

NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG BIẾN TẦN CHO CÁC BƠM NƯỚC BIỂN TRONG HỆ THỐNG LÀM MÁT TRÊN TÀU THỦY NHẪM MỤC ĐÍCH GIẢM TIÊU HAO NHIÊN LIỆU VÀ PHÁT THẢI CO₂ CHO ĐỘI TÀU VIỆT NAM

RESEARCH ON THE USE OF VARIABLE FREQUENCY DRIVE (VFD) FOR SEAWATER PUMPS IN COOLING SYSTEM ON BOARD TO REDUCE FUEL CONSUMPTION AND CO₂ EMISSIONS FOR VIETNAMESE SHIP FLEET

NGÔ NGỌC LÂN, TRẦN VĂN THẮNG*, PHẠM VĂN DŨNG

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

*Email liên hệ: tranvanthang@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Hiện nay, giảm phát thải dioxit carbon (CO₂) đang là vấn đề quan tâm hàng đầu trong lĩnh vực vận tải biển. Để đạt được mục tiêu giảm phát thải vào năm 2050 của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO), rất nhiều các giải pháp đã được nghiên cứu và áp dụng, đó là: sử dụng nhiên liệu mới, thay đổi thiết kế, quản lý và khai thác tàu hiệu quả, cũng như các giải pháp về công nghệ cho đóng mới và hiện hữu. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả giới thiệu một giải pháp công nghệ: sử dụng biến tần để điều khiển mô tơ lai bơm nước biển trong hệ thống làm mát trên tàu, nhằm giảm tiêu hao nhiên liệu đồng nghĩa với việc giảm phát thải khí CO₂. Đây là giải pháp công nghệ mang đến hiệu quả kinh tế cao mà gần như không làm thay đổi kết cấu hệ thống.

Từ khóa: Tiêu thụ nhiên liệu, phát thải khí CO₂, Chỉ số cường độ carbon (CII), biến tần, bơm nước biển (SW P/P), làm mát trung tâm (CC), làm mát nước ngọt nhiệt độ thấp (LTFWC).

Abstract

Currently, reducing carbon dioxide (CO₂) emissions is a top concern in the maritime transportation sector. To achieve the International Maritime Organization's (IMO) emission reduction target by 2050, numerous solutions have been researched and implemented, these include the use of new fuels, design modifications, efficient ship management and operation, as well as technological solutions for both newbuilds and existing vessels.

In this study, the authors introduce a technological solution: using a variable frequency drive (VFD) to control the seawater pump motor in the ship's cooling system, aiming to reduce fuel consumption, which directly correlates to lower CO₂ emissions. This technological solution offers

high economic efficiency while requiring minimal structural modifications to the system.

Keywords: Fuel consumption, CO₂ emissions, Carbon Intensity Indicator (CII), variable frequency drive (VFD), seawater pump (SW P/P), central cooling (CC), low-temperature freshwater cooling (LTFWC).

1. Đặt vấn đề

Tất cả chủ tàu và các nhà thiết kế cần tuân thủ những quy định ngày càng nghiêm ngặt của ngành hàng hải về việc giảm lượng khí thải CO₂ và khí nhà kính. Các quy định mới bao gồm: Chỉ số hiệu quả năng lượng với các tàu hiện hữu (EEXI- Energy Efficiency Existing Ship Index) và Chỉ số hiệu quả năng lượng về thiết kế (EEDI- Energy Efficiency Design Index).

Những quy định này là một phần trong chiến lược của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO- International Maritime Organization) nhằm giảm lượng khí thải nhà kính trong vận tải biển quốc tế ít nhất 40% vào năm 2030 và 70% vào năm 2050, so với năm 2008 [1].

Những biện pháp mới sẽ yêu cầu tất cả các tàu cần được tính toán EEXI theo tiêu chuẩn kỹ thuật để cải thiện hiệu quả năng lượng và thiết lập chỉ số cường độ carbon hoạt động hàng năm (CII- Carbon Intensity Indicator) để xếp hạng CII của mình. CII là một tiêu chuẩn của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) để đánh giá hiệu quả sử dụng nhiên liệu và mức phát thải CO₂ của tàu biển. CII được tính toán dựa trên mức tiêu thụ nhiên liệu với khoảng cách di chuyển và khối lượng vận tải của tàu, giúp cải thiện tính bền vững của ngành hàng hải.

Các tàu sẽ được xếp hạng về hiệu quả năng lượng (A, B, C, D, E - trong đó A là tốt nhất). Cơ quan quản lý, cảng vụ và các bên hữu quan khác được khuyến khích tạo những ưu đãi cho tàu có thứ hạng cao như A hoặc B. Ngược lại, một tàu bị xếp hạng D hoặc hạng E trong ba năm liên tiếp phải đưa ra kế

hoạch hành động để chỉ rõ cách đạt được chỉ số bắt buộc (C trở lên) [2].

Chủ tàu có thể triển khai một số hoặc tất cả các giải pháp để đáp ứng những yêu cầu bắt buộc trên. Có thể kể ra ở đây là [3]:

- Giải pháp quản lý và khai thác tàu hiệu quả;
- Giải pháp thiết kế giảm sức cản của vỏ tàu;
- Giải pháp sử dụng nhiên liệu mới;
- Giải pháp sử dụng năng lượng mặt trời và gió;
- Giải pháp sử dụng các công nghệ tiết kiệm năng lượng.

Sau một thời gian nghiên cứu cả về lý thuyết và thực nghiệm, chúng tôi đề xuất một giải pháp công nghệ tiết kiệm năng lượng, tập trung vào việc cải thiện mức tiêu thụ nhiên liệu cho động cơ Diesel lai máy phát điện trên tàu thủy. Hệ thống này hỗ trợ chủ tàu và nhà thiết kế đáp ứng yêu cầu giảm phát thải CO₂. Những hệ thống như vậy có thể được tích hợp ở giai đoạn đóng mới, hoặc dưới dạng ứng dụng cải tạo cho các tàu hiện hữu. Nó sẽ được tích hợp vào trong các hệ thống kiểm soát tổng thể. Hệ thống như vậy cũng sẽ phù hợp với các tàu sẽ tiếp tục hoạt động sau năm 2030.

2. Cơ sở lý thuyết và thực tiễn

2.1. Cơ sở lý thuyết

Xuất phát từ 3 định luật tương tự cho bơm/quạt (Affinity Laws for Pumps) [4] sau đây:

- (1). Quan hệ giữa lưu lượng và tốc độ quay:

$$Q_2 = Q_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

Trong đó:

- Q_1, Q_2 : Lưu lượng (m³/h) hoặc (lít/s);
- N_1, N_2 : Tốc độ quay (v/p).

Nhận xét: Khi tốc độ tăng gấp đôi, lưu lượng cũng tăng gấp đôi.

- (2). Quan hệ giữa cột áp và tốc độ quay:

$$H_2 = H_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (2)$$

Trong đó:

- H_1, H_2 : Cột áp (mmH₂O);
- N_1, N_2 : Tốc độ quay (RPM).

Nhận xét: Cột áp tỷ lệ với bình phương tốc độ quay.

- (3). Quan hệ giữa công suất và tốc độ quay:

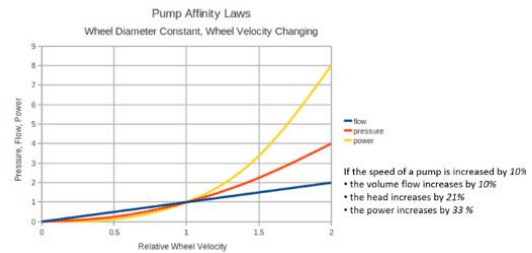
$$P_2 = P_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (3)$$

Trong đó:

- P_1, P_2 : Công suất tiêu thụ (kW) hoặc (HP);
- N_1, N_2 : Tốc độ quay (RPM).

Nhận xét: Công suất tiêu thụ tỷ lệ với lập phương tốc độ quay.

Từ 3 định luật trên về thủy khí, ta thấy rằng: Khi tốc độ quay của trục hoặc đường kính cánh quạt thay đổi, thì công suất tiêu thụ sẽ thay đổi theo lập phương của sự thay đổi tốc độ trục hoặc đường kính cánh quạt. Nói cách khác, khi đường kính cánh quạt là hằng số, mà ta thay đổi tốc độ thì mức tiêu thụ điện năng sẽ thay đổi xấp xỉ 3 lần.



Hình 1. Đặc tính của bơm/quạt

Điều này được thể hiện bằng công thức sau:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad (4)$$

“Nếu bạn giảm được tốc độ, thì bạn sẽ giảm công suất đáng kể”

Xuất phát từ cơ sở trên, chúng tôi quyết định lựa chọn giải pháp công nghệ là thay đổi tốc độ của bơm hoặc quạt cánh dẫn bằng biến tần để tiết kiệm năng lượng nhằm góp phần đạt được chỉ số CII cho các tàu.

2.2. Cơ sở thực tiễn

Như chúng ta đều biết, trên tàu thủy có rất nhiều bơm và quạt phục vụ cho các mục đích khác nhau. Nếu như tối ưu hóa được tốc độ quay của tất cả các thiết bị này (điều này hoàn toàn khả thi) thì chắc chắn lượng điện năng tiết kiệm được không hề nhỏ. Trong khuôn khổ của bài báo này, chúng tôi chỉ áp dụng giải pháp tiết kiệm cho bơm nước biển của hệ thống làm mát trung tâm trên tàu thủy với lý do sau:

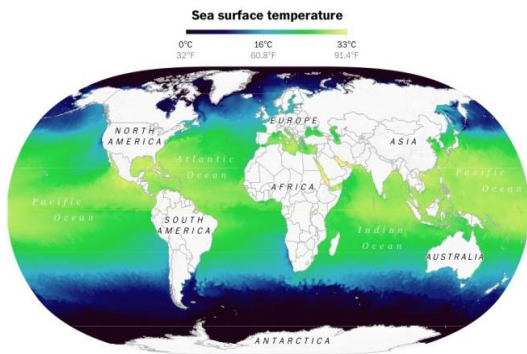
Thứ nhất là:

Động cơ lai bơm nước biển là một trong những động cơ lớn nhất trên tàu, công suất có thể tới hàng trăm kW. Ví dụ: 1 tàu có công suất máy chính khoảng 20.000kW thì công suất của 1 mô tơ lai bơm nước biển khoảng 104kW x 2 mô tơ.

Thứ hai là:

Hệ thống nước làm mát và bơm nước biển được thiết kế để tàu có thể hoạt động trong điều kiện nhiệt

độ nước biển 32°C ứng với 100% tải của động cơ. Nhưng thực tế, chỉ có một vài vị trí trên đại dương có nhiệt độ này (xem trên Hình 2), còn thông thường nhiệt độ nước biển thường thấp hơn, thậm chí thấp hơn rất nhiều.



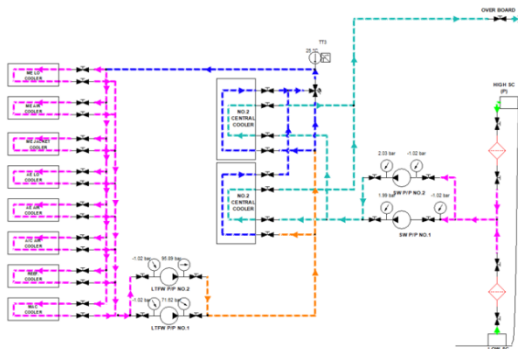
Hình 2. Phân bố nhiệt độ trên trái đất

Một hệ thống làm mát truyền thống trên tàu có bơm chạy với tốc độ không đổi sẽ có đến 95% thời gian hoạt động lãng phí năng lượng. Một hệ thống có thể điều chỉnh mức tiêu thụ năng lượng theo nhu cầu làm mát thực tế chắc chắn sẽ tiết kiệm được nhiên liệu đáng kể.

3. Thiết kế hệ thống

3.1. Hệ thống làm mát truyền thống

Trên Hình 3 thể hiện một hệ thống làm mát trung tâm trên tàu hàng rời có trọng tải 65.000 tấn.



Hình 3. Hệ thống làm mát bằng nước biển

Hệ thống làm mát của tàu bao gồm các sinh hàn, hệ thống đường ống, các thiết bị chỉ báo và bơm. Mạch nước biển (SW) gồm 2 bơm nước biển (SW P/P). Nước biển (SW) được bơm hút qua các van thông mạn/đáy rồi đi qua 2 sinh hàn trung tâm (Central Cooler - CC) để làm mát cho nước ngọt nhiệt độ thấp (LTFW). LTFW được tuần hoàn bởi 2 bơm nước ngọt nhiệt độ thấp (LTFW P/P) tới các sinh hàn, lần lượt là sinh hàn dầu nhớt máy chính (ME LO), khí tăng áp máy chính (ME AIR),... và

cuối cùng là sinh hàn máy nén khí (MAC).

Hệ thống này có tổng cộng bốn bơm, hai bơm cho SW và hai bơm cho LTFW, và đều được dẫn động bởi các động cơ điện, mà chúng nằm trong số những động cơ điện có công suất lớn nhất trên tàu.

Hệ thống làm mát trên tàu được thiết kế để có thể hoạt động được trong điều kiện khắc nghiệt nhất là điều kiện nhiệt đới (nước biển tới 32°C) với tải có thể lên tới 110%. Các bơm này luôn hoạt động ở công suất tối đa, với tốc độ và lưu lượng không đổi trong mọi điều kiện.

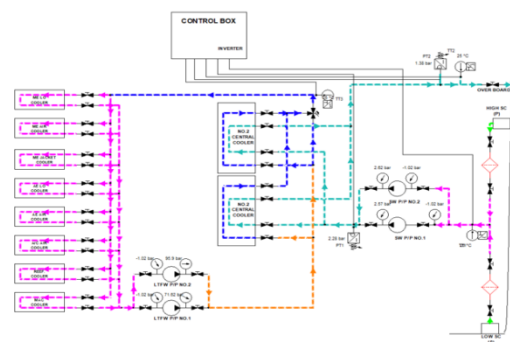
Theo cách nhìn từ hiệu quả năng lượng, rõ ràng các bơm này hoạt động không hiệu quả khi tàu không hoạt động trong vùng nhiệt đới và ở các chế độ nhỏ tải. Như đã phân tích ở trên, sẽ có tới 95% thời gian là các bơm hoạt động ở chế độ lãng phí năng lượng với mức độ khác nhau. Do vậy, có thể thay đổi lưu lượng của bơm khi nhiệt độ nước biển và tải thay đổi, dẫn đến tiết kiệm năng lượng đáng kể bằng cách trang bị biến tần để điều khiển động cơ điện dẫn động các bơm nước biển.

3.2. Hệ thống làm mát sử dụng biến tần

Hệ thống do chúng tôi đề nghị sẽ cải thiện được hiệu quả năng lượng của bơm nước biển bằng cách sau:

- Thay đổi tốc độ của SW P/P theo nhiệt độ nước biển vào/ ra ngoài mạn tàu;

- Tăng nhiệt độ nước ra ngoài mạn tàu lên đến mức tối đa cho phép (khoảng 38°C). Điều này giúp giảm tiêu thụ điện năng xuống mức tối thiểu, trong khi vẫn bảo đảm được hiệu suất trao đổi nhiệt và khả năng làm mát của hệ thống.



Hình 4. Hệ thống làm mát bằng nước biển sử dụng biến tần

Mỗi bơm nước biển đều có 1 bộ biến tần (VFD) được lắp riêng để điều chỉnh tốc độ/ lưu lượng của bơm.

Một bảng điều khiển chính sẽ được lắp đặt thêm để cung cấp thông tin như nhiệt độ và áp suất của hệ

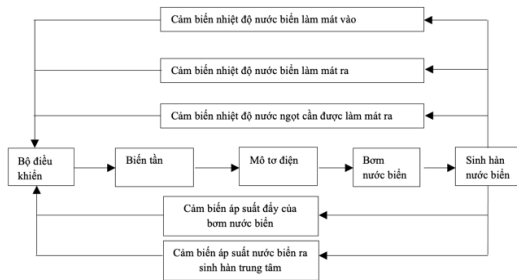
thống. Các cảm biến nhiệt độ trên đường nước biển vào và ra (TT1, TT2) đo nhiệt độ để có thể kiểm soát và tính toán lượng nước biển cần thiết làm mát cho LTFW.

Cảm biến nhiệt độ trên đường ống nước biển đầu ra được sử dụng để theo dõi và duy trì nhiệt độ nước ra tối đa (38°C), điều này giúp sử dụng tối thiểu lượng nước biển từ bơm.

Cảm biến nhiệt độ (TT3) đặt ở đầu ra của CC kiểm soát để duy trì nhiệt độ LTFW luôn có giá trị 36°C nhằm đảm bảo hiệu suất làm mát cho các sinh hàn.

Bên cạnh đó, hai cảm biến áp suất (PT1, PT2) cần trang bị thêm phía sau cửa đẩy SW P/P và sau CC. Trong đó, cảm biến PT1 có chức năng bảo vệ cho bơm khi không có áp lực, cảm biến PT2 không cho phép áp lực nước biển ra khỏi sinh hàn quá thấp, để tránh hình thành cặn trên các bề mặt trao đổi nhiệt.

Thuật toán điều khiển cho biến tần được thể hiện như trong Hình 5.

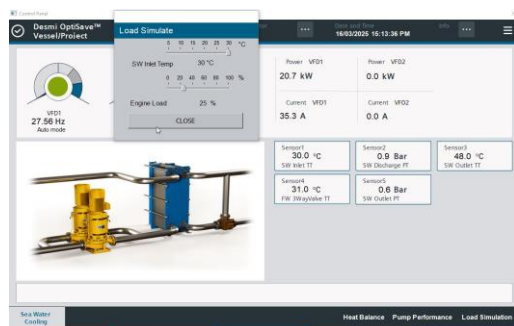


Hình 5. Sơ đồ nguyên lý điều khiển tốc độ mô tơ điện

4. Mô phỏng hệ thống nước làm mát sử dụng biến tần

4.1. Xây dựng mô phỏng

Trên cơ sở thuật toán điều khiển, nhóm tác giả đã tiến hành mô phỏng cho hệ thống, công cụ phục vụ mô phỏng là phần mềm “OptiSaver” của DESMI.



Hình 6. Phần mềm mô phỏng “OptiSaver”

Các thông số sử dụng để mô phỏng được lấy từ

tài liệu kỹ thuật của tàu Servette (IMO No.9875616, MMSI 538008920) [5].

- Công suất máy chính 7.300kW.
- Động cơ Diesel lai máy phát điện Yanmar 6EY18ALW có suất tiêu hao nhiên liệu trung bình 201.2g/kWh khi sử dụng dầu HFO.

Theo kết quả tính toán, tổng lượng nhiệt mà hệ thống nước biển làm mát cho toàn bộ hệ động lực của tàu cần mang đi là 11.306kW, để đáp ứng được hiệu quả làm mát, nhiệt độ nước ngọt ra khỏi sinh hàn trung tâm được đặt cố định (TT3=36°C). Tàu được trang bị bơm nước biển làm mát, có thông số như sau:

- Tốc độ quay của mô tơ: 1.783 vòng/phút;
- Lưu lượng của bơm: 300m³/h;
- Cột áp: 0,25Mpa;
- Công suất tiêu thụ: 45kW;
- Tần số: 60Hz;
- Điện áp: 440V.

Quy đổi sang lượng nhiên liệu tiêu thụ của máy đèn, tương đương 0,217 tấn/ngày hay 79 tấn/năm.

Tính theo giá dầu HFO hiện tại khoảng 450\$ USD/tấn, thì máy đèn một năm tiêu tốn hết 35.550,00\$ USD tính riêng cho phần công suất cấp lại bơm nước biển.

Kết quả mô phỏng khi nhiệt độ nước biển không thay đổi (30°C), tải động cơ thay đổi được thể hiện như trong Bảng 1.

Bảng 1. Mô phỏng khi thay đổi tải

Tải (%)	25	51	75	100
Tần số f (Hz)	27,56	56,2	59,8	60
Tốc độ N (V/p)	818,9	1670,8	1783	1783
Lưu lượng Q (m ³ /h)	137,8	281,1	300	300
Cột áp H (Pa)	5,3	21,9	25	25
Công suất tiêu thụ P (kW)	4,4	37,0	45	45
Lượng nhiên liệu tiêu thụ (tấn/năm)	7,75	65,2	79,0	79,0
Lượng phát thải CO ₂ (tấn/năm)	24,1	203,0	246,0	246,0
Mức độ giảm nhiên liệu và CO ₂ (%)	90,2	17,5	0	0

Kết quả mô phỏng khi tải động cơ không thay đổi (75%), nhiệt độ nước biển thay đổi được thể hiện như trong Bảng 2.

Bảng 2. Mô phỏng khi thay đổi nhiệt độ nước biển

Nhiệt độ (°C)	5	15	25	30
Tần số f (Hz)	34,6	45,1	60,0	60,0
Tốc độ N (V/p)	1028,4	1340,1	1783	1783
Lưu lượng Q (m ³ /h)	173	225,5	300,0	300,0
Cột áp H (Pa)	8,3	14,1	25,0	25,0
Công suất tiêu thụ P (kW)	8,6	19,1	45,0	45,0
Lượng nhiên liệu tiêu thụ (tấn/năm)	15,2	33,7	79,0	79,0
Lượng phát thải CO ₂ (tấn/năm)	47,3	104,9	246,0	246,0
Mức độ giảm nhiên liệu và CO ₂ (%)	80,8	57,3	0	0

4.2. Đánh giá kết quả

* Trong kết quả mô phỏng ở Bảng 2.

Khi tải của động cơ giảm từ 75% xuống 50%, 25%, hệ số tiết kiệm năng lượng (η) là:

$$\eta_{50} = \frac{P_{75} - P_{50}}{P_{75}} 100\% = \frac{45.0 - 37.0}{45.0} 100\% = 17.8\% \text{ (tương đương 6.327,9 \$ USD/năm)} \quad (5)$$

$$\eta_{50} = \frac{P_{75} - P_{50}}{P_{75}} 100\% = \frac{45.0 - 37.0}{45.0} 100\% = 89.1\% \text{ (tương đương 31.675,05\$ USD/năm)} \quad (6)$$

* Trong kết quả mô phỏng ở Bảng 2.

Khi nhiệt độ nước biển giảm từ 25°C xuống 15°C, 5°C. Hệ số tiết kiệm năng lượng (η) là:

$$\eta_{15} = \frac{P_{25} - P_{15}}{P_{25}} 100\% = \frac{45.0 - 19.1}{45.0} 100\% = 57.6\% \text{ (tương đương 20.476,8 \$ USD/năm)} \quad (7)$$

$$\eta_5 = \frac{P_{25} - P_5}{P_{25}} 100\% = \frac{45.0 - 8.6}{45.0} 100\% = 80.9\% \text{ (tương đương 28.759,95\$ USD/năm)} \quad (8)$$

Qua kết quả thu được trên mô phỏng, hệ thống trang bị biển tần đã chứng tỏ tiết kiệm năng lượng đáng kinh ngạc so với hệ thống ban đầu, cụ thể là:

- Khi làm việc ở chế độ 25%, mức độ giảm tiêu thụ nhiên liệu và phát thải tới 90% (Bảng 2);

- Khi làm việc ở điều kiện nhiệt độ nước biển là 5°C, mức độ giảm tiêu thụ nhiên liệu và phát thải tới 80% (Bảng 2).

5. Kết luận

Bài báo đã giới thiệu một giải pháp công nghệ tiết kiệm lượng nhiên liệu tiêu thụ và giảm phát thải CO₂ cho tàu thủy bằng cách trang bị biển tần cho mô tơ lai bơm nước biển làm mát. Ưu điểm khi triển khai sử dụng biển tần cho hệ thống là không hoặc cần rất ít sự thay đổi hệ thống. Có thể thực hiện việc lắp đặt, hoán cải mà không cần dừng tàu. Một điều rất hấp dẫn là thời gian hoàn vốn nhanh, thường là chưa tới một năm.

Với những kết quả đã đạt được, chúng tôi cho rằng giải pháp này hoàn toàn khả thi khi áp dụng cho hệ thống làm mát trên các tàu trong đội tàu biển Việt Nam. Hơn nữa, nó cũng có thể được áp dụng cho các hệ thống khác trên tàu thủy, như hệ thống nước ngọt nhiệt độ thấp, hệ thống thông gió buồng máy,... Đây cũng có thể được xem là hướng phát triển tiếp theo dành cho nhóm nghiên cứu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số DT24-25.18.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] IMO strategy on reduction of the emissions from ships, Annex 1, resolution MEPC.377(80), Adopted on 7 July 2023.
- [2] IMO Rules on ship carbon intensity and rating system enter into force, 01 November 2022.
- [3] <https://www.marineinsight.com/tech/7-technologies-to-reduce-fuel-consumption-of-ships/>.
- [4] Angela Marchi, Angus R. Simpson, Evaluating the Approximation of the Affinity Laws and Improving the Efficiency Estimate for Variable Speed Pumps, Article in Journal of Water Resources Planning and Management, December 2013.
- [5] MV. Servette manual.

Ngày nhận bài:	16/02/2025
Ngày nhận bản sửa:	20/03/2025
Ngày duyệt đăng:	22/03/2025