

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG DÒNG CHẢY BAO QUANH THÂN TÀU
TRÊN NƯỚC TĨNH BẰNG PHƯƠNG PHÁP CFD
NUMERICAL SIMULATION FLOW AROUND THE SHIP
IN CALM WATER CONDITION BY CFD METHOD

TRẦN NGỌC TÚ*, PHẠM THỊ THANH HẢI, NGUYỄN MẠNH CHIẾN

Khoa Đóng tàu, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: tutn.dt@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo thực hiện việc nghiên cứu tính toán lực cản tàu và các đặc trưng về dòng chảy bao quanh thân tàu tại các tốc độ khác nhau khi chạy trên nước tĩnh bằng phương pháp số CFD. Ảnh hưởng của tốc độ tàu đến lực cản, hình dáng sóng bề mặt và profile dọc thân tàu, phân bố ứng suất tiếp và áp suất động trên bề mặt thân tàu, dòng theo phía sau thân tàu, diện tích ngâm nước của đuôi transom được đưa ra và phân tích trong nghiên cứu này. Kết quả mô phỏng tính toán được đối sánh với kết quả thực nghiệm nhằm kiểm tra độ tin cậy của kết quả tính toán.

Từ khóa: Dòng chảy, CFD, lực cản tàu, mô phỏng.

Abstract

This paper presents the simulation results of ship resistance and flow around the hull of the ship at different ship speeds in calm water condition by CFD method. The effect of ship speed on ship resistance, wave pattern and wave profile along the ship, distribution of wall shear stress and dynamic pressure on the hull surface, nominal wake field, transom wetted surface area are presented and analyzed in the paper. The obtained numerical results are compared with the measured data to verify the reliability of the simulation results.

Keywords: Flow, CFD, resistance, simulation.

1. Đặt vấn đề nghiên cứu

Trong bài toán thiết kế tuyến hình tàu, việc có được các thông tin chính xác về dòng chảy bao quanh thân tàu khi chuyển động có ý nghĩa rất quan trọng bởi nó là thông số đầu vào phục vụ cho nhiều bài toán thiết kế khác nhau như: Bài toán tối ưu hóa tuyến hình tàu; bài toán thiết kế hệ thiết bị đẩy cho tàu,...

Như chúng ta đã biết, để có được các thông tin về đường dòng bao quanh thân tàu, người ta đang sử dụng hai phương pháp gồm: Phương pháp CFD và phương pháp thử mô hình trong bể thử. Trong đó,

phương pháp thử là phương pháp cung cấp cho chúng ta số liệu tin cậy nhất về đặc điểm dòng chảy bao quanh thân tàu. Tuy nhiên, phương pháp này đòi hỏi về mặt thời gian và chi phí rất lớn. Vì lý do này mà phương pháp thực nghiệm là không khả thi khi áp dụng vào trong giai đoạn thiết kế phương án. Đối với phương pháp CFD, nó có ưu điểm là cho kết quả khá tin cậy, giảm thời gian và chi phí trong việc tính toán so với thử mô hình. Ngoài ra, phương pháp CFD còn cung cấp cho chúng ta chi tiết về đặc điểm dòng chảy bao quanh thân tàu hơn nhiều so với thử mô hình [1]. Chính vì vậy, CFD đã và đang được áp dụng rất phổ biến trên thế giới vào trong nghiên cứu dòng chảy bao quanh thân tàu nói riêng và trong việc giải quyết các bài toán thủy động lực học của tàu nói chung. Ví dụ, nghiên cứu của nhóm tác giả Satu Hänninen & Juha Schweighofer [2] về đường dòng bao quanh thân tàu container Hamburg Test Case ở các tỷ lệ mô hình khác nhau bằng phương pháp số CFD. Nghiên cứu của nhóm tác giả đã đưa ra được các hình ảnh về dòng chảy bao quanh thân tàu khi chuyển động ở các tỷ lệ mô hình khác nhau. Tác giả Tu và các cộng sự [3] đã thực hiện việc nghiên cứu ảnh hưởng của việc lựa chọn mô hình dòng rôi đến sự thay đổi đặc tính dòng chảy bao quanh thân tàu DTMB. Nghiên cứu của nhóm tác giả đã chỉ ra, việc lựa chọn mô hình dòng rôi có ảnh hưởng khá lớn đến kết quả mô phỏng tính toán lực cản và dòng chảy bao quanh thân tàu. Nhóm tác giả Ke-wei Song và các cộng sự [4] đã sử dụng phương pháp CFD kết hợp với phương pháp thực nghiệm trong việc nghiên cứu ảnh hưởng của tấm cánh gắn vào đuôi tàu đến lực cản và dòng chảy quanh thân tàu. Thông qua việc phân tích dòng chảy bao quanh thân tàu, bài báo đã giải thích được ảnh hưởng của tấm cánh gắn vào đuôi tàu đến lực cản và tư thế của tàu khi chuyển động.

Các nghiên cứu đi trước kể trên của các tác giả trên thế giới là nguồn tài liệu tham khảo bổ ích trong việc áp dụng phương pháp CFD vào trong nghiên cứu tính toán lực cản và mô phỏng dòng chảy bao quanh thân tàu. Bài báo này, sẽ tiến hành mô phỏng chuyển động của tàu trên nước tĩnh khi chạy ở các vận tốc khác

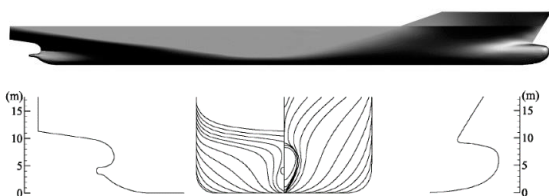
nhau bằng phương pháp CFD. Đối tượng nghiên cứu được sử dụng trong bài báo này là mô hình tàu container KCS [5].

2. Giới thiệu về mô hình tàu container KCS

Đối tượng nghiên cứu được nhóm tác giả sử dụng trong bài báo này là tàu container KCS ở dạng tỷ lệ mô hình. Đây là mô hình tàu được thiết kế bởi Viện Nghiên cứu tàu và Công trình ngoài khơi Hàn Quốc. Lý do nhóm nghiên cứu sử dụng mô hình tàu này làm đối tượng nghiên cứu bởi đây là mô hình tàu mà tất cả mọi người có thể tiếp cận được ở trên mạng cả về hình dáng và kết quả thử nghiệm mô hình này trong bể thử [5-7]. Các đặc trưng hình học cơ bản và hình dáng thân tàu container KCS được biểu diễn trên Bảng 1 và Hình 1.

Bảng 1. Các thông số hình học của mô hình tàu container KCS

Các thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
Chiều dài hai đường vuông góc	L_{PP}	[m]	7,2786
Chiều rộng tàu	B	[m]	1,0190
Đường nước thiết kế của tàu	T	[m]	0,3418
Lượng chiếm nước thể tích	∇	[m ³]	1,648
Diện tích mặt ướt của tàu	S	[m ²]	9,5121
Hệ số béo thể tích của tàu	C_B	[-]	0,6505



Hình 1. Hình dáng tàu container KCS

3. Thiết lập mô phỏng

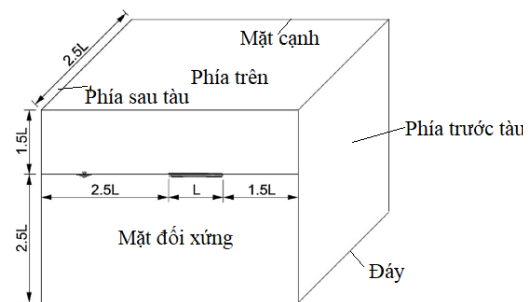
3.1. Xây dựng điều kiện và các trường hợp tính

Để có thể đối sánh kết quả mô phỏng với kết quả thực nghiệm, điều kiện tính toán mô phỏng và các trường hợp tính sẽ được thiết lập giống như trong thực nghiệm khi thử tàu container KCS trong bể thử [6, 7]. Cụ thể ở đây sẽ tiến hành mô phỏng dòng chảy bao quanh thân tàu khi chạy trên nước tĩnh tại các số Froude 0,108, 0,152, 0,195, 0,227 và 0,260, tàu chuyển động tự do tịnh tiến theo phương 0z và chuyển động quay quanh trục 0y. Độ nhớt, khối lượng riêng của nước được lấy giống như trong điều kiện thực nghiệm.

3.2. Xác định miền tính toán và lựa chọn loại điều kiện biên

Do tàu có đặc điểm là đối xứng qua mặt phẳng dọc tâm, do vậy, để giảm thời gian mô phỏng, trong bài toán này, ta chỉ cần tiến hành tính toán cho một nửa thân tàu. Theo đó, kích thước của miền tính toán (bề thử ảo) được xác định dựa trên khuyến nghị của ITTC (Hội nghị bề thử quốc tế) [8]. Biên của bề thử ảo nằm phía trước tàu cách mũi tàu một khoảng là $1,5L_{PP}$, biên của bề thử ảo nằm phía sau tàu cách đuôi tàu một khoảng là $2,5L_{PP}$. Miền không gian phía trên, phía dưới tàu và phía mạn tàu nằm cách tàu một khoảng lần lượt là $1,5L_{PP}$, $2,5L_{PP}$ và $2,5L_{PP}$.

Loại điều kiện biên được lựa chọn trong bài toán này như sau: Đối với miền tính toán, biên của miền tính toán phía trước, phía trên và phía dưới tàu là velocity inlet, biên của miền tính toán phía sau tàu là pressure outlet, biên của miền tính toán phía mạn và mặt đối xứng của tàu là symmetry plane. Đối với thân tàu, loại điều kiện biên được lựa chọn là No-slip wall.



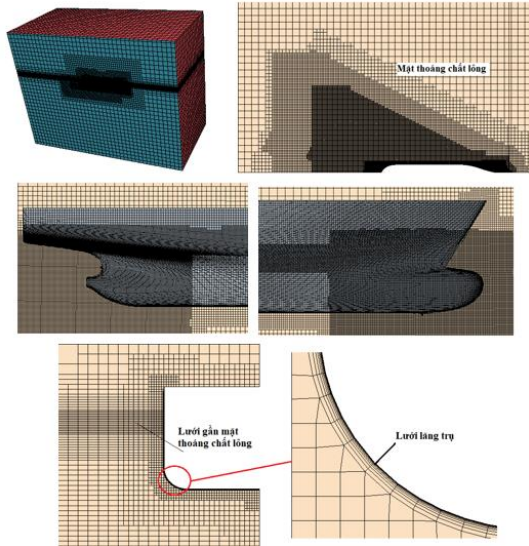
Hình 2. Kích thước bề thử ảo

3.3. Lưới và mô hình vật lý

Trong mô phỏng tính toán bằng CFD, lưới là một trong các tham số thiết lập ảnh hưởng rất lớn đến kết quả tính toán. Loại lưới được sử dụng trong nghiên cứu này gồm: Lưới trimmed và lưới prism layer. Lưới trimmed được dùng để chia miền không gian tính ra thành các thể tích hữu hạn. Lưới prism layer dùng để giải lớp biên bao quanh thân tàu [9]. Nhằm giảm số lượng phần tử lưới trong khi vẫn giữ được độ chính xác về kết quả tính toán, lưới sẽ được refine tại các vị trí và khu vực quan trọng như: Tại vị trí gần mặt thoáng chất lỏng, tại khu vực gần tàu, đặc biệt là tại phía mũi và đuôi tàu nơi có đường cong phức tạp. Kết quả tạo lưới được thể hiện trên Hình 3.

Mô hình dòng chảy nhớt không bị nén RANSE được sử dụng trong bài toán này. Mô hình dòng rối SST K- ω được sử dụng để đóng phương trình RANSE.

SST K- ω là mô hình dòng rối được các tác giả [3] khuyến nghị áp dụng bởi đây việc sử dụng mô hình dòng rối này cho kết quả mô phỏng tin cậy so với kết quả thực nghiệm, thời gian cho kết quả hội tụ nhanh.



Hình 3. Kết quả chia lưới

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Kết quả tính toán lực cản tàu

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 lưới gây ra. Ở đây, theo khuyến nghị của Hiệp hội bể thử quốc tế (ITTC) [10], việc nghiên cứu sự hội tụ của lưới sẽ được tiến hành với ba kích thước lưới khác nhau với sự thay đổi tỷ lệ độ mịn của lưới là $r_G = \sqrt{2}$. Trong bài toán này, 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 phần tử lưới lần lượt là 0,75, 1,25 và 2,48 triệu. Kết quả nghiên cứu sự hội tụ của lưới tại tốc độ $Fr=0,26$ được trình bày trên Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả nghiên cứu sự hội tụ của lưới tại $Fr=0,26$

Hệ số lực cản tàu	Mật độ lưới			ϵ_{23}	ϵ_{12}	R_k
	Lưới thô	Lưới cỡ trung	Lưới mịn			
$10^3 C_T$	3,86	3,78	3,75	-0,08	-0,03	0,375

Các đại lượng ϵ_{23} , ϵ_{12} và R_k trong Bảng 2 được xác định như sau:

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

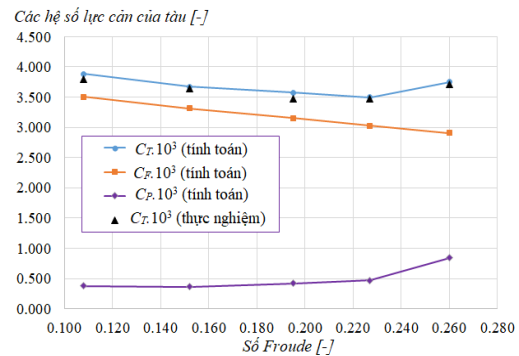
$$R_k = \epsilon_{12} / \epsilon_{23} \quad (2)$$

Trong đó: S_1 , S_2 , S_3 - là kết quả tính toán lực cản

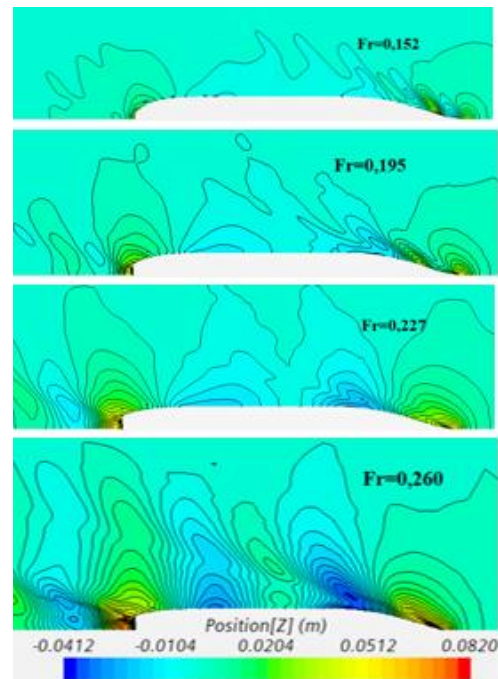
tàu khi sử dụng các kích thước lưới lần lượt là lưới mịn, lưới cỡ trung và lưới thô.

Bảng 3. Kết quả tính toán lực cản tàu các số Froude khác nhau có sự đối sánh với kết quả thử

Fr [-]	Mô phỏng bằng CFD			Thực nghiệm	E%D [%]
	$C_T \cdot 10^3$ [-]	$C_F \cdot 10^3$ [-]	$C_P \cdot 10^3$ [-]	$C_T \cdot 10^3$ [-]	
0,108	3,882	3,502	0,380	3,796	2,27
0,152	3,675	3,312	0,363	3,641	0,93
0,195	3,575	3,155	0,420	3,475	2,88
0,227	3,498	3,028	0,470	3,467	0,89
0,260	3,75	2,907	0,843	3,711	1,05



Hình 4. Đồ thị quan hệ giữa các hệ số lực cản thành phần của tàu với số Froude của tàu

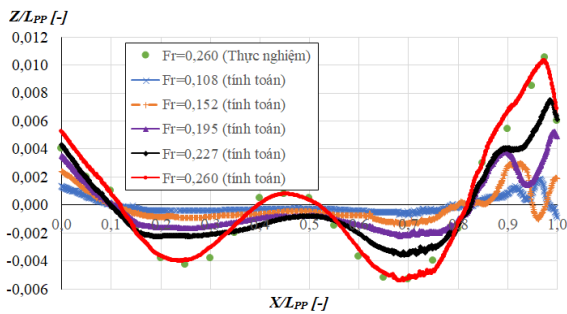


Hình 5. Hình dáng sóng tại mặt thoáng chất lỏng ở các số Froude khác nhau

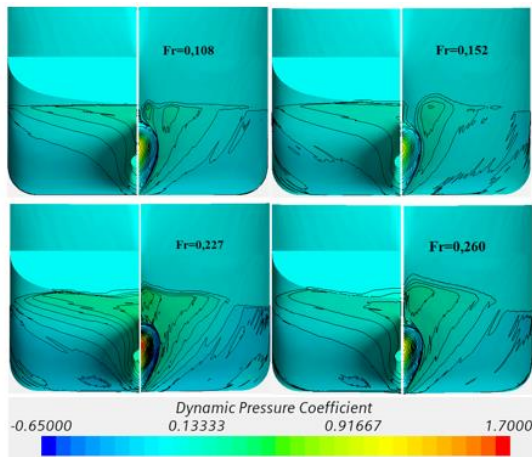
Theo kết quả nghiên cứu sự hội tụ của lưới trên Bảng 2, ta thấy rằng kết quả mô phỏng thu được là hội tụ đơn điệu và sự thay đổi hệ số lực cản tàu ở đây là rất nhỏ khi sử dụng lưới mịn (sai số 1,05% so với kết quả thử mô hình, với kết quả thử mô hình cho $C_T=3,711.10^{-3}$ [6, 7]). Chính vì vậy, ở đây sẽ sử dụng lưới mịn để mô phỏng dòng chảy bao quanh thân tàu ở các số Froude khác nhau.

Kết quả tính toán lực cản tàu và các thành phần lực cản của nó ở các số Froude khác nhau có sự so sánh

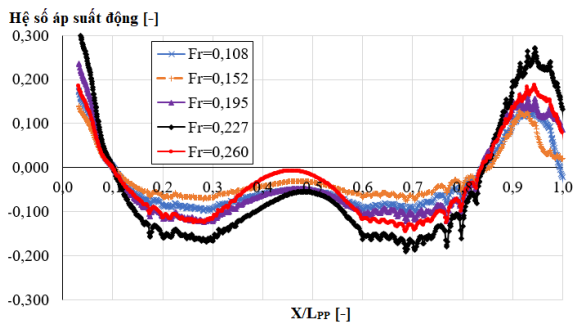
với kết quả thực nghiệm do trong bể thử được biểu diễn trên Bảng 3 và Hình 4. Trong đó các ký hiệu C_F , C_P , $E\%D$ trong Bảng 3 lần lượt được hiểu là hệ số lực cản thành phần ma sát, hệ số lực cản thành phần áp suất của tàu và sai số giữa tính toán và thực nghiệm. Như trên Bảng 3 ta có thể quan sát thấy sai số giữa tính toán và thực nghiệm rất nhỏ chỉ nằm trong dải từ 0,89% đến 2,88%. Khi tăng tốc độ tàu thì hệ số lực ma sát giảm dần và hệ số lực cản áp suất tăng lên.



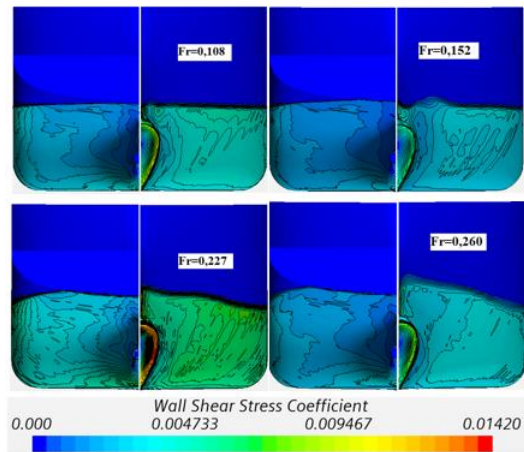
Hình 6. Profile sóng dọc thân tàu khi chuyển động ở các số Froude khác nhau



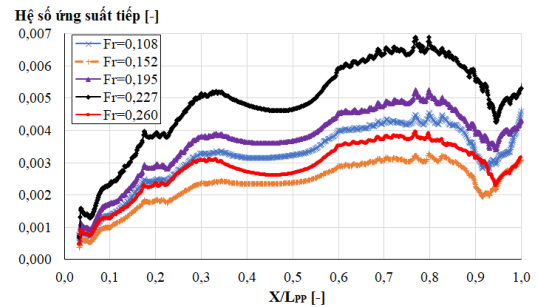
Hình 7. Áp suất động trên bề mặt thân tàu khi chuyển động ở các số Froude khác nhau



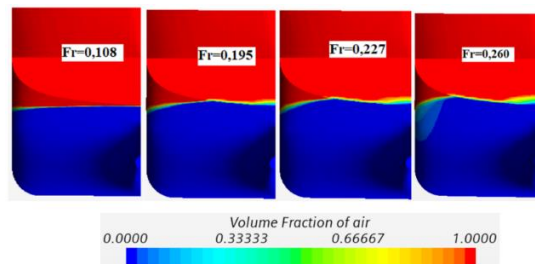
Hình 8. Phân bố áp suất động tại $Z/T=0,5$ ở các số Froude khác nhau



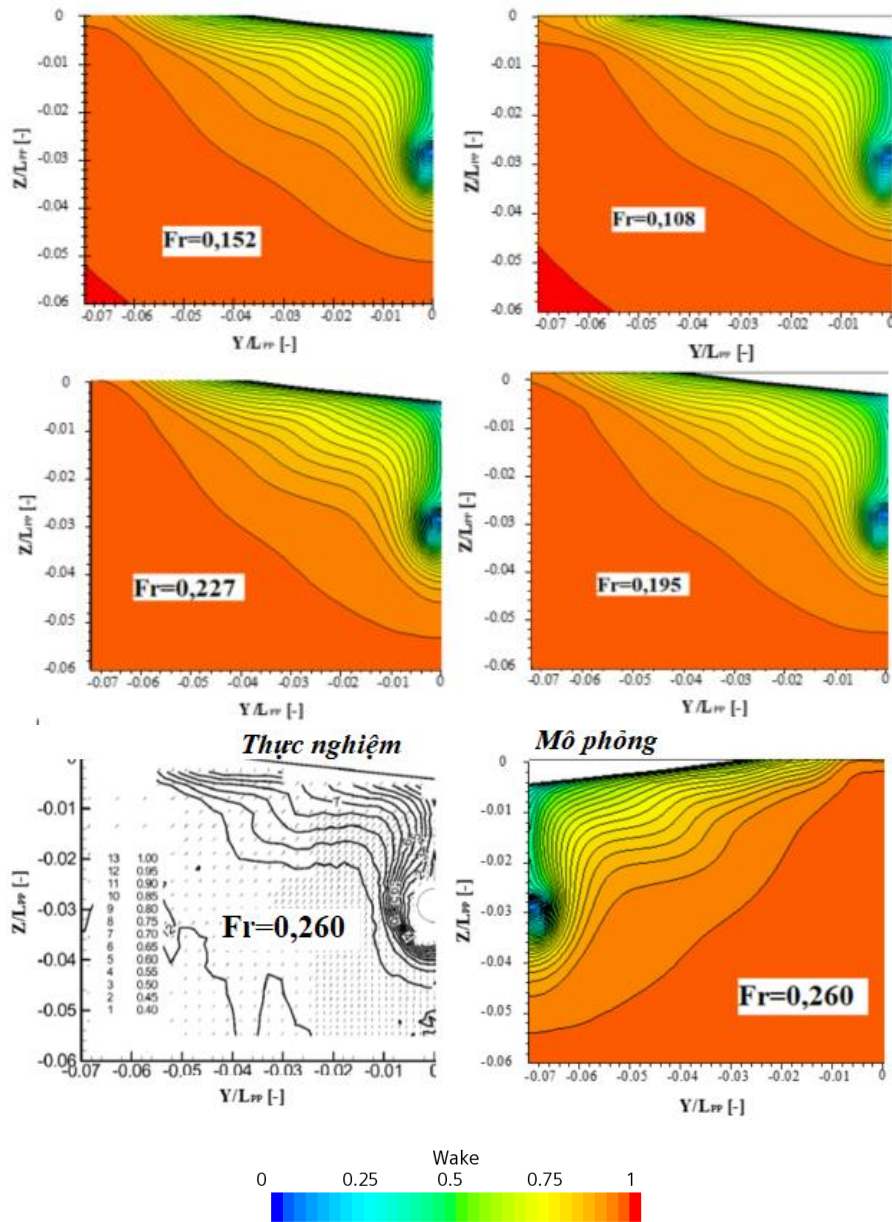
Hình 9. Ứng suất tiếp trên bề mặt thân tàu khi chuyển động ở các số Froude khác nhau



Hình 10. Phân bố ứng suất tiếp tại $Z/T=0,5$ ở các số Froude khác nhau



Hình 11. Ảnh hưởng của số Froude đến phần diện tích ngâm nước đuôi transom



Hình 12. Trường dòng theo danh nghĩa tại đĩa chong chóng ở các số Froude khác nhau

4.2. Kết quả mô phỏng đường dòng bao quanh thân tàu

Các thông tin về dòng chảy bao quanh thân tàu khi chạy ở các tốc độ khác nhau được biểu diễn trên các hình từ Hình 5 đến Hình 12. Trên Hình 5 chúng ta có thể nhận thấy sự khác nhau về biên độ và hình dạng sóng tại mặt thoáng chất lỏng khi tàu chuyển động ở các số Froude khác nhau. Profile sóng dọc thân tàu có biên độ tăng dần khi tăng số Froude của tàu (xem Hình 6). Từ Hình 6 chúng ta cũng có thể nhận thấy kết quả mô phỏng profile sóng dọc thân tàu tại tốc độ $Fr=0,260$ rất gần với kết quả thực nghiệm trong bể thử.

Phân bố áp suất trên bề mặt thân tàu là một trong

các yếu tố ảnh hưởng đến thành phần lực cản áp suất của tàu. Hình 7 và Hình 8 biểu diễn hệ số áp suất động phân bố trên bề mặt thân tàu khi chạy ở các số Froude khác nhau. Từ các hình trên ta có thể thấy, phân bố áp suất động phụ thuộc khá lớn vào tốc độ chuyển động của tàu. Cụ thể, ở đây ta thấy hệ số áp suất động trên bề mặt thân tàu tại số Froude 0,227 lớn hơn so với khi tàu chuyển động ở các số Froude khác.

Phân bố ứng suất tiếp trên bề mặt thân tàu là một trong các yếu tố ảnh hưởng đến thành phần lực cản ma sát của tàu. Các hình ảnh về phân bố ứng suất tiếp trên bề mặt thân tàu khi chạy ở các tốc độ khác nhau được trình bày trên Hình 9 và 10. Quan sát trên Hình 9 và

10, ta có thể nhận thấy, hệ số này phụ thuộc khá lớn vào tốc độ chuyển động của tàu và sự phụ này không có tính chất đơn điệu tuyến tính. Cụ thể, hệ số ứng suất tiếp lớn nhất ở số Froude 0,227 và có giá trị nhỏ nhất ở số Froude 0,152.

Trên Hình 11 thể hiện các hình ảnh về phần diện tích đuôi transom ngâm nước khi tàu chạy ở các số Froude khác nhau. Từ Hình 11 ta có thể nhận thấy, phần diện tích ngâm nước của đuôi transom sẽ tăng dần khi tăng tốc độ chuyển động của tàu (tăng số Froude).

Trường dòng theo danh nghĩa tại đĩa chong chóng là một trong những đặc trưng thủy động quan trọng ảnh hưởng đến hiệu quả làm việc của chong chóng sau thân tàu. Trên Hình 12 thể hiện trường dòng theo danh nghĩa tại đĩa chong chóng khi chuyển động ở các số Froude khác nhau. Từ Hình 12 ta có thể nhận thấy, trường dòng theo danh nghĩa giảm dần đều khi số Froude của tàu tăng. So sánh giữa trường dòng theo thu được qua mô phỏng bằng CFD với kết quả đo đạc thực nghiệm tại số Froude 0,260, ta có nhận thấy kết quả thu được khá giống nhau.

5. Kết luận

Bài báo đã đạt được mục tiêu nghiên cứu đặt ra trong việc mô phỏng dòng chảy bao quanh thân tàu ở các vận tốc khác nhau bằng việc sử dụng phương pháp CFD. Các kết quả thu được, cụ thể như sau:

- Đã tính toán được lực cản tàu trên nước tĩnh tại các số Froude khác nhau. Kết quả tính toán rất gần so với kết quả thực nghiệm.

- Đã đưa ra và phân tích được các đặc trưng về hình dáng sóng bề mặt và profile; phân bố hệ số áp suất động, hệ số ứng suất tiếp trên bề mặt thân tàu; ảnh hưởng của tốc độ tàu tới diện tích ngâm nước của đuôi transom; ảnh hưởng của tốc độ tàu tới dòng theo danh nghĩa tại đĩa chong chóng. Đây là các thông tin quan trọng, giúp ích cho người thiết kế rất nhiều trong việc cải tiến hình dáng thân tàu nhằm giảm lực cản.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT22-23.29**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Molland, A.F., S.R. Turnock, and D.A. Hudson. (2017), *Ship resistance and propulsion*. Cambridge university press.
- [2] Hänninen, S. and J. Sehweighofer. (2006), *Numerical investigation of the scale effect on the flow around a ship hull*. Ship Technology Research, Vol.53(1): pp.17-25.
- [3] Tu, T.N., et al. (2021), *Effects of Turbulence Models On RANSE Computation Of Flow Around DTMB 5415 Vessel*. Naval Engineers Journal, Vol.133(3): pp.137-151.
- [4] Song, K.-w., et al. (2020), *Experimental and numerical study on the scale effect of stern flap on ship resistance and flow field*. Vol.15(9): pp. 981-997.
- [5] *SIMMAN 2008 Workshop*, [Online]. Available from: <http://www.simman2008.dk/kcs/container.html>.
- [6] Kim, W., S. Van, and D. Kim. (2001), *Measurement of flows around modern commercial ship models*. Experiments in fluids, Vol.31(5): pp.567-578.
- [7] Hino, T., et al. (2020), *Numerical Ship Hydrodynamics: An Assessment of the Tokyo 2015 Workshop*. Vol.94, Springer Nature.
- [8] *ITTC 2014. Recommended procedures and guidelines 7.5-03-02-04*. Available from: <https://itc.info/media/4198/75-03-02-04.pdf>.
- [9] Dogrul, A., S. Song, and Y.K. Demirel. (2020), *Scale effect on ship resistance components and form factor*. Ocean Engineering, Vol.209: p. 107428.
- [10] Tahara, Y., et al. (2006), *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.

Ngày nhận bài:	17/11/2022
Ngày nhận bản sửa:	08/12/2022
Ngày duyệt đăng:	20/12/2022