

# Ứng dụng CFD trong tối ưu lực cản tác dụng lên vây cá chuyển động dạng sóng

Lê Thanh Long<sup>1,2,\*</sup>, Phan Trung Đạt<sup>1,2</sup>, Nguyễn Trần Phú<sup>3</sup>



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

## TÓM TẮT

Ngày nay, các robot tự hành dưới nước đang được ứng dụng rộng rãi trên toàn thế giới để thay thế cho con người trong việc khảo sát các vùng sông, hồ; nghiên cứu hải dương học; do thám ở các vùng không gian hẹp - nơi mà con người khó có thể tiếp cận. Khi di chuyển dưới nước, có rất nhiều yếu tố làm ảnh hưởng đến chuyển động của robot, đặc biệt là lực cản thủy động. Việc giảm thiểu lực cản này phần nào đó giúp giảm thiểu công suất cần thiết của động cơ, giúp tiết kiệm chi phí trong thiết kế và chế tạo. Bài báo này nghiên cứu về lực cản tác dụng lên hai vây cá nhấp nhô dạng sóng có biên dạng khác nhau bằng phương pháp tính toán động lực học chất lưu (CFD) kết hợp với mô hình rối k- $\epsilon$ , phương trình chất lưu Navier-Stokes và phương trình lực cản thủy động học. Kết quả cho thấy hình dạng của vây cá có ảnh hưởng đáng kể đến lực cản, đặc biệt khi thiết kế biên dạng vây có biên độ giảm dần theo chiều dài, lực cản có xu hướng giảm đi. Ở tốc độ bơi 0,2m/s, lực cản tác dụng lên vây cá ở mô hình cải tiến giảm còn 0,07N so với mô hình truyền thống là 0,95N. Ngoài ra ảnh hưởng của vận tốc bơi cũng được khảo sát trong bài báo này. Khi vận tốc bơi tăng đều từ 0,1m/s đến 0,3m/s, lực cản ở mô hình cải tiến tăng từ 0,02N đến 0,16N trong khi đó mô hình truyền thống tăng từ 0,26N đến 2N. Mô hình được xây dựng bằng phần mềm Spaceclaim và mô phỏng tính toán và tối ưu lực cản bằng ANSYS Fluent với các điều kiện biên và thông số phù hợp với các thực nghiệm trước đó.

**Từ khoá:** CFD, lực cản, vây cá gimnotiform, vây cá phỏng sinh học

<sup>1</sup>Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM

<sup>2</sup>Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

<sup>3</sup>Khoa Cơ khí Động lực, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

## Liên hệ

**Lê Thanh Long**, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM

Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

Email: ltlong@hcmut.edu.vn

## Lịch sử

- Ngày nhận: 13-4-2022
- Ngày chấp nhận: 14-6-2022
- Ngày đăng: 29-6-2022

DOI : 10.32508/stdjet.v5iS11.977



## Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



## GIỚI THIỆU

Các nghiên cứu về những robot vận hành dưới nước đã được tiến hành từ rất sớm nhưng những năm trở lại đây, những robot mô phỏng lại hình dáng cũng như hành vi, cử động của các loại động vật đang xuất hiện ngày càng nhiều do sự tăng lên về nhu cầu do thám, chinh phục bầu trời cũng như đại dương của loài người. Trong khoảng từ 10 năm trở lại đây, Festo đã cho ra mắt rất nhiều robot phỏng sinh học cực kỳ ấn tượng như robot Kangaroo, chim, nhện, dơi,... Trong số đó, có thể kể đến robot cá có màng vây mô phỏng lại vây bụng của cá dao ma đen Nam Mỹ. Nguyên lý của nó khá đơn giản: khi dao động, vây tạo ra một lực ngược lại giúp cho cá có thể chuyển động về phía trước. Với đặc điểm đó, cá dao ma đen có thể di chuyển nhanh ở những nơi có không gian hẹp, săn mồi trong im lặng mà không gây ra sự xáo động cho vùng nước phía sau như chân vịt tàu thủy hay một số động cơ phản lực khác.

Màng vây đặc biệt của cá dao ma đen đã và đang thu hút rất nhiều sự chú ý của các nhà khoa học trên khắp thế giới. Đã có rất nhiều bài báo khoa học liên quan đến cá dao ma đen, họ nghiên cứu từ những vấn đề

về cấu tạo sinh học của vây cá để tìm hiểu cách chúng bơi cho đến việc phát triển những mô hình robot mô phỏng lại hình dáng và chuyển động độc đáo của loài cá này. Có một số nhóm tác giả muốn cải thiện tốc độ bơi cho cá nên đã nghiên cứu về khả năng tạo ra lực đẩy trên một vây cá nhân tạo được họ thiết kế và điều khiển bằng hệ thống cơ - điện tử<sup>1-3</sup>. Nhóm nghiên cứu của Youngerman<sup>4</sup> cũng đã tìm hiểu về chuyển động vây bụng cá dao ma đen ở các kiểu bơi khác nhau như bơi tiến, bơi lùi, bơi đứng,... và rút ra được cách thức di chuyển của nó. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong các thiết kế robot sau này. Trong một bài báo khác, nhóm nghiên cứu của MacIver<sup>5</sup> đã thiết kế một hệ thống điều khiển để thay đổi các thông số động học của vây cá và đã khám phá ra được các giá trị tối ưu của các thông số này để tạo ra lực đẩy lớn nhất.

Cơ học chất lưu và thủy - khí động lực học tính toán (computational fluid dynamics - CFD) là các lĩnh vực đang có nhiều bước phát triển vượt bậc vì giải quyết được rất nhiều bài toán kỹ thuật trong các ngành khác nhau như công nghiệp ô tô, hàng hải đường thủy, công nghệ chế tạo các loại máy bay siêu thanh hay các vấn đề về sưởi, thông gió và điều hòa không khí (heating, ventilating and air conditioning - HVAC) trong các tòa nhà. Nhóm nghiên cứu của Fangfang Liu<sup>6</sup>

**Trích dẫn bài báo này:** Long L T, Đạt P T, Phú N T. Ứng dụng CFD trong tối ưu lực cản tác dụng lên vây cá chuyển động dạng sóng. *Sci. Tech. Dev. J. - Eng. Tech.* 2022; 5(S11):1-8.

đã dùng camera ghi lại chuyển động của các phần tử nước trong quá trình vây cá dao động và đã rút ra nhận định rằng các phần tử nước đó có xu hướng chuyển động ra sau. Sau đó họ dùng CFD để mô phỏng kiểm chứng và đã cho ra kết quả phù hợp với thí nghiệm. Nhóm nghiên cứu của Dae Hwang Kim<sup>7</sup> cũng đã ứng dụng CFD để tìm hiểu các hình dáng khác nhau của vây cá cũng như các điều kiện môi trường khác nhau ảnh hưởng như thế nào đến lực đẩy sinh ra. Nhờ vào CFD, nhóm nghiên cứu của Curet<sup>8</sup> đã rút ra được kết luận rằng lực đẩy của các robot tỉ lệ thuận với tần số dao động, góc mở tia vây và bước sóng.

Trong các ứng dụng do thám dưới đáy sông hồ, robot cá không nên di chuyển quá nhanh vì như thế sẽ gây ra khó khăn trong việc thu thập hình ảnh rõ nét từ camera, vì thế vấn đề tối ưu hóa lực cản cho cá robot khi di chuyển trong những môi trường sông, hồ có dòng chảy tự nhiên đáng được quan tâm để giảm bớt công suất cho các động cơ. Trong bài báo này, CFD được ứng dụng để so sánh lực cản của dòng chảy tác dụng lên hai mô hình vây cá khác nhau: một mô hình truyền thống và một mô hình được điều chỉnh về thiết kế. Phần mềm ANSYS Fluent được sử dụng trong bài toán này để tính toán các phương trình Navier-Stokes, phương trình bảo toàn khối lượng, động lượng và phương trình lực cân thủy động học. Ngoài ra, ảnh hưởng của vận tốc bơi cũng được so sánh giữa hai mô hình.

## MÔ HÌNH VẬT LÝ VÀ PHƯƠNG PHÁP SỐ

### Mô hình vật lý

Để đơn giản hóa việc tính toán cũng như tiết kiệm tài nguyên cho máy tính, bài toán hoàn toàn có thể được khảo sát bằng mô phỏng 2D. Ở các nghiên cứu trước đây, biên dạng vây cá có dạng hàm Sine của dao động điều hòa (harmonic motion) trong cơ học. Ở bài toán này, biên dạng vây cá sẽ được thiết kế có dạng đồ thị của dao động tắt dần (damped motion) như Hình 1. Mô hình có tổng chiều dài  $L$ , được mô phỏng trong một kênh nước hình chữ nhật với chiều dài  $H$  và chiều cao  $W$ . Bài toán được khảo sát trong hệ quy chiếu phi quán tính gắn với vây. Khi đó, nước sẽ di chuyển với vận tốc  $u$  tương đối so với vây và ra khỏi vùng nước tại mặt biên outlet được thiết lập là pressure outlet với áp suất tương đối so với không gian ngoài là  $p$ . Hai mặt trên và dưới của mô hình được thiết lập là tường tính ở dạng specified shear. Chất lỏng được dùng để khảo sát là nước có khối lượng riêng  $\rho$ , có độ nhớt động học  $\mu$  và nhiệt độ  $T$ . Các thông số của chất lỏng được cho ở Bảng 1.

Phương trình biên dạng vây cá là một hàm  $y = f(x)$  có dạng:

$$y = A_0 e^{-\beta x} \sin(2\pi x / \lambda) \quad (1)$$

Trong đó,  $A_0$  là biên độ ban đầu,  $\beta$  là hệ số tắt dần ( $\beta > 0$ ),  $\lambda$  là bước sóng. Thông số của biên dạng vây được cho ở Bảng 2.

**Bảng 1: Tính chất vật lý của nước**

Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
$\rho$	998,2	kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	1,003	mPa.s
T	25	°C

**Bảng 2: Thông số hình học cho mô phỏng**

Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
H	0,95	m
W	0,35	m
L	0,45	m
$A_0$	0,03	m
$\beta$	2	m <sup>-1</sup>
$\lambda$	0,15	m
u	0,2	m/s
	0	Pa

### Phương pháp số

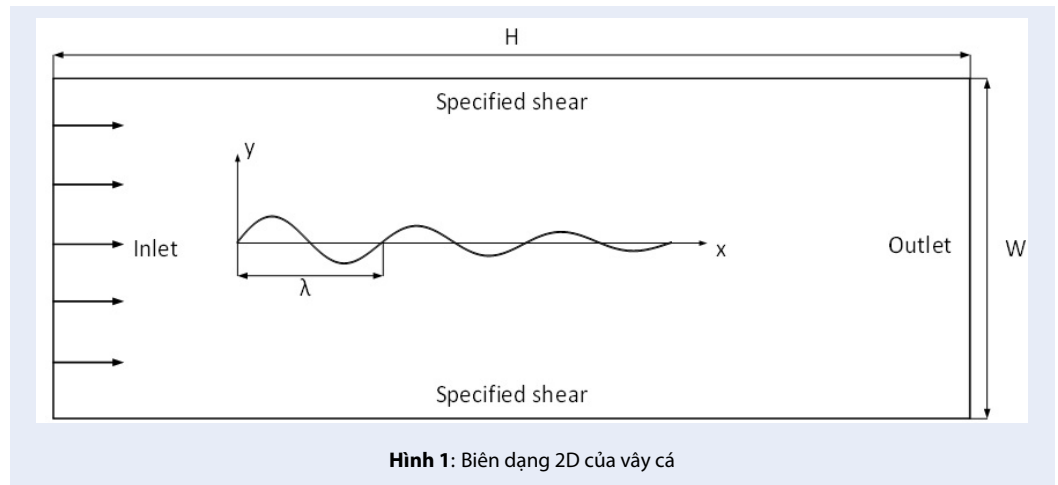
Trong nghiên cứu này, phương trình Navier-Stokes và phương trình bảo toàn khối lượng được sử dụng để tính toán hành vi của nước. Phương trình Navier-Stokes có dạng tương tự như phương trình của định luật II Newton và do đó nó có thể giải thích được hầu hết các bài toán liên quan đến chất lưu. Đối với dòng chảy không nén được, phương trình Navier-Stokes<sup>9</sup> có dạng:

$$\rho \frac{dU}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + F \quad (2)$$

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (3)$$

Trong đó  $\rho$  là khối lượng riêng của nước;  $U=(u,v,w)$  là vector vận tốc của các phần tử nước;  $\mu$  là độ nhớt động học của nước;  $F$  là ngoại lực tác dụng lên khối nước;  $p$  là áp suất;  $t$  là thời gian.

Ngoài ra, trong bài toán này mô hình rối Realizable  $k-\epsilon$  được chọn để tính toán chính xác cho lực cản và các xoáy xuất hiện trong mô hình. Mô hình Realizable  $k-\epsilon$  là một mô hình mới so với hai mô hình



Hình 1: Biện dạng 2D của vây cá

truyền thống là Standard và RNG (Re-normalisation Group). Ngày nay nó được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp vì mô hình hình sử dụng phương pháp tính trung bình RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) giúp tiết kiệm tối đa thời gian tính toán và bộ nhớ của máy, đồng thời mô hình này cho kết quả chính xác hơn hai mô hình truyền thống vì khắc phục được những nhược điểm của chúng. Mô hình gồm hai phương trình:

Phương trình động năng rối ( $k$ )<sup>9</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho - Y_M + S_k \quad (4)$$

Phương trình tốc độ tiêu tán của động năng ( $\epsilon$ )<sup>9</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_1 \epsilon \frac{\epsilon}{k} C_3 \epsilon P_b + S_\epsilon \quad (5)$$

Trong đó:

$$C_1 = \max \left[ 0,43; \frac{\eta}{\eta + 5} \right]; \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}; \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ji}};$$

$P_k$  là sự tạo ra động năng rối do ảnh hưởng của gradient vận tốc trung bình.

$P_b$  là sự tạo ra động năng rối do ảnh hưởng của lực nổi.

$Y_M$  đại diện cho sự đóng góp của độ giãn nở dao động trong dòng chảy rối nén được vào tốc độ tiêu tán tổng thể.

$S_k$  và  $S_\epsilon$  là các hệ số thực nghiệm do người dùng định nghĩa.

$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ ;  $\mu_t$  là độ nhớt rối.

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s} \frac{k U^*}{\epsilon}$$

Trong đó  $U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \epsilon_{ijk} \omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \epsilon_{ijk} \omega_k$$

$\tilde{\Omega}_{ij}$  là tensor tốc độ quay trung bình được xét trong một hệ quy chiếu chuyển động với vận tốc góc  $\omega_k$

$A_0$  và  $A_s$  là các hằng số của mô hình, được xác định bởi:

$$A_0 = 4,04; \quad A_s = \sqrt{6} \cos \varphi$$

Trong đó:

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left( \sqrt{6} W \right), \quad W = \frac{S_{ij} S_{ij} S_{ki}}{S^3}$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

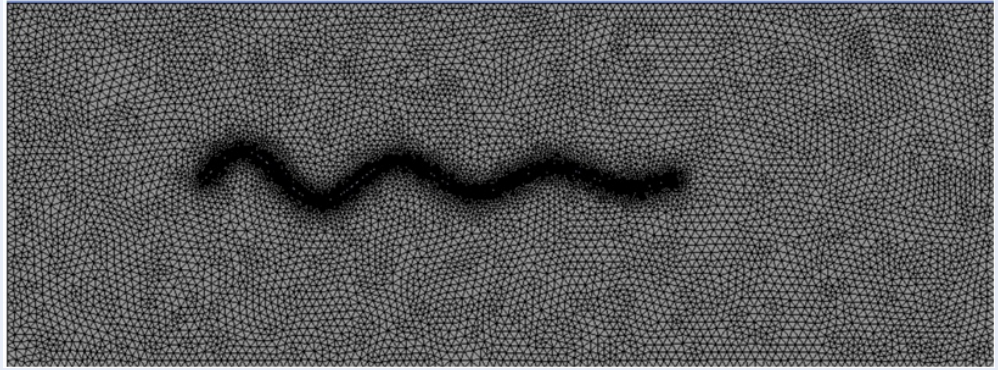
Các hằng số của mô hình là  $C_{1\epsilon} = 1,44$ ;  $C_2 = 1,9$ ;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_\epsilon = 1,2$

Lực cản của nước tác dụng lên vây được xác định bởi phương trình<sup>9</sup>:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 \quad (6)$$

Trong đó  $A$  là diện tích tham chiếu, là phần diện tích tiếp xúc của vây cá với dòng nước;  $C_D$  là hệ số cản;  $v$  là vận tốc dòng nước.

Sau đó, phương pháp thể tích hữu hạn (finite element method, FVM) được sử dụng để tính toán cho mô hình. Để áp dụng phương pháp này, mô hình được rời rạc thành những phần tử nhỏ gọi là lưới (mesh). Vì biên dạng vây cá có dạng đường cong nên trong bài toán này lưới tam giác với kích thước 7mm là lựa chọn phù hợp để chất lượng lưới tốt hơn, giúp bài toán dễ hội tụ và cho kết quả tin cậy hơn. Ngoài ra, vùng gần vây cá là một vùng quan trọng hơn so với các vùng nằm xa vây cá vì đây là vùng tiếp xúc giữa dòng nước và vây, vì thế lưới ở đây được chia mịn hơn bằng phương pháp Edge Sizing với kích thước 0,8mm. Vì chất lỏng được xem có tính nhớt nên tại lớp biên của vây ta cần tính lại profile vận tốc dòng nước. Do đó, phương pháp Inflation được chọn để xác định chính xác vận tốc tại lớp biên. Lưới sau khi



Hình 2: Kết quả chia lưới của mô hình

chia đạt 32899 phần tử với 21056 nodes, kết quả được thể hiện ở Hình 2.

Các phương trình vi phân được đề xuất trong mô hình sau đó sẽ được áp dụng để tính toán cho từng phần tử. Đối với đặc tính áp suất-vận tốc, phương pháp SIMPLE được sử dụng để nghiên cứu. Các phương trình tính toán về áp suất, động lượng, động năng,... được rời rạc hóa bằng phương pháp Upwind bậc hai để cho kết quả chính xác hơn. Bài toán được khảo sát tính với 4000 vòng lặp.

## KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

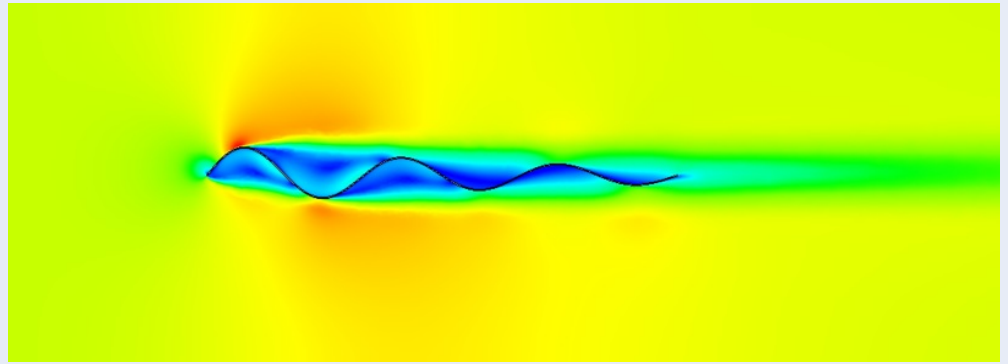
Vây cá được mô phỏng trong nước ở nhiệt độ môi trường với các thông số đã nêu ở Bảng 1 và Bảng 2. Hình 3 biểu thị phân bố vận tốc xung quanh mô hình vây cá được cải tiến khi robot bơi ở vận tốc 0,2m/s. Dựa vào kết quả mô phỏng, ta thấy sự thay đổi vận tốc tập trung ở khu vực gần mô hình: vận tốc nước đạt giá trị lớn nhất ở phần đầu và nhỏ nhất ở phần giữa các vùng bụng sóng dọc theo vây. Vận tốc tại phần đầu vây lớn là do biên dạng cong của vây tạo ra một góc tiếp xúc bất lợi cho dòng nước tiếp xúc với vây, tại đây xảy ra sự phân tách dòng làm cho dòng nước đổi hướng đột ngột và làm tăng vận tốc tại khu vực này. Ở các vùng khác dòng nước ít bị cản trở hơn nên vận tốc do đó cũng có sự phân bố đồng đều với giá trị nhỏ hơn.

Hình 4 thể hiện các vectơ vận tốc xung quanh mô hình, các xoáy có thể dễ dàng thấy ở các vùng lõm của vây. Các xoáy trong mô hình này tồn tại ở ba vùng lõm đầu tiên của vây và càng về sau các xoáy này dường như không còn. Trong lĩnh vực khí động học, các vùng xoáy này là điều không mong muốn trong các mô hình thiết kế vì trong các vùng này xảy ra sự mất mát áp suất đáng kể và tạo ra một vùng áp suất thấp gây ra sự mất ổn định và trực tiếp ảnh hưởng đến lực cản gây ra cho mô hình. Hình 5 là kết quả mô

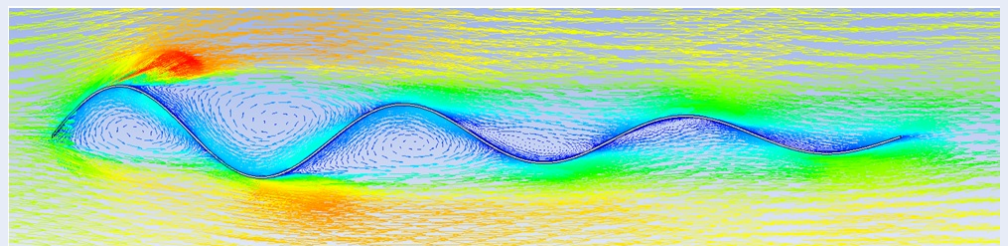
phỏng của phân bố áp suất của vùng thể tích đang xét. Có thể thấy vùng không gian ngay trước mô hình có áp suất lớn nhất trong tất cả vùng. Đặc biệt, ngay tại điểm tiếp xúc áp suất đạt giá trị cực đại. Ở những vùng xoáy đầu, do ảnh hưởng của xoáy Eddy nên tại đây áp suất nhỏ hơn và được thể hiện bởi phổ màu xanh. Ở những bụng sóng tiếp theo các xoáy tiêu biến dần, tại đây áp suất mất mát không nhiều nên có giá trị lớn hơn các vùng phía trước. Nhưng nhìn chung, vẫn có sự chênh lệch áp suất giữa các vùng do đó gây ra lực cản thủy động cho vây trong quá trình dao động.

Để có thể dễ dàng so sánh hiệu quả giữa hai mô hình, bài toán mô phỏng cho vây cá truyền thống được tiến hành. Mô hình vây cá truyền thống là mô hình có biên dạng vây mang hình dáng của đồ thị dao động điều hòa, vì thế biên độ là một giá trị hằng số và khi đó hệ số tắt dần  $\beta = 0$ , các điều kiện vật lý khác đều giống so với mô phỏng của vây cá cải tiến. Hình 6 là biểu đồ màu cho phân bố vận tốc xung quanh mô hình truyền thống. Dựa vào hai đồ thị có thể thấy rằng sự phân bố các dải màu có sự tương đồng giữa hai mô hình tuy nhiên có một sự khác biệt rõ rệt về kích thước của vùng nước có vận tốc thấp. Ta thấy ở mô hình này, vùng nước có vận tốc thấp có diện tích phân bố rộng hơn nhiều so với mô hình cải tiến nguyên nhân chủ yếu là do xuất hiện nhiều các góc tiếp xúc bất lợi cho dòng chảy.

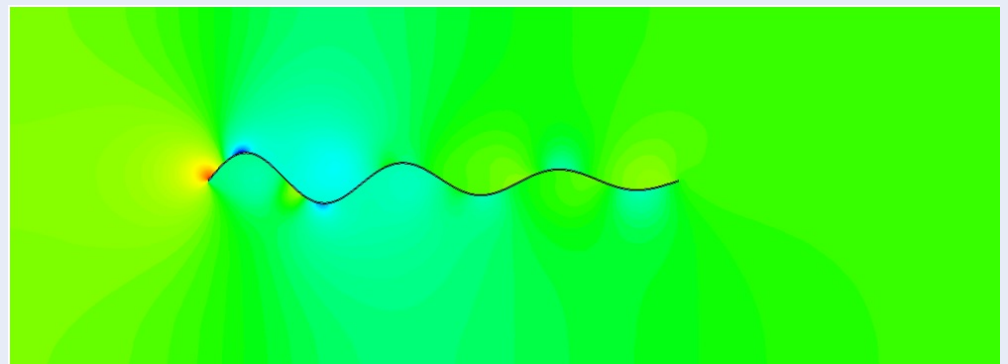
Trước đây, đã có một số công trình nghiên cứu về tính chất thủy động của mô hình vây truyền thống<sup>5,7,10,11</sup> [5],[7],[10-11]. Tuy nhiên các nghiên cứu đa số đều tập trung vào lực đẩy sinh ra bởi mô hình này và vẫn còn một số nhược điểm còn tồn tại ở mô hình vây truyền thống. Ở Hình 7, các xoáy nước có thể được nhận thấy ở tất cả các bụng sóng chứ không chỉ riêng ở ba bụng sóng đầu như mô hình cải tiến. Do đó có thể dễ dàng dự đoán rằng trong mô hình này sự mất mát áp suất diễn ra tại các vùng xoáy là lớn hơn nhiều



Hình 3: Phân bố vận tốc xung quanh mô hình vây cá cải tiến với  $u = 0,2\text{m/s}$ ,  $\beta = 2$



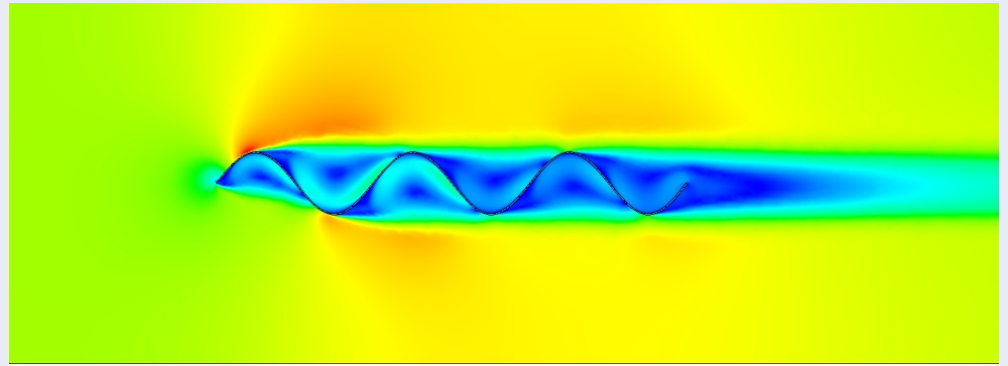
Hình 4: Vectơ vận tốc xung quanh mô hình vây cá cải tiến với  $u = 0,2\text{m/s}$ ,  $\beta = 2$



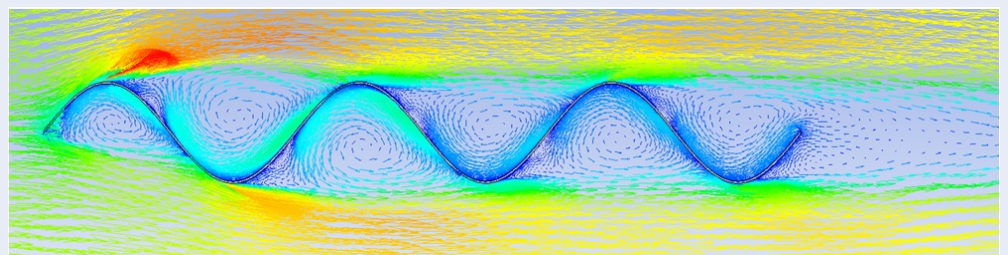
Hình 5: Phân bố áp suất xung quanh mô hình vây cá cải tiến với  $u = 0,2\text{m/s}$ ,  $\beta = 2$

so với mô hình đầu và sự ổn định của mô hình do đó cũng không được đảm bảo. Hình 8 thể hiện một cái nhìn rõ ràng hơn về áp suất xung quanh màng vây. Vẫn có sự tương đồng trong sự phân bố các phổ màu tuy nhiên ở đây diện tích vùng áp suất thấp lớn hơn nhiều so với trường hợp đầu nguyên nhân là do sự hình thành quá nhiều xoáy trên mô hình. Điều này dẫn đến sự gia tăng lực cản đáng kể lên mô hình. Trong thiết kế tối ưu khí động, các kỹ sư thiết kế luôn mong muốn giảm thiểu đi các vùng áp suất thấp sinh ra trong mô hình. Trong thiết kế bóng golf, thay vì

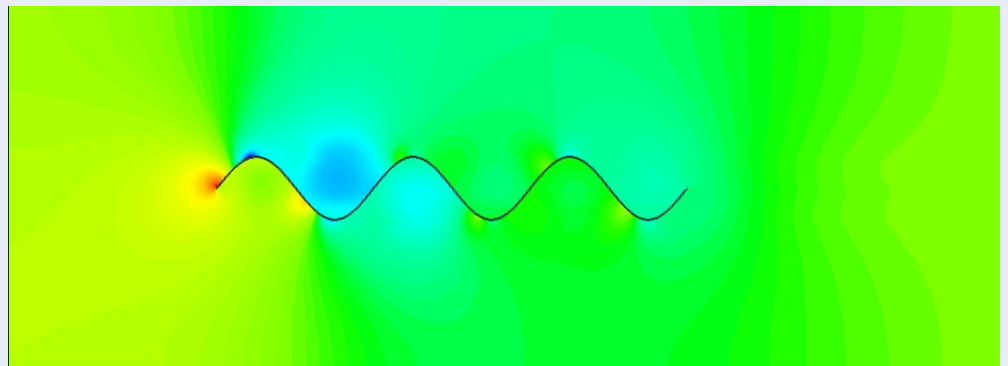
làm trơn thì rất nhiều rãnh cầu khoét lõm (dimple) được tạo ra chủ yếu là để giảm vùng xoáy áp thấp phía sau giúp cho bóng có thể đi xa hơn, ổn định hơn dẫn đến việc bóng dễ rơi trúng đích hơn<sup>12</sup>. Vỏ của một số hãng xe ô tô cũng được thiết kế có phần thân sau hơi nghiêng về phía mặt đường một góc nhỏ lý do chính cũng là để giảm lực cản khí động giúp tiết kiệm nhiên liệu cho xe<sup>13</sup>. Việc thiết kế cải tiến vây cá trong bài báo cũng dựa trên các nguyên lý đó vì có thể thấy được rõ ràng vùng áp thấp bị thu hẹp đáng kể do sự giảm dần của biên độ tại các đỉnh sóng.



Hình 6: Phân bố vận tốc xung quanh mô hình vây truyền thống với  $u = 0,2\text{m/s}$ ,  $\beta = 0$



Hình 7: Vectơ vận tốc xung quanh mô hình vây cá truyền thống với  $u = 0,2\text{m/s}$ ,  $\beta = 0$

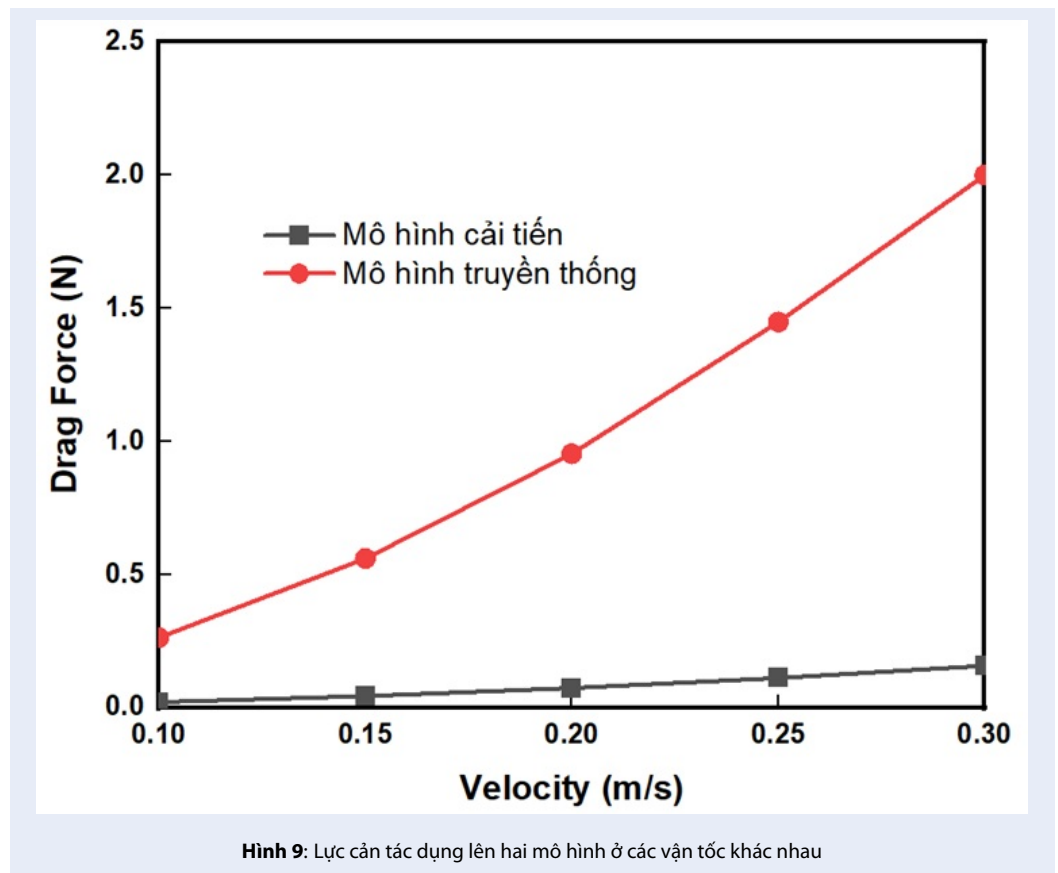


Hình 8: Phân bố áp suất xung quanh mô hình vây cá cải tiến với  $u = 0,2\text{m/s}$ ,  $\beta = 0$

Để xem xét sự ảnh hưởng của vận tốc bơi của robot cá lên lực cản sinh ra, cả hai mô hình được tính toán tại các vận tốc khác nhau là  $0,1\text{m/s}$ ,  $0,15\text{m/s}$ ,  $0,2\text{m/s}$ ,  $0,25\text{m/s}$  và  $0,3\text{m/s}$ . Hình 9 là đồ thị giá trị lực cản tác dụng lên hai mô hình tại năm giá trị vận tốc  $u$  khác nhau. Có thể thấy mối quan hệ giữa lực cản và vận tốc là gần như tuyến tính. Vận tốc di chuyển càng lớn lực cản sinh ra càng nhiều. Nhưng nhìn chung, lực cản sinh ra ở mô hình cải tiến thấp hơn rất nhiều so với mô hình truyền thống. Một điều nữa có thể được

rút ra từ đồ thị là độ dốc của đường đồ thị màu đỏ lớn hơn với đường đồ thị màu đen. Điều này có nghĩa là ở mô hình cải tiến, khi robot bơi với vận tốc nhanh hơn thì lực cản có tăng nhưng tăng với tốc độ chậm hơn so với mô hình màng vây truyền thống. Điều này cho phép robot cá có thể hoạt động được ở dải vận tốc rộng hơn mà không cần quan tâm nhiều đến vấn đề lực cản tăng vượt quá giá trị cho phép.

Bảng 3 trình bày các lực cản tính toán được từ phần mềm ANSYS Fluent. Có thể dễ dàng nhận thấy lực



**Bảng 3:** Giá trị lực cản tại các vận tốc bơi khác nhau

Vận tốc (m/s)	Lực cản ở mô hình truyền thống (N)	Lực cản ở mô hình cải tiến (N)
0,1	0,26	0,02
0,15	0,56	0,04
0,2	0,95	0,07
0,25	1,45	0,11
0,3	2	0,16

cản sinh ra ở mô hình cải tiến có giá trị nhỏ hơn mô hình truyền thống khoảng 10 lần. Giá trị lớn nhất của lực cản ở mô hình cải tiến là 0,16N, bé hơn cả lực cản nhỏ nhất ở mô hình truyền thống là 0,26N. Khi robot cá tăng tốc thêm 0,05m/s lực cản trên mô hình cải tiến chỉ tăng khoảng 0,04N trong khi đó ở mô hình truyền thống là khoảng 0,43N.

### KẾT LUẬN

Trong bài báo này, các phương pháp số và mô hình phù hợp đã được đưa ra để mô phỏng tính toán lực cản của nước gây ra cho màng vây robot nhân tạo. Các kết quả về phân bố vận tốc, áp suất cũng như các đồ thị và số liệu đã chỉ ra sự hiệu quả của mô hình

vây cá cải tiến trong việc giảm thiểu đi lực cản thủy động. Ở tốc độ bơi lớn nhất được khảo sát là 3m/s, lực cản tác dụng lên vây cá giảm từ 2N xuống chỉ còn 0,16N khi ta thay thiết kế truyền thống bằng thiết kế mới. Bên cạnh đó, tốc độ gia tăng lực cản khi thay đổi vận tốc  $\Delta F/\Delta v$  của robot cũng được giảm đi đáng kể từ 8,6N.s/m xuống còn 0,8N.s/m. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong các hoạt động thiết kế sau này vì giúp giảm thiểu năng lượng cần thiết để vận hành robot do đó tiết kiệm chi phí sản xuất ngoài ra còn giúp cho robot vận hành ổn định và chính xác hơn trong môi trường nước.

## LỜI CẢM ƠN

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.

## DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

CFD Computational Fluid Dynamics  
FVM Finite Element Method  
HVAC Heating, Ventilating and Air Conditioning  
RANS Reynolds Averaged Navier-Stokes  
RNG Re-normalisation Group

## XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Nhóm tác giả xác nhận không có xung đột lợi ích liên quan đến công trình nghiên cứu.

## ĐÓNG GÓP CỦA CÁC TÁC GIẢ

Nhóm tác giả sử dụng phương pháp tính toán động lực học chất lưu để xác định lực cản của nước tác dụng lên vây cá khi vây cá chuyển động. Các thành viên đều có đóng góp như nhau trong nghiên cứu này.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Shi G, Xiao Q. Numerical investigation of a bio-inspired underwater robot with skeleton-reinforced undulating fins. *Eur J Mech B Fluids*. 2021;87:75-91; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2020.12.009>.
2. Zhou H, Hu T, Xie H, Zhang D, Shen L. Computational hydrodynamics and statistical modeling on biologically inspired undulating robotic fins: A two-dimensional study. *J Bionic Eng*. 2010;7(1):66-76; Available from: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(09\)60192-X](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(09)60192-X).
3. Zhang Y, He J, Low KH. Parametric study of an underwater finned propulsor inspired by Bluespotted ray. *J Bionic Eng*. 2012;9(2):166-76. doi: 10.1016/S1672-6529(11)60112-1; Available from: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(11\)60112-1](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(11)60112-1).

4. Youngerman ED, Flammang BE, Lauder GV. Locomotion of free-swimming ghost knifefish: anal fin kinematics during four behaviors. *Zoology (Jena)*. 2014;117(5):337-48; PMID: 25043841. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.zool.2014.04.004>.
5. Curet OM, Patankar NA, Lauder GV, Maciver MA. Mechanical properties of a bio-inspired robotic knifefish with an undulatory propulsor. *Bioinspir Biomim*. 2011;6(2):026004; PMID: 21474864. Available from: <https://doi.org/10.1088/1748-3182/6/2/026004>.
6. Liu F, Yang CJ, Lee KM. Hydrodynamic modeling of an undulating fin for robotic fish design IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics; 2010; Available from: <https://doi.org/10.1109/AIM.2010.5695800>.
7. Nguyen VH, Pham CAT, Nguyen VD, Kim DH, Nguyen TT. A study on force generated by gymnotiform undulating fin 15th International Conference on Ubiquitous Robots; 2018; Available from: <https://doi.org/10.1109/URAI.2018.8441812>.
8. Shirgaonkar AA, Curet OM, Patankar NA, Maciver MA. The hydrodynamics of ribbon-fin propulsion during impulsive motion. *J Exp Biol*. 2008;211(21):3490-503; PMID: 18931321. Available from: <https://doi.org/10.1242/jeb.019224>.
9. Versteeg HK, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics. Pearson Education Limited; 2007.
10. Neveln ID, Bale R, Bhalla APS, Curet OM, Patankar NA, Maciver MA. Undulating fins produce off-axis thrust and flow structures. *J Exp Biol*. 2014;217(2):201-13; PMID: 24072799. Available from: <https://doi.org/10.1242/jeb.091520>.
11. Curet OM, Patankar NA, Lauder GV, Maciver MA. Aquatic manoeuvring with counter-propagating waves: a novel locomotive strategy. *J R Soc Interface*. 2010;1-10; PMID: 21177695. Available from: <https://doi.org/10.1098/rsif.2010.0493>.
12. Chowdhury H, Loganathan B, Wang Y, Mustary I, Alam F. A study of dimple characteristics on golf ball drag. *Procedia Eng*. 2016;147:87-91; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.194>.
13. Hassan SMR, Islam T, Ali M, Islam MQ. Numerical study on aerodynamic drag reduction of racing cars. *Procedia Eng*. 2014;90:308-13; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.854>.



# A CFD application in optimizing the drag force acting on a bionic undulating fin

Le Thanh Long<sup>1,2,\*</sup>, Phan Trung Dat<sup>1,2</sup>, Nguyen Tran Phu<sup>3</sup>



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

## ABSTRACT

Nowadays, autonomous underwater robots are being widely applied around the world to replace humans in surveying the rivers and lakes; researching the oceanography; spying in narrow spaces - places that are hard for humans to reach. When robot moves underwater, there are many factors that affect the robot's movement, especially hydrodynamic resistance. This reduction in drag helps to reduce the power of the motor, save costs in design and manufacture. This paper studies the drag force acting on two undulating fins with different profiles by the computational fluid dynamics (CFD) method with the popular turbulence model  $k-\epsilon$ , the Navier-Stokes equation, and the hydrodynamic drag equation. The results show that the shape of the fin has a significant influence on the drag, especially when the fin profile design has a decreasing amplitude with length, the drag tends to decrease. At the swimming speed of 0.2m/s, the drag force on the improved model is reduced to 0.07N, compared to the traditional model of 0.95N. In addition, the influence of swimming speed is also investigated in this paper. When the swimming speed increases from 0.1m/s to 0.3m/s, the drag force on the improved model increases from 0.02N to 0.16N while that in the traditional model increases from 0.26N to 2N. The model was built by Spaceclaim software and simulated to calculate and optimize drag by ANSYS Fluent with boundary conditions and parameters consistent with previous experiments.

**Key words:** CFD, drag force, gimnotiform fin, bionic undulating fin

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), 268 Ly Thuong Kiet Street, District 10, Ho Chi Minh, Vietnam

<sup>2</sup>Vietnam National University Ho Chi Minh City, Linh Trung Ward, Thu Duc City, Ho Chi Minh City, Vietnam

<sup>3</sup>Faculty of Vehicle and Energy Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam

## Correspondence

**Le Thanh Long**, Faculty of Mechanical Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), 268 Ly Thuong Kiet Street, District 10, Ho Chi Minh, Vietnam

Vietnam National University Ho Chi Minh City, Linh Trung Ward, Thu Duc City, Ho Chi Minh City, Vietnam

Email: ltlong@hcmut.edu.vn

## History

- Received: 13-4-2022
- Accepted: 14-6-2022
- Published: 29-6-2022

DOI : 10.32508/stdjet.v5iS11.977



**Cite this article :** Long L T, Dat P T, Phu N T. **A CFD application in optimizing the drag force acting on a bionic undulating fin.** *Sci. Tech. Dev. J. – Engineering and Technology* 2022; 5(S11):1-9.