

NGHIÊN CỨU SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA KIM PHUN ĐẾN CÔNG SUẤT ĐỘNG CƠ DIESEL

THE EFFECT OF INJECTOR NOZZLE HOLES ON DIESEL ENGINE PERFORMANCE

Đinh Tấn Ngọc, Đỗ Văn Dũng

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 22/10/2019, ngày phản biện đánh giá 15/11/2019, ngày chấp nhận đăng 2/3/2020.

TÓM TẮT

Hiện nay, động cơ Diesel còn được sử dụng khá nhiều đặc biệt là trong lĩnh vực vận tải và hàng hải. Tuy nhiên để tối ưu công suất, giảm suất tiêu hao nhiên liệu và giảm ô nhiễm thì cần cải tiến thêm. Trong bài báo này tác giả dùng phần mềm AVL – FIRE để nghiên cứu sự ảnh hưởng của kim phun nhiên liệu trong buồng đốt thống nhất, cụ thể là đường kính lỗ tia phun đến: công suất, moment cũng như khí thải trên động cơ Diesel (động cơ Diesel Kia JD – K3500). Kết quả mô phỏng cho ta thấy được với đường kính $d=0,16\text{mm}$ thì công suất và moment tốt nhất và ngược lại với $d=0,2\text{mm}$ cho ra khí thải tốt nhất. Kết quả nghiên cứu trên làm cơ sở tìm ra những biện pháp cải tiến kim phun nhiên liệu, nâng cao hiệu suất và giảm khí thải động cơ Diesel.

Từ khoá: Đường kính lỗ tia phun; công suất; mô phỏng; AVL – FIRE; động cơ Kia JD – K3500.

ABSTRACT

Nowadays, Diesel engines are so popular, especially in the field of transportation and marine. However, in order to increase power, reduce consumption and emission, further improvement is necessary. In this research, AVL - FIRE software was used to study the effect of injectors to the combustion chamber, the injection hole diameter related to: power, torque as well as exhaust gas on Diesel engine (Kia JD - K3500 Diesel engine). The results show that with $d = 0.16\text{mm}$, the best power, low fuel consumption but high emissions. And $d=0.2\text{mm}$, the lowest emission. The results of this research improve fuel injectors and diesel engine performance.

Keywords: nozzle diameter; power; simulation; AVL - FIRE; Kia JD - K3500 engine.

1. GIỚI THIỆU

Từ khi ra đời đến nay động cơ Diesel không ngừng được cải tiến và phát triển để đáp ứng nhu cầu thị trường. Tuy nhiên vẫn còn tồn đọng một số vấn đề khó khăn trong việc nâng cao được công suất động cơ và giảm lượng khí thải. Động cơ Diesel hoạt động ở tốc độ cao đòi hỏi việc nguyên tử hóa nhiên liệu - xảy ra chủ yếu do xâm thực và nhiễu loạn trong vùng lân cận của vòi phun phải thích hợp trong buồng đốt với thời gian cực ngắn. Một số thông số quan trọng bao gồm kích thước lỗ tia phun, xâm thực, độ côn của chùm tia, vận tốc nhiên liệu, mật độ

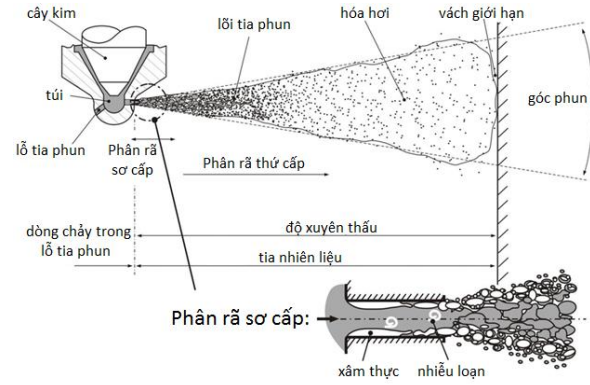
không khí mà nhiên liệu được bơm vào ảnh hưởng đến việc tăng cường nguyên tử hóa nhiên liệu [1]. Để nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian phun đến đặc tính quá trình cháy và khí thải trên động cơ Diesel, tác giả Nguyễn Văn Tổng Em và Nguyễn Lê Duy Khải đã sử dụng phần mềm mô phỏng KIVA-3V thay đổi thời gian phun từ 6° đến 12° góc quay trục khuỷu (CA) trong khi đó giữ nguyên thời điểm phun để đánh giá sự tác động đến công suất, suất tiêu hao nhiên liệu và phát thải bồ hóng cũng như NOx trong khí thải động cơ Diesel RV125-2. Kết quả chỉ ra rằng công suất của động cơ đạt giá trị lớn nhất, đồng thời bồ hóng và NOx giảm đáng kể khi thời gian

phun nằm trong khoảng từ 6° đến 9° CA [2]. Bên cạnh đó, tác giả Trần Quang Vinh cũng mô phỏng quá trình phun nhiên liệu và quá trình cháy trong động cơ D1146TIS sử dụng phần mềm CFD AVL-Fire để đánh giá quá trình cháy bên trong động cơ [3]. Ngoài ra, với nghiên cứu ảnh hưởng của kích thước hạt nhiên liệu, nồng độ nhiên liệu và tốc độ phun nhiên liệu vào buồng đốt của tác giả Rohit Sharma, Rana Ranjit Singh và Shailendra Kumar Vishwaka cho kết quả các lỗ tia phun nhiên liệu nhỏ hơn có kích thước giọt nhỏ hơn, thậm chí khi giảm áp suất phun sự nguyên tử hóa nhiên liệu vẫn tốt hơn, bay hơi nhanh hơn và trộn tốt hơn [4]. Với nghiên cứu của Dr. Hiregoudar Yerrennagoudaru, Kullaya Swamy K góc nhiên liệu với các hướng phun khác nhau có ảnh hưởng lớn đến hiệu suất động cơ cũng như khí thải [5].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

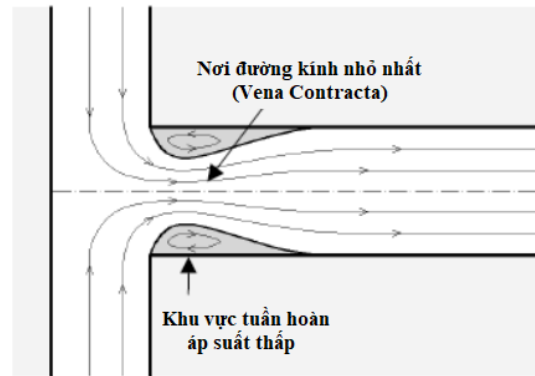
Quá trình hòa trộn hỗn hợp trong lòng xy lanh là một quá trình rối loạn giữa không khí có áp suất cao và nhiên liệu có động năng lớn ở dạng sương trong thời gian rất ngắn từ 1,6 đến $60 \mu s$. Quá trình cháy và các thông số của quá trình cháy phụ thuộc rất nhiều vào chất lượng và thời gian chuẩn bị hỗn hợp nhiên liệu. Kim phun nhiên liệu ảnh hưởng rất lớn đối với hiệu suất và khí thải của động cơ diesel. Một trong những vấn đề khó khăn nhất gặp phải trong quá trình phát triển động cơ Diesel hoạt động ở tốc độ cao là phải nguyên tử hóa nhiên liệu thích hợp trong buồng đốt trong thời gian cực ngắn. Một số thông số quan trọng bao gồm kích thước lỗ tia phun, xâm thực, độ côn của chùm tia, vận tốc nhiên liệu, mật độ không khí mà nhiên liệu được bơm vào ảnh hưởng đến việc tăng cường nguyên tử hóa nhiên liệu. Kết quả thử nghiệm cho thấy rằng lỗ có đường kính đầu ra nhỏ hơn làm tăng hệ số phun đến phạm vi nhất định gây ra sự gia tăng quá trình nguyên tử hóa nhiên liệu.

Quá trình phun nhiên liệu ảnh hưởng rất nhiều đến công suất của động cơ, tuy nhiên trong quá trình phun không thể tránh khỏi hiện tượng xâm thực, nó làm giảm hiệu suất phun và làm xói mòn kim phun [6].



Hình 1. Tổng quan về các quá trình xảy ra trong kim phun nhiên liệu [6]

Khi nhiên liệu đi vào của lỗ tia phun, sẽ hình thành một vùng áp suất thấp. Và khi điều này xảy ra tuần hoàn nó sẽ làm giảm diện tích nhiên liệu đi vào, nơi đó được gọi là “vena contracta” (đường kính dòng nhỏ nhất) [6].



Hình 2. Vị trí xảy ra xâm thực trong kim phun nhiên liệu [6]

Thông lượng khối \dot{m}_f và động lượng \dot{M}_f qua lỗ kim phun có thể được xác định thông qua vận tốc u , mật độ ρ và diện tích dòng A :

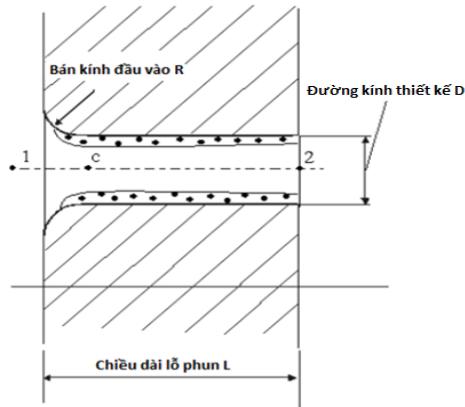
$$\dot{m}_f = \int_{A_{geo}} u \cdot \rho \cdot dA \quad (1)$$

$$\dot{M}_f = \int_{A_{geo}} u^2 \cdot \rho \cdot dA \quad (2)$$

Một hệ số Ca được xác định để liên kết diện tích lỗ tia phun thực tế với diện tích lỗ tia phun toàn phần mà không có lớp biên.

$$C_a = \frac{A \cdot \rho}{A_{geo} \cdot \rho_1} \quad (3)$$

Trong đó A và ρ là các giá trị cho trường hợp thực tế và A_{geo} và ρ_1 là các giá trị lý tưởng không có lớp biên.



Hình 3. Hiện tượng xâm thực xảy ra trong lỗ tia phun nhiên liệu [6]

Khu vực có diện tích nhỏ nhất (tại “vena Contracta”) được đánh dấu là c trong hình 4 theo định nghĩa Nurick [6]. Hệ số co C_c được xác định như sau:

$$C_c = \frac{A_c}{A_{geo}} \quad (4)$$

Trong đó A_c là diện tích lỗ tia phun tại vị trí c trong hình 4 và A_{geo} là diện tích lỗ tia phun lý thuyết. Vận tốc thực tế hoặc có ích qua lỗ kim phun được xác định bằng cách sử dụng thông lượng khối và động lượng:

$$u_{ef} = \frac{\dot{M}_f}{\dot{m}_f} \quad (5)$$

Vận tốc tổn thất lý thuyết được tính từ phương trình Bernoulli:

$$u_{th} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_1}} \quad (6)$$

Hệ số vận tốc C_v được định nghĩa là tỉ số giữa vận tốc có ích và lý thuyết:

$$C_v = \frac{u_{ef}}{u_{th}} \quad (7)$$

Cường độ của xâm thực được gọi là số xâm thực. Điều này có thể được định nghĩa theo nhiều cách. Số xâm thực được định nghĩa theo Nurick là:

$$K = \frac{P_1 - P_{vapor}}{P_1 - P_2} \quad (8)$$

Trong đó P là áp suất, số 1 là đầu vào lỗ tia phun và 2 là đầu ra lỗ tia phun, P_{vapor} là áp suất hơi của nhiên liệu.

Trong một vòi phun, hệ số phun Cd là tỉ lệ của lưu lượng thực tế với lưu lượng lý

thuyết. Hệ số phun Cd được tính bằng các phương trình hiện tượng. Ngoài các điều kiện như lưu lượng dòng chảy, các đặc điểm hình học của lưu lượng vòi phun, thì bán kính đầu vào lỗ tia phun và tỉ lệ chiều dài với đường kính của lỗ vòi phun cũng ảnh hưởng đến hệ số phun Cd. Được xác định thông qua các tham số đầu vào C1 và C2. Bằng cách này, ta có thể ước tính áp suất đầu vào p_1 cho dòng chảy rối như sau:

$$p_1 = p_2 + \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{U_{geo}}{C_d}\right)^2 \quad (9)$$

3. THIẾT LẬP MÔ PHỎNG

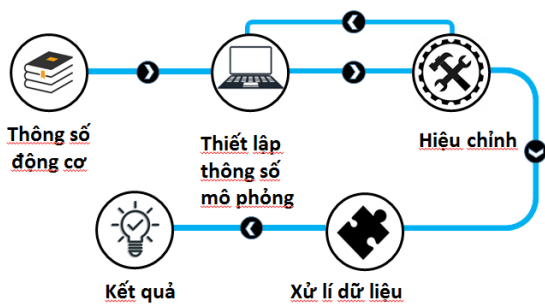
Việc nghiên cứu ảnh hưởng của đường kính lỗ tia phun đến công suất động cơ Diesel Kia - JD K3500 được thực hiện bằng phần mềm AVL Fire [7]. Đây là phần mềm được xây dựng trên nền tảng là các mô hình toán mô phỏng các quá trình mà lý thuyết CFD quan tâm giải quyết, đặc biệt trong lĩnh vực động cơ đốt trong như quá trình cháy, quá trình phun nhiên liệu, quá trình truyền nhiệt, chuyển động của các phân tử, các phản ứng hóa học xảy ra trong quá trình trao đổi chất, xử lý khí thải (after-treatment),... Đối với mỗi bài toán cụ thể, Fire đều có rất nhiều mô hình toán hiện đại với mức độ phức tạp cũng như quan điểm tính toán khác nhau giúp người dùng có thể lựa chọn phương án hợp lý nhất đối với bài toán của mình. Công cụ tính toán mô phỏng động cơ Diesel (ESE Diesel) của AVL Fire có giao diện tương đối đơn giản và dễ sử dụng nhưng vẫn đảm bảo kết quả tính toán tin cậy và chính xác [7].

3.1 Tạo lưới và thông số mô phỏng

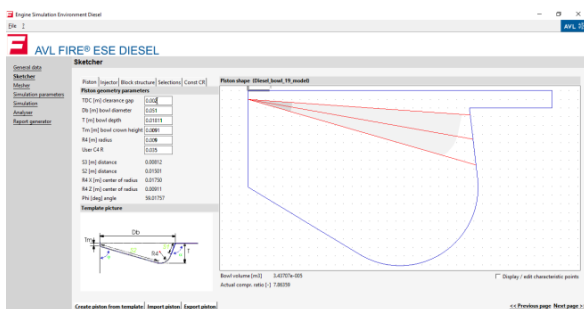
Bảng 1. Trình bày các thông số chính của động cơ Diesel Kia - JD K3500 [8].

Thông số	Giá trị
Nhiên liệu	Diesel
Số xy lanh	4
Đường kính x Hành trình piston (mm)	98 x 104
Dung tích (cc)	3455
Tỉ số nén	22
Số lượng xú páp	8

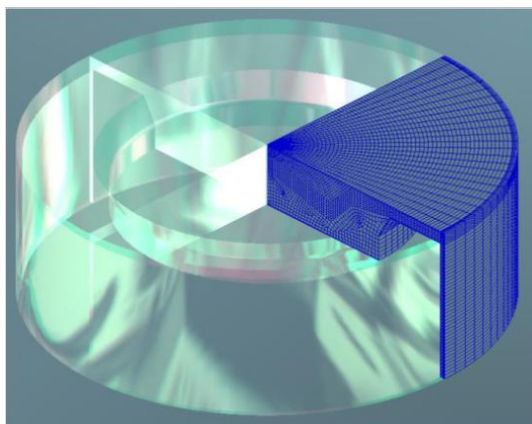
Kiểu xy lanh	Uớt
Thời điểm phối khí	
Góc mở sớm xupap nạp ($^{\circ}$)	120
Góc đóng muộn xupap nạp ($^{\circ}$)	400
Góc mở sớm xupap thải ($^{\circ}$)	500
Góc đóng muộn xupap thải ($^{\circ}$)	120
Kim phun	
Kiểu kim phun	Đa lỗ tia
Số lỗ tia x đường kính (mm)	4 x 0,182



Hình 4. Sơ đồ tiến hành thực nghiệm



Hình 5. Biên dạng thiết kế piston của động cơ Kia - JD K3500 sau khi thiết lập



Hình 6. Phần được chia lưới mô phỏng đối với kim phun có 4 lỗ tia phun

General engine parameters | Piston movement specification |

General parameters

Engine name: Kia - JD K3500

Engine layout: Inline

Number of cylinders [-]: 4

Bore [m]: 0.09800

Compression ratio [-]: 22.00

General engine parameters | Piston movement specification |

Piston movement specification

Piston displacement function

Crank radius [m]: 0.05200

Connecting rod length [m]: 0.17500

Piston pin offset [m]: 0.00000

Stroke deflection

Load p-curve... Pressure curve is not yet defined.

Deflection value [m/Pa]: 0.000e+000

Curve

Load curve... Curve is not yet defined.

Stroke [m]: 0.10400

Hình 7. Thiết lập các thông số của động cơ

Piston | Injector | Block structure | Selections | Const CR |

Piston geometry parameters

TDC [m] clearance gap: 0.00050

Db [m] bowl diameter: 0.05100

T [m] bowl depth: 0.01811

Tm [m] bowl crown height: 0.00910

R4 [m] radius: 0.00900

User C4 R: 0.03500

S3 [m] distance: 0.00812

S2 [m] distance: 0.01501

R4 X [m] center of radius: 0.01750

R4 Z [m] center of radius: 0.00911

Phi [deg] angle: 59.01757

Hình 8. Thông số hình dạng của piston động cơ Kia - JD K3500

Piston | Injector | Block structure | Selections | Const CR |

Injector geometry parameters

Number of nozzle holes [-]: 4

Inj. Nozzle position Z-coordinate [m]: 0.00143

Nozzle diameter at hole center positions [m]: 0.00350

Nozzle hole outer diameter [m]: 0.00016

Nozzle hole inner diameter [m]: 0.00000

Nozzle hole half outer cone angle [deg]: 6.00000

Nozzle hole half inner cone angle [deg]: 0.00000

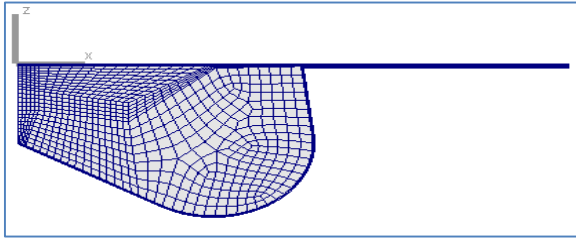
Inj. Spray angle delta 1 [deg]: 160.00000

Recessed injector

Recessed injector width [m]: 0.00800

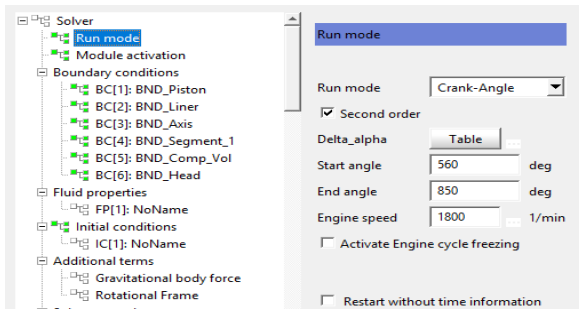
Recessed injector height [m]: 0.00100

Hình 9. Thông số hình dạng của kim phun động cơ Kia - JD K3500

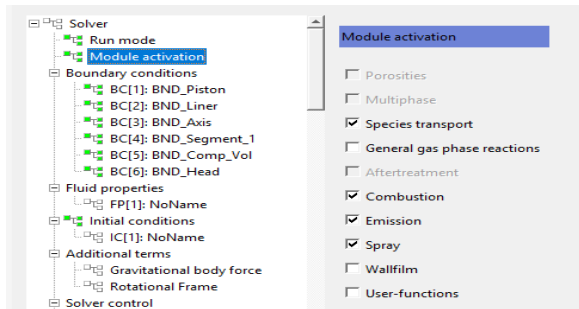


Hình 10. Mô hình lưới piston động cơ Kia - JD K3500

3.2 Thiết lập các tham số mô hình hóa (Simulation Parameters)



Hình 11. Thiết lập chế độ mô phỏng



Hình 12. Thiết lập các mô đun tính toán

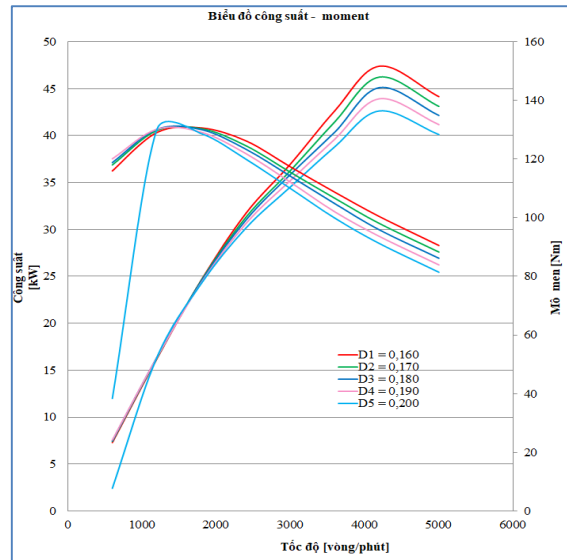
Sau khi thiết lập các thông số ta tiến hành thực hiện chạy mô phỏng, thời gian trung bình hoàn tất một lần mô phỏng là khoảng 4 giờ trên máy vi tính trang bị vi xử lý Core i5 - 4500U.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Thực hiện quá trình mô phỏng, tốc độ động cơ thay đổi từ 600 đến 5000 (vòng/phút) tương ứng với 5 đường kính lỗ tia khác nhau là D1=0,16mm; D2=0,17mm; D3=0,18mm D4=0,19mm; D5=0,2mm cho mỗi tốc độ động cơ.

Ở hình 12 thể hiện đồ thị công suất – moment động cơ tại các tốc độ theo các đường kính lỗ tia phun khác nhau. Với đường kính D=0,2mm công suất và momen

rất thấp nhất tại tốc độ thấp, trước khi vận tốc động cơ đạt 2000 vòng/phút thì với đường kính càng nhỏ thì công suất và moment càng thấp. Khi qua thời điểm tốc độ 1800 vòng/phút thì đường kính càng nhỏ thì cho công suất và moment xoắn càng cao, và vận tốc càng cao thì chênh lệch càng rõ.

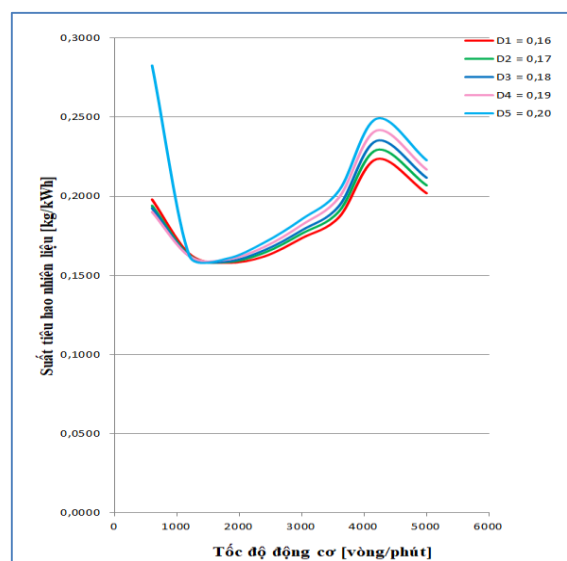


Hình 13. Sự ảnh hưởng của đường kính lỗ tia phun đến công suất và moment động cơ

- Tốc độ động cơ từ 4000 (vòng/phút):

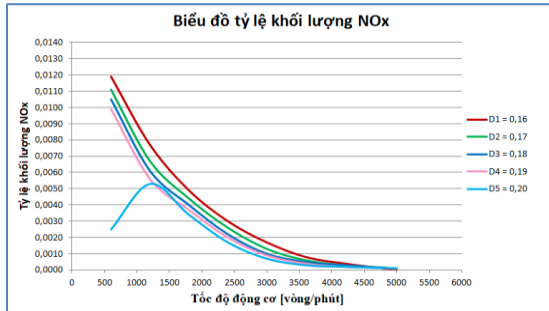
- Công suất giảm lần lượt là D1, D2, D3, D4, D5 : 2,44% ; 2,42% ; 2,63% ; 2,95%.

- Moment giảm lần lượt là D1, D2, D3, D4, D5 : 2,36% ; 2,24% ; 2,32% ; 2,58%.



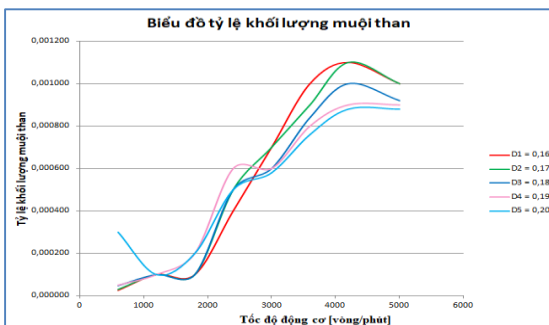
Hình 14. Sự ảnh hưởng của đường kính lỗ tia phun đến suất tiêu hao nhiên liệu

Tại vận tốc trước 1800 vòng/phút. Suất tiêu hao nhiên liệu càng cao với đường kính càng nhỏ, và sau 1800 thì đường kính càng nhỏ thì suất tiêu hao càng ít. Tại tốc độ động cơ 4200 (vòng/phút) suất tiêu hao nhiên liệu tăng lần lượt là D1, D2, D3, D4, D5: 2,59% ; 2,52% ; 2,76% ; 3,11%.



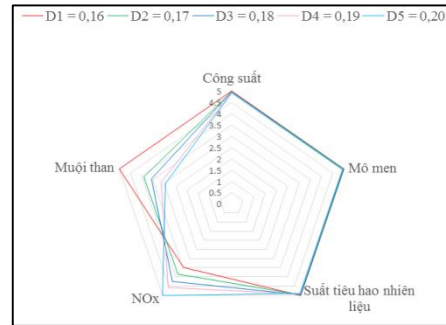
Hình 15. Sự ảnh hưởng của đường kính lỗ tia phun đến phát thải NOx

Lượng NOx sinh ra có xu hướng giảm khi tốc độ động cơ càng cao (ngoại trừ D=0,2). Và đường kính càng nhỏ thì lượng NOx sinh ra càng lớn. Việc giảm đường kính lỗ tia phun sẽ làm gia tăng lượng NOx sinh ra. Nhưng với đường kính lỗ tia phun D5 tại lúc này không còn hiện tượng nhỏ giọt như tại vận tốc 600 vòng/phút. Lượng NOx sinh ra với đường kính lỗ tia phun D5, D4, D3, D2, D1 tăng lần lượt là 5,35% ; 8,19% ; 8,95% ; 12,98%. Theo đồ thị, cùng một đường kính lỗ tia phun, lượng NOx sinh ra tại vận tốc 1200 vòng/phút giảm so với lượng NOx sinh ra tại vận tốc 600 vòng/phút. Riêng đường kính lỗ tia phun D5 do tại vận tốc 600 vòng/phút bị nhỏ giọt sinh ra lượng NOx quá nhỏ nên so với vận tốc 1200 vòng/phút thì lượng NOx sinh ra không giảm mà lại tăng lên đến 89,29%.



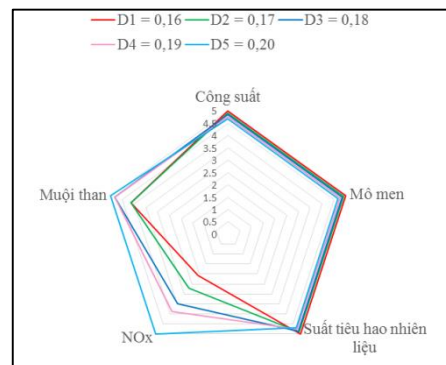
Hình 16. Sự ảnh hưởng của đường kính lỗ tia phun đến phát thải muội than

Về muội than ta có thể thấy ở tốc độ trước 3000 vòng / phút (ngoại trừ D=0,2mm) thì đường kính càng nhỏ thì lượng muội than sinh ra càng nhỏ. Và ngược lại ở tốc độ cao, đường kính lỗ tia phun càng nhỏ thì muội than sinh ra càng lớn.



Hình 17. Biểu đồ so sánh các đặc tính ngoài động cơ tại vận tốc 1800(vòng/phút)

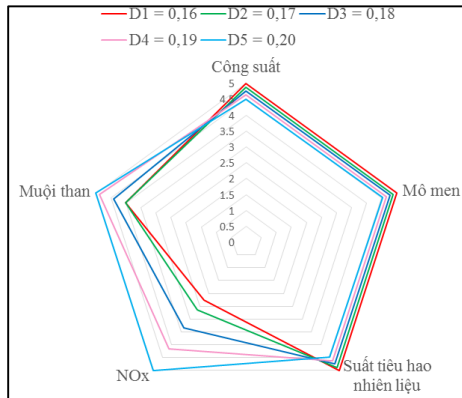
Tại tốc độ động cơ 1800 (vòng/phút), xét về mặt công suất, moment và suất tiêu hao nhiên liệu của các đường kính lỗ tia phun khác nhau cho giá trị gần bằng nhau. Xét về mặt phát thải NOx thì với đường kính D5 cho phát thải nhỏ nhất so với các đường kính còn lại, đường kính càng giảm thì lượng phát thải NOx càng tăng lên. Xét về mặt phát thải muội than thì với đường kính D1 cho phát thải nhỏ nhất so với các đường kính còn lại, đường kính càng tăng thì lượng phát thải muội than càng tăng lên.



Hình 18. Biểu đồ so sánh các đặc tính ngoài động cơ tại vận tốc 3000(vòng/phút)

Tại tốc độ động cơ 3000 (vòng/phút), xét về mặt công suất, moment và suất tiêu hao nhiên liệu của các đường kính lỗ tia phun khác nhau cho thấy sự chênh lệch rõ ràng. Với đường kính lỗ tia phun càng nhỏ thì càng công suất, moment càng tăng và suất tiêu hao

hiên liệu càng giảm. Xét về mặt phát thải NOx thì với đường kính D5 cho phát thải nhỏ nhất so với các đường kính còn lại. Và với đường kính càng giảm thì lượng phát thải NOx càng tăng lên. Tương tự như phát thải NOx, về mặt phát thải muội than thì với đường kính D5 cũng cho phát thải nhỏ nhất so với các đường kính còn lại. Và với đường kính càng giảm thì lượng phát thải NOx càng tăng lên.



Hình 19. Biểu đồ so sánh các đặc tính ngoài động cơ tại vận tốc 4200(vòng/phút)

Tại tốc độ động cơ 4200 (vòng/phút), xét về mặt công suất, moment và suất tiêu hao nhiên liệu của các đường kính lỗ tia phun khác nhau càng cho thấy sự chênh lệch rõ ràng hơn so với các tốc độ thấp hơn. Với đường kính lỗ tia phun càng nhỏ thì càng công suất, moment càng tăng và suất tiêu hao nhiên liệu càng giảm. Xét về mặt phát thải NOx thì với đường kính D5 cho phát thải nhỏ nhất so với các đường kính còn lại. Và với đường kính càng giảm thì lượng phát thải NOx càng tăng lên. Tương tự như phát thải NOx, về mặt phát thải muội than thì với đường kính D5 cũng cho phát thải nhỏ nhất so với các đường kính còn lại. Và với đường kính càng giảm thì lượng phát thải NOx càng tăng lên.

5. KẾT LUẬN

Nhìn chung, qua kết quả mô phỏng ta thấy với đường kính nhỏ cho công suất và moment lớn, tiêu hao nhiên liệu nhỏ. Tuy nhiên, ở đường kính nhỏ thì cho lượng khí xả NOx và muội than lớn. Ngược lại, đường kính lỗ tia lớn cho khí xả thấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Phạm Đình Thọ, *Nghiên cứu quá trình phun nhiên liệu trong động cơ Diesel*, 2006.
- [2] Trần Quang Vinh, *Mô phỏng quá trình phun nhiên liệu và quá trình cháy trong động cơ D1146TiS sử dụng phần mềm CFD AVL-FIRE*, Đại học Bách khoa Hà Nội, 2007.
- [3] Nguyen Le Duy Khai Nguyen Van Tong Em, *A Study on the Effects of Duration of Injection on Emissions and Combustion Characteristics in a Direct Injection Diesel Engine*. Science Technology Development Journal, **17**(4): p. 67-76, 2014.
- [4] Rohit Sharma, Rana Ranjit Singh “Experimental study of the Effect of Fuel Injector nozzle holes on Direct Injection Diesel Engine”.
- [5] Dr. Hiregoudar Yerrenagoudaru, Kullaya Swamy K B, “Effect of Nozzle Holes and Turbulent Injection on Diesel Engine Performance”.
- [6] Design of Direct Injection Fuel Injector Nozzle.
- [7] www.avl.com.
- [8] <http://www.altra888.com>
- [9] Effect of Fuel injection pressure and Injection timing on fuel pray, engine performance, emission.
- [10] Abdul Rahim Ismail, *Effect of injector nozzle holes on diesel engine performance*, p. 83, 2010.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Đình Tấn Ngọc

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM

Email: ngocdt@hcmute.edu.vn