

# ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ TẢI VÀ GÓC PHUN SỚM ĐỘNG CƠ DIESEL TÀU THỦY ĐẾN LƯỢNG PHÁT THẢI $NO_x$

## INFLUENCE OF LOAD CONDITIONS AND LOAD CONDITION $NO_x$ EMISSIONS

LƯU QUANG HIỆU

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

Email liên hệ: [luuquanghieu@vamaru.edu.vn](mailto:luuquanghieu@vamaru.edu.vn)

### Tóm tắt

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu về ảnh hưởng của chế độ khai thác và góc phun sớm đến đặc tính phát thải  $NO_x$  của động cơ hai kỳ tàu thủy cỡ lớn, thông qua các thử nghiệm được thực hiện trên động cơ MAN B&W 6S70ME-C8.2 với chế độ tải và góc phun nhiên liệu sớm khác nhau. Đặc tính phát thải  $NO_x$  đã được trình bày và thảo luận. Kết quả thực nghiệm cho thấy việc tăng góc phun sớm và tải động cơ trên 50% dẫn đến tăng lượng phát thải  $NO_x$ . Lượng phát thải  $NO_x$  nhỏ nhất khi động cơ làm việc ở quanh vùng 50% tải. Khi tải động dao động trong vùng 30-65% lượng phát thải  $NO_x$  luôn nằm trong giới hạn cho phép. Tuy nhiên, tải động cơ nhỏ hơn 25% hay lớn hơn 75% và góc phun sớm lớn hơn  $15^\circ$ , lượng phát thải  $NO_x$  lớn hơn  $14,4g/kW.h$ . Các kết quả nghiên cứu phù hợp với các công bố trước đó [5, 6, 8] và sẽ là tài liệu tốt cho bộ phận khai thác và vận hành động cơ muốn giảm lượng khí thải động cơ để đáp ứng các quy định khí thải nghiêm ngặt hơn của IMO.

**Từ khóa:** Phát thải  $NO_x$ , động cơ diesel tàu thủy, góc phun sớm, tải động cơ, hồi quy.

### Abstract

This paper presents research on the effects of the operation mode and advance angle of fuel injection on the emission characteristics  $NO_x$  of a two-stroke heavy-duty marine engine. The tests were carried out on marine engine MAN B&W 6S70ME-C8.2 with different load and different advance angle of fuel injection.  $NO_x$  emission characteristic was presented and discussed. The experimental results reveal that increasing advance angle of fuel injection and engine load in increase  $NO_x$  emissions.  $NO_x$  emissions in the engine exhaust are the smallest when the engine is working around 50% load. When the engine load changes in the range of 30-65%,  $NO_x$  emissions are always within the allowable limits. However,

when the engine load is less than 25% or more than 75% and advance angle of fuel injection is greater than  $15^\circ$ ,  $NO_x$  emissions are greater than  $14,4g/kW.h$ . The results were in line with the literature reviews [5, 6, 8] and would be good material for operators who want to reduce the engine exhaust gas emission in order to meet the stricter IMO emission regulations.

**Keywords:**  $NO_x$  emissions, marine diesel engine, advance angle of fuel injection, engine load, regression.

### 1. Đặt vấn đề

Vận tải biển là một trong những nhân tố quan trọng đóng góp vào sự phát triển kinh tế và xã hội, đồng thời tiêu thụ một lượng nhiên liệu đáng kể và có tác động lớn đến môi trường [1]. Liên tục gia tăng lượng tiêu thụ nhiên liệu hydrocarbon dẫn đến phát thải các chất độc hại vào khí quyển phá hủy quá trình làm sạch tự nhiên của sinh quyển và đe dọa đến cuộc sống của con người.

Động cơ diesel là nguồn phát thải khí gây ô nhiễm lớn nhất trên tàu thủy. Vấn đề giảm phát thải các chất gây ô nhiễm do động cơ diesel là một trong những nhiệm vụ quan trọng nhất của ngành vận tải biển [2, 3]. Hiện nay, các chỉ số môi trường của động cơ diesel tàu thủy được kiểm soát theo những yêu cầu quy định tại Phụ lục VI "Quy định ngăn ngừa ô nhiễm không khí từ tàu" thuộc Công ước MARPOL 73/78 do Ủy ban Bảo vệ môi trường biển của IMO xây dựng và có hiệu lực từ ngày 01 tháng 01 năm 2011.

Theo mục 13 Phụ lục VI, hàm lượng phát thải  $NO_x$  trong khí thải động cơ diesel tàu biển khi tàu hoạt động bắt buộc phải nằm trong giới hạn thể hiện trong Bảng 1 [1].

Việc siết chặt các tiêu chuẩn phát thải chất gây ô nhiễm không khí như vậy buộc các chủ tàu, cũng như các công ty đóng tàu, phải không ngừng tìm kiếm những giải pháp kỹ thuật mới nhằm cải thiện các thông số môi trường của động cơ diesel [4, 5]. Những giải pháp này cơ bản được chia thành hai nhóm: Sơ

cấp và thứ cấp. Các phương pháp sơ cấp thực hiện thông qua việc tổ chức quá trình hình thành hỗn hợp và cháy, cải tiến hệ thống phun nhiên liệu, cũng như sử dụng nhiên liệu thay thế. Các phương pháp thứ cấp bao gồm: Tuần hoàn khí thải, làm sạch khí thải bằng xúc tác,... Trong đó, những phương pháp nhằm thay đổi quá trình đốt cháy nhiên liệu trong xy lanh của động cơ đốt trong đáng được quan tâm đặc biệt.

Kết quả nghiên cứu [6, 8] cho rằng sự hình thành các oxit nitơ bị ảnh hưởng mạnh nhất bởi góc phun sớm nhiên liệu, thông số có thể điều chỉnh của động cơ diesel. Điều này được giải thích, do khi giảm góc phun sớm nhiên liệu, nhiệt độ cháy cực đại và thời gian tiêu chuẩn cho quá trình đốt cháy nhiên liệu sẽ giảm xuống. Bên cạnh đó nghiên cứu [9] chỉ ra chế độ tải có ảnh hưởng trực tiếp đến lượng phát thải  $NO_x$  trong thành phần khí thải. Vì thế, mục tiêu nghiên cứu của bài báo là đánh giá tác động đồng thời của các yếu tố trên, từ đó giám sát lượng phát thải  $NO_x$  cũng như xác định giá trị góc phun sớm phù hợp với chế độ tải động cơ để giảm thiểu thành phần khí thải độc hại này.

**Bảng 1. Các quy định bắt buộc về phát thải  $NO_x$**

Tiêu chuẩn	Khu vực áp dụng	Thời điểm đóng	Tổng giới hạn phát thải (g/kWh), $n = v/ph$		
			$n < 130$	$130 \leq n \leq 2000$	$n \geq 2000$
I	Toàn cầu	01/01/2000	17,0	$45.n^{-0.2}$	9,8
II	Toàn cầu	01/01/2011	14,4	$44.n^{-0.23}$	7,7
III	Vùng biển đặc biệt	01/01/2016	3,4	$9.n^{-0.2}$	2,0

## 2. Nội dung

### 2.1. Cơ sở tính toán phát thải $NO_x$ trong khí thải động cơ diesel

Giám sát lượng phát thải oxit nitơ trong khí thải của động cơ được thực hiện theo các khuyến nghị được nêu trong mục 6.4 của Bộ luật Kỹ thuật  $NO_x$  năm 2008, được sửa đổi vào năm 2012 và 2014. Thực hiện giám sát oxit nitơ bao gồm đo nồng độ oxit nitơ ( $NO + NO_2$ ) trong các sản phẩm thô của quá trình đốt cháy nhiên liệu.

Quá trình theo dõi hàm lượng phát thải  $NO_x$  trong khí thải động cơ diesel tàu thủy cần đồng thời xác định các thông số như: Tốc độ của động cơ,  $v/ph$ ; công suất có ích  $N_e$ , kW; tốc độ động cơ diesel,  $v/ph$ ; nhiệt độ không khí nạp trước và sau tua bin tăng áp, °C; nhiệt độ không khí buồng máy, °C; nhiệt độ nước làm mát vào và ra, °C; suất tiêu hao nhiên liệu, g/kWh.

Lượng phát thải  $NO_x$  trong thành phần của các sản phẩm đốt cháy nhiên liệu chưa được xử lý được tính theo công thức sau [9]:

$$q_{NO_x} = 0,001586 \cdot C_{NO_x} \cdot q_{kt} \cdot k_{hd} \cdot g/h \quad (1)$$

Trong đó:

$C_{NO_x}$  - Nồng độ  $NO_x$  trong khí thải chưa xử lý, ppm;

$q_{kt}$  - Lưu lượng khí thải, kg/h;

$k_{hd}$  - Hệ số tác động của độ ẩm không khí đến phát thải  $NO_x$ .

Do nồng độ  $NO_x$  trong khí thải động cơ có sự phụ thuộc vào nhiệt độ và độ ẩm không khí nạp, nên đối với các động cơ diesel có làm mát trung gian khí nạp trung gian, nồng độ oxit nitơ phải được điều chỉnh theo nhiệt độ và độ ẩm, có tính đến hệ số [9]:

$$k_{hd} = \frac{1}{Q} \quad (2)$$

Trong đó:

$$Q = 1 - 0,012(H_a - 10,71) - 0,00275(T_a - 298) + 0,00285(T_{SC} - T_{SCRef})$$

$T_a$  - Nhiệt độ không khí vào bầu lọc gió, K;

$H_a$  - Độ ẩm tuyệt đối không khí vào bầu lọc gió, tính theo g/ kg không khí khô;

$T_{SC}$  - Nhiệt độ gió tăng áp, K;

$T_{SCRef}$  - Nhiệt độ không khí tăng áp, tương ứng với nhiệt độ nước biển ở 25°C.

Hàm lượng phát thải  $NO_x$  sau cùng được tính toán theo công thức [9]:

$$NO_x = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{NO_x} \cdot W_{Fi})}{\sum_{i=1}^n (P_i \cdot W_{Fi})}, g/kW.h \quad (3)$$

Trong đó,  $P = P_m + P_{aux}$

$P_m$  - Công suất động cơ diesel, kW;

$P_{aux}$  - Công suất các thiết bị phụ lắp đặt trên động cơ, kW.

**Bảng 2. Thông số kỹ thuật động cơ 6S70ME-C8.2**

Công suất, kW	Tốc độ động cơ, vòng/phút	Đường kính xilanh, mm	Hành trình piston, mm	Áp suất $p_e$ , MPa
19620	91	700	2800	1,79

**Bảng 3. Các chế độ thử nghiệm động cơ**

Tốc độ động cơ, v/ph	90,47	86,98	75,57	59,85
Công suất, kW	85%	75%	50%	25%
Hệ số trọng số $W_F$	16.570	14.645	9.360	4.905
	0,2	0,2	0,15	0,15

**Bảng 4. Kết quả thử nghiệm động cơ 6S70ME-C8.2**

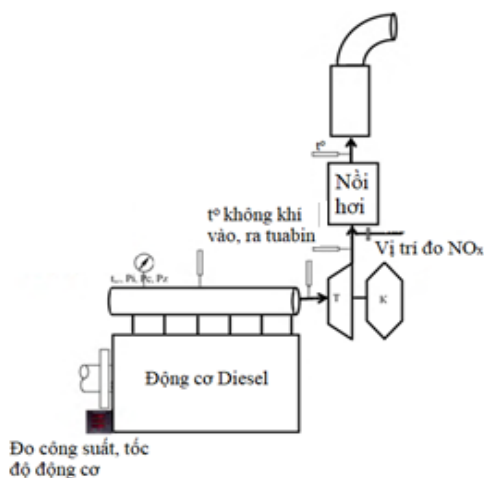
Thử nghiệm	Chế độ tải động cơ, %	Góc phun sớm, °	Hàm lượng phát thải $NO_x$ , g/kW.h
1.		8	7,82
2.	25	12	11,73
3.		16	14,54
4.		8	6,51
5.	50	12	9,75
6.		16	11,29
7.		8	8,25
8.	75	12	13,54
9.		16	15,61
10.		8	8,43
11.	85	12	13,38
12.		16	15,87

**2.2. Thử nghiệm**

**2.2.1. Đối tượng thử nghiệm**

Đối tượng nghiên cứu là động cơ diesel tàu thủy 6S70ME-C8.2 của hãng MAN B&W trang bị trên tàu MV NSU KEYSTONE. 6S70ME-C8.2 là động cơ hai kỳ 6 xy lanh có tăng áp loại MITSUI-MAN TCA88-21089. Các thông số kỹ thuật động cơ thể hiện trên Bảng 2.

Trên động cơ 6S70ME-C8.2 toàn bộ trục cam điều khiển phân phối khí, cam nhiên liệu, cam đảo chiều, đĩa chia gió,... đã hoàn toàn được loại bỏ. Thay vào đó động cơ sử dụng hệ thống thủy lực được điều khiển từ xa để thực hiện thay nhiệm vụ các cơ cấu cơ khí trên. Các thông số khai thác của động cơ đo tại các vị trí tương ứng thể hiện ở Hình 1.



**Hình 1. Sơ đồ vị trí đo các thông số khai thác**

**2.2.2. Thiết bị đo đạc và chế độ thử nghiệm**

Với mục tiêu đánh giá mức độ ảnh hưởng của góc phun sớm và các chế độ tải khác nhau của động cơ diesel tàu biển, thử nghiệm cần được thực hiện trên động cơ 6S70ME-C8.2 ở nhiều chế độ tải và ứng với mỗi chế độ tải là các giá trị góc phun sớm khác nhau. Các chế độ thử nghiệm thực hiện theo quy trình thử loại E3 đối với động cơ lai chân vịt (Bảng 3).

Nồng độ  $NO_x$  trong khí thải động cơ được đo bằng máy phân tích khí thải Testo 350. Thiết bị được kết nối với máy tính để truyền và lưu trữ dữ liệu với phần mềm easyEmission. Máy Testo 350 xác định nồng độ NO trong dải đo từ 0 đến 4000ppm với độ phân giải 1ppm, đo  $NO_2$  trong dải đo từ 0 đến 500ppm với độ phân giải 0,1ppm.

Để tính toán lượng khí thải trung bình của động cơ, công suất của động cơ diesel hàng hải được xác định bằng các thiết bị sau: Tốc độ trục khuỷu của động cơ chính được thiết lập bởi bộ điều khiển tốc độ điện tử, được đo bằng máy đo độ xoắn, cũng như bằng bộ đếm tốc độ thông thường; lưu lượng khí thải được đo tự động bằng cách sử dụng ống Pito. Ống Pito cho phép xác định vận tốc dòng khí xả trong giới hạn 0-40 (m/s).

**2.2.3. Kết quả thử nghiệm**

Thử nghiệm thực hiện ở 4 chế độ tải và 3 giá trị góc phun sớm ứng với mỗi chế độ tải. Động cơ hoạt động trong điều kiện môi trường: Áp suất khí quyển 1,016bar; nhiệt độ khí nạp 23,2°C; độ ẩm không khí 54%; Các giá trị đo được thể hiện trên Bảng 4.

Để có thể xác định được tác động đồng thời của hai yếu tố tải động cơ và góc phun sớm đến lượng phát

thải NO<sub>x</sub> cần xây dựng mô hình toán thể hiện sự phụ thuộc, qua đó xác định giá trị góc phun sớm tối ưu hoá ứng với mỗi chế độ tải của động cơ.

Mô hình toán tổng quát mối liên hệ giữa giá trị học phun sớm và tải động cơ đến hàm lượng phát thải NO<sub>x</sub> có dạng [7]:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k a_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^k a_{jj} \cdot x_j^2 \quad (4)$$

Trong đó,

$y$  - Lượng phát thải NO<sub>x</sub> trong khí thải động cơ, g/(kW.h);

$x_i, x_j$  - Giá trị của các biến số góc phun sớm và tải động cơ;

$a_i, a_j, a_{ij}, a_{jj}$  - Giá trị các hệ số phương trình hồi quy.

Dữ liệu thực nghiệm được xử lý bằng phần mềm Mathematica. Kết quả thực nghiệm tính toán dưới dạng các loại mô hình hồi quy phi tuyến được trình bày dưới đây [7]:

$$y = -0.148933 - 7.46868 \cdot x_1 + 1.3279 \cdot x_2 - 0.25345 \cdot x_1 \cdot x_2 - 12.1187 \cdot x_1^2 - 0.0191 \cdot x_2^2 \quad (5)$$

Mức độ phù hợp của các mô hình thực nghiệm được đánh giá theo các tiêu chí: Sai số tương đối trung bình A, hệ số xác định R<sup>2</sup>.

Sai số tương đối trung bình A cho thấy độ lệch phần trăm của các giá trị được tính toán so với các giá trị thử nghiệm [7]:

$$A = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y - y_t}{y} \right| 100\% \quad (6)$$

Trong đó,

$n$  - Số lần thí nghiệm;

$y$  - Giá trị thực nghiệm;

$y_t$  - Giá trị tính toán.

Giá trị hệ số xác định [7]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_t - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (7)$$

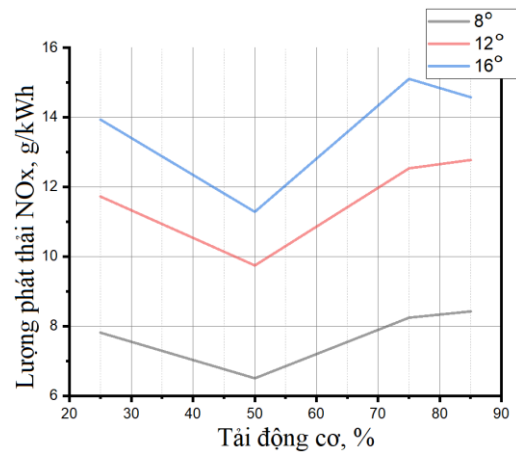
Kết quả tính toán cho thấy giá trị sai số tương đối trung bình của mô hình A = 4,37, hệ số xác định R<sup>2</sup> = 0,843. Dựa trên kết quả tính toán cho thấy mức

sai số trung bình A < 5% và hệ số xác định gần 1, điều này cho thấy mô hình toán học về sự phụ thuộc của lượng phát thải NO<sub>x</sub> vào giá trị góc phun sớm và tải của động cơ là tin cậy.

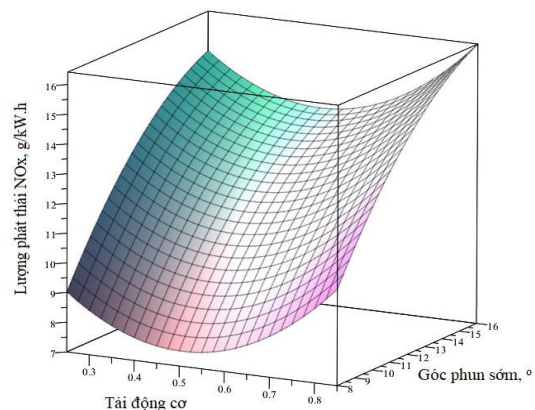
#### 2.2.4. Thảo luận

Trương quan của các thông số khai thác động cơ 6S70ME-C8.2 đến nồng độ phát thải NO<sub>x</sub> thể hiện trên các Hình 2 và 3.

Từ đồ thị Hình 2 và 3 ta thấy, giá trị góc phun sớm có ảnh hưởng trực tiếp đến lượng phát thải khí độc hại NO<sub>x</sub>, tăng độ lớn góc phun sớm phát thải NO<sub>x</sub> tăng. Đồng thời, ở mỗi trường hợp góc phun sớm khi tải động cơ tăng từ 25% đến 50% lượng phát thải NO<sub>x</sub> có xu hướng giảm và tăng lên khi tải động cơ tăng từ 50% đến 75%.



Hình 2. Ảnh hưởng của các thông số khai thác đến mức phát thải NO<sub>x</sub>



Hình 3. Mô hình 3D sự phụ thuộc của lượng phát thải NO<sub>x</sub>

Lượng phát thải NO<sub>x</sub> nhỏ nhất khi động cơ làm việc ở quanh vùng 50% tải. Khi tải động cơ diesel thay đổi trong vùng 30-65% lượng phát thải NO<sub>x</sub> luôn nằm trong giới hạn cho phép. Tuy nhiên, khi tải động cơ

nhỏ ở khoảng 25% và góc phun sớm lớn hơn 15<sup>0</sup>, lượng phát thải NO<sub>x</sub> lớn hơn 14,4g/kW.h, vì thế không đáp ứng yêu cầu Phụ lục VI Công ước MARPOL 73/78. Hàm lượng NO<sub>x</sub> trong khí thải cũng vượt quá ngưỡng quy định tại Công ước MARPOL 73/78 khi động cơ hai kỳ thấp tốc hoạt động ở dải công suất trên 75% và góc phun sớm lớn hơn 16<sup>0</sup>.

### 3. Kết luận

Nghiên cứu cho thấy động cơ hai kỳ thấp tốc MAN B&W 6S70ME-C8.2 cơ bản đáp ứng giới hạn về hàm lượng NO<sub>x</sub> trong khí thải động cơ theo Quy định 13 của Phụ lục VI ở mức độ Tier II - 14,4 g/kW.h, khi hoạt động trên vùng quốc tế nằm ngoài khu vực kiểm soát khí thải đặc biệt. Khi động cơ làm việc ở dải công suất phổ biến từ 30%-75% hàm lượng NO<sub>x</sub> không vượt quá giới hạn cho phép. Ở các chế độ tải có lượng phát thải NO<sub>x</sub> tiệm cận giới hạn và có khả năng vượt quá người khai thác cần có điều chỉnh góc phun sớm ở giá trị phù hợp.

Kết quả nghiên cứu đã khẳng định tải của động cơ và góc phun sớm có ảnh hưởng trực tiếp đến thành phần phát thải NO<sub>x</sub>. Mô hình toán về sự phụ thuộc của hàm lượng phát thải NO<sub>x</sub> vào chế độ tải động cơ và góc phun sớm cho phép người khai thác lựa chọn các thông số khai thác phù hợp nhằm giảm lượng phát thải khí độc hại, tuân thủ các quy định về môi trường và hiệu quả trong quá trình tàu hoạt động.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT22-23.20**.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Čampara, L., Hasanspahić, N., & Vujičić, S. (2018). *Overview of MARPOL ANNEX VI regulations for prevention of air pollution from marine diesel engines*. In SHS web of conferences (Vol.58, p.01004). EDP Sciences.
- [2] Eilts, P., & Tinschmann, G. (2004, June). *Possibilities and perspectives of combustion system development using electronically controlled fuel injection systems*. In 24th CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology, Kyoto, Japan, pp.7-11.
- [3] Kotakis, N. K. (2012). *Cost comparative assessment study between different retrofit technologies applied on model ship to conform to IMO MARPOL 73/78, ANNEX VI, REG. 14*.
- [4] Okubo, M., & Kuwahara, T. (2019). *New technologies for emission control in marine diesel engines*. Butterworth-Heinemann.
- [5] Deng, J., Wang, X., Wei, Z., Wang, L., Wang, C., & Chen, Z. (2021). *A review of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels*. Science of the Total Environment, Vol.766, p.144319.
- [6] Horibe, N., Takahashi, K., Kee, S. S., Ishiyama, T., & Shioji, M. (2007). *The effects of injection conditions and combustion chamber geometry on performance and emissions of DI-PCCI operation in a diesel engine*. SAE Transactions, pp.387-395.
- [7] Algina, J., & Olejnik, S. (2003). *Sample size tables for correlation analysis with applications in partial correlation and multiple regression analysis*. Multivariate Behavioral Research, Vol.38(3), pp.309-323.
- [8] Agarwal, A. K., Srivastava, D. K., Dhar, A., Maurya, R. K., Shukla, P. C., & Singh, A. P. (2013). *Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engine*. Fuel, Vol.111, pp.374-383.
- [9] Lopatin, O. P. (2020, May). *The effect of operational modes of diesel engines to emissions of nitrogen oxides*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol.862, No.6, p.062087). IOP Publishing.
- [9] NO<sub>x</sub> TECHNICAL CODE (2008). *Technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines*, 107p.

Ngày nhận bài:	14/04/2023
Ngày nhận bản sửa:	24/04/2023
Ngày duyệt đăng:	29/04/2023