

KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA XÂM THỰC TRONG KHAI THÁC VẬN HÀNH CHÂN VỊT SERI B BẰNG PHƯƠNG PHÁP QUAN SÁT VẾT SƠN

A STUDY OF CAVITATION EFFECTS IN THE OPERATION OF A B-SERIES PROPELLER BY PAINTING TEST METHOD

Trương Việt Anh*, Lê Thị Thái
Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

*Email: anh.truongviet@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Để đảm bảo an toàn, tuổi thọ khai thác và hiệu suất thủy lực của chân vịt, xâm thực trong chân vịt tàu thủy luôn được quan tâm nghiên cứu trong nhiều năm qua. Hiện tượng xâm thực với sự “nổ” của các bọt khí/đám mây xâm thực tạo ra các xung áp suất cao có thể gây rung động, tiếng ồn ô nhiễm và đặc biệt là có thể gây ra phá hủy, ăn mòn bề mặt cánh. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm đặc tính xâm thực của mẫu chân vịt seri B khi vận hành ở các số vòng quay khác nhau, trong đó sử dụng kỹ thuật khảo sát qua vết sơn bị phá hủy để đưa ra các kết luận về vùng bề mặt cánh có nguy cơ bị ăn mòn, phá hủy bởi xâm thực. Các vùng nguy cơ bị ăn mòn xâm thực quan sát được tương ứng với các hiện tượng xâm thực xuất phát từ tương tác xoáy đỉnh cánh và xâm thực bề mặt do dòng chảy tách thành ở mép cánh mà đã được biết tới ở các nghiên cứu trước đây. Ở tốc độ vòng quay cao, xâm thực phát triển và tác động trên diện rộng của bề mặt cánh chân vịt seri B và tác động đến lực đẩy của chân vịt. Khi xâm thực phát triển, hệ số lực đẩy bị suy giảm mạnh. Nghiên cứu góp phần làm rõ cơ chế xâm thực tác động lên chân vịt dạng seri B.

Từ khóa: Chân vịt seri B; Xâm thực; Ăn mòn xâm thực; Phương pháp quan sát vết sơn.

ABSTRACT

To ensure the safety, service life and hydraulic efficiency of propellers, cavitation phenomena in ship propellers has always been interested to research over the years. The phenomenon of “implosion” of cavitation bubbles/clouds creates high pressure pulses that can cause vibration, noise pollution and especially cavitation erosive damage on the material surface of the propeller. This paper presents the experimental results in studying of the erosive cavitation damage in a B-series propeller model by using the painting test method to draw out the blade surface areas where is in possibility of erosive cavitation damage. The observed erosive areas is quite suitable with the cavitation phenomena caused by the tip vortex and the tip vortex flow separating from the leading edge of the blade as previous researchs. At high rotation speeds, erosive damage area develops and affects in a large area of the blade surface of the propeller. At developed cavitation condition, thrust coefficient of the propeller is declined significantly. The study contributes to clarifying the erosion mechanism in operation of the B series propeller.

Keywords: B-series propeller; Cavitation; Erosion damage; Painting test method.



1. GIỚI THIỆU CHUNG

Chân vịt seri B là một dạng thiết bị động lực sử dụng phổ biến trong phương tiện thủy với chức năng tạo lực đẩy khi vận hành tàu. Trong quá trình hoạt động, sự thay đổi trong dải rộng của tốc độ vòng quay chân vịt tạo ra sự thay đổi về chế độ dòng chảy bao cánh thường dẫn đến sự xuất hiện các hiện tượng xâm thực. Trong nhiều năm qua, các dạng xâm thực trong chân vịt tàu thủy nói chung, chân vịt seri B nói riêng được các nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng [1], [2], làm rõ cơ chế hình thành xâm thực xoáy đỉnh cánh, xâm thực ở mép vào cánh và dòng chảy bao tách thành, xâm thực bề mặt cánh dưới dạng “sheet/partial cavitation” và đám mây bọt xâm thực – cloud cavitation. Ở những tốc độ vòng quay lớn, cánh chân vịt được bao bọc bởi bọt khí siêu xâm thực (supercavitation) kết hợp đám mây xâm thực tạo ra sức phá hủy mạnh mẽ [3]. Sự ăn mòn, phá hủy của xâm thực đối với bề mặt cánh liên quan đến tuổi thọ, sức bền vật liệu cũng luôn là chủ đề quan trọng. Các nghiên cứu thường sử dụng kỹ thuật camera tốc độ cao quan sát vị trí và vùng phá vỡ của đám mây bọt khí xâm thực [4], quan sát bề mặt vật liệu [5] hay vết lớp phủ bề mặt bằng sơn hoặc lớp phủ vật liệu [6].

Nghiên cứu này sử dụng hệ thí nghiệm đơn giản để đánh giá vùng nguy cơ chịu sự ăn mòn, phá hủy của xâm thực và đặc tính lực đẩy của chân vịt theo tốc độ vòng quay và trạng thái xâm thực, chỉ ra các đặc điểm ảnh hưởng của xâm thực đối với mẫu cánh được khảo sát. Phương pháp sử dụng khảo sát vùng tác động của xâm thực qua vết sơn được áp dụng để dự báo nguy cơ xâm thực trong vận hành mẫu chân vịt dạng seri B.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

2.1. Hệ thống thử nghiệm

Phương án thí nghiệm được thiết lập thử với bể có mặt thoáng trình bày ở Hình 1. Để quan sát xâm thực, trên thành bể ngang với vị trí chân vịt, cửa sổ quan sát được tạo ra bằng thủy tinh hữu cơ dày 25 mm đảm bảo chịu được áp lực nước trong bể. Xâm thực được quan sát trực tiếp và thông qua kỹ thuật phủ sơn để tìm vết xâm thực phá hủy trên bề mặt cánh chân vịt.

Để đo lực đẩy chân vịt, ta sẽ bố trí động cơ tải chân vịt đặt trên một trục quay để có thể đo sức đẩy thông qua hệ phương trình mô-men. Thiết bị đo lực đẩy loadcell sẽ được trình bày ở phần thiết bị bể thử, nhóm nghiên cứu đã xây dựng phần mềm hiển thị trên máy tính khi đo đạc. Thí nghiệm tiến hành như sau:

(1) Quan sát trạng thái xâm thực bằng camera.

(2) Vận hành ở các chế độ vòng quay, khảo sát vùng nguy cơ chịu sự ăn mòn xâm thực bề mặt cánh bằng kỹ thuật quan sát vết sơn.

(3) Đo lực đẩy của chân vịt khi động cơ vận hành tại vận tốc khác nhau, qua đó xây dựng được đặc tính quan hệ giữa lực đẩy và trạng thái xâm thực khi vận hành. Thiết bị đo lực sử dụng cảm biến Loadcell PST-A của hãng Keli kiểu chữ Z, độ tin cậy và chính xác cao (sai số dưới 0,3%).

Mẫu chân vịt được thiết kế theo Seri B và chế tạo CNC bằng hợp kim nhôm như ở Hình 2. Các thông số về chân vịt xem ở Bảng 1. Để đánh giá về trạng thái xâm thực, nghiên cứu sử dụng số xâm thực Thomas dựa trên số vòng quay và đường kính chân vịt, xác định theo công thức sau:

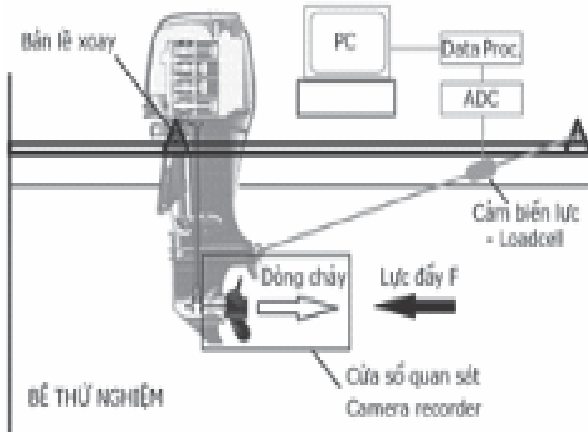
$$\sigma_n = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho \left(\frac{n}{60}\right)^2 D^2} \quad (1)$$

Trong đó, p là áp suất tĩnh theo độ sâu đặt chân vịt (tính theo vị trí trục chân vịt), $p_v = 3169$ [Pa] là áp suất hơi bão hòa của nước ở nhiệt độ thí nghiệm (nhiệt độ nước là 25°C), D [m] là đường kính chân vịt, vận tốc vòng của chân vịt n [v/ph], $\rho = 1000$ kg/m³ là khối lượng riêng của nước.

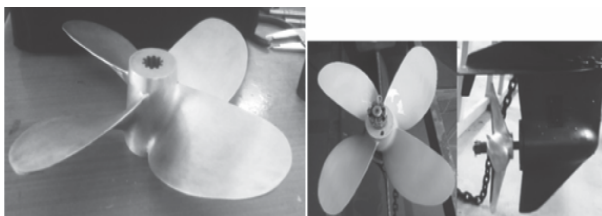
Hệ số lực đẩy chân vịt được tính toán theo công thức:

$$K_t = \frac{F_{cv}}{\rho \left(\frac{n}{60}\right)^2 D^4} \quad (2)$$

Trong đó, K_t là hệ số lực đẩy chân vịt, F_{cv} [N] là lực đẩy chân vịt.



Hình 1. Sơ đồ thí nghiệm



Hình 2. Mẫu chân vịt seri B

Bảng 1. Các thông số hình học chân vịt

Thông số	Trị số
Đường kính chân vịt D (m)	0,245
Đường kính bầu	0,04
Số cánh Z	4
Vật liệu	Alumi
Dải tốc độ vòng quay chân vịt n [v/ph]	500-3000 [v/ph]

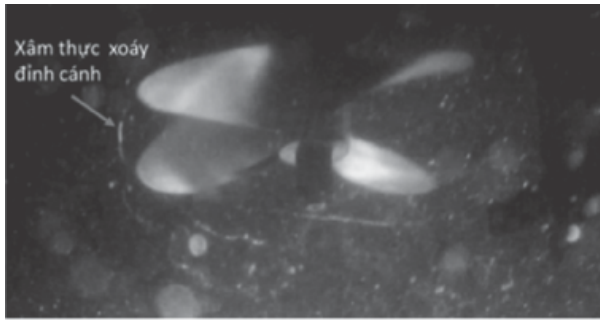
Thí nghiệm được tiến hành với việc điều khiển động cơ theo % tay ga để chân vịt chạy ở các tốc độ vòng quay khác nhau trong dải từ 500 v/ph đến 3000 v/ph, kết hợp quan sát bằng camera ở chế độ 60 hình/giây và đo đặc lực đẩy bằng loadcell (PST-A Keli). Thí nghiệm quan sát vết xâm thực sử dụng kỹ thuật sơn phủ bề mặt cánh chân vịt cho mỗi lần vận hành. Sau thời gian vận hành 2 phút, mẫu cánh được mang ra để quan sát vết vùng sơn bị phá hủy, đánh giá tỷ lệ bề mặt vùng bị phá hủy.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

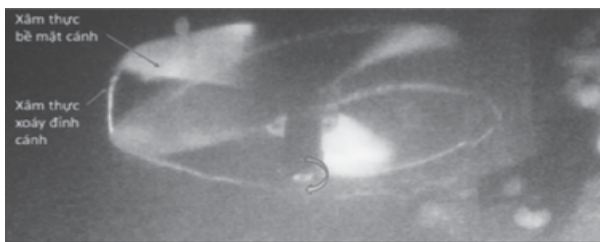
3.1. Quan sát đặc điểm dòng chảy xâm thực

Trong điều kiện thí nghiệm còn hạn chế, việc sử dụng camera chụp ảnh chỉ quan sát được rõ hiện tượng xâm thực xoáy đỉnh cánh. Kết quả cho thấy xâm thực không xuất hiện khi tốc độ vòng quay dưới 760 v/ph. Bắt đầu từ tốc độ vòng quay 760 v/ph, xâm thực xoáy đỉnh cánh bắt đầu xuất hiện với vết xoáy xâm thực liên tục kéo dài khoảng $\frac{1}{4}$ vòng đường kính đỉnh chân vịt (Hình 3a).



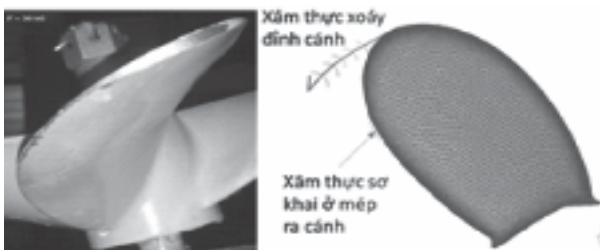


(a) Xâm thực xoáy đỉnh cánh bắt đầu xuất hiện ở $n = 760$ v/ph, $\sigma_n = 20,1$

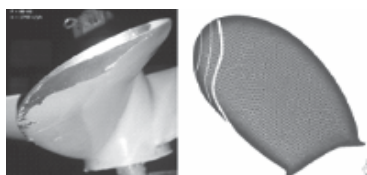


(b) Xâm thực xoáy đỉnh cánh bắt đầu xuất hiện ở $n = 1285$ v/ph, $\sigma_n = 7,03$

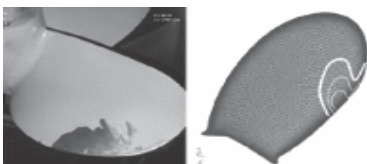
Hình 3. Quan sát xâm thực bằng camera



(a) $n = 840$ v/ph, $F_{cv} = 245$ N, $\sigma_n = 16,5$

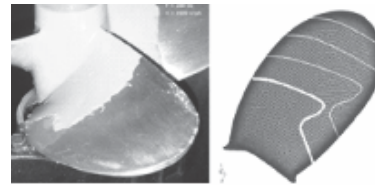


Lưng cánh

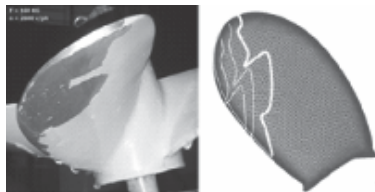


Bụng cánh

(b) $n = 1700$ v/ph, $F_{cv} = 653,7$ N; $\sigma_n = 4,02$



Bụng cánh



Lưng cánh

(c) $n = 2600$ v/ph, $F_{cv} = 1307,5$ N; $\sigma_n = 1,72$

Hình 4. Vùng chịu tác động của xâm thực theo vết sơn trên cánh chân vịt

Khi tốc độ vòng quay chân vịt tăng lên, xâm thực xoáy đỉnh cánh phát triển và kéo dài vết xâm thực kéo dài vết hướng hạ lưu (Hình 3b). Tuy nhiên, khi chân vịt quay tốc độ cao và xâm thực phát triển mạnh thì việc quan sát bằng camera khó khăn, nhất là xâm thực trên bề mặt cánh.

Khắc phục nhược điểm của camera, ta sử dụng phương pháp phủ sơn và quan sát vết. Qua đó có thể xác định được trạng thái xâm thực và vùng xâm thực tác động trên bề mặt cánh. Trước khi thí nghiệm, chân vịt được phủ kín và đều lớp sơn mịn (Hình 3). Việc thí nghiệm vận tiến hành ở các giá trị vận tốc quay chân vịt trong dải từ 500 v/ph đến tối đa 3000 v/ph. Ở mỗi lần thử nghiệm, thời gian vận hành chân vịt tại giá trị vận tốc là 2 phút. Khi chưa có xâm thực bề mặt ($n < 840$ v/ph, $\sigma_n > 16,5$), lớp sơn không bị bong tróc. Khi bắt đầu có xâm thực trên bề mặt cánh, kết quả dòng chảy xâm thực đã để lại vết phá hủy lớp sơn bảo vệ bề mặt.

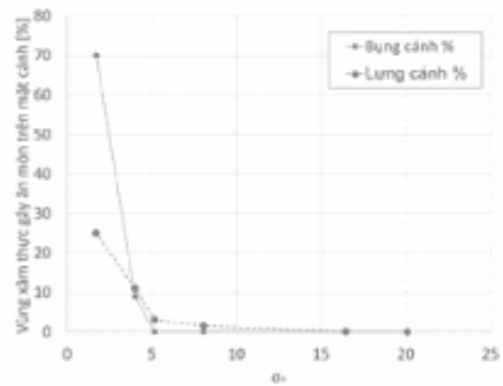
Quá trình phát triển của xâm thực bắt đầu từ xoáy đỉnh cánh và bọt khí xuất phát từ xâm thực ở mép vào cánh rồi bị phá vỡ ở vùng

lưng mép ra đỉnh cánh ở số xâm thực $\sigma_n = 16,5$ (Hình 4a) và tiếp tục phát triển khi σ_n tiếp tục giảm. Ở Hình 4b, khi $\sigma_n = 4,02$, có thể thấy xâm thực trên mẫu chân vịt xuất phát từ mép vào cánh và vùng phá vỡ loang rộng dần ra 2 mặt cánh theo dạng tấm và các đám mây xâm thực tách ra từ xâm thực dạng này đã gây ra vùng phá hủy ở vùng mép ra của cả hai mặt cánh.

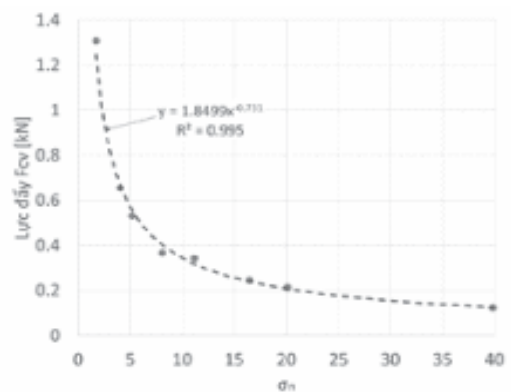
Hình 4c là hình ảnh vết ăn mòn xâm thực trên bề mặt cánh chân vịt khi $\sigma_n = 1,72$ và tốc độ vòng quay $n = 2600$ v/ph. Có thể thấy vùng nguy cơ ăn mòn chiếm đến xấp xỉ 70% bề mặt đáy của cánh (bụng cánh) và gần 30% diện tích bề mặt lưng cánh ở phía mép ra. Việc xác định diện tích có thể có sai số nhất định, nhưng kết quả khảo sát qua vết sơn cho phép dự báo được xu thế phát triển vùng bề mặt cánh có nguy cơ bị phá hủy xâm thực ở Hình 5. Có thể thấy, vùng vết sơn bị phá hủy ở mặt bụng cánh phủ rộng khi xâm thực phát triển và rộng hơn đáng kể so với ở lưng cánh.

3.2. Đặc tính động lực đẩy

Để đánh giá đặc sự ảnh hưởng của xâm thực đối với hiệu quả tạo lực đẩy của chân vịt, ta tiến hành đo lực kéo ở các chế độ động vòng quay chân vịt thay đổi như đã trình bày về hệ thống thí nghiệm ở mục 2, Hình 1. Kết quả đo lực đẩy chân vịt F_{cv} cho thấy quan hệ hàm số mũ theo giá trị số xâm thực thể hiện ở Hình 6. Khi giá trị $\sigma_n < 10$, các giá trị lực đo trong thực tế có sự dao động. Nguyên nhân có thể xuất phát chính từ sự không ổn định do xâm thực phát triển mà minh chứng là sự loang rộng của vùng vết sơn bị phá hủy đã trình bày ở mục 3.1.



Hình 5. Ước tính dự báo vùng nguy cơ ăn mòn xâm thực trên cánh chân vịt

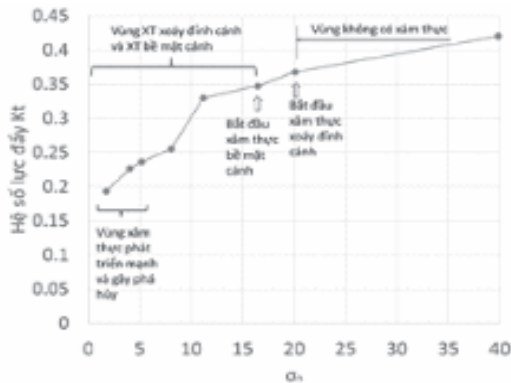


Hình 6. Quan hệ lực đẩy và hệ số xâm thực

Khi giá trị $\sigma_n = 1,72$, trạng thái xâm thực khi đó ứng với vết sơn bị phá hủy loang rộng tới 70% bề mặt bụng cánh. Sự phát triển bao phủ của xâm thực trên mặt cánh giúp ma sát thủy động trên bề mặt, qua đó giảm lực cản để chân vịt có thể gia tăng lực đẩy. Hiệu ứng này có lợi cho các chân vịt ứng dụng xâm thực để tăng hiệu quả lực đẩy của chân vịt ở tốc độ vòng quay lớn. Tuy nhiên, xâm thực phát triển có thể gia tăng nguy cơ phá hủy xâm thực và làm giảm tuổi thọ, phá hủy chi tiết cánh, và là vấn đề tiếp tục cần nghiên cứu để tối ưu thiết kế.

Hình 7 là mối quan hệ giữa hệ số lực đẩy K_t và số xâm thực σ_n . Khi $\sigma_n < 10$, sự phát triển của xâm thực làm giảm hiệu suất của lực đẩy đáng kể. Mặc dù khi xâm thực phát triển, 

lực đẩy có thể gia tăng như ở đồ thị Hình 6, nhưng về hiệu quả năng lượng thông qua hệ số K_t cho thấy sự suy giảm đáng kể. Có thể xác định giá trị của hệ số lực đẩy thông qua quan hệ hàm số mũ.



Hình 7. Đặc tính quan hệ giữa hệ số lực đẩy K_t và số xâm thực

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tiến hành thí nghiệm khảo sát về vùng ảnh hưởng của xâm thực có thể gây nguy cơ phá hủy bề mặt cánh, kết hợp đo lường lực đẩy của chân vịt ở các tốc độ vòng quay khác nhau. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra một số kết luận sau:

(i) Xâm thực đỉnh cánh bắt đầu xuất hiện ở $\sigma_n = 20,1$, xâm thực bề mặt cánh bắt đầu phát triển khi $\sigma_n = 16,5$; trong khoảng $\sigma_n > 5$, nguy cơ phá hủy bởi xâm thực chưa đáng kể;

(ii) Khi $\sigma_n \leq 5$, xâm thực trên bề mặt cánh bắt đầu phát triển và tác động phá hủy. Theo vết sơn, vùng chịu tác động ở mặt lưng sớm hơn ở mặt bụng và tập chung ở khu vực mép ra cánh chân vịt;

(iii) Khi $\sigma_n \leq 1,7$, xâm thực gây tác động phá hủy rộng trên hầu như toàn bộ bề mặt bụng cánh (70% bề mặt), vùng tác động này rộng hơn đáng kể so với mặt lưng cánh (25% bề mặt);

(iv) Đối với mẫu chân vịt seri B được

khảo sát, quan hệ giá trị lực đẩy của chân vịt có thể xác định theo hàm số mũ của số xâm thực để tính toán gần đúng theo công thức:

$$F_{cv} = 1.85\sigma_n^{-0.731}$$

Nghiên cứu góp phần làm rõ cơ chế xâm thực có tác động phá hủy lên cánh chân vịt dạng seri B. Với phương pháp vết sơn, kết quả hiện tại đang là dự báo ban đầu về vùng chịu ảnh hưởng xâm thực. Các nghiên cứu tiếp theo có thể xem xét về cường độ và thời gian xâm thực tác động để làm rõ các vấn đề vật liệu, sức bền, tuổi thọ chi tiết cánh dưới sự ảnh hưởng, tác động của xâm thực. ♦

Ngày nhận bài: 20/5/2025

Ngày phản biện: 10/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Andreas Peters et al., "Numerical prediction of cavitation erosion on a ship propeller in model- and full-scale". Wear, Volumes 408-409, Aug., 2018, Pages 1-12.
- [2]. Yanan Wang et al., "Effect of Blade Number on Tip Vortex Cavitation of Propeller". J. Mar. Sci. Eng. 2025, 13(5), 915; <https://doi.org/10.3390/jmse13050915>.
- [3]. Alessandro Capone et al., "Flow and Cavity Measurements in a Super-Cavitating Propeller". J. Mar. Sci. Eng. 2024, 12, 243. <https://doi.org/10.3390/jmse12020243>.
- [4]. Afaq Ahmed Abbasi et al., "Experimental analysis of blade root cavitation erosion on set of model propellers". Ocean Engineering, Volume 311, Part 1, 1 November 2024, 118766.
- [5]. Bu-Geun Paik et al., "Test method of cavitation erosion for marine coatings with low hardness". Ocean Engineering, Volume 38, Issue 13, September 2011, Pages 1495-1502.
- [6]. Muhammad Yusvika et al., "Achievements in Observation and Prediction of Cavitation: Effect and Damage on the Ship Propellers". 6th International Conference on Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (ICIMECE 2020), Procedia Structural Integrity 27 (2020), 109-116.