

THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA TỶ LỆ TUẦN HOÀN KHÍ THẢI (%EGR) ĐẾN CÁC CHỈ TIÊU KINH TẾ, NĂNG LƯỢNG, MÔI TRƯỜNG CỦA ĐỘNG CƠ DIESEL HYUNDAI D4CB 2.5 TCI-A

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE IMPACT OF EXHAUST GAS RECIRCULATION (EGR) RATE ON ECONOMIC, ENERGY, AND ENVIRONMENTAL INDICATORS OF THE HYUNDAI D4CB 2.5 TCI-A DIESEL ENGINE

Trần Trọng Tuấn^{1,*}, Nguyễn Hoàng Vũ², Vũ Ngọc Khiêm¹

¹Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

²Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

*Email: tuantt@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ khí thải tuần hoàn (%EGR) đến các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng, môi trường của động cơ diesel Hyundai D4CB 2.5 TCI-A (4 kỳ, 4 xi lanh, phun nhiên liệu kiểu CommonRail, tăng áp tua bin khí thải VGT có làm mát khí nạp, sử dụng hệ thống EGR áp suất cao). Thử nghiệm được thực hiện trên hệ thống thiết bị đồng bộ và hiện đại của hãng AVL, kết hợp với bộ điều khiển ECU mở của hãng Woodward (MotoHawk 0565-128). Các chỉ tiêu được đánh giá bao gồm: suất tiêu hao nhiên liệu, mô men xoắn và hàm lượng các chất ô nhiễm chính trong khí thải (NO_x, CO, HC, PM). Kết quả cho thấy khi tăng % EGR đến ngưỡng tối ưu (khoảng 20÷25%), lượng NO_x giảm đáng kể (lên đến 56,4%), tuy nhiên kèm theo là sự gia tăng của các chất ô nhiễm khác (CO, HC và PM); suất tiêu hao nhiên liệu chỉ bị ảnh hưởng nhẹ (giảm khoảng 3,2%). Kết quả nghiên cứu cung cấp đánh giá định lượng, với độ tin cậy cao về ảnh hưởng của %EGR, đồng thời là cơ sở để điều khiển %EGR phù hợp khi thay đổi quy luật cung cấp nhiên liệu (với các chiến lược phun khác nhau), loại nhiên liệu sử dụng (biodiesel B10, B20).

Từ khóa: Tuần hoàn khí thải (EGR); Động cơ diesel Hyundai D4CB; Suất tiêu hao nhiên liệu; Phát thải NO_x, CO, HC, PM.

ABSTRACT

This paper presents experimental results evaluating the impact of exhaust gas recirculation (EGR) rate on the economic, energy, and environmental performance indicators of the Hyundai D4CB 2.5 TCI-A diesel engine (four-stroke, four-cylinder, Common Rail fuel injection, variable geometry turbocharger with intercooler, equipped with a high-pressure EGR system). The experiments were conducted using a modern, fully integrated test system from AVL, combined with an open ECU from Woodward (MotoHawk 0565-128). The evaluated parameters include brake specific fuel consumption, engine torque, and the concentrations of major exhaust pollutants (NO_x, CO, HC, PM). The results show that when the % EGR is increased to the optimal level (approximately 20÷25%), the amount of NO_x is significantly reduced (up to 56.4%), but it is accompanied by an increase in other pollutants (CO, HC and PM); the fuel consumption is only slightly affected (decreased by about 3.2%). The research results provide a quantitative evaluation, with high reliability, about the influence of %EGR, and at the same time are the basis for controlling %EGR appropriately when changing the fuel supply law (with different injection strategies), type of fuel used (biodiesel B10, B20).

CO, HC, and PM). The results show that increasing the EGR rate to an optimal range (approximately 20÷25%) leads to a significant reduction in NOx emissions (up to 56.4%), but is accompanied by increases in other pollutants (CO, HC, and PM). Fuel consumption is only slightly affected, with a reduction of about 3.2%. The study provides a quantitative and highly reliable assessment of the influence of EGR rate and serves as a basis for appropriately controlling EGR under varying fuel injection strategies and fuel types, such as biodiesel blends (B10, B20).

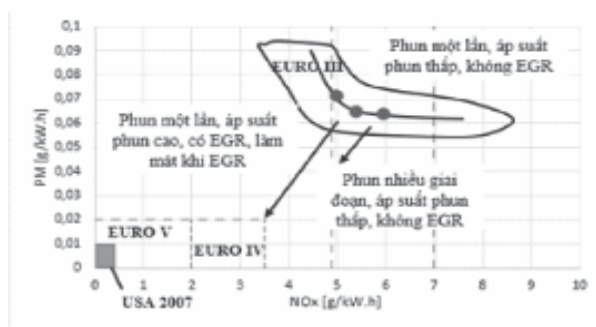
Keywords: Exhaust gas recirculation (EGR); Hyundai D4CB diesel engine; Brake specific fuel consumption (BSFC); NOx, CO, HC, PM emissions.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tuần hoàn khí thải (EGR) là giải pháp đưa một phần khí thải quay trở lại đường nạp của động cơ nhằm làm giảm nồng độ oxy của khối khí nạp mới, từ đó hạ thấp nhiệt độ và áp suất cực đại trong buồng cháy, giúp giảm đáng kể lượng khí NOx thải ra, [1], [2].

Hệ thống EGR cần được trang bị trên động cơ để đáp ứng các tiêu chuẩn ô nhiễm từ Euro 3 trở đi, [4]. Tiêu chuẩn Euro 6 được áp dụng từ năm 2015 với giới hạn nghiêm ngặt về mức phát thải NOx, PM, CO và HC, đặc biệt là xe lắp động cơ diesel. So với Euro 5, Euro 6 giảm đến 67% mức phát NOx cho phép đối với Phương tiện cơ giới đường bộ (PTCGĐB) hạng nhẹ và 37% đối với động cơ diesel trên PTCGĐB nặng, [3]. Để đáp ứng Euro 6, các nhà sản xuất ô tô phải sử dụng đồng thời các công nghệ như bộ lọc chất thải dạng hạt (DPF), hệ thống khử NOx kiểu xúc tác chọn lọc (SCR), cải tiến quy luật cung cấp nhiên liệu và làm mát khí EGR, [3]. Năm 2016, Hội đồng quốc tế về Giao thông sạch (ICCT) đưa ra bản tóm tắt kỹ thuật về tiêu chuẩn khí thải Euro 6, [3] trong đó nhấn mạnh về vai trò của EGR trong việc kiểm soát NOx. Việc sử dụng EGR kết hợp với bộ xử lý khí thải kiểu SCR sẽ giúp động cơ đạt được ngưỡng phát thải NOx của Euro 6. Vai trò của EGR trong việc đáp ứng các tiêu chuẩn Euro được trình bày trên Hình 1, [4], cho thấy, để động cơ diesel có thể đạt được tiêu chuẩn

khí thải từ Euro 3 trở lên thì không thể thiếu hệ thống EGR.



Hình 1. Vai trò của EGR trong việc đáp ứng các tiêu chuẩn khí thải [4].

Mặc dù EGR giúp giảm NOx hiệu quả, nhưng cũng ảnh hưởng mạnh đến suất tiêu hao nhiên liệu động cơ. Khi tăng tỷ lệ khí EGR (%EGR), sẽ làm tăng phát thải CO, HC và PM, [1]. Do đó, việc điều khiển % EGR tối ưu là rất quan trọng để đảm bảo sự cân bằng, thỏa hiệp giữa mức phát thải NOx, các chất ô nhiễm khác và suất tiêu hao nhiên liệu. Động cơ diesel hiện đại sử dụng hệ thống EGR điều khiển điện tử để kiểm soát chính xác lượng khí EGR nhằm điều chỉnh kịp %EGR phù hợp với chế độ vận hành, [2]. Làm mát khí EGR trước khi đưa vào đường nạp là một biện pháp hiệu quả nhằm đạt được các mục tiêu, [2].

Hountalas, [5], đã nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ và %EGR đến chỉ tiêu kinh tế và mức phát thải của động cơ diesel phun nhiên liệu trực tiếp lắp trên xe tải hạng nặng

thông qua thực nghiệm trên bộ thử với chế độ làm việc là 100% tải, tại $n = 1130$ vg/ph và $n = 1420$ vg/ph, nhiệt độ khí EGR thay đổi từ $90 \div 240$ °C. Kết quả cho thấy, nếu nhiệt độ khí EGR cao sẽ ảnh hưởng xấu đến hiệu suất nhiệt, làm tăng phát thải PM. Xuexuan Nie và cộng sự đã thử nghiệm trên động cơ diesel 4 kỳ 4 xi lanh, tăng áp tua bin khí thải có làm mát khí tăng áp, dùng hệ thống phun nhiên liệu kiểu CommonRail, sử dụng các bộ xử lý khí thải DOC, DPF và SCR, hệ thống EGR kiểu áp suất cao [1]; cho thấy, sự kết hợp tốt giữa %EGR và SCR có thể đưa mức phát thải NOx về bằng 0 khi động cơ làm việc ở $n = 1600$ vg/ph, tại 100% tải.

Việc nghiên cứu về EGR trên động cơ diesel phun nhiên liệu điều khiển điện tử đã được nhóm tác giả bài báo thực hiện từ năm 2014, với một số công trình đã công bố, [6], [7], [8]. Trong công trình [6], đã sử dụng phần mềm AVL Boost để đánh giá ảnh hưởng của %EGR đến chỉ tiêu kỹ thuật và môi trường của động cơ diesel một xi lanh dùng hệ thống phun nhiên liệu kiểu cơ khí, cho thấy, với %EGR = $15 \div 20\%$ ở $n = 2400$ vg/ph và $n = 2600$ vg/ph, tại 100% tải, có thể giảm từ $80 \div 90\%$ phát thải NOx nhưng phát thải PM tăng khoảng 4÷6 lần so với khi không sử dụng EGR, [6]. Trong công trình [7], đã nghiên cứu thực nghiệm xác định các thuộc tính hóa - lý của dòng khí EGR (nhiệt độ, áp suất, hơi nước, CO₂) khi động cơ diesel D4CB 2.5 TCI-A sử dụng các loại nhiên liệu khác nhau (diesel B0 và biodiesel B10, B20) ở $n = 1750$ vg/ph. Trong công trình [8], đã nghiên cứu thực nghiệm nhằm xác định đặc điểm điều khiển, vận hành hệ thống EGR (độ rộng xung đóng/mở van EGR, %EGR, hàm lượng oxy...) của động cơ D4CB 2.5 TCI-A khi làm việc ở các chế độ tải và tốc độ khác nhau, sử dụng ECU điều khiển nguyên thủy của động cơ; kết quả cho thấy, ở tốc độ $n = 2000$ vg/ph thì %EGR đạt giá trị lớn nhất, vào khoảng 20%.

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của %EGR đến các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng và môi trường của động cơ diesel D4CB 2.5 TCI-A lắp trên xe Hyundai Starex, trên hệ thống thiết bị thử nghiệm hiện đại, đồng bộ của Hãng AVL, [9], kết hợp với ECU mở của hãng Woodward (MotoHawk 0565-128), [10].

2. ĐỐI TƯỢNG, TRANG THIẾT BỊ NGHIÊN CỨU; LOẠI NHIÊN LIỆU SỬ DỤNG

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Động cơ diesel D4CB 2.5 TCI-A (lắp trên xe Hyundai Starex) là động cơ 4 kỳ, 4 xi lanh, dùng hệ thống phun nhiên liệu kiểu CommonRail (CR), tăng áp tua bin khí thải VGT có làm mát khí tăng áp, dùng hệ thống EGR kiểu áp suất cao có làm mát khí EGR với van EGR điện tử được điều khiển trực tiếp từ ECU, với các thông số được trình bày trong Bảng 1.

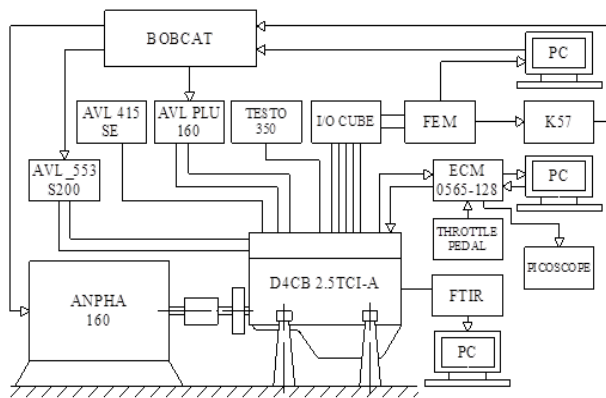
Bảng 1. Thông số kỹ thuật chính của động cơ D4CB 2.5 TCI-A, [7].

STT	Thông số	Giá trị
1	Kiểu động cơ	4 kỳ, 4 xi lanh, 1 hàng
2	Đường kính xi lanh (D) x Hành trình pít tông S (mm)	91 x 96
3	Tỷ số nén	17,6
4	Hệ thống phun nhiên liệu kiểu CR (CP1-H)	Áp suất phun lớn nhất là 1600 bar; vòi phun CR kiểu điện tử
5	Hệ thống tăng áp	Tua bin khí xả (VGT), có làm mát khí tăng áp
6	Hệ thống EGR	Áp suất cao, có làm mát khí EGR
7	Tiêu chuẩn khí thải	Euro 3



2.2. Trang thiết bị thử nghiệm

Quá trình nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành trên bộ thử động cơ thuộc Trung tâm Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, sử dụng hệ thống thiết bị thử nghiệm hiện đại, đồng bộ của Hãng AVL với sơ đồ bố trí các trang thiết bị chính được trình bày trên Hình 2.



Hình 2. Bố trí trang thiết bị thử nghiệm, [8],[9], [11].

Alpha 160 - Phanh điện; AVL-553S-200 - Hệ thống kiểm soát nhiệt độ nước làm mát; AVL PLU 160 - Thiết bị đo lượng nhiên liệu tiêu thụ; Bobcat - Hệ thống tự động hóa thiết bị đo và bộ thử; I/O Cube - Hộp nối cáp tín hiệu từ các cảm biến; FEM - Bộ chuyển đổi tín hiệu; K57 - Bảng điều khiển trung tâm; ECM 556-128 - ECU mở Woodward/Motohawk dùng để điều khiển động cơ D4CB 2.5 TCI vận hành theo yêu cầu nghiên cứu; Throttle pedal - Bàn đạp ga của D4CB 2.5 TCI; FTIR - Hệ thống thiết bị phân tích khí thải của AVL; AVL 415SE - Thiết bị đo PM; PC - Máy tính; Testo 350 - Thiết bị đo lưu lượng khí EGR; Picoscope - Thiết bị đo đặc tính tín hiệu điều khiển từ ECU.

2.3. Chế độ vận hành, loại nhiên liệu sử dụng

Quá trình thử nghiệm được tiến hành theo trình tự như sau:

(1) Đo các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng và môi trường của động cơ D4CB 2.5 TCI-A

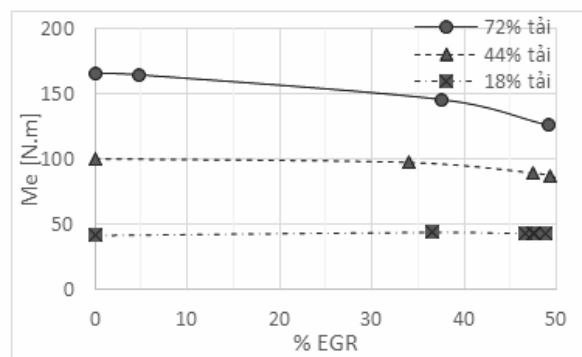
khi vận hành theo đặc tính ngoài, sử dụng ECU mở MotoHawk ECM 556-128 [10], là sản phẩm của đề tài NCKH & PTCN cấp Quốc gia, [11]; ECM 556-128 cho phép điều khiển động cơ D4CB 2.5 TCI-A theo chế độ thử cần thiết lập (lượng phun, áp suất phun nhiên liệu; thời gian mở van EGR...);

(2) Đánh giá ảnh hưởng của %EGR đến các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng và môi trường của động cơ tại các chế độ tải khác nhau, ở $n = 2000$ vg/ph (vùng tốc độ thấp của động cơ, có %EGR là lớn nhất, [8]); ECM 556-128 sẽ điều khiển độ mở van EGR theo yêu cầu nghiên cứu. %EGR được xác định thông qua kết quả đo lưu lượng dòng khí EGR và lưu lượng của dòng khí nạp.

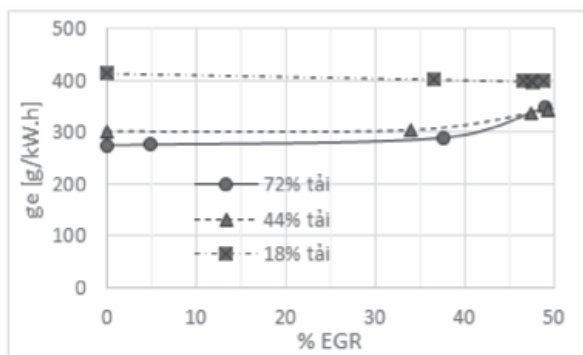
3. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM VÀ BÀN LUẬN

3.1. Mô men, suất tiêu thụ nhiên liệu

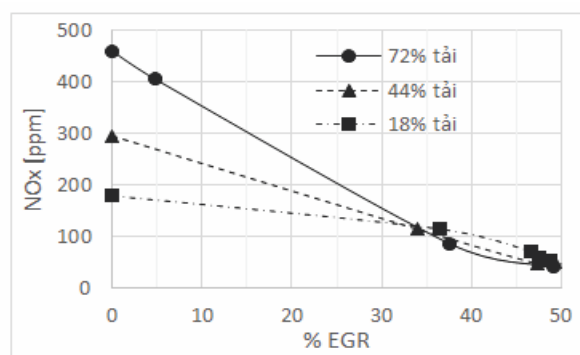
Ảnh hưởng của %EGR đến mô men (M_e , N.m), suất tiêu hao nhiên liệu (g_e , g/kW.h) khi vận hành tại các chế độ tải khác nhau, tại $n = 2000$ vg/ph được trình bày trên Hình 3 và Hình 4. Ta thấy:



Hình 3. Ảnh hưởng của %EGR đến M_e



Hình 4. Ảnh hưởng của %EGR đến g_e



Hình 5. Ảnh hưởng của %EGR đến phát thải NOx

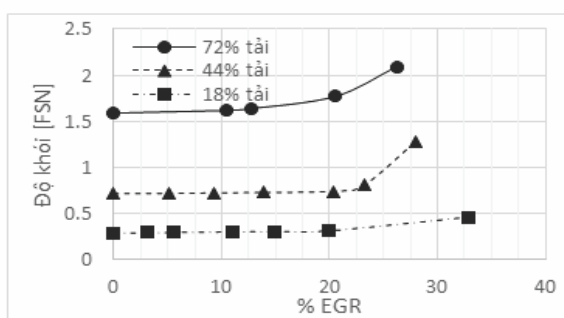
- Tại chế độ tải nhỏ và tải trung bình, khi %EGR nhỏ hơn 40% thì g_e tăng không quá nhiều (dưới 3%); M_e ít thay đổi khi tăng %EGR (nhất là tại chế độ tải nhỏ). Điều này có thể giải thích là do ở chế độ tải thấp và trung bình, hệ số dư lượng không khí và hàm lượng oxy trong hỗn hợp khí nạp lớn nên có thể mở rộng được %EGR mà không làm ảnh hưởng nhiều đến g_e ;

- Tại chế độ tải cao, trong dải %EGR nhỏ hơn 35% thì không có sự thay đổi nhiều về g_e khi tăng %EGR. Tuy nhiên, nếu %EGR vượt quá 35% sẽ có sự gia tăng mạnh về g_e .

Như vậy, nếu xét về chỉ tiêu kinh tế thì tại $n = 2000$ vg/ph, %EGR hợp lý nên dưới 35%.

3.2. Phát thải các chất ô nhiễm

Ảnh hưởng của %EGR đến phát thải NOx (ppm) và độ khói (FSN), khi vận hành tại các chế độ tải khác nhau, tại $n = 2000$ vg/ph được trình bày trên Hình 5 và Hình 6. Ta thấy:



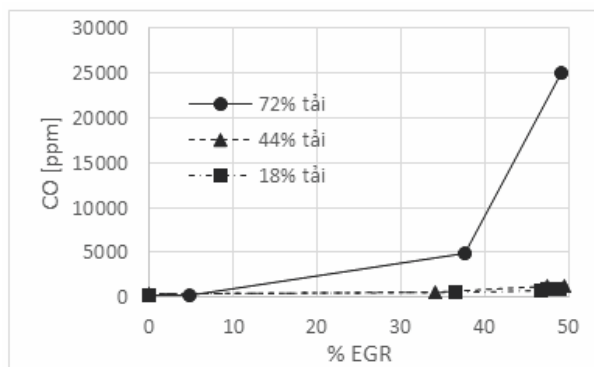
Hình 6. Ảnh hưởng của %EGR đến độ khói

- Khi tăng %EGR, hàm lượng NOx giảm mạnh (mức giảm lớn nhất từ 39,2 đến 89,15% tùy thuộc vào chế độ tải và tốc độ), nguyên nhân là do khi tăng %EGR làm giảm nồng độ oxy, giảm nhiệt độ cực đại trong buồng cháy, [1], [2], [7];

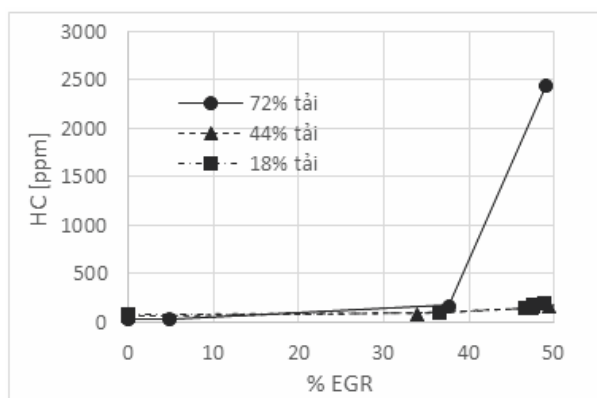
- Tại chế độ tải thấp và trung bình, khi tăng %EGR thì độ khói tăng không nhiều do ở những chế độ này nồng độ oxy trong hỗn hợp khí nạp là lớn;

- Tại một chế độ vận hành nhất định sẽ tồn tại một giá trị %EGR giới hạn khi xem xét về độ khói (khi %EGR vượt quá giá trị giới hạn này sẽ có sự tăng mạnh về độ khói). Giá trị %EGR giới hạn này ở chế độ tải thấp và trung bình có thể lên đến 25÷35%, ở các chế độ tải cao có xu hướng giảm xuống còn khoảng từ 20÷25%.

Ảnh hưởng của %EGR đến phát thải CO (ppm) và HC (ppm) khi vận hành tại các chế độ tải khác nhau ở $n = 2000$ vg/ph được trình bày trên Hình 7 và Hình 8. Ta thấy:



Hình 7. Ảnh hưởng của %EGR đến phát thải CO



Hình 8. Ảnh hưởng của %EGR đến phát thải HC

- Mức phát thải CO và HC khi không có EGR (%EGR = 0) là tương đối thấp (khoảng 300 ppm đối với CO và khoảng 75 ppm đối với HC);

- Ở chế độ tải thấp và tải trung bình, mức phát thải CO và HC tăng không nhiều khi %EGR dưới 20%. Tuy nhiên, nếu %EGR vượt quá 20% thì phát thải CO và HC có xu hướng tăng rất mạnh, cho thấy chất lượng quá trình cháy có xu hướng giảm nhanh khi tăng %EGR ở chế độ tải cao.

4. KẾT LUẬN

Đã đánh giá được chi tiết, lượng hóa ảnh hưởng của %EGR đến các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng và môi trường của động cơ diesel D4CB 2.5 TCI-A ở các chế độ tải điển hình, tại $n = 2000$ vg/ph với các trang thiết bị nghiên cứu đồng bộ, hiện đại.

Kết quả thực nghiệm cho thấy, hoàn toàn có thể lựa chọn được một khoảng giá trị của %EGR nhằm đảm bảo sự thỏa hiệp, cân bằng giữa các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng và môi trường của động cơ. Ngoài ra, các giá trị %EGR giới hạn khi xem xét theo mức phát thải PM, CO, HC có xu hướng nhỏ hơn giá trị %EGR giới hạn khi xem xét theo suất tiêu hao nhiên liệu và mô men xoắn của động cơ.

Ngoài việc đánh giá lượng hóa ảnh hưởng của %EGR, kết quả nghiên cứu còn là cơ sở để xây dựng MAP điều khiển %EGR phù hợp cho động cơ D4CB 2.5 TCI-A (với ECM MotoHawk 0565-128) trên toàn vùng làm việc, khi có sự cải tiến về quy luật cung cấp nhiên liệu (phun nhiều giai đoạn với các chiến lược phun khác nhau) và thay đổi loại nhiên liệu sử dụng (B10, B20), [11]. ♦

Ngày nhận bài: 02/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Xuexuan Nie et al, "Experimental Study on NOx Reduction of Diesel Engine by EGR Coupled with SCR". ACS Omega 2024, 9, 8308-8319. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09052>
- [2]. Xinmei Chen, "Research on Electronic Controlled EGR System of Diesel Engine". 6th International Conference on Machinery, Materials, Environment, Biotechnology and Computer (MMEBC 2016).

- [3]. International Council on Clean Transportation, “*Briefing: A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards*”, June 2016.
- [4]. Raffael Schubiger, Andrea Bertola, “*Influence of EGR on Combustion and Exhaust Emissions of Heavy Duty DI-Diesel Engines Equipped with CommonRail Injection Systems*”. SAE 2001-01-3497.
- [5]. Hountalas, “*Effect of exhaust gas recirculation (EGR) temperature for various EGR rate on heavy duty DI diesel engine performance and emission*”. Energy 33 (2008) 272-283.
- [6]. Trần Trọng Tuấn, Vũ Ngọc Khiêm, Nguyễn Hoàng Vũ, “*Đánh giá ảnh hưởng của việc tuần hoàn khí thải (EGR) đến các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng, môi trường của động cơ diesel*”. Tạp chí Giao thông vận tải (ISSN 0866-7012), 4/2014, tr.35-37.
- [7]. Trần Trọng Tuấn, Khổng Văn Nguyên, Vũ Ngọc Khiêm, Nguyễn Hoàng Vũ, “*Nghiên cứu thực nghiệm xác định thuộc tính của dòng khí thải tuần hoàn (EGR) trên động cơ diesel khi sử dụng nhiên liệu biodiesel B10, B20*”. Tạp chí Giao thông vận tải (ISSN 2354-0818), Tháng 4/2018, tr.103-107.
- [8]. Trần Trọng Tuấn, Khổng Văn Nguyên, Vũ Ngọc Khiêm, Nguyễn Hoàng Vũ, “*Nghiên cứu đặc điểm làm việc của hệ thống EGR trên động cơ Hyundai 2.5 TCI-A bằng thực nghiệm*”. Kỷ yếu Hội nghị KH&CN Giao thông vận tải lần thứ IV (ISBN 978-604-76-1578-0), ĐH Giao thông vận tải Tp. Hồ Chí Minh, tháng 5/2018, tr.376-383.
- [9]. AVL List GmbH (2015), Technical Documents & Operating Manual for UTT Project.
- [10]. <https://mcs.woodward.com/support/wiki/index.php?title=MotoHawk>
- [11]. Nguyễn Hoàng Vũ, Báo cáo tổng kết Đề tài NCKH & PTCN cấp Quốc gia “*Nghiên cứu, chế tạo thử nghiệm ECU phù hợp cho việc sử dụng nhiên liệu diesel sinh học biodiesel với các mức pha trộn khác nhau*”, mã số ĐT.08.14/NLSH (thuộc Đề án Phát triển Nhiên liệu sinh học đến năm 2015, tầm nhìn đến năm 2025).