

# NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN CÁC THÔNG SỐ THỦY ĐỘNG CỦA CHONG CHÓNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP CFD

## NUMERICAL PREDICTION PROPELLER PERFORMANCE BY CFD METHOD

TRẦN NGỌC TÚ\*, LÊ THANH BÌNH, NGUYỄN THỊ THU QUỲNH

Khoa Đóng tàu, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

\*Email liên hệ: tutn.dt@vimaru.edu.vn

### Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả mô phỏng, tính toán các thông số thủy động của chong chóng (hệ số lực đẩy  $K_T$ , hệ số mô men  $K_Q$  và hiệu suất của chong chóng  $\eta_0$ ) hoạt động trong điều kiện tự do bằng phương pháp động lực học chất lưu (CFD). Phương pháp hệ tọa độ quay được sử dụng để mô phỏng chuyển động quay của chong chóng. Ảnh hưởng của kích thước lưới đến kết quả mô phỏng được đề cập đến trong bài báo. Kết quả mô phỏng có sự so sánh với kết quả thử mô hình trong bể thử để khẳng định độ tin cậy của kết quả tính toán. Ngoài ra bài báo còn đưa ra các hình ảnh về phân bố áp suất trên bề mặt cánh chong chóng, đường dòng bao quanh chong chóng tại các bước tiến tương đối khác nhau của chong chóng, phục vụ cho các bài toán khác nhau trong thiết kế chong chóng.

**Từ khóa:** Chong chóng, CFD, hiệu suất, hệ số lực đẩy, hệ số mô men.

### Abstract

This paper presents the results of numerical prediction of propeller characteristics (thrust coefficient  $K_T$ , torque coefficient  $K_Q$ , and propeller efficiency  $\eta_0$ ) in open water condition by using CFD method. Moving reference frame method is used to model propeller rotation. The effect of mesh density on numerical results are analyzed. The simulation results are compared with the experimental results to confirm the reliability of the calculation results. In addition, the article also provided the images of the pressure distribution on the propeller blades surface, the flow around propeller at different advance coefficient of the propeller, which will be the sources for solving different problems in propeller design.

**Keywords:** Propeller, CFD, performance, thrust coefficient, Torque coefficient.

### 1. Mở đầu

Trong thiết kế tàu, việc tính toán chính xác các thông số thủy động lực học của tàu nói chung và các thông số thủy động của chong chóng nói riêng có vai trò đặc biệt quan trọng bởi nó liên quan đến việc lựa chọn hợp lý và chính xác hệ động lực cho tàu để tàu đạt được tốc độ thiết kế đặt ra.

Ngày nay, phương pháp CFD đã và đang được sử dụng rất rộng rãi trên thế giới trong việc giải quyết các bài toán thủy động lực học tàu thủy nói chung và bài toán tính toán các thông số thủy động của chong chóng nói riêng, bởi đây là một trong những phương pháp tính cho kết quả tin cậy so với kết quả thử mô hình trong bể thử [1]. Ngoài ra, so với phương pháp thử mô hình trong bể thử thì phương pháp CFD có lợi hơn về mặt kinh tế do không phải chế tạo mô hình vật lý để thử, thời gian cho kết quả nhanh hơn, việc xử lý sau tính toán CFD còn cho phép người thiết kế có thể quan sát được chi tiết đường dòng bao quanh chong chóng để phục vụ cho việc tối ưu hóa chong chóng. Tuy nhiên, CFD chỉ ra một công cụ tính nên độ chính xác của kết quả tính bằng CFD phụ thuộc rất nhiều vào kỹ năng của người tính toán như việc lựa chọn kích thước miền chất lỏng tính toán, loại lưới, kích thước lưới, mô hình vật lý, phương pháp mô phỏng...[2, 3].

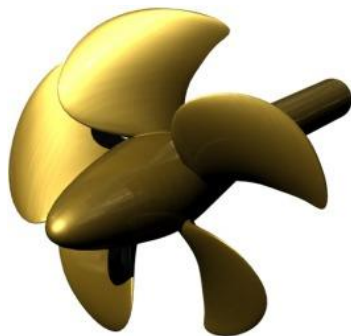
Việc áp dụng CFD vào trong mô phỏng, tính toán các thông số thủy động của chong chóng đã được nhiều các tác giả thực hiện [2, 4-7]. Tác giả Judyta Felicjancik [6] và các cộng sự đã tiến hành nghiên cứu mô phỏng, tính toán hiệu suất của chong chóng dưới dạng tỷ lệ mô hình bằng CFD qua phần mềm thương mại Star-CCM+. Đề mô phỏng chuyển động quay của chong chóng, nhóm tác giả sử dụng phương pháp hệ tọa độ quay, loại lưới mà nhóm tác giả sử dụng trong mô phỏng là lưới đa diện. Kết quả mô phỏng mà các tác giả thu được cho sai số từ 2,5 đến 11% so với kết quả thử mô hình trong bể thử tùy thuộc vào bước tiến tương đối của chong chóng. Nhóm tác giả Nakisa và các cộng sự [5] đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của các mô hình dòng rối khác nhau đến kết quả tính toán các thông số thủy động của chong chóng. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, việc sử dụng mô hình dòng rối

SST K-omega cùng với việc sử dụng lưới trượt cho kết quả gần với kết quả thử mô hình trong bể thử nhất. Sai số lớn nhất giữa hệ số mô men và hệ số lực đẩy của chong chóng so với kết quả thử mô hình trong bể thử lần lượt là 9,6% và 7,4%. Tác giả Xiao-Qian Dong cùng các cộng sự [7] đã sử dụng CFD để nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ mô hình đến kết quả tính toán hiệu suất của chong chóng hoạt động trong điều kiện tự do. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, tỷ lệ mô hình có ảnh hưởng đến kết quả tính toán lực đẩy và mô men của chong chóng. Nhóm tác giả Tu.TN [2] đã sử dụng CFD với sự hỗ trợ của phần mềm Star-CCM+ để tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của loại lưới, kích thước lưới và mô hình dòng rối đến kết quả tính toán các thông số thủy động của chong chóng ở dạng tỷ lệ mô hình. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, loại lưới, kích thước lưới và mô hình dòng rối đều là các yếu tố ảnh hưởng đến kết quả mô phỏng. Trong đó việc sử dụng loại lưới lục diện kết hợp với mô hình dòng rối SST K-omega cho kết quả tốt nhất so với kết quả thử mô hình trong bể thử.

Các nghiên cứu đi trước kể trên đóng vai trò quan trọng trong việc áp dụng CFD vào trong tính toán các thông số thủy động của chong chóng. Tuy nhiên, ở đây các nghiên cứu ở trên đa phần mới chỉ tập trung vào nghiên cứu mô phỏng, tính toán các thông số thủy động của chong chóng ở dạng tỷ lệ mô hình. Bài báo này, trên cơ sở kế thừa các nghiên cứu đi trước sẽ tiến hành tính toán, mô phỏng các thông số thủy động của chong chóng ở dạng tỷ lệ thực hoạt động trong điều kiện tự do bằng phương pháp CFD. Mô hình chong chóng được sử dụng trong tính toán là mô hình chong chóng Potsdam [8] ở dạng tỷ lệ thực. Các yếu tố ảnh hưởng đến kết quả mô phỏng gồm cách chia lưới, mật độ lưới sẽ được phân tích và tính đến nhằm nâng cao độ tin cậy của kết quả mô phỏng thu được.

## 2. Thiết lập mô phỏng

### 2.1. Mô hình chong chóng



Hình 1. Hình dáng chong chóng Potsdam [8]

Mô hình chong chóng được sử dụng trong nghiên cứu này là chong chóng Potsdam [8]. Hình dáng và các thông số chủ yếu của chong chóng này được trình bày trên Bảng 1 và Hình 1. Kết quả thử trong bể thử của chong chóng này được công bố trên website [8].

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật của chong chóng

Potsdam

Các thông số	Đơn vị	Giá trị	
Đường kính chong chóng	D	m	3,00
Tỷ số đĩa	$A_E/A_0$	-	0,779
Tỷ số bước	$P_{0,7}/D$	-	1,6295
Số cánh	Z	-	5
Số vòng quay	n	Vòng/giây	4,33
Độ nhám	$k_s$	$\mu\text{m}$	10
Chiều quay	-	-	Quay phải

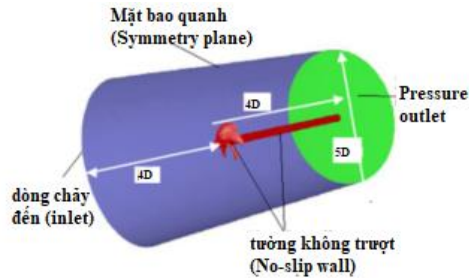
### 2.2. Phương pháp mô phỏng và mô hình vật lý

Để mô phỏng chong chóng bằng CFD, hiện có ba phương pháp khác nhau gồm [9]: Phương pháp sử dụng hệ tọa độ quay, phương pháp toàn miền chất lỏng quay và phương pháp lưới trượt. Trong đó phương pháp hệ tọa độ quay cho kết quả không khác nhiều so với hai phương pháp còn lại nhưng thời gian tính toán nhanh hơn. Chính vì vậy, bài báo này sẽ sử dụng phương pháp hệ tọa độ quay để mô phỏng chuyển động quay của chong chóng. Mô hình vật lý được sử dụng trong mô phỏng là mô hình chất lỏng thực RANSE (phương trình Navier-Stokes trung bình theo Reynolds) với dòng chảy đều do dòng chảy đến chong chóng ở điều kiện tự do là dòng chảy đều. Mô hình dòng chảy rối được sử dụng trong mô phỏng là mô hình dòng rối SST K-omega. Đây là mô hình dòng rối cho kết quả tin cậy hơn so với các mô hình dòng rối khác trong mô phỏng chong chóng [2].

### 2.3. Thiết lập kích thước miền tính toán và điều kiện biên

Kích thước miền chất lỏng tính toán và điều kiện biên là một trong những yếu tố ảnh hưởng đến kết quả mô phỏng. Kích thước miền chất lỏng tính toán cần phải đủ lớn để đảm bảo dòng chảy đến chong chóng là dòng chảy đều và dòng chảy phía sau chong chóng không bị dội lại. Theo khuyến nghị của ITTC [10], kích thước miền tính toán trong mô phỏng chong chóng hoạt động trong điều kiện tự do có dạng hình lăng trụ với đường kính gấp 5 lần đường kính chong chóng, biên trước và biên sau cách chong chóng một đoạn bằng 4 lần đường kính chong chóng. Điều kiện biên được áp dụng như sau: Dòng chảy

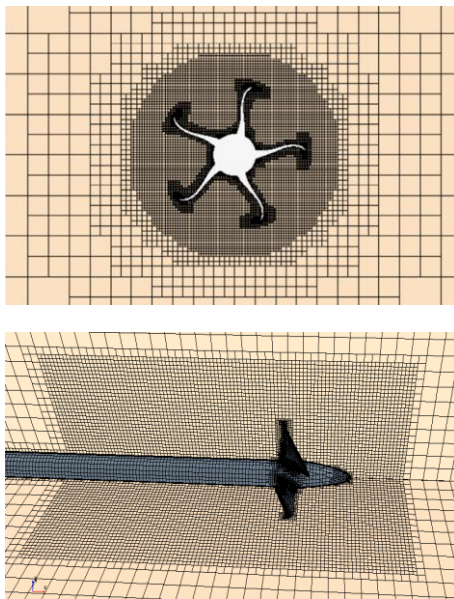
đến chong chóng là tốc độ dòng đến, dòng chảy sau chong chóng là áp suất dòng ra, miền chất lỏng bao quanh chong chóng là mặt đối xứng, điều kiện biên áp dụng cho các phần của chong chóng (cánh, củ, trục) là tường không trượt.



Hình 2. Kích thước miền tính toán và điều kiện biên [2]

### 2.4. Lựa chọn lưới và chia lưới

Loại lưới, cách chia lưới và kích thước lưới cũng là một trong những yếu tố đầu vào ảnh hưởng đến kết quả mô phỏng. Trong mô phỏng chong chóng loại lưới thường được sử dụng là loại lưới hexahedral và loại lưới prism layer dùng để giải lớp biên bao quanh chong chóng. Để số lượng lưới sử dụng là ít nhất trong khi vẫn đảm bảo được độ chính xác trong mô phỏng, lưới sẽ được làm mịn tại các vị trí quan trọng như (khu vực gần chong chóng, khu vực mép cánh). Kết quả chia lưới được trình bày trên Hình 3. Trên Hình 3, ta có thể quan sát thấy tại các khu vực quan trọng thì lưới đều được làm mịn, nghĩa là kích thước lưới tại các khu vực này nhỏ hơn so với các khu vực không quan trọng.



Hình 3. Kết quả chia lưới

### 2.5. Thiết lập điều kiện và trường hợp tính

Việc tính toán các thông số thủy động của chong chóng sẽ được thực hiện trong điều kiện giống như điều kiện trong thử thực tế với khối lượng riêng của nước  $\rho=1,02587t/m^3$ , độ nhớt động học của nước  $\nu=1,188.10^{-6}m^2/s$ , độ nhám của cánh  $10\mu m$ , vòng quay của chong chóng 4,33 vòng/giây. Việc tính toán sẽ được thực hiện trong dải bước tương đối của chong chóng, J từ 0,80 đến 1,60 với bước là 0,2.

## 3. Kết quả mô phỏng tính toán

### 3.1. Nghiên cứu sự hội tụ của lưới

Bước đầu tiên trong tính toán bằng CFD là ta cần phải nghiên cứu sự hội tụ của lưới để tránh các sai số do việc chia lưới gây ra. Ở đây, theo khuyến nghị của Hiệp hội bể thử quốc tế (ITTC) [11], việc nghiên cứu sự hội tụ của lưới sẽ được tiến hành với ba mật độ (kích thước) lưới khác nhau với sự thay đổi tỷ lệ độ mịn của lưới là  $r_G = \sqrt{2}$ . Theo đó, 3 mật độ lưới được sử dụng trong nghiên cứu sự hội tụ của lưới gồm lưới thô, lưới cỡ trung và lưới mịn ứng với số lượng lưới lần lượt là 1,8, 3,45 và 6,28 triệu. Việc nghiên cứu được tiến hành tại bước tiến tương đối đối J=1,2.

Sự thay đổi về kết quả tính thu được khi sử dụng các lưới có kích thước khác nhau được xác định theo biểu thức:

$$\varepsilon_{12} = (S_1 - S_2) / S_1; \varepsilon_{23} = (S_2 - S_3) / S_2 \quad (1)$$

Ở đây:  $S_1, S_2, S_3$  - là kết quả tính toán các thông số thủy động của chong chóng khi sử dụng các kích thước lưới khác nhau lần lượt là lưới mịn, lưới cỡ trung và lưới thô.

Sự hội tụ của kết quả mô phỏng được đánh giá dựa trên biểu thức (2). Tùy thuộc vào dấu và giá trị của  $R_k$ , sẽ có 3 trường hợp xảy ra gồm:

- Hội tụ đơn điệu  $0 < R_k < 1$ ;
- Hội tụ phân kỳ  $R_k < 0$ ;
- Không hội tụ  $R_k > 1$ .

$$R_k = \frac{\varepsilon_{12}}{\varepsilon_{23}} \quad (2)$$

Kết quả nghiên cứu sự hội tụ của lưới tại J=1,2 được trình bày trên Bảng 2.

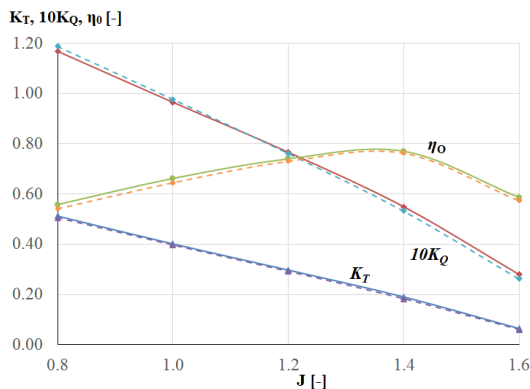
Từ kết quả nghiên cứu sự hội tụ của lưới trên Bảng 2, ta thấy rằng kết quả mô phỏng thu được ở cả 3 thông số thủy động của chong chóng là hội tụ đơn điệu và sự thay đổi giá trị các thông số thủy động của chong

chóng ở đây là rất nhỏ và không khác nhiều so với kết quả thử mô hình ( $K_T$ ,  $10K_Q$ ,  $\eta_0$  có giá trị lần lượt là 0,297, 0,766, 0,740 [8]). Chính vì vậy, ở đây sẽ sử dụng lưới cỡ trung để tiến hành tính toán các thông số thủy động của chong chóng ở các bước tiến tương đối khác nhau còn lại của chong chóng tính toán.

**Bảng 2. Kết quả nghiên cứu sự hội tụ của lưới tại  $J=1,2$**

Các thông số	Mật độ lưới			$\epsilon_{23}$	$\epsilon_{12}$	$R_k$
	Lưới thô	Lưới cỡ trung	Lưới mịn			
$K_T$	0,283	0,287	0,290	0,014	0,010	0,74
$10K_Q$	0,766	0,759	0,758	-0,009	-0,001	0,14
$\eta_0$	0,706	0,722	0,731	0,023	0,012	0,50

### 3.2. Kết quả mô phỏng



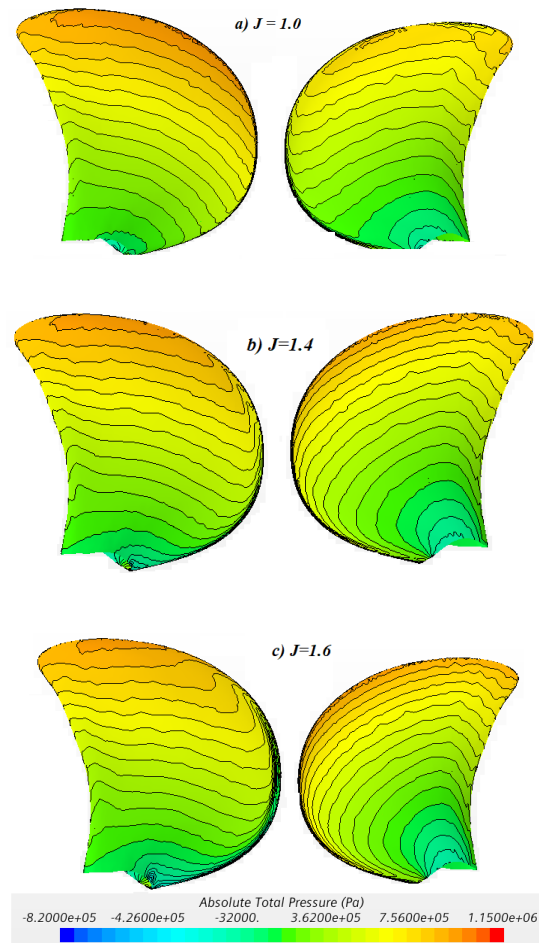
**Hình 4. So sánh giữa kết quả tính bằng CFD với kết quả thử mô hình**

Kết quả tính toán các thông số thủy động của chong chóng làm ở điều kiện tự do khi so với kết quả thử mô hình được trình bày trên Bảng 3 và Hình 4.

Từ Bảng 3 và Hình 4, ta thấy rằng, kết quả tính toán mô phỏng khá sát so với kết quả thử mô hình, đặc biệt là tại các bước tiến tương đối J nhỏ (sai số từ 1,2 đến 4,2% đối với  $K_T$ , 0,7 đến 3,1% đối với  $K_Q$ ; từ 1,0

**Bảng 3. Bảng kết quả tính toán các thông số thủy động của chong chóng tại các J khác nhau**

J	$K_T$			$10K_Q$			$\eta_0$		
	Kết quả thử [8]	Tính toán bằng CFD	% sai số	Kết quả thử [8]	Tính toán bằng CFD	% sai số	Kết quả thử [8]	Tính toán bằng CFD	% sai số
0,8	0,512	0,505	1,4	1,168	1,187	-1,6	0,558	0,542	2,9
1,0	0,401	0,396	1,2	0,965	0,977	-1,2	0,662	0,645	2,6
1,2	0,297	0,287	2,0	0,766	0,759	0,7	0,740	0,722	1,3
1,4	0,190	0,182	4,2	0,549	0,532	3,1	0,770	0,762	1,0
1,6	0,064	0,059	7,8	0,279	0,262	6,1	0,586	0,573	2,1

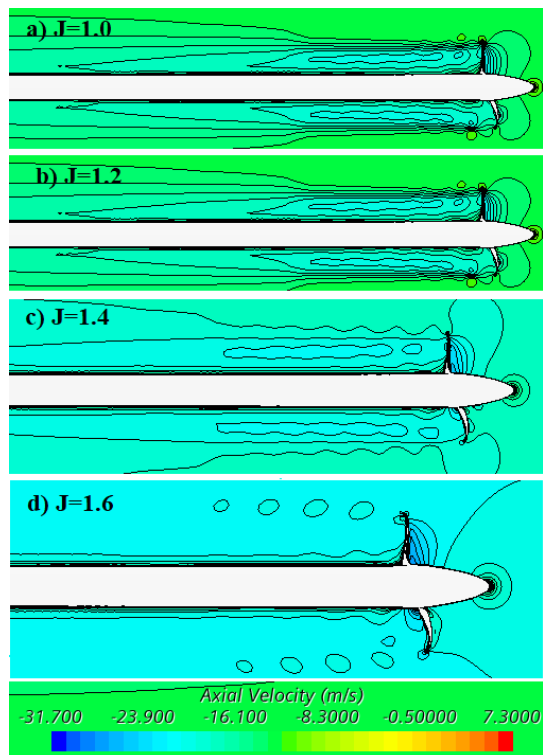


**Hình 5. Phân bố áp suất trên mặt đạp và mặt hút của cánh chong chóng tại các J khác nhau**

đến 2,9% đối với  $\eta_0$  tại bước tiến tương đối J từ 0,8 đến 1,4). Sai số tương đối tăng lên khi bước tiến tương đối tăng đặc biệt là tại bước tiến  $J=1,6$  (bên kia sườn của đường cong). Tuy nhiên, xét dưới góc độ sai số tuyệt đối thì mức sai số thu được là xấp xỉ nhau ở các J khác nhau.



Các hình ảnh về phân bố áp suất và tốc độ dòng tại các bước tiến tương đối khác nhau  $J$  được trình bày trên Hình 5 và 6.



Hình 6. Phân bố tốc độ dòng chảy dọc theo phương dọc trục chong chóng tại các  $J$  khác nhau

## 5. Kết luận

Bài báo đã thành công trong việc áp dụng CFD vào trong nghiên cứu mô phỏng các thông số thủy động của chong chóng hoạt động trong điều kiện tự do. Kết quả tính toán mô phỏng thu được rất gần với kết quả thử mô hình (Sai số đối với hệ số lực đẩy dao động trong dải từ 1,2 đến 4,2%, đối với hệ số mô men sai số nằm trong dải từ 0,7 đến 3,1%. Sai số đối hiệu suất của chong chóng là từ 1,0 đến 2,9%). Ngoài ra, bài báo còn chỉ ra sự ảnh hưởng của kích thước lưới đến kết quả mô phỏng và thu được. Bên cạnh đó bài báo còn đưa ra một số hình ảnh về đường dòng bao quanh chong chóng, phân bố áp suất trên bề mặt cánh chong chóng tại các bước tiến tương đối khác nhau của chong chóng. Đây là các hình ảnh rất quan trọng trong việc phân tích đường dòng phục vụ cho các bài toán khác trong thiết kế chong chóng.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số DT20-21.20.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Molland, A.F., S.R. Turnock, and D.A. Hudson, *Ship resistance and propulsion*. Cambridge university press. 2017.
- [2] Tu, T.N., *Numerical simulation of propeller open water characteristics using RANSE method*. Alexandria Engineering Journal. Vol.58 (2), pp.531-537, 2019.
- [3] Baltazar, J., D. Rijpkema, and J.F. de Campos, *On the use of the  $\gamma-R^*$  eht transition model for the prediction of the propeller performance at model-scale*. Fifth International Symposium on Marine Propulsors. Vol.170, pp.06-19, 2018.
- [4] Sánchez-Caja, A., et al., *Scale effects on tip loaded propeller performance using a RANSE solver*. Ocean Engineering Vol.88, pp.607-617, 2014.
- [5] Nakisa, M., M.J. Abbasi, and A.M. Amini. *Assessment of marine propeller hydrodynamic performance in open water via CFD*. in *Proceedings of The 7th International Conference on Marine Technology (MARTEC 2010)*. 2010.
- [6] Felicjancik, J., et al., *Numerical simulations of hydrodynamic open-water characteristics of a ship propeller*. Polish Maritime Research. Vol.23 (4), pp.16-22, 2016.
- [7] Dong, X.-Q., et al., *RANSE-based simulation and analysis of scale effects on open-water performance of the PPTC-II benchmark propeller*. Vol.3 (3), pp.186-204, 2018.
- [8] <https://www.sva-potsdam.de/en/ittc-benchmark/>.
- [9] Tu, T.N. and N.M. Chien, *Comparison Of Different Approaches For Calculation Of Propeller Open Water Characteristic Using RANSE Method*. Naval Engineers Journal. Vol.30 (1), pp.105-111, 2018.
- [10] ITTC - Recommended Procedures and Guidelines. *Practical Guidelines for Ship Self-Propulsion CFD*. 2014.
- [11] Tahara, Y., et al., *RANS simulation of a container ship using a single-phase level-set method with overset grids and the prognosis for extension to a self-propulsion simulator*. Journal of marine science and technology. Vol.11 (4), pp.209-228, 2006.

Ngày nhận bài:	18/02/2021
Ngày nhận bản sửa:	01/3/2021
Ngày duyệt đăng:	08/3/2021