

# NGHIÊN CỨU XÂM THỰC TRONG HỆ THỐNG CHÂN VỊT – BÁNH LÁI TÀU THỦY KHÍ THAY ĐỔI NỒNG ĐỘ KHÍ BẰNG MÔ PHỎNG SỐ 3D

A 3D SIMULATION STUDY OF CAVITATION OF SHIP'S PROPELLER – RUDDER  
SYSTEM AT SOME DIFFERENT AIR CONCENTRATION

PGS, TS. Lê Thị Thái  
Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

## TÓM TẮT

*Hiện tượng xâm thực thường ảnh hưởng đến đặc tính làm việc của chân vịt và có thể gây thiệt hại cho hệ thống thiết bị đẩy. Để khắc phục hiện tượng này, cần phải biết và hiểu được phạm vi, cơ chế hoạt động của xâm thực để có thể lựa chọn trong vận hành. Bài báo này, tính toán và khảo sát xâm thực cho hệ chân vịt - bánh lái bằng mô phỏng sử dụng lý thuyết tính toán là phương trình liên tục, phương trình Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) và mô hình xâm thực Schnerr - Sauer có tính đến sự thay đổi nồng độ pha hơi trên mô hình xâm thực 3D. Kết quả đã đánh giá, dự báo được sự ảnh hưởng của hàm lượng bọt khí tới hiệu suất làm việc của hệ chân vịt – bánh lái trong thiết bị đẩy tàu thủy.*

**Từ khóa:** *Đặc tính thủy động; Xâm thực; CFD.*

## ABSTRACT

*Cavitation phenomenon usually affects on the propeller performance characteristics and may cause damage to the propulsion system. To overcome this phenomenon, it is necessary to know and understand the scope and mechanism of cavitation in order to choose the operating mode. This paper investigates the cavitating flow in the propeller - rudder system by simulation using computational theory, such as, Continuous equations, Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations (RANS) and Schnerr - Sauer cavitation model with the change in air concentration on 3D invasion model. As a result, the effect of air content on the performance of the propeller system - the rudder in the ship propulsion device is estimated.*

**Keywords:** *Propeller, rudder, cavitation, CFD.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chân vịt và bánh lái khi làm việc trong chất lỏng đều có khả năng bị xâm thực trong quá trình vận hành ở tốc độ cao. Ở một ngưỡng tốc độ quay và độ sâu nhất định, áp suất cục bộ tại vùng dòng chảy tách thành trên mặt cánh suy giảm đến áp suất hóa hơi, xâm thực bắt đầu xảy ra ở trạng thái sơ khai với các bọt khí nhỏ xuất hiện ở đầu cánh. Khi chân vịt tăng tốc độ quay, vùng áp suất hóa hơi mở rộng và tạo ra các dạng xâm thực riêng phần, xâm thực tằm loang phủ trên bề mặt cánh. Khi chân vịt đạt tới giá trị tốc độ quay cao, hiện tượng sủi bọt có thể bao trùm cả 2 mặt hút và đẩy của cánh gọi là trạng thái siêu xâm thực [1].

Đối với bánh lái được đặt sau chân vịt, tốc độ dòng bao cánh bánh lái dưới tác động của dòng theo và luân đẩy của chân vịt cũng được xét đến trong cơ chế tạo xâm thực tại bánh lái. Sự tương tác chân vịt - bánh lái, vì vậy gây ảnh hưởng chung đến đặc tính hiệu quả làm việc của chân vịt và hệ thiết bị đẩy.

Nội dung của nghiên cứu này sẽ trình bày nghiên cứu, mô phỏng dòng xâm thực qua hệ thống thiết bị đẩy. Từ đó có thể đánh giá được ảnh hưởng của hiện tượng xâm thực đến hiệu suất làm việc của hệ thống thiết bị đẩy nói chung.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ CÔNG CỤ MÔ PHỎNG SỐ CFD

Cơ sở lý thuyết

Phương pháp tính toán được sử dụng là phương pháp phần tử hữu hạn mà trong đó các phương trình cơ bản là phương trình liên tục và phương trình Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). Mô hình xâm thực được sử

dụng là mô hình Schnerr - Sauer được đưa ra như sau [2,3,4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \tag{2.2}$$

Phương trình cho phần trăm thể tích hơi được đưa ra là:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_1 \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_1 \rho_v \vec{V}) = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{D\alpha_1}{Dt} \tag{2.3}$$

Tỷ lệ thay đổi pha được thể hiện bởi phương trình sau:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_1 (1 - \alpha_1) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3\rho_l}} \tag{2.4}$$

Trong đó:

- $\rho$ : Mật độ pha hỗn hợp;
- $\rho_l, \rho_v$ : Mật độ pha lỏng và mật độ pha hơi;
- $P_v$ : Áp suất pha hơi (3540Pa được đặt trong bài toán này);
- $u$ : Vận tốc;
- $P$ : Áp suất tĩnh;
- $t$ : Thời gian;
- $\mu_{eff}$ : Hiệu ứng nhớt;
- $R_B$ : Bán kính bóng hơi.
- $\alpha_1$ : Tỷ lệ phần trăm pha hơi:

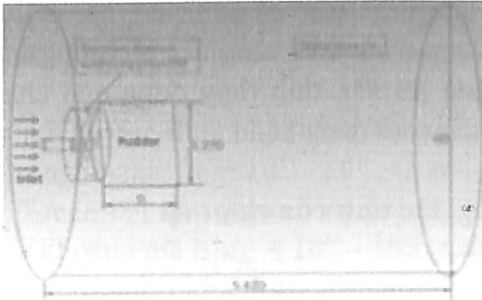
$$\alpha_1 = \frac{n_b \frac{4}{3} \pi R_B^3}{1 + n_b \frac{4}{3} \pi R_B^3}$$

Mô hình dòng rối được sử dụng cho bài toán này là mô hình k-ε.

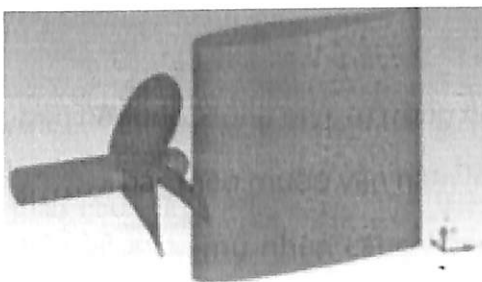
Mô hình hình học và mô hình lưới

Ansyes Icem CFD được sử dụng để tạo mô hình lưới trong bài toán này. Sử dụng các

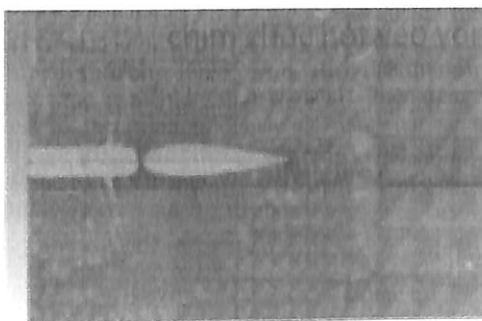
kỹ thuật chia nút lưới phù hợp với các mặt cánh cong trước khi chia lưới toàn vùng để tập trung mật độ cần thiết ở những khu vực cần độ chính xác cao. Hệ thống lưới phi cấu trúc gồm khoảng 1,700,000 phần tử lưới tứ diện.



Hình 2.1: Mô hình hình học



Hình 2.2: Lưới mặt trên chân vịt và bánh lái



Hình 2.3: Lưới mặt theo mặt cắt phương  
Điều kiện biên

Các điều kiện biên được sử dụng trong bài toán này là:

- Đầu vào: Pressure inlet (với giá trị áp suất động lượng 15,390 kPa);

- Tốc độ vòng quay của chân vịt: 200 vòng/phút;

- Độ sâu chân vịt: 3,1m;

- Số xâm thực  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{P_{ref} - p_v}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2}$$

Với  $p_{ref}$  là áp suất tham chiếu,  $p_v$  là áp suất hơi bão hòa của chất lỏng,  $U_{\infty}$  là vận tốc tham chiếu (hay vận tốc của dòng không nhiễu) và  $\rho$  là khối lượng riêng của chất lỏng. Trong trường hợp kiểm tra của chúng ta, áp suất tham chiếu được chọn là 0 Pa tại đầu ra và vận tốc tham chiếu là 5.48m/s tại đầu vào. Thông thường theo thực nghiệm, số xâm thực phụ thuộc áp suất cục bộ. Trong tính toán này, áp suất hơi bão hòa được điều chỉnh để khớp với số xâm thực đã chọn là 1 bằng cách đặt  $p_v = -18$  kPa.

- Miền tính toán được chia làm 2 phần, phần tĩnh và phần quay ngăn cách với nhau bởi các mặt phân cách (interface) để đảm bảo cho bài toán lưới trượt khí chân vịt quay; toàn bộ chân vịt sẽ chuyển động cùng vận tốc so với phần lưới động. Phần trụ phía trước và sau của chân vịt được chọn là vùng lưới tĩnh. Các phần còn lại ở phía xa của chân vịt được đặt điều kiện “free slip wall” để tránh các ảnh hưởng theo chiều ngược lại tới chân vịt.

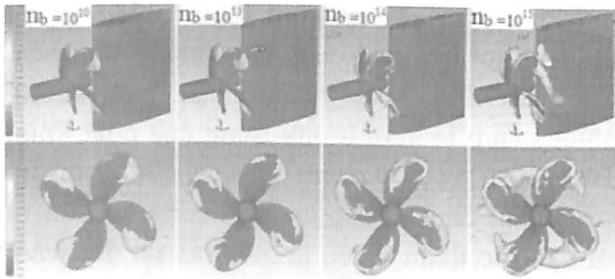
### 3. CÁC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Mật độ khí trong nước là một trong những yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến sự hình thành và phát triển xâm thực. Để đánh giá sự ảnh hưởng của nồng độ khí, giá trị mật độ khí trong mô hình xâm thực được thay đổi từ  $10^{10}$  đến  $10^{15}$ . Trường hợp không có bọt khí (mật độ ban đầu bằng 0) cũng được tiến hành

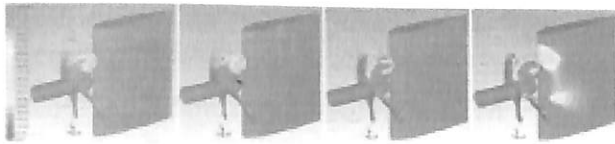
khảo sát. Trên cơ sở đó sẽ đánh giá được sự ảnh hưởng của xâm thực đến hiệu quả năng lượng của thiết bị đẩy.

**Ảnh hưởng của sự thay đổi mật độ khí**

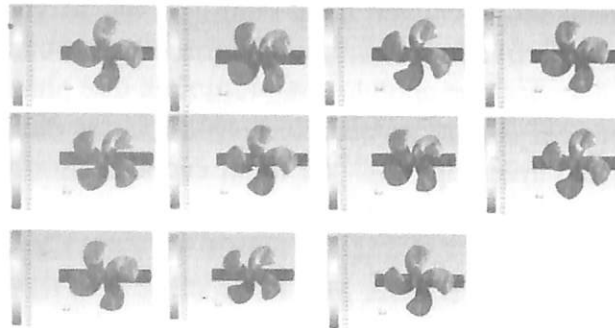
Bước thời gian được thiết lập là 0,83 ms cho mỗi bước di chuyển của cánh, tương ứng với thời gian chân vịt quay một độ.



Hình 3.1: Dự đoán xâm thực bởi phần trăm thể tích hơi ( $\sigma: 1$ )



Hình 3.2: Sự phân bố mật độ hơi ( $\sigma: 1$ )



Hình 3.3: Xâm thực trên mặt hút chân vịt trong một chu kỳ vòng quay ( $\Delta t = 7,5 \text{ ms}$ ,  $n_b = 10^{13}$ ,  $\sigma: 1$ )

Kết quả mô phỏng cho thấy xâm thực xuất hiện trên bề mặt chân vịt. Có hai loại xâm thực, xâm thực từng phần tại mép vào và xâm thực tằm trên mặt hút gần mép thoát. Vùng xâm

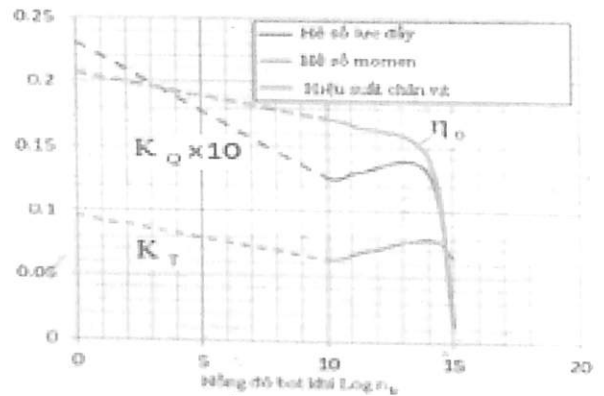
thực và kích thước xâm thực gia tăng cùng với sự tăng của nồng độ bọt khí (Hình 3.1).

Trường hợp nồng độ khí bằng  $10^{15}$  xâm thực phát triển mạnh không những trên bề mặt bánh lái mà lan ra về phía sau chân vịt làm xuất hiện xâm thực trên cả bánh lái. Về mặt quan sát, rất dễ dàng thấy rằng nếu số lượng mật độ bọt tăng thì đặc tính thủy động của chân vịt cũng thay đổi đáng kể.

**Đường đặc tính của chân vịt**

Đường đặc tính của dòng qua thiết bị đẩy ảnh hưởng bởi xâm thực được chỉ ra như sau:

$$\eta_0 = \frac{T V_A}{P_D} = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi}$$



Hình 3.4: Đồ thị đường đặc tính chân vịt theo nồng độ bọt khí

Để đánh giá ảnh hưởng của nồng độ khí với điều kiện hoạt động của hệ thống thiết bị đẩy. Các thông số thủy động của  $K_T$ ,  $K_Q$  và hiệu suất làm việc của chân vịt  $\eta_0$  được tính toán từ kết quả mô phỏng ở các trường hợp tương ứng.

Nhìn tổng thể, nồng độ khí khó hòa tan có sẵn trong nước làm suy giảm hiệu suất của chân vịt. Trong vùng khảo sát ảnh hưởng của

nồng độ khí, khi tăng nồng độ khí từ  $n_b = 10^{10}$  đến  $n_b = 10^{13}$ , xâm thực có phát triển hơn không nhiều nhưng hiệu suất chân vịt giảm 5%, mặc dù trong khoảng này, các thông số thủy động chân vịt gồm hệ số mô-men  $K_T$  và hệ số lực đẩy  $K_Q$  tăng. Điều này cho thấy có sự ảnh hưởng do sự tương tác dòng giữa chân vịt và bánh lái.

Khi xâm thực phát triển đáng kể, tương ứng trong khoảng  $n_b = 10^{13} - 10^{14}$ , hệ số lực đẩy và mô-men bắt đầu giảm cùng hiệu suất. Đặc biệt, ở khoảng giá trị  $n_b = 10^{14} - 10^{15}$ , xâm thực phát triển mạnh và hiệu suất của chân vịt giảm đột ngột xuống giá trị gần 0.

#### 4. KẾT LUẬN

Với việc mô phỏng số mô hình 3D, nghiên cứu đã làm rõ ảnh hưởng của mật độ khí tới hiệu suất của hệ thống đẩy. Kết quả tính toán cho thấy sự gia tăng phát triển xâm thực trên bề mặt cánh chân vịt và vùng mép vào bánh lái khi nồng độ khí tăng. Ảnh hưởng của dòng xâm thực với mật độ khí khác nhau qua hệ thống đẩy tàu được khẳng định. Trong vùng khảo sát ảnh hưởng của nồng độ khí, khi tăng nồng độ khí từ  $n_b = 10^{10}$  đến  $n_b = 10^{13}$ , xâm thực có phát triển không mạnh nhưng hiệu suất chân vịt giảm 5%. Khi nồng độ khí vượt giới hạn mật độ  $10^{15}$ , chân vịt phát triển mạnh, hiệu suất chân vịt suy sụp và giảm tới gần 0, có thể gây nguy hại trong quá trình vận hành. Sự tương tác giữa chân vịt và bánh lái khá đáng kể khi trạng thái xâm thực thay đổi do ảnh hưởng nồng độ khí và sẽ là chủ đề cần tiếp tục nghiên cứu thêm. ❖

Ngày nhận bài: 08/6/2019

Ngày phản biện: 18/6/2019

#### Tài liệu tham khảo:

- [1]. Trần Công Nghị (2003); *Thiết kế tàu thủy*, NXB. Đại học Quốc gia, Thành phố Hồ Chí Minh.
- [2]. Nguyễn Phước Hoàng, Phạm Đức Nhuận, Nguyễn Thạc Tân; *Thủy lực và máy thủy lực* (1979). NXB. Đại học và trung học chuyên nghiệp, Hà Nội.
- [3]. Lê Thị Thái, Lê Quang, Lê Thanh Tùng (2012); *Tính toán dòng chảy có xâm thực bao quanh bánh lái tàu thủy (NACA0018)*, tuyển tập công trình Hội nghị Khoa học cơ học thủy khí toàn quốc, Nha Trang, ISSN 1859-4182.
- [4]. Hanseong Lee et al, "Numerical modeling of rudder sheet cavitation including propeller/rudder interaction and the effects of a tunnel". Ocean Engineering Group The University of Texas at Austin, USA.lee@mail.utexas.edu. Fifth International Symposium on Cavitation – Osaka, Japan, 11.2003.
- [5]. ANSYS FLUENT 15.0 User's Guide.