhiệt tính trung bình trong toàn thể tích lõi lò phản ứng được cho bởi [5]:

$$\Phi_{av} = \frac{1}{V} \int \phi dV \tag{4}$$

do đó:

$$\Phi_{av} = \frac{P}{E\Sigma_f V} \tag{5}$$

E là năng lượng phát ra của mỗi phân hạch, Σ_f là tiết diện phân hạch vĩ mô của neutron nhiệt, V là thể tích vùng hoạt. Các tham số E, Σ_f , V gần như không thay đổi trong khi lò phản ứng vận hành, do đó: $\frac{\Phi(t)}{\Phi_0} \cong \frac{P(t)}{P_0}$ (6)

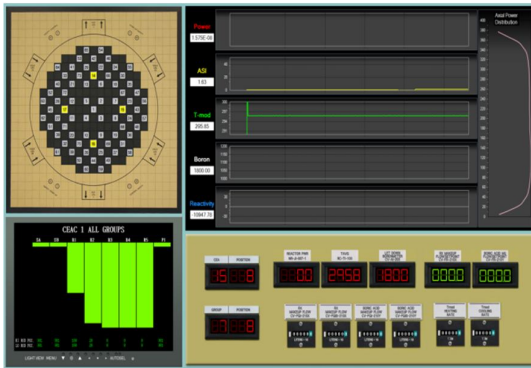
P_0 , $P(t)$ lần lượt là công suất của lò phản ứng tại thời điểm khi bắt đầu xét ($t = 0$) và tại thời điểm t.

Độ sai lệch thông lượng neutron nhiệt thế hệ thứ i+1 giữa hai thế hệ kế tiếp nhau được xác định bởi công thức:

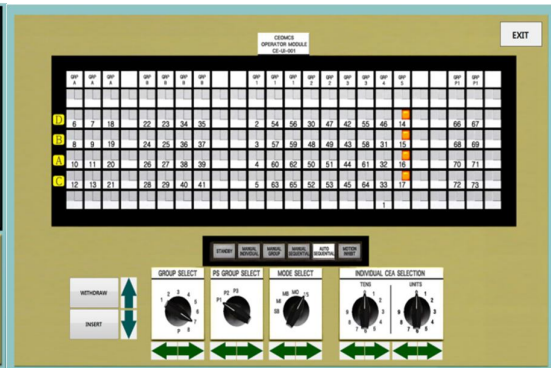
$$\text{Độ lệch (\%)} = \frac{[\Delta\Phi(i+1) - \Delta\Phi(i)]_{\text{lý thuyết}} - [\Delta\Phi(i+1) - \Delta\Phi(i)]_{\text{thực nghiệm}}}{[\Phi(i)]_{\text{lý thuyết}}} \% \quad \left(\Delta\Phi(i) = \frac{\Phi(i)}{\Phi(0)} \right) \tag{7}$$

2.2. Mô phỏng thực nghiệm

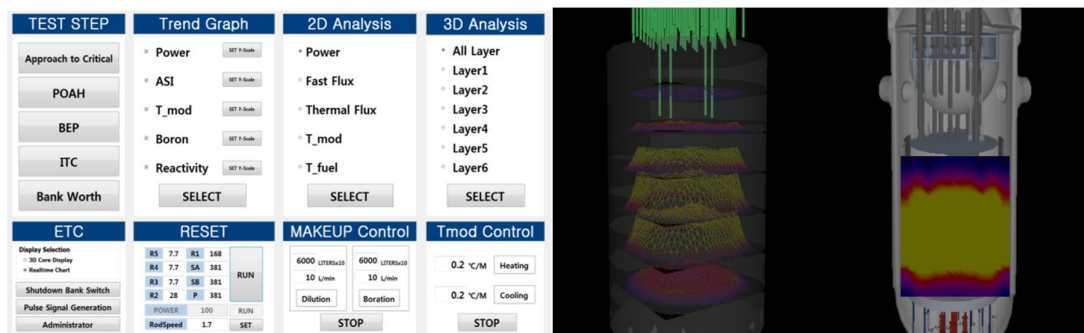
Thực nghiệm được tiến hành trên hệ mô phỏng lõi lò OPR1000. Giao diện của hệ mô phỏng gồm 3 màn hình chính, hiển thị vị trí các nhóm thanh điều khiển và nhóm thanh an toàn, các tham số chính của lò phản ứng, và chế độ điều chỉnh các tham số của lò phản ứng, chế độ hiển thị 2D/ 3D. Hình 2-5 trình bày các giao diện tương tác người dùng.



Hình 2. Giao diện thể hiện vị trí các nhóm thanh, các thông số của lò phản ứng



Hình 3. Giao diện điều khiển các nhóm thanh



Hình 4. Giao diện thay đổi các thông số trong lò

Hình 5. Giao diện hệ mô phỏng lõi lò OPR1000 hiển thị 3D

Để đảm bảo an toàn khi bắt đầu vận hành lò, các tham số mặc định của lò OPR1000 được trình bày ở Bảng 3.

Bảng 3. Một số thông số khi khởi động lò phản ứng OPR1000

Công suất (%)	Nồng độ Boron (ppm)	Áp suất (kg/cm ² a)	Nhiệt độ (°C)	Độ phản ứng (pcm)
$6,66 \times 10^{-9}$	1800	158,2	295,8	-26.000

Với nồng độ Boron là 1800 ppm, tất cả các thanh điều khiển và các thanh an toàn nằm ở vị trí dưới cùng của lò phản ứng, lúc này độ phản ứng có giá trị là xấp xỉ -26.000 pcm, các giá trị này sẽ đảm bảo cho lò phản ứng an toàn tuyệt đối.

Thực nghiệm tiến hành khảo sát thông lượng neutron nhiệt ở điều kiện rút tất cả các nhóm thanh điều khiển và an toàn ra khỏi lò. Trong quá trình rút nhóm thanh điều khiển, khi công suất lò phản ứng ở điều kiện rút tất cả các nhóm thanh an toàn và điều khiển ra khỏi lò và đưa lò tới công suất mong muốn bằng cách pha loãng Bo để phân bố công suất cũng như phân bố thông lượng neutron nhiệt trong lò phản ứng phân bố đồng đều. Sau đó tiến hành pha loãng Bo với tốc độ tối đa 600 lít/phút tới khi độ phản ứng xấp xỉ -200 pcm thì dừng pha loãng Bo, thay đổi vận tốc pha loãng nhỏ hơn 10 lít/phút (vì lúc này nếu như tốc độ pha loãng quá nhanh sẽ không kiểm soát được sự thay đổi của độ phản ứng). Tiếp tục pha loãng tới khi độ phản ứng xấp xỉ 0 pcm thì dừng pha loãng. Khi độ phản ứng và công suất ổn định. Tiến hành khảo sát thông lượng neutron nhiệt ở trạng thái tới hạn. Sử dụng dung dịch Bo để điều chỉnh độ phản ứng đạt trạng thái dưới tới hạn và trên tới hạn, tiến hành khảo sát thông lượng neutron nhiệt ở trạng thái dưới tới hạn và trên tới hạn.

3. Kết quả và biện luận

Theo công thức (6), tỉ lệ công suất lò phản ứng gần bằng với tỉ lệ thông lượng neutron nhiệt tính trung bình trong toàn thể tích lõi lò phản ứng. Do đó, tỉ lệ thông lượng neutron nhiệt tính trung bình sẽ được xác định thông qua tỉ lệ công suất của lò phản ứng ($10^{-6}\% - 10^{-3}\%$). Thực nghiệm được tiến hành khi lò phản ứng ở công suất thấp, để đảm bảo trong quá trình tiến hành thực nghiệm công suất không vượt quá mức cho phép, do đó tiến hành thực nghiệm khi độ phản ứng trong khoảng từ -20 pcm tới 20 pcm. Tiến hành thí nghiệm khảo sát thông lượng neutron nhiệt tính trung bình của Lò phản ứng OPR1000 trong các trường hợp sau:

- Lò phản ứng ở trạng thái dưới tới hạn (độ phản ứng bằng -19,00);
- Lò phản ứng ở trạng thái tới hạn (độ phản ứng bằng 0);
- Lò phản ứng ở trạng thái trên tới hạn (độ phản ứng bằng 19,80).

Thời gian khảo sát thông lượng neutron nhiệt ở các bước thực hiện là 30 giây cho tất cả 3 trường hợp dưới tới hạn, tới hạn và trên tới hạn. Sử dụng công thức (2) để tính tỉ lệ thông lượng neutron nhiệt trung bình bằng lí thuyết, công thức (6) để xác định thông lượng neutron nhiệt trung bình bằng thực nghiệm, và công thức (7) để xác định độ lệch giữa lí thuyết và thực nghiệm khi xét thông lượng trung bình của neutron nhiệt. Kết quả mô phỏng thực nghiệm và kết quả lí thuyết được trình bày ở các Bảng 4- 6, và các Hình 6-8.

Bảng 4. Kết quả tỉ lệ thông lượng neutron nhiệt khi lò phản ứng ở trạng thái dưới tới hạn

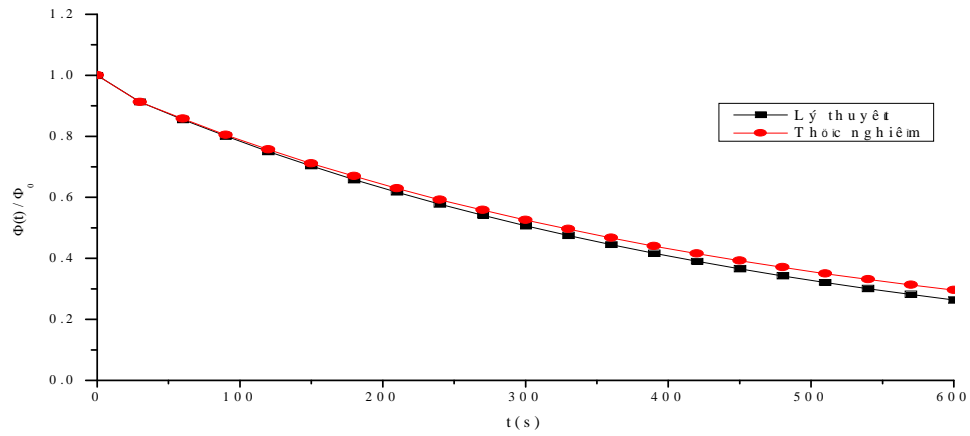
Thời gian (s)	P (%)	$\frac{\Phi(t)}{\Phi_0}$		Độ lệch (%)	Thời gian (s)	P (%)	$\frac{\Phi(t)}{\Phi_0}$		Độ lệch (%)
		TN	LT				TN	LT	
0	$2,02 \times 10^{-4}$	1,0000	1,0000	0,000	330	$1,00 \times 10^{-4}$	0,4958	0,4748	0,751
30	$1,84 \times 10^{-4}$	0,9122	0,9125	-0,025	360	$9,43 \times 10^{-5}$	0,4670	0,4448	0,584
60	$1,73 \times 10^{-4}$	0,8576	0,8548	0,359	390	$8,88 \times 10^{-5}$	0,4401	0,4167	0,628
90	$1,62 \times 10^{-4}$	0,8043	0,8007	0,114	420	$8,39 \times 10^{-5}$	0,4157	0,3903	0,882
120	$1,53 \times 10^{-4}$	0,7565	0,7501	0,412	450	$7,91 \times 10^{-5}$	0,3921	0,3656	0,722
150	$1,43 \times 10^{-4}$	0,7107	0,7026	0,284	480	$7,48 \times 10^{-5}$	0,3706	0,3425	0,982
180	$1,35 \times 10^{-4}$	0,6693	0,6582	0,543	510	$7,06 \times 10^{-5}$	0,3499	0,3209	0,828
210	$1,27 \times 10^{-4}$	0,6293	0,6166	0,378	540	$6,68 \times 10^{-5}$	0,3310	0,3006	1,096
240	$1,20 \times 10^{-4}$	0,5920	0,5776	0,421	570	$6,31 \times 10^{-5}$	0,3128	0,2816	0,949
270	$1,13 \times 10^{-4}$	0,5582	0,5411	0,671	600	$5,97 \times 10^{-5}$	0,2957	0,2638	1,015
300	$1,06 \times 10^{-4}$	0,5254	0,5069	0,502					

Bảng 5. Kết quả tỉ lệ thông lượng neutron nhiệt khi lò phản ứng đạt trạng thái tới hạn

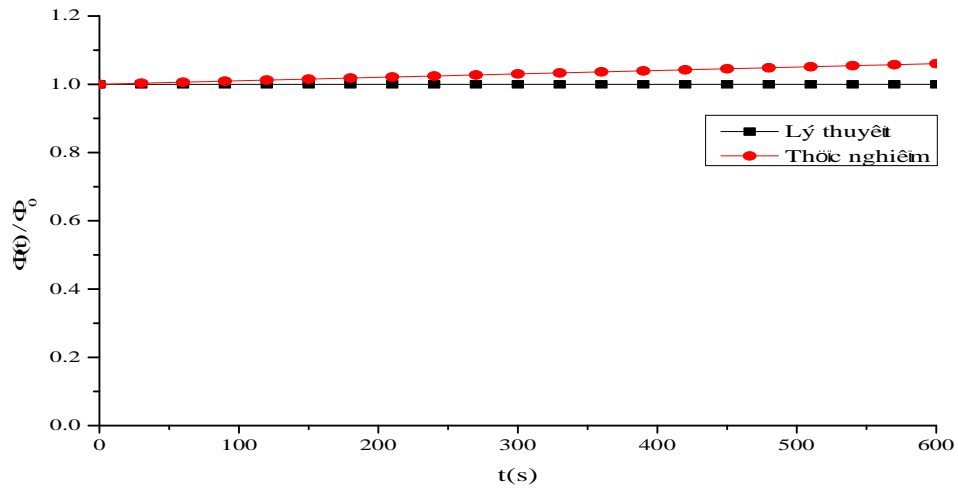
Thời gian (s)	P (%)	$\frac{\Phi(t)}{\Phi_0}$	$\frac{\Phi(t)}{\Phi_0}$	Độ lệch (%)	Thời gian (s)	P (%)	$\frac{\Phi(t)}{\Phi_0}$	$\frac{\Phi(t)}{\Phi_0}$	Độ lệch (%)
		TN	LT				TN	LT	
0	$4,12 \times 10^{-5}$	1,0000	1,0000	0,000	330	$4,25 \times 10^{-5}$	1,0334	1,0000	0,302
30	$4,13 \times 10^{-5}$	1,0031	1,0000	0,315	360	$4,26 \times 10^{-5}$	1,0364	1,0000	0,302
60	$4,14 \times 10^{-5}$	1,0061	1,0000	0,294	390	$4,28 \times 10^{-5}$	1,0394	1,0000	0,302
90	$4,15 \times 10^{-5}$	1,0091	1,0000	0,306	420	$4,29 \times 10^{-5}$	1,0424	1,0000	0,302
120	$4,17 \times 10^{-5}$	1,0122	1,0000	0,305	450	$4,30 \times 10^{-5}$	1,0454	1,0000	0,302
150	$4,18 \times 10^{-5}$	1,0152	1,0000	0,303	480	$4,31 \times 10^{-5}$	1,0484	1,0000	0,302
180	$4,19 \times 10^{-5}$	1,0183	1,0000	0,302	510	$4,33 \times 10^{-5}$	1,0515	1,0000	0,302
210	$4,20 \times 10^{-5}$	1,0213	1,0000	0,303	540	$4,34 \times 10^{-5}$	1,0545	1,0000	0,301
240	$4,22 \times 10^{-5}$	1,0243	1,0000	0,302	570	$4,35 \times 10^{-5}$	1,0575	1,0000	0,302
270	$4,23 \times 10^{-5}$	1,0273	1,0000	0,302	600	$4,36 \times 10^{-5}$	1,0605	1,0000	0,302
300	$4,24 \times 10^{-5}$	1,0303	1,0000	0,302					

Bảng 6. Kết quả tỉ lệ thông lượng neutron nhiệt khi lò phản ứng ở trạng thái trên tới hạn

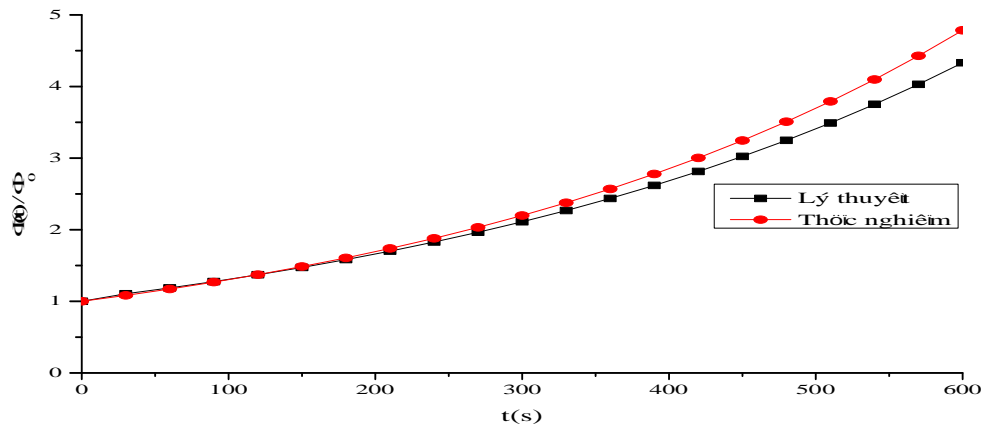
Thời gian (s)	P (%)	$\frac{\Phi(t)}{\Phi_0}$	$\frac{\Phi(t)}{\Phi_0}$	Độ lệch (%)	Thời gian (s)	P (%)	$\frac{\Phi(t)}{\Phi_0}$	$\frac{\Phi(t)}{\Phi_0}$	Độ lệch (%)
		TN	LT				TN	LT	
0	$6,12 \times 10^{-5}$	1,0000	1,0000	0,000	330	$1,45 \times 10^{-4}$	2,3766	2,2679	0,648
30	$6,63 \times 10^{-5}$	1,0828	1,1052	2,026	360	$1,57 \times 10^{-4}$	2,5694	2,4369	0,644
60	$7,18 \times 10^{-5}$	1,1723	1,1876	0,739	390	$1,70 \times 10^{-4}$	2,7777	2,6185	0,640
90	$7,77 \times 10^{-5}$	1,2688	1,2761	0,718	420	$1,84 \times 10^{-4}$	3,0027	2,8137	0,637
120	$8,41 \times 10^{-5}$	1,3730	1,3712	0,701	450	$1,99 \times 10^{-4}$	3,2456	3,0234	0,635
150	$9,09 \times 10^{-5}$	1,4855	1,4734	0,689	480	$2,15 \times 10^{-4}$	3,5081	3,2487	0,633
180	$9,84 \times 10^{-5}$	1,6070	1,5832	0,679	510	$2,32 \times 10^{-4}$	3,7915	3,4908	0,631
210	$1,06 \times 10^{-4}$	1,7381	1,7012	0,671	540	$2,51 \times 10^{-4}$	4,0977	3,7510	0,629
240	$1,15 \times 10^{-4}$	1,8798	1,8280	0,664	570	$2,71 \times 10^{-4}$	4,4284	4,0305	0,628
270	$1,24 \times 10^{-4}$	2,0328	1,9642	0,658	600	$2,93 \times 10^{-4}$	4,7856	4,3309	0,627
300	$1,35 \times 10^{-4}$	2,1981	2,1106	0,653					



Hình 6. Thông lượng neutron nhiệt trung bình khi lò phản ứng ở trạng thái dưới tới hạn



Hình 7. Thông lượng neutron nhiệt trung bình khi lò phản ứng đạt trạng thái tới hạn



Hình 8. Thông lượng neutron nhiệt trung bình khi lò phản ứng đạt trạng thái trên tới hạn

Kết quả tính toán cho thấy sự tương đồng giữa lí thuyết và mô phỏng thực nghiệm. Độ lệch thông lượng neutron nhiệt giữa lí thuyết và thực nghiệm nhỏ hơn 2,1%. Sự chênh lệch kết quả mô phỏng thực nghiệm và kết quả lí thuyết là do trong thực tế, có thể có nhiều nhóm neutron trễ xuất hiện, nhưng trong lí thuyết chỉ xét đến 1 nhóm neutron trễ. Vì tính chất cộng dồn của neutron ở các thế hệ trước nên ở trạng thái khi lò phản ứng chưa đạt tới hạn thì theo thời gian, thông lượng ngày càng giảm dần; ngược lại khi đạt trên trạng thái tới hạn, thông lượng sẽ tích lũy tăng; thông lượng neutron gần như không đổi khi lò phản ứng đạt trạng thái tới hạn.

4. Kết luận

Kết quả xác định neutron nhiệt của Lò OPR1000 đã được xác định. Nghiên cứu này đã tiến hành khảo sát thông lượng neutron nhiệt trung bình trên toàn bộ thể tích vùng hoạt của lò phản ứng OPR1000 ở ba trạng thái dưới tới hạn, tới hạn, và trên tới hạn cho thấy việc ứng dụng hệ thiết bị CoSi OPR1000 trong mô phỏng lõi lò phản ứng OPR1000 và đưa ra các dự báo cho vận hành thực của nhà máy điện hạt nhân OPR1000.

Ngoài ra, hệ mô phỏng này còn được sử dụng trong đào tạo, huấn luyện cho các kĩ sư vận hành Lò OPR1000. Kết quả thu được sẽ góp phần mở ra hướng nghiên cứu, khai thác, vận hành có hiệu quả hệ thiết bị lò mô phỏng nhằm đào tạo nguồn nhân lực kĩ thuật hạt nhân tại Việt Nam.

Lời cảm ơn: Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn Hiệp hội Hạt nhân Hàn Quốc (KNA), Trường Đại học Hanyang - Hàn Quốc, Công ti Thủy điện và Điện hạt nhân Hàn Quốc (KHNP) đã tài trợ hệ CoSi OPR1000 để thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>
- [2] Dan Gabriel Cacuci, *Handbook of nuclear engineering*, Springer, 2010.
- [3] Si-Hwan Kim, *Nuclear reactor system engineering*, UNIST, 2011.

- [4] Do Hyun Hwang, Myeong Soo Lee, Jin Hyuk Hong, Seung Ho Lee, Jung Kwan Suh, “Interface between CoSi/TH Model and Simulator for OPR1000”, *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju*, Korea, 2009.
- [5] John R. Lamarsh, *Introduction to nuclear reactor theory*, Addison Wesley Publishing, 2014.
- [6] E.E. Lewis, *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*, Academic Press, 2008.
- [7] Yu Sun Choi, *Zero Power Physics Test by using CoSi for OPR1000*, KHNP, 2014.