

# TỐI ƯU NẠP TẢI NHIÊN LIỆU CHO Lò PHẢN ỨNG VVER-1000 SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG TỐI KIM VÀ TÌM KIẾM TABU

TRẦN VIỆT PHÚ<sup>1</sup>, TRẦN HOÀI NAM<sup>2</sup>, AKIO YAMAMOTO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân, 179 – Hoàng Quốc Việt – Hà Nội*

*Email: [vietphu@vinatom.gov.vn](mailto:vietphu@vinatom.gov.vn), [vietphu@gmail.com](mailto:vietphu@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Viện Nghiên cứu và Phát triển – Đại học Duy Tân, K7/25 – Quang Trung – Đà Nẵng*

<sup>3</sup>*Đại học Nagoya, Thành phố Nagoya – Nhật Bản*

**Tóm tắt:** Một nghiên cứu tối ưu nạp tải nhiên liệu của lò VVER-1000 đã được tiến hành bằng phương pháp mô phỏng tối kim (SA) và tìm kiếm Tabu (TS). Trong nghiên cứu này, một chương trình mô phỏng vật lý vùng hoạt đã được phát triển dựa trên lý thuyết khuếch tán nhiều nhóm và sẽ được dùng cho các bài toán tối ưu nạp tải của lò VVER. Chương trình mô phỏng này chia vùng hoạt thành lưới tam giác và có tốc độ tính toán nhanh. Việc kiểm chứng chương trình cũng đã được thực hiện thông qua tính toán lại một bài toán chuẩn của lò VVER-1000. Một vài phương pháp tìm kiếm tối ưu như SA, TS và sự kết hợp của chúng đã được nghiên cứu và áp dụng bằng cách ghép nối với chương trình mô phỏng vùng hoạt. Các tính toán nhằm tìm kiếm cấu hình nạp tải tối ưu bằng các phương pháp trên đã được thực hiện dựa trên mô hình vùng hoạt của một bài toán chuẩn. Việc so sánh giữa các phương pháp tìm kiếm này cho thấy sự kết hợp SA+TS chính là phương pháp hiệu quả nhất để giải quyết bài toán tối ưu nạp tải nhiên liệu.

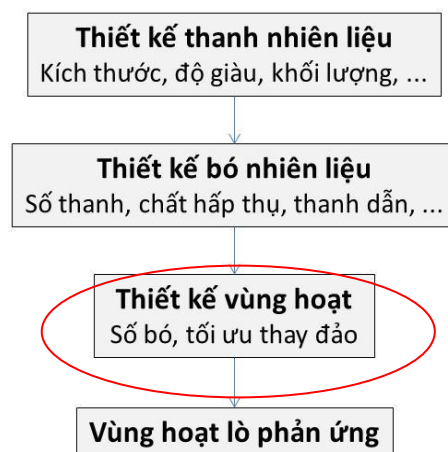
**Từ khóa:** *tối ưu nạp tải nhiên liệu, mô phỏng tối kim, tìm kiếm Tabu, VVER-1000*

## I. Mở đầu

Tối ưu nạp tải nhiên liệu là một bài toán quan trọng trong thiết kế vùng hoạt lò phản ứng, và được thực hiện sau mỗi chu trình nhiên liệu đối với hầu hết các lò phản ứng hạt nhân. Hình 1 mô tả sơ đồ các bước chính của công việc thiết kế vùng hoạt lò phản ứng, trong đó tối ưu thay đảo nhiên liệu đóng vai trò quan trọng trong việc kết hợp các bó nhiên liệu trong vùng hoạt.

Một lò phản ứng gồm khoảng 200 bó nhiên liệu thì không gian tìm kiếm có thể lên tới  $10^{20} - 10^{30}$  khả năng nạp tải. Đối với mỗi khả năng nạp tải, các tính toán mô phỏng vật lý của mô hình vùng hoạt được thực hiện thông qua các chương trình mô phỏng. Do không gian tìm kiếm là rất lớn nên không thể xem xét được hết tất cả các khả năng. Vì vậy, để giải quyết bài toán tối ưu cần có một chương trình mô phỏng vùng hoạt có tốc độ tính toán nhanh và một phương pháp tìm kiếm tối ưu phù hợp.

Tối ưu thay đảo nhiên liệu là nhiệm vụ được đặt ra ngay từ thời điểm khởi đầu của công nghệ lò phản ứng hạt nhân. Nhưng những đột phá về nghiên cứu tối ưu sử dụng các thuật toán tìm kiếm chỉ được triển khai nhiều từ những năm 1980 với nhiều công trình nghiên cứu sử dụng các phương pháp tìm kiếm cổ điển. Cùng với sự phát triển của công nghệ tính toán và máy tính, bài toán tối ưu thay đảo nhiên liệu được quan tâm nhiều và được thực hiện bởi rất nhiều các nhóm nghiên cứu lớn trên thế giới. Các thuật toán tìm kiếm ngẫu nhiên cổ điển thường được sử dụng như: thuật toán tìm kiếm trực tiếp (Direct search - DS) [1, 2], phương pháp tối kim (Simulated annealing - SA) [2-5], thuật toán di truyền (Generic algorithms - GA) [2, 6-8],... và sự kết hợp của các phương pháp đó với các quy luật phỏng đoán [2][8]. Các thuật toán tìm kiếm ngẫu nhiên này được sử dụng vì chúng có khả năng thu được lời giải tối ưu toàn cục, hoặc chí ít cũng là tiệm cận tới giá trị tối ưu toàn cục.



Hình 1: Sơ đồ mô tả các bước chính của bài toán thiết kế vùng hoạt lò phản ứng

Những năm gần đây, một số nghiên cứu tối ưu thay đảo nhiên liệu được triển khai với ứng dụng các thuật toán tìm kiếm ngẫu nhiên mạnh hơn như thuật toán tiến hóa (Evolution method - EM) [9], thuật toán bầy đàn (Particle swarm optimization - PSO) [10, 11], thuật toán tìm kiếm Tabu (TS) [12, 13],...

Tại Việt Nam, Trong những năm 1990, việc vận hành và nạp tải lò phản ứng Đà Lạt đã được thực hiện bởi nhóm các chuyên gia tại viện Nghiên cứu Hạt nhân Đà Lạt [14]14-17]. Gần đây có một số nghiên cứu theo hướng này được thực hiện bởi nhóm của PGS. TS. Đỗ Quang Bình. Nhóm này đã thực hiện nghiên cứu các phương pháp thuật toán di truyền (GA) [16], phương pháp mô phỏng tìm kiếm (SA) [17] để tìm kiếm các khả năng nạp tải tối ưu và mô đun CITATION của chương trình SRAC được sử dụng trong các tính toán vật lý để xác định các thông số đặc trưng hạt nhân của lò phản ứng. Trong một tính toán thử nghiệm bằng phương pháp SA mẫu tái nạp nhiên liệu tối ưu tìm được cho chu trình vận hành thứ hai của lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt có các đặc trưng tốt hơn đáng kể so với mẫu tái nạp nhiên liệu thực tế. Tuy nhiên các đối tượng nghiên cứu của nhóm hiện tại mới chỉ thực hiện tính toán với đối tượng là lò phản ứng hạt nhân nghiên cứu mà cụ thể là lò nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt chứ chưa hướng tới các lò phản ứng hạt nhân công suất sẽ được sử dụng trong dự án điện hạt nhân ở Việt Nam. Ngoài ra, mô đun CITATION là một chương trình tính toán tất định có tốc độ tính toán nhanh nếu so sánh với các chương trình sử dụng phương pháp Monte Carlo. Tuy nhiên, đối với bài toán lò năng lượng, với số lượng cấu hình cần tính lớn thì tốc độ tính toán của mô đun CITATION là khá chậm.

Có thể thấy bài toán tối ưu nạp tải vùng hoạt lò phản ứng hạt nhân hiện nay vẫn là một bài toán đang được quan tâm nghiên cứu trên thế giới. Các phương pháp tìm kiếm không cũng như chương trình mô phỏng đang không ngừng được nghiên cứu để nâng cao hiệu suất và độ chính xác. Ngoài ra, đây là một bài toán mới và rất cần thiết đối với nghiên cứu công nghệ điện hạt nhân ở Việt Nam.

Để thực hiện nghiên cứu tối ưu thay đảo nhiên liệu cho lò VVER cần phải có một chương trình mô phỏng vùng hoạt có tốc độ tính toán nhanh. Vì vậy, một chương trình mô phỏng vùng hoạt lò VVER đã được chúng tôi phát triển. Chương trình này đã được áp dụng để tính toán bài toán chuẩn và cho thấy nó có độ chính xác đảm bảo và có tốc độ tính toán nhanh (nhanh hơn mô đun CITATION khoảng 6 đến 10 lần).

Bên cạnh đó, nhận thấy phương pháp SA là một phương pháp phổ biến và dễ áp dụng trong nghiên cứu tối ưu thay đảo, tuy nhiên hiệu suất lại thấp dẫn đến số cấu hình cần tính lớn. Một sự cải tiến phương pháp SA đã được thực hiện bằng cách thêm vào một số thuật toán của phương pháp TS. Từ đó giúp cho hiệu suất và sự ổn định của phương pháp mới (SA+TS) nâng cao lên. Kết hợp chương trình mô phỏng vùng hoạt và các phương pháp tìm kiếm, chúng tôi đã tạo được một bộ chương trình có thể tìm kiếm cấu hình nạp tải cho các loại lò VVER.

Để kiểm tra hiệu quả hoạt động của chương trình, một bài toán mẫu của lò VVER-1000/V320 [18] đã được đưa ra và tính toán. Đầu tiên, việc tính toán các đặc trưng vật lý được thực hiện và so sánh với bài toán chuẩn để đánh giá độ chính xác của chương trình mô phỏng vùng hoạt. Sau đó, áp dụng chương trình tìm kiếm cấu hình nạp tải tối ưu để tìm cấu hình mới cho lò VVER-1000/V320. Kết quả cho thấy hiệu suất cao của phương pháp tìm kiếm SA+TS cũng như tìm được các cấu hình mới có giá trị hàm mục tiêu lớn hơn so với của giá trị tham khảo.

## II. Các phương pháp tìm kiếm tối ưu và chương trình mô phỏng vùng hoạt

Trong phần này, chúng tôi sẽ trình bày lý thuyết về các phương pháp tìm kiếm tối ưu cũng như giới thiệu về chương trình mô phỏng vùng hoạt mới. Các phương pháp tìm kiếm tối ưu có mục tiêu là tìm nghiệm tốt nhất trong không gian nghiệm khả dĩ. Việc đánh giá một nghiệm là tốt hay xấu được dựa trên giá trị của các hàm mục tiêu tương ứng với nghiệm đó và trong nghiên cứu này, giá trị hàm mục tiêu càng lớn thì nghiệm đó càng tốt. Các phương pháp này thường được sử dụng khi không gian nghiệm là quá lớn và không có khả năng xem xét hết tất cả các nghiệm. Trong bài toán tìm kiếm cấu hình nạp tải tối ưu cho lò phản ứng hạt nhân, thường sẽ có 2 mục tiêu chính như sau:

- Một trong số các mục tiêu quan trọng đó là phân bố công suất cần phải đạt độ đồng đều cao nhất, tránh các đỉnh công suất cao bất thường ảnh hưởng tới các thông số an toàn vận hành lò phản ứng.
- Một thông số quan trọng nữa là thời gian cháy nhiên liệu, lò phản ứng cần đạt trạng thái tới hạn lâu nhất ( $k_{eff}$  lớn) để đảm bảo đạt hiệu quả sử dụng nhiên liệu cao nhất.

Thông thường, việc giải bài toán tối ưu nạp tải có các bước như sau:

1. Đưa ra một số cấu hình khả dĩ ban đầu và dùng làm cấu hình gốc (base LPs) thế hệ thứ nhất.
2. Tạo các cấu hình nạp tải nhiên liệu mới từ các cấu hình gốc.
3. Tính toán các đặc trưng vùng hoạt và so sánh các giá trị hàm mục tiêu.
4. Lựa chọn cấu hình gốc thế hệ tiếp theo và quay lại bước 2.

Vòng lặp trên sẽ kết thúc dựa trên một số điều kiện do người thực hiện đặt ra. Các điều kiện này được đặt ra để kết thúc quá trình việc tính toán và lựa chọn cấu hình tối ưu. Thông thường, có một số điều kiện kết thúc được chọn như: giới hạn tổng số cấu hình được tính toán, hàm mục tiêu đạt giá trị cần thiết, cấu hình tối ưu không thay đổi sau một số vòng lặp nhất định... Cấu hình tối ưu là cấu hình có giá trị hàm mục tiêu tốt nhất.

Các phương pháp tìm kiếm khác nhau chủ yếu được phân biệt bởi cách thực hiện bước 2 và bước 4. Một phương pháp tìm kiếm được đánh giá tốt nếu nó có thể thoát khỏi các cực trị địa phương và có khả năng tìm được cấu hình đạt giá trị hàm mục tiêu tốt với số cấu hình cần tính ít (số vòng lặp ít -> thời gian tính toán nhanh).

Ngoài ra, bước 3 được thực hiện bởi chương trình mô phỏng vùng hoạt. Trong mỗi vòng lặp, thời gian tính toán ở bước này là lớn nhất. Vì vậy, để tăng tốc độ tính toán, cần phải có một chương trình mô phỏng vùng hoạt có tốc độ tính toán nhanh. Sau đây chúng tôi sẽ giới thiệu một số phương pháp tìm kiếm được sử dụng trong nghiên cứu này.

### 2.1. Phương pháp tìm kiếm trực tiếp (Direct Search – DS)

Trong nghiên cứu này, các cấu hình mới được tạo ra từ 1 cấu hình gốc bằng cách đổi chỗ 1, 2 hoặc 3 cặp bó nhiên liệu. Tất cả các cấu hình mới như vậy được gọi là miền lân cận cấu hình gốc.

Phương pháp tìm kiếm trực tiếp (DS) [1, 2] dựa trên ý tưởng leo dốc. Từ một cấu hình gốc, các cấu hình mới thuộc miền lân cận được xem xét, tính toán và so sánh giá trị hàm mục tiêu. Chỉ cấu hình tốt hơn cấu hình gốc cũ mới được lựa chọn làm cấu hình gốc mới. Cấu hình tối ưu đạt được khi không thể tìm được cấu hình nào tốt hơn ở miền lân cận nữa.

Phương pháp DS có ưu điểm là thời gian tính toán nhanh với số cấu hình tìm kiếm ít. Ngoài ra nó còn có ưu điểm là sẽ đạt được tối ưu địa phương tốt nhất. Tuy nhiên, phương pháp này không có khả năng thoát khỏi các tối ưu địa phương. Vì vậy, phương pháp này hiện nay không còn được sử dụng trực tiếp cho bài toán tối ưu nữa. Thay vào đó, nó được kết hợp với một số phương pháp khác để đạt được tối ưu tốt hơn.

## 2.2. Phương pháp mô phỏng tôi kim. (Simulated Annealing – SA)

Phương pháp mô phỏng tôi kim (SA) dựa trên ý tưởng về mô phỏng dao động của tinh thể kim loại được làm nguội sau khi nóng chảy, nếu quá trình làm nguội được thực hiện chậm, trạng thái năng lượng của tinh thể sẽ thấp hơn so với khi làm nguội nhanh [2]. Trong bài toán tìm kiếm tối ưu, phương pháp này có một khác biệt so với DS và nhờ đó nó có thể thoát khỏi các tối ưu địa phương để tiến đến tối ưu toàn cục. Đó là, ngoài việc chấp nhận các cấu hình mới tốt hơn làm cấu hình gốc, đồng thời đưa vào 1 xác suất chấp nhận cấu hình xấu. Xác suất này sẽ giảm dần theo thời gian và khi nó giảm càng chậm thì cấu hình tìm được sẽ càng tốt hơn, nhưng đồng thời số cấu hình cần tìm kiếm cũng nhiều hơn.

Ví dụ, khi ta tìm được cấu hình  $X_{i+1}$  ở lân cận cấu hình  $X_i$ . Nếu giá trị của hàm mục tiêu tại  $X_{i+1}$  cao hơn tại  $X_i$ , khi đó  $X_{i+1}$  được chấp nhận và quá trình tìm kiếm sẽ tiếp tục thực hiện quanh  $X_{i+1}$ . Tuy nhiên, nếu giá trị của hàm mục tiêu tại  $X_{i+1}$  thấp hơn tại  $X_i$ , nghiệm  $X_{i+1}$  vẫn có thể được chấp nhận với xác suất:

$$\rho = \text{Exp}(-\delta C/T)$$

Với:  $\delta C$ : sự sai khác của giá trị hàm mục tiêu tại  $X_i$  và  $X_{i+1}$

T: “nhiệt độ” của hệ thống.

Khi quá trình mô phỏng tôi kim được khởi động, T được đặt khá lớn như nhiệt độ kim loại nóng chảy. Thông thường, tùy vào từng bài toán mà T ban đầu được chọn sao cho xác suất trên xấp xỉ bằng 1. Tức là khi đó mọi nghiệm xấu đều được chấp nhận. Điều này giúp nâng cao tính toàn cục của việc tìm kiếm. Theo quá trình tìm kiếm tối ưu, T sẽ được giảm dần, và khi T đủ nhỏ, xác suất chấp nhận cấu hình xấu sẽ tiến dần dần về 0. Lúc này, cấu hình xấu không còn được chấp nhận và quá trình tìm kiếm sẽ trở về tương tự như phương pháp DS.

Việc tìm kiếm tối ưu bằng mô phỏng tôi kim có thể được thực hiện theo sơ đồ sau:

1. Đưa vào cấu hình nạp tải ban đầu.
2. Tính toán các đặc trưng vật lý của cấu hình nạp tải.
3. Tính toán giá trị hàm mục tiêu
4. Lựa chọn cấu hình gốc mới dựa vào so sánh giá trị hàm mục tiêu với giá trị tốt nhất trước đó (cấu hình này được dùng để tạo các cấu hình mới trong bước 5)
  - Lớn hơn -> chấp nhận
  - Nhỏ hơn -> xác suất chấp nhận:  $\exp(-\delta C/T)$
5. Tạo cấu hình mới bằng cách đổi chỗ 2 hoặc 3 bó nhiên liệu
6. Lặp lại từ (2)->(5), đếm số vòng lặp  $N_{loop}$ .
7. Khi số vòng lặp 2->5 ( $N_{loop}$ ) đạt đến một giá trị cho trước (Malkov length); đặt lại  $N_{loop} = 0$  và giảm “nhiệt độ” hệ thống:  $T^{(n+1)} = \alpha T^{(n)}$ ,  $\alpha < 1$
8. Quay lại (2) đến khi T đủ nhỏ và hàm mục tiêu hội tụ.

Phương pháp mô phỏng tìm kiếm có ưu điểm tốt là có khả năng thoát khỏi các tối ưu địa phương nhờ việc chấp nhận cấu hình xấu, từ đó có thể đạt được tối ưu toàn cục. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là tốc độ hội tụ chậm, dẫn đến số cấu hình tìm kiếm lớn và thời gian tính toán dài.

### **2.3. Phương pháp tìm kiếm Tabu (TS) đơn giản**

Phương pháp TS cũng là một phương pháp có khả năng tìm kiếm cấu hình tối ưu toàn cục. TS sẽ thực hiện tìm kiếm các cấu hình tối ưu của từng không gian con và so sánh các cấu hình này để chọn ra cấu hình tốt nhất. TS sử dụng một số thuật toán sau:

+ Không gian con lân cận: cấu hình gốc mới được chọn là cấu hình tốt nhất trong miền lân cận của cấu hình gốc trước đó.

+ Danh sách Tabu: một danh sách các cấu hình được tạo ra và cập nhật thường xuyên nhằm tránh việc lặp lại quá trình tìm kiếm.

+ Sự tăng cường: quá trình tìm kiếm sẽ quay lại dùng cấu hình tốt nhất trước đó làm cấu hình gốc đồng thời hiệu chỉnh các tham số tìm kiếm. Điều này được thực hiện nếu cấu hình tốt nhất không thay đổi sau N vòng lặp.

Sự đa dạng hóa: sau một số vòng lặp nhất định, nếu cấu hình tốt nhất không thay đổi, cấu hình gốc mới sẽ được chọn là một cấu hình bất kỳ.

### **2.4. Phương pháp SA kết hợp với TS**

Để khắc phục điểm yếu về thời gian tính toán của phương pháp SA, chúng tôi đã cải tiến phương pháp SA bằng cách sử dụng thêm một số thuật toán của phương pháp tìm kiếm Tabu (Tabu Search – TS) [12, 13]. Nhờ đó, hiệu suất và sự ổn định của phương pháp SA được tăng lên.

Có 3 thuật toán được sử dụng:

1. Miền lân cận: từ 1 cấu hình gốc, các cấu hình mới được tạo ra nhưng cho giá trị hàm mục tiêu nhỏ hơn chính là một phần miền lân cận; khi xác suất chấp nhận xảy ra, cấu hình gốc mới được chọn là cấu hình tốt nhất của phần miền lân cận trên.
2. Tăng cường (Intensification): Khi cấu hình tốt nhất không thay đổi sau một số vòng lặp nhất định với số lần chấp nhận cấu hình xấu nhất định, quá trình tìm kiếm sẽ quay lại sử dụng cấu hình tốt nhất hiện có để làm cấu hình gốc.
3. Danh sách Tabu: danh sách lịch sử các cấu hình gốc đã được tính được sử dụng để tránh việc lặp lại tính toán và sử dụng các cấu hình này.

Nhờ vào sự kết hợp này, ưu điểm của phương pháp SA vẫn được giữ nguyên trong khi hiệu suất và sự ổn định của phương pháp SA+TS đã tăng lên khi so với phương pháp SA ban đầu. Các kết quả so sánh sẽ được trình bày trong phần sau của báo cáo.

### **2.5. Chương trình mô phỏng vùng hoạt**

Không gian tìm kiếm của bài toán tối ưu thay đổi là rất lớn, vì vậy cần có một chương trình tính toán vật lý vùng hoạt với tốc độ nhanh và độ chính xác đảm bảo. Nhận thấy các chương trình tính toán vật lý mà chúng tôi hiện có như SRAC, MCNP, MVP... có tốc độ tính toán chậm, không đáp ứng được nhu cầu. Vì vậy chúng tôi đã phát triển một chương trình tính toán mới có tốc độ cao hơn nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác.

Chương trình này thực hiện giải hệ phương trình khuếch tán để tính toán hệ số nhân hiệu dụng ( $K_{eff}$ ), phân bố công suất cũng như đỉnh công suất (peaking factor) của vùng hoạt lò phản ứng. Chương trình có khả năng mô phỏng vùng hoạt 1 chiều, 2 chiều với bố nhiên liệu hình chữ nhật và 2 chiều với bố nhiên liệu lục giác (lưới chia tam giác). Các điều kiện

biên được sử dụng gồm có biên chân không, biên phản xạ và biên đối xứng xoay. Tùy vào sự đối xứng của lò phản ứng và việc người dùng muốn mô hình hóa toàn lò hay một phần, các loại hình học và điều kiện biên tương ứng sẽ được sử dụng.

Hệ phương trình khuếch tán (1) là hệ vi phân với rất nhiều tham số và không thể giải trực tiếp được:

$$\begin{cases} \frac{dJ_g(x)}{dx} + \Sigma_{rg}(x)\phi_g(x) = Q_g(x) \\ J_g(x) = -D_g(x)\frac{d\phi_g}{dx} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

$$Q_g(x) = \sum_{h=1, h \neq g}^G \Sigma_{g \leftarrow h}(x)\phi_h(x) + \frac{\chi_g(x)}{k_{eff}} \sum_{h=1}^G \nu \Sigma_{fh}(x)\phi_h(x) \quad (2)$$

Sử dụng phương pháp sai phân hữu hạn, hệ phương trình này được chuyển thành hệ phương trình tuyến tính bậc nhất. Ví dụ, trong trường hợp 1 chiều nó sẽ có dạng sau:

$$a_{g,i-1,i}\phi_{g,i-1} + a_{g,i+1,i}\phi_{g,i+1} + a_{g,i,i}\phi_{g,i} = Q_{g,i}\Delta x_i \quad (3)$$

Hay có thể viết dưới dạng ma trận:

$$A\Phi = Q \quad (4)$$

Khi đó, việc giải hệ phương trình này hoàn toàn có thể làm được bằng cách giải trực tiếp hay các phương pháp lặp.

Trong chương trình mô phỏng mới này, việc giải hệ phương trình tuyến tính trên được thực hiện bằng phương pháp lặp SOR (Successive Overrelaxation Method). Đây là phương pháp có khả năng giảm số vòng lặp cần tính. Ngoài ra, việc tối giản hóa các phép tính khi chỉ tính toán các phần tử ma trận khác 0, đặc trưng cho cách chia lưới tam giác cũng được áp dụng. Điều này làm cho tốc độ tính toán của chương trình tăng lên đáng kể.

Việc kiểm tra đánh giá độ chính xác và hiệu suất của chương trình mô phỏng mới này sẽ được chúng tôi trình bày trong mục 3.2.

### III. Áp dụng chương trình tìm kiếm tối ưu thay đảo để tìm cấu hình nạp tải tối ưu cho lò VVER-1000.

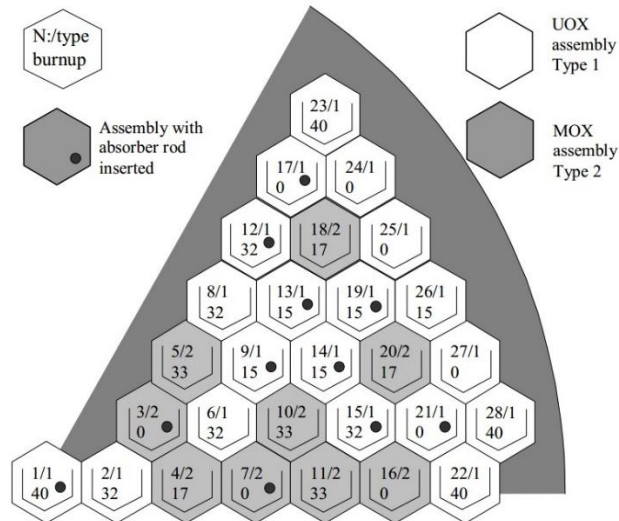
#### 3.1. Lò phản ứng VVER-1000

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sẽ thực hiện tính toán cho lò VVER-1000/V320 với các số liệu được lấy trong tài liệu tham khảo [18]. Lò phản ứng này có 163 bó nhiên liệu, được nạp tải theo đối xứng 1/6. Bó trung tâm là bó nhiên liệu loại UOX với độ sâu cháy 40 MWd/kg. Ngoài ra, số lượng cụ thể các loại bó được trình bày như trong Bảng 1.

Bảng 1: Thành phần nhiên liệu trong 1/6 vùng hoạt

Loại	UOX				MOX			Tổng
Độ sâu cháy	0	15	32	40	0	17	33	
Số lượng bó	5	5	5	3	3	3	3	27

Cấu hình nạp tải tham khảo mà bài toán chuẩn đưa ra được cho trong Hình 2:



Hình 2: Cấu hình lò VVER với 30% nhiên liệu loại MOX [18].

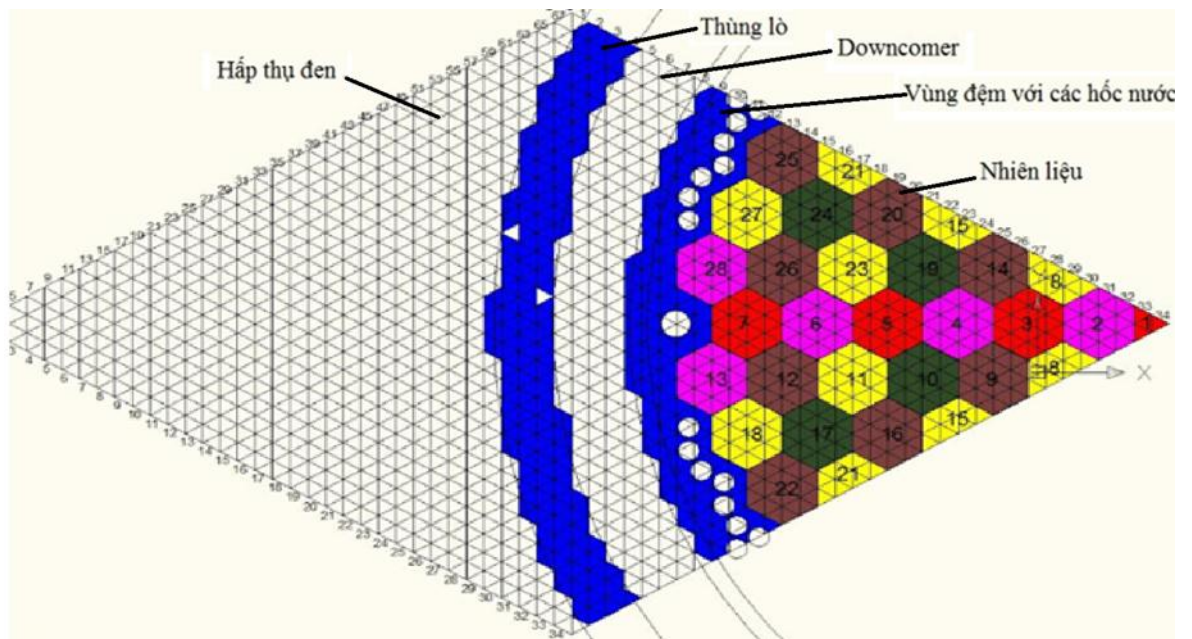
Với số lượng bó nhiên liệu như trên, nếu tính đến cả tính đối xứng và các loại nhiên liệu, số cấu hình nạp tải khả dĩ được tính theo công thức:

$$S = \frac{27!}{(5!)^3 \times (3!)^4} = 4.86 \times 10^{18} \quad (5)$$

Ta có thể thấy không gian tìm kiếm ở đây là rất lớn và với khả năng của máy tính cũng như các chương trình hiện tại sẽ không thể tính toán được hết tất cả các khả năng này. Vì vậy, việc sử dụng các phương pháp tìm kiếm tối ưu là rất cần thiết.

### 3.2. Đánh giá chương trình mô phỏng vùng hoạt

Chương trình mô phỏng vùng hoạt sẽ được sử dụng để tính  $K_{eff}$  và phân bố công suất của lò VVER-1000 trong bài toán chuẩn [18]. Vùng hoạt được mô phỏng như trong Hình 3 với mỗi bó nhiên liệu được chia thành 24 tam giác. Bộ thư viện số liệu được dùng là ENDF\_68 với cách chia 4 nhóm năng lượng.



Hình 3: Mô hình 1/6 vùng hoạt lò VVER-1000

Các kết quả được so sánh với các tính toán bằng MCNP-4C trong bài toán chuẩn với cùng bộ thư viện số liệu [18]. Bảng 2 trình bày kết quả so sánh hệ số nhân hiệu dụng giữa 2 chương trình tính toán. Có thể nhận thấy sai số lớn nhất cũng chỉ khoảng 101pcm. Đây là sai số không lớn và nguyên nhân chủ yếu do sai khác giữa phương pháp tính toán của 2 chương trình. Trong Bảng 2 ta cũng thấy sai số ở trạng thái S3 là nhỏ nhất. Trạng thái S3 là trạng thái lạnh có nồng độ Boron cao. Do đó, phổ neutron trong vùng hoạt sẽ phẳng hơn so với các trạng thái khác. Điều này giúp cho độ chính xác của việc giải phương trình khuếch tán bằng phương pháp sai phân hữu hạn ít phụ thuộc vào kích thước lưới chia và số nhóm năng lượng hơn. Vì vậy, sai số của trạng thái này là nhỏ nhất. Kết quả này cũng tương tự với kết quả so sánh các chương trình tính toán khác nhau trong bài toán chuẩn [18].

Bảng 2: So sánh hệ số nhân hiệu dụng

Trạng thái	Chương trình mới	MCNP4-C	Sai số (pcm)
S1	1.0366	1.0377	-101.77
S2	1.0503	1.0513	-97.86
S3	0.9341	0.9342	-1.07
S4	1.1376	1.1387	-95.41
S5	1.1530	1.1540	-84.56

Phân bố công suất của các trạng thái cũng được so sánh và cho sai số nhỏ hơn 5%. Nguyên nhân sai số là do phương pháp tính cũng như việc mô hình hóa của MCNP có thể làm chi tiết hơn so với chương trình tính toán tất định.

Ngoài ra, tốc độ tính toán của chương trình mới cũng được kiểm tra đánh giá (Bảng 3). Khi so sánh với chương trình tính toán tất định hiện có là mô đun CITATION của SRAC (chương trình có tốc độ tính toán nhanh nhất mà chúng tôi có), chương trình mới cho tốc độ vượt trội hơn hẳn. Trong Bảng 3, chúng tôi thực hiện so sánh thời gian tính toán của 2 chương trình khi thực hiện tính toán cho 2000 cấu hình vùng hoạt. Các tính toán được thực hiện trên 2 hệ điều hành Cygwin (máy tính cá nhân) và Ubuntu (máy chủ). Kết quả cho thấy tốc độ của chương trình mới nhanh hơn so với CITATION từ 6 đến 10 lần.

Bảng 3: so sánh tốc độ tính toán của CITATION và chương trình mới

Chương trình	Thời gian (giây)	
	Cygwin	Ubuntu
CITATION	3190	3177
Chương trình mới	501	320
Tăng lên (lần)	6.37	9.93

Qua đó, ta có thể thấy chương trình mô phỏng được chúng tôi phát triển có độ chính xác đảm bảo và tốc độ tính toán nhanh hơn khá nhiều so với các chương trình hiện có. Kết hợp chương trình này với các thuật toán tìm kiếm tối ưu, chúng tôi xây dựng được chương trình tìm kiếm tối ưu thay đảo. Các kết quả của chương trình sẽ được trình bày ở phần sau.

### 3.3. Tìm kiếm cấu hình nạp tải tối ưu cho lò VVER-1000/V320

Cấu hình nạp tải được đánh giá là tốt khi nó cho thời gian vận hành ứng với vùng hoạt đạt trạng thái tới hạn lâu nhất hay  $K_{eff}$  đầu chu trình lớn nhất, đồng thời cần đảm bảo tính an



toàn đó là có đỉnh công suất thấp hơn giới hạn đặt ra. Trong nghiên cứu này, hàm mục tiêu chúng tôi sử dụng nhằm mục đích tìm cấu hình có  $K_{eff}$  đầu chu trình lớn nhất và đỉnh công suất nhỏ hơn giới hạn. Hàm mục tiêu có dạng:

$$F = K_{eff} - W_p * \max(0, P_{peaking} - P_{const}) \quad (6)$$

Với:  $P_{const} = 1.45$  (giá trị trong bài toán chuẩn là 1.508)

$P_{peaking}$  là đỉnh công suất;  $W_p = 10$

Một cấu hình được đánh giá là tốt khi có giá trị hàm mục tiêu lớn. Từ công thức (6) có thể thấy nếu đỉnh công suất cao hơn ngưỡng  $P_{const}$ , giá trị hàm mục tiêu sẽ giảm rất nhiều do trọng số  $W_p$  lớn. Điều này giúp đảm bảo loại bỏ các cấu hình có đỉnh công suất lớn hay không đảm bảo tính an toàn. Ngoài ra, từ (6) cũng có thể thấy hàm mục tiêu sẽ tăng khi  $K_{eff}$  tăng. Từ đó giúp cho việc lựa chọn các cấu hình có  $K_{eff}$  đầu chu trình lớn nhất.

Bảng 4: So sánh các phương pháp tìm kiếm tối ưu

Method	Kết quả				Độ lệch chuẩn				
	n	$K_{eff}$	*ĐCS	F	n	$K_{eff}$	*ĐCS	F	
$\alpha=0.85$	DS	2038	1.1567	1.4526	1.0851	1128	0.0076	0.0201	0.1791
	SA	6203	1.1638	1.4444	1.1638	1002	0.0046	0.0047	0.0046
	TS	6001	1.1622	1.4366	1.1622	0	0.0037	0.0132	0.0037
	SA+TS	5919	1.1654	1.4436	1.1654	646	0.0034	0.0053	0.0034
$\alpha=0.95$	SA	20587	1.1674	1.4429	1.1674	1200	0.0032	0.0073	0.0032
	TS	20501	1.1649	1.4393	1.1649	0	0.0030	0.0128	0.0030
	SA+TS	20722	1.1681	1.4426	1.1681	1331	0.0030	0.0073	0.0030

\*ĐCS: đỉnh công suất (peaking factor)

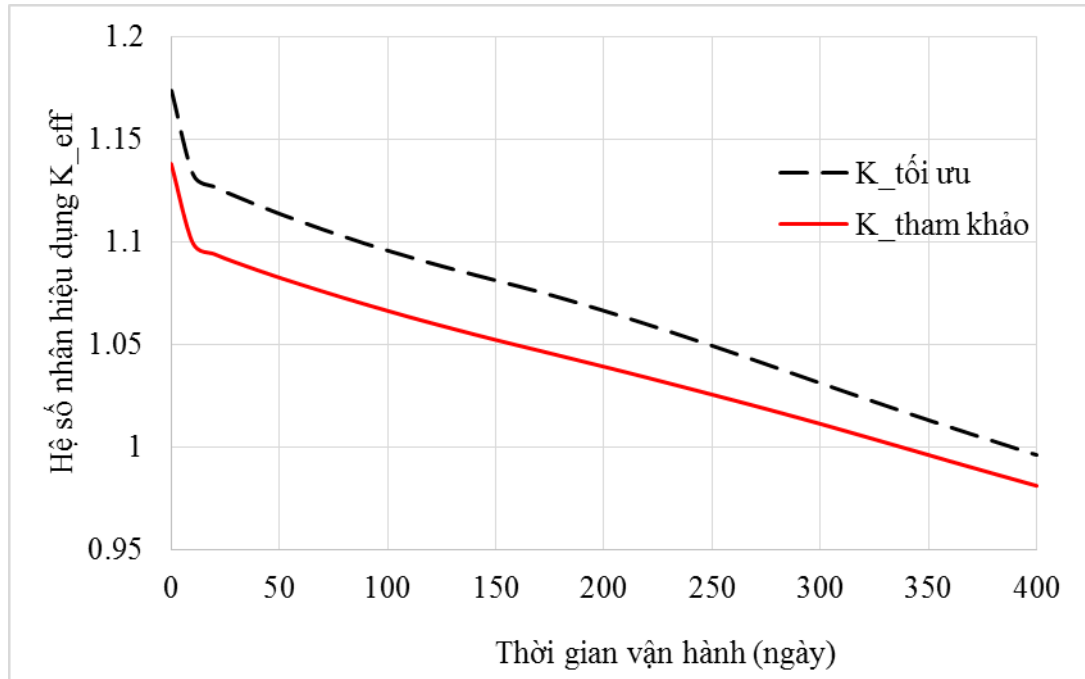
Sử dụng các số liệu và thành phần nhiên liệu trong bài toán chuẩn ở trạng thái S4 (trạng thái hoạt động không Bo), chúng tôi sẽ thực hiện tìm kiếm cấu hình nạp tải mới. Các kết quả tính toán sẽ được so sánh giữa 2 phương pháp chính SA và SA+TS với 2 trường hợp có số cấu hình tìm kiếm khác nhau. Mỗi tính toán được thực hiện cho 40 cấu hình ban đầu bất kỳ. Sau đó, các kết quả được lấy trung bình và trình bày trong Bảng 4.

Có thể thấy rõ ràng nếu cùng tính 1 số cấu hình tương đương nhau, phương pháp SA+TS cho kết quả giá trị hàm mục tiêu tốt hơn so với SA thông thường và các phương pháp khác. Cụ thể,  $K_{eff}$  của cấu hình mới do SA+TS tìm được lớn hơn so với các phương pháp khác trong khi đỉnh công suất vẫn đảm bảo  $<1.45$ . Ngoài ra, khi so sánh độ lệch chuẩn, ta thấy độ lệch chuẩn của SA+TS nhỏ hơn. Từ đó cho thấy phương pháp SA+TS có độ ổn định tốt hơn.

Lựa chọn cấu hình tốt nhất tìm được bằng chương trình tìm kiếm và so sánh với cấu hình tham khảo. Ta thấy cấu hình mới có hàm mục tiêu (hay  $K_{eff}$ ) tăng lên 3,0% (Bảng 5). Ngoài ra, việc tính toán thời gian vận hành của cấu hình mới và so sánh với cấu hình tham khảo cũng được thực hiện bằng chương trình SRAC (Hình 4). Qua đó có thể thấy thời gian vận hành theo cấu hình mới được kéo dài thêm khoảng 50 ngày (15,2%). Điều đó cho thấy chương trình tìm kiếm đã hoạt động tốt và có thể tìm được cấu hình tối ưu hơn so với cấu hình tham khảo.

Bảng 5: So sánh cấu hình tối ưu với cấu hình tham khảo

	Tham khảo	Tối ưu	Tăng lên(%)
Đỉnh công suất	1,508	1,492	
K_eff	1,139	1,173	3,0
Thời gian (ngày)	330	380	15,2



Hình 4: Sự thay đổi của K\_eff theo thời gian vận hành

#### IV. Kết luận.

Trong nghiên cứu này, một chương trình mô phỏng vùng hoạt lò phản ứng đã được phát triển thành công. Thông qua tính toán bài toán chuẩn, độ chính xác của chương trình đã được kiểm chứng. Đồng thời, chương trình này cũng cho thấy tốc độ tính toán cao (gấp 6 đến 10 lần tốc độ tính toán của chương trình CITATION - SRAC).

Nhiều phương pháp tìm kiếm tối ưu cũng đã được nhóm tác giả nghiên cứu. Từ đó, lựa chọn 1 phương pháp tìm kiếm tối ưu là phương pháp SA để áp dụng cho tính toán tối ưu thay đảo. Và để khắc phục yếu điểm của phương pháp SA là hiệu suất thấp, một sự kết hợp giữa SA và TS đã được thực hiện. Phương pháp mới SA+TS đã nghiên cứu và so sánh với phương pháp SA và một số phương pháp khác. Kết quả cho thấy hiệu suất của SA+TS đã tăng lên đáng kể đồng thời độ ổn định của kết quả cũng được tăng lên.

Sử dụng các phương pháp tìm kiếm tối ưu trên và kết hợp với chương trình mô phỏng vùng hoạt, chúng tôi đã xây dựng được một bộ chương trình tìm kiếm cấu hình tối ưu nạp tải nhiên liệu cho lò VVER. Một bài toán mẫu đã được đưa ra để đánh giá khả năng hoạt động của chương trình này. Các kết quả được so sánh với bài toán chuẩn và cho thấy cấu hình mới tìm được tối ưu hơn so với cấu hình tham khảo. Qua đó có thể thấy được tính hiệu quả của chương trình tìm kiếm tối ưu nạp tải mới này.

Trong thời gian tới, nhóm nghiên cứu sẽ tiếp tục tìm hiểu và áp dụng các phương pháp tìm kiếm tối ưu tiên tiến khác để nâng cao hiệu suất và khả năng tìm kiếm. Đồng thời các

phương pháp tăng tốc độ tính toán cũng sẽ được nghiên cứu để nâng cao hơn nữa hiệu suất của chương trình mô phỏng. Tiếp theo đó, nhóm nghiên cứu dự định sẽ tìm hiểu và xây dựng một chương trình tính toán chấy cho vùng hoạt với hiệu suất cao. Từ đó sẽ tiến dần tới việc giải quyết bài toán tính toán tối ưu đa chu trình cho các loại lò phản ứng nước nhẹ.

### Tài liệu tham khảo

- [1]. J. S. Suh and S. H. Levine, “Optimized automatic reload program for pressurized water reactors using simple direct optimization techniques”, *Nucl. Sci. Eng.* 105, 371-382, 1990.
- [2]. A. Yamamoto, “A quantitative comparison of loading pattern optimization methods for in-core fuel management of PWR”, *Journal of Nucl. Sci. and Technol.*, 34, 339-347, 1997.
- [3]. D. J. Kropaczek and P. J. Turinsky, “In-core nuclear fuel management for pressurized water reactors utilizing simulated annealing”, *Nucl. Technol.*, 95, 9, 1991.
- [4]. Y. P. Mahlers, “Core loading pattern optimization for pressurized water reactors”, *Ann. Nucl. Energy*, 21, pp. 223-227 (1994).
- [5]. J. G. Stevens, K. S. Smith, K. R. Rempe, T. J. Downar, “Optimization of pressurized water reactor shuffling by simulated annealing with heuristics”, *Nucl. Sci. Eng.*, 121, 67, 1995.
- [6]. M. D. DeChaine and M. A. Feltus, “Nuclear fuel management optimization using genetic algorithms”, *Nucl. Technol.*, 111, 109, 1995.
- [7]. G. T. Parks, “Multiobjective pressurized water reactor reload core design by nondominated genetic algorithm search”, *Nucl. Sci. Eng.*, 124, 178, 1996.
- [8]. M. D. DeChaine and M. A. Feltus, “Fuel management optimization using genetic algorithms and expert knowledge”, *Nucl. Sci. Eng.*, 124, 188, 1996.
- [9]. J. K. Axmann, “Parallel adaptive evolutionary algorithms for pressurized water reactor reload pattern optimization”, *Nucl. Technol.*, 119, 276-292, 1997.
- [10]. D. Babazadeh, M. Boroushaki, C. Lucas, “Optimization of fuel core loading pattern design in a VVER nuclear power reactors using Particle Swarm Optimization (PSO)”. *Ann. Nucl. Energy*, 36, 923-930, 2009.
- [11]. R.D.S. Yadav, H.P. Gupta, “Optimization studies of fuel loading pattern for a typical Pressurized Water Reactor (PWR) using particle swarm method”. *Ann. Nucl. Energy*, 38, 2011, 2086-2095.
- [12]. C. Lin et al., “Pressurized water reactor loading pattern design using the simple tabu search”, *Nucl. Sci. Eng.* 129, 61-71, 1998.
- [13]. J. H. Natasha, T. P. Geoffrey, “Pressurized water reactor in-core nuclear fuel management by tabu search”, *Annals of Nuclear Energy*, 75, 64-71, 2015.
- [14]. Ngô Quang Huy, Nguyễn Phước Lân, Hà Văn Thông và Đỗ Quang Bình, “Calculation of fuel burnup and refueling patterns of Dalat nuclear research reactor”. *Proceedings of the 4th National Conference on Physics*, Hà Nội-1993, 137-143, 1994.
- [15]. Nguyễn Phước Lân, Đỗ Quang Bình “Optimization of fuel reloading patterns for Dalat nuclear research reactor using perturbation theory”. *Proceedings of the 1st National Conference on Nuclear Physics and Techniques*, Hà Nội – 1996, 57- 60, 1996.
- [16]. Q.B. Do and P.L.Nguyen, “Application of a genetic algorithm to the fuel reload optimization for a research reactor”. *Applied Mathematics and Computation*, USA, Vol. 187, 977-988, 2007.

- [17]. Đỗ Quang Bình, “Tối ưu hóa tái nạp nhiên liệu lò phản ứng hạt nhân nghiên cứu bằng phương pháp mô phỏng tối kim”. *Tạp chí phát triển khoa học và công nghệ*, tập 14, số tháng 1 – 2011.
- [18]. Eugeny Gomin, Mikhail Kalugin, Dmitry Oleynik, “VVER – 1000 MOX core computation benchmark”, *OECD*, 2006.

## **FUEL LOADING PATTERN OPTIMIZATION OF A VVER-1000 REACTOR USING SIMULATED ANNEALING AND TABU SEARCH**

**Abstract:** A study on fuel loading pattern optimization of a VVER-1000 reactor has been conducted using Simulated Annealing (SA) and Tabu Search (TS). In this study, a core physics simulator has been developed based on a multi-group diffusion theory for the use in the problem of fuel loading optimization of VVER reactors. The core simulator could handle the triangular meshes of the core and the computational speed is fast. Verification of the core simulator has been confirmed against a benchmark problem of a VVER-1000 reactor. Several optimization methods such as SA, TS and a combination of them have been investigated and implemented in coupling with the core simulator. Calculations have been performed for optimizing the fuel loading pattern of the core using these methods based on a benchmark core model in comparison with the reference core. Comparison among these methods shows that a combination of SA+TS is the most effective for the problem of fuel loading pattern optimization.

Keywords: *fuel loading optimization, simulated annealing, tabu search, VVER-1000*