

NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN CHÁY VÙNG HOẠT Lò PHẢN ỨNG VVER-1000 TRONG ĐIỀU KIỆN BORON TỚI HẠN

NGUYỄN THỊ DUNG, PHẠM THỊ THÚY AN, TRẦN VIỆT PHÚ

Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân, 179 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội, Việt Nam

Email: Dungvlk52@gmail.com

Tóm tắt: Báo cáo trình bày kết quả tính toán cháy vùng hoạt lò phản ứng VVER-1000 khi nồng độ Boron trong chất làm chậm được thay đổi để lò phản ứng luôn đạt trạng thái tới hạn. Các tính toán được thực hiện bằng chương trình SRAC với 2 modul là PIJ và COREBN. Một chương trình con được xây dựng để thực hiện vòng lặp hiệu chỉnh nồng độ Boron sao cho lò phản ứng đạt tới hạn ở mọi bước cháy. Kết quả thu được gồm hệ số nhân hiệu dụng, phân bố công suất, phân bố độ sâu cháy ở cuối chu trình, thời gian vận hành của lò phản ứng và nồng độ boron tới hạn trong quá trình cháy. Các kết quả này được so sánh với các trường hợp tính cháy khi không hiệu chỉnh nồng độ boron tới hạn để hiểu rõ hơn ảnh hưởng của nồng độ boron tới các đặc trưng vật lý của lò trong quá trình vận hành.

Từ khóa: *tính toán cháy, nồng độ Boron tới hạn, SRAC, COREBN, VVER-1000*

I. MỞ ĐẦU

Trên thế giới, đã có rất nhiều nghiên cứu liên quan tới vấn đề tính toán cháy vùng hoạt. Gần đây, nhóm tác giả Hungary đã tính toán cháy cho các loại lò thuộc thế hệ thứ 4 [1]. Đối với loại lò VVER-1000, năm 2009 đã có bản đề xuất cho một bài toán chuẩn tính cháy vùng hoạt được đưa ra tại hội nghị chuyên đề của tổ chức AER (Atomic Energy Research) [2]. Năm 2013, nhóm tác giả Iran đã tính toán thành phần nhiên liệu và các tham số nhiệt-neutronic trong khi khởi động và trong chu trình đầu tiên của lò phản ứng ở Bushehr [3]. Năm 2015, nhóm tác giả khác cũng đã có một bài báo tính toán về hệ số độ phản ứng theo các bước cháy [4]. Và gần đây nhất năm 2016, một nhóm nghiên cứu ở Iran đã tính toán giá trị các thanh điều khiển trong quá trình cháy nhiên liệu của vùng hoạt [5]. Các tính toán này đều tính toán cho những lò thật và đã được thực hiện một cách khá chi tiết khi kết hợp cả vật lý và thủy nhiệt cũng như các điều kiện vận hành lò khá sát với thực tế khi xét đến sự thay đổi của công suất lò, sự thay đổi nồng độ Boron tới hạn, sự thay đổi vị trí thanh điều khiển cũng như sự thay đổi của nhiệt độ lõi vào chất làm mát. Vì vậy, các kết quả mà các nghiên cứu này thu được phù hợp tốt với các giá trị trong báo cáo phân tích an toàn FSAR (*final safety analysis report*).

Ở nước ta, vấn đề tính cháy vùng hoạt cũng rất được quan tâm nhưng vấn đề này mới chỉ được thực hiện trong một vài đề tài nghiên cứu. Đầu tiên là các tính toán về lò nghiên cứu tại Viện Nghiên cứu Hạt nhân Đà Lạt. Gần đây, tại Trung tâm Năng lượng hạt nhân, nhóm nghiên cứu cũng đã có hai đề tài liên quan tới việc tính cháy cho lò phản ứng là đề tài cấp bộ năm 2014-2015, tính toán cho lò VVER-1000 [6] và một đề tài cơ sở tính cháy cho vùng hoạt lò phản ứng VVER-1200 được thực hiện năm 2016 [7]. Tuy nhiên, cả hai đề tài này, vấn đề tính cháy đều được thực hiện khi chất làm chậm không chứa boron. Nguyên nhân là các chương trình tính toán cháy hiện nay không có khả năng tự động điều chỉnh nồng độ boron tới hạn trong quá trình cháy.

Trên thực tế, ở điều kiện vận hành bình thường của lò phản ứng nước áp lực thì chất làm chậm luôn chứa một lượng boron gần tới hạn. Việc có boron trong chất làm chậm sẽ ảnh hưởng rất lớn tới các đặc trưng vật lý của vùng hoạt. Vì vậy, việc nghiên cứu tính toán cháy vùng hoạt lò phản ứng với nồng độ boron tới hạn là rất cần thiết và nghiên cứu này sẽ thực hiện các tính toán đó đồng thời so sánh với trường hợp tính cháy khi không có boron.

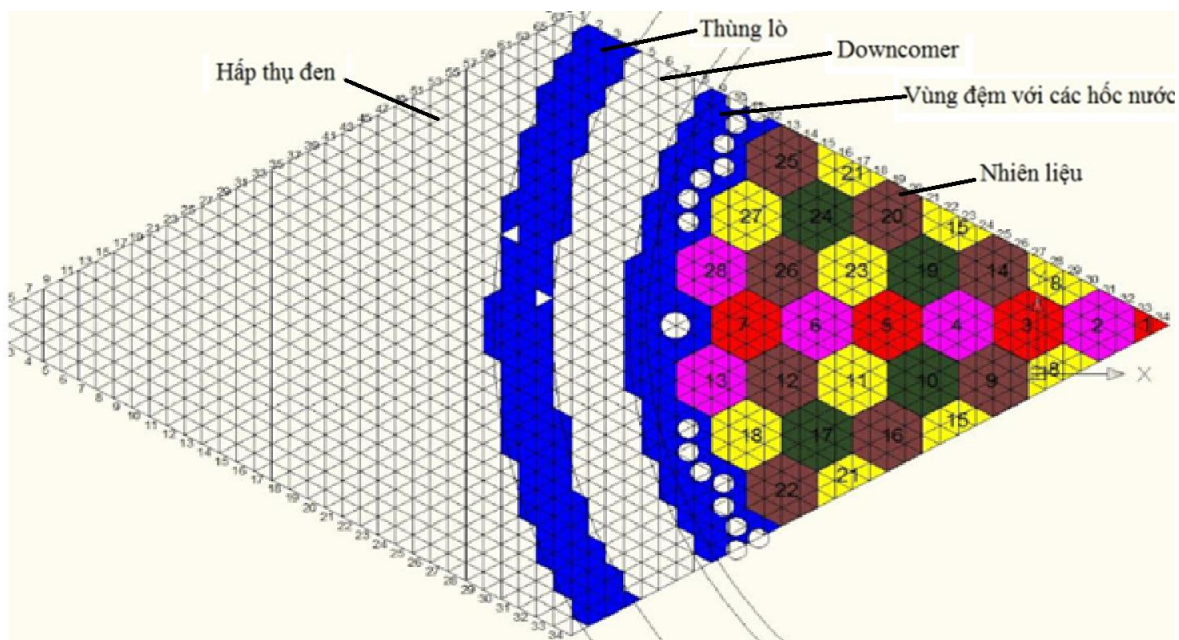
Trong nghiên cứu này, chúng tôi sẽ sử dụng công cụ tính toán là bộ chương trình SRAC2006, kết hợp với một chương trình con để tạo vòng lặp thay đổi nồng độ boron theo từng bước cháy. Đối tượng tính toán của nghiên cứu này là mô hình vùng hoạt lò phản ứng VVER-1000 trong bài toán chuẩn của OECD/NEA đưa ra năm 2006 [8].

II. PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN VÀ MÔ HÌNH VÙNG HOẠT LÒ PHẢN ỨNG VVER-1000

1. Phương pháp tính toán

Các tính toán được thực hiện bằng bộ chương trình SRAC2006 với 2 modul là PIJ và COREBN. Trong đó, PIJ được dùng để tính toán cháy cho mỗi bó nhiên liệu giúp chuẩn bị các hằng số nhóm làm dữ liệu đầu vào cho việc tính cháy toàn vùng hoạt bằng COREBN.

Vùng hoạt lò phản ứng được mô hình hóa 2D trong SRAC bằng các ô mạng tam giác, mỗi bó nhiên liệu được chia thành 24 tam giác như hình 1.



Hình 1: Mô hình 2D của 1/6 vùng hoạt trong SRAC

Với lò phản ứng hạt nhân, trong quá trình hoạt động, vùng hoạt lò phản ứng luôn được duy trì ở trạng thái tới hạn nhờ các thanh điều khiển và việc thay đổi nồng độ boron trong chất làm chậm. Trong đó, các thanh điều khiển chủ yếu được dùng để điều chỉnh độ phản ứng ở mức tinh tế và để thay đổi công suất của lò. Còn nồng độ boron thường xuyên được điều chỉnh sao cho vùng hoạt lò phản ứng luôn đạt trạng thái tới hạn. Các nồng độ boron này được gọi là *nồng độ boron tới hạn*.

Boron trong chất làm chậm sẽ tạo ra một độ phản ứng âm ρ_w được tính theo công thức sau [9]:

$$\rho_w = 1.92C \times 10^{-3}(1-f_0) \quad (1)$$

Trong đó : ρ_w : độ phản ứng âm do boron

C : nồng độ boron

f_0 : hệ số sử dụng notrôn nhiệt khi không có boron

Suy ra độ phản ứng của lò sẽ được tính theo công thức:

$$\rho = \rho_0 - \rho_w = \rho_0 - 1.92 \times 10^{-3} \times C_b \times (1-f_0) \quad (2)$$

Trong đó : ρ : độ phản ứng của lò khi có boron

ρ_0 : độ phản ứng của lò khi không có boron

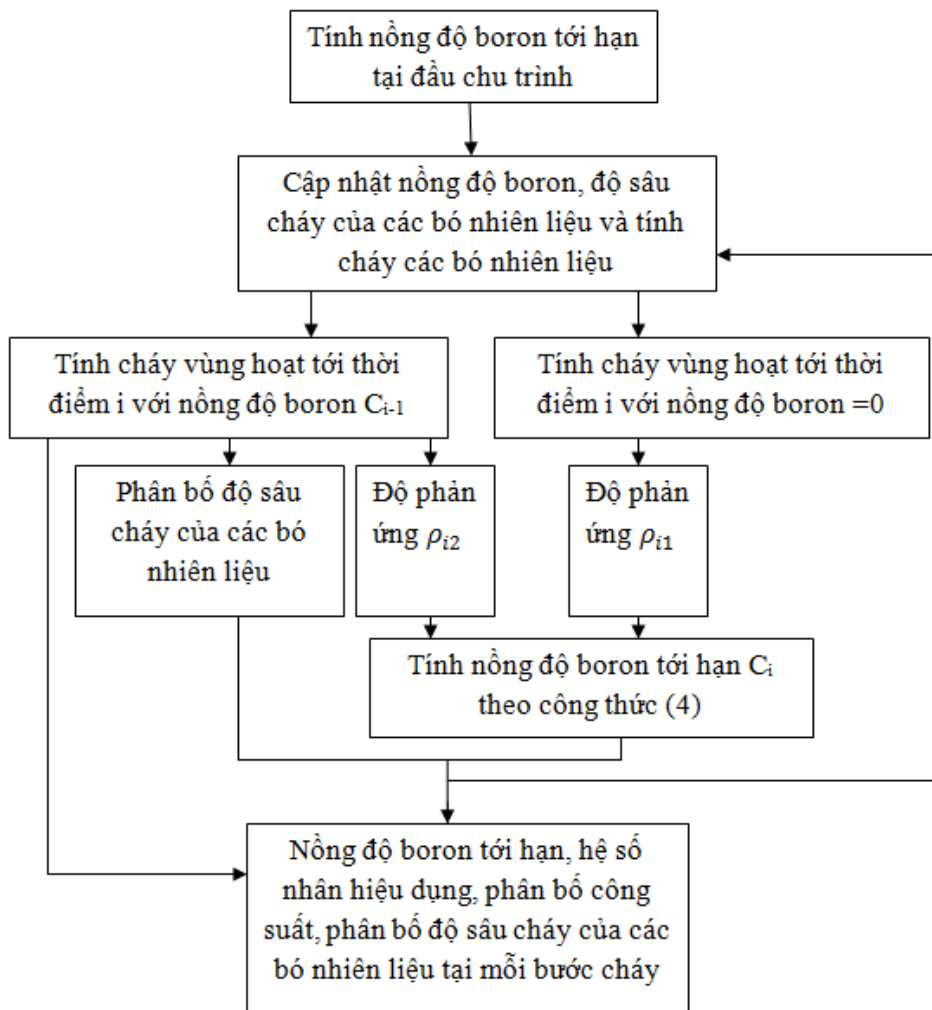
Công thức (2) cho thấy, tại cùng một thời điểm độ phản ứng của lò phụ thuộc tuyến tính vào nồng độ boron. Vì vậy, xét tại thời điểm i nếu vùng hoạt cần có độ phản ứng ρ_i thì nồng độ boron C_i tương ứng có thể tính được khi biết 2 độ phản ứng ρ_{i1} và ρ_{i2} của lò tương ứng với 2 giá trị nồng độ boron C_{i1} và C_{i2} theo công thức (3).

$$C_i = \frac{C_{i1}(\rho_i - \rho_{i2}) + C_{i2}(\rho_{i1} - \rho_i)}{\rho_{i1} - \rho_{i2}} \quad (3)$$

Trong nghiên cứu này, việc tính toán cháy được thực hiện khi nồng độ boron tại mỗi bước cháy được điều chỉnh sao cho lò đạt gần trạng thái tới hạn, do vậy độ phản ứng ρ_i được cho là xấp xỉ 0 (hệ số nhân hiệu dụng $K_{eff} = 1,01$), vì ngoài boron còn có các yếu tố khác ảnh hưởng tới độ phản ứng làm cho lò tới hạn. Và để đơn giản tính toán, chọn $C_{i1} = 0$, C_{i2} chính là nồng độ boron tới hạn ở thời điểm $i-1$ ($C_{i2} = C_{i-1}$). Vậy công thức (3) sẽ trở thành:

$$C_i = \frac{C_{i-1}(\rho_{i1} - \rho_i)}{\rho_{i1} - \rho_{i2}} \quad (4)$$

Sơ đồ thuật toán vòng lặp tính cháy khi thay đổi nồng độ boron tới hạn được mô tả như hình 2.



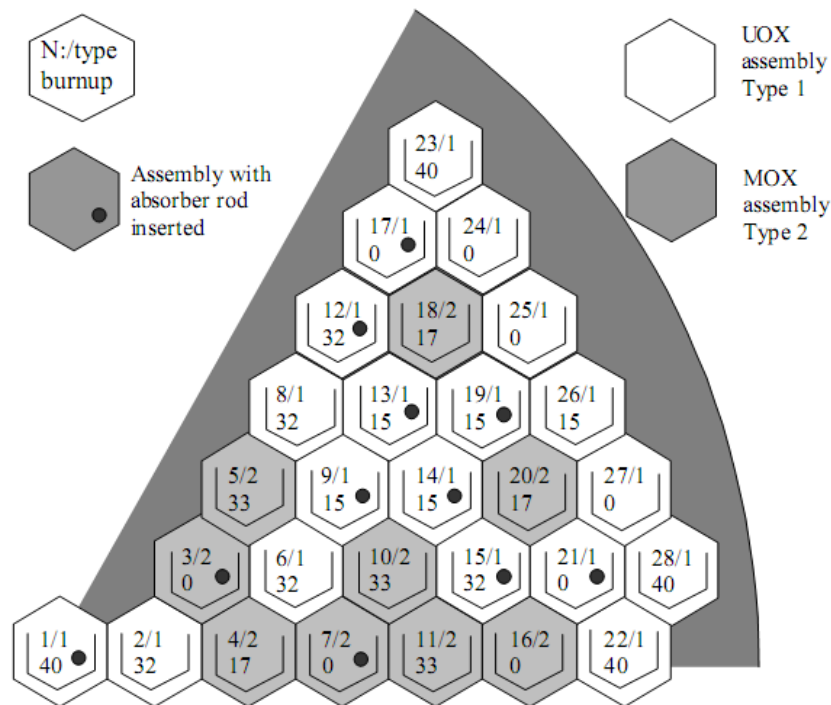
Hình 2: Sơ đồ thuật toán tính cháy vùng hoạt với nồng độ boron tới hạn

Giả sử tại thời điểm $i-1$, nồng độ boron tới hạn tính được là C_{i-1} và xác định được độ sâu cháy của từng bó nhiên liệu. Thực hiện tính cháy các bó nhiên liệu và toàn lò tới thời điểm i với nồng độ boron lần lượt là 0 và C_{i-1} . Khi đó sẽ thu được các độ phản ứng ρ_{i1} và ρ_{i2} , đồng thời có được độ sâu cháy của từng bó nhiên liệu tại thời điểm i . Áp dụng công thức (3) để tính nồng độ boron tới hạn C_i sau đó quay trở lại vòng lặp.

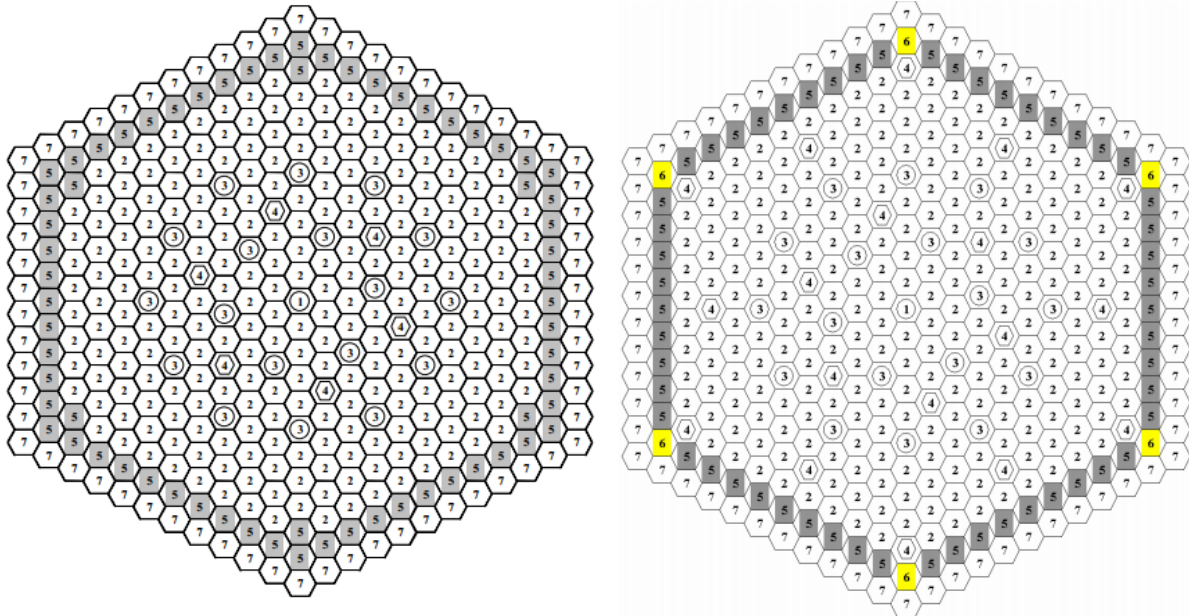
2. Mô hình vùng hoạt lò phản ứng VVER-1000

Mô hình vùng hoạt lò phản ứng được sử dụng trong nghiên cứu này là mô hình trong bài toán chuẩn của OECD/NEA. Trong đó, vùng hoạt gồm có 163 bó nhiên liệu với 30% bó nhiên liệu MOX (mixed oxide) và 70% bó nhiên liệu UOX (Uranium dioxide), (Hình 3).

Trong vùng hoạt bao gồm cả bó nhiên liệu tươi và bó nhiên liệu đã cháy. Trong đó: nhiên liệu MOX có 3 loại tương ứng với 3 giá trị bước cháy là 0, 17 và 33 MWd/kg, nhiên liệu UOX có 4 loại tương ứng với 4 giá trị bước cháy là 0, 15, 32 và 40 MWd/kg. Các bó nhiên liệu gồm 331 thanh nhiên liệu được sắp xếp theo các ô mạng hình lục giác (Hình 4)



Hình 3: Vị trí các loại bó nhiên liệu trong 1/6 vùng hoạt



- 1: Ống trung tâm
- 2: Thanh nhiên liệu UO_2 độ giàu 4.2%
- 3: Ống dẫn
- 4: Thanh nhiên liệu U-Gd, 5% Gd_2O_3
- 5: Thanh nhiên liệu độ giàu 3.7 %
- 7: Chất làm chậm

(a)

- 1: Ống trung tâm
- 2: Thanh nhiên liệu Pu_3.6
- 3: Ống dẫn
- 4: Thanh nhiên liệu U-Gd, 4% Gd_2O_3
- 5: Thanh nhiên liệu Pu_2.7
- 6: Thanh nhiên liệu Pu_2.4
- 7: Chất làm chậm

(b)

Hình 4: Mô hình bó nhiên liệu UOX (a) và MOX (b)

III. Kết quả tính toán

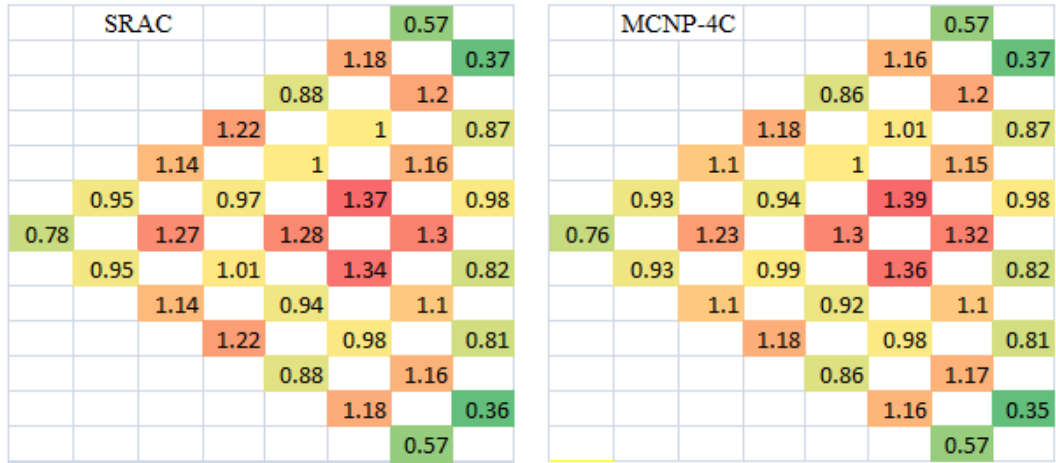
1. Tính toán bài toán chuẩn tại đầu chu trình

Các tính toán được thực hiện tại hai trạng thái đưa ra trong bài toán chuẩn [8] nhằm mục đích đánh giá độ chính xác của công cụ tính toán và phương pháp mô hình hóa. Việc tính toán được thực hiện với 2 trạng thái:

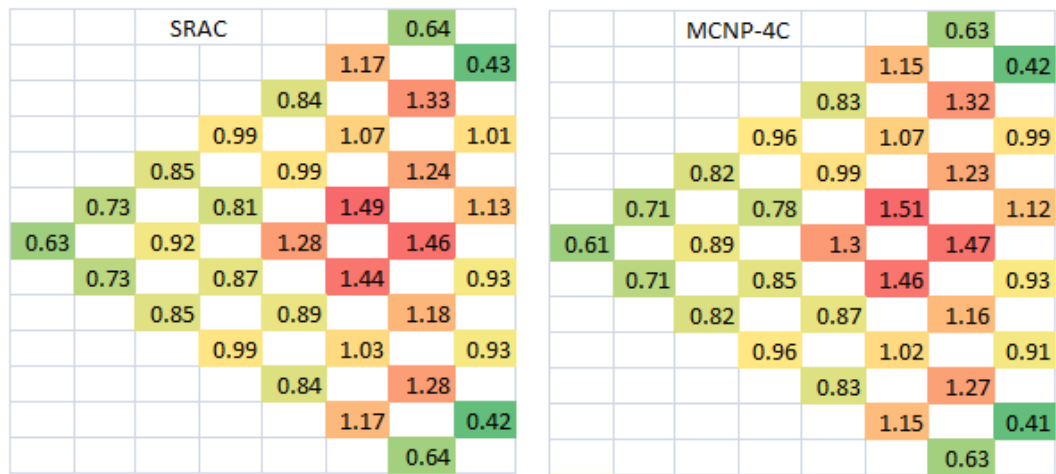
- Trạng thái S1, trạng thái đang hoạt động với nhiệt độ nhiên liệu là 1027 K, nhiệt độ chất làm chậm là 575 K và nồng độ boron 1300 ppm.
- Trạng thái S4, trạng thái đang hoạt động và không có boron.

Bảng 1. Hệ số nhân hiệu dụng K-eff

Trạng thái	SRAC	MCNP-4C	MCU	RADAR	SRAC-MCNP4C (%)	SRAC-MCU (%)	SRAC-RADAR (%)
S1	1.037488	1.03770	1.03341	1.03769	-0.02	0.39	-0.02
S4	1.138461	1.13871	1.13390	1.14081	-0.02	0.40	-0.20



(a)



(b)

Hình 5: Phân bố công suất tại trạng thái S1 (a) và S4 (b)

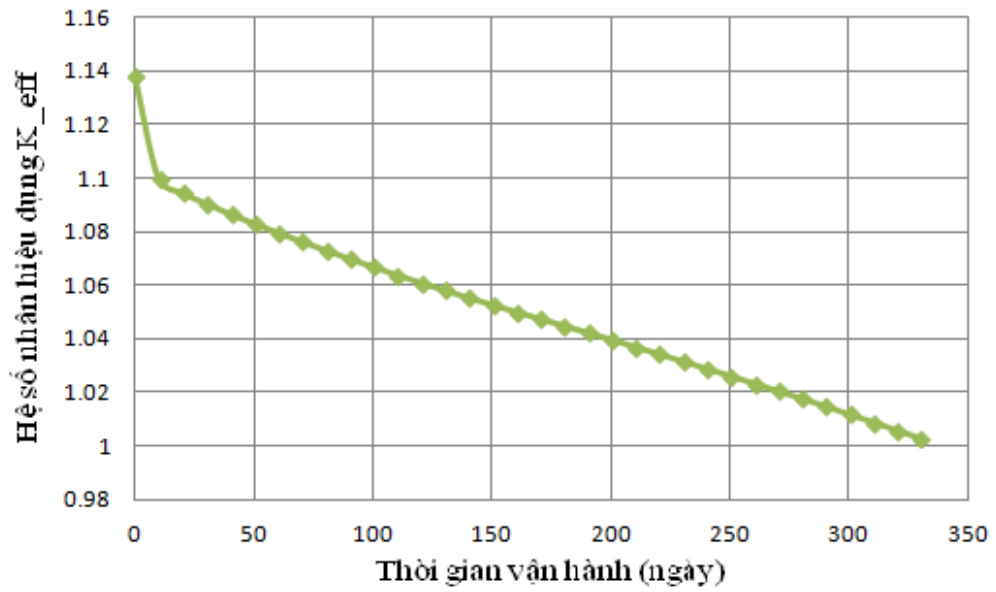
So sánh các kết quả tính toán hệ số nhân hiệu dụng bằng SRAC tại hai trạng thái với kết quả đưa ra bởi các chương trình tính toán MCNP-4C, MCU, RADAR trong bài toán chuẩn [8] cho thấy kết quả sai khác nhỏ (Bảng 1).

Tính toán phân bố công suất của vùng hoạt tại hai trạng thái cũng cho thấy sự phù hợp tốt (Hình 5). Kết quả sai khác lớn nhất giữa hai chương trình tính toán là 3.64% tại trạng thái S1 và 3.85% tại trạng thái S4. Vì vậy, việc mô hình hóa và tính toán vùng hoạt bằng chương trình SRAC có thể tin cậy và có thể áp dụng cho bài toán tính cháy vùng hoạt.

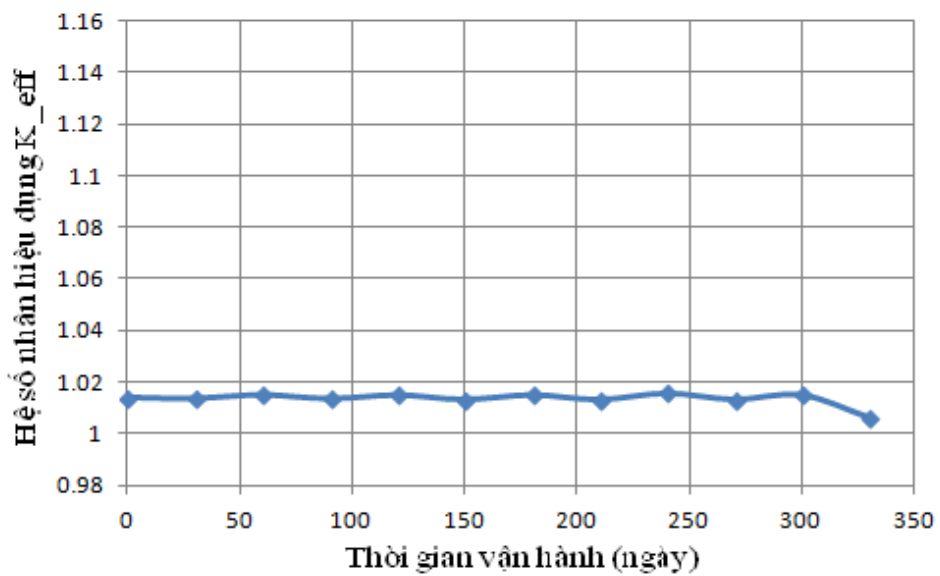
2. Tính toán cháy vùng hoạt

Hệ số nhân hiệu dụng và nồng độ boron tới hạn

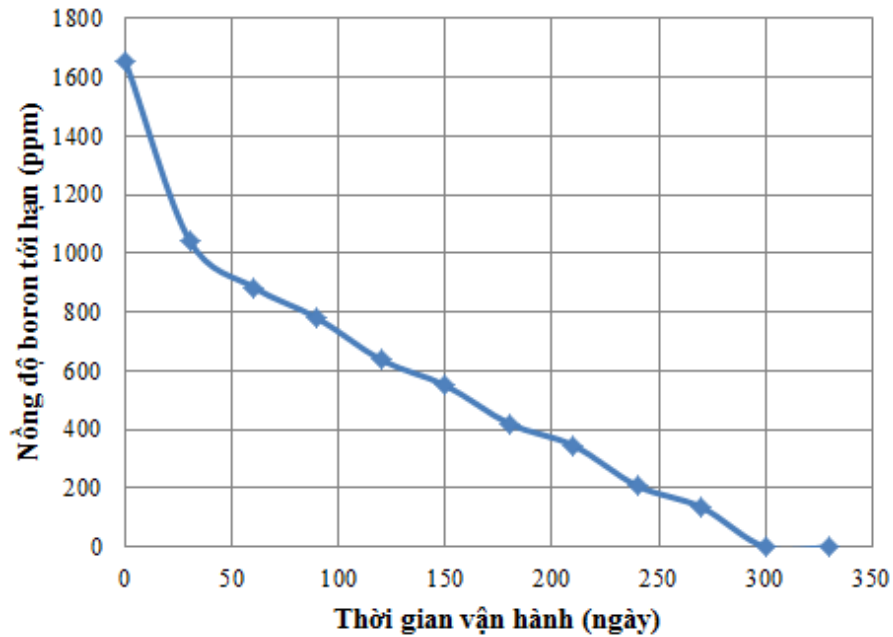
Tính toán cháy khi lò phản ứng không có boron thu được kết quả hệ số nhân hiệu dụng giảm dần theo thời gian cháy và xấp xỉ bằng 1 tại 330 ngày, tương ứng với thời gian vận hành của lò (Hình 6). Tại thời điểm ban đầu, hệ số nhân hiệu dụng giảm mạnh do sự tạo thành các chất nhiễm độc trong lò phản ứng. Sau một thời gian, các chất này sẽ đạt trạng thái cân bằng vì vậy hệ số nhân sẽ giảm dần theo sự giảm nồng độ của U235.



Hình 6: Sự thay đổi hệ số nhân hiệu dụng theo thời gian vận hành khi lò không có boron



Hình 7: Hệ số nhân hiệu dụng theo thời gian vận hành khi lò gần tới hạn



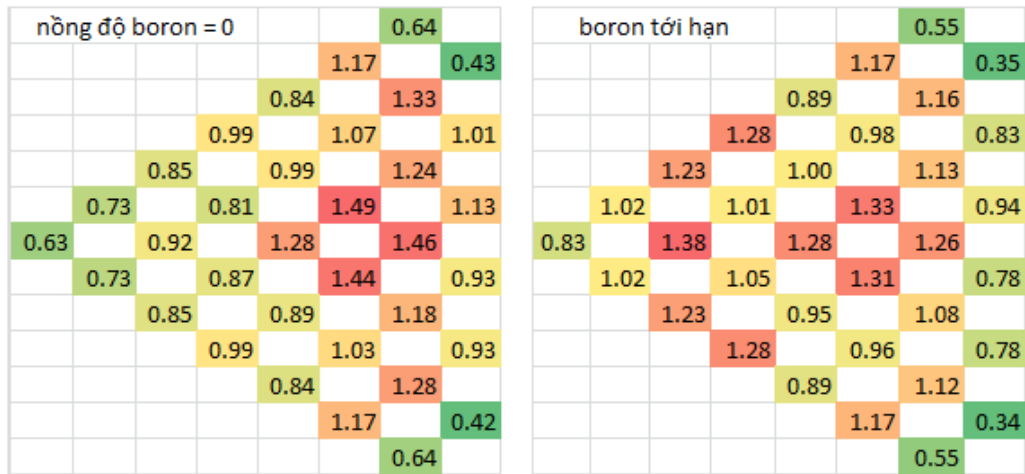
Hình 8: Nồng độ boron tới hạn theo thời gian vận hành

Kết quả hệ số nhân theo thời gian vận hành (Hình 7) cho thấy lò luôn được duy trì trạng thái gần tới hạn ($K_{eff} \approx 1$). Để duy trì hệ số nhân như vậy thì nồng độ boron đã giảm dần theo thời gian vận hành (Hình 8). Với bước cháy đầu tiên, nồng độ boron cũng giảm mạnh do sự tạo thành các chất nhiễm độc và tới cuối chu trình nồng độ boron bằng 0.

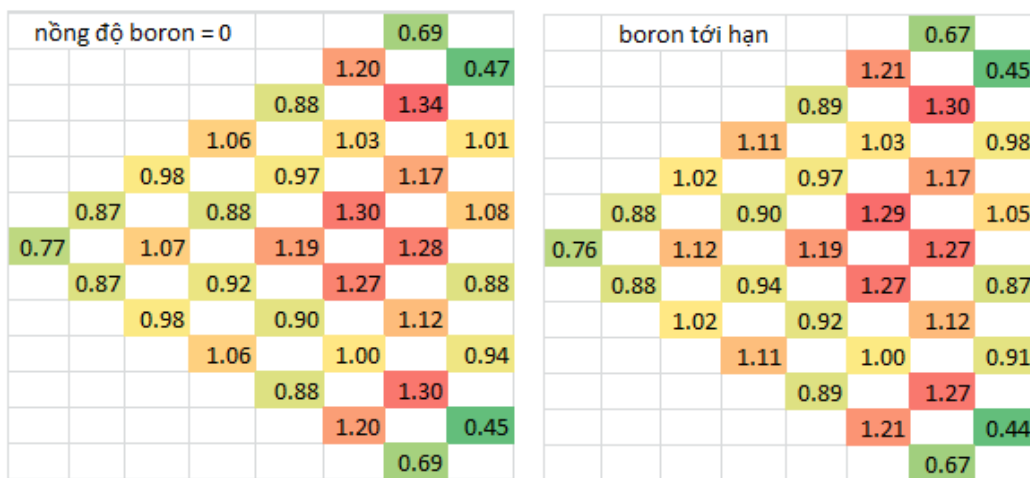
Phân bố công suất và phân bố độ sâu cháy

Tính toán phân bố công suất của lò tại thời điểm 0, 150 và 330 ngày trong hai trường hợp lò không có boron và boron tới hạn, kết quả thu được như hình 9.

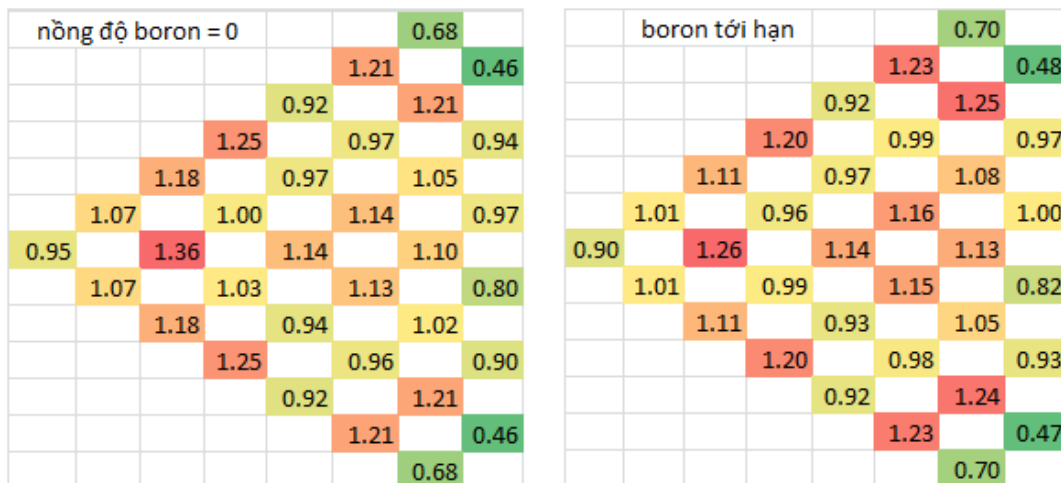
Trong cả hai trường hợp, phân bố công suất đều phẳng hơn khi về cuối chu trình, đồng thời hệ số đỉnh công suất cũng thấp hơn. Và trong trường hợp boron tới hạn thì hệ số đỉnh công suất luôn thấp hơn trong suốt quá trình cháy so với trường hợp khi lò không có boron. Điều này hoàn toàn phù hợp với thực tế khi lò vận hành. Sự khác nhau của phân bố công suất trong 2 trường hợp tính toán sẽ dẫn đến sai khác về độ sâu cháy của các bó nhiên liệu tại cuối chu trình. Hình 10 biểu diễn phân bố độ sâu cháy trong hai trường hợp và độ sai khác giữa chúng. Trong đó, sai khác lớn nhất là 9.65 %. Điều này cho thấy tác động của boron lên quá trình cháy của lò phản ứng và sự cần thiết thực hiện tính toán cháy trong điều kiện boron tới hạn.



(a)

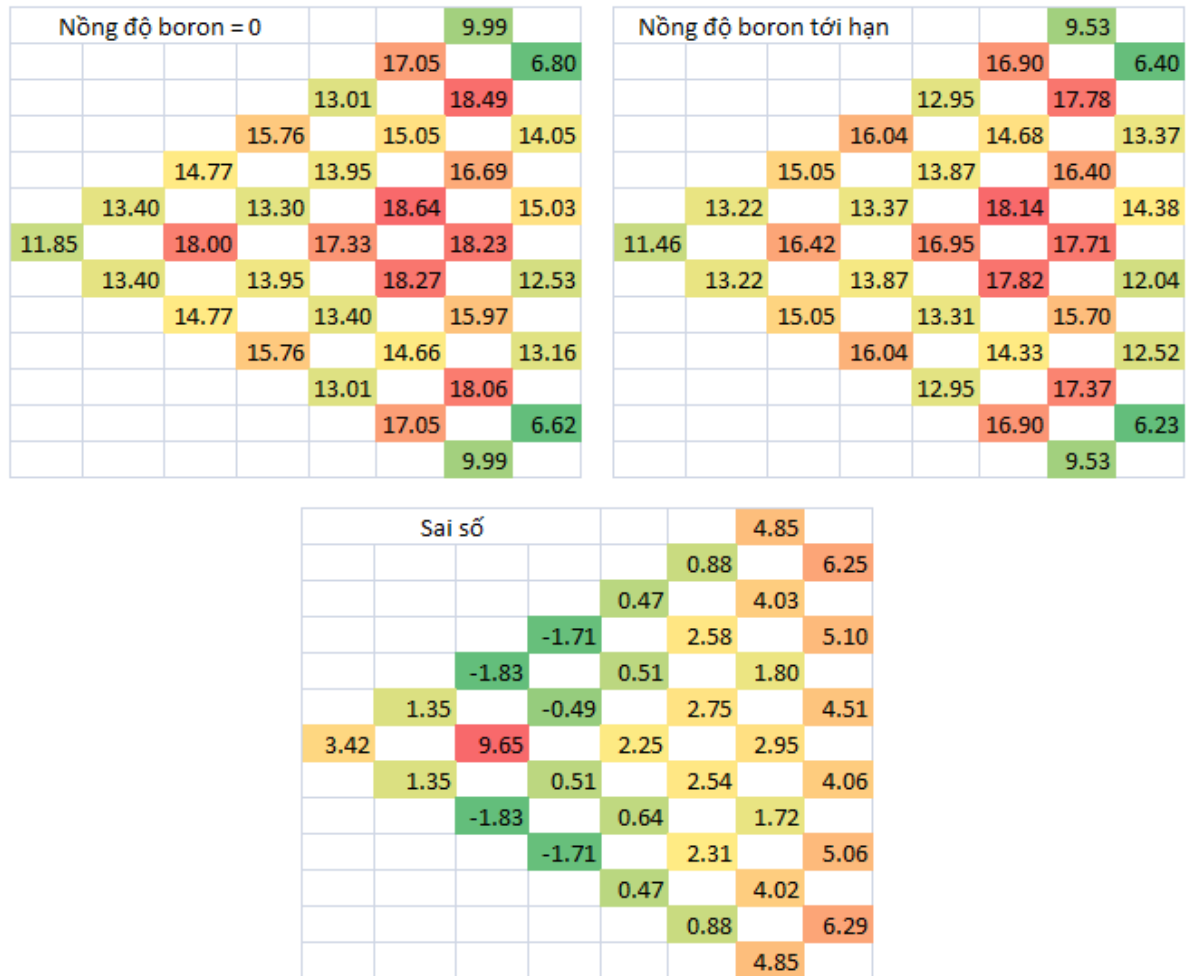


(b)



(c)

Hình 9: Phân bố công suất tại thời điểm 0 ngày (a), 150 ngày (b) và 330 ngày (c)



Hình 10: Phân bố bước cháy của các bó nhiên liệu tại 330 ngày (MWd/kg)

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thực hiện tính toán các giá trị hệ số nhân hiệu dụng, phân bố công suất, phân bố bước cháy và thời gian vận hành của lò. Các tính toán thực hiện tại đầu chu trình cho kết quả khá phù hợp với kết quả từ bài toán chuẩn. Điều này cho thấy các kết quả tính toán có thể tin cậy và có thể áp dụng mô hình tính toán cho bài toán cháy.

Các tính toán cháy đã được thực hiện trong 2 trường hợp nồng độ boron bằng 0 và boron tới hạn. Các kết quả gồm có hệ số nhân hiệu dụng, nồng độ boron tới hạn theo bước cháy, phân bố công suất và phân bố độ sâu cháy của các bó nhiên liệu tại cuối chu trình. Tính toán đã cho thấy sự khác nhau giữa 2 trường hợp. Qua đó có thể thấy sự ảnh hưởng của nồng độ boron lên quá trình cháy của vùng hoạt là đáng kể. Vì vậy việc tính toán các đặc trưng vật lý vùng hoạt trong điều kiện này là rất cần thiết để có được hiểu biết rõ ràng và chính xác hơn.

Tuy nhiên, nghiên cứu này cũng mới chỉ thực hiện với mô hình 2D trong điều kiện công suất, nhiệt độ không thay đổi và chưa có thanh điều khiển. Vì vậy, hướng nghiên cứu tiếp theo cần được đi sâu và tính toán chi tiết hơn khi thực hiện tính với mô hình 3D, cập nhật các giá trị công suất, vị trí thanh điều khiển và phân bố nhiệt độ trong lò để có được các kết quả đánh giá chính xác hơn các đặc trưng vật lý khi lò vận hành thực tế.

Tài liệu tham khảo

- [1] H. György, Sz. Czifrus. “Burnup calculation of the Generation IV reactors”, *Progress in Nuclear Energy* 81, 150-160, 2015.
- [2] T. Lötsch, V. Khalimonchuk, A. Kuchin. “Proposal of a benchmark for core burnup calculations for a VVER-1000 reactor core”, *Proceedings of the 19th AER Symposium on VVER Reactor Physics and Reactor Safety*, p.53, 2009.
- [3] Yashar Rahmani, Ali Pazirandeh, Mohammad B. Ghofrani, Mostafa Sadighi. “Calculation of the fuel composition and the thermo-neutronic parameters of the Bushehr’s VVER-1000 reactor during the initial startup and the first cycle using the WIMSD5-B, CITATION-LDI2 and WERL codes”, *Annals of Nuclear Energy* 57, 68-83, 2013.
- [4] O. Safarzadeh, F. Saadatian-Derakhshandeh, A.S. Shiran. “Calculation of reactivity coefficients with burn-up changes for VVER-1000 reactor”, *Progress in Nuclear Energy* 81, 217-227, 2015.
- [5] Omid Noori-Kalkhoran, Mehdi Yarizadeh-Beneh, Rohollah Ahangari. “Development of external coupling for calculation of the control rod worth in terms of burn-up for a VVER-1000 nuclear reactor”, *Nuclear Engineering and Design* 305, 612-625, 2016.
- [6] Trần Việt Phú. “Tính toán một số đặc trưng neutron của vùng hoạt lò phản ứng VVER-1000”, *ĐTCB 2015-2016*.
- [7] Trần Vĩnh Thành. “Nghiên cứu xây dựng mô hình tính toán cháy cho lò phản ứng VVER-1200/V491 sử dụng chương trình SRAC và AGBC”, *ĐTCS 2016*.
- [8] Eugeny Gomin, Mikhail Kalugin, Dmitry Oleynik. “VVER-1000 MOX Core Computational Benchmark”, *Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development, NEA/NSC/DOC 17*, 2005.
- [9] Lamarsh, J.R., Baratta, A.J.. "Introduction to Nuclear Engineering", *Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey (United States)*, third edition, 2001.

STUDY OF CORE BURNUP CALCULATION FOR A VVER-1000 REACTOR CORE WITH CONSIDERATION TO CRITICAL BORON CONCENTRATION

NGUYỄN THỊ DUNG, PHẠM THỊ THÚY AN, TRẦN VIỆT PHÚ

Institute for Nuclear Science and Technology, 179 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

Email: Dungvlk52@gmail.com

Abstract: The report presents the result of core burnup calculations for a VVER-1000 reactor core with consideration to critical boron concentration. The calculation is performed by the PIJ and COREBN modules of the SRAC code system. A subroutine is developed to correct critical boron concentration during burnup. The effective multiplication factor (K-eff), power distribution, burnup distribution at the end of cycle, operation time of the reactor and the critical boron concentration in the burnup process are calculated. The results are compared to the core burnup calculations without boron concentration correction to better comprehend the influence of boron concentration to the physical characteristics of reactor core during the operation.

Keywords: *burnup calculation, critical boron concentration, SRAC, COREBN, VVER-1000.*