

NGHIÊN CỨU GIẢM PHÁT THẢI NO_x BẰNG PHƯƠNG PHÁP LUÂN HỐI KHÍ THẢI (EGR) VÀ SỬ DỤNG KHÍ GIÀU NI TƠ (NEA)

NO_x REDUCTION BY EXHAUST GAS RECIRCULATION (EGR) AND NITROGEN ENRICHED AIR (NEA)

Bùi Văn Chính,
Nguyễn Đức Khánh

Tóm tắt

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu giảm phát thải NO_x trên động cơ diesel bằng hai phương pháp luân hồi khí thải (EGR) và sử dụng hỗn hợp khí giàu ni tơ (NEA). Luân hồi khí thải được thực hiện bằng cách trích một phần khí thải sau khi ra khỏi động cơ đưa trở lại đường nạp, phía trước máy nén nhờ đó chênh áp. Tỷ lệ luân hồi được điều chỉnh bằng cách thay đổi độ mở của van EGR. Khí giàu ni tơ (NEA-Nitrogen Enriched Air) được cung cấp vào động cơ bằng cách bố trí một vòi phun khí ni tơ trên đường nạp, phía sau kết làm mát khí tăng áp trước khi vào động cơ. Lưu lượng khí ni tơ phun vào đường nạp được điều chỉnh để có thể đạt được tỷ lệ khối lượng của ni tơ trong không khí nạp lớn hơn 77 %. Kết quả nghiên cứu cho thấy, sử dụng khí giàu ni tơ có khả năng giảm thiểu phát thải độc hại NO_x , tương đương với phương pháp EGR trong khi đó công suất của động cơ được cải thiện với tỷ lệ NEA phù hợp, phát thải CO giảm và phát thải dạng hạt thay đổi không đáng kể.

Từ khóa: phát thải động cơ diesel, giảm thiểu NO_x , luân hồi khí thải EGR, NEA.

Abstract

This paper presents the study results of NO_x reduction on diesel engine by mean of providing nitrogen enriched air (NEA) to engine and using exhaust gas recirculation (EGR) method. EGR was conducted by introducing an amount of exhaust gas from the engine into intake manifold before the compressor thanks to the pressure difference between exhaust gas and intake air. The EGR ratio was adjusted by EGR valve, which placed on recirculation pipe. NEA provided to the engine by a nitrogen injector which is placed on intake manifold after the intercooler. The mass flow of nitrogen injected to intake air was controlled to achieve proportion of nitrogen in intake air greater than 77% by mass. The results show that NEA could decrease NO_x emission as well as EGR method; CO emission was decreased and Soot emission was constant, while as the brake power of the ICE improved slightly.

Keywords: diesel emission, NO_x reduction, EGR, NEA.

ThS. Bùi Văn Chính, Khoa Công nghệ Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội
KS. Nguyễn Đức Khánh
Viện Cơ khí Động lực, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội
Email: khanh.nguyenduc@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 13/08/2013
Ngày chấp nhận đăng: 07/10/2013

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Phát thải ô xit ni tơ (NO_x) là một trong những thành phần phát thải độc hại chính của động cơ diesel, đặc biệt trên động cơ diesel tăng áp bởi nó là

kết quả của sự dư thừa hàm lượng ôxy và nhiệt độ quá trình cháy cao. Đã có nhiều công nghệ giảm NO_x được nghiên cứu và phát triển. Luân hồi khí thải (EGR – Exhaust Gas Recirculation)

được biết đến là một biện pháp hữu hiệu để giảm sự hình thành NO_x trên động cơ diesel. Về nguyên tắc, khí thải sau khi ra khỏi động cơ được trích một phần trở lại đường nạp và hòa trộn với khí nạp trước khi vào động cơ. Khí luân hồi bao gồm chủ yếu ô xit các bon (CO_2), ni tơ (N_2) và hơi nước sẽ được đưa trở lại xylanh để làm loãng hỗn hợp cháy và giảm nồng độ ôxy trong buồng cháy. Ngoài ra, nhiệt dung riêng của khí luân hồi lớn hơn rất nhiều so với không khí nạp nên khí luân hồi làm tăng nhiệt dung riêng của khí nạp, do đó sẽ làm giảm độ tăng nhiệt độ trong động cơ với cùng lượng nhiệt giải phóng của quá trình cháy trong buồng cháy. Hình 1 thể hiện sơ đồ hệ thống luân hồi khí thải.



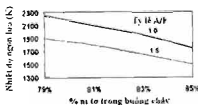
Hình 1. Sơ đồ hệ thống luân hồi khí thải EGR

Luân hồi khí thải một biện pháp kinh tế giảm thiểu phát thải NO_x , ít nhiên có nhiều hạn chế như làm tăng hàm lượng phát thải dạng hạt (PM), khói đen, đặc biệt là ở chế độ tải lớn^[2] làm giảm chất lượng dầu bôi trơn^[4], nhiều khả năng gây mài mòn piston xylanh, giảm độ bền của động cơ^[5,7].

Ngoài biện pháp luân hồi khí thải còn có một số giải pháp đã được nghi

ưu không những giảm thiểu NO_x mà còn khắc phục được những nhược điểm còn tồn tại của phương pháp này. Các nghiên cứu cho thấy hàm lượng oxy trong khí nạp là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất tới hình thành phát thải NO_x trong động cơ^[8-11].

Ảnh hưởng của hàm lượng oxy trong khí nạp (nhiệt độ đoạn nhiệt của ngọn lửa là được thử nghiệm bởi Olikara và Jorman^[12]). Hình 2 thể hiện quan hệ nhiệt độ đoạn nhiệt với hàm lượng nitơ trong buồng cháy. Đồ thị cho thấy nhiệt độ giảm khi hàm lượng nitơ trong khí nạp tăng lên ở cùng một tỷ lệ A/F. Khi hàm lượng oxy giảm từ 21% xuống 17% về thể tích hay hàm lượng nitơ tăng từ 79% đến 83% thì nhiệt độ lý thuyết của ngọn lửa giảm khoảng 50°K. Nghiên cứu giảm lượng oxy hay tăng hàm lượng nitơ trong khí nạp để giảm nhiệt độ quá trình cháy sẽ làm giảm lượng NO_x hình thành trong buồng cháy.



Hình 2. Quan hệ giữa nhiệt độ ngọn lửa và nồng độ nitơ^[12]

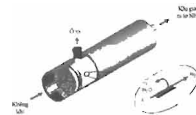
Việc cung cấp khí nạp với hàm lượng oxy thấp, hay còn gọi là khí giàu nitơ NEA (Nitrogen Enriched Air) có thể thay thế được biện pháp truyền thống EGR với nhiều hạn chế. Dưới đây là một số so sánh ưu nhược điểm của phương pháp sử dụng khí giàu nitơ NEA so với phương pháp tuần hoàn khí thải EGR (bảng 1).

Có nhiều nghiên cứu tạo khí NEA để cung cấp cho động cơ, trong đó điển hình là nghiên cứu của Nemser và cộng sự^[13]. Nguyên lý hoạt động cơ bản và kết cấu của màng tách khí được thể hiện trên hình 3. Màng tách khí dạng

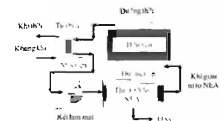
Bảng 1. So sánh hai phương pháp EGR và NEA

Cung cấp khí giàu nitơ NEA	Tuần hoàn khí thải EGR
Khí nạp sạch, không có các chất dạng hạt. Không ảnh hưởng tới tuổi thọ hay độ bền của động cơ. Nhiệt độ khí nạp thấp, tăng được lượng môi chất nạp. Hỗn hợp đồng nhất, động cơ làm việc ổn định hơn. Cần có thiết bị tách không khí đặc biệt lắp trên đường nạp, gây tổn thất về lưu lượng và áp suất.	Khí nạp bẩn hơn do các chất thải dạng hạt trong khí thải tuần hoàn. Tuổi thọ và độ bền của động cơ giảm do ảnh hưởng của axit trong khí tuần hoàn. Khí tuần hoàn có nhiệt độ cao sẽ giảm hiệu số nạp. Động cơ làm việc kém ổn định; dao động giữa các chu kỳ lớn. Cần bố trí kết làm mát khí tuần hoàn, van điều chỉnh tỷ lệ tuần hoàn và bộ lọc chất thải dạng hạt và hợp chất của lưu huỳnh.

ống lớn có thể hoạt động ở độ chênh lệch áp suất khá nhỏ và có khả năng tạo tỷ lệ khí lớn hơn các phương pháp tạo khí nitơ khác.



Hình 3. Nguyên lý làm việc của bộ tạo NEA



Hình 4. Động cơ diesel tăng áp trang bị bộ tạo NEA

Khí không khí có áp suất cao đi qua ống, sự chênh lệch áp suất bên trong và bên ngoài ống làm cho một phần oxy được ưu tiên đi qua thành ống (bề mặt bên ngoài thành ống là lớp perfluoropolymer) ra ngoài môi trường còn nitơ bị chặn lại và di chuyển dọc theo ống đến đầu ra của thiết bị. Đầu ra của thiết bị là không khí được làm giàu nitơ. Bộ tạo khí NEA có thể lắp trực tiếp trên đường nạp để cung cấp khí cho động cơ tùy theo các chế độ làm việc.

Hình 4 thể hiện sơ đồ nguyên lý động cơ diesel tăng áp bằng tua bin khí thải có trang bị thiết bị tạo khí giàu nitơ. Khí tăng áp ra khỏi máy nén sẽ được làm mát qua kết làm mát trung

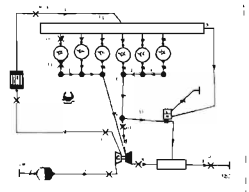
gian trước khi đi qua thiết bị tạo NEA. Áp suất của khí tăng áp sau kết làm mát quyết định đến tỷ lệ khí nitơ trước khi đi vào động cơ.

Để làm rõ hơn ưu việt của phương pháp sử dụng khí NEA nhằm giảm thiểu NO_x trên động cơ diesel tăng áp, trong nghiên cứu này, mô hình tính toán 1 chiều giảm thiểu phát thải NO_x của động cơ diesel tăng áp bằng hai phương pháp EGR và NEA được thực hiện để so sánh. Mô hình tính toán được xây dựng trên phần mềm mô phỏng 1 chiều AVL Boost. Phần mềm cho phép tính toán mô phỏng được chu trình làm việc của động cơ cũng như tính toán được các thành phần phát thải độc hại. Kết quả nghiên cứu đánh giá được ảnh hưởng của hai phương pháp tới các thông số kỹ thuật và phát thải độc hại của động cơ, nhất là phát thải NO_x và Soot.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Xây dựng mô hình mô phỏng

Đối tượng nghiên cứu là động cơ



Hình 5. Mô hình 1 chiều động cơ D1146Ti

diesel D1146Ti, tăng áp bằng tua bin máy nén, lắp trên xe bus. Các thông số cơ bản của động cơ thể hiện trong bảng 2.

Dựa trên các thông số kỹ thuật của nhà sản xuất cũng như các thông số đo đạc trên động cơ thực tế. Mô hình 1 chiều của động cơ D1146Ti được xây dựng trên AVL Boost như thể hiện trên hình 5.

Bảng 2. Các thông số cơ bản của động cơ

TT	Thông số	Đơn vị
1	Tên	D1146Ti
2	Số xy lanh (-)	6
3	Kiểu (-)	Chạy do nén
4	ĐXS (mm)	111x139
6	Công suất đỉnh mức/tốc độ (kW/v/ph)	154/2200
7	Mô men lớn nhất/tốc độ (Nm/v/ph)	880/1600
8	Tỷ số nén	16,8

2.2. Mô hình cháy

Mô hình tính toán phát thải độc hại của động cơ sử dụng trong nghiên cứu này là mô hình AVL MCC. Mô hình MCC có thể dự đoán được tốc độ tỏa nhiệt và tính toán được các thành phần phát thải độc hại chính của động cơ diesel như NO_x , bồ hóng (Soot) và mônô xit cacbon (CO). Mô hình yêu cầu các thông số kết cấu và thông số làm việc như số lỗ kim phun, đường kính lỗ phun và áp suất phun.

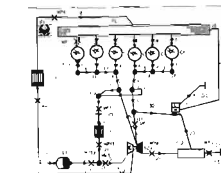
2.3. Quy trình thực hiện

Nghiên cứu được thực hiện theo quy trình sau đây:

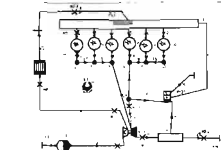
- Xây dựng mô hình động cơ D1146Ti nguyên bản, tiến hành đánh giá độ chính xác bằng cách so sánh một số kết quả tính toán mô phỏng với kết quả đo đạc và tiến hành hiệu chỉnh để mô hình đạt được độ tin cậy cần thiết.

- Tiến hành điều chỉnh lại kết cấu đường nạp, thải của động cơ sau khi kiểm nghiệm để có được hai mô hình giảm phát thải như thể hiện trên hình 6 và hình 7.

Hình 6 thể hiện mô hình động cơ khi trang bị hệ thống tuần hồi khí thải áp suất thấp. Khí thải sau khi ra khỏi động cơ được trích một phần trước tua bin để đưa qua kết làm mát trung gian trở lại đường nạp, sau đó trộn với không khí trước khi được hút vào máy nén.



Hình 6. Mô hình động cơ trang bị luân hồi khí thải



Hình 7. Mô hình động cơ có vòi phun ni tơ

Hình 7 thể hiện mô hình động cơ sử dụng biện pháp giảm NO_x bằng cách sử dụng khí NEA. Để đơn giản, khí NEA được tạo ra bằng cách bố trí 1 vòi phun khí ni tơ (I – Injector) vào đường nạp để hòa trộn với không khí trước khi đi vào động cơ.

Tiến hành mô phỏng quá trình làm việc của động cơ khi trang bị hệ thống EGR và NEA ở chế độ tốc độ 1600 và 2200 v/ph, 75% tải. Lượng khí luân hồi được điều chỉnh nhờ thay đổi độ mở của phần tử cản (R , trên hình 6) để đạt được các tỷ lệ luân hồi khác nhau. Lượng khí ni tơ phun vào đường nạp được điều chỉnh ở các lưu lượng khác nhau để chiếm chỗ một phần khí nạp.

Thông số chung để đánh giá tỷ lệ EGR hay tỷ lệ ni tơ phun vào đường nạp

là $\alpha(\%)$ – hệ số tỷ lệ.

- Trường hợp luân hồi khí thải, α được xác định như sau:

$$\alpha = \frac{m_{\text{EGR}}}{m_{\text{kk}}} \times 100\% = \frac{m_{\text{MP1}}}{m_{\text{MP2}}} \times 100\%$$

Với $m_{\text{EGR}} = m_{\text{MP1}}$ là lượng khí thải luân hồi (g/s); $m_{\text{kk}} = m_{\text{MP2}}$ là tổng lượng môi chất nạp (g/s)

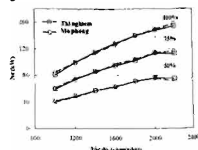
- Trường hợp sử dụng khí giàu ni tơ, α được xác định như sau:

$$\alpha = \frac{m_{\text{N}_2}}{m_{\text{kk}}} \times 100\% = \frac{m_{\text{N}_2}}{m_{\text{MP4}}} \times 100\%$$

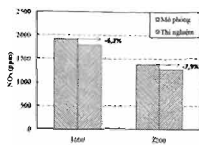
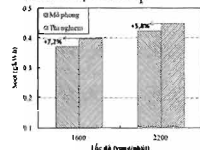
3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đánh giá mô hình

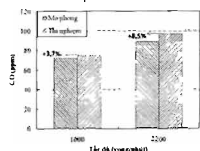
Độ tin cậy của mô hình được đánh giá bằng cách so sánh kết quả mô phỏng và thí nghiệm công suất có ích ở các đường đặc tính tốc độ của động cơ nguyên bản như thể hiện trên hình 9. Kết quả mô phỏng thu được công suất có giá trị sai lệch lớn nhất -4,9% tại tốc độ 2200 v/ph, 50% tải và sai lệch trung bình -0,2% trên toàn dải tốc độ của động cơ. Kết quả kiểm nghiệm mô hình cháy được thể hiện qua các đồ thị so sánh các thành phần phát thải độc hại của động cơ (NO_x , Soot và CO) giữa mô phỏng và thí nghiệm tại chế độ 75% tải, tốc độ 1600 và 2200 v/ph (từ hình 10 đến hình 12). Nhìn chung, giữa kết quả mô phỏng và thí nghiệm có sự sai lệch nằm trong giới hạn cho phép. Sai lệch lớn nhất là 8,5% đối với phát thải CO ở tốc độ 2200 v/ph. Như vậy có thể sử dụng mô hình này để thực hiện các tính toán nghiên cứu khác trên động cơ.



Hình 9. Công suất và suất tiêu hao nhiên liệu giữa mô phỏng và thực nghiệm

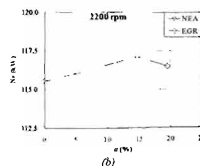
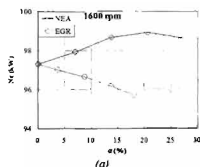
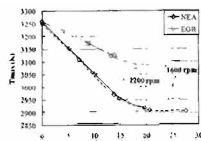
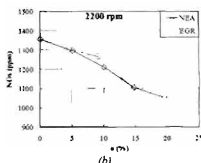
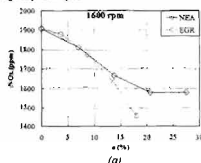
Hình 10. So sánh phát thải NO_x 

Hình 11. So sánh phát thải Soot



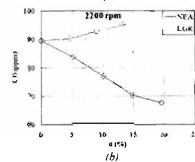
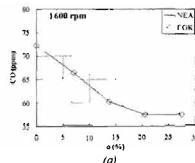
Hình 12. So sánh phát thải CO

3.2. Ảnh hưởng tới công suất và hạt thải độc hại của động cơ

Hình 13. Diễn biến công suất có ích theo tỷ lệ α
a) 1600 vòng/phút; b) 2200 vòng/phútHình 14. Diễn biến nhiệt độ lớn nhất trong buồng cháy theo tỷ lệ α Hình 15. Phát thải NO_x theo tỷ lệ α

a) 1600 vòng/phút; b) 2200 vòng/phút

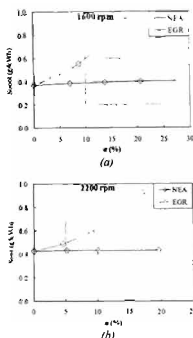
Hình 13 thể hiện diễn biến công suất có ích của động cơ theo tỷ lệ α ở chế độ tốc độ 1600 (hình 13-a) và 2200 v/ph (hình 13-b), 75% tải. Kết quả cho thấy, khi thực hiện luân hồi khí thải thì công suất của động cơ giảm xuống, càng tăng tỷ lệ α công suất càng giảm. Nguyên nhân là do chất lượng quá trình cháy kém đi vì thiếu oxy cũng như do nhiệt độ cháy giảm xuống bởi thành phần CO_2 và N_2 trong khí thải làm tăng nhiệt dung riêng của môi chất. Ngược lại, khi sử dụng NEA, công suất của động cơ có xu hướng cải thiện. Cụ thể là khi tăng tỷ lệ α thì công suất động cơ tăng khoảng 1,7% ($\alpha = 20\%$) ở tốc độ 1600 v/ph và 1,4% ($\alpha = 15\%$) ở tốc độ 2200 vòng/phút. Tuy nhiên, khi

Hình 16. Phát thải CO theo tỷ lệ α

a) 1600 vòng/phút; b) 2200 vòng/phút

tiếp tục tăng tỷ lệ α , công suất bị giảm xuống do N_2 như là một khí trơ làm tăng nhiệt dung riêng của môi chất (khoảng 1/2 so với CO_2), đồng thời lượng oxy giảm mạnh làm thay đổi cấu trúc của ngọn lửa cháy và thời gian cháy. Sự thay đổi nhiệt dung riêng của môi chất cũng như sự suy giảm hàm lượng oxy làm giảm nhiệt độ cháy như thể hiện trên Hình 14. Khi tăng α đến 17% thì nhiệt độ cực đại trong buồng cháy giảm 180K đối với EGR và 320K đối với NEA ở hai tốc độ 1600 và 2200 v/ph. Điều này không những ảnh hưởng tới công suất của động cơ mà còn ảnh hưởng mạnh tới diễn biến các thành phần phát thải độc hại, đặc biệt là phát thải NO_x , khi mà nhiệt độ cháy là yếu tố chính hình thành phát thải độc hại này.

Hình 15 thể hiện diễn biến của phát thải NO_x theo tỷ lệ α . Kết quả cho thấy cả hai phương pháp đều có khả năng giảm thiểu NO_x tương đương nhau với tỷ lệ $\alpha < 15\%$. Phát thải NO_x giảm khoảng 14,5% (ở 1600 v/ph) và 15,5% (ở 2200 v/ph). Với tỷ lệ α lớn hơn, EGR cho thấy khả năng giảm NO_x tốt hơn so với NEA. Nguyên nhân chính làm giảm phát thải NO_x là do sự suy giảm



Hình 17. Phát thải Soot theo tỷ lệ α

a) 1600 vòng/phút; b) 2200 vòng/phút
 nhiệt độ quá trình cháy và hàm lượng oxy như đã phân tích ở trên.

So với phát thải NO_x , ảnh hưởng của tỷ lệ α tới phát thải CO và Soot thì có xu hướng ngược lại. Hình 16 cho thấy diễn biến của phát thải CO theo tỷ lệ α . Với phương pháp EGR, khi tăng tỷ lệ α , phát thải CO tăng lên trong khi đó sử dụng NEA lại giảm thiểu được phát thải CO. Có thể giải thích hiện tượng này như sau: khi sử dụng EGR ngoài ảnh hưởng chiếm chỗ khí nạp, khí luân hồi còn làm tăng nhiệt độ của không khí nạp từ đó làm giảm lượng oxy dẫn tới CO tăng. Trong khi đó với phương pháp NEA, lượng ni tơ phun vào buồng cháy có ảnh hưởng chiếm chỗ của không khí nạp mà không ảnh hưởng tới nhiệt độ khí nạp nên lượng không khí nạp nhiều hơn và mức độ suy giảm hàm lượng oxy trong khí nạp ít hơn so với phương pháp EGR. Đồng thời, môi chất nạp đồng đều hơn nên giảm thiểu được các vùng cháy thiếu oxy cục bộ khi sử dụng NEA với tỷ lệ α nhỏ ($<20\%$) dẫn tới giảm phát thải CO. Kết quả cho thấy, với α lên tới 17%, phát thải CO tăng 10,5% ở tốc độ 1600 v/ph và

8,3% ở tốc độ 2200 v/ph khi sử dụng EGR; phát thải CO giảm 20,5% và 24,2% tương ứng ở tốc độ 1600 và 2200 v/ph khi sử dụng NEA.

Hình 17 thể hiện diễn biến của phát thải Soot theo tỷ lệ α . Đồ thị cho thấy sử dụng NEA gần như không gây ảnh hưởng tới hình thành phát thải Soot, trong khi đó với phương pháp EGR phát thải Soot tăng mạnh. Cụ thể với tỷ lệ α tới 17% phát thải Soot tăng 158% và 116% ở tốc độ 1600 v/ph và 2200 v/ph. Sự khác biệt này là do khí nạp sạch và đồng đều hơn khi sử dụng NEA, còn sử dụng EGR khí nạp bẩn hơn do các chất thải dạng hạt chứa trong khí thải làm tăng khả năng hình thành phát thải Soot.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu giảm phát thải NO_x bằng hai phương pháp luân hồi khí thải EGR và sử dụng khí giàu ni tơ NEA được thực hiện bằng công cụ mô phỏng 1 chiều. Các kết quả nghiên cứu có thể được tóm tắt như sau:

- Sử dụng NEA có thể cải thiện được công suất của động cơ với tỷ lệ ni tơ phù hợp, trong khi đó sử dụng EGR công suất động cơ giảm.
- Khả năng giảm thiểu phát thải NO_x của hai phương pháp là tương đương nhau với tỷ lệ $\alpha < 17\%$.
- Hai thành phần phát thải Soot và CO tăng mạnh khi sử dụng EGR, trong khi đó phát thải CO có xu hướng giảm và Soot tăng rất ít khi sử dụng NEA.

Phản biện khoa học: TS. Lê Hồng Quân

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hitoshi Yokomura, Susumu Kohketsu and Koji Mon. "EGR System in a Turbocharged and Intercooled Heavy-Duty Diesel Engine-Expansion of EGR Area with Venturi EGR System", Mitsubishi Technical

Review, 2005.

[2] Ladommatos, N., R.Balian, R.Horrock, and L.Cooper, "The Effect of Exhaust Gas Recirculation on Soot Formation in a High-Speed Direct-Injection Diesel Engine," SAE Paper 960841, 1996.

[3] Kreso, A.M., J.H.Johnson, L.D.Gratz, S.T.Bagley, and D.G.Leddy, "A Study of the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Heavy-Duty Diesel Engine Emissions," SAE Paper 981422, 1998.

[4] Leet, J.A., A.Matheaus, and D.Dickey, "EGR's Effect on Oil Degradation and Intake System Performance," SAE Paper 980179, 1998.

[5] Dennis, A.J., C.P.Garner, and D.H.C.Taylor, "The Effect of EGR on Diesel Engine Wear," SAE Paper 1999-01-0839, 1999.

[6] Nagai, T., H.Endo, H.Nakamura, and H.Yano, "Soot and Valve Train Wear in Passenger Car Diesel Engine," SAE Paper 831757, 1983.

[7] Nagaki, H., and K.Korematsu, "Effect of Sulfur Dioxide in Recirculated Exhaust Gas on Wear within Diesel Engines," JSME Int'l J., Series B, Vol. 38, No. 3, pp. 465-474, 1995.

[8] Plee, S.L., T.Ahmad, and J.P.Myers, "Flame Temperature Correlation for the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Particulate and NO_x Emissions," SAE Paper 811195, 1981.

[9] Röpke, S., G.W.Schweimer, and T.S.Strauss, "NO_x Formation in Diesel Engines for Various Fuel and Intake Gases," SAE Paper 950213, 1995.

[10] Lapuerta, M., J.M.alavert, and C.Domenich, "Modeling and Experimental Study about the Effect of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Combustion and Emissions," SAE Paper 950216, 1995.

[11] Li, J., J.O.Chae, S.B. ark, H.J.Paik, J.K.Park, Y.S.Jeong, S.M.Lee, and Y.J.Choi, "Effect of Intake Composition on Combustion and Emission Characteristics of DI Diesel Engine at High Intake Pressure," SAE Paper 970322, 1997.

[12] Olikara, C., and G.L.Borman, "A Computer Program for Calculating Properties of Equilibrium Combustion Products with Some Application to Engines," SAE Paper 750468, 1975.

[13] Poola, R.B., K.C.Stork, R.Sekar, K.Callaghan, and S.Nemser, "Variable Air Composition with Polymer Membrane-A New Low Emissions Tool," SAE Paper 980178, 1998.