

TÍNH TOÁN NEUTRON CHO Lò NGHIÊN CỨU HẠT NHÂN ĐÀ LẠT BẰNG CHƯƠNG TRÌNH MVP

NGUYỄN VĂN HIỆN

Trung Tâm Năng Lượng Hạt Nhân - Viện Khoa Học và Kỹ Thuật Hạt Nhân

179 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội

e-mail: nguyenvanhien0111@yahoo.com

Tóm tắt: Báo cáo này giới thiệu tổng quan về phương pháp Monte Carlo, các đặc trưng chính của Lò Phản ứng Hạt nhân Đà Lạt, các mô tả chi tiết chương trình MVP và các kết quả tính toán neutron cho lò phản ứng này bằng MVP. Các tính toán được thực hiện với lò sạch, ở giai đoạn vận hành thử năm 1984. Hiệu quả của việc sử dụng chương trình MVP đã được khẳng định bằng cách so sánh các kết quả tính toán bằng chương trình này với các số liệu thực nghiệm và các kết quả tính toán từ các chương trình khác (MCNP4c2, SRAC). Với hình học và lịch sử vận hành phức tạp như Lò Phản ứng Hạt nhân Đà Lạt, tính toán bằng chương trình MVP là lựa chọn tốt vì có thể mô tả đúng theo dạng hình học và sử dụng năng lượng liên tục trong tính toán. Khác biệt giữa kết quả tính toán và thực nghiệm là chấp nhận được. Bằng việc sử dụng phương pháp Monte Carlo, năng lượng neutron liên tục từ các thư viện JENDL3.3, ENDFB-6.8, JEFF-3.0, JEF-2.2.... MVP là một chương trình hữu dụng trong tính toán vật lý lò phản ứng.

Từ khóa: Phương pháp Monte Carlo, chương trình MVP, Lò nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt, tính toán neutronic.

I. MỞ ĐẦU

Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt (LPUHNĐL) được khôi phục và mở rộng từ lò phản ứng TRIGA MARK II vào những năm 1982-1983 và bắt đầu được đưa vào hoạt động từ đầu năm 1984 với công suất danh định 500 kW. Việc nghiên cứu các đặc trưng vật lý neutron và các quá trình vật lý diễn ra trong lò phản ứng trong quá trình hoạt động của nó là hết sức cần thiết nhằm thỏa mãn yêu cầu nghiên cứu khoa học và bảo đảm vận hành lò an toàn, đặc biệt phục vụ “Chiến lược ứng dụng năng lượng nguyên tử vì mục đích hòa bình đến năm 2020” đã được Thủ Tướng Chính Phủ phê duyệt ngày 03 tháng 01 năm 2006. Nhiều đề tài nghiên cứu vật lý lò cho LPUHNĐL đã được thực hiện và nhiều công trình nghiên cứu khoa học đã hoàn thành. Trong đó có hai lĩnh vực được tập trung nghiên cứu là tính toán thủy nhiệt và tính toán neutron.

- Để tính toán neutron, chúng ta phải nghiên cứu quá trình vận chuyển neutron, đó là sự chuyển động của các neutron bên trong vùng hoạt LPU, bao gồm quá trình tán xạ với các hạt nhân nguyên tử, quá trình bị hấp thụ và bị rò thoát ra khỏi vùng hoạt LPU. Phương trình tổng quát mô tả quá trình vận chuyển neutron dạng vi - tích phân có dạng:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t)}{\partial t} + \vec{\Omega} \cdot \nabla \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) + \Sigma_t(\vec{r}, E) \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) = \int_0^{\infty} dE' \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \Sigma_s(\vec{r}, E') f(\vec{r}, \vec{\Omega}', E' \rightarrow \vec{\Omega}, E) \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}', E', t) + S(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t)$$

- Hai phương pháp gần đúng quan trọng hay được sử dụng để giải phương trình vận chuyển này là phương pháp giải tích hay phương pháp tất định và phương pháp mô phỏng Monte Carlo.

- Phương pháp Monte Carlo là một phương pháp số dựa trên lý thuyết thống kê dùng để giải các bài toán bằng cách mô phỏng các đại lượng ngẫu nhiên. Phương pháp này không giải các phương trình một cách tường minh như các phương pháp khác mà kết quả thu được bằng cách mô phỏng từng hạt riêng lẻ và ghi lại tính cách trung bình của hạt mô phỏng.

- Chương trình MVP sử dụng phương pháp Monte Carlo, để giải bài toán vận chuyển neutron, photon và cặp neutron-photon trong không gian ba chiều, với năng lượng liên tục và phụ thuộc vào thời gian. Chương trình MVP có thể chạy trên hệ điều hành Window hoặc Linux. Các thư viện tiết diện cho quá trình vận chuyển neutron là JENDL-3.3, JENDL-3.2, ENDFB-

6.8, JEFF-3.0, JEF-2.2 với dải năng lượng liên tục từ 10^{-5} eV đến 20 MeV. So với các phiên bản trước, phiên bản gần đây nhất đã bổ sung thêm nhiều chức năng để đáp ứng nhu cầu của người sử dụng như phân tích tiếng ồn lò phản ứng, mẫu hình học thống kê, biên của lưới hình học có hình dạng bất kỳ....

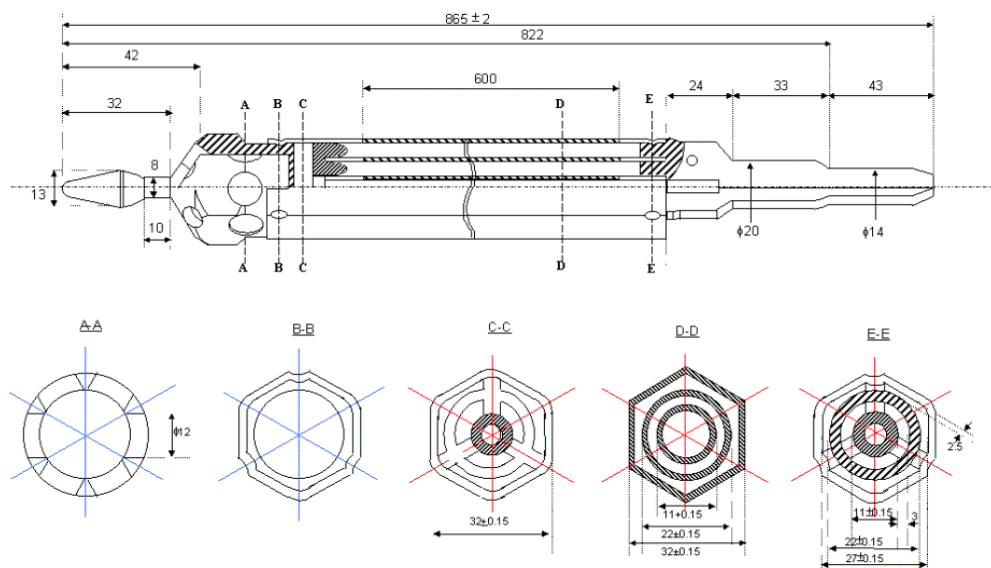
- Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt (LPUHNĐL) được khôi phục và mở rộng từ lò phản ứng TRIGA MARK II và được đưa vào vận hành từ đầu năm 1984. Đây là loại lò kiểu bể bơi, dùng nước nhẹ làm chất làm chậm và tải nhiệt, sử dụng nhiên liệu loại VVR-M2 của Nga. Lò có thể được vận hành với công suất cực đại 500kW. Tại mức công suất này, thông lượng neutron nhiệt trung bình trong vùng hoạt khoảng 4×10^{12} neutrons/cm².s.

- Vùng hoạt Lò phản ứng được làm chậm và tải nhiệt bằng nước đã khử khoáng, được phản xạ chủ yếu nhờ graphite và một lượng nhỏ beryllium bao quanh bên ngoài rìa vùng hoạt. Ngoài ra, còn có một số thanh beryllium bao quanh một kênh nước ở tâm của vùng hoạt. Lò phản ứng được điều khiển và bảo vệ bằng 6 thanh điều khiển làm bằng boron carbide B₄C có vỏ bọc thép không rỉ bên ngoài (2 thanh an toàn và 4 thanh bù trừ) và một thanh điều khiển tự động làm bằng thép không rỉ. Mỗi thanh được treo bằng cáp nối với từng động cơ dẫn động riêng. Các thanh dịch chuyển theo chiều thẳng đứng bên trong ống nhôm đặt xuyên qua vùng hoạt. Các thanh an toàn và bù trừ (nếu đã được rút lên một phần) có thể rơi hoàn toàn trong vùng hoạt với thời gian nhỏ hơn 1 giây bằng cách rơi tự do dưới tác động của trọng lực để dập tắt phản ứng dây chuyền. Chiều dài hấp thụ của các thanh điều khiển là 650mm, đủ để phủ hoàn toàn chiều cao hiệu dụng của vùng hoạt Lò phản ứng.

Bảng 1.1 Đặc trưng của các bó nhiên liệu HEU

Thông số	BNL HEU VVR-M2
Độ giàu, %	36
Khối lượng ²³⁵ U trung bình, g	40,20
Thành phần nhiên liệu	U-Al Alloy
Mật độ Uranium của phần nhiên liệu, g/cm ³	1,40
Vật liệu vỏ bọc	Al alloy (SAV1)
Độ dày thanh nhiên liệu (Nhiên liệu và vỏ bọc), mm	2,50
Độ dày nhiên liệu, mm	0,70
Độ dày vỏ bọc, mm	0,90

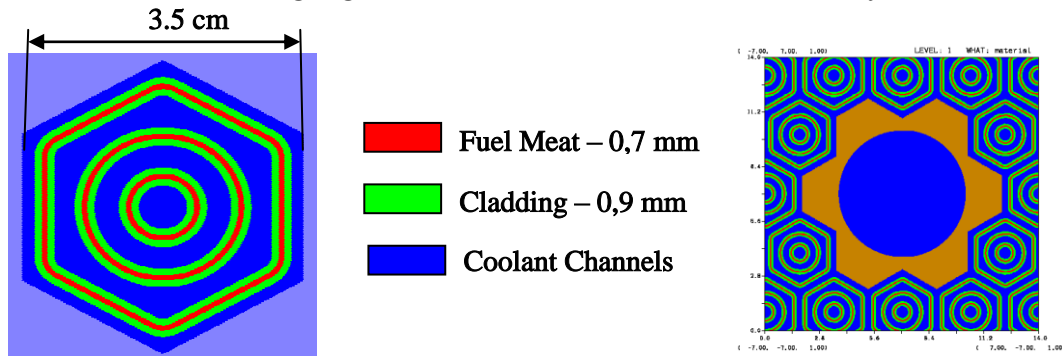
Hình 1.1. Bó nhiên liệu độ giàu cao (HEU) loại VVR-M2



II. MÔ HÌNH TÍNH TOÁN

2.1 Mô hình bó nhiên liệu

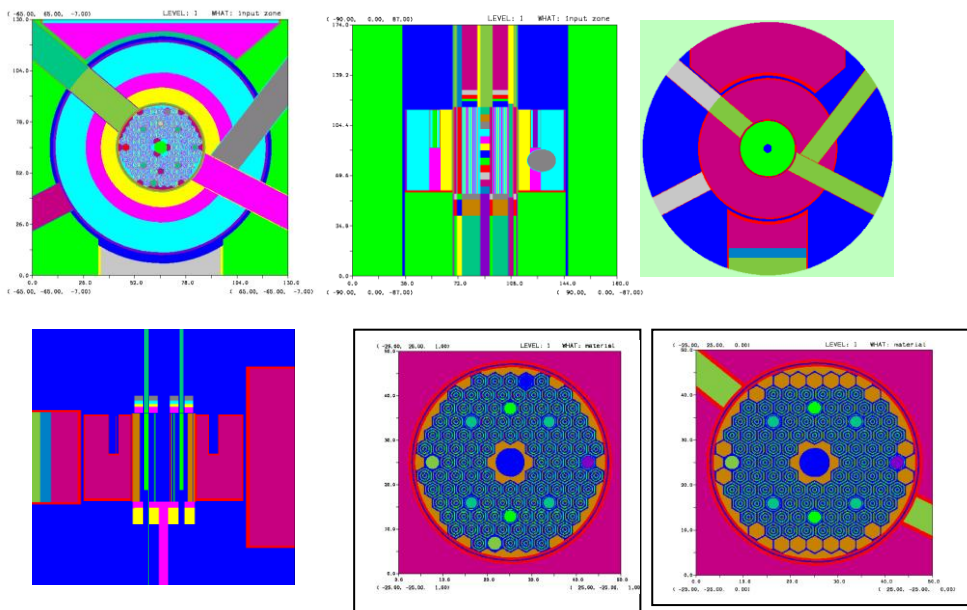
Hình 2.1 Mặt cắt ngang của BNL HEU loại VVR-M2 và bẫy neutron



2.2 Mô hình vùng hoạt lò Đà Lạt

Chương trình MVP, cùng với thư viện JENDL-3.3... có thể mô tả tương đối tốt, chi tiết hình học các cấu kiện của LPUHNDL. Vùng hoạt của lò được mô tả trong hình trụ bán kính 21,35 cm, chiều cao 60 cm, được xếp theo mạng lục giác với bước ô mạng là 3,5 cm. 7 ô mạng trung tâm dùng để lắp đặt bẫy neutron bằng beryllium. Hệ điều khiển và bảo vệ an toàn lò gồm 7 thanh điều khiển, 6 bằng B₄C và 1 bằng thép không gỉ. Ngoài ra trong vùng hoạt lò còn có 2 kênh chiếu mẫu bằng khí nén và một kênh ướn. Vành phản xạ chính bằng graphite bao quanh vùng hoạt có đường kính trong là 45,7 cm dày 30,5 cm và cao 55,9cm (bao gồm cả 40 hốc chiếu). Ngoài ra còn có một lớp phản xạ bằng beryllium. Mô hình dùng để tính toán được mô tả trong hình trụ đường kính 196 cm, chiều cao 187 cm (từ đáy đến tâm là 89,5 cm, từ tâm đến đỉnh là 97,5 cm) trong đó tâm của vùng hoạt trùng với tâm của vành phản xạ graphite. Hình 2.2 cung cấp mô hình Lò phản ứng theo chiều bán kính và chiều cao. Các cấu trúc như thùng lò bằng nhôm, khối graphite, khối bê-tông, vành phản xạ graphite, vành phản xạ berili, được mô tả với hình dạng và kích thước giống như cấu hình thực.

Hình 2.2 Mô hình Lò phản ứng theo chiều bán kính và chiều cao



III. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

3.1 Hệ số nhân hiệu dụng

Bảng 3.1a So sánh kết quả tính bằng MVP với kết quả tính bằng MCNP [4; 5]

Số BNL	Vị trí các thanh điều khiển (cm)					k_{eff} MVP	k_{eff} MCNP	Độ lệch (%)
	BT1	BT2	BT3	BT4	TĐ			
69	0	0	0	6,5	0	$1,001210 \pm 0,000199$	$1,00111 \pm 0,00020$	0,00999
72	0	0	0	19,5	0	$0,999721 \pm 0,000241$	$1,00087 \pm 0,00020$	- 0,11493
74	0	44,2	0	0	0	$1,001600 \pm 0,000186$	$1,00145 \pm 0,00020$	0,01498
75	0	36,5	0	0	65	$0,998806 \pm 0,000202$	$0,99916 \pm 0,00021$	- 0,03544
86	36,3	36,3	36,3	36,3	65	$1,000940 \pm 0,00020$	$1,00166 \pm 0,00023$	- 0,07193
86	51,5	0	65,0	51,5	20	$0,997605 \pm 0,000195$	$0,99953 \pm 0,00039$	- 0,19296
88	45	45	45	45	65	$0,999758 \pm 0,000215$	$1,00053 \pm 0,00020$	- 0,07722
88	47,2	47,2	47,2	47,2	0	$0,998683 \pm 0,000210$	$0,99920 \pm 0,00020$	- 0,05177
88	45,7	45,7	45,7	45,7	40	$1,000060 \pm 0,000209$	$0,99993 \pm 0,00023$	0,01300
88	46,7	46,7	46,7	46,7	20	$0,999379 \pm 0,000212$	$0,99938 \pm 0,00020$	- 0,00010
Giá trị trung bình						$0,9997762 \pm 0,000207$	$1,000282 \pm 0,000226$	-0,05059

Bảng 3.1b So sánh kết quả tính bằng MVP với kết quả tính bằng SRAC [4; 5]

Số BNL	Vị trí các thanh điều khiển (cm)					k_{eff} MVP	k_{eff} SRAC	Độ lệch (%)
	BT1	BT2	BT3	BT4	TĐ			
69	0	0	0	6,5	0	$1,001210 \pm 0,000199$	0,99953	0,16780
72	0	0	0	19,5	0	$0,999721 \pm 0,000241$	1,00250	- 0,27798
74	0	44,2	0	0	0	$1,001600 \pm 0,000186$	0,99879	0,28055
75	0	36,5	0	0	65	$0,998806 \pm 0,000202$	0,99870	0,01061
86	36,3	36,3	36,3	36,3	65	$1,000940 \pm 0,000200$	1,00035	0,05894
88	45	45	45	45	65	$0,999758 \pm 0,000215$	1,00052	- 0,07624
88	47,2	47,2	47,2	47,2	0	$0,998683 \pm 0,000210$	0,99885	- 0,01672
88	45,7	45,7	45,7	45,7	40	$1,000060 \pm 0,000209$	0,99977	0,02900
88	46,7	46,7	46,7	46,7	20	$0,999379 \pm 0,000212$	0,99880	0,05794
Giá trị trung bình						$1,000017 \pm 0,000208$	0,999757	0,02600

Nhận xét: Sự khác nhau giữa các kết quả tính toán bằng MVP, MCNP, SRAC là không nhiều. Như vậy, các chương trình này đều có thể được áp dụng tốt cho tính toán tới hạn lò Đà Lạt. Điều này càng làm phong phú thêm các chương trình mô phỏng Monte Carlo để giải phương trình vận chuyển neutron và các ứng dụng khác.

3.2 Độ phản ứng dự trữ

Bảng 3.2 Độ phản ứng dự trữ

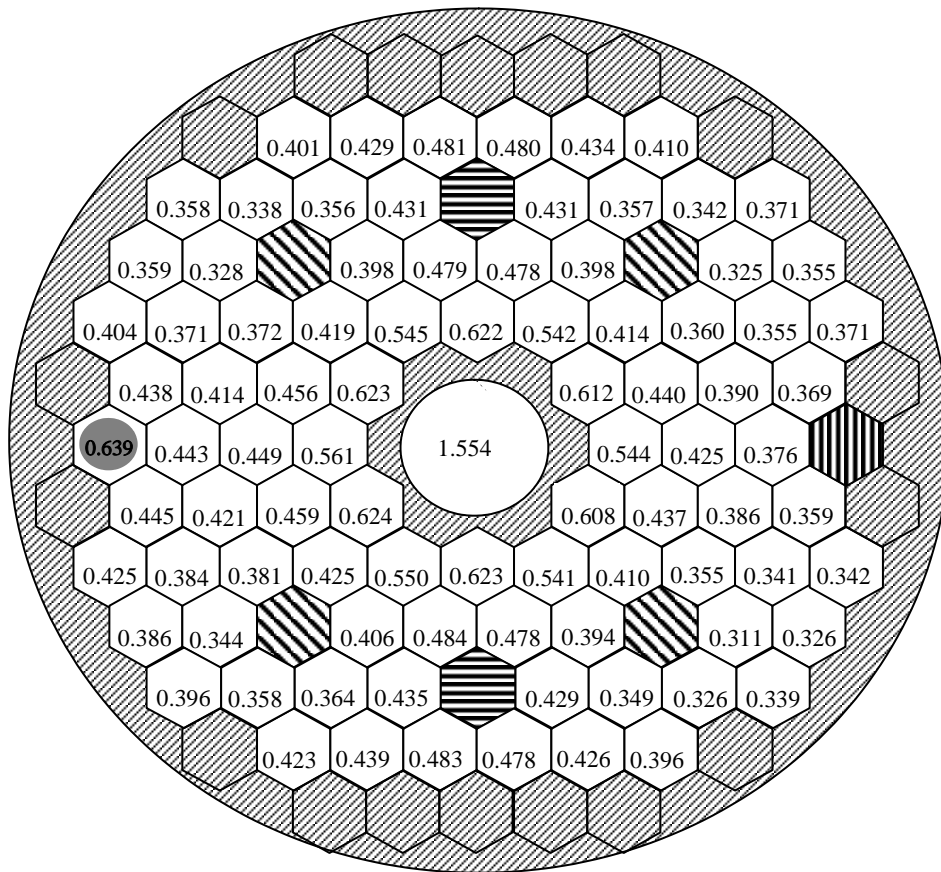
Cấu hình	k_d (Tính bằng MVP)	Kết quả MVP ρ_{dc} (%)	Kết quả MCNP ρ_{dc} (%)	Kết quả thực nghiệm ρ_{dm} (%)
69BNL	$1,00172 \pm 0,00021$	0,1717047		
72BNL	$1,00425 \pm 0,00019$	0,4232014		
74BNL	$1,02045 \pm 0,00019$	2,0040178	2,5538527	1,6929
75BNL	$1,02193 \pm 0,00019$	2,1459395	2,6763990	
86BNL	$1,06735 \pm 0,00019$	6,3100201	6,8615124	6,075
88BNL	$1,08464 \pm 0,00026$	7,8035108	7,9604966	7,9785

Nhận xét: Đối với cấu hình 88 BNL, có sự phù hợp tương đối tốt giữa các kết quả tính toán bằng MVP, MCNP và kết quả thực nghiệm. Các trường hợp khác có sự sai lệch nhiều.

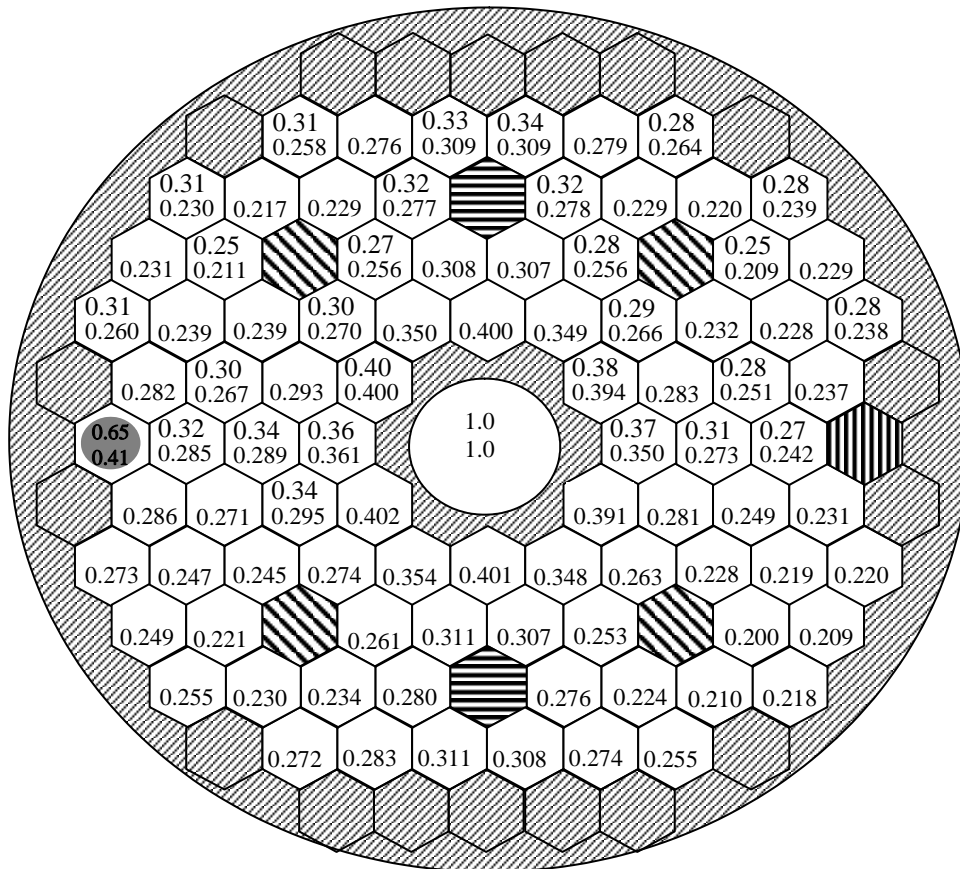
3.3 Phân bố thông lượng neutron nhanh và nhiệt

Cấu hình 88 BNL, phân bố thông lượng neutron nhiệt

Nhận xét: Kết quả tính cho thấy, thông lượng neutron nhiệt ở bẫy neutron và ở kênh khô 7-1 là lớn nhất. Có sự phù hợp tốt giữa kết quả tính toán và kết quả thực nghiệm tại các ô xung quanh bẫy neutron. Đối với một số ô ở xa bẫy, có sự sai lệch đáng kể giữa kết quả tính toán và kết quả thực nghiệm. Thông lượng neutron nhanh trung bình bằng $0,5045 \cdot 10^{13}$ neutrons/cm².s

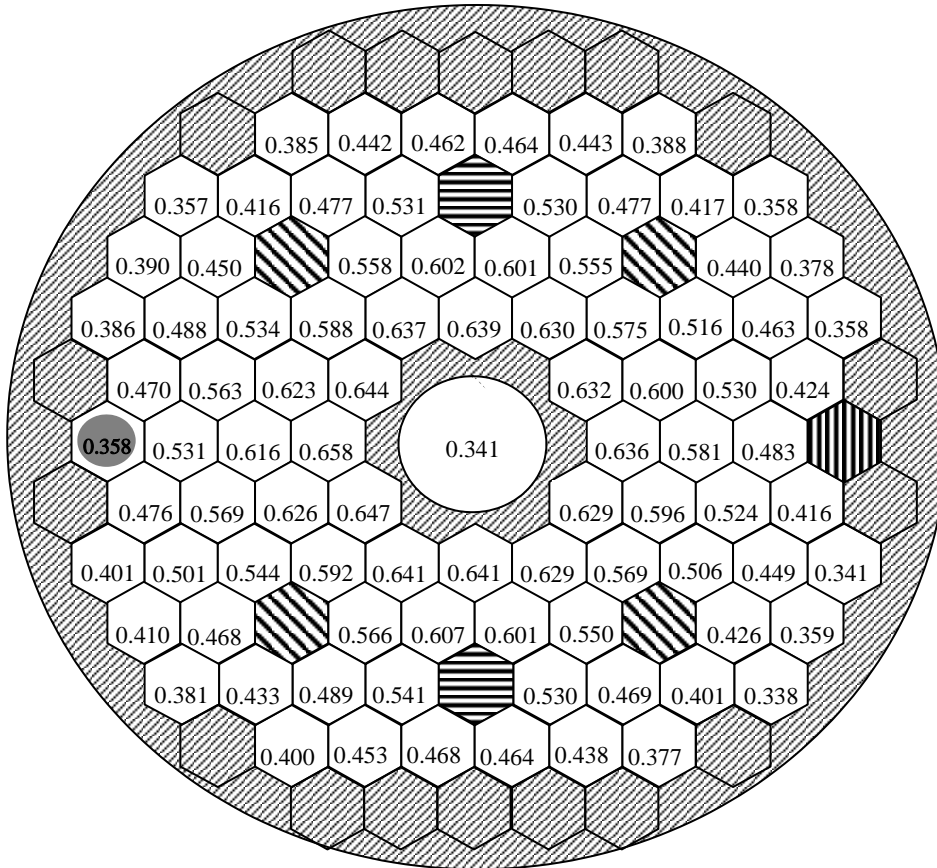


Hình 3.1 Phân bố thông lượng neutron nhiệt ($1e-05$ eV đến $0,625eV$) của vùng hoạt với 88BNL (Giá trị trong ô nhân với 10^{13} neutrons/cm².s).

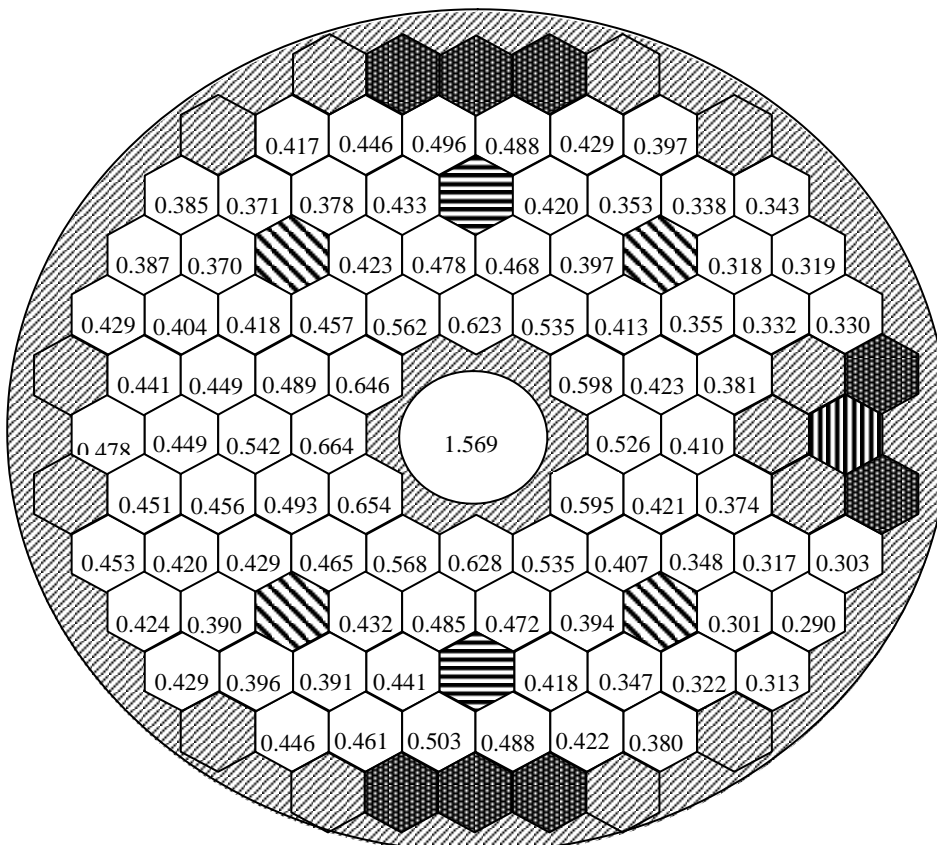


Hình 3.2 So sánh thông lượng neutron nhiệt tại vùng hoạt với 88 BNL giữa số liệu thực nghiệm (ở trên) và số liệu tính toán từ chương trình MVP (ở dưới).

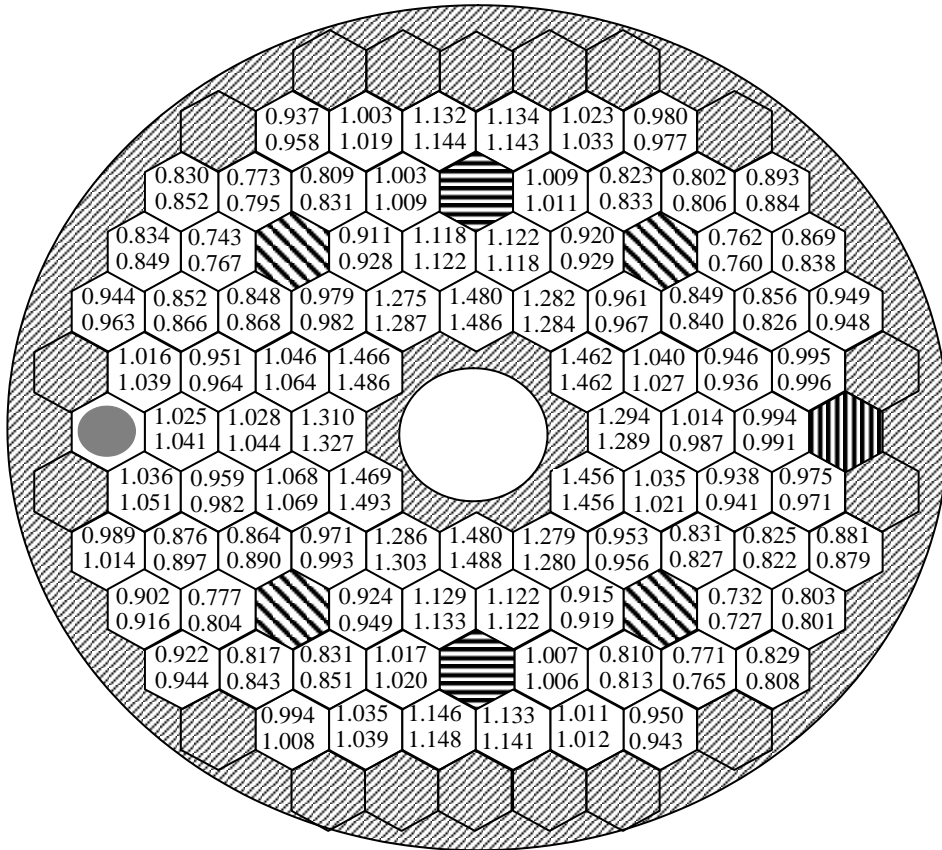
Cấu hình 88 BNL, phân bố thông lượng neutron nhanh



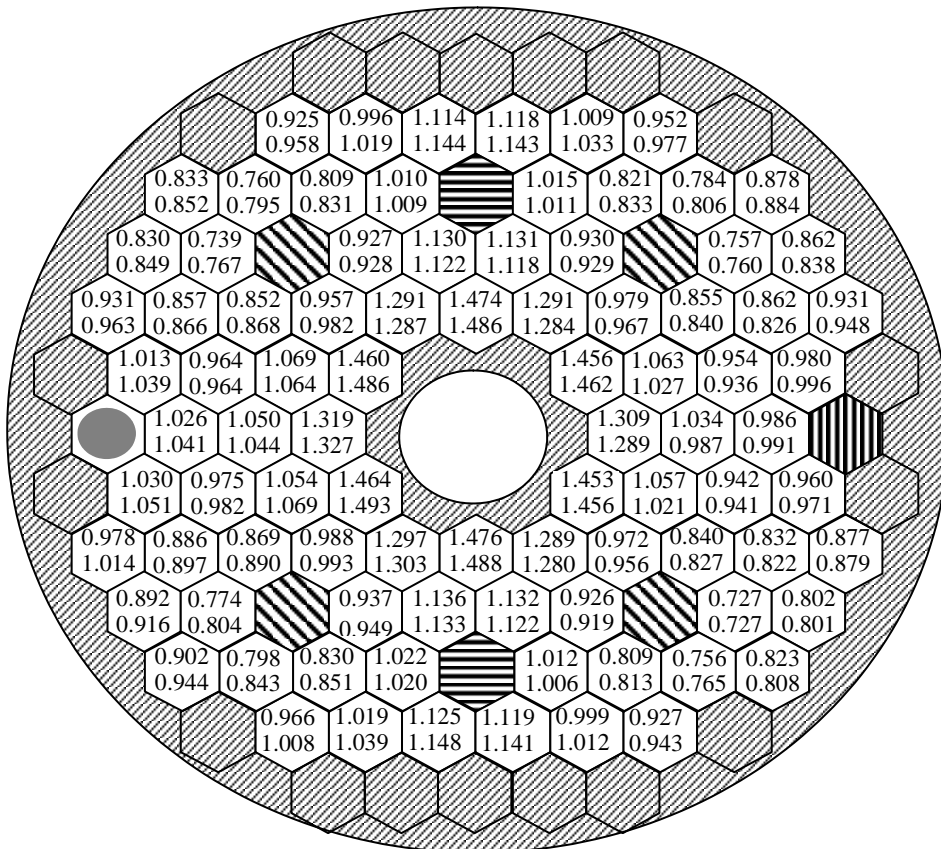
Hình 3.3 Phân bố thông lượng neutron nhanh ($0,821e+06$ eV đến 20 MeV) của vùng hoạt với 88 BNL (Giá trị trên nhân với 10^{13} neutrons/cm².s) .



Hình 3.4 Phân bố thông lượng neutron nhiệt ($1e-05$ eV đến 0,625eV) của vùng hoạt với 86BNL (Giá trị trong ô nhân với 10^{13} neutrons/cm².s)



Hình 3.5 So sánh phân bố công suất của cấu hình 88 BNL ở thời điểm khởi động. Giá trị dưới và giá trị trên được tính theo chương trình MVP và MCNP tương ứng.



Hình 3.6 So sánh phân bố công suất của cấu hình 88 BNL ở thời điểm khởi động. Giá trị dưới và giá trị trên được tính theo chương trình MVP và SRAC tương ứng.

3.4 Phân bố công suất theo bán kính và chiều cao

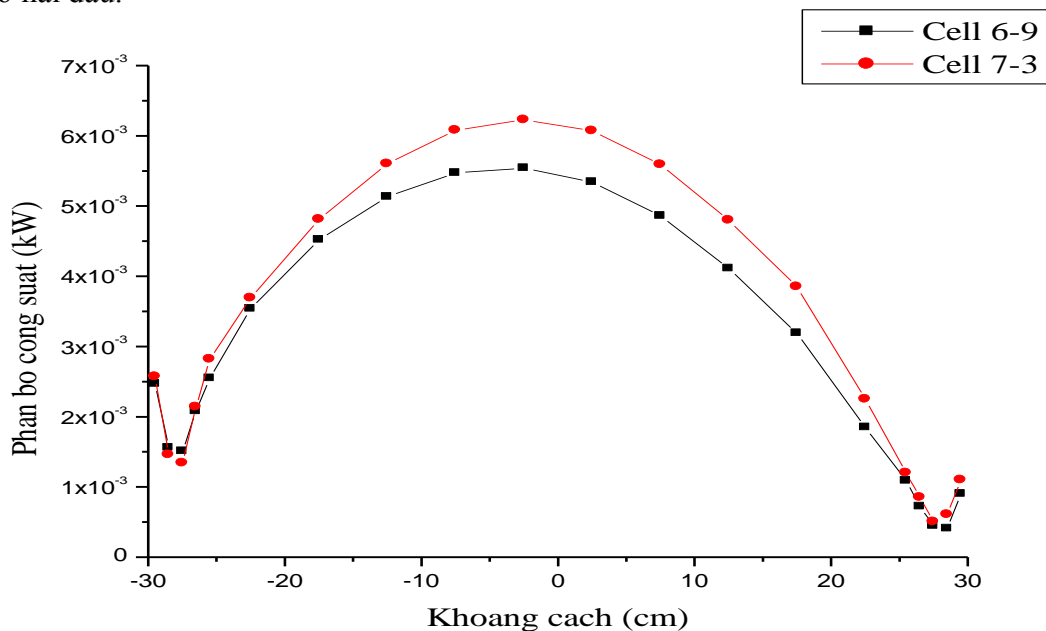
a) Phân bố công suất theo bán kính

Hình 3.5 so sánh kết quả tính phân bố công suất theo bán kính của cấu hình làm việc 88 BNL sử dụng chương trình MVP với kết quả tính bằng MCNP [4; 5]. Hình 3.6, so sánh với kết quả tính bằng SRAC [4; 5]. Đây là các giá trị tương đối, nghĩa là đã được chia cho $5,681818182 \text{ kW} = 500 \text{ KW} / 88$ là công suất trung bình của mỗi ô.

Nhận xét: Phân bố công suất theo bán kính trong vùng hoạt cho thấy, công suất có giá trị lớn nhất tại các ô mạng xung quanh bẫy neutron và hai thanh an toàn và có giá trị nhỏ nhất tại các ô mạng ở gần vành phản xạ graphite. Bởi vì LPUHNĐL được cấu tạo từ hình học và vật liệu rất phức tạp nên phân bố công suất theo bán kính là không đối xứng. Việc so sánh các kết quả tính toán bằng MVP với các kết quả tính toán bằng MCNP, SRAC cho thấy: các kết quả này khác nhau không nhiều, độ lệch lớn nhất giữa các kết quả này khoảng 3,5 % (MCNP-MVP), 4,5 % (SRAC-MVP). Điều này chứng tỏ rằng các chương trình MVP, MCNP và SRAC là hoàn toàn tương đương và là các công cụ hữu dụng trong tính toán các thông số của LPUHNĐL, đặc biệt phục vụ việc tính toán neutron cho lò phản ứng nghiên cứu mới và nhà máy điện hạt nhân trong tương lai của Việt Nam.

b) Phân bố công suất theo chiều cao

Nhận xét: Đồ thị có dạng gần giống hình cosin, có đỉnh lệch về nửa dưới của vùng hoạt (do ảnh hưởng của các thanh điều khiển). Ở hai đầu, công suất có tăng lên là do sự phản xạ của nước ở hai đầu.



Hình 3.7 Phân bố công suất theo chiều cao tại hai ô 6-9 và 7-3

3.5 Phân bố thông lượng neutron nhiệt theo chiều cao của bẫy neutron

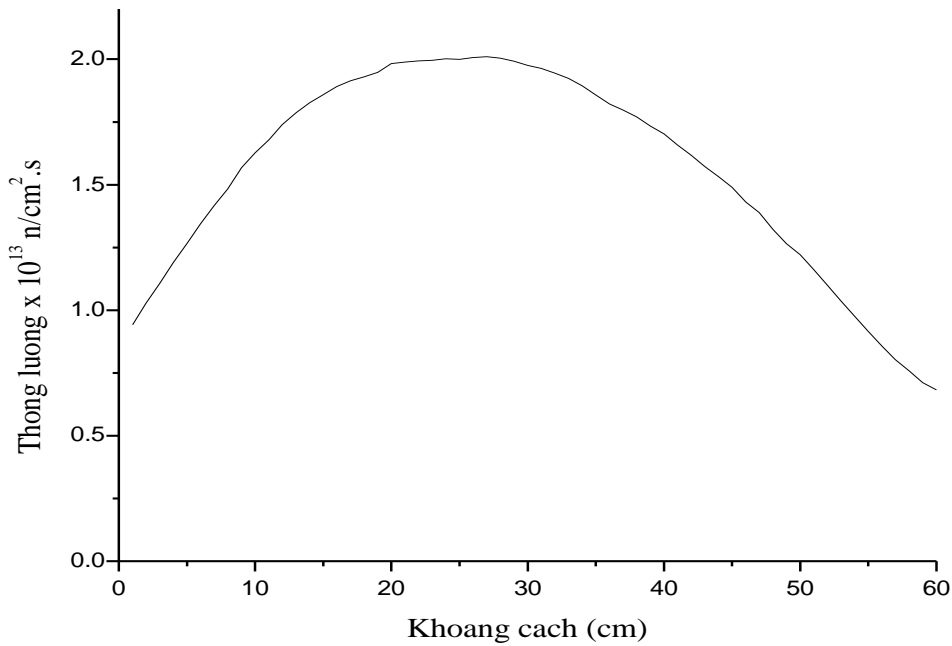
Nhận xét: Phân bố thông lượng neutron nhiệt theo chiều cao vùng hoạt của bẫy neutron có dạng hình cosin, có đỉnh lệch về nửa dưới của vùng hoạt (do ảnh hưởng của các thanh điều khiển). Thông lượng lớn nhất ở vùng thứ 27, có giá trị bằng $2,01 \times 10^{13} \text{ neutron/cm}^2 \cdot \text{s}$.

3.6 Thông lượng neutron tại một số vị trí chiếu mẫu

Bảng 3.3 (Tính toán được thực hiện đối với cấu hình 88 BNL)

Vị trí	Thông lượng neutron nhiệt trung bình ($\times 10^{13} \text{ neutron/cm}^2 \cdot \text{s}$)
Toàn vùng hoạt	0,424
Bẫy neutron	1,554
Mâm quay	0,304
Kênh khô 7-1	0,639

Hình 3.8 Đồ thị phân bố thông lượng neutron nhiệt



• Thông lượng neutron nhiệt và neutron nhanh tại 40 hốc chiếu

Bảng 3.4 Thông lượng neutron tại các hốc chiếu ($\times 10^{13}$ neutron/cm².s)

Hốc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Φ nhiệt	0,286	0,282	0,293	0,297	0,299	0,300	0,300	0,300	0,300	0,298
Φ nhanh	0,157	0,084	0,160	0,167	0,165	0,155	0,153	0,143	0,139	0,132
Hốc	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Φ nhiệt	0,296	0,297	0,297	0,301	0,309	0,319	0,319	0,324	0,325	0,332
Φ nhanh	0,130	0,135	0,141	0,148	0,164	0,178	0,189	0,185	0,180	0,175
Hốc	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Φ nhiệt	0,333	0,337	0,331	0,330	0,327	0,322	0,317	0,310	0,302	0,303
Φ nhanh	0,180	0,174	0,176	0,180	0,174	0,168	0,157	0,150	0,145	0,133
Hốc	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Φ nhiệt	0,294	0,296	0,290	0,290	0,290	0,284	0,286	0,286	0,288	0,286
Φ nhanh	0,135	0,136	0,140	0,141	0,148	0,158	0,162	0,175	0,168	0,158

3.7 Dự trữ đập lò và độ hiệu dụng của các thanh điều khiển

a) Dự trữ đập lò

Với cấu hình 88 BNL loại HEU, hệ số nhân hiệu dụng (k_{eff}) tính được như sau:

Tất cả 7 thanh điều khiển ở ngoài vùng hoạt: $k_{eff} = 1,084640 \pm 0,000260$

2 AT ở ngoài, 4 BT và TĐ ở trong vùng hoạt: $k_{eff} = 0,977508 \pm 0,000190$

Tất cả 7 thanh điều khiển ở trong vùng hoạt: $k_{eff} = 0,928456 \pm 0,000223$

Do đó, độ phản ứng đập lò khi 2 thanh AT ở ngoài, 4 thanh BT và 1 thanh TĐ ở trong vùng hoạt là $-2,301$ %kk/k lớn hơn yêu cầu $-1,0$ %kk/k [1]. Như vậy, giá trị độ phản ứng đập lò của cấu hình 88 BNL loại HEU thỏa mãn tốt tiêu chuẩn độ phản ứng đập lò.

b) Độ hiệu dụng của các thanh điều khiển

Bảng 3.5 So sánh độ hiệu dụng của các thanh điều khiển (tính theo đơn vị β_{eff})

Thanh ĐK	Kết quả tính toán C	Kết quả thực nghiệm E	Sai số = $100*(C-E)/C$
AT1	2,987828	2,98	0,2620 %
AT2	2,712999	2,70	0,4791 %
TĐ	0,491555	0,49	0,3164 %
BT1	3,534658	3,50	0,9805 %

BT2	3,478592	3,45	0,8219 %
BT3	3,064972	3,01	1,7936 %
BT4	3,211319	3,15	1,9095 %
4BT	11,96390	11,76	1,7043 %
(TĐ + 4BT)	13,36125	13,11	1,8804 %

Nhận xét: Các kết quả tính toán độ hiệu dụng của các thanh điều khiển bằng chương trình MVP tương đối phù hợp với các kết quả thực nghiệm. Sai số nhỏ hơn 2%. Điều này một lần nữa khẳng định việc sử dụng chương trình MVP để tính toán các thông số của LPUHNĐL và đặc biệt dùng để tính toán neutron cho lò phản ứng nghiên cứu mới hay lò năng lượng trong tương lai của Việt Nam là hoàn toàn tin cậy.

KẾT LUẬN

Kết quả tính toán neutron cho LPUHNĐL nhận được từ chương trình MVP đã chứng tỏ khá phù hợp với kết quả thực nghiệm và nhìn chung không khác nhiều so với kết quả tính toán từ chương trình MCNP4C2 và SRAC. Việc ứng dụng chương trình MVP như vậy là có hiệu quả, mang lại những kết quả khả quan trong tính toán các thông số lò phản ứng và có thể dùng các chương trình MVP, MCNP và SRAC để tính toán neutron cho LPUHNĐL.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lê Văn Hồng và các cộng sự, Xây dựng tiềm lực R&D phục vụ chương trình phát triển điện hạt nhân, ĐTĐL-2002/17.
- [2] MVP/GMVP II: General purpose Monte Carlo codess for neutron and photon transport calculations based on continuous energy and multigroup methods.
- [3] Safety analysis report for the Dalat Nuclear Research Reactor, Đà Lạt, 2002
- [4] Nguyen Kien Cuong, Tran Quoc Duong, Neutronics calculation for Dalat research Reactor by MCNP4C2 code.
- [5] Nguyen Kien Cuong, Core management and shielding calculation for Dalat Research Reactor (DRR), FELLOWSHIP REPORT, 2005.
- [6] Los Alamos National Laboratory, Rsic computer code collection MCNP4C- Monte Carlo N particle transport code system, Los Alamos, New Mexico, 2000.
- [7] Jaakko Leppänen, Development of a New Monte-Carlo reactor physics code, 2007.
- [8] Alex F Bielajew, Fundamentals of the Monte-Carlo method for neutral and charged particle transport, The University of Michigan, 2001.
- [9] Thomas E. Booth, MCNP variance reduction examples, Los Alamos, 2004
- [10] J.Kenneth Shultis and richard E.Faw, An in trodution to the MCNP code, 2005