

NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN DIỄN BIẾN SỰ CỐ NẶNG VÀ TRUYỀN NHIỆT Ở ĐÁY THÙNG LÒ PHẢN ỨNG HẠT NHÂN VVER-1000

TS. Trần Chí Thành
KS. Phan Ngọc Tuyên
KS. Nguyễn Tuấn Nghĩa
KS. Nguyễn Văn Thọ
KS. Hoàng Tiệp

Viện Năng lượng - Bộ Công thương

Tóm tắt

Bài báo này giới thiệu về diễn biến sự cố trong lò phản ứng hạt nhân VVER của Nga và tính toán truyền nhiệt của bể nhiên vật liệu nóng chảy ở đáy thùng lò đối với một số kịch bản sự cố nặng, dùng mô hình đối lưu hiệu quả. Kết quả mô phỏng cho thấy tương tác nhiệt từ bể nhiên vật liệu có thể dẫn đến đảo nhiệt thành lò sau một vài giờ. Hiệu quả một số biện pháp làm mát áp dụng khi có sự cố nặng cũng được tính toán và phân tích trong nghiên cứu này.

1. GIỚI THIỆU

Nghiên cứu về sự cố nặng là chủ đề quan trọng trong mấy chục năm nay, đặc biệt sau sự cố Fukushima ở Nhật Bản. Việc sử dụng các chương trình tính toán thủy nhiệt như SCDAP/RELAP, MELCOR, MAAP [1,2,3] ... để phân tích an toàn đã được áp dụng từ lâu đối với lò Phương Tây. Với lò VVER, gần đây bên cạnh các công cụ tính toán của Nga, các chương trình RELAP/SCDAP, CATHARE, MELCOR, ASTEC v.v. đã được sử dụng để phân tích sự cố nặng.

Với các sự cố nặng giả định trong VVER, các chương trình tính toán được sử dụng để phân tích các sự cố như: Sự cố mất điện toàn bộ (SBO) [4,5,6]; Quá trình sinh khí hydro trong lò và khuếch tán trong tòa nhà lò [7]; Truyền nhiệt trong bể Nhiên Vật Liệu (NVL) nóng chảy và giữ NVL trong lò [8]; Tính toán các sản phẩm phân hạch thoát ra môi trường, cũng như đánh giá hiệu quả các biện pháp làm mát trong quản lý sự cố nặng [9].

Một trong những trạng thái của diễn biến sự cố trong lò là quá trình đối lưu rối tự nhiên của bể NVL nóng chảy ở đáy thùng lò. Kết quả tính toán truyền nhiệt sẽ cho phép dự báo quá trình nóng lên của thành thùng lò, xác định thời gian, vị trí đảo nhiệt, hư hỏng của thùng lò, cũng như xác định đặc tính dòng chảy NVL lỏng ra khỏi lò, hay hiệu quả các biện pháp làm mát v.v. Tuy nhiên, do phương pháp tính truyền nhiệt trong các chương trình nêu trên là phương pháp thông số thô, nên chưa mô tả được quá trình trong cấu hình 3D, cơ chế cụ thể của quá trình chuyển đổi pha (rắn sang lỏng và ngược lại), hay quá trình mở rộng bể NVL do nhiệt dư bên trong v.v.

Các hạn chế nêu trên có thể được khắc phục khi dùng công cụ máy tính mô tả dòng chảy CFD [10]. Tuy nhiên, phương pháp dùng các mô hình chảy rối $k-\varepsilon$, $k-\omega$ không áp dụng được đối với bể NVL nóng chảy có nguồn nhiệt bên trong. Phương pháp mô phỏng trực tiếp (DNS) có thể mô tả chính xác đối lưu rối tự nhiên có nguồn nhiệt bên trong. Tuy nhiên, vì số Ra (Rayleigh number) của bể nóng chảy quá cao (10^{12} - 10^{17}), kích thước của bể NVL quá lớn và sự hiện diện của quá trình chuyển đổi pha đòi hỏi sơ đồ nút hóa dày đặc nên phương pháp này tốn nhiều bộ nhớ máy tính và thời gian.

Để mô phỏng hiệu quả (thời gian ngắn) với mức độ chính xác cao quá trình đối lưu rối tự nhiên của bể NVL nóng chảy, mô hình đối lưu hiệu quả ECM (Effective Convectivity Model), mô hình ECM có chuyển đổi pha PECM (Phase-change ECM) với nguồn nhiệt bên trong, và mô hình PECM cho lớp kim loại lỏng không có nguồn nhiệt bên trong đã được phát triển [11,12]. Mô hình có thể áp dụng tính toán truyền nhiệt khi NVL nóng chảy đã rơi xuống đáy lò. Các mô hình này đã được kiểm chứng với nhiều thí nghiệm thực tế, đã áp dụng tính toán truyền nhiệt cho lò nước sôi với thiết kế của ABB-Atom.

Bài báo có bố cục như sau. Phần tiếp theo (Phần 2) sẽ trình bày sơ bộ về mô hình ECM, PECM cho bể NVL có nguồn nhiệt bên trong, và PECM cho kim loại lỏng. Phần 3 nêu sơ bộ về

diễn biến sự cố và kịch bản trong lò VVER-1000 được đưa ra tính toán cũng như một vài biện pháp đối phó sự cố nặng có thể áp dụng. **Phần 4** sẽ là kết quả mô phỏng và phân tích đối với bể NVL nóng chảy đồng nhất và phân lớp cho lò VVER-1000. Đặc biệt, trong nghiên cứu này lần đầu tiên áp dụng đồng thời 2 mô hình, là PECM cho bể có nguồn nhiệt bên trong và PECM cho lớp kim loại của bể NVL phân lớp ở đáy lò VVER-1000. **Phần 5** sẽ kết luận về nghiên cứu này.

2. MÔ HÌNH ĐỐI LƯU HIỆU QUẢ CHO BỂ Ô-XÍT VÀ LỚP KIM LOẠI LÔNG

2.1. Mô hình đối lưu hiệu quả ECM/PECM cho bể ô-xít và PECM cho lớp kim loại

Mô hình đối lưu hiệu quả ECM được phát triển để làm công cụ mô phỏng đối lưu rối tự nhiên của bể NVL nóng chảy. Khi giải bài toán truyền nhiệt, ECM không dùng tốc độ tức thì $u_{x,y,z}$, do đó không cần thiết phải giải phương trình Navier-Stokes để xác định các tốc này, giảm được phần lớn bộ nhớ và thời gian của máy tính. Trong phương pháp ECM, tốc độ của chất lỏng đối lưu trong bể nóng chảy được thay thế bằng tốc độ đặc trưng là $U_{x,y,z}$ (hay gọi là U_{up} , U_{side} và U_{down} là 3 tốc độ đặc trưng theo hướng lên, xuống và đi ngang). Khi đó phương trình truyền nhiệt có thể được viết dưới dạng:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_p} \nabla h \right) - \frac{\partial(\rho \Delta H)}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho U_{x,y,z} h) - \nabla \cdot (\rho U_{x,y,z} L) + Q_v$$

trong đó h là enthalpy (J/kg); k là độ dẫn nhiệt của chất lỏng (W/m.K); C_p nhiệt dung riêng (J/kg.K); ΔH là nhiệt hóa lỏng của quá trình (J/kg); Q_v là nhiệt sinh ra trên đơn vị thể tích, tức là nhiệt dư (W/m³); L là nhiệt hóa lỏng của toàn bộ quá trình chuyển đổi pha (J/kg).

Các tốc độ đặc trưng được tính theo các thông số đặc tính chất lỏng, kích thước bể NVL lỏng và số Nusselt (Nu) cho đối lưu rối tự nhiên có nguồn nhiệt bên trong, đó là Nu được xác lập từ các thí nghiệm thực tế và là hàm số phụ thuộc vào Ra .

Mô hình PECM cho lớp kim loại lỏng phía trên được phát triển tương tự như mô hình ECM/PECM đã được phát triển cho bể ô-xít, sự khác nhau là ở đây không có nguồn nhiệt bên trong. Đối lưu rối trong lớp kim loại lỏng là đối lưu Rayleigh-Benard hoặc đối lưu hỗn hợp (khi có thêm lớp biên phát triển từ các mặt làm mát nghiêng hoặc đứng). Tương tự như ECM/PECM cho bể có nguồn nhiệt bên trong, ở đây tốc độ đặc trưng được tính theo kích thước hình học của lớp kim loại lỏng đối lưu, các thông số đặc tính của kim loại lỏng và số Nu cho đối lưu Rayleigh-Benard hoặc đối lưu hỗn hợp. Các mô tả cụ thể về mô hình ECM, PECM cho bể có nguồn nhiệt và bể có lớp kim loại có thể tìm thấy trong [11] và [12].

2.2. Áp dụng mô hình đối lưu hiệu quả trong Fluent

Các phương trình đạo hàm riêng được giải bằng công cụ của **Fluent** (phương pháp thể tích hạn chế). Mô hình ECM và PECM được đưa vào trong **Fluent** bằng chương trình do người sử dụng thiết lập UDF. Qua UDF, nguồn nhiệt được thay đổi để có thể đưa các tốc độ đặc trưng vào trong các thành phần đối lưu của phương trình truyền nhiệt. Khi đó **Fluent** chỉ giải phương trình truyền nhiệt, và kết quả sẽ mô tả được đối lưu rối tự nhiên của quá trình trong bể nóng chảy (hoặc trong lớp kim loại lỏng).

Cấu hình cụ thể được xác định, kích thước hình học của lò VVER-1000 được tạo ra và nút hóa bằng công cụ như ICEM hay GAMBIT. Điều kiện biên và điều kiện ban đầu được đặt bằng **Fluent**. Trong nghiên cứu này, 2 loại bể nóng chảy được mô phỏng, đó là bể nóng chảy đồng nhất có nguồn nhiệt bên trong (hay là bể ô-xít), và bể phân lớp, khi một bể ô-xít phía dưới có nguồn nhiệt bên trong, và có một lớp kim loại bên trên, nóng chảy do nhiệt từ bể ô-xít truyền lên. Các điều kiện biên, điều kiện ban đầu sẽ được mô tả chi tiết hơn trong phần tiếp theo.

3. KỊCH BẢN SỰ CỐ TRONG LÒ VVER-1000

Tùy thuộc vào thời gian diễn ra sự cố nặng, diễn biến sự cố NVL nóng chảy có thể chia làm 2 giai đoạn: giai đoạn sớm với một số ít NVL nóng chảy, và giai đoạn muộn với khối lượng lớn NVL nóng chảy [13]. Trong trường hợp NVL không được làm mát thích hợp trong vùng hoạt lò

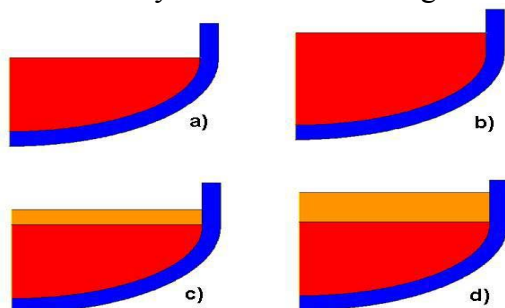
phản ứng, NVL nóng chảy sẽ rơi xuống, qua các cấu trúc dưới vùng hoạt và cuối cùng tập trung ở đáy thùng lò phản ứng, tương tác với các cấu trúc trong lò và thành thùng lò. Trong trường hợp đáy thùng lò không có nước, NVL rơi xuống đáy lò vẫn giữ nguyên trạng thái của nó. Nếu quá trình NVL lỏng dịch chuyển xuống đáy lò xảy ra khi đáy lò có nước, một phần NVL lỏng sẽ bị vỡ ra và đông đặc thành các hạt nhỏ, và phần còn lại có thể vẫn tồn tại ở dạng lỏng. Có 2 cơ chế NVL rơi xuống đáy lò: một là qua đường dẫn phía biên vùng hoạt, như đã xảy ra ở TMI-2, hoặc dịch chuyển xuống đáy lò qua các cấu trúc đỡ phía dưới đáy lò, hoặc các ống. Khi dòng NVL lỏng gặp nước, cơ chế chủ yếu của quá trình tan vỡ là quá trình thủy động. Quá trình truyền nhiệt nhanh chóng từ NVL sang nước sẽ tác động đến quá trình tan vỡ của dòng NVL lỏng, cũng như tạo ra nhiều hơi nước, oxy hóa vật liệu, tạo ra hydrô và áp suất trong lò tăng nhanh. Như vậy quá trình NVL rơi xuống và tương tác với nước, cấu trúc trong lò sẽ tạo ra lớp NVL (lớp mảnh NVL, bể NVL nóng chảy đồng nhất, bể NVL phân lớp v.v.). Trong thực tế, đặc tính của tương tác NVL và truyền nhiệt trong đáy thùng là rất phức tạp và phụ thuộc nhiều vào kích bản sự cố với nhiều hiện tượng vật lý mà hiện nay các nhà khoa học còn chưa hiểu rõ.

Quá trình dịch chuyển NVL trong lò có thể được mô phỏng bởi các công cụ tính toán như MELCOR, RELAP5/SCDAP v.v. Trong khuôn khổ nghiên cứu này, mô hình đối lưu hiệu quả có chuyển đổi pha sẽ áp dụng cho tính toán truyền nhiệt ở đáy lò, khi sự cố mất điện toàn bộ SBO xảy ra (hoặc SBO và mất nước LOCA), sau một vài giờ, khi đáy lò đã hình thành một lớp NVL có độ dày nào đó. Trên cơ sở khối lượng nhiên liệu, thiết bị có trong lò, các kịch bản đưa ra trong **Bảng 1** bao gồm bể ô-xít đồng nhất (UO_2-ZrO_2) và bể phân lớp (ô-xít phía dưới và lớp kim loại lỏng phía trên bao gồm Zr, Fe ...). Hai biện pháp quản lý sự cố nặng được đưa vào xem xét trong các tính toán là: Cấp nước vào thùng lò (có thể từ hệ thống làm mát khẩn cấp, hay từ thiết bị sinh hơi, từ các xe cứu hỏa v.v.); Bơm nước ngập làm mát đáy thùng lò từ ngoài.

Bảng 1: Các kịch bản xem xét trong tính toán truyền nhiệt đáy thùng lò

Kịch bản	Khối lượng/Độ dày của lớp (xem Hình 1)	Các biện pháp quản lý sự cố nặng (SAM)
1	78 tấn/1.0m (lớp ô-xít đồng nhất)	Không áp dụng SAM (không có nước trong lò)
2	78 tấn/1.0m (lớp ô-xít đồng nhất)	Bơm nước vào lò (có nước phía trên lớp NVL)
3	100 tấn/1.25m (lớp ô-xít đồng nhất)	Bơm nước vào lò (có nước phía trên lớp NVL)
4	100 tấn/1.25m (lớp ô-xít đồng nhất)	Bơm nước vào lò và bơm nước làm mát ngoài thùng lò (phần đáy) từ sau 4,2h
5	78 tấn/1.0m (lớp ô-xít đồng nhất + 0.2m lớp kim loại lỏng phía trên)	Không có nước trong lò, không có nước làm mát ngoài thùng lò (phía dưới)
6	78 tấn/1.0m (lớp ô-xít đồng nhất + 0.2m lớp kim loại lỏng phía trên)	Không có nước trong lò, có bơm nước làm mát ngoài thùng lò (phía dưới)
7	78 tấn/1.0m (lớp ô-xít đồng nhất + 0.4m lớp kim loại lỏng phía trên)	Không có nước trong lò, không có nước làm mát ngoài thùng lò (phía dưới)
8	78 tấn/1.0m (lớp ô-xít đồng nhất + 0.4m lớp kim loại lỏng phía trên)	Không có nước trong lò, có bơm nước làm mát ngoài thùng lò (phía dưới)

Từ các kịch bản trên, **Hình 1** cho thấy cấu hình NVL trong bể đồng nhất và bể phân lớp.



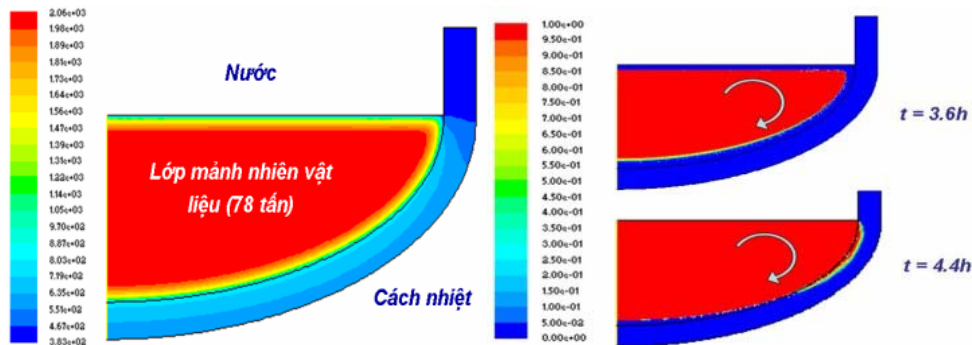
Hình 1: Cấu hình lớp NVL đáy lò theo Bảng 1: a) kích bản số 1, 2; b) kích bản số 3, 4; c) kích bản số 5, 6; d) kích bản số 7, 8.

Điều kiện biên và điều kiện ban đầu cho các cấu hình như sau. Đối với lớp NVL đồng nhất, ban đầu, lớp NVL có nhiệt độ 450 K, gần với quá trình khô hết nước trong lớp NVL. Trong trường hợp có nước làm mát, các bề mặt sẽ được đặt ở điều kiện đẳng nhiệt với nhiệt độ sôi của nước. Nếu bề mặt trên bề nóng chảy không có nước, khi đó điều kiện truyền nhiệt từ bề mặt sẽ là bức xạ nhiệt, với nhiệt độ môi trường xung quanh là nhiệt độ nóng chảy của kim loại. Bên ngoài vùng đáy thành thùng lò, trong trường hợp không có biện pháp làm mát, bề mặt được đặt ở điều kiện truyền nhiệt hạn chế (50W/m^2) do có lớp cách nhiệt phía ngoài thành thùng lò. Các bề mặt khác đặt ở điều kiện đối xứng hoặc điều kiện đoạn nhiệt. Với bề NVL phân lớp một số điều kiện thay đổi. Các mặt tiếp xúc giữa bề ô-xít NVL và lớp kim loại, hoặc NVL với thành thùng lò sẽ là cặp nhiệt. Điều kiện ban đầu áp dụng khác với bề đồng nhất, vì việc phân lớp xảy ra chậm hơn. Theo kết quả tính toán cho trường hợp lớp NVL đồng nhất, từ sau 2h kể từ khi đáy lò khô nước (~ 7000 sec), nhiệt độ của lớp ô-xít phía dưới đạt khoảng 2000 K. Do đó nhiệt độ ban đầu cho lớp ô-xít là 2000 K, lớp kim loại bên trên là 1800 K. Nhiệt độ nóng chảy (hóa rắn và hóa lỏng) của lớp ô-xít là 2750/2770 K. Nhiệt độ nóng chảy của kim loại lỏng được đặt là 1671/1727 K. Nhiệt dư của lớp ô-xít là 1 MW/m^3 , tương đương với nhiệt dư NVL sau khi dừng lò một vài giờ.

4. TÍNH TOÁN TRUYỀN NHIỆT Ở ĐÁY THÙNG LÒ VVER-1000

4.1. BỀ NVL đồng nhất ở đáy thùng lò

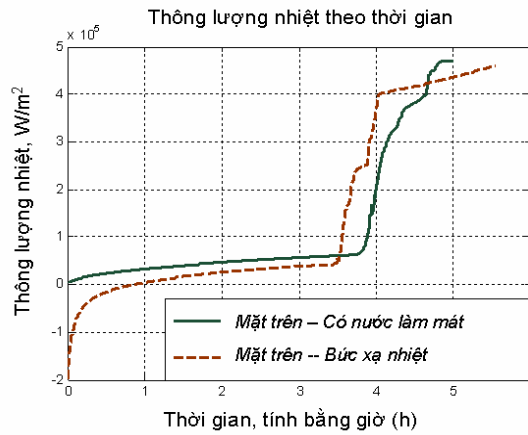
Sau một thời gian kể từ khi khô nước, lớp NVL có nhiệt độ tăng lên nhanh chóng, nhiệt độ thành lò cũng tăng lên (Hình 2, trái). Sau 3,6h lớp ô-xít bên dưới nóng chảy bên trong, bên ngoài vẫn được bao bọc một lớp vỏ cứng (Hình 2, phía trên bên phải). Sau 4,4h, thành thùng lò đã bị nóng chảy từ bên trong.



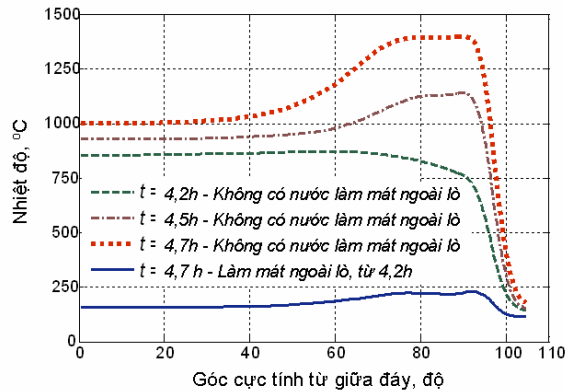
Hình 2: Nhiệt độ của lớp NVL đồng nhất kích bản 2 sau 1,9h (K), bên trái và cấu hình bề NVL theo thời gian sau đó (độ dày 1,0 m; màu đỏ - thể lỏng, màu xanh thể rắn, hình bên phải).

Kết quả tính toán cho thấy nếu việc bơm nước vào lò chậm, tức là khi lớp NVL đã hình thành ở đáy lò, thì sẽ ít hiệu quả. Lượng nhiệt lấy đi từ bề mặt bên trên lớp NVL của kích bản 1 (bức xạ nhiệt lên trên vào các cấu trúc trong lò) và 2 (nước làm mát) không khác nhau nhiều (Hình 3). Hình vẽ này cũng cho thấy khi bề NVL được hình thành, do đối lưu, thông lượng nhiệt lên trên tăng lên nhanh chóng (đồ thị sau 3,5h).

Hình 4 cho thấy thay đổi nhiệt độ thành thùng lò trong các kích bản 3 và 4 (lớp NVL dày 1,25m). Khi không có nước làm mát bên ngoài, nhiệt độ thành thùng lò tăng nhanh chóng, và sau 4,5h, nhiệt độ cao nhất của thành thùng lò đã vượt quá 1100°C , là nhiệt độ mà dao nhiệt xảy ra mạnh mẽ [14]. Trong trường hợp có nước làm mát thùng lò phía ngoài, nhiệt độ thành lò được giữ ở mức thấp ở bên ngoài (phía trong có thể vẫn bị nóng chảy một phần), nhiều khả năng thùng lò không bị dao nhiệt và NVL được giữ lại bên trong (cần có tính toán về độ bền cơ học của thành lò để khẳng định khả năng giữ NVL trong lò).



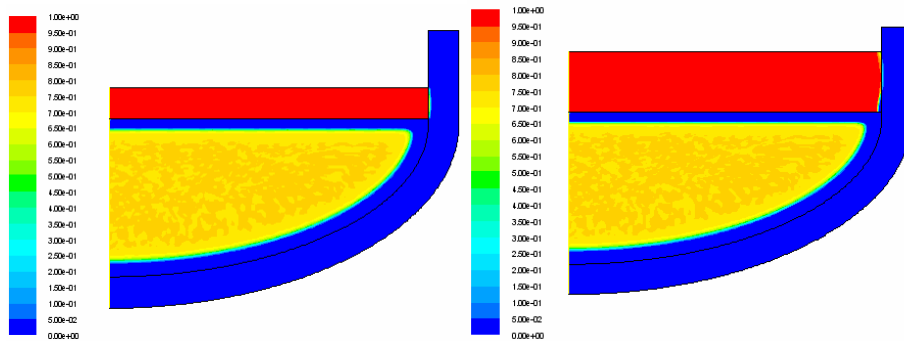
Hình 3: Thông lượng nhiệt theo thời gian từ bề mặt lớp NVL của kịch bản 1 và 2. Nhiệt độ bên ngoài thành thùng lò



Hình 4: Phân bố nhiệt độ thành thùng lò theo thời gian, kịch bản 3 và 4.

4.2. Kết quả tính toán đối với bề NVL phân lớp

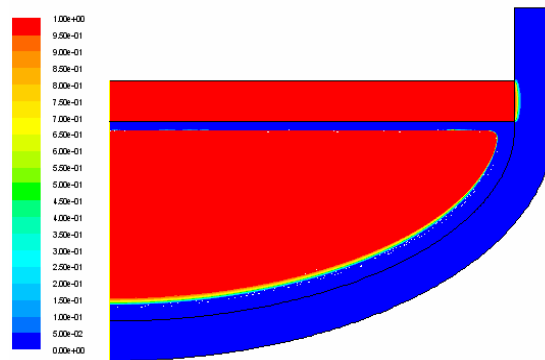
Kết quả tính toán kịch bản 5 và 7 cho thấy, sau 3,3h thành thùng lò bắt đầu bị nóng chảy (Hình 5). Có thể nhìn thấy rõ, lớp kim loại phía trên hóa lỏng hoàn toàn (hình trái) và gần 100% (hình phải). Trong khi đó lớp ô-xít phía dưới mới chỉ bắt đầu nóng chảy.



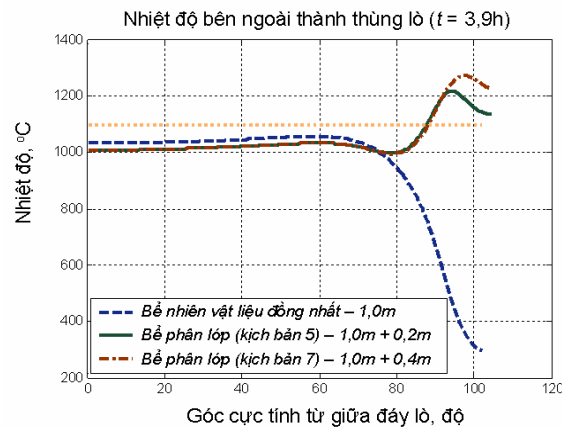
Hình 5: Tỷ lệ NVL hóa lỏng (kịch bản 5 và 7, thời gian $t = 3,3h$).

Tuy nhiên sau 3,9h lớp ô-xít bị nóng chảy toàn bộ ở giữa, có một lớp vỏ cứng bao bọc bề ô-xít, cũng như ngăn cách bề ô-xít và lớp kim loại. 100% lớp kim loại bị nóng chảy, thành thùng lò bị nóng chảy đáng kể do hiệu ứng tập trung nhiệt (Hình 6).

Hình 7 cho thấy nhiệt độ thành thùng lò, theo chiều từ phía đáy lên đối với 3 kịch bản: bề NVL đồng nhất; bề phân lớp với lớp kim loại 0,2m; và bề phân lớp với lớp kim loại 0,4m (kịch bản 1, 5 và 7 Bảng 2). Phân bố nhiệt độ tại thời điểm $t = 3,9h$.



Hình 6: Thành thùng lò bị nóng chảy do hiệu ứng tập trung nhiệt (tỷ lệ nhiên vật liệu hóa lỏng – màu đỏ 100%, kích bản 5, thời gian $t = 3,9h$).



Hình 7: Phân bố nhiệt độ bên ngoài thành thùng lò 3 kích bản sau 3,9 h (kích bản 1, 5 và 7).

Có thể thấy rằng đối với bể NVL phân lớp, do hiệu ứng tập trung nhiệt, nhiệt độ thành thùng lò tăng nhanh và đạt nhiệt độ dẻo nhiệt sớm hơn so với bể NVL đồng nhất. Sự khác nhau về nhiệt độ thành lò trong 2 kích bản 5 (lớp kim loại $0,2m$) và 7 (lớp kim loại $0,4m$) không khác nhau nhiều, do vật liệu thép có độ dẫn nhiệt cao, nhiệt bị phân tán nhanh trong thành thùng lò, và do lượng nhiệt bức xạ lên trên của kích bản 5 cao hơn so với kích bản 7. Sự khác nhau về nhiệt độ thành lò sẽ dẫn đến sự khác nhau về thời gian dẻo nhiệt. Để biết được rõ ràng hơn quá trình dẻo nhiệt và thời gian thùng lò hỏng (nếu không có nước làm mát bên ngoài), cần công cụ phân tích về độ bền cơ học của thành thùng lò, ví dụ như mô phỏng bằng chương trình ANSYS.

5. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày sơ bộ về diễn biến sự cố nặng trong lò phản ứng hạt nhân và mô phỏng truyền nhiệt đáy lò VVER-1000 mô hình đối lưu hiệu quả ECM/PECM, với một số kích bản sự cố và biện pháp quản lý sự cố nặng có thể áp dụng.

Các tính toán mô phỏng truyền nhiệt cho thấy nếu NVL rơi xuống đáy lò và hình thành bể NVL nóng chảy, biện pháp đưa nước vào lò sẽ không phát huy hiệu quả. Bể NVL phân lớp làm cho đáy thùng lò nhanh thùng hơn do hiệu ứng tập trung nhiệt. Tuy nhiên, kết quả tính toán với 2 kích bản có lớp kim loại với độ dày khác nhau cho thấy, do quá trình phân tán nhiệt diễn ra trong thành thùng lò, sự khác nhau về thông lượng nhiệt truyền từ bể NVL sang thành lò không lớn.

Khi có nước làm mát ngoài lò, mặc dầu kích hoạt muộn, thành thùng lò có thể không bị dẻo nhiệt và NVL được giữ bên trong. Các tính toán cho thấy sau thời gian dài (gần $5h$), tuy bị nóng chảy phía bên trong nhưng thành thùng lò vẫn có độ dày còn lại đáng kể. Thông lượng nhiệt từ thành thùng lò ra nước bên ngoài thấp, chưa gây nên hiện tượng khủng hoảng nhiệt. Tuy nhiên, độ bền cơ học của thành thùng lò còn lại có đủ giữ được khối lượng NVL bên trong hay không, cần có các tính toán và phân tích cơ nhiệt khác để khẳng định.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài nghiên cứu cấp bộ năm 2011. Các tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ về nguồn kinh phí của cơ quan quản lý đề tài nghiên cứu khoa học Bộ Công thương và góp ý của các chuyên gia.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] SCDAP/RELAP5-3D Code Development Team, “SCDAP/RELAP5-3D© Code Manual”, Report INEEL/EXT-02-00589, Revision 2.2, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, October, 2003.
- [2] R.O. Gauntt et al. (2005), MELCOR Computer Code Manual, Core (COR) Package Reference Manuals. NUREG/CR-6119, Vol. 2, Rev.2, Version 1.8.6, September.
- [3] Fauske Associated Inc., “MAAP4 Users Manual”, Vol. 2., 1999.
- [4] M.P. Palova, M. Andreeva, P.P. Groudev, “RELAP5/MOD3.2 Blackout Investigation for Validation of EOPs for KNPP VVER-1000/320”, *J. Progress in Nuclear Energy*, **Vol. 49**, pp. 409-427, 2007.
- [5] M. Cherubini, N. Muellner, F. D’Auria, G. Petrangeli, ”Application of an Optimized AM Procedure Following a SBO in a VVER-1000”, *J. Nuclear Engineering and Design*, **Vol. 238**, pp. 74-80, 2008.
- [6] B. Chatterjee, D. Mukhopadhyay, H.G. Lele, A.K. Ghosh, H.S. Kushwaha, P. Groudev, “Analyses for VVER-1000/320 Reactor for Spectrum of Break Sizes along with SBO”, *J. Annals of Nuclear Energy*, **Vol. 37**, pp. 359-370, 2010.
- [7] A.E. Stefanova, P.P. Groudev, B.P. Atanasova, “Comparison of Hydrogen Generation for TVSM and TVSA Fuel Assemblies for Water Water Energy Reactor (VVER)-1000”, *J. Nuclear Engineering and Design*, **Vol. 239**, pp. 180-186, 2009.
- [8] D. Tarabelli, G. Ratel, R. Pelisson, G. Guillard, M. Barnak, P. Matejovic, “ASTEC Application to In-Vessel Corium Retention”, *J. Nuclear Engineering and Design*, **Vol. 239**, pp. 1345-1353, 2009.
- [9] M. Andreeva, M.P. Pavlova, P.P. Groudev, “Overview of Plant Specific Severe Accident Management Strategies for Kozloduy Nuclear Power Plant, WVER-1000/320”, *J. Annals of Nuclear Energy*, **Vol. 35**, pp. 555-564, 2008.
- [10] UDF Manual, **Fluent 6.2 Documentation**, Fluent Inc. 2005.
- [11] C.T. Tran and T.N. Dinh, "The Effective Convectivity Model for Simulations of Melt Pool Heat Transfer in a Light Water Reactor Pressure Vessel Lower Head. Part I: Physical Processes, Modeling and Model Implementation", *J. Progress in Nuclear Energy*, **Vol. 51 (8)**, pp. 849-859, 2009.
- [12] C.T. Tran, P. Kudinov, "The Effective Convectivity Model for Simulation of Molten Metal Layer Heat Transfer in a Boiling Water Reactor Lower Head", 2009 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'09), Shinjuku Tokyo, Japan, May 10-14, 2009.
- [13] K. Ahn and D.H. Kim, “A State-of-the-Art Review of the Reactor Lower Head Models Employed in Three Representative U.S. Severe Accident Codes”, *J. Progress in Nuclear Energy*, **Vol. 42 (3)**, pp. 361-382, 2003.
- [14] J.L. Rempe, S.A. Chavez, G.L. Thinnis, C.M. Allison, G.E. Korth, R.J. Witt, J.J. Sienicki, S.K. Wang, L.A. Stickler, C.H. Heath, S.D. Snow, “Light Water Reactor Lower Head Failure Analysis”, *NUREG/CR-5642, EGG-2618*, Idaho National Engineering Laboratory, USA, 1993.