

EFFECT OF TURBULENT VISCOSITY MODEL ON THE NUMERICAL SIMULATION OF CAVITATING FLOW IN HOT WATER

Le Dinh Anh^{1*}, Nguyen Hoang Quan¹, Ngo Ich Long², Truong Van Thuan², Truong Viet Anh²

¹School of Aerospace Engineering, University of Engineering and Technology - VNU

²Hanoi University of Science and Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 27/12/2021</p> <p>Revised: 12/5/2022</p> <p>Published: 16/5/2022</p>	<p>In this study, the effect of different turbulent viscosity models on the numerical simulation of cavitating flow in hot water is investigated. The flow field around the NACA0015 hydrofoil is simulated using the compressible homogeneous water-vapor two-phase flow model. Three turbulent viscous models are performed, including compressibility model, Rebound modification model, and VLES model. The simulations are conducted with water at the temperatures of 25°C, 50°C and 70°C and the two attack angles of 5° and 8°, respectively. The simulation results are compared quantitatively with the measured data of pressure coefficient $-C_p$ by Cervone et al. at two cavitation numbers of $\sigma = 2.5$ and 1.5. As the result, the cavity volume and turbulent kinetic energy around the hydrofoil is highly influenced by the turbulent viscosity model. A good match with measured data of the pressure coefficient C_p produced by all turbulent viscous model. For which the best satisfactory prediction with experimental data was achieved by the compressibility model at all tested temperatures.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>Cavitation</p> <p>Turbulent model</p> <p>Homogeneous</p> <p>VLES</p> <p>Viscosity</p>	

ẢNH HƯỞNG CỦA MÔ HÌNH ĐỘ NHỚT RỐI LÊN MÔ PHÒNG DÒNG XÂM THỰC TRONG NƯỚC Ở NHIỆT ĐỘ CAO

Lê Đình Anh^{1*}, Nguyễn Hoàng Quân¹, Ngô Ích Long², Trương Văn Thuận², Trương Việt Anh²

¹Viện Công nghệ Hàng không Vũ trụ, Trường Đại học Công nghệ - ĐH Quốc gia Hà Nội

²Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 27/12/2021</p> <p>Ngày hoàn thiện: 12/5/2022</p> <p>Ngày đăng: 16/5/2022</p>	<p>Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của các mô hình rối lên mô phỏng dòng xâm thực trong môi trường nước ở nhiệt độ cao. Dòng chảy qua biên dạng cánh NACA0015 được mô phỏng sử dụng mô hình đồng nhất cho dòng nén được, ba pha nước - hơi bão hòa - khí không hòa tan. Ba mô hình độ nhớt rối được tính toán bao gồm mô hình độ nén, mô hình sửa đổi Reboud và mô hình VLES. Mô phỏng được thực hiện với nước ở nhiệt độ 25°C, 50°C và 70°C với góc tấn 5° và 8°. Kết quả mô phỏng được so sánh tương quan với kết quả thực nghiệm của phân bố hệ số áp suất $-C_p$ trên cánh của Cervone và các cộng sự ở hệ số xâm thực $\sigma = 2.5$ và 1.5. Kết quả cho thấy mô hình hóa độ nhớt rối có tác động lớn đến sự phân bố tỉ lệ thể tích khí xâm thực và phân bố năng lượng rối trên biên dạng cánh. Ba mô hình độ nhớt rối cho kết quả phân bố hệ số áp suất $-C_p$ tốt so với thực nghiệm. Trong đó, mô hình độ nén cho kết quả tốt nhất so với thực nghiệm ở các nhiệt độ khác nhau.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>Xâm thực</p> <p>Mô hình rối</p> <p>Mô hình đồng nhất</p> <p>VLES</p> <p>Độ nhớt</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5387>

* Corresponding author. Email: anh.ld@vnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Xâm thực (cavitation) là hiện tượng xuất hiện các bọt khí hơi bão hòa trong lòng chất lỏng khi áp suất cục bộ giảm xuống tới áp suất hơi bão hòa do ảnh hưởng của gia tốc dòng chảy [1]. Xâm thực thường xuất hiện trong các thiết bị thủy lực như bơm, van hoặc đường ống trong các nhà máy thủy điện, nhà máy nhiệt điện và nhà máy điện hạt nhân. Khi xâm thực xuất hiện, các bọt khí hơi bão hòa phát triển tại nơi có áp suất thấp và di chuyển theo dòng chảy đến nơi có áp suất cao hơn áp suất hơi bão hòa. Tại đây, các bọt khí xâm thực bị nén lại và phát nổ gây tăng áp suất cục bộ lên vài mega-pascal và nhiệt độ lên hàng nghìn độ Kelvin trong thời gian ngắn. Xâm thực mang đến các tác động xấu cho máy thủy lực như rung động, tiếng ồn, ăn mòn bề mặt vật liệu và làm giảm hiệu suất của các thiết bị thủy lực. Do đó, nghiên cứu xâm thực đóng vai trò quan trọng trong quá trình tính toán và thiết kế các thiết bị thủy lực có độ an toàn và hiệu suất cao. Xâm thực xảy ra trong các thiết bị thủy lực thường rất đa dạng như: xâm thực đơn bóng (bubble cavitation), xâm thực dính (attached cavitation), xâm thực dạng đám mây (cloud cavitation), xoáy xâm thực (vortex cavitation) và siêu xâm thực (supercavitation) [1]. Nhìn chung, xâm thực là hiện tượng vật lý rất phức tạp, xảy ra với sự tương tác cao giữa các hiện tượng chuyển pha, rối và trao đổi nhiệt. Do vậy, nghiên cứu đặc điểm của xâm thực dựa trên thực nghiệm còn gặp nhiều khó khăn do giới hạn của các thiết bị đo hiện nay.

Ngày nay, cùng với sự phát triển của công nghệ máy tính, phương pháp mô phỏng số CFD được xem là một công cụ hữu hiệu và có giá trị cho việc nghiên cứu và giải quyết các bài toán trong nhiều lĩnh vực. Các kết quả tính toán tối ưu từ mô hình số cho phép giảm thời gian và tổng chi phí đầu tư chế tạo thực nghiệm. Đặc biệt, điều này trở nên quan trọng hơn với các nghiên cứu lý thuyết và có tính mới. Các nghiên cứu trước đây đã cho thấy độ tin cậy và tính ưu việt của phương pháp mô phỏng số CFD cho nhiều lớp bài toán nói chung. Sử dụng phương pháp số CFD giúp khám phá các hiện tượng vật lý phức tạp của dòng chảy không thể thực hiện đồng thời trong thực nghiệm. Trong các phương pháp CFD hiện nay, phương pháp mô hình đồng nhất cho thấy là phương pháp hữu hiệu trong việc tính toán mô phỏng hiện tượng xâm thực trong công nghiệp [2]-[6]. Ở phương pháp này, các pha được giả thiết ở trạng thái cân bằng nhiệt và cân bằng cơ học. Do đó, hệ phương trình cho dòng nhiều pha có thể được đơn giản hóa thành hệ phương trình cho dòng một pha hỗn hợp. Bên cạnh đó, các yếu tố ảnh hưởng đến xâm thực như quá trình trao đổi nhiệt và chuyển pha trong xâm thực được tính đến thông qua các phương trình bổ sung.

Nhiều mô hình toán - vật lý đã được nghiên cứu và phát triển cho mô phỏng dòng xâm thực sử dụng mô hình đồng nhất như mô hình xâm thực, mô hình nhiệt và mô hình rối. Schnerr và Sauer [7], Singhal và các cộng sự [8] và Zwart và các cộng sự [9] đã đưa ra các mô hình xâm thực dựa trên quá trình đơn giản hóa phương trình động lực học bọt khí đơn lẻ của Reyleigh – Plesset. Trong khi đó, Saito và các cộng sự [10] phát triển mô hình xâm thực dựa trên phương trình hóa hơi – ngưng tụ của Herz-Knudsen-Langmuir. Các mô hình trên đã được áp dụng mô phỏng thành công cho nhiều bài toán xâm thực khác nhau. Delgosha và các cộng sự [11] cho thấy kết quả mô phỏng hiện tượng xâm thực phụ thuộc lớn vào mô hình hóa độ nhớt rối. Trong đó, sự phát triển của xâm thực và các đặc điểm của xâm thực như tính không dừng bị suy giảm so với thực tế khi sử dụng các mô hình độ nhớt rối cho dòng một pha. Do đó, việc sửa đổi mô hình độ nhớt rối là cần thiết để có thể dự đoán chính xác hiện tượng xâm thực trong mô phỏng. Một số mô hình độ nhớt rối sửa đổi đã được phát triển và áp dụng thành công cho mô phỏng dòng xâm thực như mô hình sửa đổi Reboud [11], mô hình độ nén [12] và mô hình VLES [13].

Trong công nghiệp, nước là loại chất lỏng được sử dụng rộng rãi với dải nhiệt độ rộng từ nhiệt độ phòng trong các nhà máy thủy điện cho tới nhiệt độ cao trong các nhà máy điện hạt nhân hoặc nhà máy nhiệt điện. Khác với ở nhiệt độ thường, hiện tượng xâm thực trong nước ở nhiệt độ cao chịu tác động lớn của yếu tố nhiệt động lực học. Khi xâm thực xuất hiện, một lượng nhiệt ẩn cần thiết phải được cung cấp từ môi trường nước xung quanh cho sự hóa hơi. Do đó, nhiệt độ của nước suy giảm dẫn đến sự suy giảm của áp suất hơi bão hòa và làm chậm quá trình phát triển của

xâm thực. Nhìn chung, ảnh hưởng nhiệt động lực học lên xâm thực là hiện tượng tốt cho các thiết bị thủy lực [1]. Quan trọng hơn, ở nhiệt độ cao, các thông số nhiệt động lực học của nước có sự thay đổi lớn so với ở nhiệt độ thường, đòi hỏi lượng nhiệt ẩn lớn hơn cho quá trình hóa hơi. Bên cạnh đó, độ nhớt của nước suy giảm nhanh khi nhiệt độ tăng dẫn đến thay đổi tác động của các mô hình độ nhớt rồi sửa đổi lên hiện tượng vật lý của xâm thực, nhưng chưa được tìm hiểu ở các nghiên cứu trước đây [2], [11]. Ngoài ra, khác với các loại chất lỏng khác, trong nước luôn tồn tại một hàm lượng khí không hòa tan mà không thể loại bỏ hoàn toàn. Tùy theo hàm lượng khí hòa tan trong nước, nó có tác động nhất định lên sự phát triển của xâm thực, đặc biệt ở trong môi trường nước nhiệt độ cao do đặc tính khuếch tán của khí [1].

Do vậy, nghiên cứu này hướng tới làm rõ tác động của các mô hình độ nhớt rồi lên mô phỏng đặc tính dòng xâm thực trong nước ở nhiệt độ cao. Dòng xâm thực qua biên dạng cánh NACA0015 được thực nghiệm bởi Cervone và các cộng sự [14] với nước ở nhiệt độ từ 25°C tới 70°C được lựa chọn cho tính toán mô phỏng. Chương trình tính toán mô phỏng sử dụng mô hình đồng nhất cho dòng nén được ba pha nước – hơi bão hòa - khí không hòa tan phát triển trên ngôn ngữ Fortran được sử dụng nhằm đánh giá ảnh hưởng của ba mô hình độ nhớt rồi lên kết quả mô phỏng bao gồm: mô hình sửa đổi Reboud, mô hình độ nén và mô hình VLES.

2. Phương pháp mô phỏng

2.1. Mô hình đồng nhất hỗn hợp nước - hơi bão hòa - khí không hòa tan

Ở nghiên cứu này, dòng xâm thực trên cánh NACA0015 được mô phỏng sử dụng mô hình đồng nhất cho dòng nén được, ba pha nước - hơi bão hòa - khí không hòa tan [5]. Với giả thiết các pha giả thiết có cùng vận tốc, nhiệt độ, áp suất và khối khí xâm thực bao gồm cả hơi bão hòa và khí không hòa tan, hệ phương trình động lực học chất lỏng cho dòng ba pha được rút gọn thành hệ phương trình động lực học chất lỏng cho dòng một pha hỗn hợp [5]. Pha hơi bão hòa và pha khí không hòa tan giả thiết giống như khí lý tưởng với khối lượng riêng xác định từ phương trình trạng thái. Khối lượng riêng ρ_g và áp suất p_g của khối khí xâm thực do đó được tính như sau:

$$p = p_v + p_a = \rho_g R_g T; \rho_g = \rho_a + \rho_v. \quad (1)$$

Với R_g tính bởi:

$$R_g = D_a R_v + (1 - D_a) R_a. \quad (2)$$

Trong phương trình trên, ký hiệu g , a , v tương ứng với pha khí, khí không hòa tan và hơi bão hòa. R là hằng số chất khí, T là nhiệt độ của hỗn hợp và D_a là tỉ lệ khối lượng riêng của pha khí không hòa tan trong khối khí xâm thực. Bên cạnh đó, nước giả thiết là chất lỏng nén được với khối lượng riêng ρ_l tính bởi phương trình Tamman [2].

$$\rho_l = \frac{p + p_c}{(T_c + T) K_l}. \quad (3)$$

Với p_c , K_l và T_c tương ứng là hằng số áp suất, hằng số tự do và hằng số nhiệt độ của nước. Ký hiệu l tương ứng với pha nước. Mối quan hệ giữa tỉ lệ khối lượng Y và tỉ lệ thể tích α của khối khí xâm thực như sau:

$$\rho Y = \rho_g \alpha. \quad (4)$$

Với ρ là khối lượng riêng của hỗn hợp nước - khối khí xâm thực và được tính bởi phương trình:

$$\rho = \frac{(p + p_c) p}{R_g Y T (p + p_c) + K_l p (T + T_c) (1 - Y)}. \quad (5)$$

Với các giả thiết trên, hệ phương trình động lực học chất lỏng cho hỗn hợp nước – khối khí xâm thực bao gồm phương trình cho khối lượng riêng của hỗn hợp ρ , động lượng u_i , nhiệt độ T , tỉ lệ khối lượng khối khí xâm thực Y , tỉ lệ khối lượng riêng khí không hòa tan D_a , năng lượng rối k và tốc độ tiêu tán rối đặc trưng ω trong hệ tọa độ Oxy được đưa ra như sau:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}_j}{\partial x_i} = \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{E} \mathbf{v}_j}{\partial x_i} + \mathbf{S}, \tag{6}$$

Với

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_i \\ \rho T \\ \rho Y \\ \rho Y D_a \\ \rho k \\ \rho \omega \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_j = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u_i u_j + \delta_{ij} p \\ \rho T u_i \\ \rho Y u_i \\ \rho Y D_a u_i \\ \rho k u_i \\ \rho \omega u_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-Lm^+ - 0.8Lm^-}{c_p} \\ m \\ 0 \\ P_k - \beta^* \rho k \omega \\ P_k \gamma \frac{\omega}{k} - \beta \rho \omega^2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\mathbf{E} \mathbf{v}_j = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{ij} \\ ((\kappa + \kappa_r) \frac{\partial T}{\partial x_i}) \\ 0 \\ 0 \\ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \\ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/c_p & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Ở hệ phương trình này, τ_{ij} là ứng suất cắt, C_p là nhiệt dung riêng đẳng áp của hỗn hợp và L là nhiệt ẩn hóa hơi; m , m^+ và m^- tương ứng là tốc độ chuyển pha tổng, tốc độ hóa hơi và tốc độ ngưng tụ; κ và μ là hệ số truyền nhiệt và hệ số nhớt của chất lỏng. Bên cạnh đó, σ_k , σ_ω , β và β^* là các hệ số tự do của mô hình rối [12]. Cụ thể về mô hình tính toán có thể tham khảo các bài báo trước của tác giả [3]-[6].

2.2. Mô hình xâm thực

Để mô phỏng quá trình chuyển pha, mô hình xâm thực dựa trên phương trình Herz-Knudsen-Langmuir được sử dụng [5]:

$$\dot{m} = \begin{cases} \dot{m}^+ = \frac{C_e [\alpha(1-\alpha)]^{2/3} \max(0, p_v(T)^* - p^*)}{\sqrt{2\pi R_g T}} \\ \dot{m}^- = \frac{C_c [\alpha(1-\alpha)]^{2/3} \min(0, p_v(T)^* - p^*)}{\sqrt{2\pi R_g T}} \end{cases}, \tag{8}$$

Trong đó, $C_e = 1000$ và $C_c = 1$ tương ứng là các hệ số chuyển pha. Áp suất chuyển pha tới hạn $p_v(T)^*$ được tính bởi áp suất hơi bão hòa $p_v(T)$ và áp suất nhiễu động do rối:

$$p_v(T)^* = p_v(T) + 0.195 \rho k, \tag{9}$$

Áp suất riêng phần p^* tính bởi phương trình:

$$p^* = \frac{(1-D_a)R_v p}{D_a R_a + (1-D_a)R_v}, \quad (10)$$

2.3. Mô hình độ nhớt rối

Độ nhớt rối μ_t được tính bởi:

$$\mu_t = F_r \frac{\rho k}{\omega}, \quad (11)$$

Ở phương trình này, hàm F_r được xác định bởi 3 mô hình: mô hình độ nén [12], mô hình sửa đổi Reboud [11] và mô hình VLES [13]. Trong đó:

2.3.1. Mô hình sửa đổi Reboud

$$F_r = \frac{\rho_g + (1-\alpha)^{n_r} (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g + (1-\alpha)(\rho_l - \rho_g)}, \quad (12)$$

Ở mô hình này, $n_r = 3$ được sử dụng cho mô phỏng dòng chảy qua biên dạng cánh NACA [5], [15].

2.3.2. Mô hình VLES

$$F_r = \min\left[1, \frac{0.09\Delta\omega}{k^{1/2}}\right], \quad (13)$$

Trong đó, Δ là hàm lọc và lấy giá trị bằng 1,5 lần kích thước lưới lớn nhất trong không gian tính toán. Tại các điểm lưới sát với biên tường, F_r có giá trị bằng 1 và hàm tường được áp dụng để tính độ nhớt rối ở khu vực này.

2.3.3. Mô hình độ nén

Khác với hai mô hình trên, F_r có giá trị bằng 1 trong mô hình độ nén. Thay vào đó, hai hệ số tự do trong phương trình rối β và β^* được thay đổi tương ứng như sau:

$$\begin{aligned} \beta^* &= \beta_o^* (1 + 1.5f(M)), \\ \beta &= \beta_o - 1.5\beta_o^* f(M). \end{aligned} \quad (14)$$

Với

$$f(M) = \begin{cases} 0 & \text{if } M \leq 0.25 \\ M^2 - 0.25^2 & \text{if } M > 0.25 \end{cases}, \quad (15)$$

$$M = \sqrt{k/a^2}.$$

Với a là tốc độ âm thanh trong hỗn hợp [6].

2.4. Phương pháp tính toán

Trong nghiên cứu này, dòng xâm thực qua biên dạng cánh NACA0015 được mô phỏng sử dụng chương trình tính toán được phát triển bởi nhóm nghiên cứu dựa trên ngôn ngữ FORTRAN và phương pháp sai phân hữu hạn (FDM). Trong đó, thông lượng không nhớt \mathbf{E}_j được tính bằng phương pháp xấp xỉ tiến bậc 2 Harten-Yee TVD [16]. Phương pháp xấp xỉ trung tâm bậc 2 được dùng cho hàm thông lượng nhớt \mathbf{E}_{v_j} . Phương pháp chia thời gian của Strang được dùng để tính xấp xỉ hàm thời gian cho \mathbf{Q} [16]. Do vậy, phương pháp tính toán này có độ chính xác bậc 2 cho cả không gian và thời gian. Để tính toán các đại lượng rối gần biên tường, hàm tường giới thiệu bởi Allmaras được sử dụng [5]. Chương trình tính toán do nhóm phát triển đã được tính toán

kiểm nghiệm và cho kết quả sát với thực nghiệm đối với các dạng dòng chảy không xâm thực và xâm thực [3]-[6].

Cụ thể, các vec-tơ \mathbf{Q} , \mathbf{E} , \mathbf{E}_v và \mathbf{S} trong phương trình (6) và (7) trước tiên được biến đổi sang hệ tọa độ tính toán (ξ, η) . Phương pháp Harten-Yee TVD được thực hiện theo các bước sau trên hệ tọa độ tính toán:

$$\mathbf{Q}_{i,j}^{n+1} = L_{\xi}^{h/2} L_{\eta}^h L_{\xi}^{h/2} \mathbf{Q}_{i,j}^n, \tag{16}$$

Trong đó,

$$L_{\xi}^{h/2} \mathbf{Q}_{i,j}^{n+1} = \mathbf{Q}_{i,j}^* = \mathbf{Q}_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{2\Delta \xi} (\tilde{\mathbf{E}}_{i+1/2,j} - \tilde{\mathbf{E}}_{i-1/2,j}) + \frac{\Delta t}{\Delta \xi} (\mathbf{E}_{v_{i+1/2,j}} - \mathbf{E}_{v_{i-1/2,j}}), \tag{17}$$

$$L_{\eta}^h \mathbf{Q}_{i,j}^* = \mathbf{Q}_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta \eta} (\tilde{\mathbf{F}}_{i,j+1/2} - \tilde{\mathbf{F}}_{i,j-1/2}) + \frac{\Delta t}{\Delta \eta} (\mathbf{F}_{v_{i,j+1/2}} - \mathbf{F}_{v_{i,j-1/2}}) + \mathbf{S}.$$

Thông lượng $\tilde{\mathbf{E}}$ theo phương ξ được tính bởi:

$$\tilde{\mathbf{E}}_{i+1/2,j} = \frac{1}{2} (\mathbf{E}_{i,j} + \mathbf{E}_{i+1,j} + \mathbf{R}_{i+1/2,j} \Phi_{i+1/2,j}), \tag{18}$$

Với, $\mathbf{R}_{i+1/2} = \partial \mathbf{E} / \partial \mathbf{U}$ là ma trận dạng riêng.

Các phần tử $\phi_{i+1/2,j}$ của hàm $\Phi_{i+1/2}$ được tính bởi:

$$\phi_{i+1/2,j}^l = \sigma(a_{i+1/2,j}^l) (g_{i+1,j}^l - g_{i,j}^l) - \psi(a_{i+1/2,j}^l + \gamma_{i+1/2,j}^l) \alpha_{i+1/2,j}^l, \tag{19}$$

Trong đó, các hàm giới hạn được tính như sau:

$$g_{i,j}^l = \min \text{mod}(\alpha_{i,j-1/2}^l, \alpha_{i,j+1/2}^l), \tag{20}$$

$$\sigma(z) = \frac{1}{2} (\psi(z) - \lambda z^2),$$

$$\gamma_{i+1/2,j}^l = \sigma(a_{i+1/2}^l) \begin{cases} (g_{i+1,j}^l - g_{i,j}^l) / \alpha_{i+1/2,j}^l & \alpha_{i+1/2,j}^l \neq 0 \\ 0 & \alpha_{i+1/2,j}^l = 0 \end{cases}. \tag{21}$$

Hàm en-trô-py được tính bởi [37] $\psi(z) = \sqrt{z^2 + 0.25^2}$ \tag{22}

Ở các phương trình trên, a_l và α_l là nghiệm riêng và là vec-tơ riêng của $\tilde{\mathbf{E}}$. Quá trình tính toán được thực hiện tương tự cho phương η .

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Điều kiện tính toán

Dòng xâm thực qua biên dạng cánh NACA0015 được chọn cho tính toán mô phỏng. Kết quả mô phỏng được so sánh tương quan với kết quả thực nghiệm của Cervone và các cộng sự [14]. Biên dạng cánh NACA0015 có chiều dài $c = 115$ mm và góc tấn cố định tại $\text{AoA} = 5^\circ$ và 8° . Trong cả tính toán mô phỏng và thực nghiệm, môi chất làm việc là nước với nhiệt độ thay đổi tương ứng từ nhiệt độ phòng 25°C tới nhiệt độ cao ở 70°C . Không gian tính toán mô phỏng xây dựng tương ứng với thí nghiệm của Cervone được thể hiện trong Hình 1.

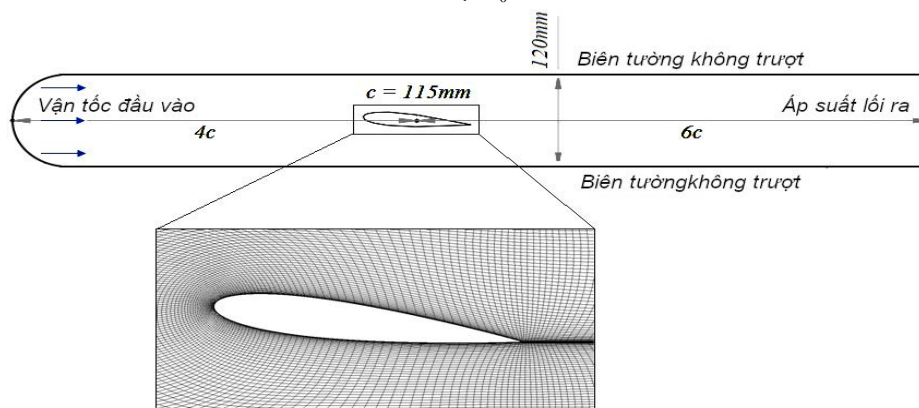
Bảng 1. Điều kiện tính toán theo thực nghiệm [14]

Vận tốc U_0 [m/s]	Góc tấn AoA [deg]	Hệ số xâm thực	Nhiệt độ nước T_0 [$^\circ\text{C}$]
8	5	1,5	25
	8	2,5	50
			70

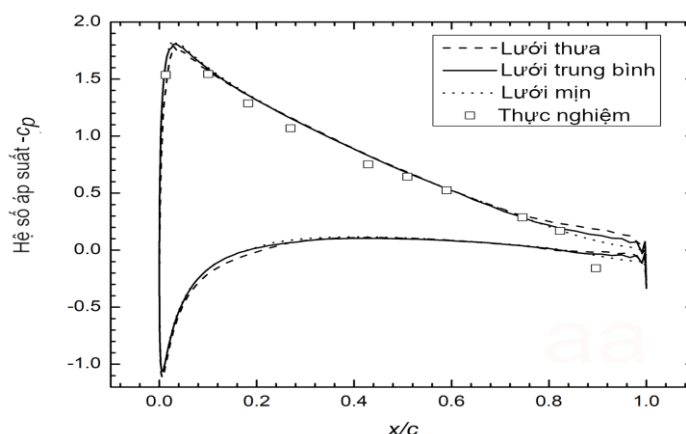
Tại lõi vào, vận tốc $U_0 = 8$ m/s, tỉ lệ thể tích khối khí xâm thực $\alpha = 0,001$, tỉ lệ khối lượng riêng khí không hòa tan D_a , temperature T_0 và các đại lượng rối được khai báo [5]. Áp suất tĩnh

p_0 được sử dụng tại lõi ra và được tính dựa theo hệ số xâm thực σ theo phương trình (23) trong thực nghiệm. Điều kiện dòng không trượt và đoạn nhiệt được sử dụng cho các biên tường và trên biên dạng cánh NACA0015. Cụ thể điều kiện tính toán được cho trong Bảng 1.

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v(T)}{0.5\rho U_0^2}. \quad (23)$$



Hình 1. Không gian tính toán cho biên dạng cánh NACA0015 và chia lưới tính toán



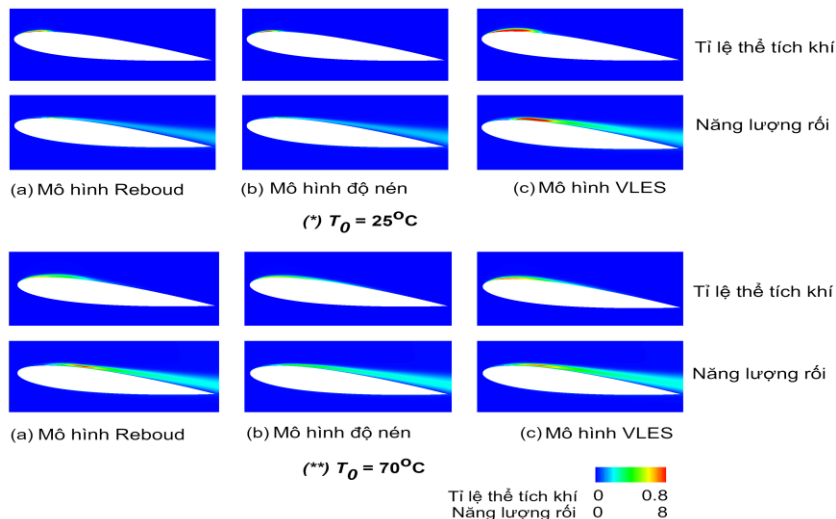
Hình 2. Tính toán hội tụ lưới cho biên dạng cánh NACA0015

Dạng lưới chữ C có cấu trúc được tạo trên toàn bộ không gian tính toán như trong Hình 1. Trước tiên, ảnh hưởng của độ hội tụ lưới lên kết quả tính toán được khảo sát. Ba loại lưới được tính toán bao gồm lưới thưa (10500 điểm lưới), lưới trung bình (17150 điểm lưới) và lưới mịn (21952 điểm lưới). Kết quả mô phỏng được so sánh tương quan với kết quả thực nghiệm bởi Cervone tại $AoA = 5^\circ$ và hệ số xâm thực $\sigma = 3$ [14]. Độ nhớt rối với mô hình sửa đổi Reboud được sử dụng cho tính toán kiểm nghiệm. Hình 2 thể hiện phân bố hệ số áp suất $-C_p$ trên biên dạng NACA0015 với ba loại lưới và kết quả thực nghiệm. Kết quả mô phỏng là sát với thực nghiệm. Trong đó, lưới trung bình và lưới mịn cho kết quả tương tự nhau với độ sai lệch nhỏ. Dựa trên kết quả tính toán, lưới trung bình được sử dụng cho các tính toán tiếp theo trong nghiên cứu này để giảm thiểu thời gian mô phỏng [5].

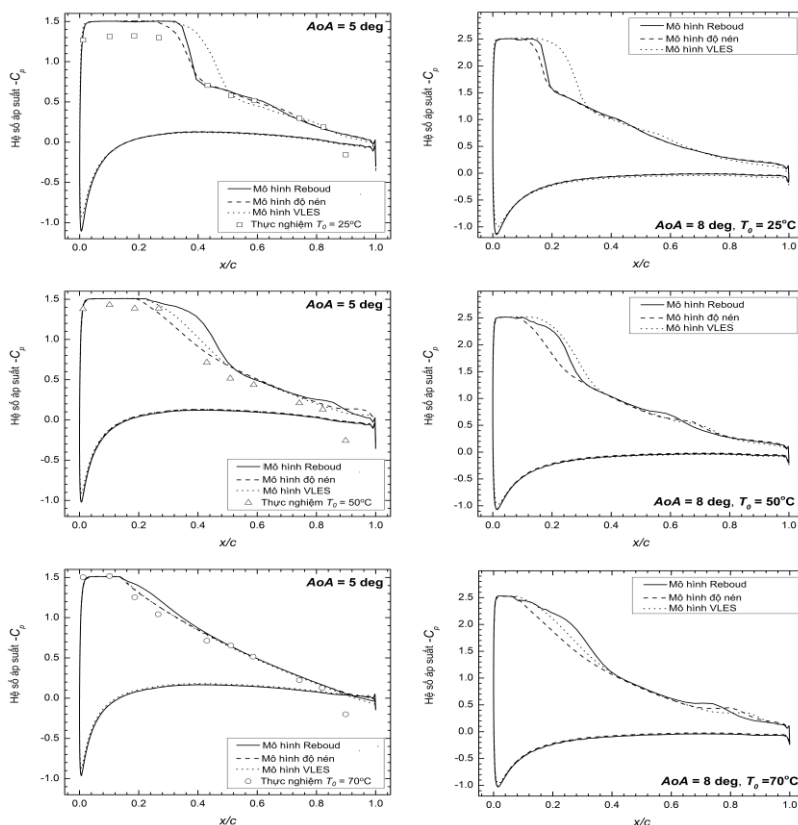
3.2. Ảnh hưởng của mô hình rối

Các nghiên cứu trước cho thấy kết quả mô phỏng dòng xâm thực chịu ảnh hưởng lớn bởi mô hình độ nhớt rối [11]. Trong đó, mô hình độ nhớt rối thông thường cho dòng 1 pha có xu hướng làm giảm các hiện tượng thực tế của xâm thực như tính không dừng và giảm kích thước khối bọt khí. Điều này gây ra do độ nhớt rối tính bởi các mô hình thông thường lớn hơn so với thực tế

trong khu vực xâm thực. Do vậy, đòi hỏi phải có các mô hình sửa đổi độ nhớt rồi để có thể tính toán chính xác các đặc tính của dòng xâm thực. Trong mục này, tác động của ba mô hình rồi lên mô phỏng dòng xâm thực qua biên dạng cánh NACA0015 được phân tích bao gồm: mô hình độ nén, mô hình sửa đổi Rebound và mô hình VLES.



Hình 3. Phân bố tỉ lệ thể tích khí và năng lượng rối trên biên dạng cánh NACA0015 với 3 mô hình độ nhớt ở nhiệt độ $T_0 = 25^\circ\text{C}$ và $T_0 = 70^\circ\text{C}$



Hình 4. So sánh phân bố hệ số công suất $-C_p$ giữa các mô hình độ nhớt và thực nghiệm [14] trên biên dạng cánh NACA0015 ở nhiệt độ và góc tấn khác nhau

Hình 3 thể hiện so sánh tương quan phân bố tỉ lệ thể tích khối khí xâm thực α và năng lượng rôi k trên biên dạng cánh NACA0015 ở góc tấn $AoA = 5^\circ$ với nhiệt độ của nước $T_0 = 25^\circ\text{C}$ và $T_0 = 70^\circ\text{C}$. Năng lượng rôi k có giá trị lớn nhất ở mô hình VLES và mô hình sửa đổi Reboud làm tăng trị số áp suất chuyển pha, theo phương trình (9). Do đó, ngưỡng áp suất hóa hơi tăng và kích thước khối bọt khí xâm thực ở mô hình VLES và mô hình sửa đổi Reboud là lớn hơn so với mô hình độ nén. Tỉ lệ thể tích khối khí xâm thực là lớn nhất trong mô hình VLES, do độ nhớt rôi gần biên tường có xu hướng giảm mạnh trong mô hình này so với 2 mô hình còn lại. Khi nhiệt độ của nước tăng, kích thước khối bọt khí hơi bão hòa tăng ở cả ba mô hình. Đặc điểm này sát với kết quả quan sát thực nghiệm bởi Cervone [14].

Hình 4 so sánh hệ số áp suất $-C_p$ trên biên dạng cánh NACA0015 trong mô phỏng bởi ba mô hình độ nhớt rôi ở các nhiệt độ khác nhau. Trong đó, các kết quả với góc tấn $AoA = 5^\circ$ và $AoA = 8^\circ$ được đặt tương ứng ở bên trái và bên phải của hình. Kết quả mô phỏng được so sánh tương quan với kết quả thực nghiệm bởi Cervone ở góc tấn $AoA = 5^\circ$. Với góc tấn $AoA = 5^\circ$, phân bố hệ số áp suất $-C_p$ có thể được chia làm hai phân vùng. Phân bố $-C_p$ là sát nhau bởi ba mô hình độ nhớt rôi trong vùng từ $0,4c$ tới đuôi cánh. Sự khác biệt trong kết quả tính toán $-C_p$ có thể thấy rõ ràng hơn giữa ba mô hình độ nhớt rôi trong vùng từ đầu cánh đến $0,4c$. Vùng áp suất thấp tương ứng với vị trí khối khí xâm thực có kích thước lớn nhất đối với mô hình độ nhớt VLES ở cả 2 góc tấn $AoA = 5^\circ$ và $AoA = 8^\circ$ với nước ở nhiệt độ $T_0 = 25^\circ\text{C}$. Điều này tương ứng và phù hợp với hình ảnh phân bố thể tích khối khí xâm thực ở mô hình VLES đã thảo luận trong Hình 3. Khi nhiệt độ của nước tăng, mô hình độ nén và mô hình VLES cho kết quả sát với thực nghiệm hơn so với mô hình sửa đổi Reboud. Nguyên nhân có thể lý giải do giá trị độ nhớt rôi trong mô hình sửa đổi Reboud phụ thuộc lớn vào giá trị n_T , một đại lượng có thể thay đổi theo thông số nhiệt động lực học của chất lỏng [5]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, giá trị của n_T được giả thiết là không đổi ở mọi nhiệt độ của nước. Mô hình độ nén cho kết quả vùng áp suất thấp (vùng phân bố dạng đường thẳng) có kích thước ngắn nhất trong ba mô hình độ nhớt rôi ở mọi nhiệt độ. Phân bố $-C_p$ bởi mô hình độ nén cho kết quả sát nhất với đo đạc thực nghiệm bởi Cervone ở cả ba nhiệt độ $T_0 = 25^\circ\text{C}$, 50°C và 70°C . Các đặc điểm phân bố hệ số áp suất $-C_p$ với góc tấn $AoA = 8^\circ$ có thể thấy tương tự như với góc tấn $AoA = 5^\circ$. Kết quả khẳng định độ nhạy trong tính toán mô phỏng dòng xâm thực đối với các mô hình độ nhớt rôi. Dựa trên phân tích mô phỏng, mô hình độ nén được khuyến nghị sử dụng trong mô phỏng dòng xâm thực 2D với kết quả sát với thực nghiệm ở các điều kiện khác nhau.

4. Kết luận

Ở nghiên cứu này, ảnh hưởng của mô hình độ nhớt rôi lên mô phỏng dòng xâm thực được phân tích. Dòng xâm thực trên biên dạng cánh NACA0015 được mô phỏng sử dụng chương trình tính toán do nhóm phát triển dựa trên ngôn ngữ FORTRAN và phương pháp sai phân hữu hạn. Ba mô hình độ nhớt rôi được khảo sát bao gồm mô hình độ nén, mô hình sửa đổi Reboud và mô hình VLES. Kết quả mô phỏng được so sánh tương quan với các dữ liệu thực nghiệm của Cervone và các cộng sự với nước ở các nhiệt độ khác nhau từ 25°C đến 70°C .

Kết quả cho thấy, mô phỏng dòng xâm thực có độ nhạy cao đối với các mô hình độ nhớt rôi cả về kích thước khối khí xâm thực và phân bố hệ số áp suất. Mô hình VLES và mô hình sửa đổi Reboud cho kích thước khối khí xâm thực lớn hơn so với mô hình độ nén, do năng lượng rôi là lớn hơn ở 2 mô hình này. Trong khi đó, phân bố hệ số áp suất $-C_p$ đạt được chính xác nhất so với thực nghiệm ở mô hình độ nén. Dựa trên phân tích kết quả mô phỏng, nghiên cứu khuyến nghị sử dụng mô hình độ nén trong mô phỏng dòng xâm thực 2D với kết quả sát với thực nghiệm ở các điều kiện khác nhau.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.03-2020.22.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J.-P. Franc, C. Rebattlet, and A. Coulon, "An Experimental Investigation of Thermal Effects in a Cavitating Inducer," *ASME J. of Fluids Eng.*, vol. 126, pp. 716-723, 2004.
- [2] Y. Iga, M. Nohmi, A. Goto, B. R. Shin, and T. Ikohagi, "Numerical Study of Sheet Cavitation Breakoff Phenomenon on a Cascade Hydrofoil," *ASME J. Fluids Eng.*, vol. 125, pp. 643-651, 2003.
- [3] Anh Dinh Le, J. Okajima, and Y. Iga, "Modification of Energy Equation for Homogeneous Cavitation Simulation with Thermodynamic Effect," *ASME J. Fluids Eng.*, vol. 141, no. 8, p. 081102-1-12, 2019.
- [4] A. D. Le, J. Okajima, and Y. Iga, "Numerical Simulation Study of Cavitation in Liquefied Hydrogen," *Cryogenics*, vol. 101, pp. 29-35, 2019.
- [5] A. D. Le, T. H. Phan, and T. H. Tran, "Assessment of a Homogeneous Model for Simulating a Cavitating Flow in Water under a Wide Range of Temperatures," *ASME J. Fluids Eng.*, vol. 143, no. 10, p. 101204-1-10, 2021.
- [6] A. D. Le, "Study of Thermodynamic Effect on the Mechanism of Flashing Flow under Pressurized Hot Water by a Homogeneous Model," *ASME J. Fluids Eng.*, vol. 141, no. 1, p. 011206-1-11, 2022.
- [7] G. H. Schnerr and J. Sauer, "Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics," presented at 4th International Conferences on Multiphase Flow, New Orleans, USA, 2001.
- [8] A. Singhal, M. Athavale, H. Li, and Y. Jiang, "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model," *ASME J. Fluids Eng.*, vol. 124, no. 3, pp. 614-624, 2002.
- [9] P. J. Zwart, A. G. Gerber, and T. Belamri, "A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics," presented at 5th International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, Japan, 2004.
- [10] Y. Saito, R. Takami, I. Nakamori, and T. Ikohagi, "Numerical analysis of unsteady behavior of cloud cavitation around a NACA0015 foil," *Comput. Mech.*, vol. 40, pp. 85-96, 2007.
- [11] O. Coutier-Delgosha, R. Fortes-Patella, and J. L. Reboud, "Evaluation of Turbulence Model Influence on the Numerical Simulation of Unsteady Cavitation," *ASME J. Fluids Eng.*, vol. 125, no. 1, pp. 38-45, 2003.
- [12] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc., 1994, ISBN 0-9639051-0-0.
- [13] S. T. Johansen, J. Wu, and W. Shyy, "Filter based Unsteady RANS Computations," *Int. J. Heat and Fluid Flows*, vol. 25, no. 1, pp. 10-21, 2011.
- [14] A. Cervone, C. Bramanti, E. Rapposelli, and L. Agostino, "Thermal Cavitation Experiments on a NACA0015 Hydrofoil," *ASME J. of Fluids Eng.*, vol. 128, pp. 326-331, 2006.
- [15] H. C. Yee, *Upwind and Symmetric Shock - Capturing Schemes*, NASA Technical Memorandum 89464, 1987.
- [16] A. D. Le and T. H. Tran, "Improvement of Mass Transfer Rate Modeling for Prediction of Cavitating Flow," *J. Applied Fluid mechanics*, vol.15, no. 2, pp. 551-561, 2022.