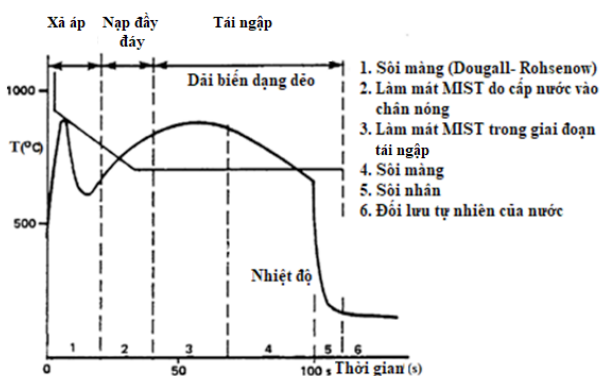


NGHIÊN CỨU ĐỘ NHẠY CÁC MÔ HÌNH VẬT LÝ SỬ DỤNG TRONG CODE TÍNH TOÁN THỦY NHIỆT RELAP5 DỰA TRÊN SỐ LIỆU THỰC NGHIỆM CỦA HỆ THỰC NGHIỆM FEBA

Trong phân tích an toàn thủy nhiệt, kết quả tính toán mô phỏng sử dụng các phần mềm thủy nhiệt phụ thuộc rất nhiều vào việc mô hình các hiện tượng vật lý đã được xây dựng trong các phần mềm này. Các mô hình vật lý là các phương trình bảo toàn, các công thức thực nghiệm được phát triển dựa trên việc làm khớp chúng với các số liệu thực nghiệm, hoặc dựa trên các giả thiết, đơn giản hóa để giải các phương trình lý thuyết. Chính vì vậy, các mô hình vật lý đó cần phải xem xét độ bất định mà chúng đưa vào trong kết quả tính toán. Để tính toán độ bất định, khảo sát độ nhạy trước hết được thực hiện để tìm ra những mô hình vật lý có tầm ảnh hưởng lớn lên kết quả tính toán cho kịch bản tái ngập vùng hoạt. Khảo sát độ nhạy này được thực hiện dựa trên các số liệu thực nghiệm đo đạc trên hệ thí nghiệm FEBA. Dựa trên hai tiêu chuẩn nhiệt độ cực đại và thời gian dính ướt, có bốn mô hình vật lý có ảnh hưởng lớn lên kết quả tính toán đã được chọn từ 16 mô hình vật lý được xem xét. Bốn mô hình này sẽ được nghiên cứu sâu hơn để đánh giá độ bất định mà chúng gây ra lên kết quả tính toán trong pha tiếp theo.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong kịch bản sự cố vỡ lớn do mất nước làm mát (LBLOCA), sự thay đổi nhiệt độ của vỏ thanh nhiên liệu có thể được chia thành bốn giai đoạn chính: xả áp, nạp đầy đáy, tái ngập, và làm mát dài hạn được thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Sự thay đổi nhiệt độ vỏ nhiên liệu trong các pha trong tai nạn vỡ lớn [3].

Giai đoạn tái ngập là giai đoạn quan trọng trong đó thanh nhiên liệu có thể bị phồng, bị vỡ, bị ôxi hóa, hoặc thậm chí bị nóng chảy nếu thanh nhiên liệu không thể được làm mát thích hợp. Pha tái ngập trong kịch bản này bắt đầu khi phần dưới của đáy thùng lò đã được làm đầy nước và các thanh nhiên liệu bắt đầu được tái ngập. Hơi nước được hình thành trong giai đoạn tái ngập này với vận tốc rất lớn và cuốn theo các giọt nước làm cho các chế độ truyền nhiệt trong pha này trở nên phức tạp, chuyển từ đơn pha khí, hai pha khí- lỏng và cuối cùng là đơn pha lỏng. Chế độ dòng chảy thẳng đứng chín chế độ (bốn chế độ truyền nhiệt trước thông lượng nhiệt tới hạn (CHF), bốn chế độ truyền nhiệt sau CHF và một chế độ truyền nhiệt phân tầng) được sử dụng trong các phần mềm nhiệt-thủy lực để mô phỏng pha tái ngập [1, 2]. Mỗi loại chế độ dòng chảy thường sử dụng

một số mô hình truyền nhiệt nhất định. Sự thay đổi chế độ chảy dẫn đến các mô hình hệ số truyền nhiệt cũng thay đổi theo như từ mô hình truyền nhiệt Chen, Dittus-Boelter, Bromley, Zuber CHF, hoặc CHF Bảng tra cứu [1, 2].

Các phần mềm thủy lực nhiệt như RELAP5, MARS, TRACE, hoặc CATHARE, đã được sử dụng rộng rãi trong phân tích an toàn lò phản ứng. Trong số đó, RELAP5 là công cụ thích hợp để sử dụng trong việc tính toán kiểm tra cấp phép, đánh giá các hướng dẫn vận hành và làm cơ sở cho phân tích nhà máy điện hạt nhân [1, 4]. Trong phần mềm này, cùng với các điều kiện ban đầu và biên, các mô hình vật lý (PM) thường được sử dụng trong mô phỏng. Các mô hình này thường được xây dựng dựa trên cả lý thuyết và thực nghiệm. Các mô hình lý thuyết sử dụng các giả định, đơn giản, lý tưởng hóa và các quy trình lý tưởng để giải, trong khi các mô hình thực nghiệm được phát triển dựa trên các thí nghiệm cụ thể với các điều kiện biên và điều kiện ban đầu xác định. Nghĩa là luôn có những giới hạn nhất định về khả năng ứng dụng của các mô hình vật lý. Độ chính xác của dự đoán trong mô phỏng luôn là một vấn đề thách thức mà các nhà phát triển phần mềm cần phải giải quyết và tìm cách cải thiện. Các mô hình vật lý được đề xuất là các thông số có ảnh hưởng lớn đến kết quả tính toán và cần phải được đánh giá thêm [5].

2. PHƯƠNG PHÁP, CÔNG CỤ TÍNH TOÁN VÀ HỆ THỰC NGHIỆM VÀ MÔ HÌNH HỆ FEBA

2.1. Phương pháp, công cụ tính toán và hệ thực nghiệm

Về phương pháp, phân tích độ nhạy (SA) cho thấy các giá trị khác nhau của một biến đầu vào độc lập ảnh hưởng như thế nào đến một biến đầu ra phụ thuộc cụ thể bằng cách sử dụng một tập hợp các giả định. Trong số tất cả các tham số đầu

vào cho SA, một số tham số ảnh hưởng không đáng kể đến kết quả tính toán, trong khi những tham số khác ảnh hưởng lớn lên kết quả tính toán. Thông qua quá trình SA, các thông số đầu vào ảnh hưởng nhất được lựa chọn. Đây là một công cụ hữu ích để giảm số lượng phép tính bằng cách giảm các tham số đầu vào được xem xét mà vẫn giữ nguyên độ chính xác của phép toán. Từ hai mươi đến cả trăm tham số đầu vào ban đầu, thông qua tính toán độ nhạy có thể giảm số lượng đầu vào xuống dưới mười tham số [6, 7, 8].

Về hệ thực nghiệm, hệ FEBA được lựa chọn. Kịch bản tái ngập thuộc loại phức tạp nhất về mặt thủy nhiệt vì trong quá trình tái ngập có rất nhiều cơ chế truyền nhiệt của pha hơi, hai pha và pha lỏng tồn tại. Cùng với đó, các chế độ dòng chảy cũng thay đổi rất phức tạp. Các nghiên cứu đã thực hiện nhiều thí nghiệm để nghiên cứu cơ chế thủy nhiệt cũng như các hiện tượng xảy ra trong giai đoạn tái ngập để đánh giá và cải thiện khả năng dự đoán các phần mềm thủy nhiệt. Chương trình kiểm tra Hiệu ứng Hệ thống và Hiệu ứng Riêng biệt (FLECHT-SEASET) đã tập trung vào cơ chế truyền nhiệt ở tốc độ dòng chảy tái ngập cao với sự thay đổi của công suất [9]. Tuy nhiên, những thí nghiệm này không đủ để định lượng các hiện tượng liên quan đến cơ chế tái ngập chi tiết do một số bất định sinh ra trong thực nghiệm. Chương trình RBHT (Truyền nhiệt trong bó nhiên liệu) [11] được đề xuất để cải thiện những hạn chế thực nghiệm trước đây. Thử nghiệm này được thực hiện để khảo sát sự truyền nhiệt phần đáy vùng hoạt lên khi thay đổi tốc độ dòng chảy tái ngập với thay đổi áp suất phần trên. Giống như thử nghiệm RBHT, FEBA (Thử nghiệm ngập lụt với các mảng bị chặn) [12] được thực hiện để nghiên cứu cơ chế truyền nhiệt. Các tác động của bộ đệm lưới và sự phình nhiên liệu trong giai đoạn tái ngập đã được xem xét cho các thí nghiệm trên hệ FEBA nhằm đánh giá, phát triển và cải tiến các mô hình đã được xây dựng [12].

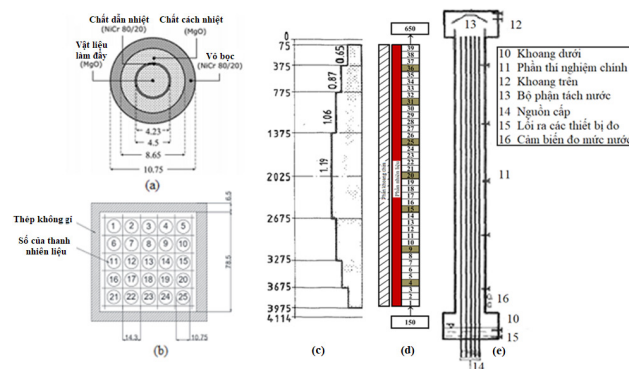
Về *phần mềm tính toán*, phần mềm RELAP5 được lựa chọn. Đây là phần mềm tính toán thủy nhiệt được sử dụng rộng rãi, có bề dày lịch sử trong phân tích an toàn và cấp phép do Cục quản lý hạt nhân Mỹ (USNRC) phát triển [13]. Phần mềm này cũng có khả năng mô phỏng pha tái ngập. Các tính toán độ nhạy, độ bất định cũng đã được thực hiện trên phần mềm này.

2.2. Mô hình hệ thực nghiệm FEBA

Nhiên liệu của hệ thí nghiệm FEBA là một bó thanh nhiên liệu có kích thước 5x5 như bó nhiên liệu thật của lò phản ứng nước áp lực (PWR) (Hình 2a) [12]. Nó được bao quanh bởi một vỏ hình vuông làm bằng thép không gỉ (Hình 2b) và được gia nhiệt bằng điện theo công suất cô-sin bảy bậc với mật độ công suất khác nhau (Hình 2c). Mô hình của phần chính của hệ thực nghiệm FEBA (Hình 2d) được xây dựng dựa trên sơ đồ cấu tạo bộ phận chính của hệ FEBA (Hình 2e). Mô hình phần chính của hệ thí nghiệm FEBA được chia làm ba phần khác nhau: thể tích đầu vào (150) tương ứng với khoang dưới (10), phần thử nghiệm chính bao gồm thanh gia nhiệt (11), và thể tích đầu ra (650) là khoang trên (12). Chiều dài thanh gia nhiệt là 3.9 mét được chia thành 39 đoạn có độ dài 0.1 mét. Trên thực tế, tổng chiều dài thanh nhiên liệu trong hệ FERBA là 4.114 m. Tuy nhiên, phần chứa chất gia nhiệt chỉ có chiều dài là 3.9 mét, tức là từ 75 mm đến 3975 mm, như minh họa trong Hình 2c. Trong mô hình hệ thí nghiệm FEBA, các lưới giằng (tại các nút 4, 9, 15, 20, 25, 31 và 36) cũng như khung chứa để được xét đến như được thể hiện trong Hình 2d.

Thí nghiệm ban đầu được làm nóng bằng hơi ở công suất thấp (200 kW) để đạt được nhiệt độ ban đầu cần thiết trước khi mô phỏng quá trình tái ngập. Theo đường cong công suất nhiệt phân rã 120% Tiêu chuẩn Quốc gia Hoa Kỳ (ANS), quá trình đun nóng hệ được tiến hành trong khoảng 40 giây sau khi lò phản ứng ngừng hoạt động để đạt nhiệt độ mong muốn ban đầu ở trạng thái cân

bằng. Sau đó, nước làm mát được cấp vào hệ từ phần dưới (10) để mô phỏng pha tái ngập. Trong quá trình tiến hành thí nghiệm, nhiệt độ của khung chứa (phần không được gia nhiệt) và vỏ nhiên liệu (phần được gia nhiệt) được đo tại các vị trí khác nhau dọc trên bề mặt trục của chúng.



Hình 2. Sơ đồ nút hóa của thí nghiệm FEBA trong RELAP5: (a) Cấu trúc cắt ngang của thanh nhiên liệu; (b) Cấu trúc cắt ngang của bó nhiên liệu trong thí nghiệm FEBA; (c) Công suất cô-sin của các thanh nhiên liệu theo 7 bậc khác nhau; (d) Sơ đồ nút hóa hệ thí nghiệm FEBA trong RELAP5; (e) Phần chính của hệ thí nghiệm FEBA

3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

3.1. Trường hợp tham chiếu

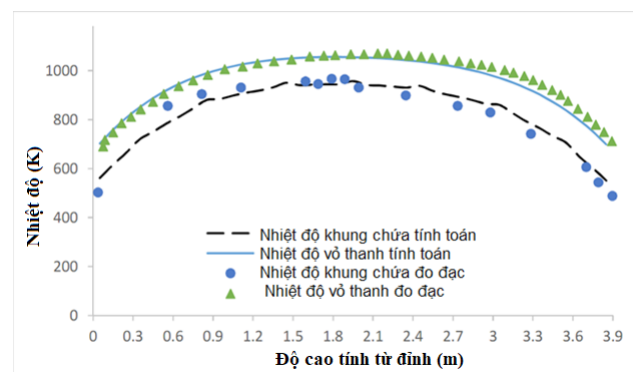
Trường hợp tham chiếu là trường hợp tất cả các mô hình vật lý xem xét với các giá trị mặc định của chúng là 1.0. Có mười sáu mô hình vật lý với các hàm phân bố (PDF) và dải giao động được chọn trong nghiên cứu độ nhạy như được liệt kê trong Bảng 1.

Dựa trên tiến trình thực hiện thí nghiệm cũng như các điều kiện ban đầu và điều kiện biên cho thí nghiệm 216, tính toán tiến hành mô phỏng cho cả hai giai đoạn. Giai đoạn đầu là mô phỏng việc hâm nóng hệ bằng hơi đơn pha ở công suất thấp trong khoảng 1000 s cho đến khi đạt đến nhiệt độ ổn định của nhiệt độ vỏ nhiên liệu. Giai đoạn tiếp theo là mô phỏng quá trình chuyển tiếp tái ngập bằng cách kích hoạt cấp nước từ lối vào

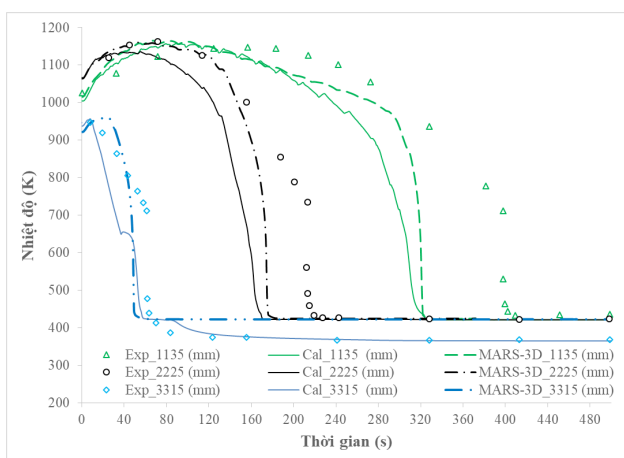
Bảng 1. Các mô hình vật lý, hàm phân bố và dải dao động của chúng

Stt	Mô hình vật lý	PDF	Dải dao động
IP1	Hệ số truyền nhiệt Chen cho dòng sôi nhân	L-N	[0.4 – 2.8]
IP2	Bảng tra cứu thông lượng nhiệt tới hạn AECL	N	[0.20 – 1.80]
IP3	Thông lượng nhiệt tới hạn trong loại sôi thùng (Zuber)	L-N	[0.50 – 2.00]
IP4	Tương quan hệ số truyền nhiệt Weisman sửa đổi	N	[0.50 – 1.50]
IP5	Hệ số truyền nhiệt Bromley cho dòng sôi màng	N	[0.50 – 1.50]
IP6	Hệ số truyền nhiệt sôi màng phân tán (phương trình Forslund-Rohsenow)	N	[0.50 – 1.50]
IP7	Đổi lưu với hơi quá nhiệt (chảy rối, chảy phân tầng, đổi lưu tự nhiên)	N	[0.50 – 1.50]
IP8	Hệ số tăng cường giọt của dòng hơi	N	[0.50 – 1.50]
IP9	Hệ số tăng cường giọt của dòng hơi	L-N	[0.50 – 2.00]
IP10	Mô hình cuộn chất lỏng theo của Ishii-Mishama	L-N	[0.50 – 2.00]
IP11	Số Weber	L-N	[0.50 – 2.00]
IP12	Hệ số truyền nhiệt mặt phân cách cho dòng lỏng dưới bão hòa	L-N	[0.50 – 2.00]
IP13	Diện tích mặt phân cách của dòng vành khăn ngược (độ nhẵn)	L-N	[0.50 – 2.00]
IP14	Tiêu chí tường khô/ ướt	L-N	[0.50 – 2.00]
IP15	Tiêu chí chuyển tiếp đối với độ rỗng	N	[0.50 – 1.50]
IP16	Hệ số truyền nhiệt mặt phân cách của giọt-hơi nước	N	[0.80 – 1.20]

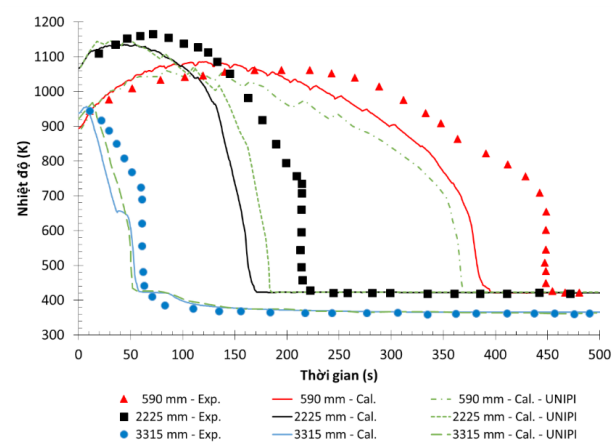
lên bộ phận chính của hệ thí nghiệm, công suất bố nhiên liệu được áp dụng theo đường công suất mô phỏng nhiệt phân rã theo Chuẩn ANS 120 % nhằm mô phỏng quá trình tái ngập. Trong giai đoạn làm nóng bằng hơi đến nhiệt độ ổn định, kết quả tính toán nhiệt độ ban đầu của vỏ thanh nhiên liệu và khung chứa được so sánh với số liệu thực nghiệm như được chỉ ra trong Hình 3. So sánh này chỉ ra rằng quá trình mô phỏng đun nóng hệ thí nghiệm đã đạt được kết quả giống như đo đạc thực tế.



Hình 3. So sánh phân bố nhiệt độ ban đầu của vỏ thanh nhiên liệu và khung chứa



Hình 4. So sánh kết quả nhiệt độ tính toán của vỏ thanh nhiên liệu với các số liệu thực nghiệm và tính toán sử dụng phần mềm MARS-3D [5]



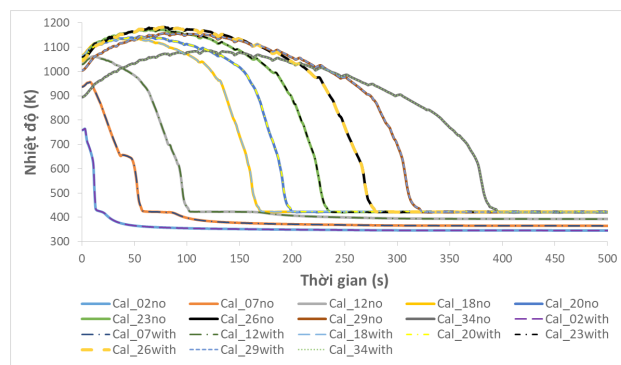
Hình 5. So sánh kết quả nhiệt độ tính toán của vỏ thanh nhiên liệu với các số liệu thực nghiệm và tính toán khác sử dụng phần mềm RELAP5 [5]

Khi chuyển từ trạng thái ổn định sang trạng thái chuyển tiếp, các kết quả tính toán mô phỏng cho bài toán tham chiếu ở các độ cao khác nhau (ở phần dưới, phần giữa và phần trên của thanh nhiên liệu) được so sánh với dữ liệu thực nghiệm và các tính toán khác sử dụng phần mềm MARS-3D (KAERI [5]), và RELPA5 (UNIPI [5]) như hình minh họa trong Hình 4 và Hình 5.

Từ các so sánh trên có thể kết luận rằng input của thí nghiệm 216 cho kết quả tương tự với kết quả tính toán từ các phần mềm thủy nhiệt khác và có kết quả khá gần với đo đạc thực nghiệm. Từ kết quả so sánh nói trên, input này có thể sử dụng cho các nghiên cứu tiếp theo.

3.2. Tính toán độ nhạy

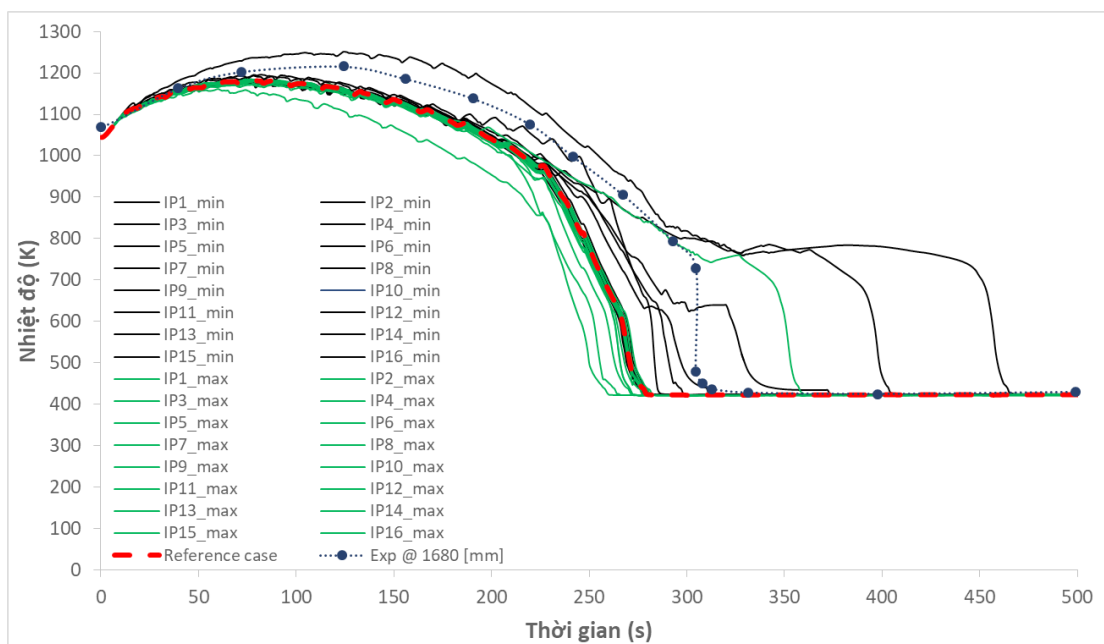
Để xem xét độ nhạy của các mô hình vật lý, các lựa chọn để xem xét 16 mô hình vật lý được kích hoạt như trong Bảng 1. Bài toán tham chiếu là bài toán mà các mô hình vật lý có hệ số mặc định được lựa chọn (giá trị là 1.0). Cần lưu ý rằng là khi kích hoạt chức năng này kết quả tính toán phải đảm bảo là không đổi. Kết quả tính toán trước và sau khi kích hoạt tính toán độ nhạy cho các mô hình vật lý được chỉ ra trong Hình 6.



Hình 6. So sánh kết quả tính toán nhiệt độ mô phỏng trong trường hợp trước (no) và sau khi kích hoạt (with) lựa chọn xem xét độ nhạy của các mô hình vật lý

Kết quả tính toán trước khi kích hoạt các mô hình vật lý (Cal_xxno) hoàn toàn giống với kết quả tính toán sau khi kích hoạt chúng (Cal_xxwith). Trong đó xx là chín vị trí (02, 07, 12, 18, 20, 23, 26, 29 và 34) như được minh họa trong Hình 6.

Trong tính toán với trường hợp tham chiếu, kết quả phân bố nhiệt độ chỉ ra rằng vị trí nút 26 có nhiệt độ cao nhất, PCT xảy ra, tương ứng với độ cao 1400 mm. Đây được chọn là vị trí tham chiếu và được dùng để tính phân bố nhiệt độ trong phân tích độ nhạy.



Hình 7. Kết quả tính toán độ nhạy với 16 mô hình vật lý

Bằng cách lấy giá trị min và max của mỗi tham số trong 16 tham số, thực hiện truyền thông tin qua tham số lối ra là PCT và thời gian dính ướt, có tất cả 32 trường hợp được tính toán tại vị trí tham chiếu có PCT xảy ra (1400 mm) và kết quả được chỉ ra như trong Hình 7. Có thể thấy rằng kết quả tính toán có phân bố khá đối xứng về mặt nhiệt độ so với trường hợp tham chiếu (chỉ ra bằng đường đậm nét đứt quãng) và thực nghiệm. Tuy nhiên thời gian dính ướt trong tính toán mô phỏng cho một số trường hợp trong tổng 32 trường hợp này lại có thăng giáng đáng kể.

Để phân tích độ nhạy, cần phải lựa chọn ra các tiêu chuẩn để đánh giá. Các tiêu chí được lựa chọn cho nghiên cứu độ nhạy trong đề tài này dựa trên các tiêu chí đã cho [5].

Đối với quá trình đánh giá và cấp phép về mặt thủy nhiệt, PCT là tiêu chí chính được lựa chọn. Trong kịch bản tái ngập được xem xét, thời gian dính ướt là một hiện tượng điển hình. Nó xác định tình trạng bề mặt của thanh, T_w , là khô nếu nhiệt độ của thanh cao hơn nhiệt độ bão hòa khoảng 30 độ, $T_w = T_{sat} + 30$, và ngược lại thì vỏ thanh nhiên liệu là bị ướt.

Chính vì thế, hai tiêu chuẩn được lựa chọn trong nghiên cứu độ nhạy của đề tài là PCT và thời gian dính ướt:

Tiêu chí PCT được xác định là giá trị tuyệt đối của độ thay đổi nhiệt độ PCT:

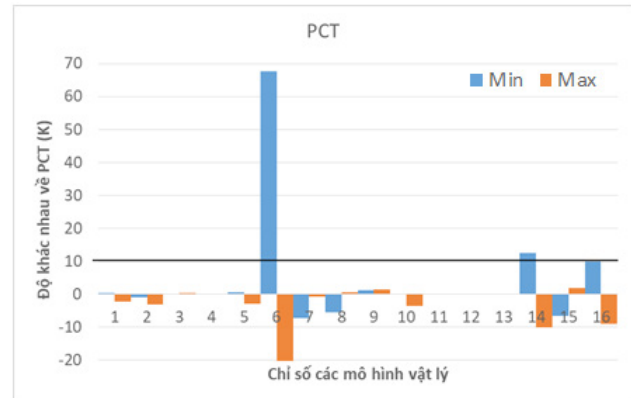
$$\Delta T_{ref} (=PCT_i - PCT_{ref}) = 10 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

trong đó $i = 1, \dots, 32$.

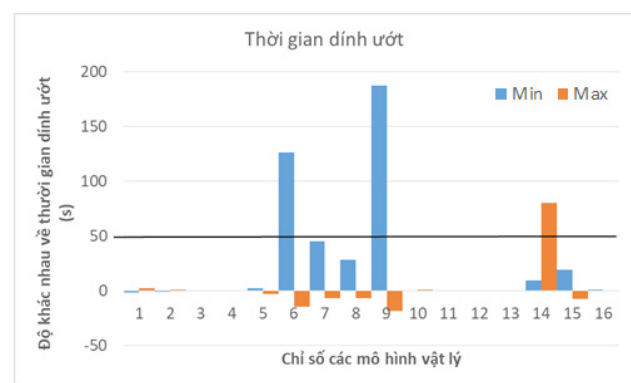
Tiêu chuẩn thời gian dính ướt là độ thay đổi trong thời gian dính ướt:

$$\Delta t_{quench} (=t_{q,i} - t_{q,ref}) = 50 \text{ (s)}$$

Kết quả tính toán độ nhạy được thể hiện trong Hình 8 và Hình 9 trong đó các kết quả tính toán của giá trị Min và Max trong bảng chú thích tương ứng với giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của 16 tham số đầu vào xem xét.



Hình 8. Độ nhạy các mô hình vật lý theo tiêu chuẩn PCT



Hình 9. Độ nhạy các mô hình vật lý theo tiêu chuẩn thời gian dính ướt

Có thể thấy rằng đối với cả hai tiêu chuẩn đánh giá độ nhạy, các mô hình vật lý từ với chỉ số tương ứng, từ 1 đến 5 và từ 11 đến 13, có rất ít ảnh hưởng lên kết quả tính toán của nhiệt độ vỏ thanh nhiên liệu cũng như thời gian dính ướt. Dựa theo tiêu chuẩn đánh giá độ nhạy PCT đã nêu trên, có thể thấy rằng có ba mô hình vật lý (các mô hình với chỉ số là 6, 14, và 16) có ảnh hưởng lớn nhất đến nhiệt độ vỏ thanh nhiên liệu. Dựa theo tiêu chuẩn đánh giá độ nhạy thời gian dính ướt, các mô hình vật lý có chỉ số tương ứng là 6, 9, và 14 có ảnh hưởng lớn đến kết quả tính toán thời gian dính ướt.

Như vậy, tính toán độ nhạy áp dụng hai tiêu chí đánh giá là PCT và thời gian dính ướt chỉ ra 4 tham số (IP6, IP9, IP14 và IP16) có tác động đáng kể nhất lên kết quả tính toán. Chúng được tổng kết như trong Bảng 2.

Bảng 2: Bốn mô hình vật lý có tác động lớn lên kết quả đầu tính toán đầu ra

ID	Tên mô hình vật lý
IP6	Hệ số truyền nhiệt sôi màng phân tán (phương trình Forslund-Rohsenow)
IP9	Hệ số tăng cường giọt của dòng hơi
IP14	Tiêu chí tường khô/ ướt
IP16	Hệ số truyền nhiệt mặt phân cách của giọt-hơi nước

Có thể nhận thấy rằng bốn tham số này đều là các tham số quan trọng trong giai đoạn tái ngập vì chúng liên quan đến chế độ dòng chảy và các hiện tượng vật lý đặc trưng cho quá trình tái ngập. Hệ số sôi màng (IP6) là một hiện tượng chi phối chính trong quá trình truyền nhiệt trong giai đoạn tái ngập. Dòng hơi với các giọt cuốn theo (entrained droplets) (IP9) có kích thước và vận tốc khác nhau, có ảnh hưởng mạnh mẽ tốc độ dòng cũng như khả năng truyền nhiệt [14]. Tiêu chí khô hay ướt của vỏ thanh nhiên liệu (IP14) dẫn đến việc lựa chọn các hệ số truyền nhiệt hoàn toàn khác nhau. Quá trình bị dính ướt đột ngột và quá trình bị trì hoãn sự dính ướt là hai hiện tượng thường đi kèm trong quá trình dính ướt. Kết quả tính toán độ nhạy trong đề tài này được chỉ ra trong Hình 1.9. Có thể thấy rằng quá trình trì hoãn sự dính ướt là chiếm ưu thế. Điều này chứng tỏ rằng tiêu chuẩn dính ướt cũng cần phải được đánh giá kỹ hơn. Mô hình vật lý được chọn cuối cùng, sự truyền nhiệt tại mặt phân cách giọt-hơi nước (IP16), góp phần đáng kể vào việc truyền nhiệt, đặc biệt là trong giai đoạn tái ngập. Số lượng giọt nước mang kèm hơi nước và kích thước của giọt nước một phần quyết định khả năng truyền nhiệt chung, dẫn đến giảm nhiệt độ của thanh nhiên liệu. Do đó tham số IP16 cũng là tham số cần có các đánh giá về độ bất định.

4. KẾT LUẬN KIẾN NGHỊ

Trong số các điều kiện đầu vào như điều kiện ban đầu, điều kiện biên và PM, PM được đề xuất là các tham số có ảnh hưởng nhất đến kết quả tính toán. Chính vì vậy, các PM là trọng tâm trong

nghiên cứu này. Các PM được phân tích độ nhạy thông qua mô phỏng hệ thực nghiệm FEBA dựa trên các số liệu thực nghiệm của Chuỗi 1 trong các thí nghiệm thực hiện trên hệ FEBA. Trường hợp tham chiếu đã được lựa chọn và kết quả mô phỏng đã chứng tỏ quá trình gia nhiệt tương tự như đã tiến hành trong thực nghiệm. Có 16 mô hình vật lý đã được chọn cho nghiên cứu độ nhạy dựa trên hai tiêu chí về PCT và thời gian dính ướt. Kết quả tính toán độ nhạy chỉ ra rằng bốn mô hình vật lý với chỉ số tương ứng là 6, 9, 14 và 16 có ảnh hưởng lớn đến kết quả tính toán trong số mười sáu tham số đầu vào được xem xét. Có thể nhận thấy rằng bốn tham số này đều là các tham số quan trọng trong giai đoạn tái ngập và cần được xem xét kỹ hơn về đóng góp độ bất định của chúng trong kết quả tính toán.

**Trần Thanh Trâm, Hoàng Tân Hưng,
Đoàn Mạnh Long, Vũ Hoàng Hải**

Trung tâm Đào tạo hạt nhân

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] USNRC, RELAP5/Mod3.3 code manual Volume I: Code Structure, System Models, and Solution Methods., vol. 1, 2001.
- [2] ISL, RELAP5/MOD3.3 code manual volume IV: models and correlations, NUREG/CR-5535/Rev P3-Vol IV, 2006.
- [3] NEA, Nuclear fuel behaviour in loss-of-coolant accident (LOCA) conditions: State-of-the-art Report, Nuclear Energy Agency, 2009.
- [4] Choi T. S., No H. C., Improvement of the reflood model of RELAP5/MOD3.3 based on the assessments against FLECHT-SEASET tests, Nuclear Engineering and Design, Vol. 240, pp.832–841, 2010.
- [5] Kovtonyuk, A. et al., Post-BEMUSE Reflood Model Input Uncertainty Methods (PREMIUM) Benchmark: Final Report, NEA/CSNI/R(2016)18,

2017.

[6] Kovtonyuk A. et al., Post-BEMUSE Reflood Model Input Uncertainty Methods (PREMIUM) Benchmark Phase II: Identification of Influential Parameters, NEA/CSNI/R(2014)14, 2015.

[7] Perez M. et al., Uncertainty and sensitivity analysis of a LBLOCA in a PWR Nuclear Power Plant: Results of the Phase V of the BEMUSE programme, Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, pp. 4206 – 4222, 2011.

[8] Horst Glaeser, GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications, Science and Technology of Nuclear Installations, pp. 1-7, 2008.

[9] Lee N. et al., PWR FLECHT-SEASET unblocked bundle, forced and gravity reflood task data evaluation and analysis report, NUREG/CR-2256, 1982.

[10] Seo G. H. et al. Numerical analysis of RBHT reflood experiments using MARS 1D and 3D modules, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 52, pp.70-84, 2015.

[11] Hochreiter L. E. et al., RBHT reflood heat transfer experiments data and analysis, NUREG/CR-6980, 2012.

[12] Ihle P., Rust K., FEBA Flooding Experiments with Blocked Arrays Evaluation Report, März 1984.

[13] Mesina G. L., A History of RELAP Computer Codes, Nuclear Science and Engineering, vol. 182, v-ix, 2016.

[14] Berna C. et al., Review of droplet entrainment in annular flow: Characterization of the entrained droplets, Progress in Nuclear Energy, Vol. 79, pp. 64-86, 2015.