

NGHIÊN CỨU TỐI ƯU ĐỘ BỀN KẾT CẤU THÂN TÀU HÀNG KHÔ BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

OPTIMIZATION STUDY ON THE STRUCTURAL STRENGTH OF DRY CARGO
SHIP USING THE FINITE ELEMENT METHOD

TS. Đàm Văn Tùng

Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email: tungdv.mtb@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả tối ưu hóa độ bền kết cấu thân tàu hàng khô bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Nghiên cứu tập trung vào việc phân tích và đánh giá tối ưu độ bền kết cấu dàn đáy và dàn mạn, hai khu vực chịu tải trọng lớn trong quá trình khai thác. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng, các tính toán thiết kế cơ bản ban đầu cho giá trị dư bền lớn về độ bền kết cấu, điều này cho phép các kỹ sư thiết kế xem xét các phương án tối ưu hơn trong lựa chọn kết cấu nhằm giảm chi phí tôn vỏ trong quá trình đóng mới tàu thủy.

Từ khóa: Độ bền kết cấu; Thân tàu; Tàu hàng khô; Phần tử hữu hạn (PTHH).

ABSTRACT

The paper presents the results of optimizing the structural strength of a dry cargo ship using the finite element method. The study focuses on analyzing and optimizing the structural strength of the bottom and side structures, which are the two main load-bearing areas during operation. The research findings indicate that the initial design calculations provide a high structural strength margin, allowing design engineers to explore more optimized structural options. This optimization can lead to a reduction in hull plate costs during the shipbuilding process while maintaining the required structural strength.

Keywords: Structural strength; Ship hull; Dry cargo ship; Finite element method (FEM).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong thiết kế kết cấu tàu hàng, việc xây dựng và phân tích độ bền kết cấu đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo độ an toàn của tàu, chi phí đóng mới và tính hiệu quả trong quá trình hoạt động trên biển. Thân tàu có kết cấu phức tạp, là khu vực nâng đỡ toàn bộ kết

cấu, đồng thời chịu toàn bộ tải trọng từ hàng hóa, thiết bị và áp lực của sóng biển. Tính toán độ bền kết cấu tàu hàng cần tập trung vào việc phân tích độ bền chung toàn tàu và độ bền cục bộ trên từng khu vực. Hiện nay, các tính toán độ bền kết cấu tàu hàng đều đang dựa trên các công thức giải tích được quy định dựa theo yêu cầu của các tổ chức đăng kiểm và kết quả của

các tính toán này có độ dư bền tương đối lớn trong một số trường hợp. Độ dư bền lớn mang lại tính an toàn trong quá trình hoạt động của tàu, tuy nhiên lại làm gia tăng chi phí tôn vỏ và đóng mới tàu hàng [1].

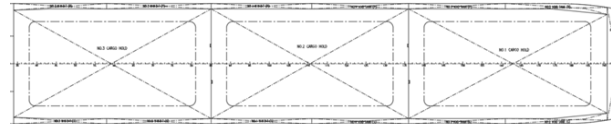
Trong giai đoạn thiết kế cơ bản tàu thủy hiện nay, quy cách kết cấu thân tàu phần lớn đang được tính toán dựa theo các phương pháp giải tích được phê duyệt theo các quy phạm thuộc các tổ chức đăng kiểm. Tuy nhiên, với sự phát triển của các phần mềm mô phỏng trong việc xử lý các bài toán về độ bền kết cấu đã đặt ra hướng đi mới cho việc nghiên cứu. Trong đó, phần tử hữu hạn - PTHH (Finite Element Method - FEM) là một phương pháp hiện đại và linh hoạt trong việc phân tích độ bền kết cấu, đặc biệt là trong lĩnh vực kỹ thuật tàu thủy [2, 3, 4].

Phương pháp PTHH cho phép mô phỏng và phân tích các kết cấu có hình dạng phức tạp, không đối xứng và phân tích các trạng thái ứng suất - biến dạng của kết cấu, từ đó giúp các kỹ sư phát hiện và đưa ra các đề xuất phương án cho việc xây dựng kết cấu. Trong nghiên cứu này, bằng phương pháp PTHH, tác giả tập trung vào việc phân tích độ bền kết cấu thân tàu hàng khô 12.000 DWT dưới tác dụng của các tải trọng trong quá trình hoạt động, đồng thời đưa ra giải pháp tối ưu hóa độ bền kết cấu thân tàu thông qua công cụ mô phỏng.

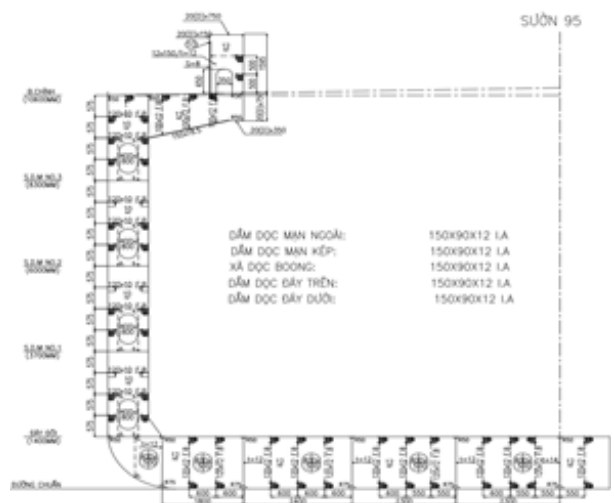
2. ĐẶC ĐIỂM THIẾT KẾ MÔ HÌNH TÀU MẪU

Tàu hàng khô 12.000 DWT sử dụng trong nghiên cứu được hạ thủy và đi vào hoạt động từ năm 2022, hoạt động trên vùng biển Quốc tế (không giới hạn). Tàu được thiết kế theo các tiêu chuẩn thuộc Quy phạm DNV [5]. Mô hình tàu mẫu bố trí 3 hầm hàng nằm từ vị

trí sườn 34 đến sườn 190 (Hình 1), với hệ kết cấu khung ngang nhằm chống chịu tác động từ nhiều loại tải trọng khác nhau trong quá trình khai thác. Kết cấu mặt cắt ngang và các thông số chính của tàu được thể hiện trên hình 2 và bảng 1.



Hình 1. Bố trí khoang hàng tàu hàng khô 12.000 DWT



Hình 2. Kết cấu mặt cắt ngang tàu hàng 12.000 DWT

Bảng 1. Thông số kỹ thuật tàu hàng 12.000 DWT

Các thông số kỹ thuật	Đơn vị	Giá trị
Chiều dài lớn nhất	[m]	128.05
Chiều dài thiết kế	[m]	120.00
Chiều rộng thiết kế	[m]	20.00
Chiều cao mạn	[m]	10.20
Mớn nước	[m]	7.6

Kết cấu khu vực hầm hàng đóng vai trò quan trọng trong tổng thể kết cấu thân tàu hàng khô, đây là khu vực chịu ảnh hưởng trực tiếp

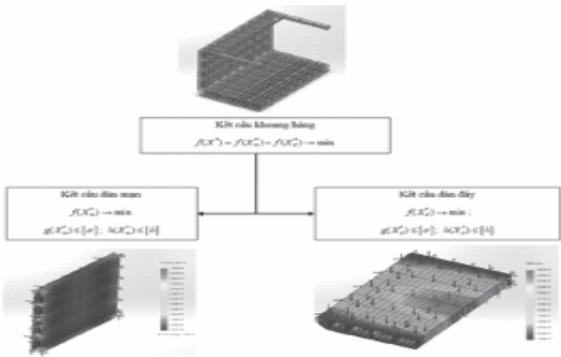
từ tải trọng hàng hóa và áp lực nước biển lên vỏ tàu. Độ bền kết cấu của khu vực này phụ thuộc vào nhiều yếu tố như dạng kết cấu sườn, vật liệu chế tạo, phương pháp hàn và liên kết giữa các bộ phận. Thông tin quy cách về kết cấu thuộc khu vực hầm hàng tàu mẫu được thể hiện trên Hình 2.

3. THIẾT LẬP BÀI TOÁN TỐI ƯU

Với tính chất chịu tải phức tạp trong quá trình khai thác, trong nghiên cứu này, tác giả tập trung vào việc phân tích và tối ưu độ bền kết cấu thân tàu khu vực khoang hàng tàu mẫu (Khoang hàng số 2 từ sườn 85 đến sườn 136). Bài toán tối ưu trong nghiên cứu được xây dựng dựa trên việc tối ưu kết cấu thân tàu vùng khoang hàng nhằm thu lại khối lượng kết cấu nhỏ nhất nằm trong giới hạn cho phép về độ bền kết cấu theo các yêu cầu thuộc quy phạm DNV.

Kết cấu thân tàu mẫu vùng khoang hàng được xây dựng dựa trên ba phần kết cấu chính gồm kết cấu dàn mạn, kết cấu dàn đáy và kết cấu dàn boong. Trong nghiên cứu, nhóm tác giả

tập trung vào việc tối ưu hóa từng phần kết cấu thuộc khu vực khoang hàng, cụ thể nhóm tiến hành tối ưu hóa từng phần kết cấu bao gồm kết cấu dàn mạn và kết cấu dàn đáy thuộc khu vực khoang hàng, do đây là khu vực kết cấu chịu tải trọng lớn từ nước biển và hàng hóa. Sơ đồ thiết lập bài toán được thể hiện trên Hình 3. Bảng 3 mô tả các thông số thiết lập được sử dụng trong bài toán. Trong đó, các biến tối ưu sử dụng trong nghiên cứu được thiết lập dựa trên các thông số quy cách kết cấu theo từng khu vực và được ràng buộc dựa theo tiêu chuẩn về độ bền của vật liệu kết cấu (Ứng suất và độ võng của kết cấu).



Hình 3. Sơ đồ thiết lập bài toán tối ưu hóa độ bền kết cấu thân tàu tàu hàng khô 12.000 DWT

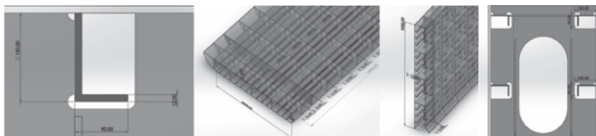
Bảng 2. Thiết lập thông số bài toán tối ưu hóa

Kết cấu	Biến tối ưu (ký hiệu)	Giá trị (đơn vị)	Điều kiện ràng buộc	Hàm mục tiêu
Dàn mạn	Kích thước sườn khõe (S_m)	7; 8; 9; 10 (mm)	Ứng suất kết cấu: $\sigma \leq 360MPa$ Chuyển vị của kết cấu: $h \leq 15mm$	Khối lượng kết cấu: $m_m \rightarrow \min$
	Kích thước dầm dọc mạn (L_m)	L130; L140; L150; L160		
	Kích thước tôn vỏ (t_m)	10; 11; 12; 13 (mm)		
Dàn đáy	Kích thước đà ngang (S_d)	8; 9; 10; 11 (mm)	Ứng suất kết cấu: $\sigma \leq 360MPa$ Chuyển vị của kết cấu: $h \leq 15mm$	Khối lượng kết cấu: $m_d \rightarrow \min$
	Kích thước dầm dọc đáy (L_d)	L130; L140; L150; L160		
	Kích thước tôn đáy đôi (t_d)	10; 11; 12; 13 (mm)		

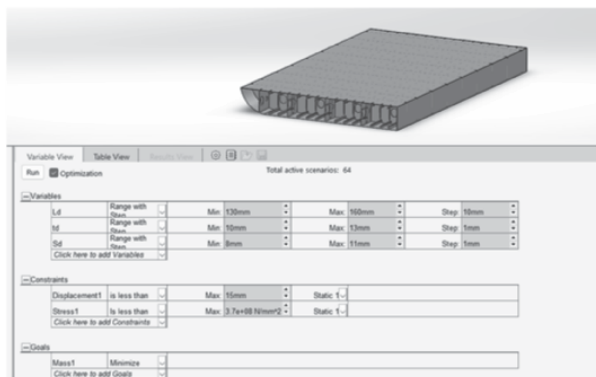
4. THIẾT LẬP MÔ PHÒNG

Để nghiên cứu tính toán và giải quyết bài toán tối ưu độ bền kết cấu thân tàu mẫu, nhóm tác giả đã tiến hành dựng lại mô hình 3D và thiết lập chạy mô phỏng trên ứng dụng Solidworks Simulation.

Mô hình 3D kết cấu thân tàu mẫu được xây dựng dựa trên hồ sơ kỹ thuật của tàu mẫu. Trong đó, kích thước về quy cách của hệ kết cấu dàn mạn và dàn đáy được thiết lập tham số hóa nhằm phục vụ cho việc giải quyết bài toán tối ưu hóa khi các biến tối ưu thay đổi giá trị (Hình 4, 5).



Hình 4. Mô hình 3D tham số hóa kích thước kết cấu dàn đáy và dàn boong theo kích thước tàu mẫu



Hình 5. Thiết lập thông số đầu vào cho bài toán tối ưu trên Solidworks Simulation

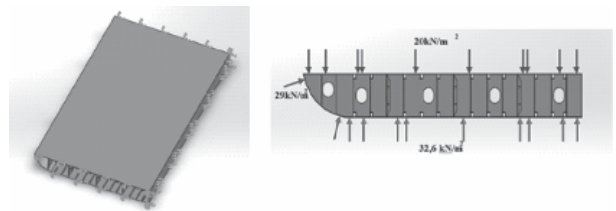
Trong tính toán mô phỏng độ bền kết cấu, độ chính xác của kết quả đầu ra phụ thuộc vào việc thiết lập điều kiện biên, tải trọng và lưới tính toán của bài toán. Dựa trên hoạt động thực tế của tàu mẫu và các tài liệu nghiên cứu tin cậy về tính toán độ bền kết cấu, với mô hình kết cấu dàn mạn, điều kiện biên của mô hình

được gán gố cố định tại vị trí vách kín nước thuộc sườn 85 và sườn 136, và gố di động tại vị trí đáy đôi. Trong khi đó, với mô hình kết cấu dàn đáy, điều kiện biên của mô hình được thiết lập gố cố định tại vị trí vách kín nước hai đầu khoang hàng và điều kiện đối xứng tại mặt cắt dọc tâm của khoang hàng (Hình 6).

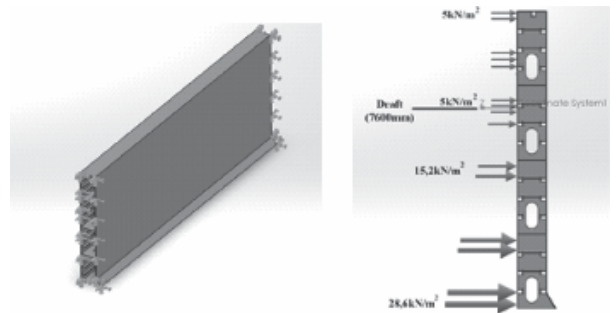
Tải trọng tác dụng lên kết cấu thân tàu tại khu vực khoang hàng bao gồm tải trọng do hàng hóa và áp lực từ nước biển tác động trực tiếp trong quá trình khai thác. Thông số của các tải trọng này được xác định dựa theo các mục 5.1, 5.2 thuộc Chapter 3, Quy phạm DNV [5].

$$P = P_s + P_w + P_c$$

Trong đó: P_s - Áp suất thủy tĩnh (MPa); P_w - Áp suất sóng tác dụng lên vỏ tàu; P_c - Tải trọng hàng hóa (Hình 6).



a) Kết cấu dàn đáy

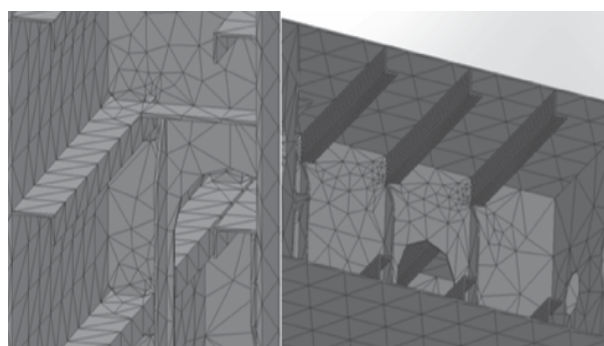


b) Kết cấu dàn mạn

Hình 6. Mô hình điều kiện biên và tải trọng tác dụng lên kết cấu thân tàu

Bài báo sử dụng phương pháp chia lưới Curvature-Based Mesh trong Solidworks 

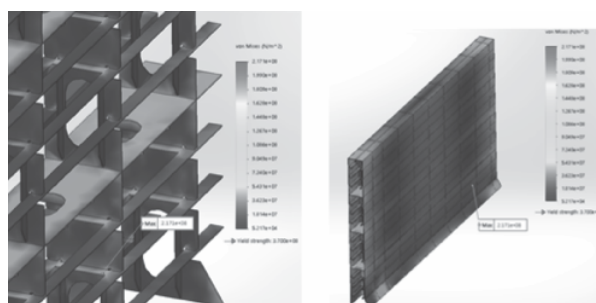
Simulation để tạo lưới phần tử trên bề mặt mô hình. Phương pháp này cho phép chia lưới hiệu quả trên cả bề mặt phẳng và cong, đảm bảo tính liên tục của lưới trong quá trình mô phỏng. Kích thước phần tử lưới được lựa chọn trong khoảng từ 50mm đến 350mm. Bên cạnh khả năng thiết lập kích thước lưới tùy chỉnh cho từng chi tiết, Solidworks Simulation còn cho phép tự động điều chỉnh thông số lưới phù hợp với hình dạng bề mặt và phạm vi kích thước đã thiết lập (Hình 7) [5, 6, 7].



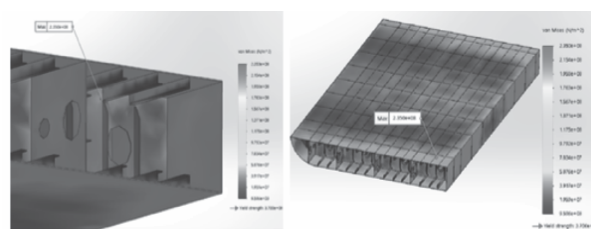
Hình 7. Kết quả chia lưới phần tử

5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Kết quả tính toán mô phỏng độ bền kết cấu dàn mạn và dàn đáy theo phương án ban đầu của tàu mẫu cho thấy sự phân bố ứng suất không đồng đều trên toàn bộ kết cấu. Đối với kết cấu dàn đáy, vùng có ứng suất lớn nhất tập trung tại các nút liên kết giữa kết cấu dọc (sống dọc đáy, dầm dọc đáy) và kết cấu ngang (đà ngang) (Hình 8a). Đây là khu vực chịu ảnh hưởng của tải trọng tập trung, dẫn đến hiện tượng tập trung ứng suất cục bộ, có thể gây nguy cơ mất ổn định hoặc phá hủy môi trong quá trình khai thác tàu.



a) Kết cấu dàn mạn

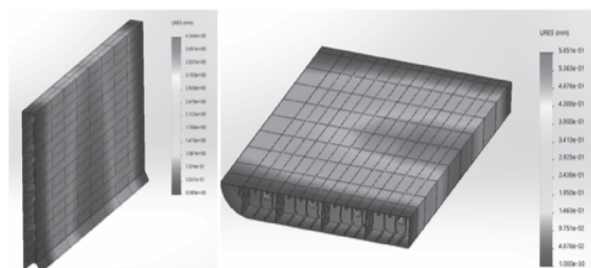


b) Kết cấu dàn đáy

Hình 8. Kết quả phân bố ứng suất theo phương án tàu mẫu

Tương tự, đối với kết cấu dàn mạn, ứng suất lớn nhất được ghi nhận tại vị trí liên kết giữa dầm dọc mạn, sống dọc mạn và kết cấu ngang (sườn khỏe) của mạn tàu (Hình 8b). Nguyên nhân chính là do sự thay đổi độ cứng cục bộ tại các nút liên kết, kết hợp với ảnh hưởng của tải trọng sóng và lực tác động lên vỏ tàu trong điều kiện vận hành thực tế.

Kết quả về thông số chuyển vị kết cấu của dàn mạn và dàn đáy hoàn toàn nằm trong giới hạn cho phép theo tiêu chí về độ bền (Hình 9).



a)

b)

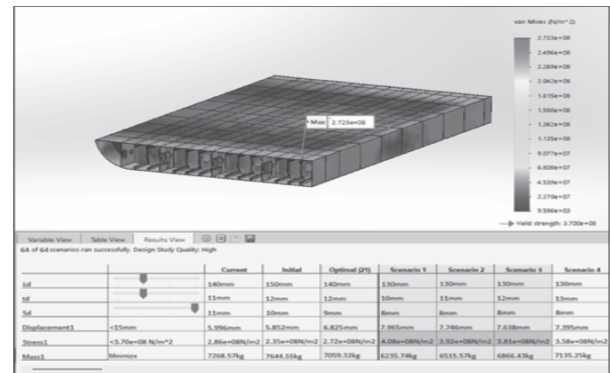
Hình 9. Kết quả phân bố giá trị chuyển vị trên kết cấu dàn mạn (a) và dàn đáy (b)

Các kết quả tính toán mô phỏng cho thấy tỷ lệ dư bền của vật liệu cao hơn đáng kể so với tiêu chuẩn về độ bền kết cấu tàu thủy (35%). Điều này cho thấy cần xem xét điều chỉnh quy cách kết cấu thân tàu nhằm tối ưu hóa thiết kế, giảm thiểu khối lượng và chi phí vật liệu tôn vỏ trong quá trình đóng mới tàu thủy, đồng thời vẫn đảm bảo các tiêu chí về độ bền kết cấu.

Dựa trên các thông số đầu vào của bài toán, nghiên cứu đã tiến hành phân tích tổng cộng 128 phương án tính toán độ bền kết cấu của dàn mạn và dàn đáy tàu mẫu bằng phần mềm mô phỏng Solidworks Simulation. Kết quả cho thấy có 108 phương án đáp ứng yêu cầu về độ bền kết cấu (chiếm 84,3%), trong khi đó 16 phương án không đạt tiêu chuẩn. Số liệu này chứng tỏ dải thông số về quy cách kết cấu thân tàu đảm bảo độ bền kết cấu là khá rộng, mang lại nhiều lựa chọn cho các kỹ sư thiết kế trong việc tìm ra phương án thiết kế tối ưu.

Trên Hình 10 thể hiện kết quả mô phỏng của các phương án theo bài toán về tối ưu độ

bền kết cấu dàn đáy. Trong đó, tại phương án tối ưu giá trị ứng suất lớn nhất đạt 272MPa tăng 15,7% so với phương án ban đầu; giá trị chuyển vị đạt 6,82mm cao hơn 16,5% so với phương án ban đầu; khối lượng tôn vỏ thu được là 7059kg giảm 7,7% so với khối lượng ban đầu.



Hình 10. Bảng kết quả tối ưu kết cấu dàn đáy

Trong khi đó, với kết cấu dàn mạn giá trị ứng suất cực đại đạt 259MPa tăng 19,3% so với phương án ban đầu; giá trị chuyển vị đạt 5,1mm cao hơn 20,3% so với phương án ban đầu; khối lượng tôn vỏ thu được là 7856kg giảm 6,9% so với khối lượng ban đầu (Bảng 2).

Bảng 3. Kết quả tối ưu độ bền kết cấu thân tàu hàng khô 12.000 DWT

Kết cấu	Thông số bài toán	Phương án ban đầu	Phương án tối ưu
Dàn mạn	Kích thước sườn khỏe (S_m)	9mm	8mm
	Kích thước dầm dọc mạn (L_m)	L150	L140
	Kích thước tôn vỏ (t_m)	12mm	12mm
	Ứng suất cực đại	217MPa	259MPa
	Chuyển vị	4,2mm	5,1mm
	Khối lượng	8437kg	7856kg
Dàn đáy	Kích thước đà ngang (S_d)	12mm	9mm
	Kích thước dầm dọc đáy (L_d)	L150	L140
	Kích thước tôn đáy đôi (t_d)	13mm	12mm
	Ứng suất cực đại	235MPa	272MPa
	Chuyển vị	5,85mm	6,82mm
	Khối lượng	7644kg	7059kg



6. KẾT LUẬN

Bài báo sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua công cụ mô phỏng số để nghiên cứu và đánh giá độ bền kết cấu khoang hàng của tàu hàng khô 12.000 DWT. Nghiên cứu cũng tiến hành tính toán và tối ưu hóa độ bền kết cấu dàn mạn và dàn đáy của khoang hàng. Kết quả cho thấy phương án tối ưu giúp cải thiện các tiêu chí về độ bền kết cấu, đồng thời giảm 14,6% khối lượng tôn vỏ so với thiết kế ban đầu. Việc tối ưu hóa thiết kế không chỉ giúp giảm đáng kể khối lượng vật liệu sử dụng mà vẫn đảm bảo độ bền kết cấu trong giới hạn cho phép. Ứng suất và chuyển vị gia tăng nhưng vẫn nằm trong phạm vi an toàn, khẳng định tính khả thi của phương án tối ưu trong thực tế.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT24-25.23.❖

Ngày nhận bài: **20/02/2025**

Ngày phản biện: **14/3/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Caridis, P. (2024), “*Local Strength of Ship Structures*”. CRC Press.
- [2]. Servis, D., Voudouris, G., Samuelides, M., & Papanikolaou, A. (2003), “*Finite element modelling and strength analysis of hold No.1 of bulk carriers*”. Marine Structures, 16(8), 601-626.
- [3]. Akbar M. S., Prabowo A.R. (2021), “*Analysis of plated-hull structure strength against hydrostatic and hydrodynamic loads: A case study of 600 TEU container ships*”. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, Vol.30, pp.237-248
- [4]. Bin Liu, C.Guedes Soares (2020), “*Ultimate strength assessment of ship hull structures subjected to cyclic bending moments*”. Journal of Ocean Engineering, Vol.215.
- [5]. DNV Rules for classification. Part 3, Hull/sec. 5 External loads 2022.
- [6]. Đàm Văn Tùng (2024), “*Nghiên cứu ảnh hưởng của hình dạng cầu dẫn lên độ bền cục bộ kết cấu cầu dẫn trên tàu cao tốc hai thân hoạt động trên nước tĩnh*”. Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, 79, 27-32.
- [7]. Бугаев В.Г., “*CAD/CAM/CAE – системы. Автоматизированное проектирование судов*”. Издательство ДВГТУ, Владивосток, 2008.