

KHẢO SÁT TAI NẠN Lò ÁP LỰC PWR CHO TRƯỜNG HỢP MÁY BƠM NƯỚC CẤP GẤP SỰ CỐ BẰNG PHẦN MỀM MÔ PHÒNG PCTRAN

NGUYỄN MINH NHẬT ⁽¹⁾, VÕ HỒNG HẢI ⁽²⁾

⁽²⁾*Bộ môn Vật lý hạt nhân, trường Đại học khoa học tự nhiên, TP Hồ Chí Minh*
Email: nmnhat1987@gmail.com

Tóm tắt: Tai nạn có thể xảy ra với lò phản ứng bất cứ lúc nào và ta cũng không thể biết trước được thời điểm nào. Sự cố có thể mang lại hậu quả nghiêm trọng hay không còn phụ thuộc vào từng bộ phận gặp sự cố. Nếu người vận hành lò thiếu kinh nghiệm, chuyên môn hoặc không phản ứng kịp thời trước những phản ứng của lò thì tai nạn càng trở nên tồi tệ hơn. Vì vậy, hiện nay, đã và đang có nhiều chương trình mô phỏng về tai nạn lò phản ứng hạt nhân nhằm dự báo, ngăn chặn cũng như giảm sự cố xuống mức an toàn cần thiết. PCTRAN (Personal Computer Transient Analyzer) là một trong những phần mềm mô phỏng về các tai nạn nhà máy điện hạt nhân được sử dụng ở một số nước trên thế giới như: Đức, Nhật Bản, Hàn Quốc... Trong báo cáo này, chúng tôi thực hiện khảo sát tai nạn về hệ thống máy bơm cung cấp nước cho bình sinh hơi của lò phản ứng gặp sự cố. Các thông số vật lý: thông lượng neutron, nhiệt độ của lõi lò, nhiệt độ của thanh nhiên liệu, hoạt độ phóng xạ... được khảo sát.

Từ khóa: PCTRAN, PWR

I. MỞ ĐẦU

Theo thống kê của IAEA, lò áp lực PWR là kiểu lò phổ biến nhất với trên 230 lò hiện đang được vận hành trên thế giới. Loại lò PWR sử dụng nước thường làm chất tải nhiệt và chất làm chậm. Thiết kế đặc trưng của loại lò này là dùng nước trong chu trình làm nguội vòng một đi qua tâm lò với áp suất rất cao và chu trình thứ hai được sử dụng là hơi được sinh ra để chạy tuốc bin. Nước trong vùng hoạt có thể đạt tới vài trăm độ C nhưng nước không bị sôi nhờ hệ thống hơi trong bình điều áp duy trì áp suất cao. Trong chu trình vòng I nước cũng đóng vai trò của chất làm chậm nên nếu nước trở thành hơi thì phản ứng phân hạch giảm xuống. Hiệu ứng phản hồi âm là một trong những đặc trưng an toàn nội tại của loại lò PWR.

Trong điều kiện lò vận hành bình thường, hệ thống máy bơm nước cấp bơm liên tục vào trong bình sinh hơi giúp tạo ra hơi nước và làm quay tuốc bin. Từ màn hình giao diện của chương trình, chúng tôi thấy áp suất do hơi nước sinh ra và nhiệt độ trung bình trong bình sinh hơi là 55 (kg/cm²) và 301⁰C.

Khi sự cố hệ thống máy bơm nước cấp chính cho bình sinh hơi ngưng hoạt động sẽ tạo ra sự thay đổi về lưu lượng dòng chảy vào trong bình sinh hơi. Kết quả là áp suất hơi trong bình sinh hơi tăng lên đến 65,5 (kg/cm²) và nhiệt độ trung bình của hơi giảm còn 280⁰C. Với thiết kế an toàn của nhà máy điện, các hệ thống bơm an toàn sẽ hoạt động giúp cho lò hoạt động ổn định trở lại. Việc mô phỏng sự cố này đã được phần mềm PCTRAN [1] phát triển cho loại lò áp lực PWR-2 bình sinh hơi.

Trong bài báo này, ngoài sự cố máy bơm nước cấp chính ngưng hoạt động do sửa chữa, chúng tôi mở rộng khảo sát sự cố hệ thống bơm an toàn ngừng hoạt động (cụ thể là hai van cung cấp nước bị khóa do nhân viên nhà máy không kịp mở bằng tay khi hệ thống điều khiển tự động bị ngắt và hai máy bơm tải nhiệt chính bị hỏng tắt do mất điện từ ngoài nhà lò cung cấp), từ đó đánh giá về khả năng đáp ứng an toàn của nhà máy hạt nhân khi sự cố xảy ra.

Nghiên cứu này sử dụng chương trình PCTRAN mô phỏng hoạt động của lò phản ứng PWR- 2 bình sinh hơi với sự cố máy bơm nước cấp chính ngưng hoạt động, tiếp theo chúng tôi khóa hai van cấp nước và cuối cùng tác động lên hai máy bơm tải nhiệt chính. Việc khóa hai van cấp nước đã làm cho nước không được bơm liên tục vào trong bình sinh hơi từ máy

bơm cấp nước phụ. Mức nước trong bình sinh hơi giảm liên tục dẫn đến áp suất, nhiệt độ của bình sinh hơi tăng lên. Bên cạnh đó, việc tắt máy bơm tải nhiệt chính do mất điện cung cấp từ bên ngoài nhà lò đã làm cho nhiệt độ, lượng phóng xạ sinh ra tăng lên nhanh chóng. Do mất điện từ ngoài nhà lò quá lâu, đã dẫn đến nóng chảy vùng hoạt. Chúng tôi thực hiện khảo sát trong 4 giai đoạn như sau:

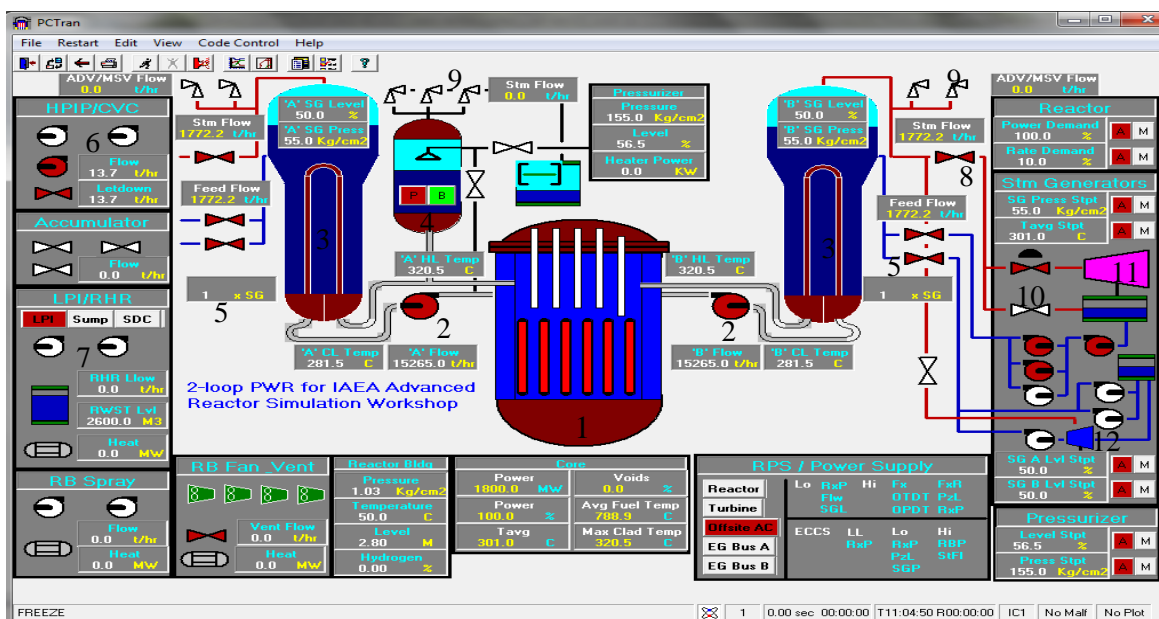
- Từ giây đầu đến 120 giây, lò hoạt động bình thường,
- Sau 120 giây, hệ thống máy bơm cấp nước chính cho bình sinh hơi ngưng hoạt động,
- Sau 720 giây, hai van cung cấp nước trở lại bình sinh hơi bị khóa.
- Sau 10000 giây, hai máy bơm tải nhiệt chính RCP bị tắt do mất điện.

Thời gian quan sát các chỉ số lò được thực hiện đến 14436 giây (tương đương 4 giờ khảo sát). Các tham số về áp suất, nhiệt độ của lõi lò; áp suất và nhiệt độ của bình sinh hơi; nhiệt độ của nhiên liệu, thông lượng neutron trong lò... được khảo sát theo thời gian, từ đó phân tích và đánh giá kết quả.

II. CHƯƠNG TRÌNH MÔ PHÒNG PCTTRAN

PCTTRAN (Personal Computer Transient Analyzer) [1] là phần mềm mô phỏng các trường hợp tai nạn của nhà máy điện hạt nhân, đã được nhiều nước trên thế giới như Hoa Kỳ, Đức, Pháp... đánh giá cao và sử dụng để giảng dạy cho các nhà vận hành, kỹ thuật viên, cán bộ quản lý... trong lĩnh vực điện hạt nhân. Phần mềm này đã được IAEA tài trợ cho Cục ATBXHN nhằm hỗ trợ nâng cao năng lực an toàn hạt nhân của cơ quan pháp quy [2]. Mô hình của nhà máy được mô phỏng trong chương trình PCTTRAN là công nghệ PWR- 2 vòng gồm: một bình điều áp, hai bình sinh hơi, hai máy bơm tải nhiệt và 1 thùng lò. Giao diện của chương trình thể hiện tất cả tham số của lò phản ứng theo thời gian thực như áp suất của vòng sơ cấp, áp suất của bình điều áp, nhiệt độ của chân nóng, chân lạnh, nhiệt độ cửa lõi lò...

Hình 1 thể hiện giao diện đầy đủ chương trình PCTTRAN cho lò phản ứng PWR- 2 vòng. Màu sắc trong giao diện thể hiện trạng thái hoạt động khác nhau của hệ thống, thiết bị. Màu đỏ tương ứng với trạng thái mở, màu trắng tương ứng với trạng thái đóng, màu xanh lá cây tương ứng với trạng thái đóng mở, màu xanh da trời tương ứng với mực nước. Bảng 1 trình bày vị trí các thành phần thiết bị trong lò PWR-2 vòng.



Hình 1. Chương trình PCTTRAN – PWR – 2 vòng

Bảng 1. Các thành phần chính của lò phản ứng PWR- 2 vòng được mô phỏng trong PCTRAN

ST T	Hệ thống	Ký hiệu	Vị trí
1	Vùng hoạt lò phản ứng		1
2	Máy bơm tải nhiệt chính	RCP	2
3	Bình sinh hơi	SG	3
4	Bình điều áp	PRZ	4
5	Hệ thống van cấp nước trở lại bình sinh hơi	MFV	5
6	Hệ thống bơm nước áp suất cao	HPI	6
7	Hệ thống bơm nước áp suất thấp	LPI	7
8	Van cô lập hệ thống hơi	MSIV	8
9	Hệ thống van xả hơi an toàn bình điều áp và bình sinh hơi	Relief/ Safety Valve	9
10	Van tước bin chính	TCV Valve	10
11	Tuốc bin		11
12	Hệ thống máy bơm nước cấp cho bình sinh hơi		12

III. KỊCH BẢN MÔ PHỎNG SỰ CỐ

1. Điều kiện lò hoạt động bình thường.

Khi lò hoạt động bình thường trong khoảng 120 giây đầu tiên, các thông số của lò phản ứng được thể hiện trong bảng 2.

Bảng 2. Các thông số của lò phản ứng trong điều kiện hoạt động bình thường

STT	Thông số	Giá trị
1	Áp suất của hệ thống làm mát lò (RCS)	155 (kg/cm ²)
2	Áp suất của bình sinh hơi	55 (kg/cm ²)
3	Công suất nhiệt của vùng hoạt	1803,7 (MW)
4	Nhiệt độ của chân nóng	320,5 ⁰ C
5	Nhiệt độ của chân lạnh	281,5 ⁰ C
6	Nhiệt độ trung bình của nhiên liệu	789,7 ⁰ C
7	Nhiệt độ trung bình của vỏ bọc nhiên liệu	320,5 ⁰ C
8	Lưu lượng dòng chảy vào bình sinh hơi	1772,2 (tấn/ giờ)
9	Mức nước trong bình sinh hơi	11,83 (m)
10	Mức nước bình điều áp	56,4%

2. Mô tả sự cố

Chúng tôi khảo sát trong 4 giai đoạn như sau: (1) Từ giây đầu đến 120 giây, lò hoạt động bình thường; (2) sau 120 hệ thống máy bơm chính ngưng hoạt động; (3) sau 720 hai van cung cấp nước trở lại bình sinh hơi bị khóa; và (4) sau 10000 giây máy bơm tuần hoàn RCP bị hỏng. Toàn bộ kịch bản mô phỏng sự cố được tóm tắt trong Bảng 3.

Bảng 3. Kịch bản mô phỏng 3 sự cố lần lượt theo thời gian.

Thời gian	Diễn biến mô phỏng
1 + 120 giây	Lò hoạt động bình thường
120 giây	Máy bơm nước cấp chính ngưng hoạt động
120 + 185,5 giây	Chờ tín hiệu scram và máy bơm phụ bật lên
185,5 + 720 giây	Máy bơm phụ khởi động và lò hoạt động ổn định
720 giây	Hệ thống van cấp nước trở lại bình sinh hơi bị khóa
720 + 10000 giây	Khởi động bơm cấp nước áp suất cao HPI
10000 giây	Tắt tất cả máy bơm tải nhiệt chính RCP
10000 + 14436 giây	Bơm cấp nước HPI, LPI, MSIV hoạt động liên tục

Trên giao diện mô phỏng, các kết quả và sự đáp ứng phản hồi của các thiết bị an toàn được trình bày. Cụ thể các kết quả sơ nét của các sự cố trên được trình bày như sau:

- Tại thời điểm 120 giây, chúng tôi tắt hệ thống máy bơm nước cấp chính để sửa chữa, kết quả thể hiện lượng cung cấp nước vào bình sinh hơi A giảm mạnh. Nhiệt độ chất tải nhiệt tăng nhẹ làm cho mực nước ở bình điều áp tăng lên.

Hệ thống máy bơm phụ tự bật lên, để bổ sung lượng nước thiếu vào bình sinh hơi. Tại thời điểm 288 giây, sau khi gặp sự cố, nước trong bình sinh hơi giảm xuống dưới mức 17% cho phép, bộ phận điều khiển đập lò kích hoạt và tiến hành đập lò. Sau khoảng 65,5 giây mất cung cấp nước lò đã được đập tắt. Khi thanh điều khiển rơi vào vùng hoạt của lò, neutron bị hấp thụ nên thông lượng nơ tron giảm đi rất nhanh, dẫn đến công suất của lò cũng giảm.

Sau đó, van ông hơi chính dẫn đến tuốc bin đóng lại nên áp suất bình sinh hơi tăng lên, nhiệt độ chân lạnh và chân nóng giảm dần. Hệ thống phun áp suất cao gồm hai máy bơm HPIP tự động hút nước từ bể chứa nước và bơm vào hệ thống chất tải nhiệt lò phản ứng để điều hòa áp suất. Bên cạnh đó, sự mở ra của van vòng tuốc bin, lượng hơi từ bình sinh thoát ra xuống bể ngưng tụ và do có sự điều áp của bình điều áp, mức điều áp dần khôi phục.

- Việc tắt máy bơm nước cấp chính về cơ bản vẫn an toàn do còn có máy bơm cấp nước phụ bật lên. Nhưng lúc này, hai van cho phép nước từ máy bơm phụ bơm trở vào bình sinh hơi bị lỗi, không mở van ra được (vị trí 5 ở hình 1). Từ sau thời điểm 720 giây, lưu lượng nước cũng như sự bay hơi trong bình sinh hơi A giảm rõ rệt. Tại 3397 giây, không còn nước trong bình sinh hơi. Hệ thống chân lạnh dần dần tăng nhiệt độ đến lúc gần bằng nhiệt độ chân nóng của lò là 345°C . Vì không còn một lượng nước lớn bơm tuần hoàn vào trong lò làm mát, nước trong lò vẫn tiếp tục nóng, nhiệt độ trung bình trong lò vẫn tăng lên liên tục.

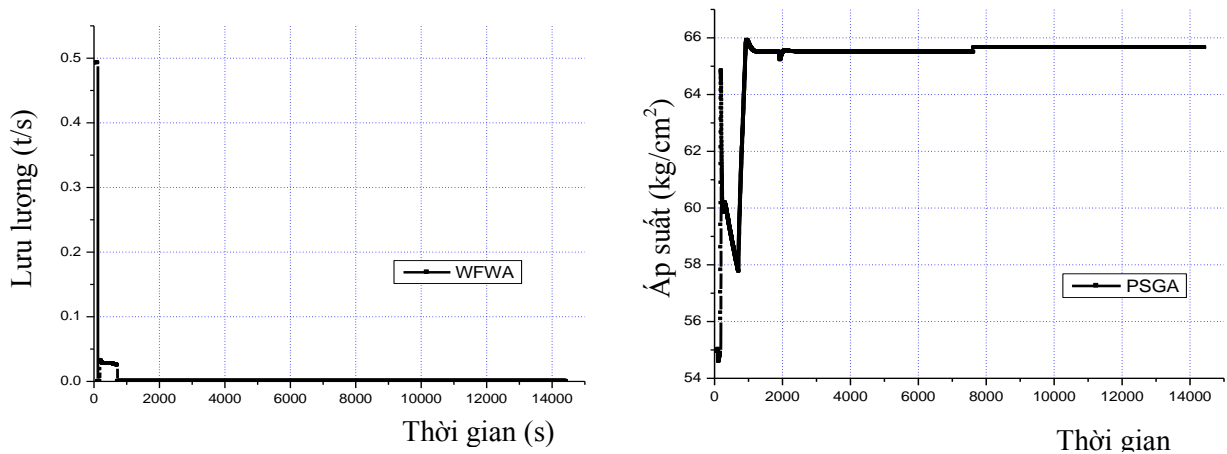
Nhiệt độ vẫn tiếp tục làm nóng lò do nhiệt lượng tỏa ra từ các sản phẩm phân hạch, dẫn đến lượng nước trong vùng hoạt của lò giảm dần. Chất làm mát được bơm liên tục vào trong hệ thống làm lạnh lò từ ECCS và máy bơm áp lực cao HPIP để bù đắp lượng nước mất đi khi truyền qua vòng thứ cấp. Từ bảng số liệu xuất ra trong chương trình, chúng tôi nhận thấy mực nước trong lò tăng lên nhưng không nhiều khoảng 20 (m^3). Điều này là do nước trong lõi lò đang nóng dần lên, thể tích bắt đầu nở ra, áp suất tăng lên nhanh chóng. Hệ thống điều áp mở van để nước từ chân lạnh phun vào bình điều áp, đồng thời điều chỉnh máy sưởi nóng để điều chỉnh áp suất lò. Quá trình điều áp liên tục, cho đến khi nhiệt độ và áp suất chất tải nhiệt dần ổn định.

- Tại 10000 giây, chúng tôi tiếp tục thiết lập hai máy bơm tải nhiệt chính gặp sự cố do mất điện cung cấp từ ngoài nhà lò (ký hiệu số 2 trong hình 1) làm cho lưu lượng nước làm mát bơm vào hệ thống lò suy giảm nhiều. Vì nhiệt độ trong lõi lò còn khá cao nên nước trong lò nóng, dẫn đến áp suất trong lõi lò tăng. Nhìn vào vị trí mực nước trong bình điều áp thể hiện trên màn hình giao diện của chương trình, hệ thống bình điều áp ngay lập tức hạ thấp xuống bằng cách điều chỉnh lưu lượng nước trong bình điều áp để tránh áp suất tăng quá cao trong lò. Nước làm mát thì không bơm vào được, mà nhiệt độ lõi lò vẫn chưa hạ thấp, nên lúc này đã xảy ra hiện tượng nước hóa hơi. Và mực nước trong hệ thống làm lạnh lò hạ xuống nhanh chóng. Thanh nhiên liệu và vỏ bọc nhiên liệu bắt đầu lộ ra ngoài bề mặt nước. Nhiệt độ của vỏ bọc nhiên liệu vượt quá 1200°C , gây ra phản ứng giữa Zircaloy và hơi nước trong lõi lò. Phản ứng oxi hóa này tạo ra khí H_2 ngày càng nhiều. Điều này đã được chúng tôi ghi nhận từ bảng số liệu chạy trong chương trình.

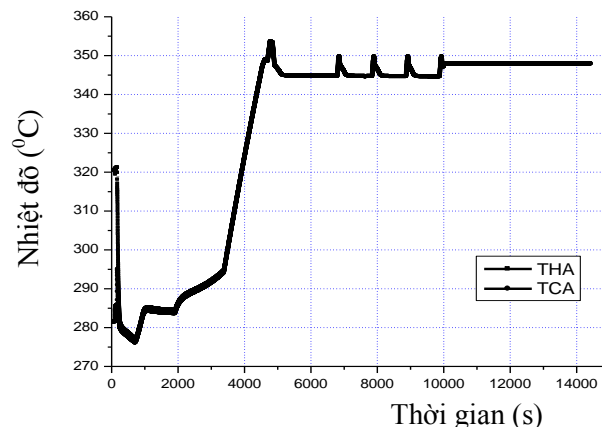
Áp suất vẫn tăng trong lò. Vì để đảm bảo an toàn, tránh nổ lò nên hệ thống van cứu trợ và van an toàn của bình điều áp được mở ra nhằm giảm bớt áp suất trong lò. Tuy nhiên, việc xả khí ra ngoài đã làm cho khí H_2 phản ứng với O_2 ở trong không khí gây nổ tại thời điểm 13545 giây và 13716 giây.

IV. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

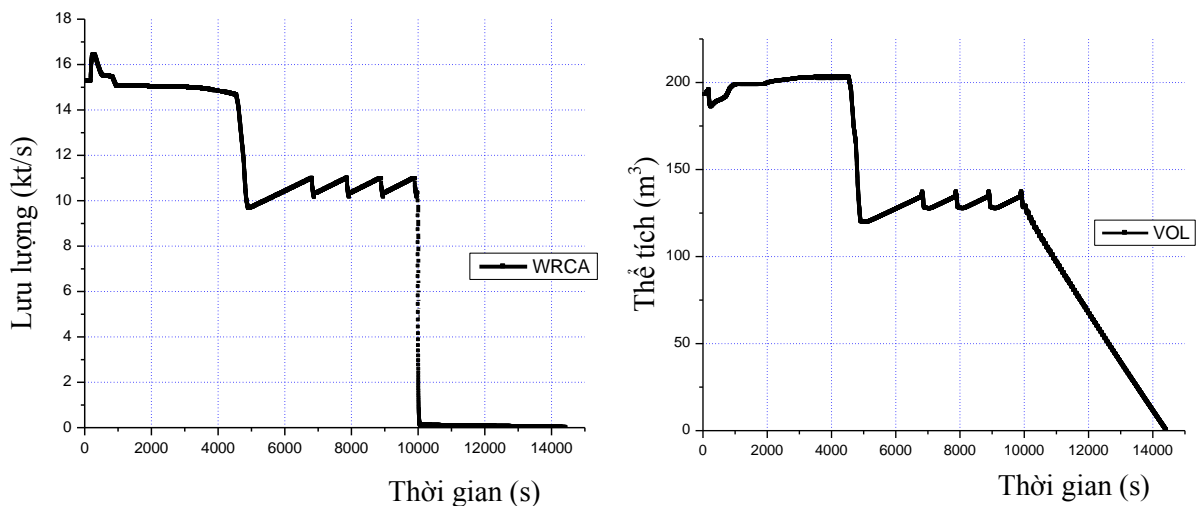
Để đánh giá một các định lượng cụ thể hơn về sự cố, các số liệu về các tham số vật lý lò được ghi nhận. Các số liệu vật lý được đánh giá gồm: lưu lượng và áp suất của bình sinh hơi, nhiệt độ của chân nóng và chân lạnh, lưu lượng dòng chảy vào làm mát lò, thể tích chất lỏng trong hệ thống làm lạnh lò, thông lượng neutron sinh ra trong lõi lò, nhiệt độ của nhiên liệu và vỏ bọc nhiên liệu, khối lượng khí H₂ sinh ra, và hoạt độ của các đồng vị trong hệ thống sơ cấp. Đây là các số liệu vật lý quan trọng mà khi tan nạn xảy ra, các nhà điều hành điều quan tâm các các tham số này.



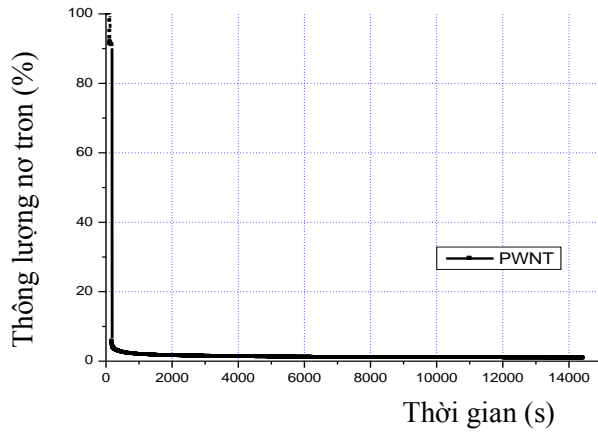
Hình 2: Lưu lượng nước bơm vào bình sinh hơi A (WFWA) và áp suất của bình sinh hơi A (PSGA).



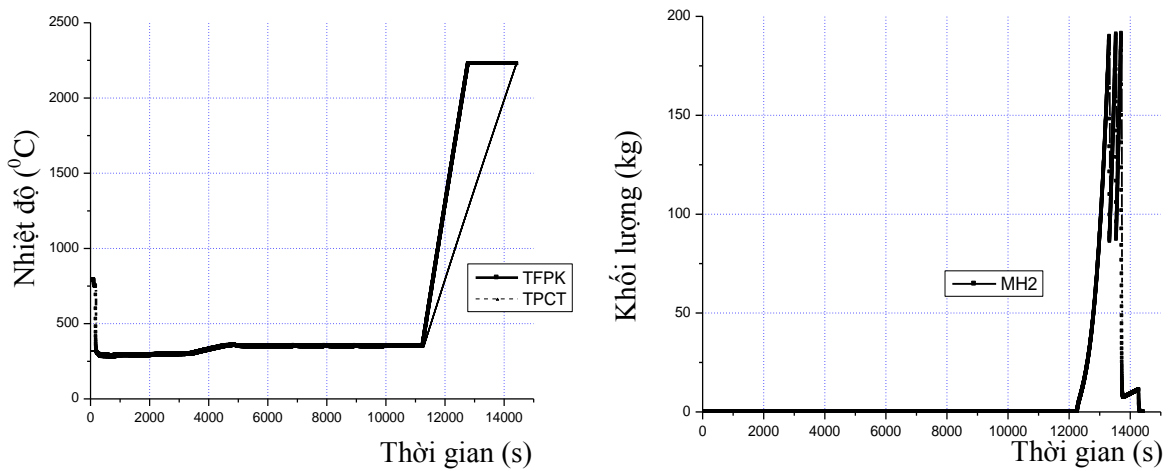
Hình 3: Nhiệt độ của chân nóng A (THA) và nhiệt độ chân lạnh A (TCA).



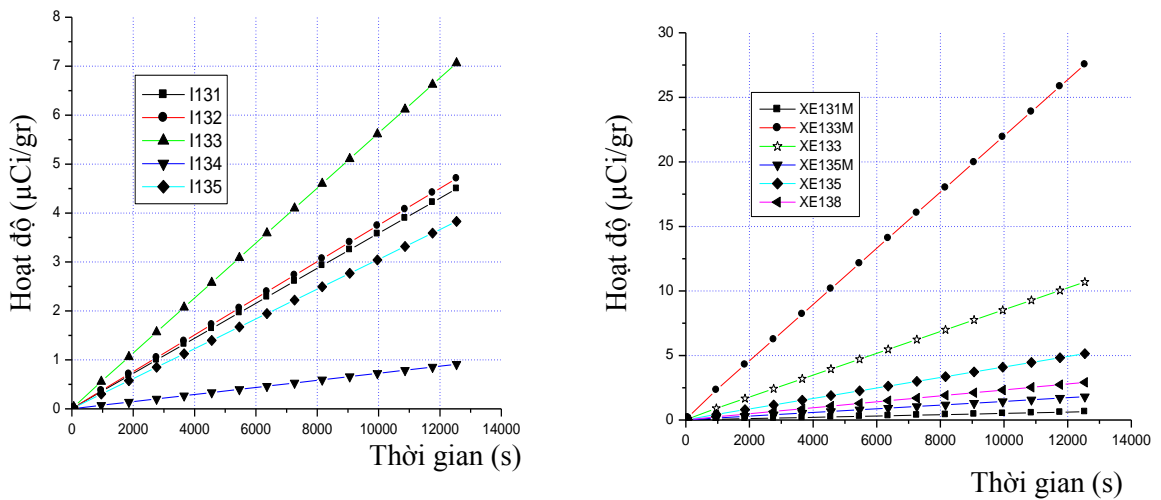
Hình 4: Lưu lượng dòng chảy làm mát lò qua vòng A (WRCA) và thể tích chất lỏng trong hệ thống làm lạnh lò (VOL).



Hình 5: Thông lượng neutron sinh ra (PWNT).



Hình 6: Nhiệt độ cao nhất của nhiên liệu (TFPK) và nhiệt độ cao nhất của vỏ bọc nhiên liệu (TPCT) và khối lượng khí H₂ sinh ra từ phản ứng Zr-H₂O (MH2).



Hình 7: Hoạt độ của các đồng vị I-ốt và Xenon sinh ra trong hệ thống sơ cấp.

Hình 2 là kết quả về lưu lượng nước bơm vào và áp suất của bình sinh hơi A. Hình vẽ cho thấy lưu lượng nước bơm vào giảm dần cho đến khi không còn bơm vào nữa, cùng lúc đó áp suất của bình sinh hơi tăng nhanh khi máy bơm phụ bơm vào và ổn định khi van cung cấp nước bị khóa.

Hình 3 thể hiện nhiệt độ chân nóng và chân lạnh A khi sự cố xảy ra. Vì nước làm mát không còn bơm vào trong vùng hoạt do máy bơm RCP bị tắt, đã làm cho nhiệt độ ở chân lạnh tăng nhanh và bằng với nhiệt độ chân nóng A.

Hình 4 cho thấy việc tắt máy bơm RCP khiến nước bơm vào lõi lò giảm một cách nhanh chóng. Nhiệt sinh ra từ trong vùng hoạt càng làm cho thể tích nước giảm do bay hơi.

Trên hình 5, thời điểm 185,5 giây hiện tượng đập lò xuất hiện. Thanh điều khiển rơi vào vùng hoạt đã hấp thụ phần lớn neutron sinh ra trong lò. Vì thế đường biểu diễn thông lượng giảm dần gần về 0.

Hình 6 cho thấy nhiên liệu khi không còn ngập trong nước đã khiến nhiệt độ của nhiên liệu và vỏ bọc tăng cao. Và vỏ bọc nóng chảy kết hợp với hơi nước đã sản sinh ra khí H_2 .

Sự cố máy bơm tải nhiệt chính bị hỏng đã làm cho nhiệt độ trong lõi lò tăng nhanh. Chính việc nóng chảy của vỏ bọc nhiên liệu - có tác dụng giữ các chất phóng xạ không thoát ra ngoài- đã làm cho hàm lượng của I-ốt, Xenon thoát ra ngoài và tăng nhanh chóng trong lõi lò. Hình 7 biểu diễn hoạt độ phóng xạ của các đồng vị I-ốt, Xenon thoát ra.

V. KẾT LUẬN

Chúng tôi thực hiện khảo sát tại nạn hệ thống máy bơm nước cấp chính cho bình sinh hơi của lò phản ứng PWR gặp sự cố. Chúng tôi khảo sát thông qua 4 giai đoạn: (1)- từ giây đầu đến 120 giây, lò hoạt động bình thường, (2)- sau 120 hệ thống máy bơm nước cấp chính ngưng hoạt động do sửa chữa, (3)- sau 720 hai van cung cấp nước trở lại bình sinh hơi bị khóa do nhân viên nhà lò không kịp mở bằng tay khi hệ thống điều khiển tự động bị ngắt , và (4)- sau 10000 giây máy bơm tải nhiệt chính RCP bị tắt do mất điện. Chúng tôi khảo sát độ đáp ứng của lò và các thông số vật lý lò như nhiệt độ, áp suất, mực nước, thông lượng neutron, các đồng vị phóng xạ sinh ra được khảo sát. Kết quả cho thấy có sự thay đổi rất lớn về các tham số này. Việc mất nước làm mát lò từ việc máy bơm tải nhiệt chính bị tắt cho thấy tầm quan trọng của nước làm mát.

Điều này đã được minh chứng trong các tai nạn đã từng xảy ra trên thế giới như: tai nạn ở nhà máy Chernobyl (26.04.1986 tại Mỹ), tai nạn ở nhà máy Fukushima Daiichi (11.03.2011 tại Nhật Bản).

Các kết quả đạt được cũng như việc sử dụng phần mềm mô phỏng PCTTRAN về các tai nạn trong nhà máy điện hạt nhân đang được nghiên cứu và đưa vào giảng dạy tại trường đại học Khoa học Tự nhiên – TpHCM.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Personal Computer Transient Analyzer For a Two- loop PWR For IAEA Workshop on NPP Simulators for Education Bucharest, Romania, 3- 7 July 2006 By Micro- Simulation Technology.

[2] IAEA Collection of PC- Based Simulators for Education, [online]: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Technology/Training/Simulators/>