

## TỐI ƯU HÓA TÁI NẠP NHIÊN LIỆU Lò PHẢN ỨNG HẠT NHÂN NGHIÊN CỨU BẰNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG TÔI KIM

**Đỗ Quang Bình**

Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Tp Hồ Chí Minh

(Bài nhận ngày 21 tháng 12 năm 2010, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 06 tháng 09 năm 2011)

**TÓM TẮT:** Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu khả năng thiết kế các mẫu tái nạp nhiên liệu tối ưu cho lò phản ứng nghiên cứu bằng phương pháp mô phỏng tôi kim. Biến quyết định của bài toán tối ưu là mẫu tái nạp nhiên liệu cho chu trình vận hành tiếp theo sau khi lò phản ứng kết thúc một chu trình hoạt động. Hàm mục tiêu được thiết lập để cực đại hóa thừa số nhân hiệu dụng  $k_{eff}$  tại đầu chu trình vận hành đồng thời chứa đựng thông tin về hệ số bất đồng đều công suất. Một thủ tục tìm kiếm lời giải tối ưu đã được thiết lập và một chương trình máy tính đã được phát triển bằng ngôn ngữ Fortran chạy trên máy tính cá nhân. Chương trình CITATION được sử dụng để cung cấp kết quả tính toán toàn lò cho bài toán tối ưu. Tính toán để tìm mẫu tái nạp nhiên liệu tối ưu đối với chu trình vận hành thứ hai của lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt được thực hiện và trình bày trong báo cáo này.

**Từ khóa:** Mô phỏng tôi kim, Tối ưu hóa, Lò phản ứng hạt nhân, Mẫu tái nạp nhiên liệu.

### 1. MỞ ĐẦU

Sau một thời gian vận hành, lượng nhiên liệu trong lò phản ứng (LPU) không còn đủ để sử dụng theo yêu cầu do nhiên liệu đã bị đốt cháy. Vì phân bố cháy nhiên liệu trong toàn vùng hoạt LPU là không đồng đều nên một số bó nhiên liệu (BNL) cháy nhiều phải được loại bỏ, một số BNL cháy ít được giữ lại và thay bằng các BNL mới. Tại cuối mỗi chu trình vận hành, người quản lý LPU phải quyết định thay thế bao nhiêu BNL, những BNL nào phải được loại bỏ và sắp xếp các BNL mới và cũ trong vùng hoạt như thế nào để đảm bảo LPU hoạt động an toàn, nhiên liệu được sử dụng một cách hiệu quả. Quyết định như vậy cần dựa trên một cơ sở khoa học chắc chắn và lời giải của bài toán thay đảo nhiên liệu LPU cung cấp căn cứ khoa học cho quyết định đó.

Trước đây, việc thay đảo nhiên liệu thường được thực hiện theo sơ đồ “out-in” hoặc sơ đồ “checker board” [1]. Các sơ đồ nạp tái nhiên liệu này bảo đảm phân bố thông lượng neutron trong vùng hoạt LPU là tương đối đồng đều. Từ những năm 1980, việc nghiên cứu bài toán thay đảo nhiên liệu phát triển mạnh và hệ quả là mẫu tái nạp độ rò thấp (low-leakage) được đề nghị thay thế cho các sơ đồ truyền thống [2, 3, 4]. Gần đây, các phương pháp tối ưu ngẫu nhiên như thuật toán di truyền (Genetic algorithms), phương pháp mô phỏng tôi kim (Simulated annealing viết tắt là SA) ... được áp dụng thành công cho bài toán thay đảo nhiên liệu LPU [5, 6, 7, 8, 9] đã mở ra khả năng giải quyết bài toán một cách toàn diện hơn với độ chính xác tốt hơn. Trong công trình này, chúng tôi áp dụng phương pháp SA để tìm kiếm mẫu tái nạp nhiên liệu tối ưu cho lò phản ứng hạt

nhân nghiên cứu. Mô hình của bài toán tối ưu được trình bày trong phần 2, phương pháp giải bài toán được trình bày trong phần 3, phần 4 trình bày các kết quả tính toán để tìm mẫu tái nạp nhiên liệu tối ưu cho chu trình vận hành thứ 2 của LPU nghiên cứu Đà Lạt và cuối cùng là phần kết luận.

## 2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN

Nhiệm vụ của bài toán tối ưu hóa thay đảo nhiên liệu LPU hạt nhân là tìm kiếm các phương án tái nạp nhiên liệu để đảm bảo nhiên liệu hạt nhân được sử dụng một cách hiệu quả nhất, an toàn nhất trong suốt chu trình vận hành của LPU. Do đó, các mục tiêu của bài toán là kéo dài tối đa thời gian vận hành của một chu trình, đồng thời bảo đảm tối đa sự an toàn của LPU trong quá trình vận hành. Muốn như vậy, cần phải thiết lập cấu hình vùng hoạt LPU (mẫu tái nạp nhiên liệu) sao cho hệ số nhân hiệu dụng  $k_{eff}$  của LPU đạt giá trị lớn nhất trong khi hệ số bất đồng đều công suất PPF phải có giá trị thấp nhất. Trong công trình này, mô hình của bài toán tối ưu được thiết lập để tìm kiếm các sắp xếp nhiên liệu trong vùng hoạt LPU sao cho hệ số nhân hiệu dụng  $k_{eff}$  của LPU đạt giá trị cực đại trong khi PPF phải thỏa mãn các giới hạn an toàn cho phép.

Biến quyết định trong mô hình của bài toán tối ưu này là một cấu hình vùng hoạt LPU cho chu trình vận hành tiếp theo. Đó chính là cách sắp xếp các BNL mới và cũ trong vùng hoạt LPU, có thể được biểu diễn bởi tập hợp  $\{\chi_{lm}\}$ , trong đó  $l$  chỉ vị trí trong vùng hoạt và  $m$  chỉ

loại BNL (loại BNL được xác định bởi độ cháy nhiên liệu của nó):

$$\chi_{lm} = \begin{cases} 1 & \text{nếu BNL loại } m \text{ ở vị trí } l \\ 0 & \text{trong các trường hợp khác} \end{cases} \quad (1)$$

Hàm mục tiêu được thiết lập dựa trên phương pháp hàm phạt [5] nhằm cực đại hóa thừa số nhân hiệu dụng  $k_{eff}$  đồng thời chứa đựng thông tin về một thông số an toàn quan trọng trong quá trình tìm kiếm lời giải là hệ số bất đồng đều công suất PPF:

$$F = \alpha(k_{eff} - 1) - \beta \text{Max}[0, (PPF - PPF_{max})] \rightarrow \text{maximum} \quad (2)$$

trong đó  $\alpha > 0$  và  $\beta > 0$  là các trọng số của  $k_{eff}$  và PPF trong hàm mục tiêu.

Các giới hạn gồm có:

- Hệ số bất đồng đều công suất:

$$PPF \leq PPF_{max} \quad (3)$$

- Độ cháy:

$$BU_l \leq BU_{max} \quad \forall l \quad (4)$$

- Chỉ có một BNL được đặt tại một vị trí:

$$\sum_m \chi_{lm} = 1 \quad \forall l \quad (5)$$

- Số lượng BNL loại  $m$  thỏa điều kiện giới hạn:

$$\sum_l \chi_{lm} \leq N_m \quad \forall m \quad (6)$$

trong đó  $PPF_{max}$  là giá trị cực đại của PPF,  $BU_{max}$  là độ cháy cực đại,  $BU_l$  là độ cháy của BNL tại vị trí  $l$ ,  $N_m$  là số BNL loại  $m$  còn được giữ lại trong vùng hoạt. Đối với một tập hợp BNL được xác định thì  $BU_{max}$ ,  $N_m$  có giá trị xác định.

### 3. PHƯƠNG PHÁP GIẢI BÀI TOÁN

#### 3.1 Tính toán toàn lò

Các đặc trưng vật lý của LPU như  $k_{eff}$ , phân bố thông lượng neutron có thể được xác

$$-D_{r,g} \Delta \Phi_{r,g} + (\Sigma_{a,r,g} + \sum_{g'} \Sigma_{s,r,g \rightarrow g'}) \Phi_{r,g} = \sum_{g'} (\Sigma_{s,r,g' \rightarrow g} + \frac{\chi_g (v\Sigma)_{f,r,g'}}{k_{eff}}) \Phi_{r,g'} \quad (7)$$

Trong đó  $\Phi_{r,g}$  là thông lượng neutron nhóm  $g$  tại vị trí  $r$ ,  $D_{r,g}$  là hệ số khuếch tán neutron nhóm  $g$  tại vị trí  $r$ ,  $\Sigma_{a,r,g}$  là tiết diện hấp thụ vĩ mô nhóm  $g$  tại vị trí  $r$ ,  $\Sigma_{s,r,g}$  là tiết diện tán xạ vĩ mô nhóm  $g$  tại vị trí  $r$ ,  $\Sigma_{s,r,g' \rightarrow g}$  là tiết diện vĩ mô chuyển neutron tại vị trí  $r$  từ nhóm  $g'$  sang nhóm  $g$ ,  $(v\Sigma)_{f,r,g'}$  là tiết diện sinh neutron do phân hạch nhóm  $g'$  tại vị trí  $r$ ,  $\chi_g$  là phổ phân hạch neutron nhóm  $g$ .

Trong công trình này, chương trình CITATION [10] được dùng để giải hệ phương trình khuếch tán neutron nhiều nhóm (7) bằng phương pháp sai phân hữu hạn. Trước mỗi chu trình vận hành của LPU, một tập hợp các BNL đã sử dụng và mới với các độ cháy nhiên liệu khác nhau được xác định. Độ cháy nhiên liệu của tập hợp đó được xác định từ các tính toán cháy nhiên liệu. Hệ số nhân hiệu dụng và phân bố thông lượng neutron của một cấu hình sắp xếp nhiên liệu tương ứng với một mẫu tái nạp nhiên liệu có thể được xác định bằng việc chạy chương trình CITATION cho cấu hình đó. Sau đó, hệ số bất đồng đều công suất PPF được xác định dựa trên phân bố thông lượng neutron và

định từ việc giải hệ phương trình khuếch tán neutron nhiều nhóm [10]:

phân bố cháy nhiên liệu. Như vậy, một tính toán toàn lò bằng chương trình CITATION sẽ cung cấp đầy đủ các thông số cần thiết cho tính toán tối ưu.

#### 3.2 Phương pháp mô phỏng tối kim

Phương pháp mô phỏng tối kim [11] là một phương pháp tính toán tối ưu phỏng theo kỹ thuật tối trong luyện kim. Quá trình tìm kiếm lời giải của SA được S. Kirkpatrick phát triển dựa trên một thuật toán Monte Carlo của N. Metropolis để tìm cấu hình cân bằng với năng lượng tối thiểu của một tập hợp các nguyên tử ở một nhiệt độ nào đó. Thuật toán của N. Metropolis tìm kiếm trạng thái cân bằng với năng lượng thấp nhất bằng cách thay đổi vị trí của các nguyên tử một cách ngẫu nhiên theo hướng không chỉ làm cho năng lượng của hệ thống giảm mà còn chấp nhận các thay đổi làm tăng năng lượng của hệ thống với một xác suất phụ thuộc vào năng lượng và nhiệt độ của hệ thống. Trong thuật toán tối ưu của Kirkpatrick, năng lượng của hệ thống được thay bằng giá trị hàm mục tiêu và nhiệt độ hệ thống trở thành

một tham số điều khiển quá trình tìm kiếm thông qua xác suất chấp nhận một lời giải tồi.

Quá trình tìm kiếm lời giải tối ưu của SA có thể được mô tả như sau: giả sử ta đang tìm lời giải  $X_{i+1}$  tại lân cận một lời giải  $X_i$ , nếu giá trị hàm mục tiêu của lời giải  $X_{i+1}$  lớn hơn giá trị hàm mục tiêu của lời giải  $X_i$  thì lời giải  $X_{i+1}$  được chấp nhận và quá trình tìm kiếm sẽ tiếp tục ở lân cận của lời giải  $X_{i+1}$ . Trong trường hợp giá trị hàm mục tiêu của lời giải  $X_{i+1}$  nhỏ hơn giá trị hàm mục tiêu của lời giải  $X_i$  thì lời giải  $X_{i+1}$  hoặc bị loại bỏ hoặc được chấp nhận với một xác suất cứu sống nào đó. Xác suất cứu sống của lời giải  $X_{i+1}$  trong trường hợp sau phụ thuộc nhiệt độ hệ thống và mức độ sai lệch hàm mục tiêu của lời giải  $X_{i+1}$  và  $X_i$  và được xác định bởi công thức:

$$P = \exp(-\delta C/T) \quad (8)$$

trong đó  $T$  là nhiệt độ của hệ thống và  $\delta C$  là độ lệch giữa giá trị hàm mục tiêu của hai lời giải  $X_i$  và  $X_{i+1}$ .

Khi bắt đầu quá trình tối ưu, nhiệt độ hệ thống  $T$  được thiết lập ở giá trị lớn, sau đó  $T$  giảm dần qua từng giai đoạn. Chính vì vậy, trong giai đoạn đầu của quá trình tìm kiếm, xác suất cứu sống  $P$  của một lời giải tồi có giá trị lớn, do đó SA có khả năng thoát khỏi một tối ưu địa phương để có thể thực hiện tìm kiếm lời giải trong vùng không gian rộng. Giống như trong tôi kim loại, thời gian tìm kiếm càng lâu tương ứng với sự làm nguội hệ thống xảy ra càng chậm thì chất lượng của lời giải tối ưu cuối cùng càng tốt.

Trong công trình này, thủ tục tìm kiếm lời giải tối ưu bằng SA được thiết lập như sau:

1- Khởi tạo ngẫu nhiên mẫu nạp tải nhiên liệu ban đầu,

2- Thực hiện tính toán toàn lò để đánh giá hàm mục tiêu của mẫu nạp tải ban đầu,

3- Thực hiện đảo ngẫu nhiên một số BNL để tạo ra một mẫu nạp tải mới (Candidate LP) từ mẫu nạp tải ban đầu (Base LP),

4- Thực hiện tính toán toàn lò để đánh giá hàm mục tiêu  $F_C$  của Candidate LP,

5- Nếu giá trị hàm mục tiêu của Candidate LP lớn hơn giá trị hàm mục tiêu  $F_B$  của Base LP thì Candidate LP trở thành Base LP,

6- Nếu giá trị hàm mục tiêu của Candidate LP nhỏ hơn giá trị hàm mục tiêu của Base LP thì tính xác suất cứu sống đối với Candidate LP,

7- Tạo ra một số ngẫu nhiên  $r$ ,  $0 \leq r < 1$ , và gán cho Candidate LP,

8- Nếu  $r < P$  thì Candidate LP trở thành Base LP, nếu  $r \geq P$  thì Candidate LP bị loại bỏ,

9- Lặp lại các bước từ 3 đến 8 với một số lần được xác định, được gọi là chiều dài Malkov,

10- Hạ nhiệt độ hệ thống xuống theo quy luật:

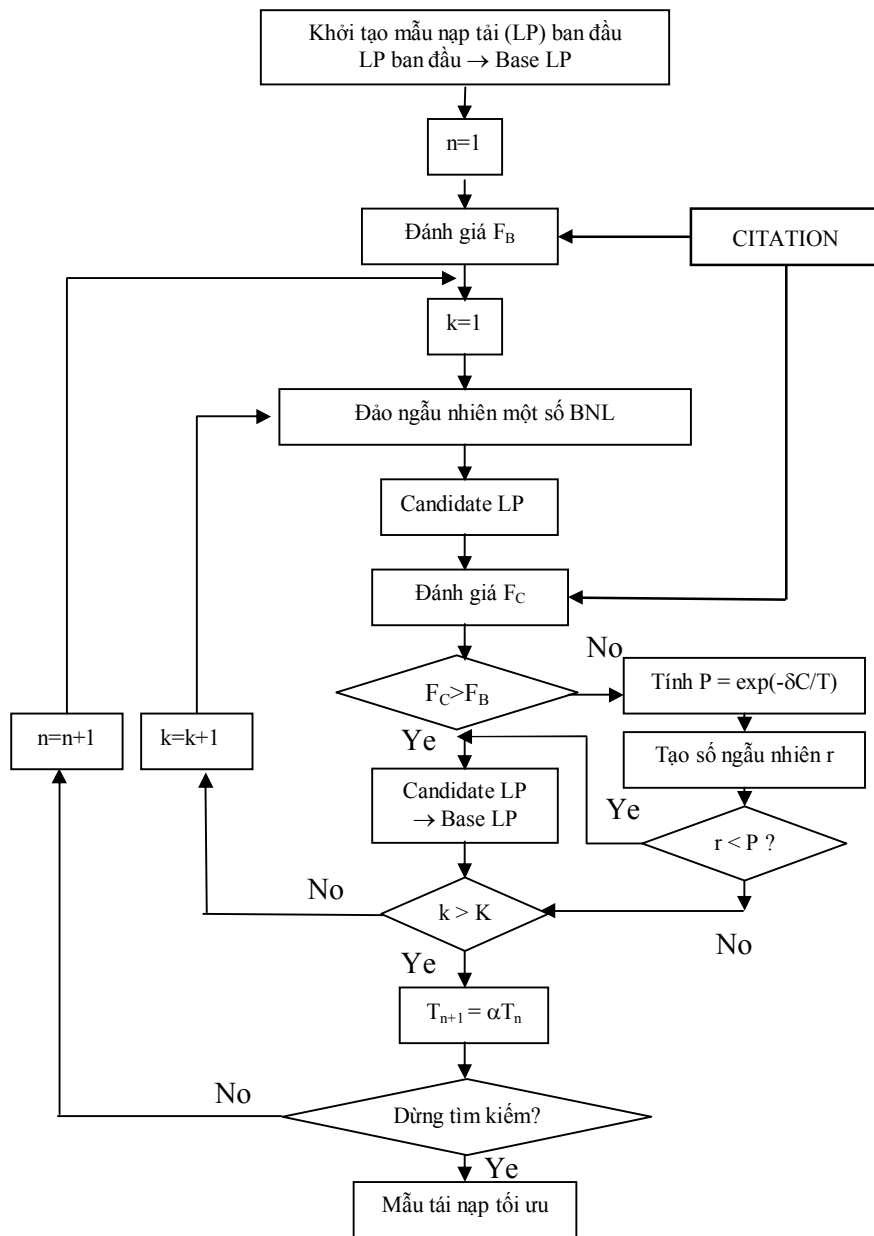
$$T_{n+1} = \alpha T_n \quad (9)$$

$\alpha$  được gọi là thừa số ủ nhiệt (annealing factor),  $n$  là số giai đoạn ủ trong quá trình tìm kiếm.

11- Quay trở về bước 3 cho đến khi nhiệt độ hệ thống  $T$  giảm xuống dưới giá trị giới hạn  $T_{min}$  hoặc tần số thay đổi của Base LP trở nên rất bé.

Hình 1 mô tả thuật toán tìm kiếm mẫu tái nạp nhiên liệu tối ưu bằng SA. Trên hình 1, k chỉ số mẫu nạp tái nhiên liệu được khảo sát trong một giai đoạn, n chỉ số giai đoạn được

khảo sát, K là chiều dài Malkov,  $F_C$  là giá trị hàm mục tiêu của Candidate LP và  $F_B$  là giá trị hàm mục tiêu của Base LP.



Hình 1. Sơ đồ thuật toán tìm kiếm mẫu tái nạp nhiên liệu tối ưu bằng SA.

#### 4. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN VÀ THẢO LUẬN

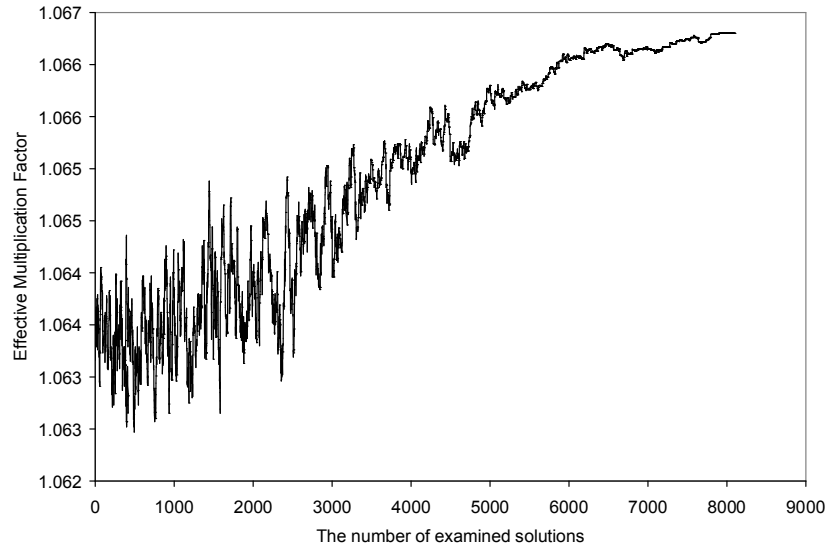
Một chương trình tính toán tối ưu hoá thay đảo nhiên liệu bằng SA dựa trên thủ tục đã trình bày trong phần trên đã được xây dựng bằng ngôn ngữ Fortran, được tích hợp với chương trình tính toán toàn lò CITATION. Trong kết quả tính toán được trình bày sau đây,

$$F = \begin{cases} 10000(k_{eff} - 1) - 100(PPF - PPF_{max}) & \text{if } PPF \geq PPF_{max} \\ 10000(k_{eff} - 1) & \text{if } PPF < PPF_{max} \end{cases} \quad (10)$$

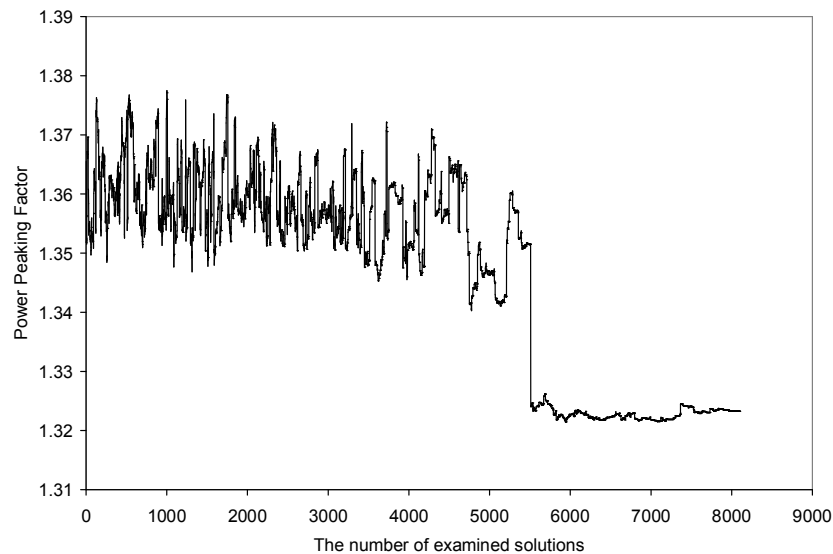
Quá trình tìm kiếm lời giải tối ưu đối với bài toán trên đã tiến hành với các thông số SA đã được sử dụng khá phổ biến đối với bài toán tối ưu hóa thay đảo nhiên liệu lò phản ứng [5, 6, 7] như sau: nhiệt độ ban đầu của hệ thống  $T_0 = 10$ , nhiệt độ giới hạn dưới  $T_{min} = 0.001$ , thừa số ù nhiệt  $\alpha = 0.95$ , chiều dài Malkov bằng 75. Kết quả tính toán được trình bày trên hình 2 và 3. Hình 2 biểu diễn sự thay đổi của hệ số nhân hiệu dụng  $k_{eff}$  và hình 3 biểu diễn sự thay đổi của hệ số bất đồng đều công suất PPF theo số mẫu nạp tải nhiên liệu được khảo sát. Hình 2 cho thấy rằng  $k_{eff}$  dao động mạnh trong giai đoạn đầu của quá trình tối ưu nhưng sau đó tăng đều đặn và đạt đến giá trị cân bằng cỡ 1,0663 khi quá trình tìm kiếm lời giải đã khảo

chương trình đã được áp dụng để tìm phương án thay đảo nhiên liệu tối ưu cho LPU hạt nhân Đà Lạt đối với chu trình vận hành thứ hai. Đối với bài toán này, tại cuối chu trình vận hành thứ nhất, 89 BNL đã cháy một phần được giữ lại, 11 thanh berili ở ngoại vi vùng hoạt được thay bằng 11 BNL mới tạo nên một cấu hình vùng hoạt gồm 100 BNL. Hàm mục tiêu được sử dụng trong tính toán được thiết lập như sau:

sát khoảng 8000 mẫu nạp tải. Trong khi đó hình 3 cho thấy rằng trong giai đoạn đầu, giá trị của PPF cũng dao động mạnh, có xu hướng giảm nhưng không thể hiện rõ cho đến khi đã khảo sát hơn 5000 mẫu nạp tải. Một biến đổi đột ngột đã làm cho PPF giảm giá trị từ 1,375 xuống 1,323 rồi sau đó giữ ổn định ở mức này. Điều này cho thấy khả năng thoát khỏi bẫy cực trị địa phương của phương pháp SA. Mẫu tái nạp nhiên liệu tối ưu có các đặc trưng:  $k_{eff} = 1,0663$  và  $PPF = 1,323$ . So với mẫu tái nạp nhiên liệu thực tế [9] với  $k_{eff} = 1,0604$  và  $PPF = 1,374$  thì mẫu tối ưu tìm được bằng SA có các đặc trưng tốt hơn đáng kể với PPF giảm một lượng  $\Delta PPF = 0.051$  và  $k_{eff}$  tăng một lượng  $\Delta p = 0.73 \beta_{eff}$ .



**Hình 2.** Thay đổi hệ số nhân hiệu dụng  $k_{eff}$  trong quá trình tối ưu.



**Hình 3.** Thay đổi hệ số bất đồng đều công suất PPF trong quá trình tối ưu.

## 5. KẾT LUẬN

Công trình này đã áp dụng thành công phương pháp mô phỏng tối kim để giải bài toán tối ưu hóa thay đảo nhiên liệu cho lò phản ứng hạt nhân nghiên cứu. Kết quả tính toán cho

thấy rằng, với hàm mục tiêu được thiết lập bằng phương pháp hàm phạt và các thông số tìm kiếm nhận các giá trị phổ biến, quá trình tìm kiếm lời giải tối ưu bằng phương pháp mô phỏng tối kim tiệm cận lời giải tối ưu sau khi chi khảo sát một phần nhỏ không gian lời giải.

Mẫu tái nạp nhiên liệu tối ưu tìm được cho chu trình vận hành thứ hai của LPU hạt nhân Đà Lạt trong một tính toán thử nghiệm có các đặc

trung tốt hơn đáng kể so với mẫu tái nạp nhiên liệu thực tế.

## OPTIMIZATION OF FUEL RELOADING PATTERNS FOR A RESEARCH REACTOR BY SIMULATED ANNEALING

Do Quang Binh

University of Technical Education HCM city

**ABSTRACT:** *This article presents results obtained from a research into an application of simulated annealing method to the in-core fuel reloading pattern optimization for a research reactor. The decision variable of the optimization problem is a fuel reloading pattern for the next cycle after the present cycle finishes. The objective function maximizes the effective multiplication factor  $k_{eff}$  at the beginning of cycle while it is established to include an important safety parameter – the power peaking factor, in search process. A procedure for searching the optimal solutions was formed and a computer code was developed in the Fortran language running on PCs. Nuclear safety parameters for the optimization problem are provided from the results of the multigroup neutron diffusion theory computation program CITATION. A sample calculation was performed to find the optimal fuel reloading patterns for the second cycle of the Dalat research reactor and the results are presented in this article.*

**Keywords:** *Simulated Annealing, Optimization, Nuclear Reactor, Fuel Reloading Pattern.*

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. G. I. Bell, S. Glasstone, *Nuclear Reactor Theory*, Robert E. Kreiger Publishing Co., Malabar, Florida (1979).
- [2]. L. W. Ho, A. F. Rohach, *Perturbation Theory in Nuclear Fuel Management Optimization*, Nucl. Sci. Eng., 82, 151-161 (1982).
- [3]. Galperin, E. Nissan, *Application of a Heuristic Search Method for Generation of Fuel Reload Configuration*, Nucl. Sci. Eng., 99, 343-352 (1988).
- [4]. G. H. Hobson and P. J. Tutinsky, *Automatic Determination of Pressurized Water Reactor Core Loading Patterns that Maximize Beginning-of-Cycle Reactivity Within Power Peaking and Burnup Constraints*, Nucl. Technol., 74, 5-13 (1986).
- [5]. Yamamoto, *A Quantitative Comparison of Loading Pattern Optimization Methods for In-core Fuel Management of PWR*, Journal



- of Nucl. Sci. and Technol., 34 (4), 339-347 (1997).
- [6]. 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, 67-80 (1995).
- [7]. D. J. Kropaczek, P. J. Turinsky, *In-core Nuclear Fuel Management for Pressurized Water Reactors Utilizing Simulated Annealing*, Nucl. Technol., 95, 9-32 (1991).
- [8]. Q. B. Do, H. Choi, G. Roh, *An evolutionary optimization of the refueling simulation for a CANDU reactor*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 53 (5), 2957-2961 (2006).
- [9]. Q. B. Do and P. L. Nguyen, *Application of a genetic algorithm to the fuel reload optimization for a research reactor*, Appl. Math. Comp., 187, 977-988 (2007).
- [10]. T. B. Fowler, D. R. Vondy, F. B. Kemshell, *Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION. ORNL-TM-2496, RSICC* (1971).
- [11]. S. Kirkpatrick, et. al., *Optimization by Simulated Annealing*, Science, 220.4598 (1983).