

Xác định nồng độ boron ở trạng thái tới hạn của lò phản ứng hạt nhân OPR 1000 bằng hệ Cosi OPR1000

- Nguyễn An Sơn
- Trần Trung Nguyên
- Trần Quốc Tuấn
- Lý Quang Cường

Trường Đại học Đà Lạt

- Lê Thị Hà Lan

Trường THPT Trần Phú, Đà Lạt

- Văn Lê Quang

Trường trung cấp nghề Ninh Hòa, Đà Lạt

(Nhận bài ngày 22 tháng 07 năm 2016, đăng bài ngày 21 tháng 11 năm 2016)

TÓM TẮT

Trong vận hành nhà máy điện hạt nhân, việc điều chỉnh công suất là cần thiết. Khi thay đổi công suất, quá trình phản ứng phân hạch trong lò phản ứng sẽ thay đổi theo. Các phương pháp thường sử dụng trong việc thay đổi công suất của nhà máy điện khi vận hành gồm: thay đổi nồng độ boron, thay đổi vị trí các nhóm thanh điều khiển, và kết hợp thay đổi nồng độ boron và điều khiển nhóm thanh điều khiển. Bài báo trình bày kết quả

nghiên cứu, đo đạc hàm lượng boron để lò OPR1000 đạt trạng thái tới hạn trong các trường hợp ARO, ARI SB, ARI R1, R5 trên cơ sở sử dụng phương pháp chia đôi trong việc điều chỉnh nồng độ Boron. Mô phỏng thực nghiệm tiến hành trên hệ mô phỏng lõi lò phản ứng OPR1000 (CoSi OPR1000). Kết quả thu được tương đồng cho cả 4 trường hợp khi so sánh số liệu vận hành của Nhà máy điện hạt nhân sử dụng lò phản ứng OPR1000.

Từ khóa: nồng độ boron, Lò OPR1000, Hệ Cosi OPR1000

MỞ ĐẦU

Thập niên 50 của thế kỷ XX là thời điểm khởi đầu của điện hạt nhân thương mại trên thế giới. Cho đến nay, điện hạt nhân cung cấp khoảng 11 % nguồn năng lượng trên toàn cầu [1]. Hơn 60 năm sử dụng, điện hạt nhân được đánh giá là nguồn năng lượng to lớn, sạch và gần như vô tận.

Từ những năm 1980, Hàn Quốc bắt đầu triển khai chương trình nội địa hóa thiết bị nhà máy điện hạt nhân. Từ năm 1984 và kéo dài 10 năm sau đó, có 7 lò phản ứng hạt nhân loại nước áp lực PWR (Pressurized Water Reactor) được xây dựng theo Tiêu chuẩn hạt nhân Hàn Quốc [2]. Mục đích nội

địa hóa mà Hàn Quốc đặt ra là chủ động công nghệ, tăng hiệu suất sử dụng và giảm thiểu ảnh hưởng môi trường. Thành công lớn trong bước đường nội địa hóa nhà máy điện hạt nhân của Hàn Quốc là phát triển thành công loại lò cải tiến OPR1000 (Optimized Power Reactor 1000) do Công ty Thủy điện và Điện hạt nhân Hàn Quốc (KHNP - Korea Hydro and Nuclear Power company) chế tạo. Nhà máy điện OPR100 đầu tiên xây dựng tại Yonggwang số 3 và 4. Bảng 1 trình bày một số thông số chính của lò OPR1000 [3].

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 của dòng hơi tại điều kiện bình thường	5,769,695 kg/giờ
4	Loại bơm	Bơm ly tâm, bơm dọc, bơm đơn
5	Lưu lượng bơm	323 m ³ /phút
6	Tốc độ bơm	1,200 rpm
7	Tốc độ tại vòng làm mát sơ cấp	1,293 m ³ /phút
8	Áp suất vận hành	158,2 kg/cm ²
9	Nhiệt độ nước làm mát đi vào lò	295,8 °C
10	Nhiệt độ nước làm mát đi ra lò	327,3 °C
11	Tổng thể tích bình điều áp	51 m ³
12	Thể tích khí bình điều áp (công suất tối đa)	25,49 m ³
13	Nhiệt độ/áp suất bình điều áp thiết kế	371,1 °C /175,8 kg/cm ²
14	Chiều cao hoạt động của lõi lò	381 cm
15	Đường kính lõi lò	312,4 cm
16	Số bó nhiên liệu	177
17	Số bó điều khiển	73
18	Chu kỳ vận hành	12 ~ 18 tháng
19	Tòa nhà lò	Dạng hình trụ bằng bê tông cốt thép
20	Đường kính trong tòa nhà lò	43,9 m
21	Chiều cao tòa nhà lò	66,8 m
22	Nhiệt độ khi đang vận hành tòa nhà lò	48,9 °C
23	Đường kính bên trong của thùng lò	414 cm
24	Bề dày thùng lò	Tối thiểu là 20,5 cm
25	Chiều cao tổng của thùng lò	1,464,2 cm
26	Tốc độ tuabin	1,800 rpm
27	Kiểu ống trong bình sinh hơi	Ống U thẳng đứng
28	Diện tích trao đổi nhiệt bề mặt của bình sinh hơi	9,522,6 m ²
29	Áp suất khi đang vận hành tại vòng sơ cấp/ thứ cấp của bình sinh hơi	158,2/75,2 kg/cm ²

Bất kỳ một nhà máy điện hạt nhân đang vận hành nào cũng luôn có hệ mô phỏng, tính toán các thông số vật lý của lò phản ứng nhằm đưa ra khuyến cáo về an toàn khi vận hành, các dự báo rủi ro ... Đặc biệt, để phục vụ vấn đề này với lò 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-CoSi 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.

VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

Cơ sở lý thuyết

Động học lò phản ứng đã đưa ra sự phụ thuộc của hệ số nhân hiệu dụng k_{eff} theo số neutron ban đầu và số neutron tại thời điểm đang xét thông qua công thức (1) [5, 6]:

$$N = N_0 + N_0 k_{eff} + N_0 k_{eff}^2 + \dots = N_0 (1 + k_{eff} + k_{eff}^2 + \dots)$$

Khai triển gần đúng công thức (1) ta được:

$$N \approx \frac{N_0}{1 - k_{eff}}$$

Tăng quá trình phân hạch trong khi vận hành lò phản ứng hạt nhân là điều kiện để đưa lò phản ứng lên trạng thái tới hạn. Để thực hiện điều này,

cần biết công suất của nguồn neutron trong lò phản ứng. Tuy nhiên, thực tế vận hành lò phản ứng, đại lượng đó thường không được biết hoặc khó xác định, nên người ta sử dụng các kết quả đo tương đối. Giả sử detector ghi neutron, nằm ngoài và sát thùng lò phản ứng, đo lần đầu được C_0 , tỷ lệ với dòng neutron trong vùng hoạt. Số đo đó được lấy làm điểm đầu để đo. Tiếp sau, đưa vào lò phản ứng độ phản ứng dương theo từng bước i liên tiếp. Sau khi đưa độ phản ứng, bằng $\Delta k_{eff} / k_{eff}$, vào theo cách, thí dụ, rút thanh điều chỉnh ra một đoạn Δx_i , dòng neutron tăng lên, và số đo của detector là C_i . Xây dựng sự phụ thuộc C_0/C_i vào x_i . Rõ ràng, độ phản ứng được đưa vào lò phản ứng càng lớn và tương ứng với nó là k_{eff} càng gần 1, thì tỷ lệ C_0/C_i càng gần 0.

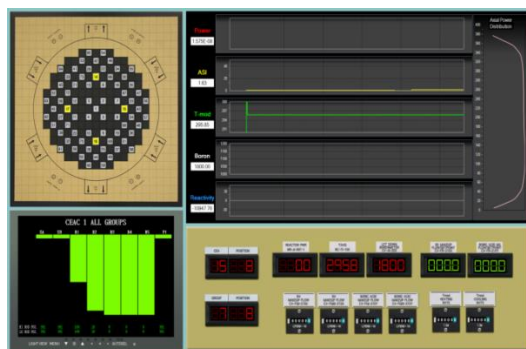
Sau một số bước nhất định, khi ngoại suy hàm $C_0/C_i(x)$ đến 0 (nghĩa là, đến giao với trục x), sẽ tìm được độ cao rút thanh điều chỉnh, tương ứng với trạng thái tới hạn của lò phản ứng [5].

$$\frac{C_0}{C_i} = 1 - k_{eff}$$

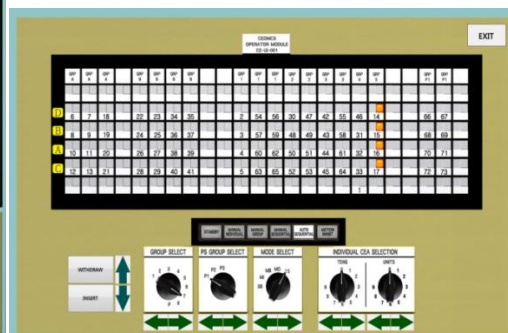
Khi sử dụng việc thay đổi nồng độ boric acid, là phương pháp được sử dụng rộng rãi trong vận hành các lò phản ứng dùng nước làm chất trao đổi nhiệt - nước để điều chỉnh và điều hòa độ phản ứng, thay vì vị trí của thanh làm đối số trong điều chỉnh độ phản ứng thì việc thay đổi nồng độ boron dễ thực hiện và an toàn hơn.

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 1, Hình 2, Hình 3, Hình 4 trình bày các giao diện.



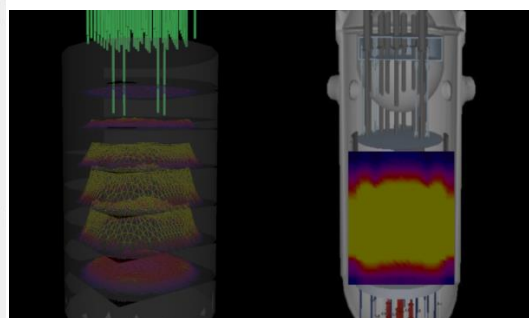
Hình 1. Giao diện thể hiện vị trí các nhóm thanh, các thông số của lò phản ứng



Hình 2. Giao diện điều khiển các nhóm thanh



Hình 3. Giao diện thay đổi các thông số trong lò



Hình 4. Giao diện hệ mô phỏng lõi lò OPR1000 hiển thị 3D

Khi khởi động lò OPR1000, các giá trị ban đầu gồm: nồng độ boron: 1800 ppm, nhiệt độ: 295,8 °C, áp suất: 158,2 kg/cm²a. Sở 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. Tiến hành 4 thí nghiệm kiểm tra tỉ số C_0/C_i trong các trường hợp sau:

ARO (All Rod Out) – rút hoàn toàn tất cả các nhóm thanh điều khiển và nhóm thanh an toàn;

ARI SB (All Rod In SB) – giữ nhóm thanh an toàn SB ở vị trí sâu nhất trong lò, đồng thời rút tất cả các nhóm thanh an toàn và điều khiển còn lại ra khỏi lò;

ARI R1 (All Rod In R1) - giữ nhóm thanh điều khiển R1 ở vị trí sâu nhất trong lò, đồng thời rút tất cả các nhóm thanh an toàn và điều khiển còn lại ra khỏi lò;

Cố định nhóm thanh điều khiển R5 ở vị trí 191 cm lò, đồng thời rút tất cả các nhóm thanh an toàn và điều khiển còn lại ra khỏi lò.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Để tiến hành khảo sát tìm hàm lượng boron khi lò phản ứng đạt trạng thái tới hạn, mô phỏng thực nghiệm tiến hành khảo sát bằng phương pháp chia đôi. Cụ thể, tiến hành pha loãng Boron từ điểm đầu là 1800 ppm, và điểm cuối của hàm lượng boron theo thông số thực khi vận hành lò OPR100 theo 4 trường hợp tương ứng là: 1089 ppm, 821 ppm, 1014 ppm, 1079 ppm [7]. Trường hợp ARO tiến hành thực hiện phương pháp chia đôi như sau: từ nồng độ boron ban đầu, 1800 ppm, ($\Delta C1 = 711$ ppm), để đảm bảo an toàn nhưng tiết kiệm thời gian đưa lò đạt trạng thái tới hạn, tiến hành đưa nồng độ boron giảm thêm không vượt quá $\Delta C1/2$. Mô phỏng thực nghiệm đưa nồng độ boron giảm thêm 300 ppm (nhỏ hơn $\Delta C1/2 \sim 350$

ppm) tức là nồng độ boron đạt 1390 ppm với thời gian ngắn nhất có thể (vì ở nồng độ này, độ phản ứng vẫn còn ở giá trị âm rất lớn (~ -3500 pcm), nên vẫn đảm bảo an toàn tuyệt đối của lò phản ứng mặc dù rút ngắn thời gian đạt tới hạn). Lần pha loãng thứ hai, từ nồng độ 1390 ppm ($\Delta C2 \sim 300$ ppm), tiến hành pha loãng boron trong thời gian 10 phút để nồng độ giảm thêm, $\frac{\Delta C2}{2} \sim \frac{300}{2} = 150$ ppm

nghĩa là nồng độ boron lúc này là 1240 ppm. Tiếp tục thực hiện phương pháp chia đôi để xác định hàm lượng boron khi lò phản ứng đạt trạng thái tới hạn ở trường hợp ARO và các trường hợp còn lại. Kết quả trình bày ở Bảng 2, Bảng 3, Bảng 4, Bảng 5, Hình 5, Hình 6, Hình 7, Hình 8.

Stt	Số đếm/s	Nồng độ boron (ppm)	Tỉ số C_o/C_i
1	4	1800	
2	10	1390	1,000000
3	19	1240	0,526316
4	34	1165	0,294118
5	59	1125	0,168634
6	80	1110	0,125628
7	101	1104	0,098619
8	118	1100	0,084531
9	130	1098	0,077220
10	136	1097	0,073529

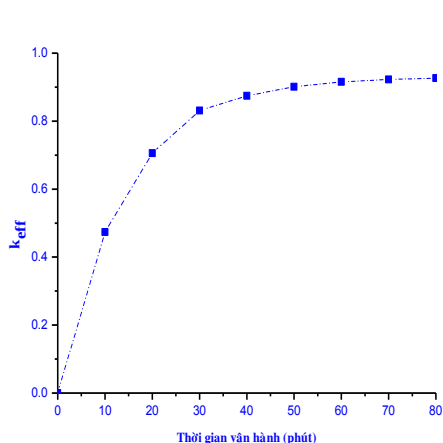
Bảng 4. Kết quả thay đổi hàm lượng boron bằng phương pháp chia đôi trong trường hợp ARI R1

Stt	Số đếm/s	Nồng độ boron (ppm)	Tỉ số C_o/C_i
1	2	1800	
2	3	1230	1,000000
3	4	1118	0,750000
4	6	1000	0,500000
5	9	950	0,333333
6	12	900	0,250000
7	16	850	0,187500
8	25	825	0,120000
9	36	810	0,083333
10	50	806	0,060000

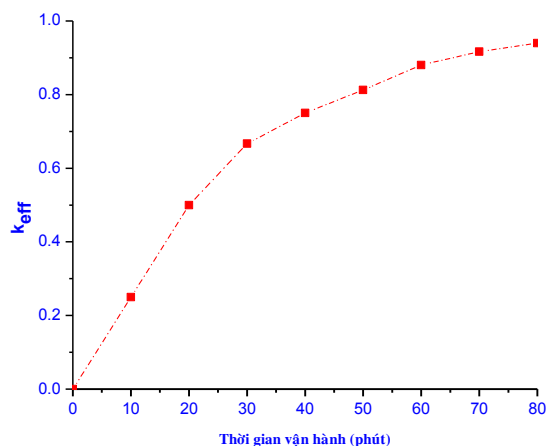
Bảng 5. Kết quả thay đổi hàm lượng boron bằng phương pháp chia đôi trong trường hợp R5 = 191 cm

Stt	Số đếm/s	Nồng độ boron (ppm)	Tỉ số C_o/C_i
1	4	1800	
2	10	1315	1,000000
3	20	1165	0,500000
4	36	1090	0,277778
5	50	1063	0,200401
6	67	1045	0,149031
7	82	1036	0,121951
8	92	1032	0,108696
9	105	1027	0,095238
10	131	1021	0,076336

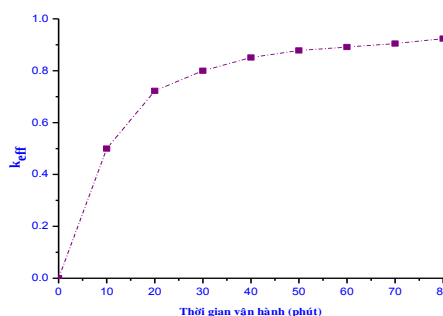
Stt	Số đếm/s	Nồng độ boron (ppm)	Tỉ số C_o/C_i
1	4	1800	
2	10	1379	1,000000
3	18	1229	0,555556
4	36	1154	0,277778
5	59	1117	0,169779
6	85	1099	0,117371
7	115	1090	0,086957
8	136	1086	0,073529
9	148	1084	0,067568
10	156	1083	0,064103



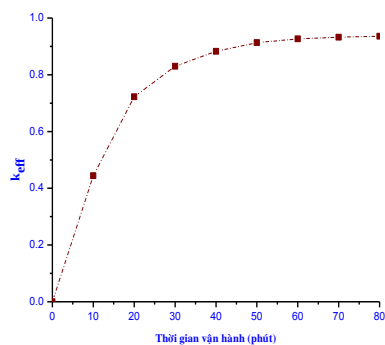
Hình 5. Kết quả thay đổi hàm lượng boron bằng phương pháp chia đôi trong trường hợp ARO



Hình 6. Kết quả thay đổi hàm lượng boron bằng phương pháp chia đôi trong trường hợp ARI SB



Hình 7. Kết quả thay đổi hàm lượng boron bằng phương pháp chia đôi trong trường hợp ARI R1



Hình 8. Kết quả thay đổi hàm lượng boron bằng phương pháp chia đôi trong trường hợp R5 = 191 cm

Từ kết quả mô phỏng thực nghiệm, khớp hàm phụ thuộc giữa hàm lượng boron và $1 - k_{eff}$ như sau:

Trường hợp ARO: $y = 0,0031x - 3,3777$

Trường hợp ARI SB: $y = 0,0021x - 1,6204$

Trường hợp ARI R1: $y = 0,0031x - 3,1126$

Trường hợp R5 = 191 cm: $y = 0,0032x - 3,3905$

trong đó x là nồng độ boron (ppm), $y = 1 - k_{eff}$.

Từ các hàm mô phỏng thực nghiệm, xác định hàm lượng boron cho các trường hợp để lò đạt trạng thái tới hạn. Bảng 6 trình bày các kết quả tính toán và so sánh với kết quả dự đoán (kết quả vận hành thực của lò OPR1000).

Bảng 6. Kết quả mô phỏng thực nghiệm và kết quả vận hành lò OPR1000

Vị trí nhóm thanh	Nồng độ boron xác định bằng mô phỏng thực nghiệm (Ccal) (ppm)	Nồng độ boron thu nhận bằng vận hành lò OPR1000 (Cpred) (ppm) [7]	(Ccal)/(Cpred)	Δk_{eff} (keff cal – keff pred)
ARO	1090	1089	1,001	-0,0018
ARI SB	772	821	0,940	0,1037
ARI R1	1004	1014	0,990	0,0308
R5 = 191 cm	1060	1079	0,982	0,0623

Kết quả mô phỏng thực nghiệm cho thấy việc sử dụng hệ CoSi OPR1000 cho các tham số mô phỏng gần giống với vận hành thực trên lò OPR1000. Hàm lượng boron trong đo đặc bằng hệ CoSi OPR1000 xấp xỉ với nồng độ boron trong vận hành lò. Kết quả ở Bảng 6 cho thấy tỉ số hàm lượng boron ở hệ CoSi OPR1000 và với vận hành lò OPR1000 gần bằng 1, trạng thái tới hạn trong trường hợp lò vận hành và trường hợp đo bằng hệ CoSi OPR1000 có sai số < 6,3 % cho cả 4 trường hợp.

KẾT LUẬN

Nồng độ boron trong lò phản ứng hạt nhân loại nước áp lực là một trong những điều kiện thay đổi độ phản ứng, trong nghiên cứu này đã chỉ ra sự phụ thuộc tới hạn của lò phản ứng OPR100 trong một số trường hợp cụ thể. Kết quả nghiên cứu đã xác định giá trị boron tới hạn cho 4 trường hợp: ARO,

ARI SB, ARI R1, R5. Bảng hệ mô phỏng CoSi OPR1000, số liệu thu được so với số liệu vận hành lò phản ứng OPR1000 rất trùng khớp nhau, với sai số lớn nhất là ~%. Điều này cho thấy tính dự đoán cao khi sử dụng hệ CoSi OPR1000 trong vận hành lò phản ứng OPR1000.

Ngoài tính dự đoán trong vận hành lò OPR1000, khả năng ứng dụng trong đào tạo, huấn luyện cho các kỹ sư vận hành lò OPR1000 cũng là vấn đề nổi bật của hệ mô phỏng này. 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 kỹ 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 ty Thủy điện và Điện hạt nhân Hàn Quốc đã tài trợ hệ CoSi OPR1000 để thực hiện nghiên cứu này.

Determination of the boron concentration of OPR 1000 reactor critical state using the Cosi OPR1000 system

- **Nguyen An Son**
- **Tran Trung Nguyen**
- **Tran Quoc Tuan**
- **Ly Quang Cuong**

Dalat University

- **Le Thi Ha Lan**

Tran Phu High School, Dalat

- **Van Le Quang**

Ninh Hoa Vocational School

ABSTRACT

In the operation of a nuclear power plant (NPP), to adjust the capacity of NPP is necessary. When the NPP capacity is changed the nuclear fission is also changed. The methods used in changing the capacity of NPP include: changing the boron concentration, changing the position of the control rod groups, and changing the boron concentrations and the position of the control rod groups together. This report presents some results

of the research, measurement boron concentrations when nuclear power plants OPR1000 critically state in the cases of ARO, ARI SB, ARI R1, R5 = 191 cm on the basis of the bisection method in the boron concentrations adjustment. The experiment is performed on core the simulator for OPR 1000 nuclear power plant. The results in the 4 cases were similar with NPP operating data using OPR1000 reactor.

Keywords: boron concentration, OPR1000 reactor, OPR1000 Core simulator.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclearpower-in-the-world-today.aspx>
- [2]. D.G. Cacuci, Handbook of nuclear engineering, Springer (2010).
- [3]. <http://www.kepco-enc.com/English/sub.asp?Mcode=B010020>
- [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]. J.C. Bryan, Introduction to nuclear science, Taylor & Francis Group (2013).
- [7]. Y.S. Choi, Zero Power Physics Test by using CoSi for OPR1000, KHNP (2014).