 DOI: 10.31276/VJST.65(8).40-44

Tính toán sơ bộ thủy nhiệt lò phản ứng mô đun nhỏ dựa trên công nghệ lò phản ứng ACPR50S

Cao Đình Hưng*, Lê Trần Chung, Nguyễn Thị Thanh Thủy, Phạm Tuấn Nam

Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân, 179 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 13/6/2022; ngày chuyển phản biện 15/6/2022; ngày nhận phản biện 11/7/2022; ngày chấp nhận đăng 13/7/2022

Tóm tắt:

Bài báo trình bày các kết quả tính toán sơ bộ về thủy nhiệt cho lò phản ứng mô đun nhỏ (SMR - Small modular reactor) với công suất nhiệt 200 MW dựa trên công nghệ lò phản ứng ACPR50S (Advanced customer-friendly practicable reliable 50 MWe compact SMR). Các thông số cơ bản và an toàn thủy nhiệt được đánh giá bao gồm lưu lượng chất tải nhiệt qua vùng hoạt, nhiệt độ nhiên liệu và vỏ bọc nhằm đảm bảo khả năng vận hành của lò phản ứng trong điều kiện giới hạn an toàn. Cấu hình SMR được mô phỏng bằng chương trình RELAP5 và thực hiện tính toán trong khoảng 500 giây ở trạng thái dừng. Nhiệt độ của chất tải nhiệt dọc theo chiều cao của vùng hoạt tại lối vào và lối ra có độ lệch nhỏ (1,7%) so với giá trị tham khảo. Về khía cạnh an toàn, tỷ số thông lượng nhiệt tại điểm khởi phát sôi nhân (DNBR - Departure from nucleate boiling ratio) cũng được ước lượng dọc theo kênh nhiên liệu trung bình và kênh nóng nhất trong vùng hoạt ở trạng thái hoạt động ổn định. Kết quả từ nghiên cứu này sẽ được tiếp tục sử dụng cho tính toán chuyển tiếp và phân tích sự cố cho SMR.

Từ khóa: **chương trình RELAP5, lò phản ứng mô đun nhỏ (SMR), số Nusselt, tỷ số thông lượng nhiệt tại điểm khởi phát sôi nhân (DNBR).**

Chỉ số phân loại: **2.2**

1. Mở đầu

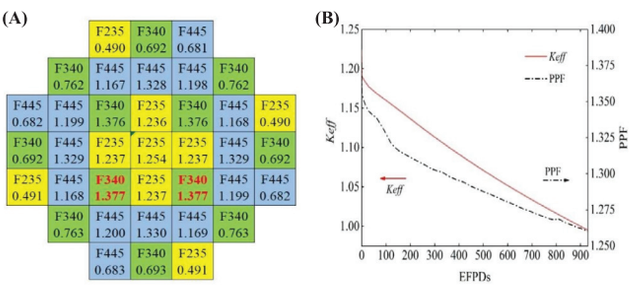
Theo quy định của Cơ quan Năng lượng nguyên tử quốc tế (IAEA) [1, 2] những lò phản ứng hạt nhân có công suất nhỏ hơn 300 MWe được phân loại là SMR. Từ đầu thế kỷ XXI, việc phát triển và ứng dụng các SMR đã nhận được sự quan tâm rất lớn của các quốc gia do chúng có các ưu điểm như: độ an toàn, tính kinh tế và tính linh hoạt trong sử dụng. Các nước phát triển và hầu hết các công ty công nghệ năng lượng hạt nhân đang tích cực phát triển các SMR song song với phát triển các lò phản ứng công suất thế hệ mới, ví dụ như KLT-40S (Nga) [3], ACPR100, ACPR50S (Trung Quốc) [2, 4].

Với mục đích nâng cao năng lực nghiên cứu trong tính toán thủy nhiệt cho SMR, nhóm tác giả sử dụng các thông số của ACPR50S [2, 4-6] và tiến hành tính toán một số thông số thủy nhiệt của vùng hoạt lò phản ứng.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình tính toán trong trạng thái tĩnh

Các thông số thiết kế chủ yếu dựa vào các thông số đặc trưng loại lò phản ứng ACPR50S của Trung Quốc đã được công bố. Các tính toán vật lý (hình 1) về phân bố đỉnh công suất (PPF - Power picking factor) và hệ số nhân hiệu dụng (k_{eff}) đã được thực hiện trong nghiên cứu của T.V. Phu và cs (2020) [5], nghiên cứu này tiến hành tính toán các thông số thủy nhiệt của vùng hoạt SMR dựa trên các thông số của ACPR50S. Từ đó, có những đánh giá sơ bộ về an toàn và mức độ tin cậy của thiết kế loại SMR này, các thông số đặc trưng được đưa ra ở bảng 1.



Hình 1. Phân bố đỉnh công suất (A) và giá trị k_{eff} và PPF chu kỳ 900 ngày (B).

Bảng 1. Các thông số đặc trưng ban đầu cho SMR [2, 4-7].

Các thông số, đơn vị	Giá trị
Công suất nhiệt (Q_t) [MWt]	200
Mật độ công suất nhiệt (ù) [MWt/m^3]	45,45
Chất làm chậm và làm mát	Nước nhẹ
Áp suất vòng sơ cấp [MPa]	15,5
Nhiệt độ lối ra [°C]	321,8
Nhiệt độ lối vào [°C]	299,3
Chiều cao phần nhiên liệu (h) [m]	2,2
Độ giàu [%wt U235]	4,45; 3,40; 2,35
Số bó nhiên liệu [-]	37
Kiểu bó nhiên liệu [-]	17×17
Số thanh nhiên liệu trong bó [-]	264
Số ống thanh điều khiển [-]	24
Số ống thanh trung tâm [-]	1
Đường kính ngoài thanh nhiên liệu [m]	0,94996x10^{-2}
Đường kính ống dẫn thanh điều khiển [m]	0,86614x10^{-2}
Đường kính ống trung tâm [m]	0,122428x10^{-2}
Kích thước bó nhiên liệu (h_cell) [m]	0,21402

*Tác giả liên hệ: Email: caohung191@gmail.com

Thermal hydraulic preliminary calculations for small modular reactor based on ACPR50S technology

Dinh Hung Cao*, Tran Chung Le, Thi Thanh Thuy Nguyen, Tuan Nam Pham

Institute for Nuclear Science and Technology, 179 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

Received 13 June 2022; revised 11 July 2022; accepted 13 July 2022

Abstract:

This paper presents preliminary thermal-hydraulics calculation results for a small modular reactor (SMR) with a thermal capacity of 200 MW based on the ACPR50S reactor technology (Advanced customer-friendly practicable reliable 50 MWe compact SMR). The basic parameters and thermal-hydraulics safety were assessed, including the heat coolant flow through the core, fuel, and cladding temperatures to ensure the reactor's capability to operate within safe limits. The SMR configuration was simulated using the RELAP5 program and performed the calculation in about 500 seconds in the steady state. The coolant temperature of the heat carrier along the height of the core at the inner and outer was found to be different (1.7%) from the reference value. Regarding safety, the departure from nucleate boiling ratio (DNBR) was also estimated along the average channel and the hottest channel of the core in the steady state. The results from this study will be further used in transient computations and incident analysis for SMRs.

Keywords: **departure from nucleate boiling ratio (DNBR), Nusselt number, RELAP5 program, small modular reactor (SMR).**

Classification number: **2.2**

Từ các thông số ban đầu ở bảng 1, bán kính vùng hoạt $R_{core} = \sqrt{Q_t/(\pi\omega h)} = 0,798$ m [8]. Với các thông số cấu trúc hình học của vùng hoạt, tốc độ dòng chất tải nhiệt qua vùng hoạt được xác định bởi công thức sau:

$$G = \chi x Q_t/(h_{out} - h_{in}) \quad (1)$$

trong đó h_{in}=1334 kJ/kg, h_{out}=1464 kJ/kg, giá trị enthalpy của nước là hàm của áp suất và nhiệt độ lối vào và lối ra vùng hoạt, P_{in}=15,631 MPa, P_{out}=15,5 MPa, thành phần năng lượng chuyển hóa thành năng lượng nhiệt của vùng hoạt lò phản ứng χ=0,9 [9]. Thay các giá trị vào (1), tốc độ dòng chất tải nhiệt qua vùng hoạt là G=1384,61 kg/s, với số bó nhiên liệu là 37, khi đó tốc độ dòng chất tải nhiệt qua một bó G_{FA}=41,96 kg/s. Nhiệt độ trung bình và mật độ trung bình của chất làm mát trong vùng hoạt T_f=310,55°C, $\bar{\rho}$=703,5 kg/m^3, với diện tích ô mạng bó nhiên liệu $f_{FA} = h_{cell}^2 = 5,48 \times 10^{-2}$ m^2. Với các thông số loại bó nhiên liệu 17×17 được đưa ra trong bảng 1, khi đó tính toán được diện tích và tốc độ dòng trung bình của chất tải nhiệt qua một bó nhiên liệu là S_{FA}=3,88x10^{-2} m^2 và $\bar{w}$=1,5226 m/s. Đường kính thủy lực của bó nhiên liệu được xác định bởi công thức sau:

$$d_{H-FA} = 4S_{FA}/P_{FA} \quad (2)$$

trong đó chu vi thủy lực P_{FA}=8,564 m, từ (2) đường kính thủy lực bó nhiên liệu 1,8126×10^{-2} m. Hệ số Reynolds đặc trưng cho chế độ chuyển động cưỡng bức của chất tải nhiệt, Re=2,321.10^5 với hệ số dẫn nhiệt trung bình λ_f=0,5244 W/mK. Hệ số Prandt đặc trưng cho tính chất vật lý của chất tải nhiệt, Pr=0,9656 với hệ số nhớt động lực trung bình μ_f=8,187×10^{-5} Pa.s, nhiệt dung đẳng áp trung bình c_{pf}=6185,5 J/kg.K, và đặc trưng hình học của ô mạng thanh nhiên liệu A=0,0267. Hệ số (chuẩn số) Nusselts (Nu) đặc trưng cho cường độ trao đổi nhiệt giữa chất tải nhiệt và bề mặt ngoài của nhiên liệu, vì đối lưu cưỡng bức nên hệ số Nu được xác định là hàm liên hệ giữa hệ số Pr và Re, khi đó hệ số Nu được xác định theo công thức sau:

$$Nu = Ax\,Re^{0,8}x\,Pr^{0,4} \quad (3)$$

Theo (3), Nu=516,43, khi đó hệ số truyền nhiệt được xác định theo công thức $\alpha = \lambda Nu/d_{H-FA}$, thay các giá trị vừa tính toán được thì α=14942,24 W/mK.

Để đảm bảo khả năng hoạt động của lò phản ứng hạt nhân trong điều kiện hoạt động bình thường, cũng như trong điều kiện xảy ra sự cố thì thông lượng nhiệt tới hạn luôn lớn hơn thông lượng nhiệt bề mặt của nhiên liệu và tỷ số DNB lớn hơn 1,5 [6].

$$DNBR = \frac{q_{cr}}{q_s} > 1,5 \quad (4)$$

Hai giá trị, thông lượng nhiệt tới hạn q_{cr} và thông lượng nhiệt trên bề mặt nhiên liệu q_s được xác định theo (5) và (6) [8].

$$q_s = \chi x \bar{q}_\ell / \pi x d_2 \quad (5)$$

$$q_{cr} = \frac{0,894X^{1/3}}{320 + 90,395H} L\rho' \left[g d_{heat} (g x a')^{1/3} \right]^{1/3} x Pr^{1/3} x Re^{1/5} \quad (6)$$

Từ công thức (5) và (6), các giá trị của tham số được thể hiện trong bảng 2.

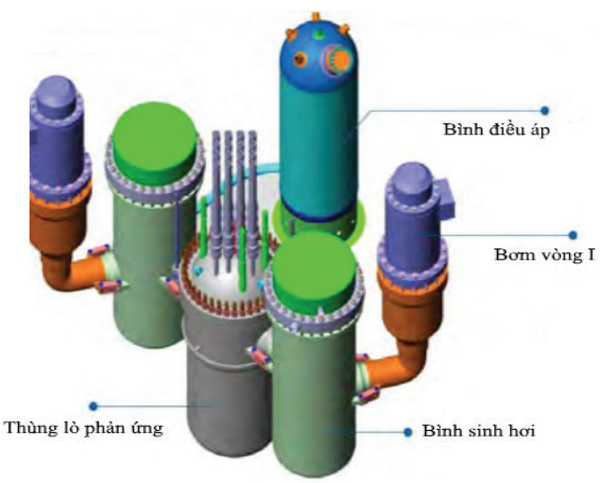
Bảng 2. Các giá trị của tham số trong công thức (5) và (6) [8].

Tham số	Giá trị
Thành phần năng lượng chuyển hóa thành năng lượng nhiệt của vùng hoạt lò phản ứng (χ)	0,9
Công suất nhiệt tuyến tính $\overline{q}_l$ (kW/m)	9,307
Enthalpy tương đối của chất tải nhiệt (x)	-0,239
Hàm lượng hơi tổng (X)	-1,285
Emthalpy trung bình của chất tải nhiệt ($\overline{h}$, kJ/kg)	1399
Emthalpy của nước bão hòa ở áp suất trung bình (h', kJ/kg)	1630
Emthalpy của hơi nước bão hòa ở áp suất trung bình (h'', kJ/kg)	2596
Nhiệt lượng riêng hóa hơi của chất tải nhiệt (L, kJ/kg)	966,4
Gia tốc trọng trường (g, m/s^2)	9,81
Hệ số khuếch tán nhiệt (a', m^2/s)	1,205x10^{-7}

Từ các giá trị trong bảng 2, tính được q_s=280,808 kW/m^2 và q_{cr} =1598,017 kW/m^2, khi đó giá trị DNBR trung bình theo công thức (4) là 5,691.

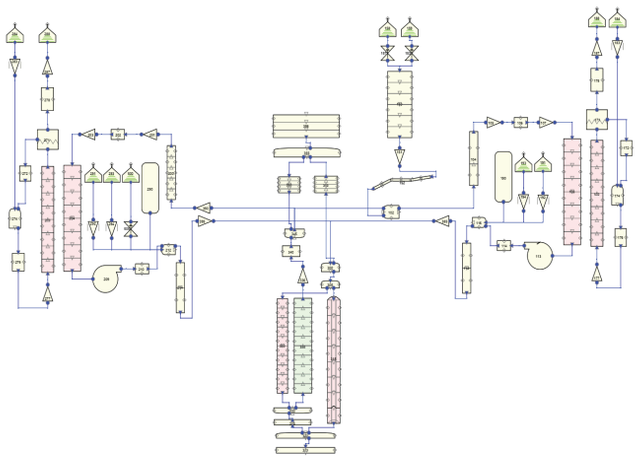
2.2. Mô hình tính toán bằng chương trình RELAP5

Cấu hình SMR được mô phỏng với các thông số đặc trưng đã được tính toán vật lý là dữ liệu điều kiện ban đầu đưa vào tập tin đầu vào của chương trình tính toán thủy nhiệt RELAP5 [7, 10]. Hệ thống thủy nhiệt của vòng sơ cấp và thứ cấp được đưa vào mô hình bao gồm: bơm tuần hoàn chính, thùng lò phản ứng, đường ống, bình sinh hơi, bình điều áp, hệ thống ống trong bình sinh hơi của vòng thứ cấp tương tự như thiết kế của loại ACPR50S.



Hình 2. Cấu trúc hệ thống thủy nhiệt của lò phản ứng ACPR50S [2].

Từ cấu trúc hệ thống thủy nhiệt của ACPR50S, mô hình hệ thống của SMR được thiết lập và sử dụng tính toán bằng chương trình RELAP5. Sơ đồ mô hình hóa bằng RELAP 5 được đưa ra ở hình 3. Trong đó, thùng lò phản ứng được chia thành các thành phần, vùng hoạt lò phản ứng (PIPE 335) khoang dưới thùng lò (BRANCH 322), khoang trên thùng lò (PIPE 356), bypass (PIPE 320), downcommer (PIPE315). Vòng tuần hoàn chính bao gồm các hệ thống: kênh nóng, bình sinh hơi, bơm, kênh lạnh. Các kênh nóng với loại và số hiệu lần lượt là: BRANCH X02, PIPE X04 - Y00, SNGVOL X06 - Y02. Bình sinh hơi PIPE X108 - Y204, bơm tuần hoàn chính PUMP X13 - Y209. Kênh lạnh PIPE X14 - Y10, BRANCH X16 - Y12, PIPE X18 - Y14. Bình tích (Accumulator) gồm có ACCUM X90 - Y90, được nối với BRANCH X16 - Y12 ở kênh lạnh. Bình điều áp được mô tả với loại và số hiệu PIPE 150 được nối với kênh nóng của vòng tuần hoàn I tại BRANCH 102 bằng đường ống PIPE 152. Phía trên bình điều áp là hai van an toàn có số hiệu lần lượt là 153 và 157. Kết quả tính toán mô phỏng bằng chương trình RELAP 5 được so sánh với giá trị tính toán trong phần mô hình toán học như giá trị áp suất vòng sơ cấp, tốc độ dòng chất tải nhiệt qua vùng hoạt, nhiệt độ theo chiều cao vùng hoạt và DNBR (với X và Y tương ứng là vòng tuần hoàn I và vòng tuần hoàn II).

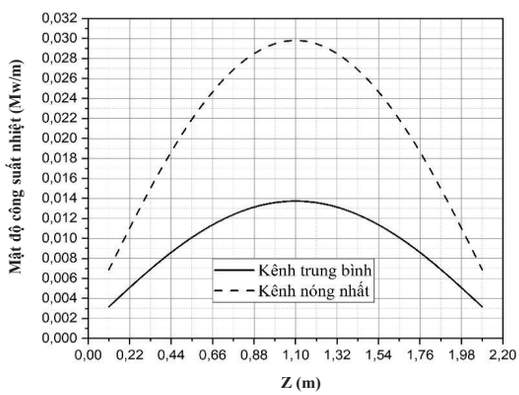


Hình 3. Sơ đồ mô hình hóa mô phỏng SMR bằng RELAP 5.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Mật độ công suất nhiệt theo chiều cao

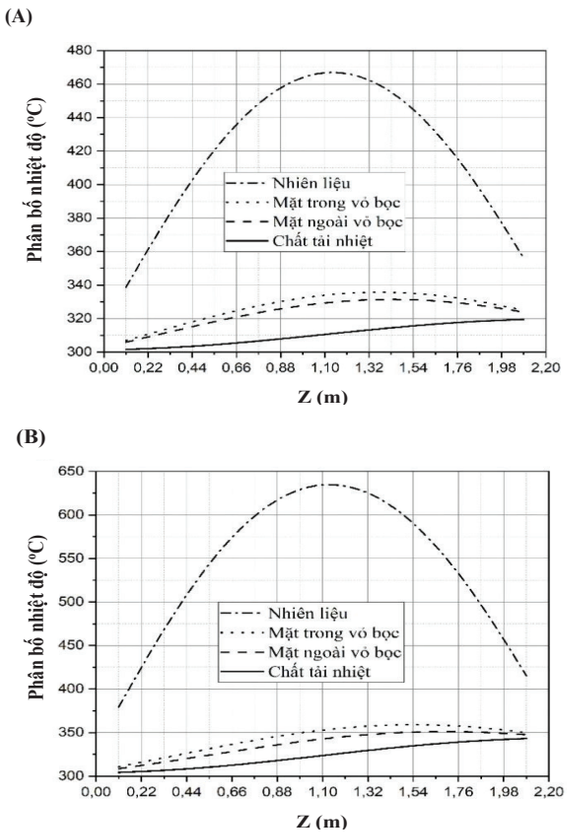
Với chiều cao phần nhiên liệu 2,2 m (bảng 1), dựa trên tính toán vật lý phân bố mật độ công suất nhiệt theo chiều cao và sau đó làm khớp lấy 10 đoạn để tiến hành khai báo trong tập tin đầu vào của RELAP5. Trong hình 4, tại vị trí giữa của phần thanh nhiên liệu, mật độ công suất nhiệt đạt giá trị lớn nhất 0,01378 MW/m tại kênh trung bình và 0,02991 MW/m tại kênh nóng nhất.



Hình 4. Mật độ công suất nhiệt theo chiều cao.

3.2. Phân bố nhiệt độ theo chiều cao

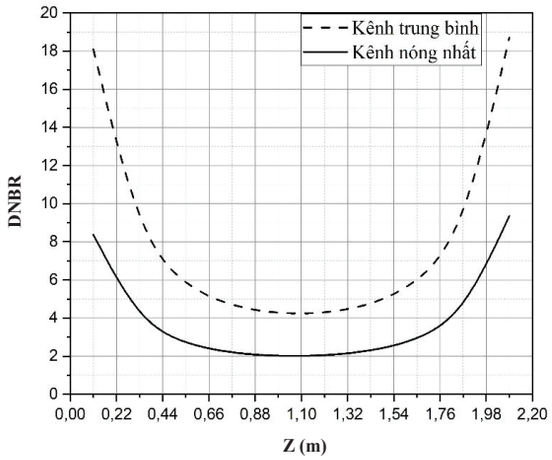
Tiếp theo phân bố công suất nhiệt theo chiều cao, nhóm tác giả tiến hành tính toán phân bố nhiệt độ tại kênh trung bình và kênh nóng nhất. Trong hình 5, phân bố nhiệt độ được tính từ nhiệt độ viên nhiên liệu, nhiệt độ bên trong vỏ bọc thanh nhiên liệu, nhiệt độ mặt ngoài thanh nhiên liệu và cuối cùng là nhiệt độ chất làm mát. Tại kênh trung bình, nhiệt độ chất tải nhiệt T_{min} = 301,57°C, T_{max} = 319,53°C khi đó giá trị chênh lệch nhiệt độ là 17,96°C (hình 5A). Tại kênh nóng nhất, nhiệt độ chất tải nhiệt T_{min} =304,23°C, T_{max} =343,20°C, khi đó giá trị chênh lệch nhiệt độ là 38,97°C (hình 5B).



Hình 5. Phân bố nhiệt độ tại kênh trung bình (A) và kênh nóng nhất (B).

3.3. Đánh giá thông số DNBR

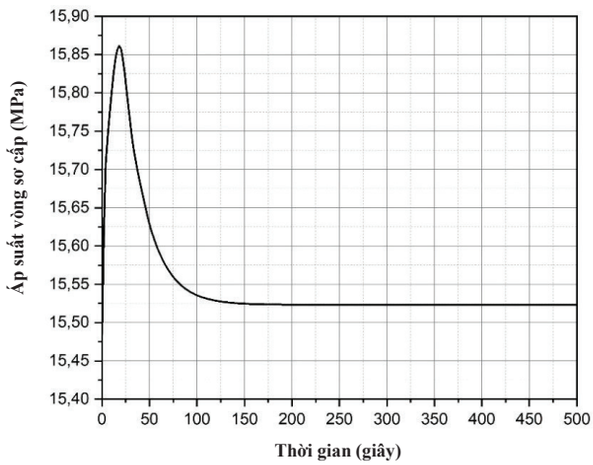
DNBR là một trong những thông số quan trọng để đánh giá khả năng hoạt động an toàn của lò phản ứng. DNBR được xác định dọc theo chiều cao phần nhiên liệu là 2,2 m và được chia thành 10 đoạn. Giá trị DNBR của kênh nóng nhất và kênh trung bình được thể hiện ở hình 6. DNBR có giá trị lớn hơn 150% là phù hợp với tiêu chí đánh giá khả năng hoạt động an toàn của lò phản ứng hạt nhân trong thiết kế [6, 11].



Hình 6. Giá trị tính toán DNBR theo chiều cao của nhiên liệu.

3.4. Giá trị áp suất hệ thống làm mát sơ cấp

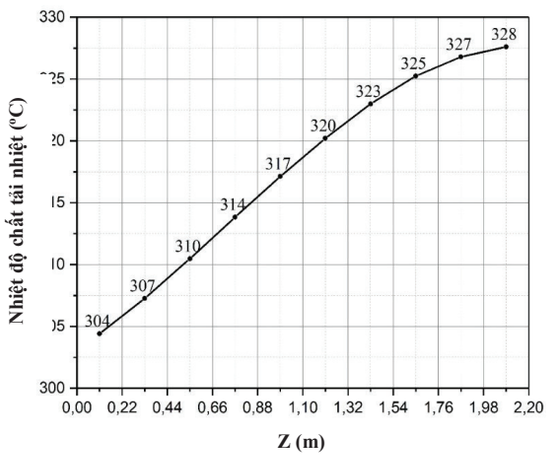
Với giá trị áp suất được khai báo theo bảng 1, kết quả thu được từ chương trình RELAP 5 cho thấy khoảng thời gian từ 0-150 giây là trạng thái hoạt động ban đầu của hệ thống được lược bỏ. Giá trị ổn định của áp suất vòng sơ cấp được xem xét đánh giá từ giây thứ 151 đến 500 giây, trong khoảng thời gian này, giá trị áp suất trung bình là 15,525 MPa (hình 7).



Hình 7. Giá trị áp suất vòng sơ cấp.

3.5. Nhiệt độ chất tải nhiệt qua vùng hoạt lò phản ứng

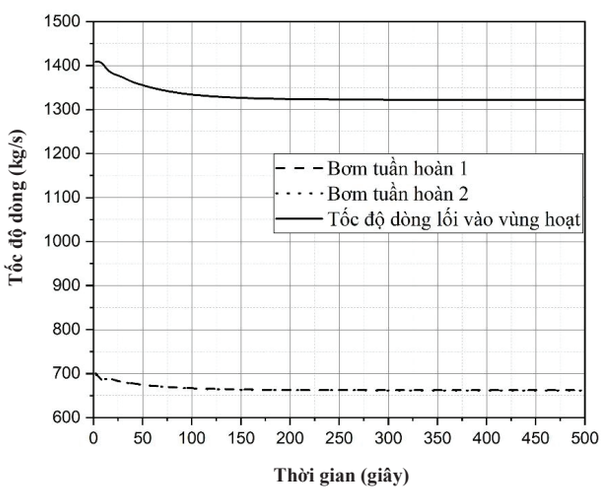
Với chiều cao của phần nhiên liệu là 2,2 m, khoảng cách mỗi đoạn 22 cm, nhiệt độ lối vào và lối ra vùng hoạt tương ứng là 299,3 và 321,8°C (bảng 1). Kết quả tính toán mô phỏng nhiệt độ của chất tải nhiệt dọc theo chiều cao của vùng hoạt được trình bày ở hình 8. Với giá trị nhiệt độ lối vào 304,41°C và lối ra 327,59°C tại thời điểm 400 giây khi lò phản ứng hoạt động ổn định, giá trị này có độ lệch 1,7% so với giá trị khai báo trong tập tin đầu vào.



Hình 8. Nhiệt độ của chất tải nhiệt trong vùng hoạt.

3.6. Tốc độ dòng chất tải nhiệt qua vùng hoạt lò phản ứng

Từ kết quả tính toán trong trạng thái tĩnh (1), tốc độ dòng chất tải nhiệt qua vùng hoạt là 1384,61 kg/s, giá trị này được khai báo trong tập tin đầu vào của RELAP5. Trong hình 9, tại thời điểm 400 giây, tốc độ dòng chất tải nhiệt qua vùng hoạt là 1322,36 kg/s, tốc độ dòng chất tải nhiệt qua hai bơm tuần hoàn chính lần lượt là 662,39 và 661,87 kg/s. Độ lệch của tốc độ dòng qua vùng hoạt từ kết quả RELAP 5 so với kết quả của tính toán theo (1) là 4,71%, giá trị này có thể chấp nhận được do sự phân tán của dòng chảy qua các cấu trúc khác trong thùng lò phản ứng và hệ thống thủy nhiệt.



Hình 9. Tốc độ dòng chất tải nhiệt qua vùng hoạt.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã tiến hành tính toán thủy nhiệt ở trạng thái tĩnh dựa theo các thông số đặc trưng của loại lò phản ứng mô đun nhỏ ACPR50S (bảng 1). Các thông số của vùng hoạt được xác định bao gồm bán kính vùng hoạt (0,798 m), tốc độ dòng chất tải nhiệt qua vùng hoạt (1384,61 kg/s), chu vi thủy lực (8,564 m), hệ số Nu (516,43), khi đó hệ số truyền nhiệt tính toán được là 14942,24 W/mK, giá trị DNBR là 5,691 lớn hơn 150%. Có thể thấy rằng, loại SMR này đảm bảo vận hành an toàn với thiết kế đã được xác định. Bên cạnh đó, các kết quả này cùng với các kết quả tính toán trong thời gian tới về kích thước hình học của thùng lò, hệ thống thủy nhiệt và hệ thống an toàn sẽ được khai báo trong tập tin đầu vào của RELAP5 để sử dụng cho tính toán chuyển tiếp và phân tích sự cố cho SMR.

Nghiên cứu này chỉ thực hiện tính toán các giá trị trung bình ở trạng thái vận hành ổn định, chưa tính đến các trạng thái chuyển tiếp hay sự cố. Kết quả của nghiên cứu là bước khởi đầu quan trọng cho tính toán thiết kế lò phản ứng mô đun nhỏ hoàn chỉnh và chuẩn bị cho tính toán phân tích an toàn sau này. Đồng thời, nghiên cứu này góp phần nâng cao năng lực của nhóm nghiên cứu, giúp xây dựng và phát triển đội ngũ nhân lực chất lượng cao cho ngành hạt nhân trong nước.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] IAEA (1997), *Introduction to Small and Medium Reactors in Developing Countries*, *IAEA-TECDOC-999*.

[2] IAEA (2020), *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System*.

[3] JSC-Afrikantov OKB Mechanical Engineering (OKBM) (2013), *KLT40S*, https://aris.iaea.org/PDF/KLT-40S.pdf, accessed 3 March, 2022.

[4] Peter Lobner (2021), *China's CGN ACPR50S Floating Nuclear Power Plant (FNPP) Concept*, https://lynceans.org/wp-content/uploads/2021/05/ChinaCGN-ACPR50S-FNPP-converted.pdf, accessed 3 March, 2022.

[5] T.V. Phu, T.H. Nam, H.V. Khanh (2020), "Application of evolutionary simulated annealing method to design a small 200 MWt reactor core", *Nuclear Science and Technology*, **10(4)**, pp.16-23.

[6] China General Nuclear Power Corporation, China Nuclear Power Technology Research Institute (2017), *Design, Applications and Siting Requirements of CGN ACPR50(S)*, Natural Energy Powering Nature, 56pp.

[7] US NRC (2004), *Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19 - Tier 2 Chapter 4 - Reactor - Section 4.4 Thermal and Hydraulic Design*, https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1793/initial/index.html, accessed 3 March, 2022.

[8] V.I. Boyko, F.P. Koshelev, I.V. Shamanin, et al. (2009), *Neutron-Physical and Thermal Hydraulic Calculation of a Thermal Neutron Reactor*, Textbook, Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 504pp.

[9] K.N. Ivanov (2015), *Multiphase Flow Dynamics 5: Nuclear Thermal Hydraulics*, 3rd Editon, Springer International Publishing Switzerland, ISBN 9783-319-15155-7.

[10] Nuclear Safety Analysis Division, U.S. Nuclear Regulatory Commission (2002), *Relap5/Mod3.3 Code Manual Volume II: Appendix A Input Requirements*.

[11] IAEA-TECDOC-1332 (2003), *Safety Margins of Operating ReactorsAnalysis of Uncertainties and Implications for Decision Making*.