

# NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG SỐ BIẾN DẠNG CỦA CÁNH NGẦM TÀU CAO TỐC TRONG QUÁ TRÌNH VẬN HÀNH

## NUMERICAL SIMULATION FOR DEFORMATION OF HYDROFOIL WING IN OPERATING CONDITIONS

MAI THANH KIỀU, PHẠM THỊ THANH HƯƠNG, PHẠM VĂN SÁNG\*

Viện Cơ khí động lực, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Email liên hệ: sang.phamvan@hust.edu.vn

### Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu tính toán mô phỏng sự tương tác giữa dòng chảy và cánh ngầm tại các vận tốc làm việc khác nhau. Bài toán tương tác rắn - lỏng hai chiều giữa cánh ngầm và dòng chảy có mặt thoáng qua cánh ngầm được mô phỏng. Giá trị và sự biến đổi theo thời gian của lực cản, lực nâng tác dụng lên cánh ngầm, biến dạng của cánh ngầm và ảnh hưởng của biến dạng tới lực tương tác tính toán, mô phỏng tại các vận tốc tàu khác nhau. Kết quả cho thấy sự phụ thuộc của lực cản, lực nâng, biến dạng cánh ngầm vào vận tốc tàu và độ chiều sâu của cánh so với mặt thoáng.

**Từ khóa:** Cánh ngầm, CFD, phương pháp biên.

### Abstract

The article explores the simulation of interaction between the flow and the hydrofoil wing at different working speeds. Two - dimensional solid - liquid interaction problem between the hydrofoil wing and the fluid is simulated. The value and transformation over time of the drag force, the lifting force on the wing, the deformation of the wing and the effect of the deformation to the interactive force, simulation at different speeds. The result shows the dependence of the resistance, the lifting, the deformation of the wing at the speed of the ship and the depth of the wings.

**Keywords:** Inertial sorting, CFD, microfluidic, Immersed Boundary Method.

hợp giúp thân tàu nhẹ hơn, từ đó tăng tính cơ động của tàu.

Trong các loại tàu cao tốc, tàu cánh ngầm là loại có tỷ số lực nâng trên lực cản cao. Sau thế kỷ XX, tàu cánh ngầm được thiết kế, chế tạo và đưa vào khai thác phục vụ du lịch một cách rộng rãi. Ngày nay, các loại tàu cao tốc cánh ngầm dần bị thay thế bởi các tàu hai thân với nhiều ưu điểm vượt trội, thu hút khách du lịch trải nghiệm, giảm chi phí vận hành và bảo dưỡng, đặc biệt là đối với tàu cỡ lớn.

Trong quá trình phát triển của loại tàu hai thân, việc trang bị thêm cánh ngầm cho các tàu đang khai thác và đóng mới là vấn đề mà các nhà thiết kế, chủ tàu đặc biệt quan tâm. Bởi cánh ngầm giúp tăng đáng kể vận tốc, làm êm chuyển động của tàu từ đó tăng hiệu suất trong quá trình khai thác.

Trên thế giới đã có một vài nghiên cứu mô phỏng số cho cánh ngầm được lắp hỗ trợ cho tàu hai thân nhằm đánh giá các đặc tính thủy động lực học của cánh [2]. Riêng đối với trong nước, chưa có bài báo khoa học nào nghiên cứu về vấn đề này.



Hình 1. Tàu 2 thân Catamaran

## 1. Giới thiệu

### 1.1. Khái quát chung

Ở các vùng biển Việt Nam hiện nay, các loại tàu cao tốc được đưa vào khai thác khá rộng rãi, trong đó có loại tàu hai thân cao tốc. Loại tàu này có ưu điểm nổi bật với sức cản thân tàu nhỏ, độ ổn định cao, giảm lắc, không gian trên boong chính rộng giúp tăng hiệu suất sử dụng và giảm chi phí khai thác. Bên cạnh đó, tàu được chế tạo bằng vật liệu hợp kim nhôm, sợi tổng

### 1.2. Tính thực tiễn của vấn đề

Mỗi con tàu hai thân đang khai thác hoặc đóng mới đều có một vận tốc khai thác nhất định trong trường hợp tàu toàn tải và cũng là yếu tố có mối quan hệ với lực cản và chiều chìm. Đó là những vấn đề mà các nhà thiết kế đặc biệt quan tâm trong quá trình cách tân, phát triển dòng tàu hai thân cao tốc.

Đối với các chủ tàu, yêu cầu đưa ra chủ yếu là làm thế nào để tăng vận tốc khai thác, giảm thời gian hành trình, tiết kiệm chi phí vận hành. Từ những yêu cầu đó, bài toán đặt ra cho các nhà thiết kế là tìm ra giải pháp tối ưu vừa giải quyết được vấn đề chủ tàu đưa ra, vừa tiết kiệm chi phí cải tiến và chế tạo. Một trong những giải pháp hiệu quả là lắp thêm cánh ngầm để tăng lực nâng giúp giảm chiều chìm từ đó giảm sức cản cho tàu.



Hình 2. Tàu 2 thân Catamaran lắp thêm cánh ngầm

**1.3. Mục đích nghiên cứu**

Áp dụng thiết kế cánh ngầm cho một con tàu đang được khai thác là tàu khách hai thân cao tốc CATAMARAN 2975 với vận tốc khai thác 30h/h. Yêu cầu của bài toán cần giải quyết là xác định các thông số lực nâng, lực cản, ứng suất, biến dạng của cánh ngầm đã thiết kế nhằm phục vụ cho quá trình tính toán ổn định bổ sung cho tàu cánh ngầm, tính toán kết cấu cánh và kiểm bền cánh.

Từ yêu cầu trên, thực hiện quá trình mô phỏng để khảo sát tương tác và độ ổn định của cánh ngầm tại các vận tốc khác nhau.

**2. Mô hình nghiên cứu**

**2.1. Biên dạng cánh ngầm ứng dụng cho tàu hai thân**

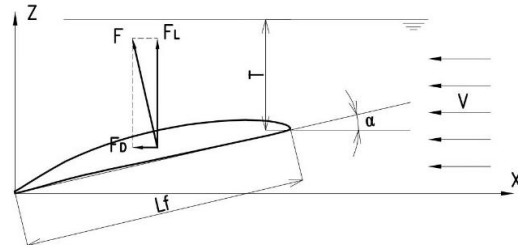
Cánh ngầm thiết kế có biên dạng cánh Naca 4412, trong trường hợp dòng chảy có số Reynolds (*Re*) bằng 50.000 và góc tấn của cánh là 4 độ có các thông số từ nghiên cứu thực nghiệm cho biên dạng cánh này thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số của biên dạng cánh Naca 4412

Tham Số	Giá trị	Đơn vị
$\alpha$	4	độ
$C_L$	0,635	-
$C_D$	0,048	-

Trong đó:  $C_L$  là hệ số lực nâng của cánh ngầm;  $C_D$  là hệ số lực cản của cánh ngầm.

Thực hiện quá trình tính toán lực nâng và lực cản của cánh độc lập theo hệ số thực nghiệm trong bảng trên.



Hình 3. Lý thuyết cánh ngầm

Khi cánh ngầm nghiêng một góc  $\alpha$  so với phương của dòng chảy, trên cánh sẽ xuất hiện hợp lực thủy động  $F$  đặt tại một điểm gọi là tâm áp lực của cánh ngầm [1].

Lực  $F$  bao gồm các thành phần lực như: Lực nâng  $F_L$  vuông góc mới phương dòng chảy, lực cản  $F_D$  song song với phương dòng chảy.

Lực nâng do cánh tạo nên xác định theo công thức:

$$F_L = C_z \frac{\rho v^2}{2} S \quad (1)$$

Trong đó:  $C_z$  là hệ số nâng;  $\rho$  là mật độ nước ( $\text{kg/m}^3$ );  $v$  là vận tốc của dòng chảy hay vận tốc tàu ( $\text{m/s}$ );  $S$  là diện tích mặt dưới của cánh.

Cánh ngầm thiết kế có góc đặt cánh 4 độ, tra hệ số lực nâng trong bảng trên, áp dụng công thức để tính toán lực nâng của cánh theo Bảng 2.

Bảng 2. Lực nâng cánh tính theo công thức lý thuyết

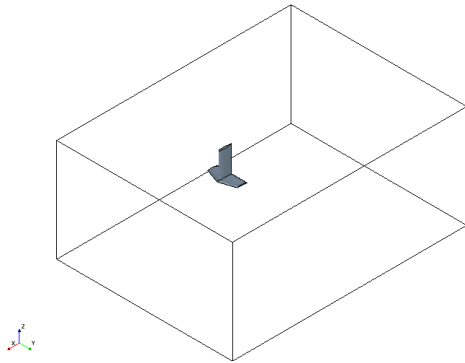
Tham số	Giá trị				Đơn vị
$S$	1,74	1,74	1,74	1,74	$\text{m}^2$
$v$	13,89	14,4	14,92	15,43	$\text{m/s}$
$Re$	68.033	70.552	73.072	75.592	-
$C_L$	0,635	0,635	0,635	0,635	-
$F_L$	109,25	117,42	126,05	134,82	kN

Tham số	Giá trị				Đơn vị
$S$	1,74	1,74	1,74	1,74	$\text{m}^2$
$v$	15,95	16,46	16,98	17,49	$\text{m/s}$
$Re$	78.112	80.631	83.151	85.671	-
$C_L$	0,635	0,635	0,635	0,635	-
$F_L$	144,06	153,42	163,26	173,22	kN

## 2.2. Miền không gian tính toán

Lựa chọn kích thước vùng không gian bao quanh cánh cần đảm bảo điều kiện đủ lớn để không ảnh hưởng tới kết quả tính toán.

Từ yêu cầu trên, tác giả lựa chọn kích thước miền không gian tính toán mô phỏng như Hình 4.



Hình 4. Miền không gian bao quanh cánh

Các thông số kích thước miền không gian đã chọn:

- Chiều dài: 16m;
- Chiều rộng: 11m;
- Chiều cao: 7m.

## 2.3. Các mô hình vật lý

Với bài toán mô phỏng cánh ngầm, chọn 2 mô hình vật lý đặc trưng cho chất lỏng (Physics Fluid) tương ứng với dòng bao quanh cánh và chất rắn (Physics Solid) tương ứng với vật liệu chế tạo cánh ngầm.

Mô hình vật lý cho chất lỏng bao gồm:

- Không gian (Space): 3 chiều (Three Dimensional);
- Thời gian (Time): Không ổn định (Implicit Unsteady);
- Vật liệu (Material): Nhiều pha (Eulerian Multiphase);
- Dòng (Flow): Hỗn loạn (Segregated Flow);
- Chế độ nhớt (Viscous Regime): Chảy rối (Turbulent);
- Mô hình rối: K-Epsilon.

Mô hình vật lý cho chất rắn bao gồm:

- Không gian (Space): 3 chiều (Three Dimensional);
- Thời gian (Time): Không ổn định (Implicit Unsteady);
- Vật liệu (Material): Chất rắn (Solid);
- Mô hình tùy chọn (Optional Models): Ứng suất

chất rắn (Solid Stress), tương tác rắn-lỏng (Fluid Structure Coupling).

## 2.4. Phương trình chủ đạo

2.4.1. Phương trình Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) Turbulence Models:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (2)$$

$$\partial / \partial t \cdot (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \otimes \bar{v}) = -\nabla \cdot \bar{p} I + \nabla \cdot (\bar{T} + T_{RANS}) + f_b \quad (3)$$

$$\partial / \partial t \cdot (\rho \bar{E}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{E} \bar{v}) = -\nabla \cdot \bar{p} \bar{v} + \nabla \cdot (\bar{T} + T_{RANS}) \bar{v} - \nabla \bar{q} + f_b \bar{v} \quad (4)$$

Trong đó:  $\rho$  là khối lượng riêng của chất lỏng;  $\bar{v}$  là vận tốc trung bình;  $\bar{p}$  là áp suất trung bình,  $I$  tenxơ danh tính;  $\bar{T}$  là tenxơ ứng suất nhớt;  $f_b$  là kết quả của lực khối (như trọng lực và lực ly tâm);  $\bar{E}$  là tổng năng lượng trung bình trên một đơn vị khối lượng;  $\bar{q}$  là thông lượng nhiệt.

2.4.2. Phương trình biến dạng của vật liệu:

a. Chuyển vị

$$x(X, t) = X + u(X, t) \quad (5)$$

$$u = \{u_x, u_y, u_z\}^T$$

Trong đó:  $X$  là vị trí của 1 chất điểm vật liệu;  $u(X, t)$  là sự dịch chuyển của chất điểm đó.

Trường biến dạng (Deformation Gradient):

$$F = \frac{\partial x}{\partial X} = I + \frac{\partial u}{\partial X} = I + \begin{pmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial X} & \frac{\partial u_x}{\partial Y} & \frac{\partial u_x}{\partial Z} \\ \frac{\partial u_y}{\partial X} & \frac{\partial u_y}{\partial Y} & \frac{\partial u_y}{\partial Z} \\ \frac{\partial u_z}{\partial X} & \frac{\partial u_z}{\partial Y} & \frac{\partial u_z}{\partial Z} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$F = RU$$

Trong đó:  $I$  là ma trận đơn vị;  $X, Y, Z$  là các thành phần vị trí của chất điểm vật liệu;  $R$  là tenxơ quay;  $U$  là tenxơ ứng suất:

$$\begin{aligned} F &= F^V F^d \\ F^d &= J^{-1/3} f \\ F^V &= J^{-1/3} I \\ J &= \det F \end{aligned} \quad (7)$$

Trong đó:  $J = \det F$  là phần thể tích;  $F^d$  là phần rời rạc.

b. Ứng suất:

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x/A \\ F_y/A \\ F_z/A \end{pmatrix} \quad (8)$$

Trong đó:  $F$  là lực tác động lên bề mặt;  $A$  là diện tích của bề mặt.

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

$$\tau = \sigma \cdot n = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} \quad (9)$$

Trong đó:  $n$ : vector đơn vị.

c. Phương trình bảo toàn động lượng.

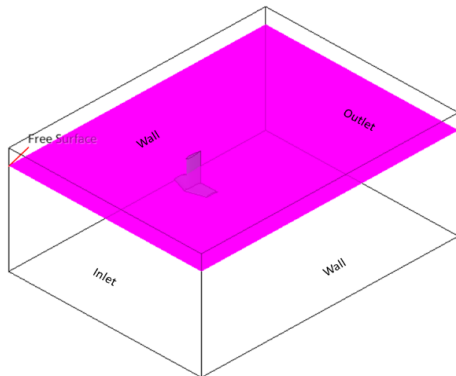
$$\rho u - \nabla \cdot \sigma - b = 0 \quad (10)$$

Trong đó:  $\rho$  là khối lượng riêng của chất lỏng;  $u$  là sự dịch chuyển của chất rắn;  $b$  là tổng lực khối trên mỗi đơn vị thể tích.

**2.5. Điều kiện biên**

Miền không gian tính toán là một hình hộp chữ nhật bao gồm 6 mặt, mỗi mặt có điều kiện biên giống nhau hoặc khác nhau tùy thuộc vào các điều kiện thực tế của bài toán đang xét. Với bài toán mô phỏng cánh ngầm, điều kiện biên được lựa chọn như sau:

- Mặt Inlet của miền không gian phía trước cánh đặt điều kiện biên vận tốc đầu vào (Velocity Inlet);
- Mặt Outlet của miền không gian phía sau cánh đặt điều kiện biên áp suất đầu ra (Pressure Outlet);
- Các mặt còn lại của miền không gian: Điều kiện biên tường (Wall).



Hình 5. Điều kiện biên

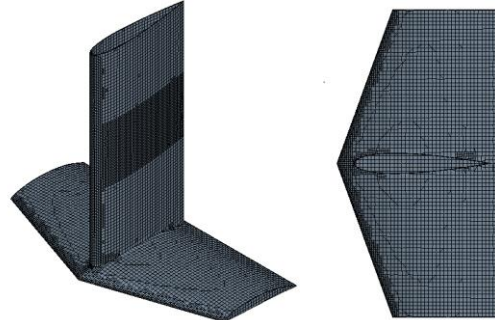
**2.6. Mô hình lưới**

Chia lưới là một quá trình quan trọng trong quá trình mô phỏng. Số lượng và chất lượng lưới ảnh hưởng trực tiếp tới thời gian mô phỏng cũng như độ chính xác của kết quả tính toán [3]. Với thông số của máy tính: Chip Intel(R) Core™ i5-5200U CPU @ 2.2GHz, RAM 4.00GB, sử dụng công cụ chia lưới tự động (Automatic Mesh) với các thiết lập như sau:

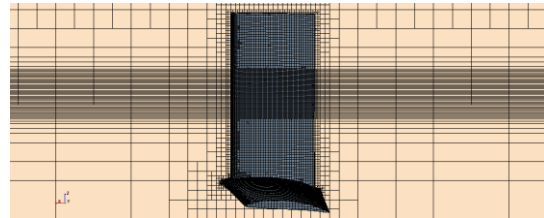
- Kích thước lưới cơ bản 100mm vùng chất lỏng xa cánh ngầm, xa mặt thoáng;

- Kích thước lưới nhỏ nhất 10mm tại khu vực xung quanh bề mặt cánh và tại khu vực mặt thoáng.

Kết quả sau quá trình sinh lưới là 370.000 phần tử lưới.



Hình 6. Chia lưới cánh ngầm

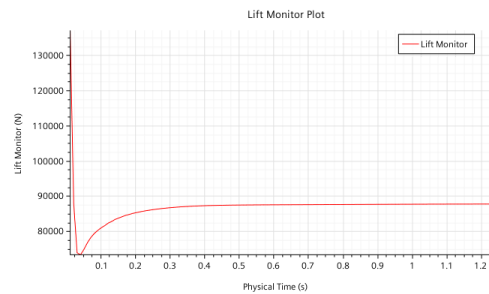


Hình 7. Khu vực lưới gần bề mặt cánh và mặt thoáng

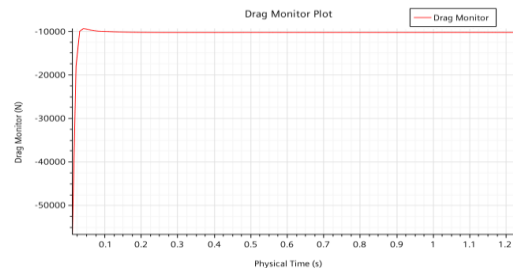
**3. Kết quả**

**3.1. Kết quả tính toán**

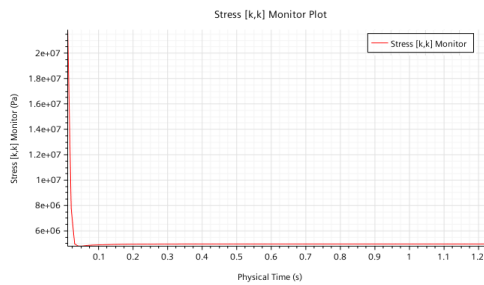
Quan sát đồ thị sai số tính toán sau mỗi vòng lặp để nhận biết kết quả tính toán mô phỏng đã hội tụ.



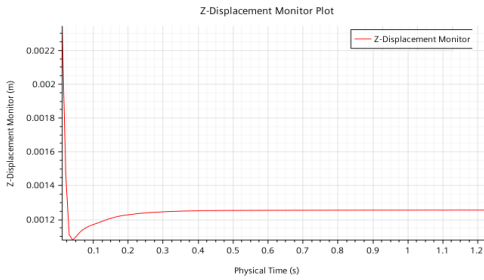
Hình 8. Đồ thị sai số lực nâng



Hình 9. Đồ thị sai số lực cản



Hình 10. Đồ thị sai số ứng suất lớn nhất



Hình 11. Đồ thị sai số biến dạng lớn nhất

Sau quá trình mô phỏng các trường hợp vận tốc và xuất kết quả, tổng hợp kết quả lực nâng, lực cản, ứng suất lớn nhất, biến dạng lớn nhất trong Bảng 3.

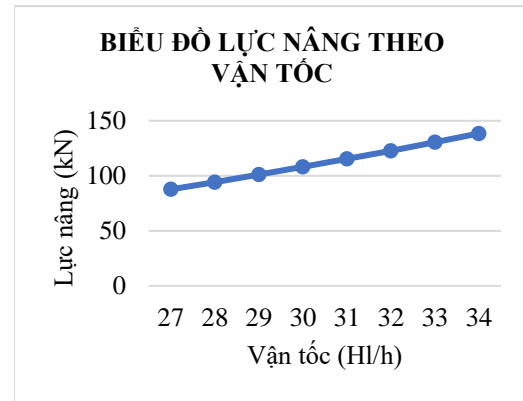
Bảng 3. Kết quả mô phỏng

Tham số	Giá trị				Đơn vị
$v$	27	28	29	30	Knot
$v$	13,89	14,4	14,92	15,43	m/s
$F_L$	87,73	94,21	101,07	108,03	kN
$F_D$	10,36	11,13	11,94	12,76	kN
$\sigma_{MAX}$	4,94	5,31	5,7	6,09	Mpa
$\Delta Z_{MAX}$	1,25	1,35	1,45	1,54	mm

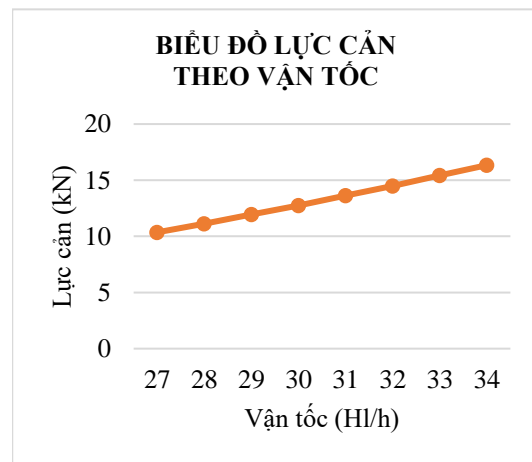
Tham số	Giá trị				Đơn vị
$v$	31	32	33	34	Knot
$v$	15,95	16,46	16,98	17,49	m/s
$F_L$	115,36	122,79	130,61	138,50	kN
$F_D$	13,62	14,5	15,12	16,34	kN
$\sigma_{MAX}$	6,51	6,93	7,39	7,83	Mpa
$\Delta Z_{MAX}$	1,65	1,76	1,87	1,99	mm

Trong đó:  $v$  là vận tốc của dòng chảy hay vận tốc tàu;  $F_L$  là lực nâng,  $F_D$  là lực cản;  $\sigma_{MAX}$  là ứng suất lớn nhất;  $\Delta Z_{MAX}$  là biến dạng lớn nhất theo phương Z.

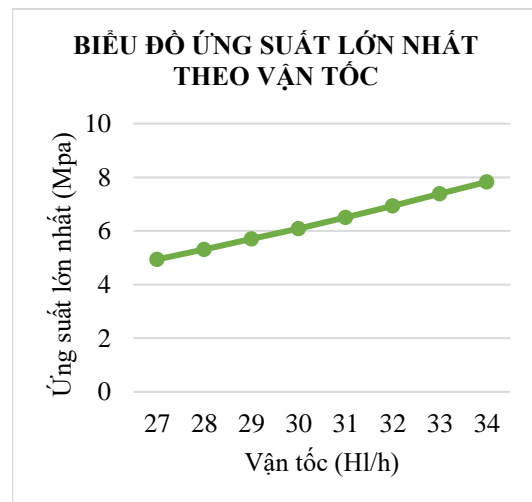
Từ bảng tổng hợp kết quả, xây dựng các biểu đồ thể hiện mối quan hệ giữa lực nâng, lực cản, ứng suất lớn nhất, biến dạng lớn nhất với vận tốc.



Hình 12. Biểu đồ thay đổi lực nâng theo vận tốc

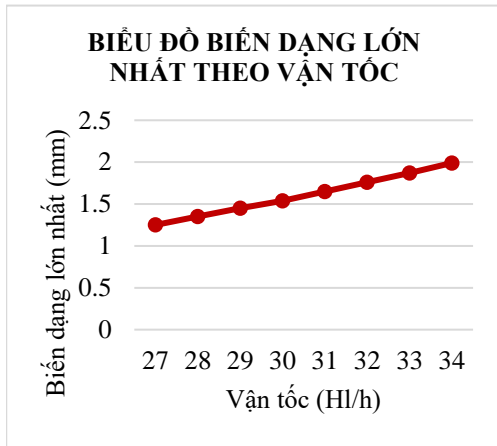


Hình 13. Biểu đồ thay đổi lực cản theo vận tốc



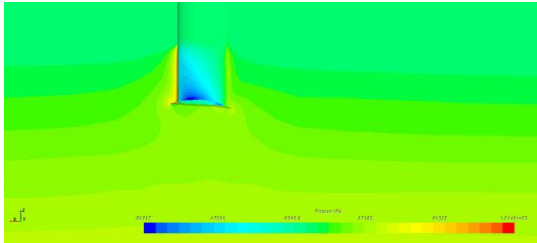
Hình 14. Biểu đồ thay đổi ứng suất lớn nhất theo vận tốc



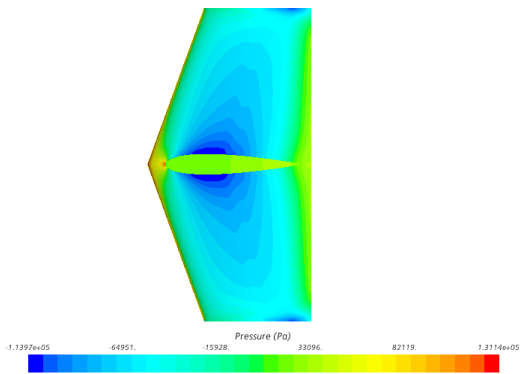


Hình 15. Biểu đồ thay đổi biến dạng lớn nhất theo vận tốc

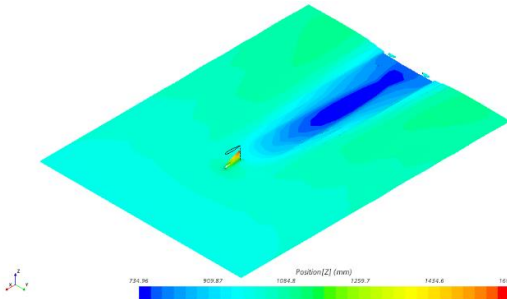
3.2. Trường vận tốc và áp suất quanh cánh



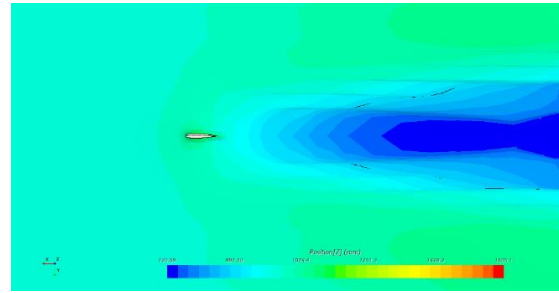
Hình 16. Phân bố áp suất động hình chiếu cạnh



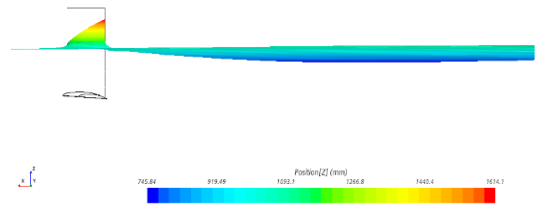
Hình 17. Phân bố áp suất động hình chiếu bằng



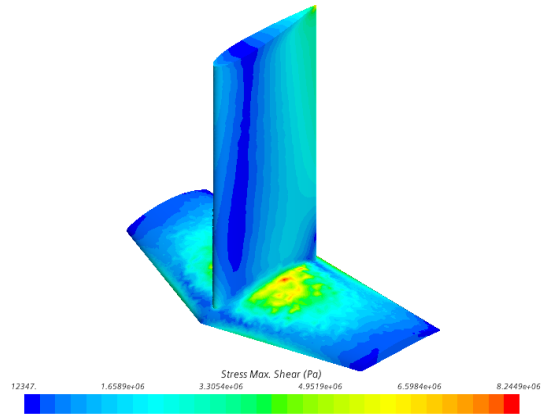
Hình 18. Phân bố mặt thoáng



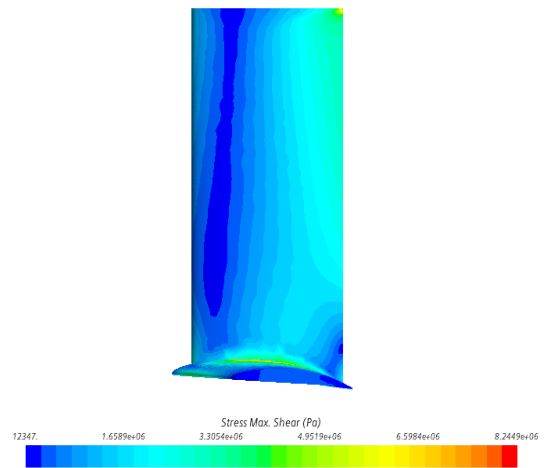
Hình 19. Phân bố mặt thoáng hình chiếu bằng



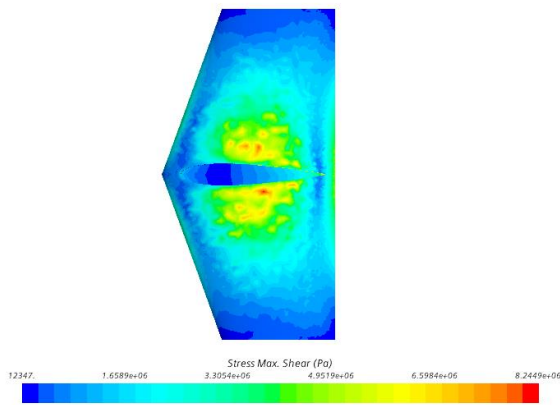
Hình 20. Phân bố mặt thoáng hình chiếu cạnh



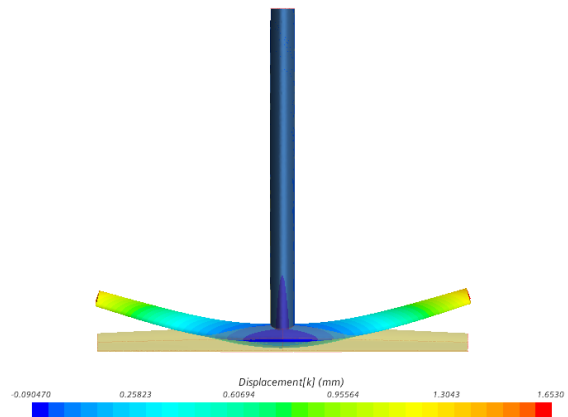
Hình 21. Phân bố ứng suất trên cánh ngầm



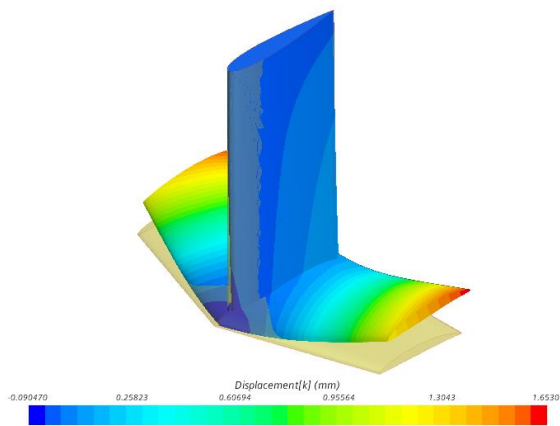
Hình 22. Phân bố ứng suất hình chiếu cạnh



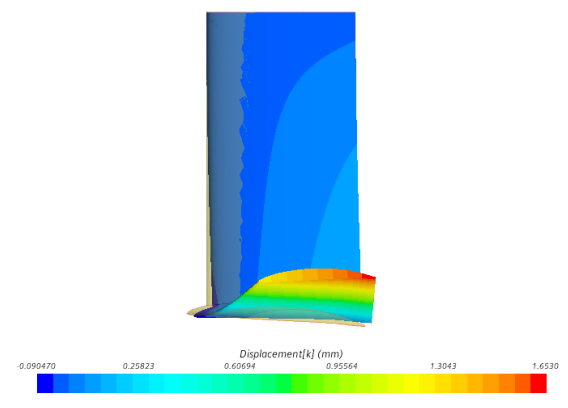
Hình 23. Phân bố ứng suất hình chiếu bằng



Hình 25. Phân bố biến dạng hình chiếu đứng

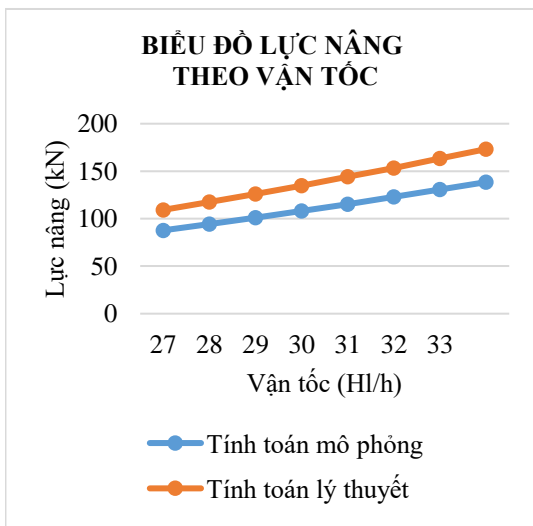


Hình 24. Phân bố biến dạng cánh



Hình 26. Phân bố biến dạng hình chiếu cạnh

### 3.3. So sánh lực nâng giữa kết quả mô phỏng với tính toán lý thuyết



Hình 27. Biểu đồ so sánh lực nâng giữa tính toán lý thuyết và mô phỏng

### 4. Kết luận

Kết quả mô phỏng cho thấy các thành phần như lực nâng, lực cản, ứng suất, biến dạng tăng đồng biến theo vận tốc; kết quả giá trị lực nâng từ quá trình mô phỏng nhỏ hơn kết quả tính toán lý thuyết; giá trị lực cản nhỏ không ảnh hưởng nhiều tới lực cản của thân tàu. Bên cạnh đó, giá trị ứng suất và biến dạng tại vận tốc khai thác lớn nhất của tàu nằm trong giới hạn cho phép của vật liệu chế tạo cánh.

Qua quá trình mô phỏng, ý nghĩa của kết quả mong muốn đạt được là có thể giúp ích cho quá trình thiết kế biên dạng cánh ngầm sao cho phù hợp với mục tiêu giảm lực cản, tăng vận tốc khai thác tới giá trị mong muốn; đồng thời giúp ích cho việc kiểm tra ổn định cho tàu, tính toán lựa chọn kết cấu cánh ngầm đảm bảo điều kiện đủ bền, ít biên dạng và tiết kiệm vật tư chế tạo.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Công Nghi, *Thiết kế tàu cỡ nhỏ chạy nhanh*, NXB Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2005.
- [2] Hari Prastowo, Agoes Santoso, Andre Arya B,

*Analysis and Optimization Hydrofoil Supported Catamaran (HYSUCAT) Size 25 Meter, Based on CFD Method*, Int. J. of Marine Engineering Innovation and Research, 2016.

- [3] Hyunyul Kim and Chi Yang, *Hydrodynamic Optimization of Multihull Ships*, 11th International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2011.

Ngày nhận bài:	10/7/2021
Ngày nhận bản sửa:	03/8/2021
Ngày duyệt đăng:	12/8/2021