

Xác định giá trị nhóm thanh an toàn SA, SB của lò phản ứng hạt nhân OPR 1000 bằng hệ CoSi OPR1000

- Nguyễn An Sơn
- Trần Trung Nguyên
Trường Đại học Đà Lạt
Email: sonna@dlu.edu.vn

(Bài nhận ngày 15 tháng 03 năm 2017, nhận đăng ngày 17 tháng 05 năm 2017)

TÓM TẮT

Trong vận hành nhà máy điện hạt nhân, việc đảm bảo an toàn khi vận hành lò là quan trọng nhất. Chức năng của các nhóm thanh an toàn là để dập lò phản ứng trong những trường hợp khẩn cấp. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu, xác định giá trị các nhóm thanh an toàn SA, SB. Xác định hàm lượng Boron tương ứng với mỗi nhóm thanh an toàn.

Từ khóa: nồng độ Boron, lò phản ứng hạt nhân OPR1000, hệ CoSi OPR1000

MỞ ĐẦU

Năng lượng hạt nhân, một nguồn năng lượng không khí thải CO₂, dồi dào và gần như vô tận. Cho tới nay, trải qua hơn 60 năm hình thành và phát triển, điện hạt nhân đã dần đi vào cuộc sống của con người, cung cấp khoảng 12% sản lượng điện năng của toàn thế giới [1], là nguồn năng lượng quan trọng để các quốc gia phát triển kinh tế một cách bền vững bên cạnh những nguồn năng lượng sạch khác.

Dưới sự hỗ trợ từ Mỹ, từ những năm 60 của thế kỷ XX, Hàn Quốc đã bắt đầu xây dựng và vận hành lò nghiên cứu. Đến năm 1978, nhà máy điện hạt nhân thương mại đầu tiên được đưa vào hoạt động. Cho đến nay, Hàn Quốc đã hoàn thành chương trình nội địa hóa thiết bị nhà máy điện hạt nhân, và phát triển những loại lò mới, tiên tiến nâng cao hệ số an toàn, tăng công suất vận hành, cạnh tranh suất khấu với các cường quốc trên thế giới. OPR1000 (Optimized Power Reactor 1000) do Công ty Thủy điện và Điện hạt nhân Hàn Quốc (KHNP - Korea Hydro and Nuclear Power company limited) chế

toàn để đảm bảo lò phản ứng (LPU) hạt nhân OPR1000 hoạt động an toàn trong suốt quá trình vận hành. Mô phỏng thực nghiệm tiến hành trên hệ mô phỏng lõi lò phản ứng OPR1000 (CoSi OPR1000). Kết quả thực nghiệm thu được tương đồng với kết quả tính toán lý thuyết với nhóm thanh SA 1500 pcm, SB trên 4000 pcm. Giá trị nồng độ Boron tương ứng 134 ppm và 284 ppm.

tạo [2]. Lò OPR1000 là loại lò PWR có công suất là 1000 Mwe, Bảng 1 trình bày một số thông số của lò OPR1000 [2, 3].

LPU OPR1000 có tổng cộng 73 bó thanh điều khiển, trong đó bao gồm 32 bó thanh điều khiển với 12 cấu hình sắp xếp, 41 bó thanh điều khiển còn lại với 4 cấu hình sắp xếp.

Trong LPU OPR100, các nhóm thanh điều khiển dùng để điều khiển công suất LPU (R1 ÷ R5), trong đó nhóm R1 có 3 nhóm con, nhóm R2 và nhóm R3 có 2 nhóm con, nhóm 4 và nhóm 5 có 1 nhóm con (mỗi nhóm con có ít nhất 4 thanh điều khiển, khi vận hành thì đồng bộ). Nhóm thanh điều khiển tự động (P1 và P2) điều chỉnh phân bố công suất theo trục z (thẳng đứng) của LPU.

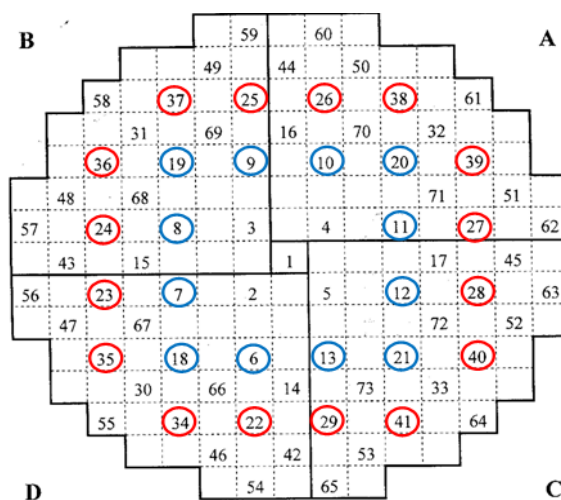
Ngoài các nhóm thanh điều khiển kể trên, trong LPU còn có nhóm thanh an toàn (SA – Safety rod A và SB – Safety rod B) nhằm đưa độ phản ứng xuống âm (trên 1000 pcm) để đi đến dập lò tức thời [7]. Các nhóm thanh an toàn được mô tả ở Bảng 2, Hình 1.

Bảng 1. Thông số chính của hệ thống lò phản ứng OPR1000

Stt	Đặc tính	Thông số
1	Số vòng làm mát	2
2	Thể tích vòng sơ cấp, bao gồm cả bình điều áp	339,4 m ³
3	Tốc độ tại vòng làm mát sơ cấp	1.293 m ³ /phút
4	Áp suất vận hành	158,2 kg/cm ²
5	Nhiệt độ nước làm mát đi vào lò	295,8 °C
6	Nhiệt độ nước làm mát đi ra lò	327,3 °C
7	Tổng thể tích bình điều áp	51 m ³
8	Nhiệt độ/áp suất bình điều áp thiết kế	371,1°C /175,8 kg/cm ²
9	Chiều cao hoạt động của lõi lò	381 cm
10	Số bó nhiên liệu	177
11	Số bó điều khiển	73
12	Chu kỳ vận hành	12 ~ 18 tháng
13	Nhiên liệu	UO ₂

Bảng 2. Các nhóm thanh an toàn

Nhóm thanh		Nhóm con	Bó thanh
Nhóm thanh an toàn	A	2	6, 8, 10, 12
		3	7, 9, 11, 13
		5	18, 19, 20, 21
	B	6	22, 24, 26, 28
		7	23, 25, 27, 29
		9	34, 36, 38, 40
10		35, 37, 39, 41	



Hình 1. Vị trí các nhóm thanh an toàn bên trong LPU OPR1000

Để thay đổi độ phản ứng, ngoài việc thay đổi vị trí thanh điều khiển, trong vận hành LPU PWR người ta còn thay đổi nồng độ boric acid, vì vậy sẽ có sự phụ thuộc lẫn nhau giữa các yếu tố điều chỉnh độ phản ứng trong lò: Vị trí thanh điều khiển, nồng độ Boron.

Hệ thống mô phỏng kiểm tra các trạng thái vật lý ở mức công suất thấp luôn được phát triển song song với việc xây dựng nhà máy điện hạt nhân nhằm mục đích tính toán các thông số vật lý của lò phản ứng, kiểm tra mức độ an toàn khi vận hành lò phản ứng, các dự báo rủi ro. Công ty KHNP đã thiết kế, chế tạo hệ mô phỏng lõi lò OPR1000 - CoSi Simulator OPR1000 (CoSi OPR1000). 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 cho các nhân viên vận hành của nhà máy điện hạt nhân [4].

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.

CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ PHỎNG THỰC NGHIỆM

Cơ sở lý thuyết

Thanh an toàn trong LPU được cấu tạo từ các vật liệu hấp thụ rất mạnh neutron. Khi cần sử dụng, nó có thể dịch chuyển để đưa vào bên trong lõi lò. Để điều khiển đập LPU, những vấn đề quan trọng sau đây liên quan đến các thanh an toàn trong lò phản ứng [5, 6]:

Độ hiệu dụng tổng thể (trọng lượng) của từng thanh, $\Delta\rho_{\text{thanh}}$;

Sự phụ thuộc của độ hiệu dụng tích phân của thanh vào vị trí nhúng (bán kính), r ;

Sự phụ thuộc của độ hiệu dụng vi phân và tích phân của thanh vào độ sâu nhúng, z ;

Các hiệu ứng giao thoa của các thanh;

Sự thay đổi độ hiệu dụng của các thanh khi cháy nhiên liệu.

Độ hiệu dụng tổng thể (trọng lượng) của thanh đơn lẻ, là phần trọng lượng được nhúng hoàn toàn vào vùng hoạt, $\Delta\rho_{\text{thanh}}$, $\Delta\rho_{\text{thanh}}^0=0$ (tại $z=H$ thì $\rho=0$). Giá trị $\Delta\rho_{\text{thanh}}$ được xác định gần đúng trên cơ sở mô hình khuếch tán và lý thuyết giao thoa qua các thông số:

$$\Delta\rho_{\text{thanh}}^h \approx 7,5 M^2 / [(R_{v,h}^2) \times \ln(0.465 R_{v,h} / R_{\text{thanh}}^{h,\text{đụng}})] \quad (1)$$

trong đó: M^2 là diện tích dịch chuyển, $R_{v,h}$ là bán kính vùng hoạt của LPU, $R_{\text{thanh}}^{h,\text{đụng}}$ là bán kính hiệu dụng của thanh, tức là bán kính thực của thanh an toàn (không xét đến phần dẫn động).

Trên thực tế, các số liệu về độ hiệu dụng tổng thể của thanh đơn lẻ hoặc của nhóm các thanh được nhà thiết kế LPU cung cấp, còn nhân viên vận hành chỉ đo các đại lượng tương ứng $\Delta\rho_{\text{thanh}}^h$ trong quá trình khởi động lò ở công suất không.

Sự phụ thuộc tích phân của độ hiệu dụng tổng thể được xác định như là độ phản ứng được đưa vào LPU khi thanh được đưa vào/rút ra một độ sâu z :

$$\Delta\rho_{\text{thanh}}(O, Z) = \int_0^z \rho_{\text{thanh}}(O, H) \Phi^2(OZ) dz \quad (2)$$

Giá trị độ phản ứng khi thay đổi vị trí thanh điều khiển được tính toán theo công thức sau:

$$AROCBC(ppmB) = \text{Boron}_{RCS}(ppmB) + \left\{ \frac{\text{Group Worth}(pcm)}{\text{Predicted DBW} \left(\frac{pcm}{ppmB} \right)} \right\} \quad (3)$$

trong đó:

Boron_{RCS} : nồng độ Boron của hệ thống làm mát độ phản ứng được đo bởi Chemistry samples (Điều kiện cân bằng);

Group Worth: giá trị phần thanh điều khiển được đẩy vào lõi LPU (giá trị được dự đoán dựa trên vị trí nhóm thanh tại điều kiện cân bằng Boron);

Predicted DBW: giá trị Boron vi phân (differential Boron Worth) được dự đoán. Các giá trị DBW được trình bày ở Bảng 4.

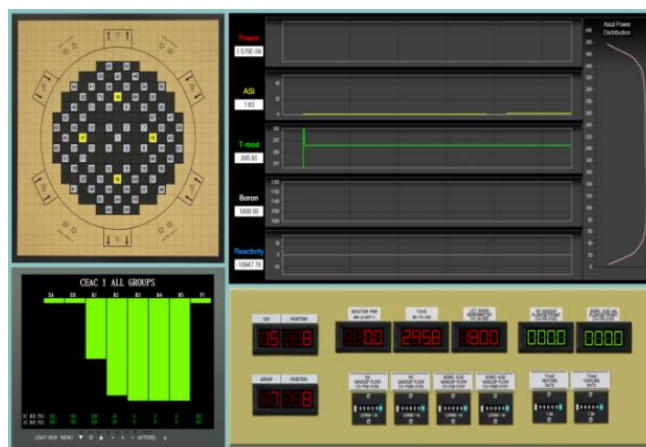
Bảng 4. Giá trị DBW tại nhiệt độ 295,8°C, áp suất 158,2 kg/cm²A [7]

Trường hợp	Giá trị dự đoán (ppm/pcm)	Độ lệch chuẩn (ppm/pcm)
(Nhóm thanh SB ở vị trí 190,5 cm	-0,0727	±0,015
ARO	-0,0842	±0,015
R1 ở vị trí 190,5 cm	-0,083	±0,015
R2 ở vị trí 190,5 cm	-0,081	±0,015

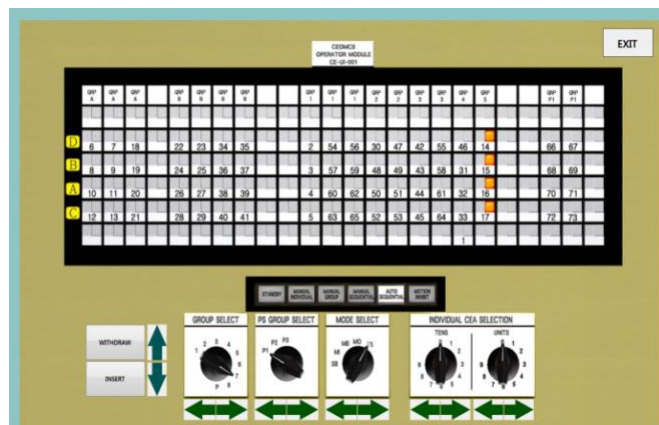
Mô phỏng thực nghiệm

Mô phỏng thực nghiệm được tiến hành trên hệ mô phỏng lõi lò OPR1000. Giao diện của hệ mô phỏng gồm 3 màn hình hiển thị vị trí các nhóm thanh điều khiển và nhóm thanh an toàn, các tham

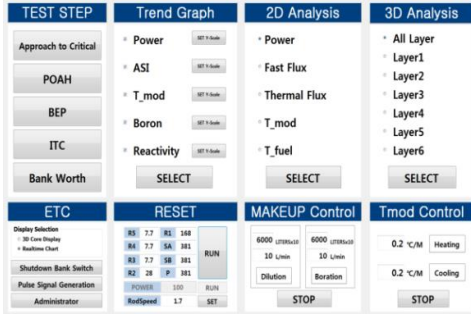
số chính của lò phản ứng, và chế độ điều chỉnh các tham số của lò phản ứng, chế độ hiển thị 2D/ 3D. Hình 2, Hình 3, Hình 4, Hình 5 trình bày các giao diện.



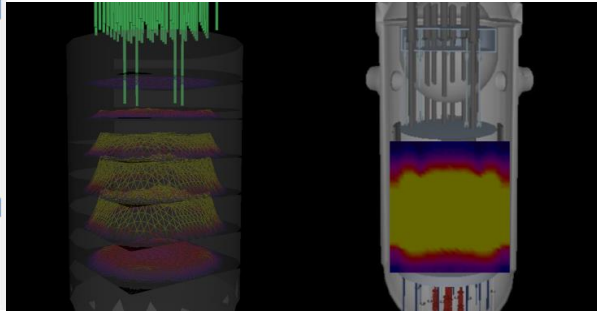
Hình 2. Giao diện thể hiện vị trí các nhóm thanh, các thông số của lò phản ứng



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

Tiến hành mô phỏng thực nghiệm khảo sát ảnh hưởng nhóm thanh an toàn SA, SB trong lò phản ứng OPR 1000. Khởi động lò phản ứng OPR1000, các giá trị ban đầu được định mức: nồng độ Boron: 1800 ppm, nhiệt độ: 295,8 °C, áp suất: 158,2 kg/cm². Sờ dĩ giá trị Boron ban đầu là 1800 ppm vì ở giá trị này, độ phản ứng nằm trong khoảng -25000 pcm ~ -26000 pcm (Per cent Mille ~ 10⁻⁵), đây là giá trị tuyệt đối an toàn của lò phản ứng.

Đưa lò phản ứng đạt trạng thái tới hạn ở mức công suất không. Khi đó độ phản ứng xấp xỉ không và nhóm R5 ở vị trí 252cm. Rút nhóm R5 ra khỏi lò phản ứng đồng thời bơm Boron vào để độ phản ứng duy trì ở mức không đảm bảo an toàn khi vận hành lò. Lần lượt đưa các nhóm thanh an toàn SA,

SB đến các vị trí cần khảo sát đồng thời thực hiện pha loãng Boron để duy trì trạng thái tới hạn của LPU, đảm bảo an toàn khi vận hành.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong LPU các nhóm thanh an toàn (SA – Safety rod A và SB – Safety rod B) là một hệ thống quan trọng của lò phản ứng hạt nhân. Chúng hoạt động và phản hồi một cách tức thời khi lò phản ứng xảy ra sự cố. Giá trị của các nhóm thanh an toàn SA, SB được xác định bởi thực nghiệm và được so sánh với kết quả tính toán lý thuyết dựa trên công thức (3). Việc tính toán được thực hiện trong điều kiện mức công suất không. Tất cả kết quả được tính toán, so sánh và trình bày ở Bảng 5, Bảng 6, Hình 6-8.

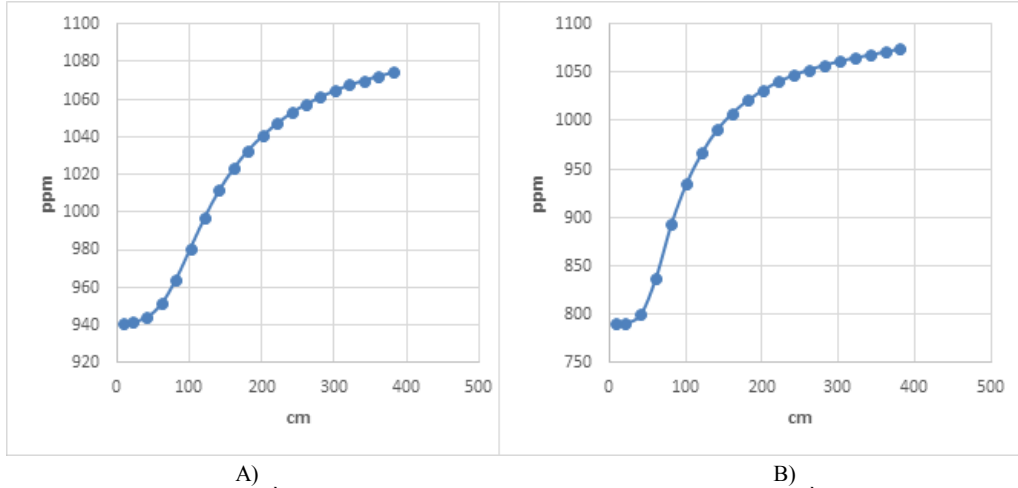
Bảng 5. Sự phụ thuộc độ phản ứng vào vị trí nhóm thanh SA và nồng độ Boron

Vị trí nhóm thanh SA (cm)	Nồng độ Boron	Độ phản ứng (trạng thái tới hạn)	Giá trị nhóm thanh (pcm) (tính theo thực nghiệm)	Giá trị nhóm thanh (pcm) (tính theo lý thuyết)	Vị trí nhóm thanh SA (cm)	Nồng độ Boron	Độ phản ứng (trạng thái tới hạn)	Giá trị nhóm thanh (pcm) (tính theo thực nghiệm)	Giá trị nhóm thanh (pcm) (tính theo lý thuyết)
381	1074,16	0,01	0,01	0,00	181	1032,78	-0,01	-563,43	-491,45
361	1072,30	0,02	-20,67	-22,09	161	1023,28	0,00	-698,47	-604,28
341	1069,97	0,02	-47,85	-49,76	141	1011,65	0,00	-853,78	-742,40
321	1067,55	-0,03	-78,79	-78,50	121	997,22	0,03	-1017,54	-913,78

301	1064,63	-0,03	-112,46	-113,18		101	980,71	-0,02	-1175,34	-1109,86
281	1061,22	0,02	-153,57	-153,68		81	964,17	-0,02	-1311,35	-1306,29
261	1057,31	0,03	-209,47	-200,12		61	951,19	-0,01	-1415,27	-1460,45
241	1052,83	-0,02	-276,64	-253,33		41	944,16	-0,02	-1483,35	-1543,94
221	1047,29	0,00	-349,44	-319,12		21	941,59	0,02	-1512,78	-1574,47
201	1040,61	-0,02	-451,17	-398,46		8	940,98	0,00	-1518,89	-1581,71

Bảng 6. Sự phụ thuộc độ phản ứng vào vị trí nhóm thanh SB và nồng độ Boron

Vị trí nhóm thanh SB (cm)	Nồng độ Boron	Độ phản ứng (trạng thái tới hạn)	Giá trị nhóm thanh (pcm) (tính theo thực nghiệm)	Giá trị nhóm thanh (pcm) (tính theo lý thuyết)		Vị trí nhóm thanh SB (cm)	Nồng độ Boron	Độ phản ứng (trạng thái tới hạn)	Giá trị nhóm thanh (pcm) (tính theo thực nghiệm)	Giá trị nhóm thanh (pcm) (tính theo lý thuyết)
381	1074,21	0,01	0,01	0,00		181	1021,05	0,01	-982,36	-631,35
361	1071,14	0,00	-35,67	-36,46		161	1007,82	-0,03	-1338,38	-788,48
341	1067,97	0,01	-78,10	-74,11		141	990,58	-0,01	-1842,49	-993,23
321	1064,98	-0,01	-115,56	-109,62		121	966,58	-0,03	-2539,48	-1278,27
301	1061,44	-0,01	-158,89	-151,66		101	935,11	-0,03	-3455,48	-1652,02
281	1057,37	0,00	-215,34	-200,00		81	892,80	-0,01	-4712,34	-2154,51
261	1052,65	0,01	-289,52	-256,06		61	837,55	0,02	-5839,58	-2810,69
241	1047,20	0,03	-387,38	-320,78		41	799,71	0,03	-6885,35	-3260,10
221	1040,33	0,02	-526,36	-402,38		21	790,88	0,03	-7315,47	-3364,96
201	1031,70	-0,02	-720,49	-504,87		8	790,05	0,02	-7436,63	-3374,82



A) Vị trí nhóm thanh SA và nồng độ Boron tới hạn

B) Vị trí nhóm thanh SB và nồng độ Boron tới hạn

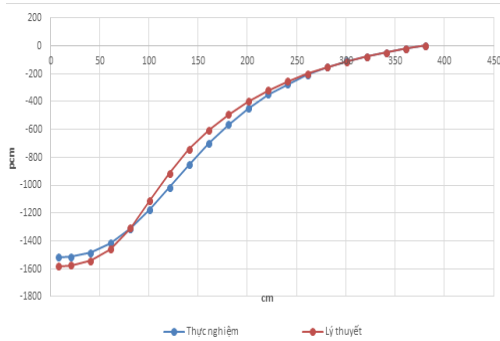
Hình 6. Vị trí nhóm thanh an toàn SA, SB và nồng độ Boron tới hạn ứng với mỗi vị trí

Giá trị nồng độ Boron ứng với toàn bộ chiều dài nhóm thanh SA khoảng 134 ppm. Khi đưa từ từ nhóm thanh an toàn SA vào lò phản ứng, để duy trì trạng thái tới hạn của lò phản ứng, phải pha loãng nồng độ Boron tương ứng.

Ứng với nhóm thanh SB, giá trị nồng độ Boron tương ứng với toàn bộ chiều dài thanh khoảng 284 ppm, nồng độ Boron tương ứng phải

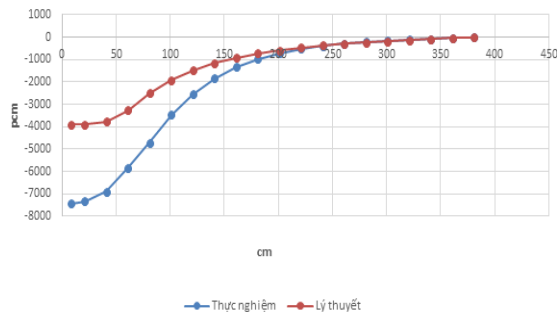
giảm dần để duy trì trạng thái tới hạn của lò phản ứng.

So sánh kết quả giữa 2 trường hợp ta thấy, độ hấp thụ neutron của nhóm thanh an toàn SB lớn hơn độ hấp thụ neutron của nhóm thanh an toàn SA vì giá trị nồng độ Boron ứng với nhóm thanh SB hơn gấp đôi so với nhóm thanh SA



Hình 7. Đồ thị mối liên hệ giữa vị trí và giá trị nhóm thanh SA

Giá trị nhóm thanh SA khoảng 1581 pcm và giá trị nhóm thanh SB khoảng 3374 pcm, để đảm bảo an toàn lò phản ứng khi xảy ra sự cố khẩn cấp,



Hình 8. Đồ thị mối liên hệ giữa vị trí và giá trị nhóm thanh SB

giá trị các nhóm thanh an toàn phải rất cao (vài ngàn pcm) để phân hồi và ngăn chặn một cách tức thời.

Đối với giá trị nhóm thanh SB, nhóm thanh này được cấu tạo bởi 16 thanh, vì vậy độ hấp thụ neutron của nhóm thanh SB lớn nhất so với các nhóm thanh còn lại. Thực tế khi đưa toàn bộ nhóm thanh SB vào trong lõi lò phản ứng, giá trị nhóm thanh lên tới 7400 pcm so với tính toán lý thuyết 3400 pcm. Việc tính toán lý thuyết giá trị thanh SB để đảm bảo an toàn lò phản ứng chỉ khoảng 3400 pcm đó là mức an toàn khi xảy ra sự cố, tuy nhiên thực tế nhà thiết kế gia tăng độ an toàn của lò lên mức cao nhất có thể nên họ bù vào một khoảng gấp đôi giá trị cần thiết của nhóm thanh SB.

Kết quả giá trị các nhóm thanh an toàn SA, SB của lò OPR1000 đã được xác định bằng việc đo đạc thực nghiệm (mô phỏng) dựa vào thông số thực của nhà máy điện hạt nhân Shin-Kori 1 kết hợp với việc tính toán lý thuyết. Nghiên cứu này đã tiến hành khảo sát đánh giá ảnh hưởng các nhóm thanh an toàn của lò phản ứng OPR1000, đảm bảo vận hành an toàn lò, ngăn chặn sự cố, 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.

KẾT LUẬN

Determination of the safety rods (SA, SB) for optimized power reactor 1000 using the Core simulator OPR1000

- Nguyen An Son
 - Tran Trung Nguyen
- Đà Lạt University

ABSTRACT

In order to operate a nuclear power plant, ensuring safety is the most important factor. The function of safety rods are to shut down the reactor in case of emergency. The purpose of this paper to show the result of research and determine the value of safety rods SA, SB. Determination of the Boron concentration corresponding to each group of safety rods of OPR1000 nuclear reactor

Keywords: Boron concentration, OPR1000 nuclear reactor, CoSi OPR1000 system

ensures the safely in the whole operation process. Experimental simulation is carried out in the system simulating core reactor OPR1000 (CoSi OPR1000). The experimental result corresponds with the theoretic calculated result of Sa and Sb with 1500 pcm, 4000 pcm. The concentrations of Boron appropriately are 134 ppm and 284 ppm, respectively.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>
- [2]. D.G. Cacuci, *Handbook of nuclear engineering*, Spinger (2010).
- [3]. S.H. Kim, *Nuclear reactor system engineering*, UNIST, 2011
- [4]. D.H. Hwang, M.S. Lee, J.H. Hong, S.H. Lee, J.K. Suh, *Interface between CoSi/TH Model and Simulator for OPR1000*, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea (2009).
- [5]. J.R. Lamarsh, *Introduction to nuclear reactor theory*, Addison Wesley Publishing (1966).
- [6]. E.E. Lewis, *Fundamentals of nuclear reactor physics*, Academic Press (2008).
- [7]. Y.S. Choi, *Zero Power Physics Test by using CoSi for OPR1000*, KHNP (2014).