

TÍNH TOÁN KHẢO SÁT HẰNG SỐ NHÓM CỦA Ô MẠNG NHIÊN LIỆU VVR-M2 CÓ ĐỘ LÀM GIÀU CAO VÀ ĐỘ LÀM GIÀU THẤP

INVESTIGATION ON THE GROUP CONSTANTS OF THE HEU AND LEU FUEL CELL TYPE VVR-M2

¹Đỗ Quang Bình, ¹Võ Thanh Tân

²Ngô Quang Huy, ³Nguyễn Hoàng Hải

¹Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Tp HCM

²Trường Đại học Công nghiệp Tp HCM

³Trung tâm Nghiên cứu & Triển khai Công nghệ bức xạ Tp HCM

TÓM TẮT

Báo cáo này trình bày kết quả đánh giá hằng số nhóm của ô mạng nhiên liệu lò phản ứng hạt nhân VVR-M2 với độ làm giàu cao VVR-M2 HEU và độ làm giàu thấp VVR-M2 LEU. Ngoài ra, sự thay đổi của hằng số nhóm theo độ cháy nhiên liệu cũng được khảo sát. Các kết quả này là cơ sở cho các tính toán toàn lò và tính toán phân tích an toàn đối với lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt sử dụng hai loại nhiên liệu này. Kết quả thu được ở đây được thực hiện bằng chương trình tính toán ô mạng WIMS.

ABSTRACT

This paper presents the evaluated results of fuel cell group constants for the VVR-M2 HEU and VVR-M2 LEU fuels loaded in the Dalat nuclear research reactor. The dependence of the group constants on the fuel burn up was also investigated. These results are the important data served for the global reactor core calculations with HEU and LEU fuels. The calculations were done by the multi group neutron transport theory with the WIMS code.

I. GIỚI THIỆU

Nhiên liệu VVR-M2 là loại nhiên liệu hạt nhân được sản xuất bởi Liên Xô trước đây và bây giờ được sản xuất bởi Nga, được sử dụng trong các lò phản ứng nghiên cứu tại các nước Đông Âu (Ba Lan, Hungary ...) và Việt Nam. Tại Việt Nam, lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt từ sau khi được cải tạo và nâng cấp từ lò TRIGA MARK II đã sử dụng nhiên liệu VVR-M2 với độ làm giàu cao HEU (High Enrichment Uranium). Theo khuyến cáo của tổ chức Năng lượng nguyên tử quốc tế IAEA

dựa trên thỏa thuận của Hoa Kỳ và Liên bang Nga, mà theo đó thì các lò phản ứng nghiên cứu sử dụng nhiên liệu uranium có độ làm giàu cao (trên 20% ²³⁵U) đều phải chuyển đổi sang sử dụng nhiên liệu có độ làm giàu thấp (dưới 20% ²³⁵U) để bảo đảm không thể sử dụng lò phản ứng với mục đích chế tạo vũ khí hạt nhân, Việt Nam đã tiến hành chương trình chuyển đổi từ nhiên liệu độ làm giàu cao sang nhiên liệu độ làm giàu thấp và từ cuối năm 2011 thì lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt sử dụng nhiên liệu VVR-M2 với độ làm giàu

thấp LEU (Low Enrichment Uranium) [1].

Việc đánh giá các đặc trưng vật lý và an toàn của hai loại nhiên liệu VVR-M2 HEU và VVR-M2 LEU có vai trò quan trọng trong phân tích an toàn và chuẩn bị cơ sở để thực hiện các tính toán tĩnh học và động học đối với lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt. Công trình này tiến hành các nghiên cứu tính toán ô mạng cho cả hai loại nhiên liệu nói trên và sẽ trình bày kết quả đánh giá hàng số ít nhóm đối với nhiên liệu sạch và sự thay đổi của chúng theo độ cháy.

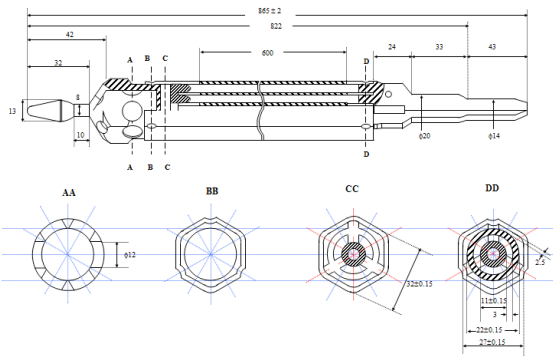
Mỗi bó nhiên liệu VVR-M2 bao gồm ba ống hình vành khuyên đồng trục. Ống ngoài cùng có hình lục giác với bước là 32mm, hai ống ở trong có dạng hình trụ với đường kính ngoài lần lượt là 22mm và 11mm. Mỗi ống của bó nhiên liệu gồm ba lớp, lớp nhiên liệu nằm giữa hai lớp vỏ bọc bằng nhôm. Loại nhiên liệu có độ làm giàu cao HEU có nhiên

liệu là hợp kim U-Al với độ làm giàu ^{235}U là 36 %, còn loại nhiên liệu có độ làm giàu thấp LEU có nhiên liệu là hợp kim $\text{UO}_2\text{-Al}$ với độ làm giàu ^{235}U là 19,75 %. Trung bình mỗi bó nhiên liệu loại HEU có 40,2 g ^{235}U và mỗi bó nhiên liệu loại LEU có 49,7g ^{235}U . Về mặt cấu trúc thì hai loại nhiên liệu HEU và LEU có sự khác nhau ở bề dày của các lớp nhiên liệu và vỏ bọc. Bó nhiên liệu loại HEU có bề dày lớp nhiên liệu ở giữa là 0,7mm, hai lớp vỏ bọc bằng nhôm có bề dày mỗi lớp 0,9mm; còn bó nhiên liệu loại LEU có bề dày lớp nhiên liệu ở giữa là 0,94mm, hai lớp vỏ bọc bằng nhôm có bề dày mỗi lớp 0,78mm. Giữa các ống nhiên liệu là lớp nước nhẹ với bề dày từ 2,5cm đến 3cm. Hình 1 mô tả mặt cắt đứng của một bó nhiên liệu VVR-M2. Hình 2 mô tả mặt cắt ngang phần chứa nhiên liệu của một bó nhiên liệu VVR-M2 HEU. Những đặc trưng cơ bản của nhiên liệu HEU và LEU được trình bày trong bảng 1.

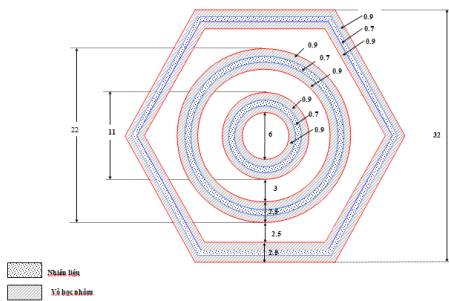
Bảng 1. Các đặc trưng của nhiên liệu VVR-M2 HEU và VVR-M2 LEU [1].

Thông số	Nhiên liệu VVR-M2 HEU	Nhiên liệu VVR-M2 LEU
Độ dày ống nhiên liệu, mm	2,5	2,5
Độ dày phần nhiên liệu, mm	0,7	0,94
Độ dày phần vỏ bọc, mm	0,9	0,78
Độ rộng khe hở giữa các thanh nhiên liệu, cm	2,5 – 3,0	2,5 – 3,0
Thành phần nhiên liệu	U-Al	$\text{UO}_2\text{-Al}$
Độ làm giàu ^{235}U , %	36	19,75
Khối lượng ^{235}U trong một bó nhiên liệu, g	40,2	49,7

Cả hai loại nhiên liệu VVR-M2 loại HEU và LEU đều được sử dụng trong lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt. Đây là một lò phản ứng nghiên cứu loại bể bơi, được cải tạo và nâng cấp từ lò TRIGA MARK II của hãng GE (Mỹ), có công suất danh định 500 kW, làm chậm và tải nhiệt bằng nước nhẹ. Thông tin chung của lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt được tóm tắt trong bảng 2.



Hình 1. Hình dạng và kích thước một bó nhiên liệu VVR-M2.



Hình 2. Mặt cắt ngang phần chứa nhiên liệu của một bó nhiên liệu VVR-M2 HEU.

Bảng 2. Một số thông số của lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt [1].

Loại lò	Bể bơi
Công suất danh định	500 kW
Chất làm chậm	Nước nhẹ

Chất phản xạ	Graphite, beryllium và nước nhẹ
Chất tải nhiệt	Nước nhẹ
Thanh điều khiển	2 thanh an toàn (B_4C), 4 thanh bù trừ (B_4C) và 1 thanh điều chỉnh tự động (thép không gỉ)

II. CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN VÀ MÔ HÌNH BÀI TOÁN Ô MẠNG

Trong công trình này, tính toán ô mạng được thực hiện bằng chương trình WIMS (Winfrith Improved Multi-group Scheme). Chương trình WIMS được xây dựng và phát triển bởi Tổ chức Năng lượng nguyên tử Winfrith, là một chương trình tính toán ô mạng lò phản ứng có thể được áp dụng cho một lớp rộng các loại lò phản ứng khác nhau. Chương trình này được viết bằng ngôn ngữ lập trình FORTRAN ở dạng các module, bao gồm một chương trình chính và 16 chương trình con. Cấu trúc của chương trình WIMS bao gồm ba phần chính: tính toán nhiều nhóm năng lượng, tính toán ít nhóm năng lượng và tính toán hiệu chỉnh. Trong nghiên cứu này, phiên bản WIMSD-5B [2] được sử dụng cùng với thư viện số liệu WIMS '1986' [3], trong đó năng lượng neutron từ 10 MeV đến 0 MeV được chia thành 69 nhóm gồm 14 nhóm neutron nhanh với năng lượng trong vùng từ 10 MeV đến 9,118 keV, 13 nhóm neutron cộng hưởng với năng lượng trong vùng từ 9,118 keV đến 4 eV và 42 nhóm neutron nhiệt với năng lượng trong vùng từ 4 eV đến 0 eV. Số liệu đầu vào cho chương trình này là các thông số hình học và vật liệu của ô mạng nhiên liệu, lựa chọn mô hình và phương pháp tính toán.

Trong nghiên cứu này, mô hình hình học cho tính toán ô mạng là mô hình pincell với hình học trụ. Theo đó, một ô mạng nhiên liệu mô tả một bó nhiên liệu được nạp trong vùng hoạt lò phản ứng. Ống ngoài cùng hình lục giác của bó nhiên liệu được trụ hóa với cùng diện tích. Kích thước và thành phần các lớp của ô mạng nhiên liệu HEU và LEU được trình bày trong bảng 3.

Bảng 3. Kích thước và thành phần các lớp của ô mạng nhiên liệu HEU và LEU.

Nhiên liệu HEU			Nhiên liệu LEU		
Lớp	Bán kính ngoài (cm)	Vật liệu	Lớp	Bán kính ngoài (cm)	Vật liệu
1	0,3000	H ₂ O	1	0,3000	H ₂ O
2	0,3900	Al	2	0,3780	Al
3	0,4600	U-Al	3	0,4720	UO ₂ -Al
4	0,5500	Al	4	0,5500	Al
5	0,8500	H ₂ O	5	0,8500	H ₂ O
6	0,9400	Al	6	0,9280	Al
7	1,0100	U-Al	7	1,0220	UO ₂ -Al
8	1,1000	Al	8	1,1000	Al
9	1,4176	H ₂ O	9	1,4176	H ₂ O
10	1,5121	Al	10	1,4995	Al
11	1,5856	U-Al	11	1,5982	UO ₂ -Al
12	1,6801	Al	12	1,6801	Al
13	1,8376	H ₂ O	13	1,8376	H ₂ O

Đối với mô hình pincell, phương pháp giải phương trình vận chuyển neutron trong hình học chi tiết của ô mạng nhiên liệu đối với tính toán ít nhóm năng lượng là phương pháp tọa độ gián đoạn DSN [4]. Tính toán ít nhóm để chuẩn bị hằng số nhóm cho tính toán toàn lò đối với ba nhóm năng lượng có cấu trúc các nhóm như sau: nhóm một (neutron nhanh) từ 10 MeV đến 5530 eV, nhóm hai (neutron trên nhiệt) từ 5530 eV đến 0,22 eV và nhóm ba (neutron nhiệt) từ 0,22 eV đến 0 eV.

Tính toán khảo sát sự phụ thuộc hằng số nhóm theo độ cháy nhiên liệu được thực hiện với mỗi bước tính cháy nhiên liệu là 5% từ khi nhiên liệu sạch BU = 0% đến khi độ cháy

đạt BU = 50%.

III. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

3.1. Hằng số nhóm của ô mạng nhiên liệu sạch

Trong phần này, hằng số nhóm của hai loại ô mạng nhiên liệu HEU và LEU được tính cho trường hợp nhiên liệu mới (độ cháy 0%). Kết quả được trình bày trong bảng 4 và bảng 5. Trong đó, D_g là hệ số khuếch tán nhóm g , $\Sigma_{a,g}$ là tiết diện hấp thụ vĩ mô nhóm g , $\nu\Sigma_{f,g}$ là tiết diện sinh neutron vĩ mô nhóm g , $\Sigma_{s,g \rightarrow 1}$, $\Sigma_{s,g \rightarrow 2}$ và $\Sigma_{s,g \rightarrow 3}$ lần lượt là tiết diện tán xạ neutron vĩ mô từ nhóm g đến nhóm 1, 2 và 3 tương ứng.

Bảng 4. Hằng số nhóm của ô mạng nhiên liệu loại HEU và LEU.

Loại nhiên liệu	Nhóm năng lượng g	D_g (cm)	$\Sigma_{a,g}$ (cm ⁻¹)	$\nu\Sigma_{f,g}$ (cm ⁻¹)
HEU	1	1,7436550	$6,306679 \cdot 10^{-4}$	$8,172098 \cdot 10^{-4}$
	2	0,8939375	$1,268701 \cdot 10^{-2}$	$1,475472 \cdot 10^{-2}$
	3	0,2755703	$9,362662 \cdot 10^{-2}$	$1,639929 \cdot 10^{-1}$
LEU	1	1,739711	$9,018380 \cdot 10^{-4}$	$1,265826 \cdot 10^{-3}$
	2	0,869475	$1,668972 \cdot 10^{-2}$	$1,800092 \cdot 10^{-2}$
	3	0,274673	$1,110093 \cdot 10^{-1}$	$1,996629 \cdot 10^{-1}$

Bảng 5. Tiết diện tán xạ của ô mạng nhiên liệu loại HEU và LEU.

Loại nhiên liệu	Nhóm năng lượng g	$\Sigma_{s,g \rightarrow 1}$ (cm ⁻¹)	$\Sigma_{s,g \rightarrow 2}$ (cm ⁻¹)	$\Sigma_{s,g \rightarrow 3}$ (cm ⁻¹)
HEU	1	0	$4,341935 \cdot 10^{-2}$	0
	2	0	0	$6,822895 \cdot 10^{-2}$
	3	0	$4,867184 \cdot 10^{-3}$	0
LEU	1	0	$4,346685 \cdot 10^{-2}$	0
	2	0	0	$6,619798 \cdot 10^{-2}$
	3	0	$5,488122 \cdot 10^{-3}$	0

3.2. Sự thay đổi của hằng số nhóm ô mạng nhiên liệu theo độ cháy nhiên liệu

Trong mục này, các hằng số nhóm của hai loại nhiên liệu HEU và LEU được khảo sát ở các độ cháy khác nhau từ 0% đến 50%.

Sự phụ thuộc của các hằng số nhóm theo độ cháy nhiên liệu BU được biểu diễn thành các hàm đa thức bậc hai làm cơ sở cho tính toán động học toàn lò.

Đối với nhiên liệu VVR-M2 HEU:

$$\begin{aligned}
 D_1 &= 5,468531 \times 10^{-08} BU^2 + 1,546392 \times 10^{-05} BU + 1,743655 \\
 \Sigma_{a,1} &= 8,258182 \times 10^{-10} BU^2 - 2,628289 \times 10^{-06} BU + 6,306639 \times 10^{-04} \\
 v\Sigma_{f,1} &= 1,005427 \times 10^{-09} BU^2 - 5,985327 \times 10^{-06} BU + 8,172684 \times 10^{-04} \\
 \Sigma_{s,1 \rightarrow 2} &= -5,846154 \times 10^{-10} BU^2 + 5,458853 \times 10^{-07} BU + 4,341936 \times 10^{-02} \\
 D_2 &= 1,292308 \times 10^{-08} BU^2 + 4,747166 \times 10^{-05} BU + 8,939411 \times 10^{-01} \\
 \Sigma_{a,2} &= -1,371506 \times 10^{-07} BU^2 - 2,565789 \times 10^{-05} BU + 1,268522 \times 10^{-02} \\
 v\Sigma_{f,2} &= -2,569122 \times 10^{-07} BU^2 - 1,034582 \times 10^{-04} BU + 1,475461 \times 10^{-02} \\
 \Sigma_{s,2 \rightarrow 3} &= 1,931324 \times 10^{-07} BU^2 + 1,724983 \times 10^{-05} BU + 6,822832 \times 10^{-02} \\
 D_3 &= -2,614312 \times 10^{-07} BU^2 - 4,792680 \times 10^{-05} BU + 2,755449 \times 10^{-01} \\
 \Sigma_{a,3} &= -1,516533 \times 10^{-06} BU^2 - 5,363306 \times 10^{-04} BU + 9,399413 \times 10^{-02} \\
 v\Sigma_{f,3} &= -1,415534 \times 10^{-06} BU^2 - 1,327821 \times 10^{-03} BU + 1,639279 \times 10^{-01} \\
 \Sigma_{s,3 \rightarrow 2} &= -6,009995 \times 10^{-08} BU^2 - 1,817898 \times 10^{-05} BU + 4,879130 \times 10^{-03}
 \end{aligned}$$

Đối với nhiên liệu VVR-M2 LEU:

$$\begin{aligned}
 D_1 &= 7,421911 \times 10^{-08} BU^2 + 1,874723 \times 10^{-05} BU + 1,739715 \\
 \Sigma_{a,1} &= 1,471855 \times 10^{-09} BU^2 - 3,126277 \times 10^{-06} BU + 9,018435 \times 10^{-04} \\
 v\Sigma_{f,1} &= 1,696718 \times 10^{-09} BU^2 - 7,020175 \times 10^{-06} BU + 1,265941 \times 10^{-03} \\
 \Sigma_{s,1 \rightarrow 2} &= -1,105828 \times 10^{-09} BU^2 + 6,244914 \times 10^{-07} BU + 4,346687 \times 10^{-02} \\
 D_2 &= -3,925408 \times 10^{-09} BU^2 + 5,232391 \times 10^{-05} BU + 8,694827 \times 10^{-01} \\
 \Sigma_{a,2} &= -1,817814 \times 10^{-07} BU^2 - 8,792660 \times 10^{-06} BU + 1,668348 \times 10^{-02} \\
 v\Sigma_{f,2} &= -4,332569 \times 10^{-07} BU^2 - 9,421516 \times 10^{-05} BU + 1,801091 \times 10^{-02} \\
 \Sigma_{s,2 \rightarrow 3} &= 2,216354 \times 10^{-07} BU^2 + 3,099375 \times 10^{-07} BU + 6,619964 \times 10^{-02} \\
 D_3 &= -1,613100 \times 10^{-07} BU^2 - 5,023068 \times 10^{-05} BU + 2,746358 \times 10^{-01} \\
 \Sigma_{a,3} &= -1,889437 \times 10^{-06} BU^2 - 5,725583 \times 10^{-04} BU + 1,114738 \times 10^{-01} \\
 v\Sigma_{f,3} &= -1,765315 \times 10^{-06} BU^2 - 1,461955 \times 10^{-03} BU + 1,995983 \times 10^{-01} \\
 \Sigma_{s,3 \rightarrow 2} &= -6,728709 \times 10^{-08} BU^2 - 1,959233 \times 10^{-05} BU + 5,502822 \times 10^{-03}
 \end{aligned}$$

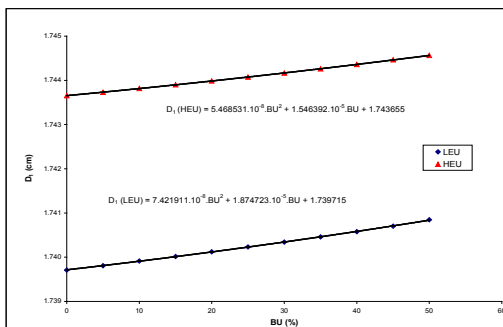
Sự thay đổi của hệ số khuếch tán theo độ cháy được trình bày trong hình 3, 4 và 5. Theo đó, hệ số khuếch tán nhóm 1 và 2 của hai loại nhiên liệu đều tăng theo độ cháy, trong khi xu thế này ngược lại đối với nhóm 3. Trong cả ba trường hợp, hệ số khuếch tán của nhiên liệu loại LEU đều nhỏ hơn loại HEU.

Hình 6, 7 và 8 cho thấy tiết diện hấp thụ ba nhóm của cả hai loại nhiên liệu HEU và LEU đều giảm theo độ cháy. Hơn nữa, do thành phần ^{238}U trong nhiên liệu LEU lớn hơn trong nhiên liệu HEU, tiết diện hấp thụ của nhiên liệu LEU lớn hơn của nhiên liệu HEU.

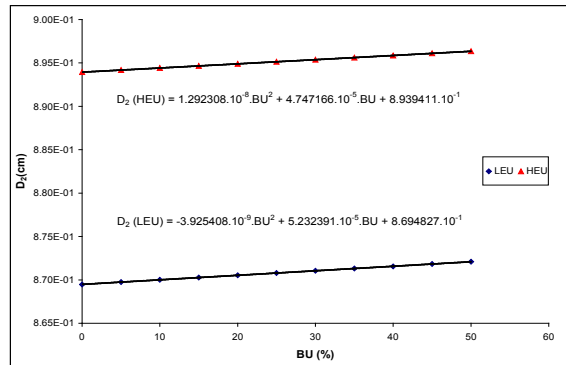
Quy luật biến đổi của tiết diện sinh neutron được biểu diễn trong hình 9, 10 và 11. Do lượng ^{235}U giảm, nên các tiết diện này có xu hướng giảm theo độ cháy.

Đối với các tiết diện tán xạ neutron (hình 12, 13 và 14) thì tiết diện tán xạ neutron từ nhóm 1 đến nhóm 2 và từ nhóm 2 đến nhóm 3 tăng theo độ cháy trong khi tiết diện tán xạ ngược neutron từ nhóm 3 đến nhóm 2 có xu hướng ngược lại.

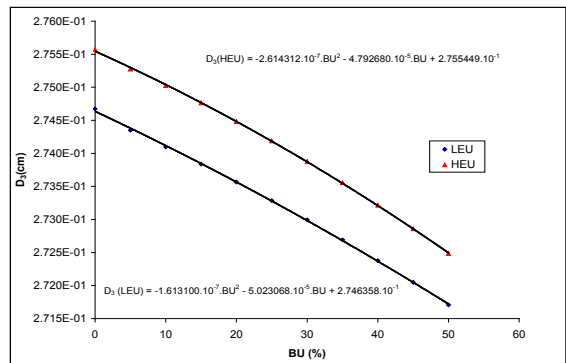
Do khác nhau về nồng độ hạt nhân trong nhiên liệu HEU và LEU nên giá trị của hằng số nhóm đối với hai loại nhiên liệu này khác nhau. Tuy nhiên, quy luật thay đổi của các hằng số nhóm theo độ cháy là như nhau mặc dù tốc độ thay đổi có khác nhau nhưng không nhiều.



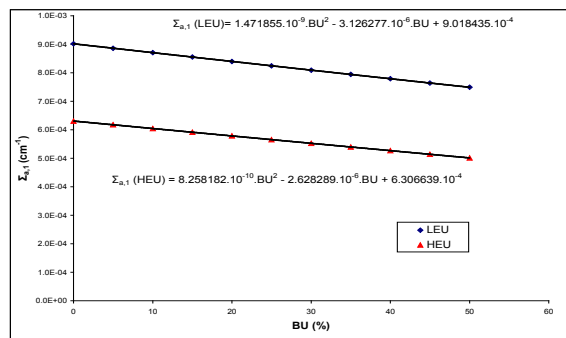
Hình 3. Sự thay đổi của hệ số khuếch tán nhóm 1 D_1 theo độ cháy nhiên liệu.



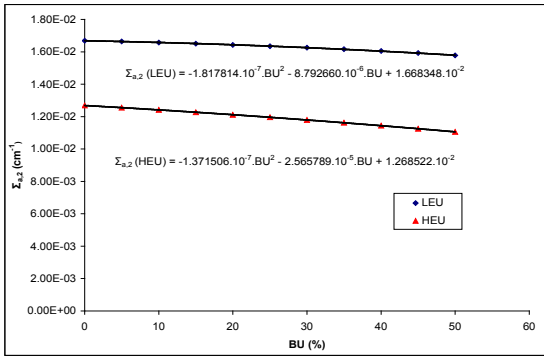
Hình 4. Sự thay đổi của hệ số khuếch tán nhóm 2 D_2 theo độ cháy nhiên liệu.



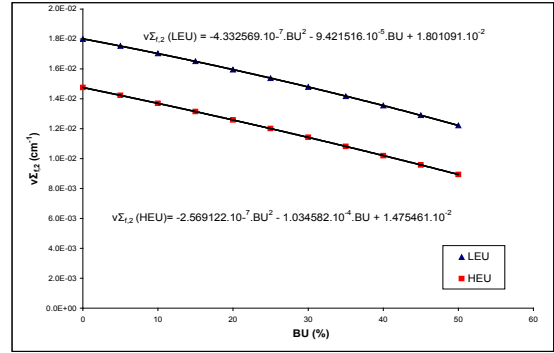
Hình 5. Sự thay đổi của hệ số khuếch tán nhóm 3 D_3 theo độ cháy nhiên liệu.



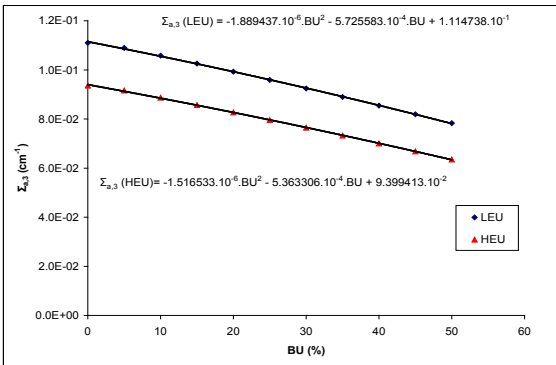
Hình 6. Sự thay đổi của tiết diện hấp thụ vĩ mô nhóm 1 $\Sigma_{a,1}$ theo độ cháy nhiên liệu.



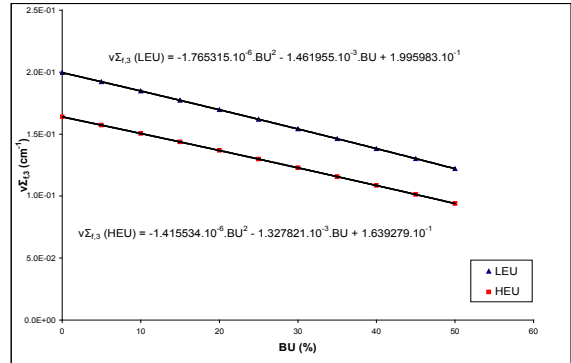
Hình 7. Sự thay đổi của tiết diện hấp thụ vĩ mô nhóm 2 $\Sigma_{a,2}$ theo độ cháy nhiên liệu.



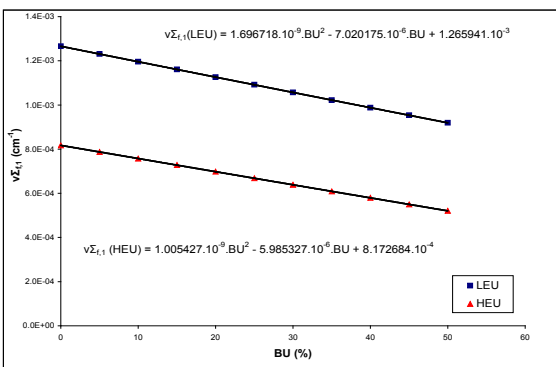
Hình 10. Sự thay đổi của tiết diện sinh neutron vĩ mô nhóm 2 $v\Sigma_{f,2}$ theo độ cháy nhiên liệu.



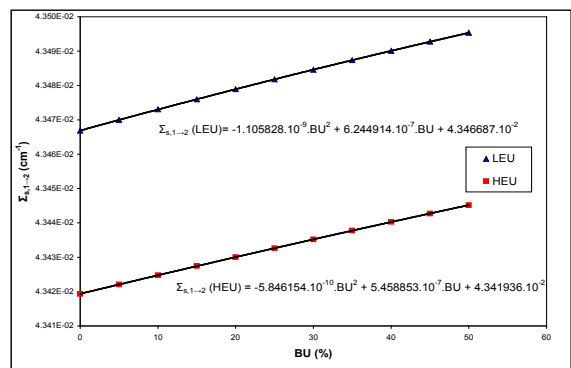
Hình 8. Sự thay đổi của tiết diện hấp thụ vĩ mô nhóm 3 $\Sigma_{a,3}$ theo độ cháy nhiên liệu.



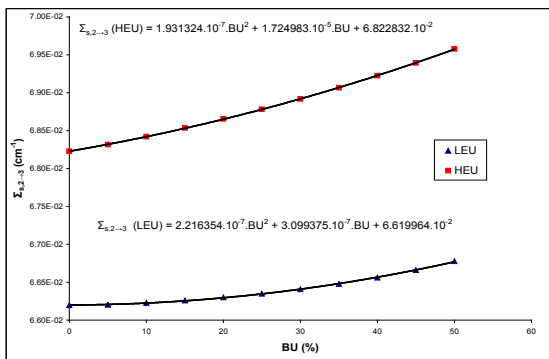
Hình 11. Sự thay đổi của tiết diện sinh neutron vĩ mô nhóm 3 $v\Sigma_{f,3}$ theo độ cháy nhiên liệu.



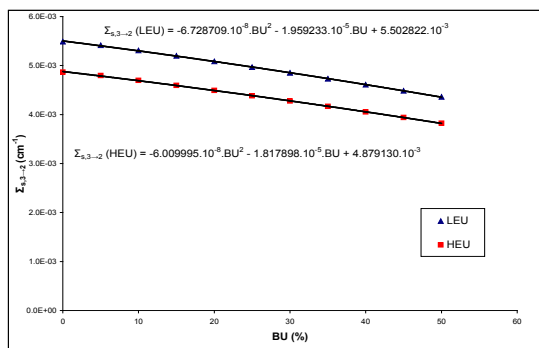
Hình 9. Sự thay đổi của tiết diện sinh neutron vĩ mô nhóm 1 $v\Sigma_{f,1}$ theo độ cháy nhiên liệu.



Hình 12. Sự thay đổi của tiết diện tán xạ neutron từ nhóm 1 đến nhóm 2 $\Sigma_{s,1 \rightarrow 2}$ theo độ cháy nhiên liệu.



Hình 13. Sự thay đổi của tiết diện tán xạ neutron từ nhóm 2 đến nhóm 3 $\Sigma_{s,2 \rightarrow 3}$ theo độ cháy nhiên liệu.



Hình 14. Sự thay đổi của tiết diện tán xạ neutron từ nhóm 3 đến nhóm 2 $\Sigma_{s,3 \rightarrow 2}$ theo độ cháy nhiên liệu.

IV. KẾT LUẬN

Trong báo cáo này, mô hình bài toán ô mạng pincell và phương pháp tính toán vận chuyển neutron bằng chương trình WIMS để chuẩn bị hằng số nhóm đối với ba nhóm năng lượng neutron cho ô mạng nhiên liệu loại VVR-M2 với độ làm giàu cao HEU và độ làm giàu thấp LEU được sử dụng tại lò phản ứng hạt nhân nghiên cứu Đà Lạt đã được thiết lập. Kết quả tính toán cung cấp hằng số nhóm đối với nhiên liệu sạch cùng với sự thay đổi của các hằng số nhóm này theo độ cháy nhiên liệu. Kết quả khảo sát sự thay đổi của các hằng số nhóm theo độ cháy nhiên liệu đã cung cấp một biểu diễn toán học của hằng số nhóm vào độ cháy nhiên liệu làm cơ sở cho nghiên cứu tính toán các đặc trưng vật lý neutron toàn lò và tính toán phân tích an toàn cho lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt với cả hai cấu hình lò phản ứng nạp tải nhiên liệu HEU và LEU.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số **103.04-2012.61**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. B. Vien, L. V. Vinh, H. T. Nghiem, N. K. Cuong, Neutronics and thermal hydraulics analysis for full core conversion of the Dalat nuclear research reactor, *Proceedings of the 9th National conference on Nuclear science and technology*, Science and Technics Publishing House, 175-187 (2011).
- [2] AEA Technology, *WIMSD – A neutronics Code for Standard Lattice Physics Analysis*, ANSWERS Software Service (1997).
- [3] Halsall, M.J., C.J. Taubman, C.J., 1986. The ‘1986’ WIMS Nuclear Data Library, AEEW-R 2133, AEE Winfrith.
- [4] G. I. Bell and S. Glasstone, *Nuclear Reactor Theory*, Van Nostrand Reinhold Company, New York (1970).