

RESEARCHING ON BASIC THERMALHYDRAULICS PARAMETERS OF FIXED BED NUCLEAR REACTOR

DINH VAN THIN, LE THI PHUONG ANH, NGUYEN THI HAI LY

Faculty of Nuclear Engineering, Electric Power University

thindv@epu.edu.vn.

Abstract: This paper will present the thermalhydraulics parameters of FBNR small reactor by Computational Fluid Dynamics (CFD) method. FBNR is a type of spherical fuel reactor, operated by a large capacity pump to bring fuel pellets from the storage chamber to the active core to achieve a critical state. This mechanism helps the reactor have a very high passive safety. However, this mechanism also makes analytical calculation methods difficult to research thermal processes in the active core. In the paper, the authors used the CFD method to analyze the basic thermalhydraulics parameters of FBNR using TRISO fuel elements such as temperature of spherical fuels, and temperature, pressure and velocity of the coolant. The results are highly accurate and intuitive, helping us to better understand the processes of heat generation, thermal conductivity and heat exchange of spherical fuel pellets.

Keywords: FBNR, TRISO, CFD, ThermalHydraulics.

NGHIÊN CỨU CÁC THÔNG SỐ THỦY NHIỆT CƠ BẢN CỦA Lò PHẢN ỨNG CÔNG SUẤT NHỎ FBNR

ĐINH VĂN THÌN*, LÊ THỊ PHƯƠNG ANH, NGUYỄN THỊ HẢI LÝ

Khoa Kỹ thuật Hạt nhân, Trường Đại học Điện lực.

số 235, Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm, Hà Nội.

thindv@epu.edu.vn.

Tóm tắt: Báo cáo này sẽ trình bày về các thông số thủy nhiệt của lò phản ứng công suất nhỏ FBNR bằng phương pháp tính toán động lực học chất lưu (CFD). FBNR là loại lò sử dụng nhiên liệu hình cầu, hoạt động nhờ một bơm công suất lớn nhằm đưa các viên nhiên liệu từ buồng chứa đến vùng hoạt để đạt được trạng thái tới hạn. Cơ chế hoạt động này giúp cho lò phản ứng có độ an toàn thụ động rất cao. Tuy nhiên, cơ chế này cũng khiến cho các phương pháp tính toán giải tích gặp khó khăn khi nghiên cứu các quá trình nhiệt trong vùng hoạt. Trong báo cáo, nhóm tác giả đã sử dụng phương pháp CFD để phân tích các thông số thủy nhiệt cơ bản của FBNR như nhiệt độ viên nhiên liệu, nhiệt độ, áp suất và vận tốc của nước tải nhiệt. Các kết quả thu được có độ chính xác cao và trực quan, giúp cho chúng ta hiểu rõ ràng hơn các quá trình sinh nhiệt, dẫn nhiệt và trao đổi nhiệt của các viên nhiên liệu hình cầu.

Từ khóa: FBNR, TRISO, CFD, Thủy nhiệt lò phản ứng hạt nhân.

1. MỞ ĐẦU

Trong những năm gần đây, các nghiên cứu về lò phản ứng công suất nhỏ đang được triển khai tại nhiều nước dưới sự hỗ trợ từ Cơ quan Năng lượng Nguyên tử Quốc tế (IAEA). Nhóm nghiên cứu tại Trường Đại học Điện lực cũng tham gia cùng với các nhóm nghiên cứu khác tại Brazil và Thổ Nhĩ Kỳ để nghiên cứu về lò phản ứng công suất nhỏ không phải thay thế nhiên liệu tại chỗ (FBNR). Hiện nay, các nghiên cứu đang được triển khai đến giai đoạn nghiên cứu khái niệm và đã có nhiều bài báo về các thông số vật lý của FBNR được đăng trên các tạp chí khoa học quốc tế có uy tín. Giai đoạn tiếp theo là cần phải nghiên cứu về động học của lò FBNR, trong đó các vấn đề về thủy nhiệt đóng vai trò quan trọng. Các nghiên cứu này sẽ cho thấy lý do tại sao lò FBNR lại có độ an toàn thụ động rất cao và an toàn trong quá trình hoạt động.

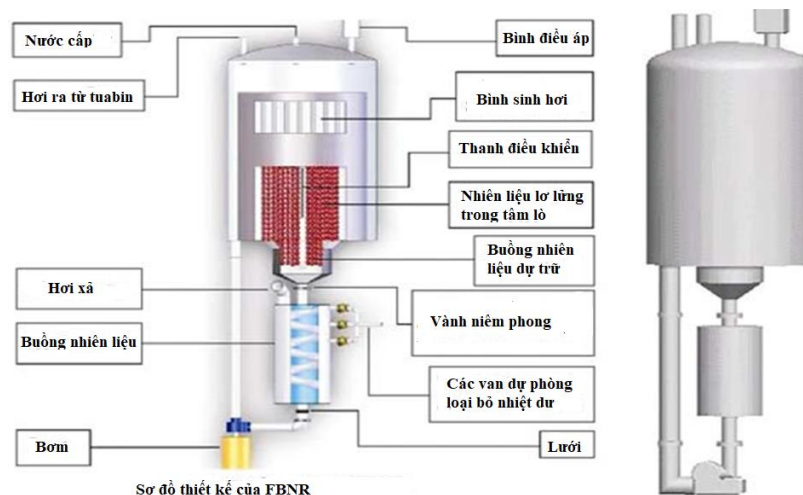
Nội dung của nghiên cứu này cũng góp phần vào việc đào tạo nguồn nhân lực, giúp cho các nhà khoa học trẻ và sinh viên ngành kỹ thuật hạt nhân tại Trường Đại học Điện lực có cơ hội học hỏi, nâng cao năng lực chuyên môn, góp phần vào sự phát triển chung của ngành hạt nhân trong nước.

2. NỘI DUNG

2.1. Đối tượng và Phương pháp

Lò phản ứng công suất nhỏ FBNR là lò phản nước nhẹ có công suất và kích thước nhỏ (218MWt - 70MWe). Đặc trưng của lò là có thiết kế đơn giản, an toàn thụ động, chịu được ăn mòn hóa học và va đập mạnh. Một điểm hoàn toàn khác biệt của lò phản ứng công suất nhỏ là có viên nhiên liệu hình cầu [1].

Lò phản ứng gồm ba phần riêng biệt: tâm lò ở giữa, bình sinh hơi phía trên và buồng nhiên liệu phía dưới. Thùng lò hình trụ có đường kính 2.14m, cao 6m, và dày 15mm. Bên trong thùng lò chứa bình sinh hơi và tâm lò, với vùng hoạt hình trụ đường kính 1.7m và cao 2m. Trong quá trình vận hành lò phản ứng các viên nhiên liệu hình cầu được giữ lại bởi chất tải nhiệt tạo nên tâm lò lơ lửng. Chất tải nhiệt chảy dọc lên ống dẫn bên trong và đi qua các viên nhiên liệu, và đi thẳng lên bình sinh hơi. Buồng nhiên liệu dự trữ phía dưới là ống có đường kính 60cm, được làm từ hợp kim hấp thụ hấp thụ neutron cao, được nối trực tiếp bên dưới vùng tâm lò.



Hình 1: Sơ đồ của lò phản ứng FBNR.

Bơm tuần hoàn đẩy chất tải nhiệt đi với tốc độ dòng là 220 kg/s, tương ứng với vận tốc 1.5 m/s trong buồng chứa nhiên liệu dự trữ, mang các viên nhiên liệu đi lên vùng tâm lò và tạo thành dạng ổn định. Tại vận tốc khi đang vận hành ổn định là 7.23 m/s tương ứng với tốc độ dòng khối 1060 kg/s, các viên nhiên liệu được giữ chặt với nhau bởi áp suất 0.188 bar gây ra áp lực gấp 27.1 lần trọng lượng của chúng. Chất tải nhiệt chảy qua vùng tâm lò, sau đó hấp thụ nhiệt từ viên nhiên liệu và chuyển tới bình sinh hơi phía trên. Sau đó chất tải nhiệt quay trở lại bơm và cứ thế tạo thành vòng tuần hoàn khép kín. Khi có bất cứ hoạt động không bình thường nào của lò phản ứng, điện sẽ ngắt khỏi máy bơm và chất tải nhiệt sẽ ngừng lưu thông, các viên nhiên liệu sẽ rơi khỏi tâm lò theo lực hấp dẫn và được làm mát thụ động trong buồng chứa nhiên liệu.

Viên nhiên liệu hạt nhân TRISO: Viên nhiên liệu hình cầu có đường kính là 15 mm được bao bọc trong một lớp chất nền SiC và một lớp thép không gỉ có bề dày là 0.5mm. Viên TRISO có thành phần cấu tạo là 60% là nhiên liệu UO_2 và 40% là chất nền SiC. Các nhân UO_2 nhỏ có đường kính là 0.5mm được bọc bởi một lớp vỏ Carbon dày 0.1mm. Lớp vỏ các bon này có nhiệm vụ chính là lưu giữ các sản phẩm phân hạch tại trạng thái có nhiệt độ cao.

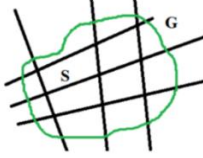
Mật độ của UO_2 , Carbon và SiC lần lượt là 10.97 g/cm^3 , 1.0 g/cm^3 , và 3.2 g/cm^3 . Lớp vỏ thép không gỉ có mật độ là 8.03 g/cm^3 được cấu tạo từ 70% Fe, 19% Cr, và 11% Ni.

Bảng 1: Các thông số kỹ thuật của lò phản ứng FBNR

Đại lượng	Giá trị	Đại lượng	Giá trị
Công suất nhiệt	218 MWt	Đường kính ngoài của viên nhiên liệu	15 mm
Công suất điện	70 MWe	Số viên nhiên liệu trong lò	1,62 triệu
Chất làm mát sơ cấp	Nước nhẹ	Độ giàu nhiên liệu	5%
Chất làm chậm	Nước nhẹ	Chu trình nhiên liệu	25 tháng
Chu trình nhiệt động	Rankine	Độ cháy trung bình nhiên liệu	15.3 MWd/kg
Chiều cao vùng hoạt	2 m	Tốc độ chất tải nhiệt sơ cấp	1060 kg/s
Đường kính lò	1,7m	Áp suất lò đang vận hành	16 Mpa
Mật độ công suất trung bình	45 MW/m^3	Nhiệt độ lõi vào	290°C
Nhiên liệu	TRISO	Nhiệt độ lõi ra	326°C

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng phương pháp CFD để tính toán các quá trình sinh nhiệt trong viên nhiên liệu, dẫn nhiệt từ viên nhiên liệu ra nước và quá trình dòng chảy rối của nước, cùng với độ sụt áp suất khi nước đi qua vùng hoạt. CFD dựa trên những lý thuyết vật lý như định luật bảo toàn khối lượng, định luật bảo toàn năng lượng, định luật bảo toàn động lượng để xây dựng nên một hệ gồm những phương trình đạo hàm riêng chi phối sự vận chuyển của dòng chất lưu và sự trao đổi nhiệt. Hệ những phương trình này thường được nhắc đến với tên hệ phương trình Navier-Stocks. Sau đó những công cụ toán số như phương pháp thể tích hữu hạn (FVM), phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) sẽ được áp dụng cho việc tìm ra những tính chất chi phối dòng chảy như vận tốc, áp suất, tốc độ dòng chảy hoặc tốc độ dòng nhiệt [1].

Phương pháp thể tích hữu hạn có thể hiểu đơn giản thể tích hữu hạn là một đơn vị thể tích không gian không lớn quá, cũng không nhỏ quá. Ví dụ như trong vật lý khi khoanh vùng vật chất để xét, ta chọn một vùng vừa phải để nó đủ nhỏ, để có thể xem tính chất của các hạt nằm trong phạm vi đang xét gần gần nhau. Trong miền tính toán, ta chọn một thể tích hữu hạn V được bao bởi mặt kín S . Trong trường hợp một chiều (hai chiều nếu tính cả chiều thời gian) thì thể tích V được thay bằng miền D và mặt S được hiểu là biên G của miền D . Thể tích hữu hạn và mặt bao của nó được gọi là thể tích kiểm soát và mặt kiểm soát. Lấy tích phân phương trình định luật bảo toàn khối lượng ta được phương trình định luật bảo toàn khối lượng dạng tích phân:

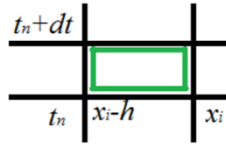


$$\iiint_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} \right) dx dt = 0 \quad (1)$$

Theo công thức Green ta có:

$$\iiint_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} \right) dx dt = \iint_G \rho dx - \rho u dt = 0 \quad (2)$$

Có nhiều cách khác nhau để chọn thể tích kiểm soát, trong trường hợp đơn giản nhất mặt kiểm soát sẽ chọn trùng với các mặt của ô lưới tính toán. Trong trường hợp bên dưới công thức tích phân ở công thức trên được viết lại như sau:

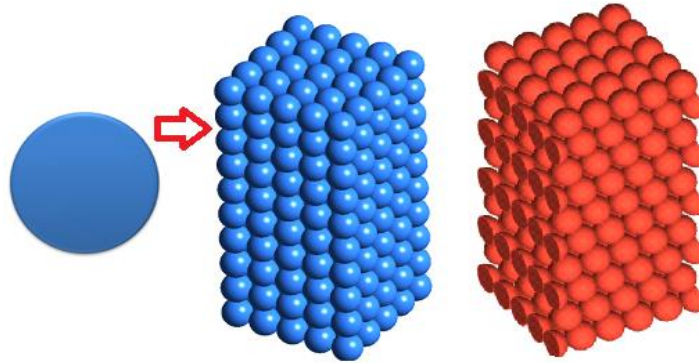


$$\oint_G \rho dx - \rho u dt = \int_{x_i-h}^{x_i} \rho(x, t_x) dx - \int_{x_i-h}^{x_i} \rho(x, t_x + t) dx + \int_{t_n}^{t_n+dt} \rho(x_i, t) dt - \int_{t_n}^{t_n+dt} \rho u(x_i - h, t) dt = 0 \quad (3)$$

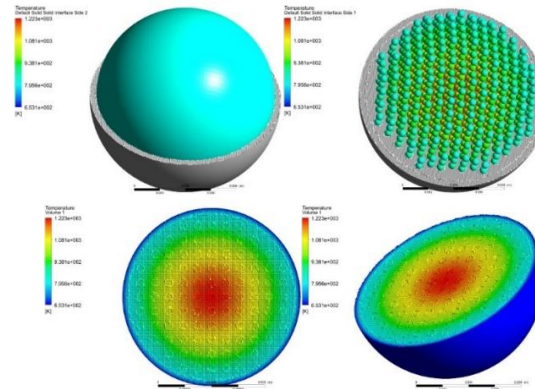
Đây là một ví dụ trong việc khai triển phương trình bảo toàn động lượng trong phương pháp thể tích hữu hạn. Các phương trình khác cũng được áp dụng tương tự để tiến hành các tính toán theo yêu cầu.

2. 2. Kết quả

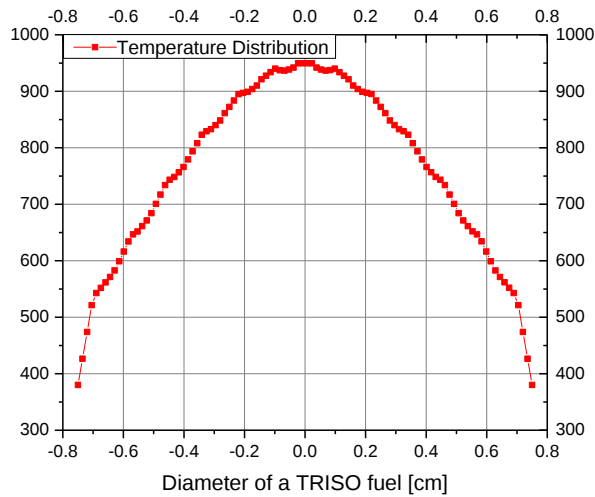
Sau khi tiến hành xây dựng mô hình chính xác của viên nhiên liệu bằng chương trình ANSYS ICEM CFD, thì toàn bộ mô hình sẽ được nhập vào chương trình ANSYS CFX để tiến hành các bước thiết lập thông số tính toán và phân tích. Các kết quả thu được từ phân tích cho độ chính xác cao, bao quát hết các quá trình nhiệt của lò FBNR trong không gian 3 chiều [1,2].



Hình 2: Xây dựng mô hình 3 chiều của nhiên liệu



Hình 3. Phân bố nhiệt độ trong viên nhiên liệu hình cầu TRISO.

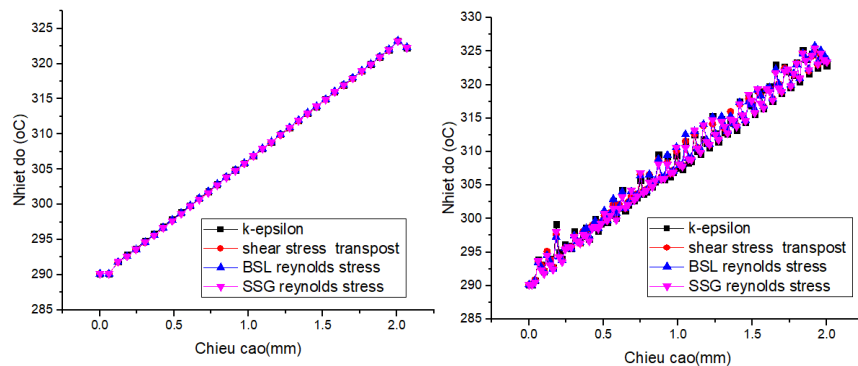


Hình 4. Phân bố nhiệt độ theo bán kính của viên nhiên liệu.

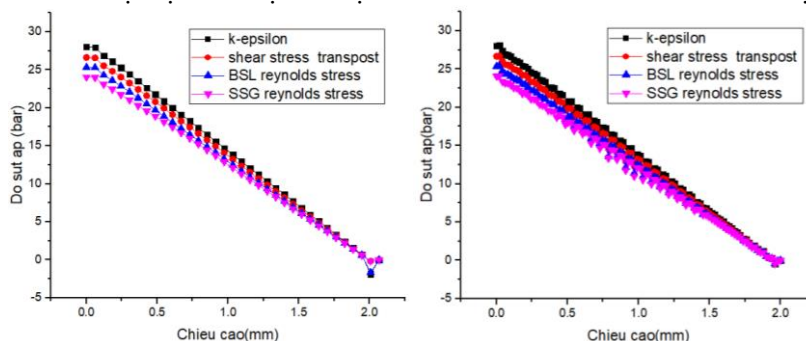
Từ kết quả thu được, chúng ta nhận được giá trị nhiệt độ nhỏ nhất của nhiên liệu UO_2 là 541.68°C , nhiệt độ lớn nhất là 950.11°C và nhiệt độ trung bình là 698.90°C . Tương tự đối với lớp chất nền SiC , giá trị nhiệt độ nhỏ nhất là 533.60°C , nhiệt độ lớn nhất là 945.73°C và nhiệt độ trung bình là 663.73°C . Cuối cùng là lớp vỏ ngoài thép không gỉ, giá trị nhiệt độ nhỏ nhất là 380.14°C , nhiệt độ lớn nhất là 645.70°C và nhiệt độ trung bình là 456.31°C .

Khi các viên nhiên liệu được sắp xếp cố định trong vùng tâm lò và đạt được trạng thái hoạt động ổn định, nhóm tác giả đã tiến hành phân tích với các điều kiện công suất nhiệt khác nhau.

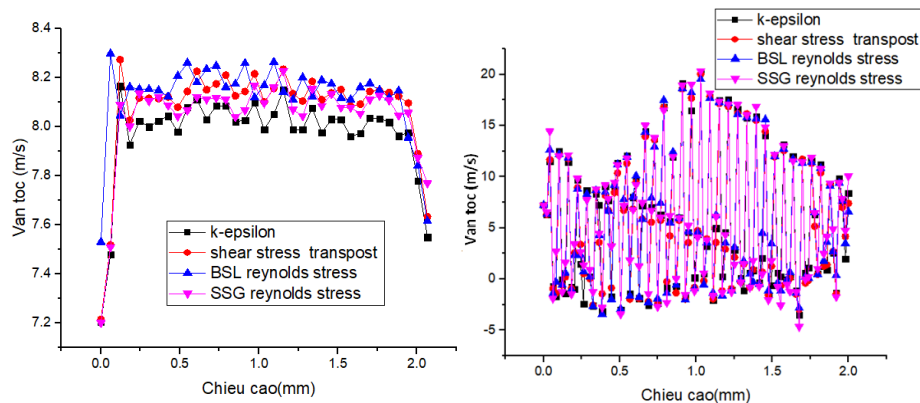
Khi thông lượng nhiệt có giá trị là $q''=3.06 \text{ (MW/m}^2\text{)}$, phân bố nhiệt độ, độ sụt áp và tốc độ dòng chảy dọc theo mặt cắt và theo kênh tải nhiệt khi sử dụng các mô hình chảy rối khác nhau như sau:



Hình 5: Nhiệt độ theo mặt cắt dọc theo chiều cao và theo kênh tải nhiệt.



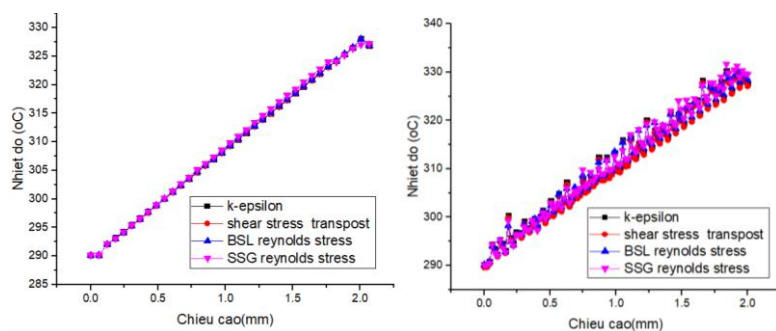
Hình 6: Độ sụt áp suất của các mặt cắt dọc theo chiều cao và theo kênh tải nhiệt.



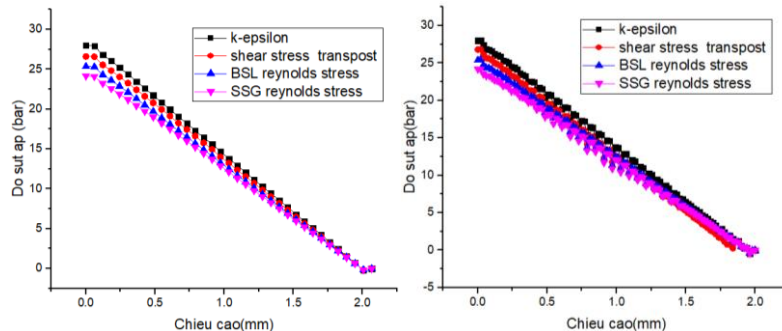
Hình 7: Tốc độ dòng chảy tại mặt cắt dọc theo chiều cao và theo kênh tải nhiệt.

Khi các viên nhiên liệu sắp xếp so le trong vùng tâm lò, kênh tải nhiệt không được phân tách rõ ràng và điều này làm cho việc di chuyển của nước vô cùng phức tạp, đồng thời quá trình tải nhiệt kém hiệu quả hơn. Do vậy khi $q''=3.06$ (MW/m²) là không đáp ứng đủ điều kiện để nước lõi ra có thể đạt 325°C. điều này bắt buộc chúng ta phải vận hành lò với công suất nhiệt cao hơn.

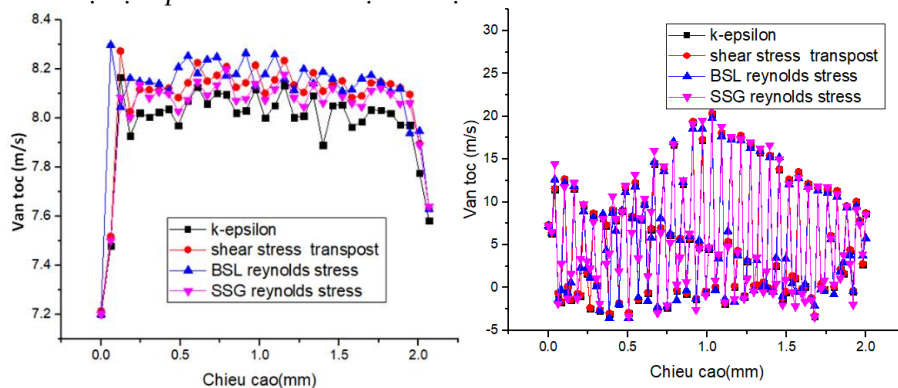
Khi thông lượng nhiệt có giá trị là $q''=3.5$ (MW/m²), phân bố nhiệt độ, độ sụt áp và tốc độ dòng chảy dọc theo mặt cắt và theo kênh tải nhiệt khi sử dụng các mô hình chảy rối khác nhau như sau:



Hình 8: Phân bố nhiệt độ theo mặt cắt dọc theo chiều cao và theo kênh tải nhiệt.



Hình 9: Độ sụt áp suất của các mặt cắt dọc theo chiều cao và theo kênh tải nhiệt.



Hình 10: Tốc độ dòng chảy tại mặt cắt dọc theo chiều cao và theo kênh tải nhiệt.

Khi tăng thông lượng nhiệt của một viên nhiên liệu là $q''=3.5$ (MW/m²) thì nhiệt độ lõi ra đạt 325°C và nhiệt độ cao nhất tại bề mặt viên có thể đạt được là 415°C. Áp suất giảm với độ giảm áp suất trung bình là $\Delta P = 26.01$ (bar).

3. KẾT LUẬN

Từ những kết quả thu được, nhóm tác giả có đưa ra một số nhận xét như sau: Phương pháp CFD là phương pháp tiên tiến, phù hợp với phân tích thủy nhiệt trong lĩnh vực lò phản ứng hạt nhân nói chung và lò FBNR nói riêng. Kết quả nhận được từ phương pháp này rất trực quan và có độ chính xác cao; Các giá trị về nhiệt độ, độ sụt áp và vận tốc dòng chảy của nhiên liệu và chất tải nhiệt trong lò FBNR trong các điều kiện vận hành rất phù hợp với các giới hạn về an toàn. Ngay cả khi tính toán trong điều kiện vận hành với công suất lớn hơn thì các thông số vẫn đảm bảo dưới mức nóng chảy của các thành phần vật liệu, cũng như an toàn về ứng suất khi xét đến độ sụt áp toàn lò.

Từ kết quả trên, nhóm nghiên cứu khẳng định lò phản ứng FBNR đạt độ an toàn cao trong các điều kiện vận hành bình thường và kể cả khi xảy ra sự cố cơ bản nằm trong thiết kế.

Trong thời gian tới, nhóm nghiên cứu sẽ tiếp tục tính toán cho các điều kiện vận hành và khi xảy ra các sự cố bất ngờ để xem liệu rằng các đại lượng đặc trưng của lò FBNR có bị vượt quá giới hạn an toàn hay không. Nhóm tác giả hi vọng rằng những kết quả thu được từ nghiên cứu sẽ góp phần mang đến cho công chúng cái nhìn khách quan hơn về an toàn của lò phản ứng FBNR nói riêng và điện hạt nhân nói chung tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] ANSYS CFX-Solver Modeling Guide
- [2] Lê Thị Phương Anh, “*Mô phỏng các thông số thủy nhiệt của lò phản ứng công suất nhỏ sử dụng nhiên liệu TRISO*”, Đồ án tốt nghiệp đại học năm 2018.
- [3] Farhang Sefidvash, “Water Cooled FBNR Nuclear Reactor”, IAEA-CN-164-5S05.