

NGHIÊN CỨU QUÁ TRÌNH HÌNH THÀNH VÀ PHÁT TRIỂN XÂM THỰC TRONG BƠM HƯỚNG TRỤC TỶ TỐC CAO ($n_s \approx 1200$ v/ph)

Đỗ Hồng Vinh

Viện Bơm và Thiết bị Thủy lợi

Trương Việt Anh, Nguyễn Văn Thanh, Đỗ Phước Phú

Đại học Bách khoa Hà Nội

Tóm tắt: Bài báo này trình bày nghiên cứu sự hình thành, phát triển và phân bố vùng bọt khí trên bánh công tác của bơm hướng trục tỷ tốc (n_s) cao bằng phương pháp mô phỏng số và thực nghiệm. Đối tượng nghiên cứu là bơm hướng trục có $n_s \approx 1200$ v/ph. Kết quả thực nghiệm và mô phỏng được tổng hợp và so sánh với nhau về mặt hình ảnh vùng bọt khí phát triển theo thời gian và các giá trị thông số làm việc của bơm để đánh giá tính tin cậy của phương pháp nghiên cứu. Các kết quả nghiên cứu mô phỏng gồm phân bố bọt khí, sự phát triển của vùng bọt theo thời gian, phân bố áp suất, mật độ, ảnh hưởng của dòng chảy ngược tại khe hở cánh đến sự nhiễu loạn và phát triển xâm thực sẽ được phân tích và thảo luận cụ thể so với kết quả thu được từ thực nghiệm. Về mặt lý thuyết, việc nghiên cứu sự hình thành và phát triển của xâm thực trong bơm hướng trục tỷ tốc cao đã giải thích và làm rõ hơn bản chất của xâm thực. Về mặt thực tiễn, nghiên cứu này giúp cho các nhà thiết kế có những dữ liệu cần thiết để có các nghiên cứu tiếp theo về các giải pháp hạn chế ảnh hưởng của xâm thực trong bơm nói chung và bơm hướng trục nói riêng.

Từ khóa: Bơm hướng trục, tỷ tốc cao, xâm thực, mô phỏng, thực nghiệm.

Summary: This article presents research on the formation, development and distribution of air bubbles on the impeller of a high-speed axial pump using numerical simulation and experimental methods. The research object is an axial pump with $n_s \approx 1200$ rpm. Experimental and simulation results are synthesized and compared with each other in terms of images of the bubble area developing over time and pump working parameter values to evaluate the reliability of the research method. Simulation research results include the distribution of air bubbles, the development of the bubble area over time, the distribution of pressure, density, and the influence of reverse flow at the wing gap on turbulence and cavitation development. will be analyzed and discussed in detail compared to the results obtained from experiments. Theoretically, the study of the formation and development of cavitation in high-speed axial pumps has explained and clarified the nature of cavitation. Practically, this research helps designers has the necessary data for further research on solutions to limit the effects of cavitation in pumps in general and axial pumps in particular.

Keywords: Axial pump, high speed, cavitation, simulation, experiment.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Xâm thực là hiện tượng xuất hiện các bọt khí (hơi) trong dòng chất lỏng do nguyên nhân giảm áp suất đến một giá trị tới hạn nào đó. Thông thường giá trị tới hạn đó là áp suất hơi bão hòa (P_{bh}). Áp suất này phụ thuộc vào bản chất của chất lỏng và nhiệt độ cục bộ. Nếu tại

bất kỳ điểm nào trong chất lỏng mà áp suất giảm đến áp suất hơi bão hòa, tại nơi đấy bọt khí hình thành. Các bọt này được chất lỏng mang theo và đi vào vùng áp suất thấp hơn hoặc cao hơn, chúng lớn lên hoặc bé đi, hoặc bị nổ (nổ bung, nổ xẹp), kèm theo sự dao động các thông số dòng, và phá hủy vật liệu ở các mức độ khác

Ngày nhận bài: 16/9/2024

Ngày thông qua phản biện: 11/11/2024

Ngày duyệt đăng: 28/11/2024

nhau. Xâm thực gây nên rung ồn, giảm hiệu suất và tuổi thọ máy.

Một số các công trình nghiên cứu tiêu biểu về xâm thực có thể tham khảo như: nghiên cứu về ảnh hưởng của góc cánh công tác trên hiện tượng xâm thực trong bơm hướng trục năm 2012 [1]. Về nghiên cứu và dự báo xâm thực năm 2005 [2] đã công bố công trình nghiên cứu và dự báo xâm thực trong máy bơm. Theo tác giả, xâm thực ngày càng trở thành yếu tố trở ngại chính trong thiết kế nâng cao hiệu suất máy bơm. Các quy tắc thiết kế cổ điển được áp dụng trong nhiều thập kỷ không còn hiệu quả nữa, và hình thành nhu cầu mạnh mẽ dự đoán hành vi xâm thực của máy bơm sử dụng công cụ mô phỏng số chính xác cao. Nhóm tác giả Masashi Fukaya, Tomoyoshi Okamura, Yoshiaki Tamura và Yoichiro Matsumoto năm 2003 [3] đã đưa ra phương pháp dự đoán xâm thực và hiệu suất của bơm hướng trục bằng cách sử dụng phương pháp số mô phỏng dòng xâm thực với mô hình dòng bọt khí. Ngoài ra còn có các nghiên cứu về xoáy bề mặt và áp suất ở miệng hút bơm hướng trục đứng" năm 2012 [4], nghiên cứu về ảnh hưởng của xâm thực đến cột áp bơm trong máy bơm hướng trục, năm 2015 [5]. Theo các nghiên cứu, kích thước của máy bơm hướng trục được sử dụng trong các trạm bơm thoát nước giảm và tốc độ quay của chúng đã tăng lên, tuy có thể đạt được mục tiêu giảm kích thước và giảm được chi phí chế tạo thiết bị

và công trình trạm nhưng sẽ làm tăng nguy cơ gây ra xâm thực.

Bơm hướng trục tỷ tốc cao là dạng bơm lưu lượng lớn, cột nước thấp. Mặt khác, yêu cầu giới hạn kích thước chế tạo (liên quan đến khả năng công nghệ và giá thành) dẫn tới tốc độ dòng chảy lớn, đây có thể là tác nhân gây nên xâm thực trong cỡ máy bơm này.

Bên cạnh đó, hầu hết các bơm lớn đều sử dụng cánh xoay để có thể điều chỉnh được thông số cột áp, lưu lượng thích ứng với điều kiện vận hành thực tế. Vì vậy, xâm thực hoàn toàn có thể xảy ra khi sử dụng biện pháp xoay cánh.

Chính vì vậy, nghiên cứu xâm thực xảy ra trong bơm hướng trục tỷ tốc cao là rất cần thiết, trong đó việc nghiên cứu quá trình hình thành và phát triển của xâm thực cho gam bơm này là rất quan trọng.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp mô phỏng số

2.1.1. Phương trình tổng quát

Khi áp suất giảm xuống áp suất hơi, chất lỏng bắt đầu hóa hơi và dòng bọt bọt khí sẽ trộn lẫn với dòng chất lỏng. Bằng cánh sử dụng đơn giản hóa vận tốc không trượt giữa hai pha, khi đó dòng xâm thực có thể coi là một dòng chảy đồng nhất. Các phương trình liên tục và động lượng cho dòng hỗn hợp không nén được này được biểu diễn như sau:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} [\mu_m + \mu_i] \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_m}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

Các phương trình tổng quát trên được giải bằng mô hình rối k- ω shear stress transport (SST). Mô hình này có độ chính xác cao khi mô phỏng trường dòng chảy trong máy thủy lực. Khối lượng riêng của hỗn hợp được xác định bằng công thức sau:

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l \quad (3)$$

Trong quá trình xâm thực, sự thay đổi khối

lượng pha lỏng-khí (bay hơi và ngưng tụ) được điều khiển bởi phương trình sau:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\partial_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v V_v) = R_e - R_c \quad (4)$$

Mô hình Zwart – Gerber - Belamri được chọn để diễn tả tỷ lệ trao đổi khối lượng, sử dụng phương trình này cho khả năng giải mạnh mẽ và nhanh chóng hội tụ. Mô hình này thiết lập dựa trên giả định rằng tất cả các bong bóng

trong xâm thực có cùng kích thước và các phương trình thể hiện như sau:

Nếu $P < P_v$:

$$R_e = F_{vap} \frac{3\alpha_{nuc}(1-\alpha_v)p_v}{\Re_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{p_l}} \quad (5)$$

Nếu $P \geq P_v$:

$$R_e = F_{cond} \frac{3\alpha_v p_v}{\Re_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - P_v}{p_l}} \quad (6)$$

Trong Ansys CFX 14.5 thì các thông số trên có giá trị như sau:

$$\Re_B = 1 \times 10^{-6} \text{ m}; \alpha_{nuc} = 5 \times 10^{-4};$$

$$F_{vap} = 0.01.$$

Giá trị F_{cond} nhỏ hơn giá trị F_{vap} do trong thực tế quá trình ngưng tụ thường chậm hơn nhiều so

với quá trình hóa hơi.

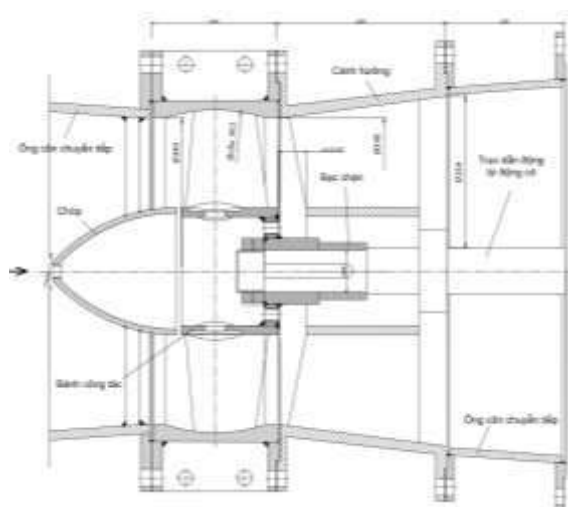
2.1.2. Thiết lập mô hình và các điều kiện biên

2.1.2.1. Mô hình mô phỏng và lưới tính toán

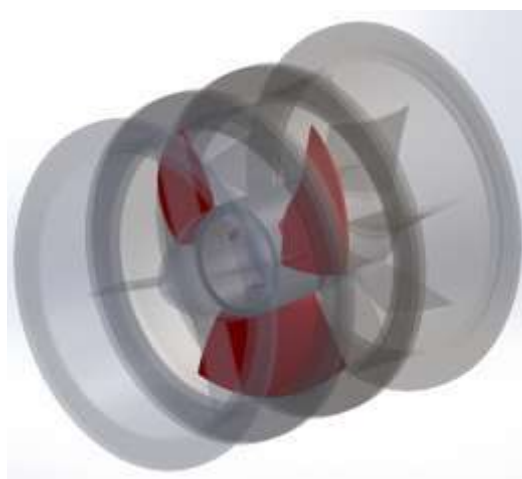
Thông số thiết kế: Cột áp $H = 2.517 \text{ m}$; Lưu lượng $Q = 0,4283 \text{ m}^3/\text{s}$; Số vòng quay 980 vòng/phút; Tỷ tốc $n_s = 1172 \text{ v/ph}$

Bảng 1: Các thông số chính của bánh công tác

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Số vòng quay: n	980	v/ph
Đường kính bầu: d_b	0.17	m
Đường kính BCT: D_{bct}	0.352	m
Khe hở đầu cánh	0.35	mm
Số lá cánh: Z	3	

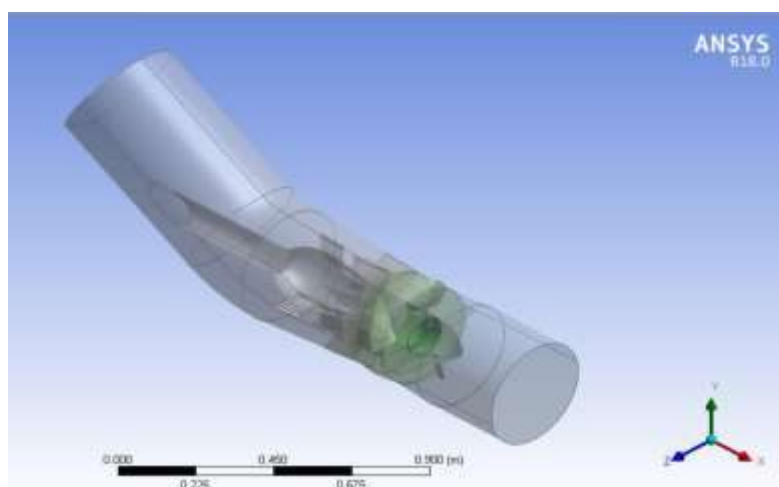


a) Thiết kế 2D

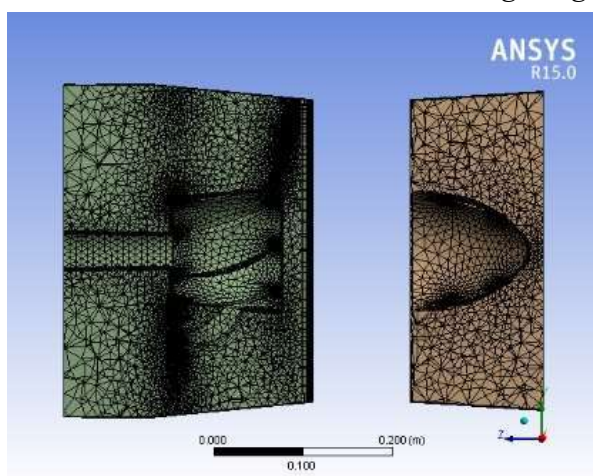


b) Thiết kế 3D

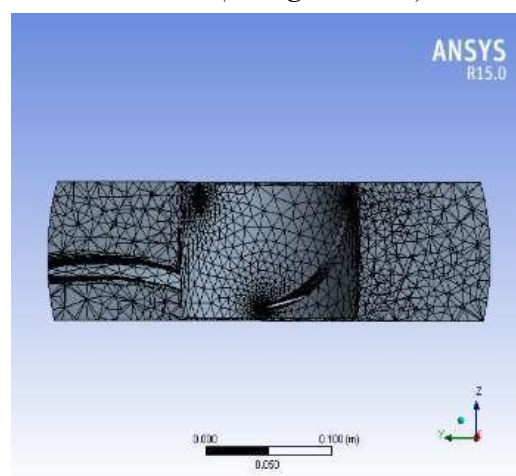
Hình 1: Thiết kế phần dẫn dòng bơm mô hình



Hình 2: Mô hình tính toán trong công cụ thiết kế mô hình (Design modler)



Mô hình tính toán phần tĩnh (Stato)



Mô hình tính toán phần động (Rotor-BCT)

Hình 3: Lưới mô hình tính toán và không gian khảo sát

2.1.2.2. Điều kiện biên tính toán.

- Chọn thuật giải: Solver CFX, Pressure-Based, Transient;
- Chọn vật liệu: nước, nhiệt độ 25°C; bột khí, nhiệt độ 25°C và áp suất hơi bão hòa là $P_v=3173$ Pa;
- Chọn mô hình rối k- ω SST;
- Chọn mô hình xâm thực: Mô hình Homogeneous, Mô hình mô hình Zwart, Phương trình Rayleigh – Plesset, Sức căng bề mặt của bột khí 0.074 N/m.
- Đặt các điều kiện biên: Số vòng quay bơm $n=102,57$ rad/s;
- +) Inlet là được thiết lập tổng lưu lượng đầu vào (Bulk mass flow rate; Nồng độ bột khí đầu α_v (volume of fraction);

- +) Outlet là được thiết lập áp suất đầu ra (tham chiếu giá trị chạy ở chế độ no-cavitation); Đối với chạy chế độ no-cavitation thì $P_{out} = 0$ Pa;
- +) Interface để dạng Rotor-Stator, Specific angle cho Rotor và Stator là 360 độ và biên tường là dạng No-slip wall;
- Đặt tiêu chuẩn hội tụ: 0,000001; Timestep size: $\Delta t = 0.0002$ s.

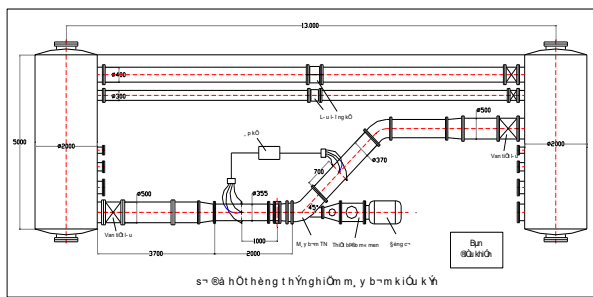
2.2. Phương pháp thực nghiệm

Phần nghiên cứu thực nghiệm máy bơm mô hình được thực hiện trên giá thí nghiệm bơm của Viện Bơm và Thiết bị thủy lợi như sơ đồ đo ở Hình 3. Quy trình thử nghiệm như sau:

- Khởi động động cơ điện kéo máy bơm quay ở trị số n không đổi, nước được hút từ bể hút vào

bơm và được đẩy vào ống chảy vào bể xả. Bể xả và bể hút thông nhau bằng đường ống trên đó có đặt thiết bị đo lưu lượng.

- Dùng van đặt trên ống đẩy để thay đổi lưu lượng từ 0 đến $Q_{\max}$.
- Đo lưu lượng Q nhờ thiết bị đo đặt trên ống nối hai bể, hoặc dùng đầu siêu âm đo trên đoạn ống đẩy.
- Đo cột nước H và vẽ đường $H - Q$: dùng chân không kế đặt ngay ở gần cửa vào BXCT để đo độ chân không H_{ck} , dùng áp lực kế để đo cột nước cột nước áp lực H_{ak} ở ngay sau cửa ra BXCT, tính ra cột nước H theo công thức sau:



Hình 4: Hệ thống thí nghiệm máy bơm hướng trục $n_s \approx 1200$ v/ph
(Viện Bơm và Thiết bị thủy lợi)

Các thông số chính cần đo đặc trong quá trình thí nghiệm bao gồm:

- Lưu lượng
- Cột áp
- Số vòng quay
- Áp suất hút
- Công suất trên trục bơm
- Hiệu suất máy bơm

Theo độ chính xác của các thiết bị đo, giá trị đo lường về cột áp, lưu lượng, mô men và công suất có sai số trong giới hạn 3%.

Trước khi đo đặc thực nghiệm, tiến hành kiểm tra các điều kiện làm việc của hệ thống thí nghiệm và của máy cần kiểm tra mức nước trong hệ thống, hoạt động của máy bơm chân

$$H = H_{ak} + H_{ck} + Z + (v_2^2 - v_1^2)/2g \quad (7)$$

trong đó Z - khoảng cách hai điểm đo giữa áp kế và chân không kế (với hệ thống thí nghiệm này, $Z=0$), v_1 , v_2 - vận tốc nước ở hai điểm đo tương ứng lối vào và ra bơm ở vị trí 1 và 2.

Mỗi lần thí nghiệm phải giữ vòng quay n không đổi, điều chỉnh lưu lượng thông qua độ mở van trên ống đẩy. Cột áp ở các điểm đo chân không kế (1) và áp kế (2) tương ứng trên sơ đồ Hình 3 để xây dựng đặc tính $H - Q$ với n không đổi, đặc tính công suất $N - Q$ tại các góc xoay cánh khác nhau trong dải từ -6° đến 6° .

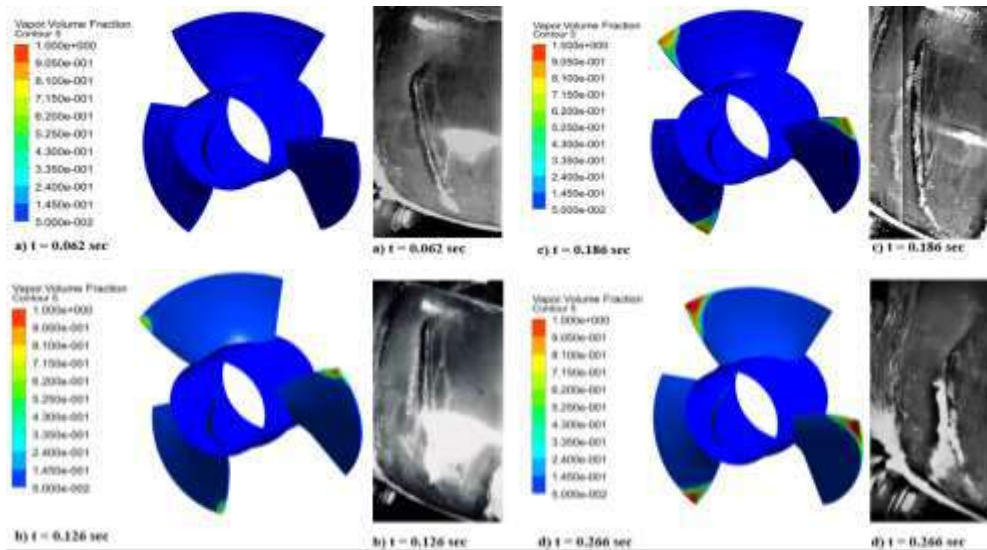


không, hệ thống van và hiệu chỉnh điểm 'O' của các thiết bị đo lường. Sau đó khởi động máy bơm và điều chỉnh qua van để đạt các trạng thái khảo nghiệm, theo dõi và ghi các thông số của hệ thống trên bàn điều khiển.

Thí nghiệm trên bơm mô hình được tiến hành tại 5 vị trí góc xoay cánh: 0° , -3° , -6° , $+3^\circ$ và $+6^\circ$. Tại mỗi vị trí góc xoay, tiến hành thí nghiệm đo đặc các thông số của bơm và sử dụng camera chụp ảnh quan sát các trạng thái của dòng chảy xâm thực.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

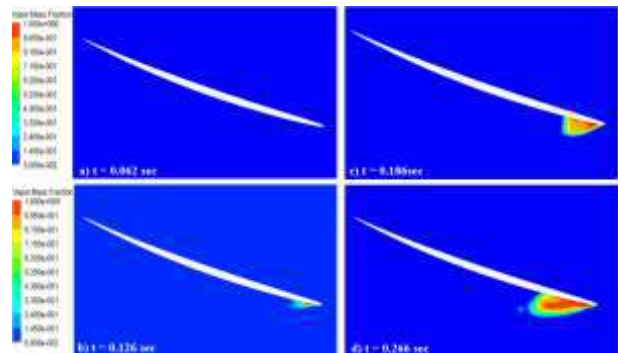
Các kết quả thu được qua nghiên cứu bằng mô phỏng và nghiên cứu thực nghiệm được sắp xếp theo kiểu so sánh hình ảnh thực nghiệm và mô phỏng được trình bày trong hình 5.



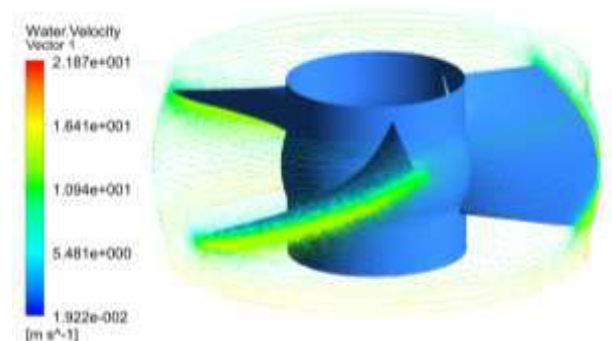
Hình 5: Xâm thực trong bánh công tác bơm hướng trục: so sánh giữa kết quả mô phỏng số và kết quả thực nghiệm

Kết quả thu được bằng mô phỏng số có tính tương đồng tốt với kết quả thực nghiệm. Cụ thể là về vị trí xuất hiện bọt khí đều ở mép vào, khe hở cánh và sự phát triển của vùng bọt khí theo thời gian. Có thể thấy hình dạng chính xác của vùng bọt khí trong thực nghiệm và trong tính toán không giống nhau, vì cấu trúc này dao động lớn theo thời gian và theo không gian.

Hình 6 cho thấy sự hình thành và phát triển vùng xâm thực theo thời gian tăng dần trên bánh công tác và trên biên dạng cánh 2D (hydrofoil). Kết quả cho thấy sau 0.062 giây, bọt khí không xuất hiện. Sau 0.126 giây bọt khí bắt đầu xuất hiện ở ba cánh bơm. Sau 0.186 giây thì sự phát triển khoang bọt khí tiếp tục tăng lên ở các mép vào của các cánh do áp suất tại đây thấp (nhỏ hơn giá trị áp suất hơi bão hòa $P_v=3175$). Sau 0.266 giây hình dạng khoang hơi phát triển hoàn toàn và giữ nguyên trạng thái. Phân hiển thị màu đỏ cho thấy bọt khí xuất hiện chủ yếu tại phần đầu vào mép cánh.



Hình 6. Sự phát triển của bọt khí xâm thực theo thời gian.



Hình 7: Phân bố vận tốc ở khe hở cánh

Hình 7 cho thấy hiện tượng dòng chảy ngược qua khe hở cánh do chênh áp hai bên mặt cánh. Chênh lệch áp suất càng lớn dòng chảy ngược này càng gia tăng. Dòng chảy này khi kết hợp với dòng xâm thực sinh ra tại mép cánh dẫn tới sự hỗn loạn tăng dần.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày các kết quả nghiên cứu sự hình thành và phát triển xâm thực trong bơm hướng trục tỷ tốc cao ($n_s \approx 1200$ v/ph) bằng mô phỏng số và thực nghiệm. Từ các kết quả nghiên cứu này có thể đưa ra một số kết luận như sau:

1- Kết quả thu được bằng mô phỏng số có tính tương đồng tốt với kết quả thực nghiệm về sự hình thành, phát triển vùng bọt khí (khoảng xâm thực) theo thời gian. Điều này cũng khẳng định độ tin cậy của các kết quả nghiên cứu bằng phương pháp mô phỏng.

2 - Căn cứ vào kết quả khảo sát xâm thực bằng thực nghiệm, kết hợp với các kết quả mô phỏng có thể bước đầu giải thích quá trình hình thành và phát triển xâm thực trong bơm như sau: Tại vùng áp suất thấp ($p_{\min} < p_{bh}$) ở mép vào phía mặt hút của cánh công tác (điểm góc nhọn của mép vào và tiết diện biên) xuất hiện các bọt khí xâm thực đầu tiên, các bọt khí này phát triển tạo ra các xoáy quần. Dòng chảy ngược qua khe hở do chênh áp hai bên mặt cánh cũng gây ra

xoáy quần. Khi sự kết hợp của các xoáy này đủ lớn sẽ gây ra hiện tượng tách thành tại khe hở đầu cánh, làm cho dòng chất lỏng xoáy quần pha trộn các bọt khí càng tăng, xâm thực càng mạnh thêm.

3- Áp suất thấp nhất trong khoang bánh công tác là tại điểm mép vào cánh và tiết diện biên (hay khe hở đầu cánh).

4- Chênh lệch áp suất hai bên mặt cánh tạo ra dòng chảy ngược tại khe hở đầu cánh, mật độ dòng này tăng khi chênh lệch áp suất tăng.

5- Bọt khí đầu tiên xuất hiện tại mép vào cánh phía hút và tại khe hở cánh, sau đó bọt này di chuyển dọc theo biên dạng cánh và được pha trộn bởi dòng chảy ngược dẫn tới xâm thực mạnh hơn tạo thành xoắn rồi kéo dài từ mép cánh này tới mép cánh sau theo chiều quay của bơm. Phía mặt đẩy không xuất hiện.

6- Dạng xâm thực chính là xâm thực mép cánh và xâm thực dòng chảy ngược (Tip vortex cavitation and Backflow cavitation)

7- Kết quả cho thấy rằng xâm thực mép cánh sẽ gây nên tổn thất thủy lực.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Mostafa NH, Adel M, "Effect of Blade Angle on Cavitation Phenomenon in Axial Pump". J Appl Mech Eng 1:112. doi:10.4172/2168-9873.1000112, 2012
- [2] Phillipe Dupont, "Numerical Prediction of Cavitation in Pumps", Sulzer Pump Ltd, Swiss, 2005
- [3] Masashi Fukaya et al, "Prediction of Cavitation Performance of Axial Flow Pump by using Numerical Cavitating Flow Simulation with Bubble Flow Model", Hitachi Industries Co. and Ltd University of Tokyo, 2003
- [4] Václav Uruba et al, "Experimental and Numerical Study on Vortical Structures and Their Dynamics in a Pump Sump", Water 2012, 14, 2039; <https://doi.org/10.3390/w14132039>, 2012
- [5] K Hosono1 et al, "Study on cavitation influence for pump head in an axial flow pump", Journal of Physics: Conference Series 656,012062 doi:10.1088/1742-6596/656/1/012062, 2015
- [6] A.A. LÔMAKIN, "Bơm li tâm và bơm hướng trục", NXB Khoa học kỹ thuật, 1971
- [7] Engineering Simulation Software, "ANSYS-CFX-Solver-Theory-Guide", 2018