TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

NGHIÊN CỨU THỬ NGHIỆM CÁC GIẢI PHÁP LƯU HỒI KHÍ XẢ GIẢM PHÁT THẢI NO_x CHO ĐỘNG CƠ DIESEL THỦY ĐANG KHAI THÁC

AN EXPERIMENTAL STUDY ON EXHAUST GAS RECIRCULATION SOLUTIONS TO REDUCE NO_x EMISSIONS FOR THE EXISTING MARINE DIESEL ENGINES

TRẦN THẾ NAM

Phòng Quan hệ Quốc tế, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
Email liên hệ: thenam@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Sử dụng lưu hồi khí thải (EGR) giảm phát thải khí NO_x là một trong các giải pháp hiệu quả và đang được áp dụng phổ biến cho các động cơ diesel nói chung và diesel thủy nói riêng. Tuy nhiên, giải pháp này chủ yếu dành cho các động cơ diesel thế hệ mới. Đối với động cơ diesel đang khai thác, chưa có nhiều nghiên cứu và ứng dụng cụ thể. Trước yêu cầu bắt buộc về giảm phát thải NO_x của Công ước MARPOL phụ lục VI đối với tàu biển, các động cơ diesel thủy đang khai thác ở Việt Nam cần có các giải pháp phù hợp và có tính khả thi. Do đó, nghiên cứu thử nghiệm các giải pháp EGR dành cho đối tượng động cơ này nhằm đánh giá phương án áp dụng là thực sự cần thiết, làm cơ sở để tham khảo và triển khai các bước ứng dụng tiếp theo trong thực tiễn.

Từ khóa: *EGR, phát thải NO_x, diesel thủy.*

Abstract

Exhaust Gas Recirculation (EGR) solution for decreasing the NO_x emissions is one of the effective measures and widely applied for general diesel engines and marine engines as well. This method has been mainly implemented for the new engines; however it is lack of the same studies for the existing ones. Facing to the compulsory regulations of the MARPOL Annex VI on NO_x emissions control, it can be seen that the current diesel engines on-board the Vietnamese sea-going fleets need more and more applicable and feasible solutions. Hence, an experimental study on evaluating the NO_x reduction effectiveness of the EGR measure will be one of them in order to be referred as a positive and convincible basis for next steps of realization.

Keywords: *EGR, NO_x emissions, marine engine.*

1. Đặt vấn đề

Nhằm tăng cường việc bảo vệ môi trường biển, Tổ chức Hàng hải thế giới (IMO) đã thiết lập giới hạn phát thải NO_X và đưa ra lộ trình áp dụng đối với các động cơ diesel thủy [1]. Hiện nay, hầu hết các động cơ diesel thủy sản xuất mới đều được các nhà sản xuất động cơ trang bị hệ thống hồi lưu khí thải (EGR) nhằm giảm phát thải chất NO_x một cách hiệu quả [2]. Theo đó, một phần khí xả sẽ được đưa trở lại đường nạp trong một số chế độ tải nhằm tăng hệ số khí sót, giảm lượng oxy cung cấp vào buồng đốt, dẫn đến hạn chế tốc độ tăng nhiệt độ tạo phản ứng sinh khí NO_x. Công nghệ EGR được tập trung vào việc kiểm soát sự rò lọt ngược của khí nạp vào đường khí xả hồi lưu và tỷ lệ EGR (tỷ lệ không khí-khí thải lưu hồi) một cách hợp lý. Trong đa số trường hợp, áp suất của khí trước cửa nạp được thiết kế cao hơn so với khí thải hồi lưu (EGR), nên khí thải từ đường xả của động cơ không thể hút trực tiếp vào đường nạp. Đã có nhiều nghiên cứu khác nhau trong vấn đề này như: cấp vào cửa hút của máy nén tăng áp, cấp vào phía sau máy nén,... Lựa chọn giải pháp thích hợp với từng động cơ phụ thuộc vào loại động cơ, nhiên liệu sử dụng, công suất động cơ. Các nghiên cứu liên quan đến EGR đã được tiến hành khá đầy đủ, từ việc nghiên cứu lý thuyết, mô phỏng [3], nghiên cứu thử nghiệm [4], hay phương án tối ưu hóa lượng EGR [5], nhưng có thể thấy rằng nghiên cứu về EGR đều chủ yếu hướng đến việc sản xuất động cơ mới. Các nghiên cứu phục vụ mục đích hoán cải các động cơ diesel thủy thế hệ cũ còn chưa có nhiều hoặc chỉ đối với các động cơ ô tô [6].

Động cơ diesel thủy tại Việt Nam lắp trên các phương tiện thủy nội địa cũng như tàu biển là khá lớn và đa dạng. Tiệm cận dần với các quy định kiểm soát NOx, rất khó có thể thay thế toàn bộ số lượng động cơ này bằng các động cơ mới trong thời gian ngắn được. Chính vì vậy, tìm kiếm các giải pháp dành cho đối tượng động cơ này luôn được các nhà

khoa học trong nước quan tâm, đặc biệt đối với các nghiên cứu mang tính thực nghiệm. Dựa vào cơ sở nghiên cứu các công trình đã công bố trên thế giới, tác giả lựa chọn thử nghiệm đối sánh 2 phương pháp EGR được cho là có tính khả thi cao đối với các động cơ đang khai thác: EGR áp suất thấp (trước tuabin tăng áp) và EGR áp suất cao (sau tua bin tăng áp). Quá trình thử nghiệm được thực hiện trên động cơ HANSHIN 6LU32 với lưu lượng tái sử dụng khí thải EGR trong khoảng từ 2% đến 15%.

2. Tính toán mô hình thử nghiệm

2.1. Đối tượng thử nghiệm

Động cơ 6LU32 là động cơ diesel thuỷ có tua bin tăng áp, cỡ trung, vòng quay trung bình, dùng để dẫn động trực tiếp cho chân vịt trong hệ động lực của các tàu biển từ 2.000-5.000DWT. Động cơ được lựa chọn làm đối tượng thử nghiệm vì có khả năng sử dụng được cả nhiên liệu thuộc phân đoạn cuối của quá trình chưng cất dầu thô (nhiên liệu nặng FO).

Các thông số cơ bản của động cơ 6LU32 như trong Bảng 1.

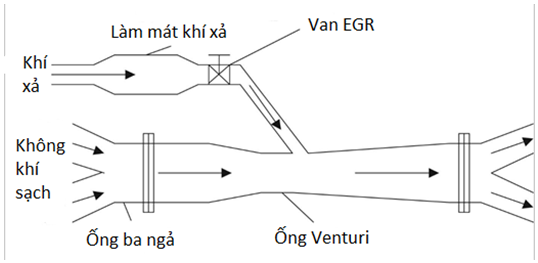
***Bảng 1. Thông số động cơ HANSHIN 6LU32** [7]*

Thông số	Giá trị
Động cơ HANSHIN	6LU32
Số xi lanh	6
Vòng quay định mức	340v/phút
Công suất định mức	1300HP/970kW
Đường kính xi lanh	320mm
Hành trình piston	510mm
Tốc độ trung bình piston	5,78m/s
Lưu lượng khí xả lưu hồi	(20-30)%
Lưu lượng khí sạch lớn nhất theo yêu cầu	4701,79 m^3/h
Đường kính ống dẫn khí nạp từ máy nén đến bầu sinh hàn	158mm

Với mục tiêu đối sánh khả năng xử lý NO_x của các động cơ đang khai thác, nên tỷ lệ EGR được lựa chọn ở mức độ nhỏ, dự kiến tối đa là 20%.

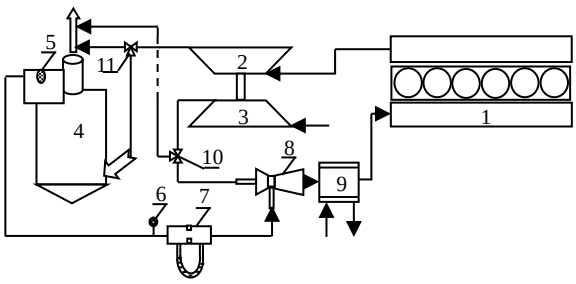
2.2. Phương pháp EGR áp suất cao bằng ống phun Venturi

Theo phương pháp này, khí xả lưu hồi được đưa lại đường nạp, phía sau máy nén tuabin tăng áp (môi trường áp suất cao) thông qua ống phun Venturi. Dòng khí nạp áp suất cao lưu động nhanh qua ống Venturi, đóng vai trò là dòng công chất chính tạo chân không, dẫn động hút khí thải lưu hồi. Sự vận động hỗn loạn và giao thoa giữa dòng khí sạch áp suất cao với khí lưu hồi trong không gian hẹp tạo nên hỗn hợp "không khí sạch-khí thải sạch" với độ đồng nhất cao trước khi cấp vào động cơ. Tùy thuộc vào mục tiêu thiết kế và mức độ giảm nồng độ NO_x, tỷ lệ khí thải lưu hồi sẽ được lựa chọn hợp lý.



Hình 1. Cấu tạo ống Venturi

Hai thông số chính ảnh hưởng đến hiệu suất của ống Venturi là tiết diện cổ ống và góc phân kỳ (góc tiết diện tăng dần theo dòng chảy). Vùng tiết diện cổ ống quyết định năng suất của ống Venturi, còn góc phân kỳ sẽ ảnh hưởng đến sự tăng áp suất khí sau khi hòa trộn. Ống Venturi được tính toán thiết kế theo các thông số định mức của động cơ 6LU32 (970KW, 340v/p). Để đơn giản trong tính toán, dòng chảy trong đường ống được coi là dòng chảy không đổi và van EGR được điều chỉnh từ đóng hoàn toàn thành mở hoàn toàn khi động cơ làm việc. Sơ đồ EGR áp suất cao được đề xuất như trên Hình 2.



***Hình 2. Sơ đồ hệ thống trộn và kiểm soát tỷ lệ trộn của khí thải lưu hồi EGR áp suất cao** [7]*

1. Động cơ diesel; 2. Tuabin khí xả; 3. Máy nén tăng áp; 4. Tháp lọc muội và xử lý SOx; 5. Van điều chỉnh EGR; 6. Nhiệt kế; 7. Lưu lượng kế; 8. Ống venturi; 9. Bầu làm mát; 10. Van điều chỉnh khí tăng áp; 11. Van điều chỉnh khí xả qua tháp.

Quá trình tính toán được dựa trên các công thức cơ bản sau:

- Áp suất đối với chất khí lý tưởng:

$$p = \rho . RT \quad (1)$$

- Mật độ dòng đối với chất lỏng liên tục:

TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

$$m = \rho . Av \quad (2)$$

- Vận tốc âm:

$$a = \sqrt{k\,RT} \quad (3)$$

- Số Mach:

$$M = v/a \quad (4)$$

Trong đó: p là áp suất khí nạp (MPa), ρ là mật độ khí nạp (kg.m^{-3}); R là hằng số chất khí (J kg^{-1}K^{-1}); T là nhiệt độ tuyệt đối của khí nạp (^{0}K); m là mật độ dòng khí nạp (kgS^{-1}); A là diện tích mặt cắt ngang đường ống (m^2); v là tốc độ dòng khí nạp (ms^{-1}); k là chỉ số nén đoạn nhiệt k=C_p/C_V; C_p nhiệt dung riêng đẳng áp của chất khí; C_V nhiệt dung riêng đẳng tích của chất khí; M là số Mach.

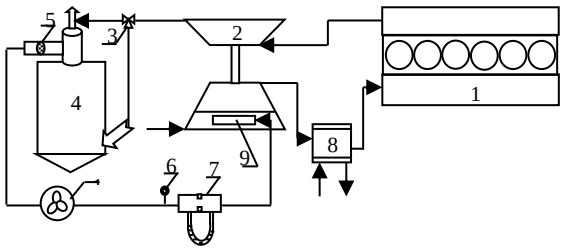
Các điều kiện biên cơ bản được xác định như sau: Đường kính vào và ra của ống Venturi được thiết kế bằng đường kính ống khí nạp $d_1 = d_2$ = 115mm, áp suất khí ra khỏi máy nén p_1 = 0,157MPa, nhiệt độ T_1 = 345^{0}K, lưu lượng khí nạp m_1 = 0,529 kgs^{-1}, áp suất khí xả trước tuabin p_2 = 0,15MPa. Theo đó, ống Venturi được tính toán và thiết kế với các thông số như trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số tính toán ống Venturi

Thông số	Giá trị
Chiều rộng cổ họng ống	54,84 mm
Góc co	24^o
Chiều dài của vòi phun ống Venturi	141,5 mm
Tổng chiều dài ống	441,5 mm
Chiều dài phần hòa trộn	50 mm
Chiều dài bộ khuyếch tán	245 mm
Góc khuyếch tán	14^o

2.3. Phương pháp EGR áp suất thấp

Phương pháp này sẽ đưa khí xả lưu hồi trở lại trước cửa hút của máy nén tuabin tăng áp (vùng áp suất thấp). Do có độ chênh áp suất giữa khí xả lưu hồi và khí ngoài trời, nên khí xả lưu động dễ dàng trở lại cửa hút. Tuy nhiên, nhằm kiểm soát lượng khí EGR một cách chủ động, bên cạnh việc điều chỉnh độ mở của van EGR, nhóm nghiên cứu bổ sung quạt tăng áp cưỡng bức (11 - Van điều chỉnh khí xả qua tháp) trên đường lưu hồi. Sơ đồ của hệ thống thử nghiệm được đề xuất như trên Hình 2. Quạt tăng áp được trang bị cho hệ thống cấp khí thải tái lưu hồi với mục đích chủ động cấp lượng khí thải cần thiết theo thiết kế vào cửa nạp động cơ mà không phụ thuộc vào áp suất của không khí nạp trước máy nén.



***Hình 3. Sơ đồ hệ thống trộn và kiểm soát tỷ lệ trộn của khí thải lưu hồi EGR áp suất thấp** [7]*

1. Động cơ diesel; 2. Tuabin khí xả; 3. Van ba ngả điều chỉnh khí xả; 4. Tháp lọc muội và xử lý SO_x; 5. Van điều chỉnh EGR; 6. Nhiệt kế; 7. Lưu lượng kế; 8. Bầu làm mát; 9. Thiết bị điều hướng khí xả; 10. Khí nạp mới; 11. Quạt tăng áp.

Việc thiết kế và chế tạo hệ thống cấp khí thải lưu hồi vào cửa hút máy nén được bắt đầu từ tính kích thước của đường ống cấp, mà thực chất chính là đường kính của đường ống này. Phương pháp tính đơn giản nhất chính là tính theo tỷ lệ giữa lưu lượng khí thải lưu hồi và tổng lưu lượng khí nạp vào động cơ:

$$EGR[\%] = \left(\frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{nap}}\right).100 \quad (5)$$

Vậy với thiết kế có thể sử dụng đến 20% lượng khí thải lưu hồi, thì theo công thức trên sẽ tính được giá trị của lượng khí thải lưu hồi cần thiết:

m_{EGR} = (20/100). 4701,79m^3/h = 940m^3/h

Lựa chọn quạt tăng áp cấp khí thải tái lưu hồi vào động cơ diesel 6LU32 với các thông số kĩ thuật như trong Bảng 3.

Bảng 3. Thông số kỹ thuật của quạt tăng áp

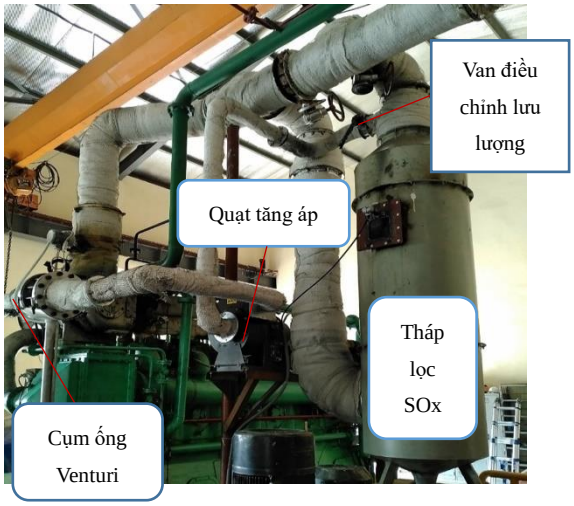
Thông số	Giá trị
Lưu lượng quạt	1500-2000m^3/h
Áp suất	Max. 1,4 bar
Nhiệt độ công tác	160^{0}C

3. Lắp đặt và thử nghiệm

Hệ thống thử nghiệm được xây dựng bao gồm tổng thể các trang thiết bị của cả 2 phương pháp và hoán đổi việc dẫn khí lưu hồi thông qua điều chỉnh các van phân phối. Tuỳ theo lượng khí thải lưu hồi ở từng chế độ thử nghiệm của động cơ, độ mở của các van điều chỉnh khí xả ra khỏi tháp lọc sẽ được thiết đặt theo. Thiết bị tạo tải cho động cơ là phanh thủy lực Omega 1500 do hãng AVL ZOLLNER GMBH - Cộng hòa Áo chế tạo. Quá trình thử nghiệm được thực hiện với 3 chế độ tải dùng cho động cơ diesel thủy theo tiêu chuẩn là 242kW (25%), 485kW (50%)

và 730kW (75%) tại vòng quay 280v/ph. Quá trình đo mức độ phát thải NOx của động cơ tại các chế độ tải và phương pháp EGR sẽ được thực hiện bằng thiết bị TESTO 350 đo tại đầu ống xả ra ngoài trời.

Sơ đồ kết nối hệ thống thử nghiệm thực tế như trên Hình 4.



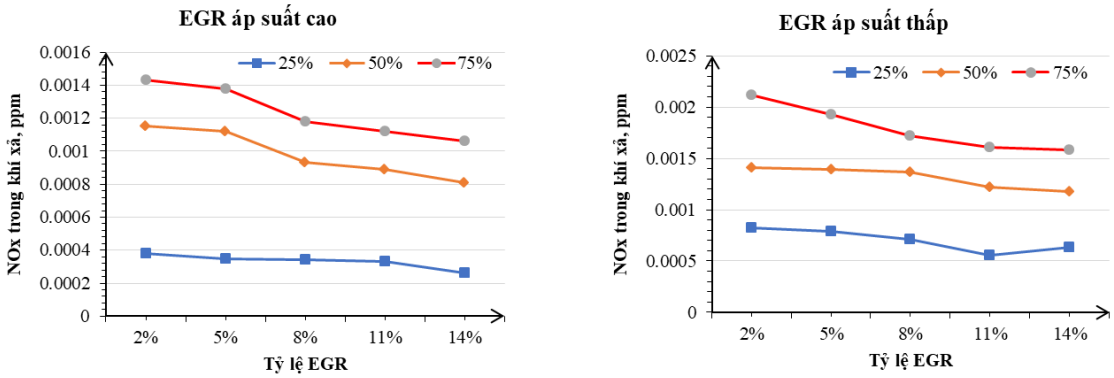
Hình 4. Sơ đồ lắp đặt thử nghiệm hệ thống EGR

4. Kết quả thử nghiệm và đánh giá

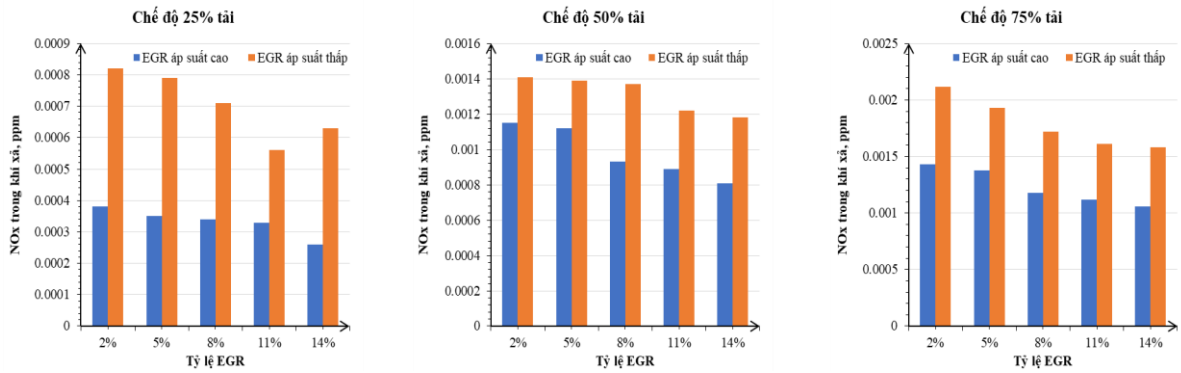
Kết quả thử nghiệm đối với từng giải pháp được tổng hợp như trên Hình 5 và Hình 6.

- Đánh giá về hiệu quả giảm phát thải NO_x khi sử dụng giải pháp hồi lưu khí xả EGR:

Đồ thị Hình 5 cho thấy, với cả hai phương pháp EGR, có thể thấy tác động tích cực của các phương pháp EGR trong việc cải thiện hiệu quả phát thải NO_x, đặc biệt là ở điều kiện tải cao. Nồng độ phát thải NO_x ở chế độ 75% tải cao gấp 1,5-2,5 lần so với chế độ tải thấp hơn. Điều này có thể lý giải khi ở các chế độ tải thấp, do tốc độ hình thành NO_x chậm hơn nhiều so với các chế độ tải cao, nên việc xử lý NO_x trong các chế độ này không rõ rệt. Tuy nhiên, có thể thấy rõ xu hướng tăng hiệu quả xử lý NO_x trong cả hai trường hợp khi tăng dần tỷ lệ khí xả hồi lưu. Điển hình là, ở điều kiện tải 75%, khi tỷ lệ EGR thay đổi từ 2 đến 12%, NO_x giảm từ $1,43 \times 10^{-3}$ xuống $1,06 \times 10^{-3}$, tổng giảm 22% đối với phương pháp EGR áp suất cao và 24% đối với phương pháp EGR áp suất thấp. Đó chính là do ở chế độ này, một lượng lớn khí trơ trong khí thải gây cản trở quá trình đốt cháy và nhiệt độ trong xi lanh giảm. Vì tốc độ tạo ra NO thấp hơn tốc độ phản ứng đốt cháy, chỉ một lượng nhỏ NO được tạo ra ở rìa ngoài của ngọn lửa. Với sự gia tăng tốc độ động cơ diesel, thời gian nhiệt độ cao được rút ngắn và NO không thể đạt đến hàm lượng cân bằng. Do đó, việc tạo ra NO_x giảm cùng với sự gia tăng khí thải lưu hồi.



Hình 5. Phát thải NO_x khi sử dụng các phương pháp EGR



Hình 6. Nồng độ phát thải NO_x theo chế độ tải động cơ

- Đánh giá hiệu quả xử lý NO_x của 2 phương pháp EGR thử nghiệm:

Nhìn chung, các phương pháp đều có các tác động như nhau, nhưng thấy rõ phương pháp EGR áp suất thấp hiệu quả cao hơn khoảng 20-30%, khi lượng khí thải lưu hồi chủ động chiếm thể tích của khí nạp mới, làm tăng hệ số khí sót. Các kết quả cho thấy, sự thay đổi các giá trị phát thải theo tỷ lệ EGR ở các chế độ tải là rất khác nhau. Trong phạm vi tỷ lệ EGR dưới 10%, ở chế độ 25% tải, mức độ giảm phát thải NO_x của phương pháp EGR áp suất cao không có sự thay đổi khi tăng tỷ lệ khí EGR. Đối với trường hợp EGR áp suất thấp, có xảy ra cả trường hợp tăng NO_x khi tiếp tục tăng EGR lớn hơn 11%. Lý do chính là khi động cơ diesel ở tốc độ thấp, lượng khí thải EGR sẽ làm giảm nồng độ oxy cấp vào trong xi lanh, điều này cũng sẽ làm tăng nhiệt độ trong xi lanh. Do đó, dẫn đến tác động tiêu cực của EGR đối với phát thải NO_x.

5. Kết luận

Quá trình thử nghiệm đối sánh hiệu quả xử lý NO_x cho động cơ diesel của các phương pháp EGR, rút ra đánh giá chung như sau:

- Cả hai phương pháp đều cho hiệu quả giảm NO_x trong phát thải khí xả động cơ diesel rất tốt, dễ dàng lắp đặt và triển khai đối với các động cơ diesel đang khai thác.

- Phương pháp cấp khí EGR áp suất cao bằng ống Venturi có thể tạo hỗn hợp không khí - khí thải với độ đồng nhất cao, chất lượng sạch, nhưng ống Venturi phải được thiết kế riêng cho từng động cơ sử dụng.

- Phương pháp cấp khí thải lưu hồi áp suất thấp cấp chủ động khí thải EGR bằng quạt tăng áp, thích hợp đối với các động cơ công suất lớn cần một lượng khí thải tái lưu hồi lớn, hệ thống đơn giản, dễ chế tạo, bảo quản và kiểm soát được lượng khí thải tái lưu hồi một cách chính xác. Tuy vậy, phương pháp này dễ làm bẩn cửa hút và cánh máy nén, giảm hiệu suất của động cơ.

Trong điều kiện ở Việt Nam, để đơn giản hóa và tăng tính khả thi áp dụng giải pháp EGR cho các động cơ diesel đang khai thác, đặc biệt là các động cơ diesel cỡ vừa và lớn lắp trên tàu biển là đối tượng được ưu tiên và chịu sự kiểm soát nghiêm ngặt của Công ước MARPOL phụ lục VI, phương pháp EGR áp suất thấp được khuyến cáo sử dụng. Hiệu quả sử dụng của phương pháp được nâng lên khi kết hợp với các bộ làm mát khí EGR và tỷ lệ EGR dưới 15%. Hệ thống cũng dễ dàng tích hợp với các phương án xử lý các thành phần phát thải SO_x, muội,... để đáp ứng yêu cầu của Công ước.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] *IMO regulations 13.8 and 5.3.2 respectively, NO_x Technical Code 2008.*

[2] Jafarmadar S, Nemati P., *Analysis of exhaust gas recirculation (EGR) effects on exergy terms in an engine operating with diesel oil and hydrogen*, Energy 126, pp.746-755. (10.1016/j.energy.2017.03.030), 2017.

[3] An XH, Liu BL, Zhang FJ, Fu G., *Simulation of the effect of intake charge oxygen concentration based EGR on diesel engine performance*, Trans. CSICE 31, pp.115-119, 2013.

[4] Park Y, Bae C. *Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine*, Appl. Energy 133, pp.308-316. (10.1016/j.apenergy 2014.08.003), 2014.

[5] Shuai Y, Xiuyuan L, Qijia Y., *EGR rates optimization rule and experimental study about influence of EGR rates on diesel engine*, Trans. Chin. Soc. Agric. Mach. 37, pp.30-33, 2006.

[6] Nguyễn Lê Duy Khải, Nguyễn Minh Trí, *Ảnh hưởng của hồi lưu khí thải đến công suất và khí thải động cơ Diesel Vikyno -RV125-2*, Science and technology Development, Vol.18, No.K7-2015.

[7] PGS. TSKH. Đặng Văn Uy và các cộng sự, *Đề tài NCKH cấp Bộ "Xây dựng giải pháp xử lý khí độc hại trong khí thải động cơ diesel thủy đáp ứng yêu cầu của công ước quốc tế MARPOL 73/78"*, 2017-2019.

Ngày nhận bài: 24/04/2020
Ngày nhận bản sửa: 18/05/2020
Ngày duyệt đăng: 27/05/2020