

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÂM THỰC TRONG BÁNH CÔNG TÁC CỦA BƠM HƯỚNG TRỤC CÓ SỐ VÒNG QUAY ĐẶC TRƯNG CAO

AN EXPERIMENTAL STUDY OF CAVITATION IN IMPELLER OF AN AXIAL-FLOW PUMP WITH A HIGH- SPECIFIC SPEED

Trương Việt Anh^{1*}, Đỗ Hồng Vinh²

¹Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

²Viện Bơm và Thiết bị Thủy lợi

TÓM TẮT

Đặc điểm về xâm thực trong máy cánh dẫn luôn được quan tâm nghiên cứu để cải tiến thiết kế, vận hành hiệu quả. Các nghiên cứu trên mô hình máy để đưa ra dự báo xâm thực xảy ra thường dựa trên phương pháp nghiên cứu thực nghiệm hoặc mô phỏng số hoặc kết hợp cả hai phương pháp trên. Bài báo này, trình bày các kết quả nghiên cứu thực nghiệm khi vận hành máy bơm hướng trục có số vòng quay đặc trưng cao ($n_s \cong 1200$). Các máy bơm hướng trục phổ biến thường có $n_s < 1000$. Nghiên cứu này thực hiện trên mẫu thiết kế có n_s cao đang được quan tâm trong xu hướng cải tiến công nghệ hiện nay với mục tiêu nghiên cứu để thu nhỏ kích thước máy, giảm chi phí chế tạo và thích ứng chế độ làm việc cột áp thấp, lưu lượng lớn. Kết quả nghiên cứu này đã quan sát được xâm thực khu vực biên cánh bánh công tác và vùng xâm thực khi vận hành máy ở các góc xoay cánh từ -6° đến $+6^\circ$. Qua đó, cho phép áp dụng cho thực tiễn vùng vận hành hiệu quả. Nghiên cứu cũng kiểm chứng về công thức tính toán lý thuyết dự báo theo số xâm thực tới hạn δ_{th} và cho thấy công thức này vẫn phù hợp áp dụng với mẫu máy có $n_s \cong 1200$. Các kết quả nghiên cứu có thể áp dụng phục vụ phát triển cho lý thuyết thiết kế máy bơm hướng trục.

Từ khóa: Bơm hướng trục; Bơm thủy lực cánh dẫn; Xâm thực.

ABSTRACT

The cavitation aspects in turbomachines is always in the interest for researchers for improvement of its design and operation. The prediction of cavitation occurrence can be based on experimental research or numerical simulation methods or combination of the both aboved methods. This article presents the results of experimental study in a model of an axial flow pumps with a high-specific speed ($n_s \cong 1200$). The popular axial-flow pumps usually have $n_s < 1000$. This study is implemented with a turbomachine with a high value of n_s with the aim of minimizing the size of the machine, reducing manufacturing cost and adapting for low pressure, high flow working mode. As the results of this study, the cavitation in the impeller blade boundary area is observed and the cavitation area are determined when operating the machine at several blade's rotation angles from -6° to $+6^\circ$. Thereby allowing effective application to practical operating areas. The study also verified the theoretical calculation formula for prediction based on the critical cavitation number δ_{th} and showed that this formula is still suitable for applying to machine with $n_s \cong 1200$. The results can be applied for development of the theory of axial-flow pump's design.

Keywords: Axial-flow Pump, Turbomachine; Cavitation.



1. GIỚI THIỆU CHUNG

Xâm thực trong máy bơm hướng trục đã được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu trong nhiều năm qua nhằm phát triển các cải tiến trong thiết kế, công nghệ và nâng cao hiệu suất. Các chủ đề nghiên cứu chủ yếu tập trung ở các vấn đề như: Tìm hiểu bản chất vật lý của hiện tượng xâm thực và các điều kiện xảy ra xâm thực trong bơm; Đặc tính các dạng xâm thực trong bánh công tác và đưa ra đặc tính vận hành, đánh giá sự ảnh hưởng và đề xuất giải pháp vận hành hiệu quả và gia tăng tuổi thọ chi tiết. Phương pháp nghiên cứu có thể dựa trên mô phỏng số và thực nghiệm để dự đoán xâm thực. Mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu song các nghiên cứu về xâm thực trong máy bơm vẫn tiếp tục được quan tâm do tính đa dạng của các máy bơm cánh dẫn và kết cấu. Một số các công trình nghiên cứu tiêu biểu 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. Nghiên cứu này tiến hành thí nghiệm trên mô hình bơm hướng trục có số vòng quay đặc trưng cao ($n_s \cong 1200$), khảo sát vùng xâm thực để phân tích, đánh giá tác động của trạng thái xâm thực dưới ảnh hưởng của việc điều chỉnh góc xoay cánh và khả năng vận hành của máy bơm hướng trục hiệu quả.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU 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 1. 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 đo 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 áp lực H_{ak} ở ngay sau cửa ra BXCT, tính ra cột nước H theo công thức sau:

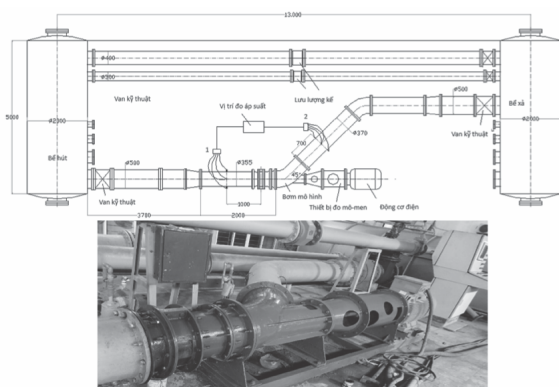
$$H = H_{ak} + H_{ck} + Z + (v_2^2 - v_1^2)/2g \quad (1)$$

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 dẫn. Cột áp ở các điểm đo chân không kế (1) và áp kế (2) tương ứng trên sơ đồ Hình 1 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° .

Các thông số chính cần đo đạc 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.



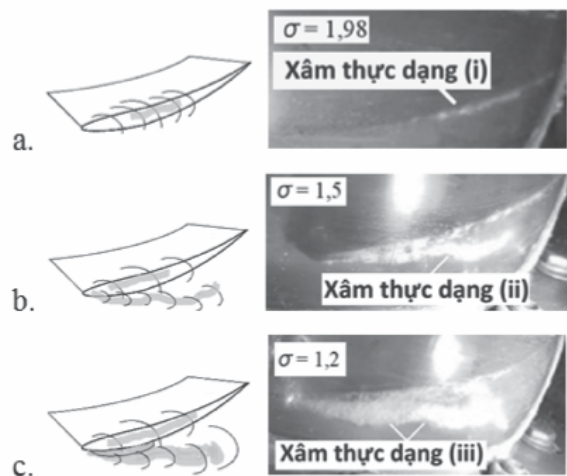
Hình 1. Hệ thống thí nghiệm máy bơm hướng trục
 $n_s \cong 1200 \text{ v/ph}$
(Viện Bơm và Thiết bị Thủy lợi)

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 đạc 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 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 điều khiển.

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



Hình 2. Quan sát các dạng xâm thực trong vùng bánh công tác bơm hướng trục
(Góc xoay cánh 0°)

Để đánh giá chất lượng xâm thực của máy bơm nói chung, người ta dùng hệ số xâm thực Thomat định nghĩa cho máy bơm [6]:

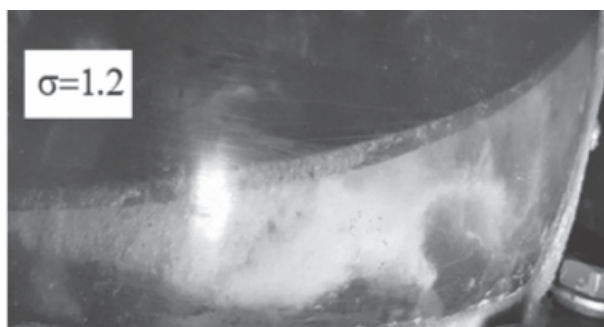
$$\sigma_1 = \frac{\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{p_{bh}}{\gamma}}{\frac{v_1^2}{2g}} \quad (2)$$

Như vậy, để xác định hệ số xâm thực của bơm ta phải xác định được các giá trị áp suất p_1 , vận tốc V_1 lấy tại điểm đo trước lối vào bánh công tác, áp suất hơi bão hòa $p_{bh} = f(T)$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Quan sát xâm thực

Tại vị trí góc xoay cánh 0 độ, hiện tượng xâm thực được quan sát và chụp bằng camera dưới ánh sáng đèn chớp tần số cao như ở Hình 2. Ứng với các giá trị số xâm thực ở trạng thái vận hành tương ứng và ta quan sát được các dạng xâm thực như sau:



a) Xâm thực tại góc xoay -3 độ, $\sigma=1,2$



b) Xâm thực tại góc xoay +3 độ, $\sigma=1,2$

Hình 3. Xâm thực dạng trong bánh công tác bơm hướng trục khi xoay cánh

(i) Xâm thực do tách thành ở mép sắc dọc biên cánh tại tiết diện biên: Do sự chênh áp 2 mặt cánh và khe hở thủy lực đầu cánh, chất lỏng dồn từ mặt áp suất cao sang mặt hút của cánh và tạo vùng áp suất thấp dọc biên cánh

do dòng chảy tách thành. Hiện tượng xâm thực này được quan sát thấy sớm nhất khi giá trị $\sigma=1,98$ trong Hình 2a.

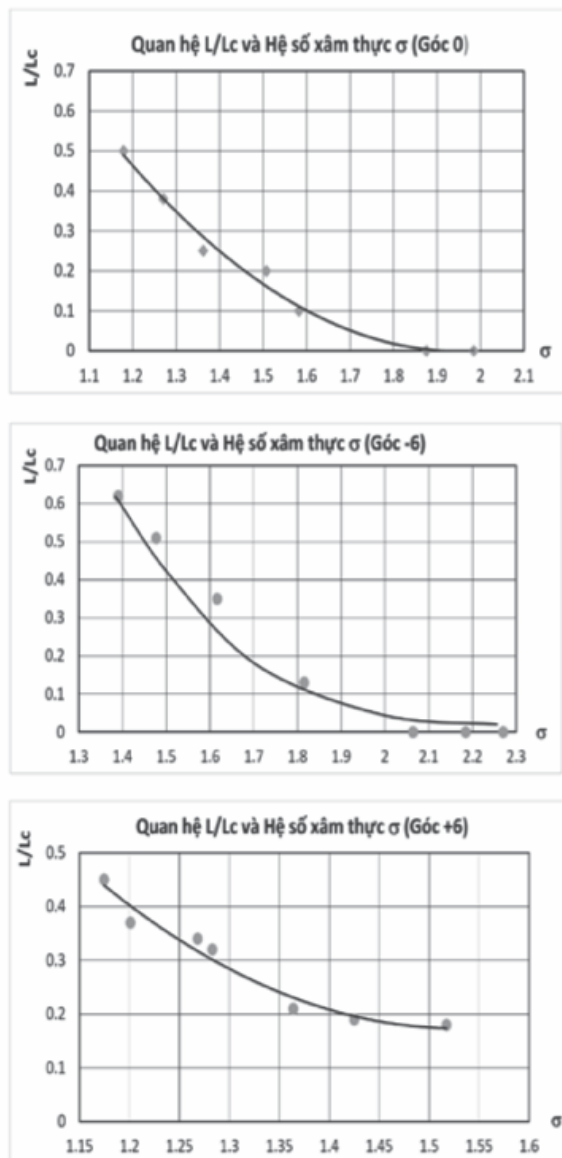
(ii) Xâm thực xoáy đỉnh cánh ngoài tiết diện biên: Quan sát cho thấy khi $\sigma = 1,6$, xâm thực bắt đầu xuất hiện dưới dạng xoáy đỉnh cánh gây ra bởi tương tác dòng chảy tách thành từ mũi đỉnh cánh (tiết diện biên) kết hợp sự ảnh hưởng của dòng chảy tạo bởi sự chênh áp suất giữa hai mặt cánh. Xoáy này trở thành dây xoáy do chuyển động quay của bánh công tác (Hình 2b).

(iii) Xâm thực mép vào cánh và xoáy đỉnh cánh phát triển: Khi tiếp tục vận hành ở giá trị σ thấp hơn, sự suy giảm áp suất trong buồng bánh công tác cùng với sự tăng tốc độ dòng chảy làm gia tăng cường độ xoáy và xâm thực dạng xoáy đỉnh cánh này càng phát triển. Kích thước lõi bọt khí và dây xoáy tăng và lan rộng về phía đuôi cánh.

Việc xoay các góc cánh để điều chỉnh chế độ làm việc của các bơm hướng trục cỡ lớn là biện pháp kỹ thuật khá phổ biến. Tuy nhiên, xâm thực là nguy cơ tiềm ẩn khi vận hành theo các chế độ xoay cánh, đặc biệt với bơm cỡ lớn. Trong nghiên cứu này, góc xoay cánh điều chỉnh trong dải -6 đến +6 độ có ảnh hưởng lớn về chất lượng thủy lực, gây ra các hiện tượng xâm thực phát triển hơn đáng kể so với vị trí thiết kế (góc xoay là 0 độ). Hình a cho thấy ở góc xoay cánh -3 độ, xâm thực phát triển mạnh trên phần mép vào cánh bánh công tác kết hợp sự phát triển của xoáy xâm thực đỉnh cánh. Bề mặt lưng cánh chịu ảnh hưởng lớn của xâm thực bề mặt, xuất phát từ sự tách thành ở mép vào cánh, đồng thời đám mây xâm thực phát triển bởi xoáy rồi đã được quan sát ở các nghiên cứu trước đây [1,3] cho thấy nguy cơ ăn mòn xâm thực mãnh liệt khi vận hành ở các giá

trị số xâm thực thấp ($\sigma=1,2$).

Ở chiều ngược lại, Hình b hiển thị ảnh có góc xoay cánh +6 độ cho thấy hiện tượng xâm thực dạng (iii) cũng xảy ra khá mãnh liệt, tuy nhiên, phạm vi xâm thực được quan sát cho thấy không mở rộng và phát triển mạnh bằng trường hợp xoay cánh ở chiều ngược lại (-3 độ).



Hình 4. Vùng xâm thực khi $\Delta\alpha$ thay đổi

3.2. Vùng xâm thực và kiểm chứng σ_{th}

Để xác định mức độ ảnh hưởng và phát triển của trạng thái xâm thực, vùng bọt khí xâm thực được đo trên hình ảnh quan sát và ước tính thông qua chỉ số L/L_c với L là chiều dài lớn nhất của vùng xoáy bọt khí dọc theo bề mặt cánh, L_c là chiều dài profile ở biên cánh bánh công tác. Dưới đây là các đặc tính vùng xâm thực xây dựng từ thực nghiệm (Hình 4). Thực tế có sự dao động do xoáy và tương tác dòng chảy ở khe hở thủy lực giữa vỏ bơm và biên bánh công tác, do đó việc quan sát bằng máy ảnh có những hạn chế nhất định bởi không thể quay video ở tốc độ cao.

Nếu so sánh ở cùng giá trị σ , có thể nhận thấy, vùng xâm thực phát triển mạnh hơn khi góc xoay cánh là giá trị âm nếu xét theo hệ số chiều dài không thứ nguyên L/L_c . Áp dụng lý thuyết tính toán của A.A Lomakin [1] cho máy bơm hướng trục, bằng số liệu đo đạc thực nghiệm, ta tiến hành tính toán các thông số hệ số cột áp K_H và số xâm thực tới hạn σ_{th} [6]:

$$K_H = \frac{H}{n^2 \cdot D^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{th} = \frac{0,0555}{K_H} + 0,7351 \frac{T}{L} + 0,2419 K_H \left(\frac{T}{L} \right)^2 \quad (4)$$

Điều kiện để xuất hiện xâm thực trong bơm là: $\delta_l < \delta_{th}$.

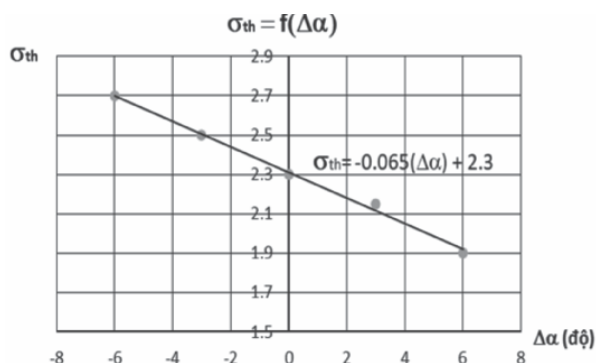
Qua đó, ta xây dựng được mối quan hệ giữa góc xoay cánh $\Delta\alpha$ và giá trị số xâm thực tới hạn σ_{th} và có kết quả ở Bảng 1 và Hình 5.

So sánh giữa kết quả quan sát xâm thực và sự xuất hiện của vùng xâm thực ở Hình 4, kết quả tính toán kiểm chứng cho thấy giá trị tính toán σ_{th} là phù hợp với kết quả thực nghiệm. Khi góc xoay cánh bằng 0 độ, xâm thực sẽ xảy ra khi $\sigma < 2,3$. Tương tự với các trạng thái ở các

góc xoay cánh khác, ta ước tính được số xâm thực giới hạn. Đồ thị trong Hình 5 cho kết quả thú vị về giá trị σ_{th} là hàm số tuyến tính với giá trị góc xoay.

Bảng 1. Giá trị K_{Htr} và σ_{th} tại các góc xoay cánh $\Delta\alpha$ khác nhau:

$\Delta\alpha$ (độ)	H_{tr} (m)	D (m)	n (v/ph)	K_{Htr}	σ_{th}
0	2.38	0.352	980	0.072	2.3
-3	2.24	0.352	980	0.068	2.5
-6	2.08	0.352	980	0.063	2.7
3	2.7	0.352	980	0.082	2.2
6	2.99	0.352	980	0.090	1.9



Hình 5. Quan hệ tuyến tính giữa σ_{th} và $\Delta\alpha$

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm về xâm thực trong mẫu bơm hướng trục cột áp thấp với số vòng quay đặc trưng cao. Các trạng thái xâm thực đã được khảo sát, đánh giá về vùng xâm thực và kiểm chứng giá trị σ_{th} . Kết quả nghiên cứu này đưa ra một số kết luận như sau:

- Hiện tượng xâm thực được quan sát có 3 dạng, xuất phát từ xâm thực dọc mép cánh do tương tác giữa vùng áp suất cao và áp suất thấp trên 2 bề mặt cánh tại khe hở thủy lực của bánh

công tác; Xâm thực dưới dạng xoáy xâm thực ở đầu mút đỉnh cánh trên tiết diện biên và xâm thực phát triển dọc theo bề mặt cánh.

- Hiện tượng xâm thực khi góc xoay cánh theo giá trị âm phát triển mạnh hơn đáng kể so với khi xoay cánh theo giá trị dương.

- Việc sử dụng công thức tính số xâm thực tới hạn σ_{th} trong vận hành máy bơm được kiểm chứng, có thể áp dụng với trường hợp máy bơm hướng trục có số vòng quay đặc trưng cao ($n_s \cong 1200$).

Ngày nhận bài: 26/5/2024

Ngày phản biện: 12/6/2024

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Mostafa NH, Adel M (2012) *Effect of Blade Angle on Cavitation Phenomenon in Axial Pump*. J Appl Mech Eng 1:112. doi:10.4172/2168-9873.1000112.
- [2]. Phillipe Dupont (2005), "Numerical Prediction of Cavitation in Pumps", Sulzer Pump Ltd, Swiss.
- [3]. Masashi Fukaya et al. (2003), "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.
- [4]. Václav Uruba et al. (2022), "Experimental and Numerical Study on Vortical Structures and Their Dynamics in a Pump Sump", Water 2022, 14(13), 2039; <https://doi.org/10.3390/w14132039>.
- [5]. K Hosono1 et al. (2015), "Study on cavitation influence for pump head in an axial flow pump", Journal of Physics: Conference Series 656 (2015) 012062 doi:10.1088/1742-6596/656/1/012062.
- [6]. A.A. LÔMAKIN (1971), "Bơm li tâm và bơm hướng trục", NXB. Khoa học kỹ thuật.