

KHẢO SÁT SỰ PHÂN TẦNG NHIỆT ĐỘ TẠI CHÂN LẠNH VÀ DOWNCOMER CỦA Lò PWR TRONG QUÁ TRÌNH TIÊM NƯỚC LÀM MÁT CỦA HỆ ECCS DỰA TRÊN HỆ THỰC NGHIỆM LSTF

NGUYỄN THỊ THANH THỦY, TRẦN VĂN TRUNG, LÊ ĐẠI DIỄN

*Viện Khoa Học và Kỹ Thuật Hạt Nhân
179 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô- Cầu Giấy-Hà Nội
Email: thuy83qn@yahoo.com*

Tóm tắt: Một trong những sự cố quan trọng trong lò phản ứng hạt nhân là sự cố mất chất tải nhiệt (LOCA). Hệ thống làm nguội tâm lò khẩn cấp (ECCS) có nhiệm vụ tiêm nước làm mát vào thùng lò chịu áp lực nhằm duy trì vùng hoạt ngập nước và được làm mát lâu dài. Trong quá trình nước làm mát ECCS được tiêm vào thùng lò phản ứng qua chân lạnh và đi vào khe biên (downcomer) sẽ có sự phân tầng nhiệt độ. Thực nghiệm LSTF (Large Scale Test Facility) được thiết lập cho các mục đích nghiên cứu thực nghiệm về khảo sát các hiện tượng thủy nhiệt và xác định hiệu quả của ECCS trong quá trình sự cố LOCA nhỏ và các chuyên tiếp trong vận hành.

Báo cáo trình bày một số kết quả khảo sát sự phân tầng của nhiệt độ tại chân lạnh và downcomer trong quá trình tiêm nước làm mát của hệ ECCS dưới điều kiện đối lưu tự nhiên dòng một pha, dựa trên hệ thực nghiệm LSTF, thông qua việc áp dụng phần mềm CFD FLUENT.

Từ khóa: LSTF, LOCA, FLUENT

I. MỞ ĐẦU

Một trong những sự cố quan trọng trong lò phản ứng hạt nhân là sự cố mất chất tải nhiệt (LOCA). Trong sự cố LOCA, hệ thống làm nguội tâm lò khẩn cấp (ECCS) có nhiệm vụ tiêm nước làm mát vào thùng lò chịu áp lực nhằm duy trì vùng hoạt ngập nước và được làm mát lâu dài. Ở giai đoạn đầu của sự cố LOCA, áp suất trong thùng lò phản ứng vẫn còn cao. Hệ phun cao áp được kích hoạt thực hiện việc đưa nước từ hệ thống ECCS vào thùng lò. Nước được đưa vào từ hệ ECCS tạo thành một hỗn hợp có nhiệt độ thấp ở dưới và dòng nước có nhiệt độ cao hơn ở phía trên của chân lạnh. Hỗn hợp nước này là sự pha trộn giữa nước phun vào từ hệ phun cao áp có nhiệt độ thấp hơn và nước từ chân lạnh có nhiệt độ cao hơn. Việc mô phỏng được thực hiện tại chân lạnh A với giả thiết chỗ vỡ xảy ra ở chân lạnh B. Mặc dù sau khi xảy ra LOCA, lò được dập, nhưng do dòng qua bơm tải nhiệt vẫn được đưa vào nhờ quán tính của bơm. Chính sự pha trộn giữa hỗn hợp nước ở nhiệt độ cao và nhiệt độ thấp này gây nên sự phân tầng nhiệt độ. Để xem xét hiện tượng trên, phần mềm FLUENT được áp dụng để tính toán, mô phỏng dòng chảy của chất lưu.

Như đã nêu trên, ở giai đoạn đầu của sự cố LOCA, trong chân lạnh vẫn duy trì chế độ dòng một pha.

II. MÔ TẢ HỆ THỰC NGHIỆM ROSA-V/LSTF

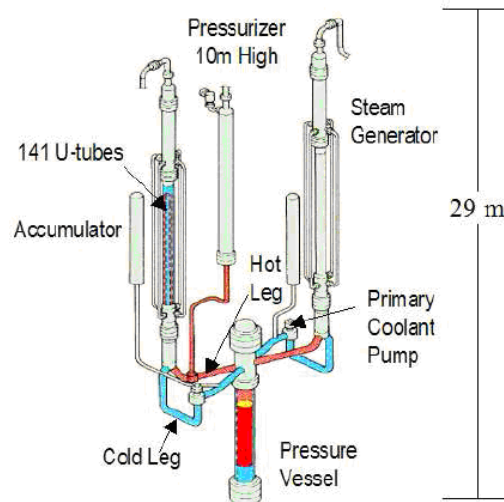
Dự án ROSA (Rig-of Assessment) được thực hiện tại Viện nghiên cứu năng lượng nguyên tử Nhật Bản (JAERI), với mục đích nghiên cứu thủy nhiệt đối với lò phản ứng nước nhẹ (LWRs) trong sự cố LOCAs và điều kiện chuyển tiếp. Hệ thực nghiệm LSTF (Large Scale Test Facility) được sử dụng để nghiên cứu các hiện tượng thủy nhiệt xảy ra trong quá

trình SBLOCAs và trong quá trình vận hành chuyển tiếp để đánh giá hiệu quả hoạt động của hệ thống ECCS.

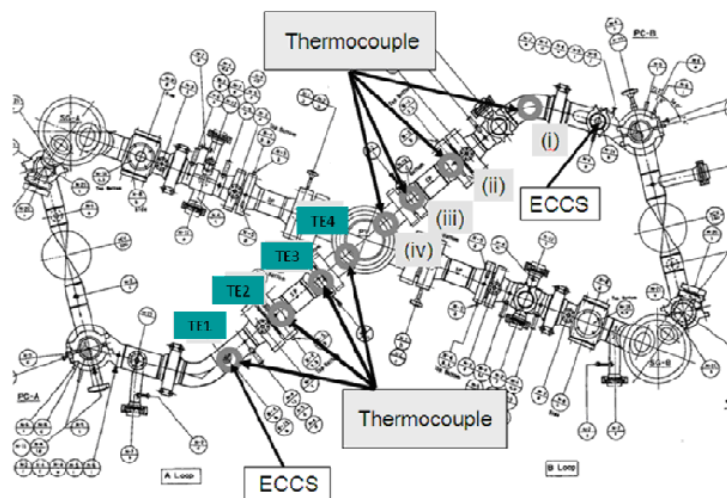
LSTF(Large Scale Test Facility) mô phỏng lò phản ứng Westinghouse PWR công suất nhiệt là 3423 MW với tỷ lệ tương đương về chiều cao, 1/48 về thể tích và 2 vòng tuần hoàn. Hai chân lạnh giống hệt nhau bao gồm các ống thẳng và ống khuỷu được nối với máy bơm nước làm mát chính. Hình 1 mô tả sơ đồ các thiết bị chính của thực nghiệm. Vòi phun ECCS tại hai chân lạnh khác nhau về vị trí và hình dạng. Vòi phun ECCS nhánh A vuông góc với đường ống chính, trong khi vòi phun ECCS nhánh B tạo thành một góc 45^0 so với đường ống chính của chân lạnh[4].

Hình 2 mô tả mặt cắt ngang của thiết bị và vị trí các cặp nhiệt điện thực hiện các đo đạc trong khi tiến hành thực nghiệm. Sự phân bố nhiệt độ trong không gian ba chiều ở điều kiện nhiệt độ cao và áp suất cao được thực hiện trong hệ dưới các điều kiện đổi lưu tự nhiên dòng một pha, hai pha và trong sự cố LOCA vỡ nhỏ.

Trong bài này, mô hình downcomer phía chân lạnh A với vòi phun ECC vuông góc được mô phỏng bằng FLUENT.



Hình 1: Sơ đồ hệ thực nghiệm LSTF[2]



Hình 2: Mặt cắt ngang LSTF và các vị trí cặp nhiệt[4]

III. MÔ PHỎNG THỰC NGHIỆM BẰNG FLUENT

Dựa trên các số liệu của hệ thực nghiệm LSTF/ROSA[1], chúng tôi tiến hành mô hình hóa hình học của bài toán trên DesignModeler có số liệu hình học như trong bảng 1 với lối vào của hệ ECCS cách thùng lò một khoảng 1.05 m và 1.46 m và chiều cao của chân lạnh cách đáy thùng lò một khoảng là 8 m. Đường kính ngoài của downcomer là 0.64 m với chiều rộng khe là 0.046 m.

Bảng 1: Các thông số hình học của thực nghiệm

Thành phần	Đường kính ngoài (m)	Chiều dài (m)	Chiều cao (m)
Chân lạnh	0.207	3.5	-
Chân nóng	0.207	3.5	-
ECC	0.02	250	-
Downcomer	0.64	-	1.8

Mô phỏng bằng cách lấy phép đối xứng bên trong phần mềm FLUENT (hình 3) cho phép giảm khối lượng tính toán và thời gian thực hiện và không làm ảnh hưởng quá nhiều đến các hiện tượng vật lý quan trọng ở trong hệ.

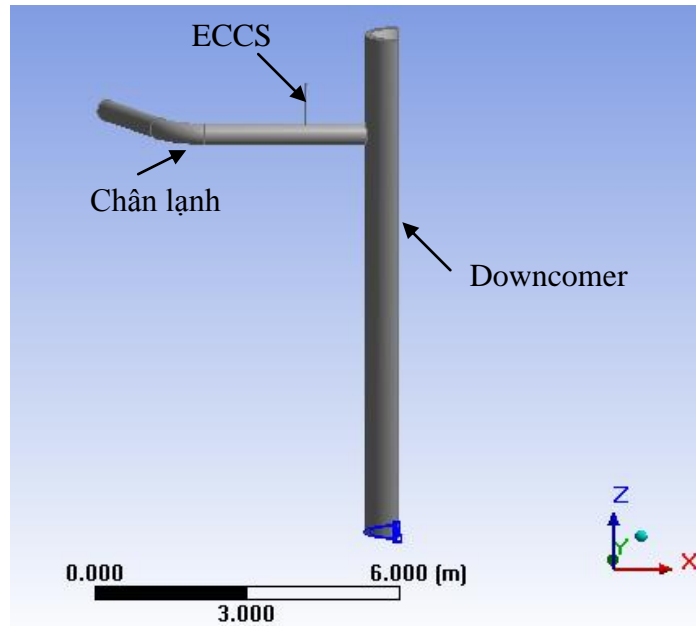
Trong mô hình này vùng chất lỏng được chia lưới với 68000 phần tử tứ diện để giải hệ các phương trình chuyển động bao gồm các phương trình liên tục, phương trình bảo toàn momen động lượng và năng lượng trên các thể tích điều khiển này. Hệ các phương trình này được giải bằng FLUENT 14.0 với hai mô hình rối k- ϵ tiêu chuẩn, k- ϵ realizable và các giá trị đầu vào như nhiệt độ, áp suất làm việc, tốc độ dòng lối vào và tính chất nhiệt của nước được mô tả trong bảng 2 và 3.

Bảng 2: Tính chất nhiệt của nước lạnh (Tcold leg) và nước nóng (TECC) tại chân lạnh và ECC

Điều kiện	Thông số
Áp suất (MPa)	10.28
$T_{\text{cold leg}}$ (K)	454.6
Tốc độ lối vào tại chân lạnh (kg/s)	7.39
T_{ECCS} (K)	299.2
Tốc độ dòng lối vào tại ECCS (kg/s)	0.936

Bảng 3: Tính chất nhiệt của nước

Khối lượng riêng (kg/m ³)	998.2
Nhiệt dung riêng (J/kg-K)	4182
Hệ số dẫn nhiệt (W/m-K)	0.6
Độ nhớt (kg/m-s)	0.001



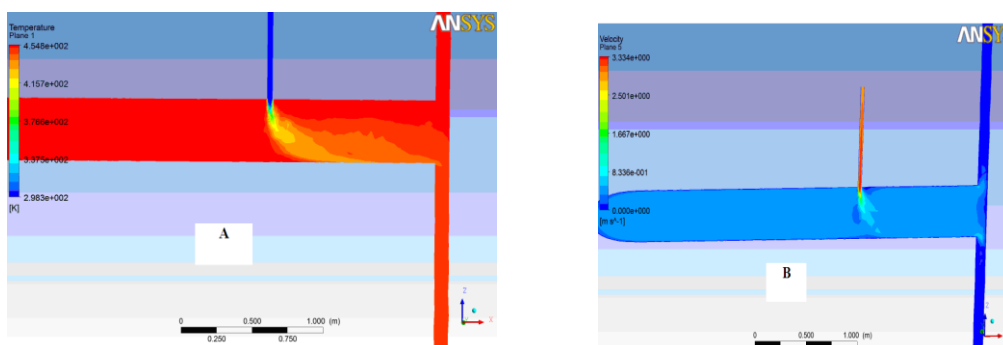
Hình 3: Downcomer và chân lạnh mô phỏng bằng FLUENT

IV. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

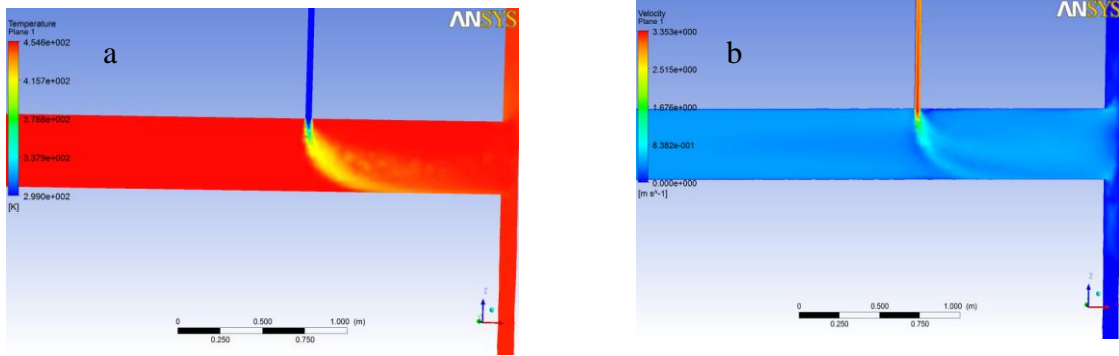
Trong bài báo này chúng tôi sẽ tập trung phân tích tính chất nhiệt và vận tốc dòng chảy ở những vùng hỗn hợp chất lỏng giữa ECCS/chân lạnh và giữa chân lạnh/downcomer để đánh giá hiệu quả của ECCS trong việc làm mát vùng hoạt khi sự cố LOCA xảy ra. Đây là vùng xảy ra sốc nhiệt do chênh lệch nhiệt độ giữa nước tuần hoàn trong hệ tải nhiệt và nước phun vào từ hệ ECCS. Để nghiên cứu hiện tượng này, cần phải tính đến các tính chất vật liệu của lớp vỏ và các quá trình trao đổi nhiệt giữa thành ống và dòng chất lưu. Các nghiên cứu này không nằm trong phạm vi của bài báo này.

Vùng chất lỏng được chia thành 68000 phần tử tứ diện với tiêu chuẩn để đo chất lượng phần tử lưới so với hình dạng lý tưởng của phần tử đó “Skewness” có giá trị từ 0 đến 0.92, với giá trị trung bình là 0.58, điều này cho thấy các phần tử lưới có chất lượng khá tốt.

Sự phân bố nhiệt độ và vận tốc tại chân lạnh và downcomer ở điều kiện dòng một pha với các mô hình rối k-ε tiêu chuẩn, k-ε realizable được trình bày trong các hình 4 và 5.



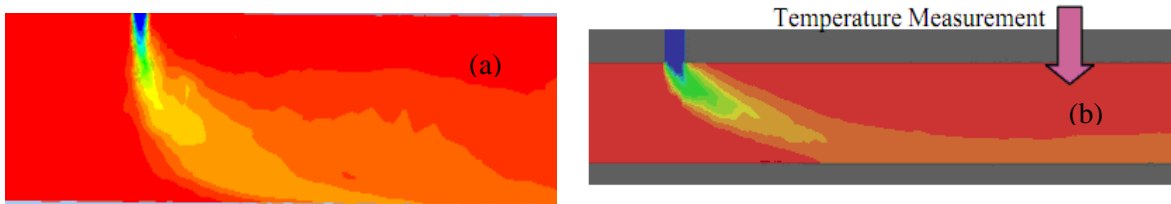
Hình 4: Dòng chất lỏng tại lối ra của chân lạnh đối với mô hình k-ε tiêu chuẩn:
(a) nhiệt độ, (b) vận tốc



**Hình 5: Dòng chất lỏng tại lối ra của chân lạnh đối với mô hình k- ϵ realizable:
(a) nhiệt độ, (b) vận tốc**

Trong tất cả các trường hợp, sự phân bố nhiệt độ ở hai mô hình cho kết quả khá giống nhau: dòng chảy trong ống chính là dòng chuyển động do lực nổi. Nhiệt độ thấp nhất được thể hiện bằng màu xanh cho nước của hệ ECCS và nhiệt độ cao nhất là màu đỏ cho dòng chất lỏng của chân lạnh. Nước từ hệ ECCS đi xuống đáy của đường ống chân lạnh rồi dịch chuyển lên phía trên của thành ống tạo ra hỗn hợp pha trộn giữa chúng như trong hình 4, 5.

Hình 6 biểu diễn các kết quả mô phỏng so sánh với các kết quả thu được từ phần mềm OpenFOAM với cùng một mô hình dòng chảy k- ϵ [1].

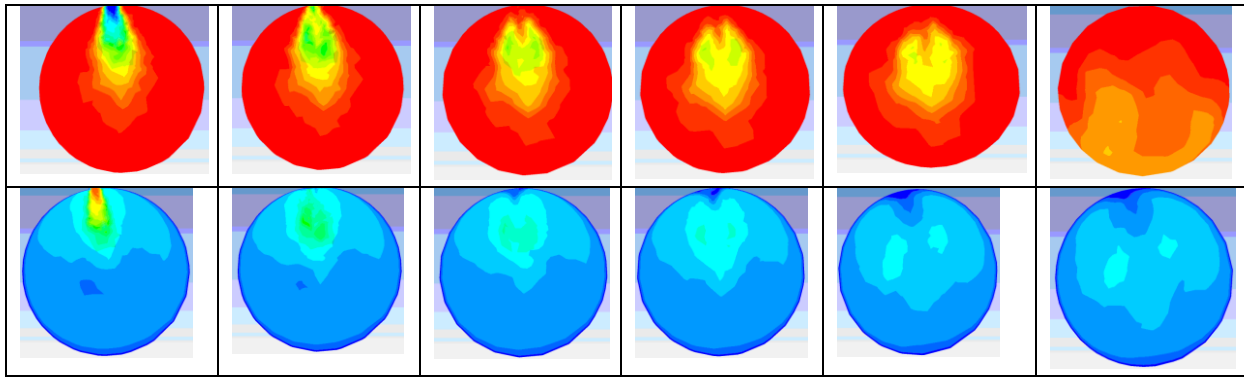


Hình 6: Trường nhiệt độ trên mặt phẳng cắt dọc theo trục x: (a) FLUENT14.0, (b) OpenFOAM [1]

Hình 6 cho thấy, sự phân tầng nhiệt độ quan sát được từ phần mềm FLUENT 14.0 và OpenFOAM mặc dù không hoàn toàn giống nhau nhưng chúng đều cùng chung một quy luật của phân bố nhiệt độ, sự không giống nhau giữa chúng có thể xuất hiện là do số các phần tử được chia trong vùng chất lỏng là khác nhau.

Trường nhiệt độ và vận tốc của chất lỏng tại mặt cắt ngang của chân lạnh được thể hiện trên hình 7. Vị trí của mặt phẳng cắt tính từ miệng ống ECCS, các hình ảnh từ vị trí ứng với mỗi 0.1m dọc theo đường ống chân lạnh được hiển thị từ trái sang phải của hình 7.

Từ hình 7 cho thấy, trường nhiệt độ của chất lỏng bên trong chân lạnh có sự pha trộn giữa dòng phun ECCS sau khi đi vào chân lạnh sẽ có nhiệt độ tăng dần và có khuynh hướng phân tầng khi dịch chuyển về phía downcomer. Trường vận tốc cũng có biến thiên tương tự, càng đi về phía downcomer tốc độ dòng sẽ chậm dần.



Hình 7: Trường chất lỏng tại mặt cắt ngang của chân lạnh: Nhiệt độ (phía trên), Vận tốc (phía dưới)

V. KẾT LUẬN

Bài báo này đã tiến hành thực hiện bài toán 1-1 của hệ thực nghiệm ROSA bằng phần mềm ANSYS FLUENT code nhằm khảo sát sự phân tầng nhiệt độ ở điều kiện đối lưu dòng một pha tại chân lạnh của lò PWR với các mô hình dòng chảy rối khác nhau. Đồng thời cũng tiến hành so sánh các kết quả thu được với các kết quả được tính được bằng phần mềm OpenFOAM với cùng một điều kiện đầu vào và cùng một mô hình tính toán. Sự so sánh cho thấy, mặc dù các kết quả là không hoàn toàn giống nhau nhưng chúng đều cùng chung một quy luật của phân bố nhiệt độ, sự không giống nhau giữa chúng có thể xuất hiện là do số các phần tử được chia trong vùng chất lỏng là khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Jiejun CAI and Tadashi WATANABE. Numerical Simulation of Thermal Stratification in Cold Legs by Using OpenFOAM. Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 2, pp.107-113 (2011).
- [2] HIDEO NAKAMURA*, TADASHI WATANABE, TAKESHI TAKEDA, YU MARUYAMA and MITSUHIRO SUZUKI, OVERVIEW OF RECENT EFFORTS THROUGH ROSA/LSTF EXPERIMENTS, Received February 1, 2009.
- [3] D. Lucas , D. Bestion, ON THE SIMULATION OF TWO-PHASE FLOW PRESSURIZED THERMAL SHOCK (PTS), The 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-12), Sheraton Station Square, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A. September 30-October 4, 2007.
- [4] T. Farkas, I. Tóth, FLUENT ANALYSIS OF A ROSA COLD LEG STRATIFICATION TEST.
- [5] Mahaffy et al., “Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications”, NEA/CSNI/R(2007)5, (2007).

Temperature stratification and coolant mixing during ECCS coolant injection through LSTF experiment

Nguyen Thi Thanh Thuy, Tran Van Trung, Le Dai Dien
Nuclear Safety Center, Institute of Nuclear Safety and Technology

Abstract

One of a important accident in pressurized nuclear reactors is loss-of-coolant accidents (LOCA). ECCS coolant injection into the cold legs and the core is totally covered with water for a long term cooling. During cold ECCS water injected into cold legs and downcomer, the temperature stratification will be occurred under single-phase natural circulation conditions. Large Scale Test Facility (LSTF) simulated to investigate the thermal-hydraulic phenomena and to confirm the effectiveness of ECCS during small-break LOCAs and operation transients.

This report will show that the calculations the temperature distribution in the cold leg and the downcomer during ECCS water injection under single-phase natural circulation conditions was analysed with the CFD FLUENT code.

Key words:, *LSTF,LOCA, FLUENT*