## KHẢO SÁT SỰ THAY ĐỔI CÔNG SUẤT LÒ PHẢN ỨNG THEO VỊ TRÍ THANH ĐIỀU KHIỂN SỬ DỤNG PHẦN MỀM MÔ PHỎNG E-CORSIM

Nguyễn Thị Nguyệt Hà<sup>1</sup> Trần Viết Nam<sup>1</sup> Nguyễn Thị Minh Sang<sup>1</sup> Phạm Thị Ngọc Hà<sup>1</sup>

## TÓM TẮT

Bài báo khảo sát sự thay đổi công suất của lò phản ứng nước áp lực (PWR) khi thay đổi vị trí của các thanh điều khiển. Thực nghiệm được tiến hành mô phỏng bằng phần mềm e-CORSIM. Kết quả mô phỏng cho thấy thời gian hoạt động lò càng dài thì vai trò của các thanh điều khiển càng quan trọng trong việc điều khiển công suất. Ngoài ra, vị trí của các thanh điều khiển trong lò phản ứng ảnh hưởng đến phân bố công suất giữa nửa trên và nửa dưới của lò.

**Từ khóa:** Phần mềm mô phỏng e-CORSIM, công suất, vị trí thanh điều khiển, lò phản ứng

#### 1. Mở đầu

Nhà máy điện hạt nhân đầu tiên trên thế giới sản xuất điện thương mại được xây dựng vào năm 1954 tại Obninsk, Liên Bang Nga. Theo thống kê của Cơ quan Năng lượng Nguyên tử Quốc tế IAEA (International Atomic Energy Agency), cho đến nay có tổng cộng 449 lò phản ứng đang hoạt động tại 30 quốc gia và có 54 lò phản ứng đang trong quá trình xây dựng [1]. Năng lượng hạt nhân được đánh giá là nguồn năng lượng sạch, có hiệu suất cao, công nghệ chế tạo ngày càng được hiện đại hóa đảm bảo tính an toàn và là một trong những giải pháp giải quyết nhu cầu năng lượng điện hiện nay trên toàn cầu.

Để đáp ứng nhu cầu phát triển nguồn nhân lực, các chương trình giáo dục và đào tạo về công nghệ hạt nhân sử dụng nguyên tắc mô phỏng được thiết lập ở nhiều nước trên thế giới, đặc biệt là các nước đang sử dụng điện hạt nhân. Những mô phỏng này hoạt động trên máy tính cá nhân và cung cấp cho người sử dụng những kỹ năng cơ bản trong vận hành nhà máy điện hạt nhân như khảo sát công suất, tính toán độ phản ứng, thay đổi vị trí các thanh nhiên liệu, thanh điều khiển...

E-CORSIM (Educational Core Simulator) là hệ mô phỏng thiết kế lõi lò được phát triển và sử dụng tại Viện nghiên cứu Năng lượng Nguyên tử Hàn Quốc (KAERI) với mục đích tính toán các thông số lò phản ứng, từ đó đưa ra những khuyến cáo phù hợp để đảm bảo an toàn khi vận hành. Hệ mô phỏng e-CORSIM được sử dụng cho lò phản ứng nước áp lực (PWR – Pressurized Water Reator) – là loại lò được sử dụng rộng rãi nhất trong các nhà máy điện hạt

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Trường Đại học Đà Lạt

Email: hantn@dlu.edu.vn

nhân, với 300 lò hoạt động hiện nay trên thế giới [2]. Các thông số, số liệu của e-CORSIM được lấy từ số liệu vận hành (số liệu thực) của nhà máy điện hạt nhân Yonggwang 3 [3]. Năm 2017, Viện KAERI đã tài trợ phần mềm mô phỏng e-CORSIM cho trường Đại học Đà Lạt.

Trong bài báo này, sự thay đổi công suất lò phản ứng theo vị trí thanh điều khiển sử dụng hệ mô phỏng e-CORSIM sẽ được khảo sát.

# 2. Phương pháp nghiên cứu2.1. Cơ sở lý thuyết

Hệ số nhân hiệu dụng là thước đo sự thay đổi số lượng neutron ở hai thế hệ kế tiếp nhau và được biểu diễn theo công thức:

$$k_{eff} = \frac{n_2}{n_1} \tag{1}$$

Trong đó:  $n_2$  là số neutron trong một thế hệ;  $n_1$  là số neutron trong thế hệ trước đó.

Để mô tả sự thay đổi trạng thái của lõi lò phản ứng, thay vì dùng hệ số nhân hiệu dụng, một thuật ngữ được gọi là độ phản ứng được sử dụng. Độ phản ứng  $\rho$  được xác định theo hệ số nhân hiệu dụng  $k_{\rm eff}$  trong phương trình sau:

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \tag{2}$$

Độ phản ứng được sử dụng như một phép đo độ lệch của lò phản ứng so với

trạng thái tới hạn. Trong quá trình vận hành lò phản ứng hạt nhân, hệ số nhân hiệu dụng cần được duy trì bằng 1, còn độ phản ứng bằng 0, tức là ở trạng thái tới hạn. Ngoài việc sử dụng boron để điều chỉnh và điều hòa độ phản ứng, người ta còn thực hiện điều khiển bằng cơ học, tức là sử dụng các thanh điều khiển trong việc thay đổi độ phản ứng để giảm hoặc nâng công suất, đưa lò phản ứng về giai đoạn hoạt động ổn định. Một thanh điều khiển có thể được rút ra khỏi hoặc chèn vào vùng hoạt của lò phản ứng để kiểm soát thông lượng neutron trong lò.

Trong lò phản ứng hạt nhân, các thanh điều khiển được kết nối lại theo từng nhóm. Một lò phản ứng phát điện điển hình có thể có 50 hoặc 60 nhóm thanh điều khiển, mỗi nhóm chứa khoảng 20 thanh [4]. Các thanh điều khiển được chế tạo bởi một chất hấp thụ neutron mạnh, thông thường các hợp kim của cadmium, indium, bạc, hafnium hoặc thép có chứa boron được sử dụng.

## 2.2. Phần mềm mô phỏng e-CORSIM

Trong bài báo này, quá trình khảo sát được tiến hành trên phần mềm mô phỏng e-CORSIM [3]. Hình 1 mô tả giao diện ban đầu của phần mềm. Giao diện chọn lựa các bó thanh nhiên liệu được minh họa ở hình 2.



Hình 1: Giao diện ban đầu của phần mềm e-CORSIM Phần mềm e-CORSIM được sử

dụng cho lò nước áp lực, có tổng cộng 177 bó thanh nhiên liệu trong lõi lò được chia theo các loại có độ giàu cho bởi bảng 1 [3]. Hình 3 biểu diễn ví dụ

e-CORSIM	20-1							0-0-0
	RESTART FI	LE				OUTPUT FILE		
	SELECT OFTLE			FILE NAME		SELECT CYCLE PLANT EFPO	FELE NAVE	
	18 4			MAS_RST.VG3Q_06_0471.34	÷.	[2] 4 YESQ 471.34	dapg_66.out	
	E 5			M45_R51.1030_05_0431.22		5 YE3Q 431.22	depq_05.out	
	12 4			HAS_RST.Y630_04_8374.13		4 YE3Q 374-13	depq_64.out	
	10 F			H45_R57.YG3Q_83_8942.98		3 YER 162.98	depq_00.out	
Loading Pattern	12 2			HAS_RST.YG3Q_02_8275.49		[2] 2 VE3Q 275.49	dept_82.out	
	8 1			MAS_RST.VG3Q_01_8378.26	×	1 YE3Q 378.26	depq_01.out	
	REFUEL LES	τ —						
	SELECT ALL	10	CYCLE	84T01 13		BURN UP	POSITION	
	12	36	4	42		17.463	10,12	1
	×	34	4	12		31.686	6_12	
	X	32	4	12		32.991	1,12	
	X	38	4	EØ		33.484	8_11	
	8	29	4	82		34,993	1,11	
	N.	28	4	62		17.687	i_11	
	30	26	4	63		20.436	7_11	
	N.	24	4	12		24.483	1,10	
	8	22	4	#2		33.322	N_10	
	R	21	4	п		31.654	P_10	
	×.	- 29	4	E2		41.296	1_10	
and the second	N	18	4	20		39.585	1_10	
	8	- 16	4	69		20.359	8_89	
	N	14	4	62		18.087	5,09	
	8	13	4	#2		33.826	1_09	
	5Z	12	4	42		38.649	L_89	
	N.	1	4	п		24.123	1,35	
	<u>8</u>	24	2	88		17.928	8_10	
	N	25	2	81		24,583	8,11	
	10	26	2	CØ		22.005	1_11	
	x	27	2	82		26.113	s_11	
	- R	29	2	C1		26.993	7,11	

Hình 2: *Giao diện chọn lựa* các bó thanh nhiên liệu cách bố trí các bó thanh nhiên liệu trong một chu trình. Các bó thanh nhiên liệu cùng loại được phân bố một cách đối xứng qua tâm của lõi lò phản ứng.

Lasi há thanh	Độ gi	àu U-235, %	Loại bó	Độ giàu U-235, %		
Loại do thanh nhiên liêu	Bình	Vùng giàu	thanh	Bình	Vùng giàu	
nmen neu	thường	thấp	nhiên liệu	thường	thấp	
A0	1,30		G0	4,10	3,62	
B0	2,37		G1	4,11	3,62	
B1	2,36	1,30	G2	4,12	3,61	
B2	2,37		H0	4,52	4,00	
C0	2,87	2,35	H1	4,50	4,00	
C1	2,87	2,36	H2	4,50	4,00	
D0	3,35	2,87	JO	4,48	4,00	
D1	3,36	2,85	J1	4,48	4,00	
D2	3,35	2,87	J2	4,48	4,00	
E0	4,08	3,61	K0	4,49	4,00	
E1	4,08	3,61	<b>K</b> 1	4,48	4,01	
E2	3,60	3,11	K2	4,48	4,01	
DS	3,35	2,85	K4	4,48	4,00	
F0	4,11	3,59	K5	4,48	4,00	
F1	4,11	3,59	K6	4,48	4,00	
F2	4.11	3.59				

Bảng 1: Tổng hợp các loại bó thanh nhiên liệu



Hình 3: Cách bố trí các bó thanh nhiên liệu trong một chu trình

Cách phân bố các nhóm thanh điều khiển và các nhóm thanh an toàn được mô tả ở hình 4.





#### 2.3. Mô phỏng thực nghiệm

Trong nghiên cứu này chu trình nhiên liệu được bố trí như hình 5. Ở đây phần mềm mô phỏng e-CORSIM cho thấy cách sắp xếp các bó thanh nhiên liệu ở góc một phần tư của lõi lò phản ứng.

e-CORSIM															-	o ×
	1	/4 REACT	OR CORE !	IODEL -						C NE	WFUEL					
$\sim$	-	H H2	J1	K K4	L J2	M H2	N K2	P J2	R H2			BATCH ID		ENRICHMENT	AXIAL CUTBACK	
KAERI Research Institute	8	L_08 (2)	J_09 (1)	- 4 50	P_08 (2)	R_08 (2)	- 4 50	K_08 (2)	N_08 (2) 39.065	_		кө		4.50	NO	
		0.9202	1.1542	1.2489	1.1479	1.0076	1.3001	0.9931	0.4541			K1		4.50	YES	
	-	31	30	H2	31	32	на	К5	30			К2		4.50	YES	
Resetting	9	J_09 (0) 22.746	N_13 (2) 12.186	M_11 (0) 40.174	P_10 (2) 19.059	N_09 (0) 22.760	N_12 (3) 31.283	4.50	R_09 (2) 13.464			К4		4.50	YES	
		1.1542	1.2750	0.9402	1.1766	1.1414	1.0783	1.2142	0.6152			К5		4.50	YES	
Fix Core		К4	H2	Кб	J1	К4	J0 P 11 (2)	К6	H2			K6		4.50	YES	
	10	4.50	40.162	4.50	22.633	4.50	15.744	4.50	39.373							
EFPD : 30		1.2489	0.9402	1.2940	1.1444	1.2883	1.2711	1.1096	0.3529							EDIT
Single Run		J2 P_08 (1)	J1 K_14 (2)	J1 J_11 (1)	H0 M_08 (3)	H0 N_11 (1)	J2 M_12 (0)	кө -		RE	FUEL					
	11	20.731	19.055	22.718	33.727	32.223	21.807	4.50		۷	CYCLE	BATCH ID	POSITION	BURNUP	SYMMETRY	
	-	1.1479	1.1759	1.1424	0.9744	1.0050	1.0814	0.9848		$\checkmark$	6	32	P_08	20.731	J2(H_14)	^
EFPD : 30		HZ R_08 (1)	J_ J_13 (0)	-	HØ L_13 (3)	-	-	H1 N_10 (2)			6	J2	H_14	20.731	J2(P_08)	
Cycle Depletion	12	31.847	22.821	4.50	32.122	4.50	4.50	37.607		$\checkmark$	6	32	N_09	22.760	J2(J_13)	
	-	1.0076	1.1396 H0	1.2050	1.0033	×1	H2	0.3859			6	32	H_10	23.039	J2(K_08)	
Reactivity Calculation	13	-	M_13 (1)	L_14 (1)	L_11 (2)	-	K_10 (0)	NOUSE L SYMMETR	EFT DRAG RY BATCH	$\checkmark$	6	32	L_11	22.451	-	
Result View	15	4.50	31.245	15.684	22.451	4.50	37.434	MOUSE RI SINGLE	EGHT DRAG	$\checkmark$	6	32	J_13	22.821	J2(N_09)	
result from	-	32	K5	1.2072 K6	1.0005 K0	Н1	0.4001	BATCH ID		$\checkmark$	6	32	K_08	23.039	J2(H_10)	
	14	K_08 (1)	- 4 50	- 4 50	- 4 50	K_13 (2)		POSITION BURNUP &	(QUADRANT) ENRICHMENT	1	6	32	M_12	21.807	-	
		0,9931	1.2123	1.1052	0.9774	0.3830			POWER	~	6	J1	P_10	19.059	J1(K_14)	
	-	H2	30	H2	BORON	(PPM): 122	J 8.808	K6		$\checkmark$	6	31	J_11	22.718	J1(L_09)	
	15	N_08 (1) 39,065	J_15 (2) 13,458	K_12 (0) 39,393	EFPD	: )	0.000	- 4.50	0 90'	1	6	J1	K_14	19.055	J1(P_10)	
Core All Clear		0.4541	0.6142	0.3516	MAXIMU MAXIMU	MFQ: 1 MFR: 1	.5123	1.2940	270	~	6	J1	L_09	22.633	J1(J_11)	
Core / In Creat				יש או ש		8 81	SEC			$\checkmark$	6	J1	J_09	22.746	-	
Screen Capture	Г			ADJOIN	IT =	0.00	SEC		^	~	6	30	P_11	15.744	J0(L_14)	
	Γ			SHAPE	MATCH=	0.00 0.00	SEC			~	6	30	L_14	15.684	J0(P_11)	
HOME	08	1:05.90 J	OB FINISHE	D AT 16:54	1:44.				~	1	6	30	R_09	13.464	J0(J_15)	~
	-									_	_					_

Hình 5: Cách sắp xếp bó thanh nhiên liệu được sử dụng để mô phỏng

Tiến hành khảo sát ba trường hợp điều chỉnh công suất khác nhau của lò phản ứng: bằng cách thay đổi vị trí thanh điều khiển ở đầu và ở giữa chu trình nhiên liệu (trường hợp 1 và 2 tương ứng) và bằng cách sử dụng cả thanh điều khiển và boron ở đầu chu trình nhiên liệu (trường hợp 3). Thời gian khảo sát cho mỗi trường hợp là 57 giờ. Trong mỗi trường hợp, công suất được thay đổi theo những khoảng thời gian giống nhau (3 giờ), hơn nữa sau khi tăng hoặc giảm, công suất sẽ được duy trì ổn định tại đó trước khi chuyển sang mức công suất kế tiếp. Tiến hành thay đổi công suất từ 100 % xuống 50 %, sau đó trở về 100 % như hình 6.



Hình 6: Biểu đồ sự thay đổi công suất

#### 3. Kết quả và thảo luận

Kết quả mô phỏng vị trí thanh điều khiển theo thời gian ứng với sự thay đổi công suất như hình 6 được thể hiện qua hình 7. Để giảm công suất các thanh điều khiển có xu hướng được chèn vào lò phản ứng, ngược lại muốn công suất tăng thì các thanh diều khiển cần phải

kiểm soát lò phản ứng giảm khi lò chạy

trường hợp còn lại (hình 7c). Đồng thời,

trong quá trình điều khiển không cần

đến sư có mặt của nhóm thanh R3. Điều

này đảm bảo an toàn hơn trong trường

Khi có sự tham gia của boron các thanh điều khiển ít chèn sâu hơn hai

được nửa chu trình.

hợp khẩn cấp.

được rút ra khỏi lò. Từ hình 7a và 7b cho thấy so với thời điểm đầu chu trình thì ở giữa chu trình nhiên liệu các thanh điều khiển đóng góp vai trò lớn hơn và được chèn vào sâu hơn, đặc biệt nhóm thanh R3 tham gia sớm hơn vào việc điều khiển công suất (sau 25 giờ thực nghiệm ở giữa chu trình so với 34 giờ tại đầu chu trình), do các thành phần





Để so sánh sự thay đổi độ sâu của thanh điều khiển ở mỗi thời điểm vận hành trong lò phản ứng, độ dịch chuyển thanh điều khiển so với tổng độ dài thanh được tính theo công thức sau:

$$\Delta x(\%) = \frac{X_i - X_{i-1}}{L} \cdot 100$$
 (3)

Trong đó:  $\Delta x$  là độ dịch chuyển (%);  $X_i$  là vị trí thanh điều khiển trong

lò phản ứng tại thời điểm hiện tại (cm);  $X_{i-1}$  là vị trí thanh điều khiển trong lò phản ứng tại thời điểm liền kề trước đó (cm) so với đáy lò; L là độ dài của thanh điều khiển (L = 381 cm).

Hình 8 biểu diễn kết quả thực nghiệm của độ dịch chuyển thanh điều khiển trong lò phản ứng.



Hình 8: Độ dịch chuyển thanh điều khiển trong lò phản ứng ở trường hợp 1 (a); trường hợp 2 (b) và trường hợp 3 (c)

Độ dịch chuyển có giá trị dương khi thanh điều khiển được rút ra và có giá trị âm khi thanh được chèn thêm vào lò phản ứng so với vị trí của nó ở thời điểm liền kề trước đó. Độ dịch chuyển bằng không khi vị trí thanh điều khiển không đổi.

Trong một số giai đoạn có hai nhóm thanh điều khiển di chuyển đồng thời với độ dịch chuyển như nhau, có thể quan sát được qua sự trùng nhau của hai đường ở các giai đoạn đó qua hình 8. Khi chỉ có một nhóm thanh đóng vai trò điều khiển công suất thì độ dịch chuyển của nhóm thanh này ở những giai đoạn đó lớn hơn so với các giai đoạn có sự tham gia của hai nhóm.

Quá trình dịch chuyển thanh điều khiển lên xuống dọc theo chiều cao của lõi lò phản ứng gây ra sự chênh lệch công suất giữa nửa trên và nửa dưới của lõi lò. Đại lượng đặc trưng cho sự chênh lệch này gọi là offset dọc trục (hệ số AO – Axial Offset). Kết quả mô phỏng cho biết hệ số AO trong cả ba trường hợp như hình 9.



Hình 9: Sự thay đổi hệ số AO theo thời gian

Từ hình 9 thấy rằng sự phân bố công suất xảy ra không đồng đều trong trường hợp 2 so với hai trường hợp còn lại do có sự chèn sâu hơn của thanh điều khiển ở trong lò phản ứng. Sau khi tiến hành thực nghiệm 24 - 30 giờ hệ số AO ở trường hợp 2 đạt 20 %, gấp đôi và hệ số này gấp ba lần (sau 45 giờ) so với hai trường hợp còn lại.

#### 4. Kết luận

Sự thay đổi công suất lò phản ứng theo vị trí thanh điều khiển được tiến hành khảo sát trên phần mềm mô phỏng e-CORSIM. Kết quả mô phỏng cho thấy thời gian hoạt động lò càng dài thì vai trò của các thanh điều khiển càng quan trọng thông qua sự xuất hiện của nhiều nhóm thanh hơn trong việc điều khiển công suất. Trong thực tế, kèm theo phương pháp sử dụng thanh điều khiển, người ta kết hợp điều chỉnh nồng độ boron trong vận hành lò phản ứng. Ngoài ra, vị trí của các thanh điều khiển trong lò phản ứng ảnh hưởng đến phân bố công suất giữa nửa trên và nửa dưới của lò.

Phần mềm mô phỏng e-CORSIM là công cụ hữu ích cho công tác nghiên cứu và đào tạo, với mục đích cung cấp cho người sử dụng những kiến thức, kỹ năng thiết kế và vận hành lõi lò phản ứng hạt nhân, góp phần đáp ứng việc đào tạo nguồn nhân lực về hạt nhân trong tương lai.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. "PRIS – Reactor status reports – Operational & Long-Term Shutdown Reactors – By Country", Pris.iaea.org, 2019. [Online]. Available: https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx. [Accessed: 25<sup>th</sup> September 2019]

2. "PRIS – Reactor status reports – Operational & Long-Term Shutdown Reactors – By Type", Pris.iaea.org, 2019. [Online]. Available: https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx. [Accessed: 25<sup>th</sup> September 2019] 3. Chang, Jonghwa (2015). Development of PC Based Core Simulator for Education and Training Utilizing KAERI's Core Analysis Code. KAERI/CM-2268

4. Lamarsh, J.R. (1966). Introduction to Nuclear reactor theory. Third Edition, Addison Wesley Publishing, New Jersey

## SURVEY ON THE CHANGE OF POWER REACTOR BY THE CONTROL ROD POSITION USING THE E-CORSIM SIMULATOR ABSTRACT

The paper surveys the power change of the Pressurized Water Reactor (PWR) by changing the position of control rods. The experiment was simulated by e-CORSIM software. The results showed that the longer operating time, the more important the role of the control rods in controlling power. In addition, the position of the control rods in the reactor affects the power distribution between the upper and lower halves of the reactor.

Keywords: e-CORSIM simulator, power, control rod position, reactor

(Received: 21/11/2019, Revised: 28/11/2019, Accepted for publication: 30/11/2020)