

MÔ PHỎNG SỰ BAY HƠI CỦA TIA NHIÊN LIỆU PHUN MỒI TRONG ĐỘNG CƠ DUAL FUEL BIOGAS-DIESEL

SIMULATION OF VAPORIZATION OF DIESEL JETS IN BIOGAS-DIESEL DUAL FUEL ENGINES

Bùi Văn Ga¹, Nguyễn Việt Hải², Võ Anh Vũ², Lê Trung³

¹Bộ Giáo dục và Đào tạo; buivanga@dongcobiogas.com

²Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

³Trường Cao đẳng Công nghiệp Huế

Tóm tắt - Quá trình bay hơi của tia nhiên liệu diesel trong môi trường hỗn hợp không khí-biogas được mô phỏng nhờ phần mềm CFD FLUENT. Kết quả cho thấy khi phun diesel trong cùng điều kiện nhiệt độ, bay hơi của tia trong môi trường không khí gần với bay hơi của nó trong môi trường CO₂ ở áp suất thấp, nhưng gần với bay hơi trong môi trường CH₄ ở điều kiện áp suất cao. Trong môi trường hỗn hợp không khí-biogas, bay hơi của tia phun diesel phụ thuộc vào tỉ lệ CH₄/CO₂ trong nhiên liệu. Trong cùng điều kiện phun và thành phần khí trong hỗn hợp, bay hơi của tia diesel giảm khi áp suất buồng cháy tăng, nhưng tăng mạnh khi tăng nhiệt độ của hỗn hợp trong buồng cháy. Cùng một lượng phun diesel cung cấp vào buồng cháy, khi tăng lưu lượng phun thì tốc độ bay hơi của hạt nhiên liệu diesel tăng.

Từ khóa - động cơ lưỡng nhiên liệu biogas-diesel; phun diesel; hóa hơi tia phun; mô phỏng sự phun; CFD.

1. Giới thiệu

Quá trình đánh lửa động cơ dual fuel biogas-diesel có thể giả định nhờ nguồn nhiệt hình trụ [9], [10]. Giả định này dẫn đến sai lệch nhất định giữa mô phỏng và thực nghiệm trên động cơ dual fuel [11]. Để thể hiện rõ hơn bản chất quá trình đánh lửa của loại động cơ này nhằm tối ưu hóa quá trình công tác, chúng ta cần xem xét quá trình đánh lửa và cháy của tia phun mồi diesel.

Sự phát triển tia phun diesel trong môi trường không khí đã được nghiên cứu tường tận và đã trở thành kinh điển trong các tài liệu về động cơ đốt trong. Chất lượng quá trình cháy trong động cơ diesel phụ thuộc nhiều vào tốc độ bay hơi của hạt nhiên liệu. Quá trình bay hơi phụ thuộc vào điều kiện lý hóa trong buồng cháy và điều kiện phun. Sự phân bố kích thước hạt nhiên liệu trong tia phun, đường kính trung bình của hạt nhiên liệu là các thông số vật lý ảnh hưởng đến quá trình bay hơi hạt nhiên liệu. Cơ chế tạo hạt được khống chế bởi mức độ rối (phụ thuộc vào số Reynolds), tương tác khí động học giữa tia phun và môi trường lưu chất và sức căng bề mặt. Ảnh hưởng của lực khí động học và sức căng bề mặt được biểu diễn thông qua số Weber của dòng chảy, số này khống chế cơ chế hình thành hạt trong tia [1]. Tia phun trong động cơ diesel bị phân rã thành hạt theo cơ chế ma sát và phá vỡ. Tốc độ phun và áp suất trong buồng cháy ảnh hưởng đến cơ chế này [2].

Để có được các thông tin liên quan đến nồng độ nhiên liệu, người ta sử dụng các phương pháp đo quang học dựa trên kỹ thuật laser. Các phương pháp này cũng nhận dạng được pha hơi của nhiên liệu [3]. Nếu pha vào nhiên liệu chất theo dấu phù hợp thì các pha lỏng và khí có thể nhận dạng được nhờ phát xạ ở các bước sóng khác nhau [4], [5], [6]. Mật độ khối lượng ảnh hưởng mạnh đến độ xuyên thấu

Abstract - Simulation of vaporization of diesel jets in air-biogas mixture is carried out with CFD software FLUENT. The results show that at the same temperature, injection of diesel jets in air approaches its vaporization in CO₂ at low pressure but approaches its vaporization in CH₄ in high pressure. In biogas-air mixture, vaporization of diesel jet depends on CH₄/CO₂ ratio in the fuel. In the same injection conditions and mixture components, vaporization of diesel jets decreases as pressure increases but it increases sharply when the temperature of the mixture in the combustion chamber goes up. With the same diesel quantity injected into combustion chamber, vaporization increases as jet flow goes up.

Key words - Biogas-diesel dual fuel engine; diesel injection; vaporization of diesel jet; injection simulation; CFD.

của tia phun: mật độ khối lượng tăng, độ xuyên thấu giảm mạnh [7]. Nhiệt độ môi chất tăng làm giảm độ xuyên thấu của tia, nhưng nhiệt độ nhiên liệu trong tia không ảnh hưởng lớn đến độ xuyên thấu so với những thông số khác [7], [8].

Trong những cấu hình kỹ thuật phức tạp và nhỏ gọn như trong buồng cháy động cơ đốt trong, việc nghiên cứu bằng thực nghiệm hết sức khó khăn và khó có thể tổng quát hóa nghiên cứu trong những trường hợp khác nhau. Mô phỏng sự phát triển của tia phun rất phù hợp trong dự báo các quá trình khí động lực học diễn ra trong tia làm nền tảng nghiên cứu quá trình cháy khuếch tán.

Mô phỏng sự phát triển của tia phun dựa trên dự đoán dịch chuyển của các hạt trong tia phun bằng tích phân lực tác động lên các hạt này. Sự phân tán của hạt do dao động rối có thể được mô hình hóa bằng mô hình đám mây hạt. Sự phân tán rối của hạt quanh quỹ đạo trung bình được tính toán theo phương pháp thống kê. Mật độ hạt quanh quỹ đạo trung bình được đặc trưng bởi hàm mật độ xác suất Gauss mà mạch động của nó dựa vào độ phân tán của hạt do mạch động rối. Quỹ đạo trung bình nhận được bằng cách giải phương trình trung bình tổng thể mô tả sự chuyển động của tất cả các hạt hiện diện trong đám mây.

Mô hình đám mây hạt được xây dựng dựa vào phương pháp thống kê xác suất để xác định sự phân tán của hạt trong môi trường rối xung quanh quỹ đạo trung bình. Quỹ đạo trung bình được tính toán trên cơ sở trung bình các phương trình vận chuyển hạt có mặt trong đám mây. Đám mây đi vào vùng tính toán từ điểm nguồn. Đám mây dần nở ra do quá trình rối từ đầu vào đến đầu ra. Sự phân bố hạt trong đám mây được xác định nhờ phương trình mật độ xác suất dựa trên vị trí của đám mây tương đối so với tâm của

nó. Giá trị mật độ xác suất thể hiện khả năng tìm thấy hạt trong đám mây với thời gian tồn tại t ở vị trí x_i trong dòng chảy. Giá trị trung bình của mật độ xác suất, hay tâm của đám mây, tại thời điểm cho trước biểu diễn vị trí nhiều khả năng tồn tại nhất của hạt trong đám mây.

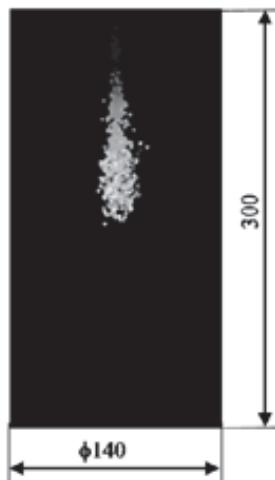
Bay hơi bắt đầu khi nhiệt độ hạt đạt đến nhiệt độ bốc hơi và tiếp tục đến khi hạt nhiên liệu đạt đến điểm sôi hay đến khi toàn bộ những chất bay hơi trong hạt bốc hơi hoàn toàn.

Trong công trình này, chúng tôi tập trung nghiên cứu mô phỏng sự bay hơi của nhiên liệu trong tia phun diesel khi phun vào môi trường hỗn hợp biogas-không khí dựa vào phần mềm FLUENT.

2. Điều kiện biên sử dụng trong mô phỏng

- Điều kiện hỗn hợp khí

Mô phỏng sự bay hơi của hạt nhiên liệu trong tia phun diesel được thực hiện nhờ phần mềm FLUENT. Buồng cháy nghiên cứu được giả định có dạng hình trụ có đường kính 140mm và chiều cao 300mm (thể tích 4,62 lít) (Hình 1). Hỗn hợp môi chất trong buồng cháy gồm không khí và biogas. Nhiên liệu biogas được ký hiệu MxCy ($x\%$ CH₄ và $y\%$ CO₂ theo thể tích). Như vậy hỗn hợp khí trong buồng cháy trước khi phun nhiên liệu diesel gồm: CH₄, CO₂, O₂ và N₂. Trong tính toán thành phần hỗn hợp được mô phỏng tương tự như thành phần hỗn hợp cung cấp cho động cơ dual fuel biogas-diesel.



Hình 1. Kích thước buồng cháy mô phỏng

Để đốt cháy hoàn toàn 1g CH₄ chúng ta cần 4g O₂. Từ đó chúng ta có thể tính toán thành phần các chất trong buồng cháy ứng với hệ số tương đương φ cho trước. Bảng

1 giới thiệu thành phần các chất khi nồng độ CH₄ trong hỗn hợp là 5% ứng với các nhiên liệu biogas khác nhau và hệ số tương đương φ tương ứng.

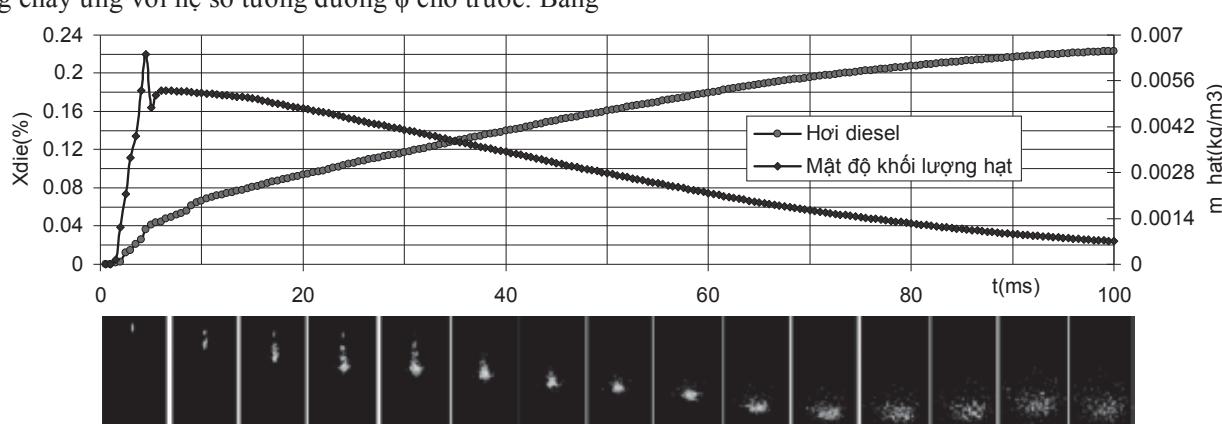
Bảng 1. Thành phần khói lượng các chất trong hỗn hợp

%V-CH ₄ trong biogas	%M-CH ₄ trong hỗn hợp	%M-CO ₂ trong hỗn hợp	%M-O ₂ trong hỗn hợp	%M-N ₂ trong hỗn hợp	φ
40	5	20,63	17,11	57,26	1,17
45	5	16,81	17,98	60,21	1,11
50	5	13,75	18,69	62,56	1,07
55	5	11,25	19,26	64,49	1,04
60	5	9,17	19,74	66,09	1,01
65	5	7,40	20,15	67,45	0,99
70	5	5,89	20,5	68,61	0,98
75	5	4,58	20,8	69,62	0,96
80	5	3,44	21,06	70,50	0,95
85	5	2,43	21,29	71,28	0,94
90	5	1,53	21,5	71,97	0,93
95	5	0,72	21,68	72,6	0,92
100	5	0,00	21,85	73,15	0,92

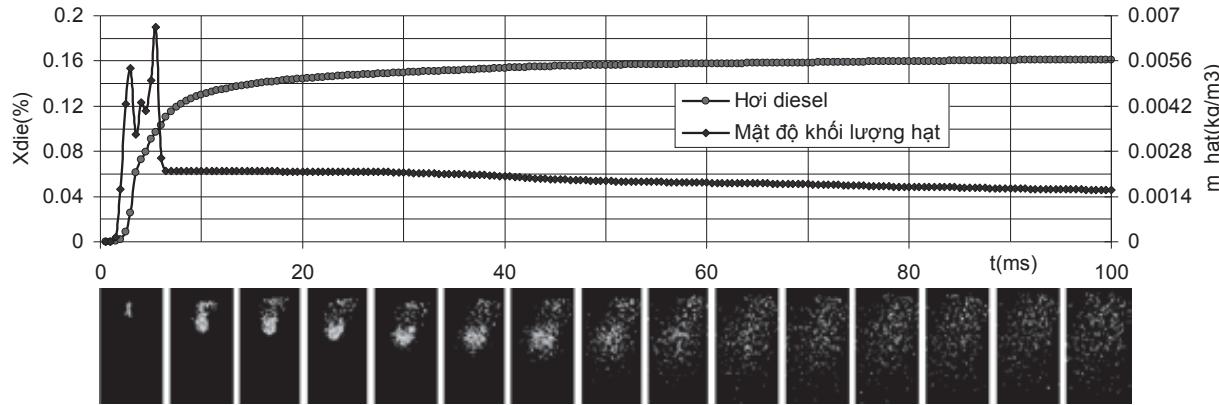
- Điều kiện tia phun diesel

Diesel bao gồm các phân tử ổn định như C₁₂H₂₂, C₁₃H₂₄ và C₁₂H₂₄. Thông thường người ta sử dụng thành phần hóa học trung bình của diesel là C₁₂H₂₃. Diesel có nhiệt độ tự cháy 483K. Lượng không khí trong buồng cháy mô phỏng nêu trên có thể dùng để đốt cháy hoàn toàn 0,4g diesel. Trong tính toán ta chọn lưu lượng nhiên liệu ra khỏi vòi phun là 0,01kg/s và 0,005kg/s. Thời gian phun là 5ms, do đó lượng nhiên liệu diesel phun vào buồng cháy tương ứng là 0,05g và 0,025g tức chiếm 12,5% và 6,25% lượng nhiên liệu diesel cực đại có thể phun vào buồng cháy.

Những điều kiện trên là điều kiện đầu vào cơ bản để tính toán sự phát triển và bay hơi của tia phun diesel bằng phần mềm FLUENT. Hình 2 giới thiệu sự phát triển của tia phun diesel trong hỗn hợp giả định gồm 80% không khí và 20% CH₄, áp suất buồng cháy 3 bar, nhiệt độ 325K. Chúng ta thấy sau khi kết thúc phun tại thời điểm 5ms, tia phun bắt đầu phân rã mạnh biến dần thành đám mây hạt nhiên liệu, đi xa dần miệng vòi phun. Khi đám mây hạt dần nở theo thời gian, các hạt nhiên liệu bay hơi nhanh dần, số lượng hạt giảm dần và nồng độ hơi nhiên liệu tăng lên trong buồng cháy.



Hình 2. Sự phát triển tia phun diesel trong hỗn hợp biogas-không khí ($p=3$ bar)



Hình 3. Sơ phác triển tia phun diesel trong môi trường hỗn hợp biogas-không khí ($p=10$ bar)

Hình 3 giới thiệu biến thiên tia phun diesel trong cùng điều kiện như trên, nhưng với áp suất buồng cháy 10 bar. Do áp suất trong buồng cháy tăng cao, độ xuyênh thấu của tia phun giảm, dám mây hạt phân tán gần miệng vòi phun. Cùng nhiệt độ môi trường, tốc độ bay hơi của nhiên liệu ở áp suất cao thấp hơn trường hợp áp suất thấp. Nếu nhiệt độ không tăng thì số lượng hạt bay hơi giảm đi rất ít và nồng độ hơi nhiên liệu trong buồng cháy gần như ổn định.

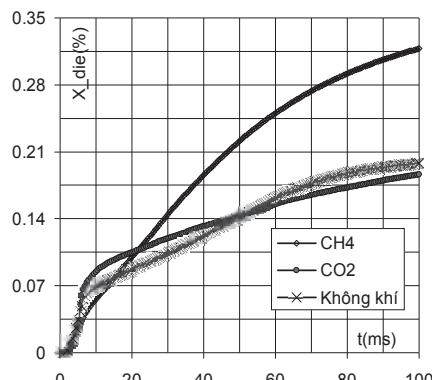
3. Kết quả và bình luận

3.1. Ảnh hưởng của thành phần môi chất trong buồng cháy

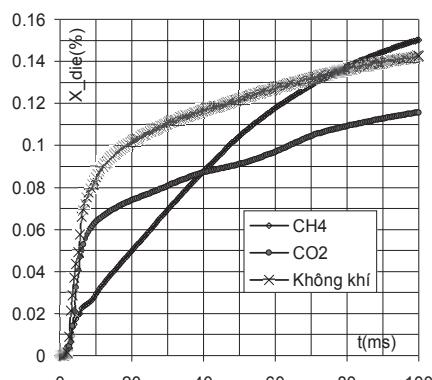
Hình 4a và Hình 4b giới thiệu biến thiên nồng độ hơi nhiên liệu diesel trong buồng cháy ở cùng điều kiện nhiệt độ, áp suất và điều kiện phun tia diesel trong buồng cháy chứa lần lượt các chất CH_4 , CO_2 và không khí ở áp suất 3 bar và 5 bar. Chúng ta thấy ở áp suất buồng cháy thấp thì đường cong bay hơi nhiên liệu diesel trong trường hợp buồng cháy chứa không

khí gần với trường hợp buồng cháy chứa CO_2 . Tuy nhiên ở áp suất buồng cháy cao thì đường cong bay hơi nhiên liệu diesel trong trường hợp buồng cháy chứa không khí lại tiêm cận dần với trường hợp buồng cháy chứa CH_4 .

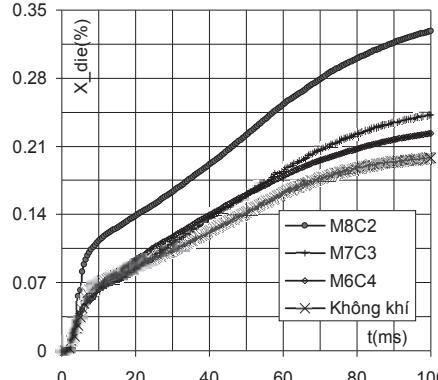
Hình 5a và Hình 5b so sánh biến thiên nồng độ hơi nhiên liệu diesel trong trường hợp buồng cháy chứa hỗn hợp không khí với các nhiên liệu biogas khác nhau. Chúng ta thấy trong cùng điều kiện áp suất, nhiệt độ của buồng cháy và điều kiện phun, tia phun bay hơi càng nhanh khi hàm lượng CH_4 trong biogas càng cao. Khi áp suất buồng cháy thấp, đường cong bay hơi trong trường hợp buồng cháy chứa không khí gần với đường cong bay hơi trong trường hợp biogas chứa hàm lượng CH_4 thấp. Khi áp suất trong buồng cháy tăng cao thì đường cong bay hơi nhiên liệu diesel trong trường hợp buồng cháy chứa không khí gần với trường hợp nhiên liệu biogas chứa hàm lượng cao CH_4 .



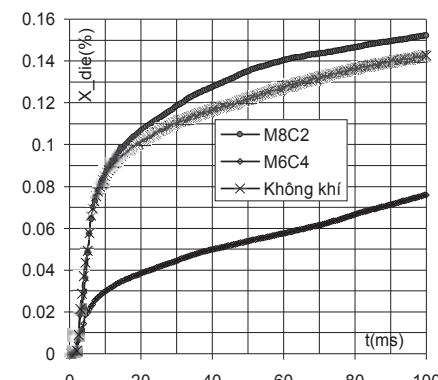
Hình 4a. Ảnh hưởng của môi chất trong buồng cháy đến biến thiên nồng độ hơi diesel theo thời gian ($p=3$ bar, $T=450$ K, $Q=0,01$ kg/s)



Hình 4b. Ảnh hưởng của môi chất trong buồng cháy đến biến thiên nồng độ hơi diesel theo thời gian ($p=5$ bar, $T=450$ K, $Q=0,01$ kg/s)



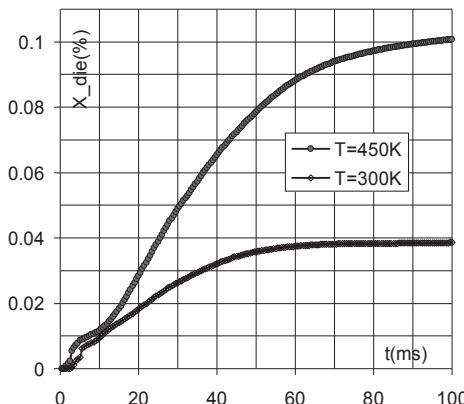
Hình 5a. Ảnh hưởng nồng độ CH_4 trong biogas đến biến thiên nồng độ hơi diesel ($p=3$ bar, $T=450$ K, $Q=0,01$ kg/s)



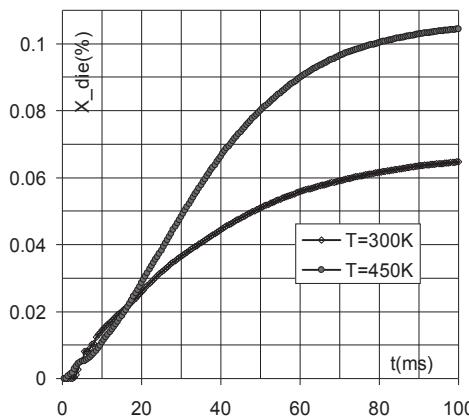
Hình 5b. Ảnh hưởng nồng độ CH_4 trong biogas đến biến thiên nồng độ hơi diesel ($p=5$ bar, $T=450$ K, $Q=0,01$ kg/s)

3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ môi chất trong buồng cháy

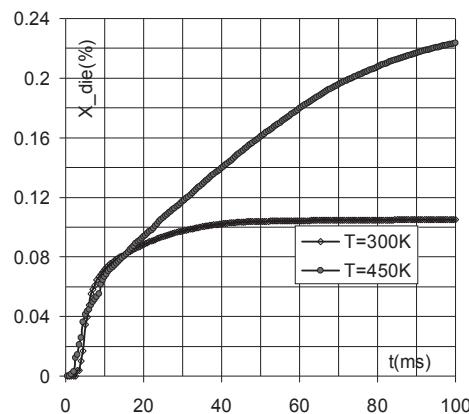
Nhiệt độ môi trường ảnh hưởng rất lớn đến tốc độ bay hơi của hạt nhiên liệu. Hình 6 giới thiệu biến thiên nồng độ hạt nhiên liệu diesel phun trong môi trường không khí ở áp suất môi trường 3 bar. Kết quả cho thấy ở $t=100\text{ms}$, nồng độ hơi nhiên liệu diesel trong buồng cháy chứa môi chất có nhiệt độ 450K, gấp 2,5 lần so với nồng độ hơi nhiên liệu trong trường hợp nhiệt độ môi chất 300K.



Hình 6. Ảnh hưởng nhiệt độ môi chất đến biến thiên nồng độ hơi diesel (Không khí, $p=3\text{bar}$, $Q=0,005\text{kg/s}$)



Hình 7a. Ảnh hưởng nhiệt độ môi chất đến biến thiên nồng độ hơi diesel ($M8C2$, $p=3\text{bar}$, $Q=0,005\text{kg/s}$)



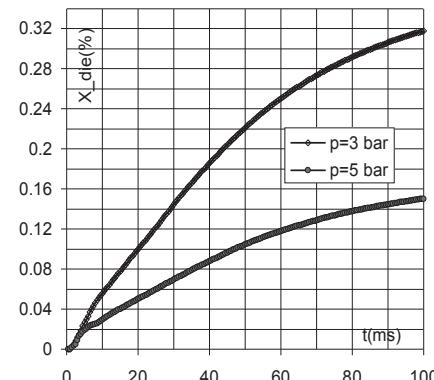
Hình 7b. Ảnh hưởng nhiệt độ môi chất đến biến thiên nồng độ hơi diesel ($M6C4$, $p=3\text{bar}$, $Q=0,01\text{kg/s}$)

Ảnh hưởng của nhiệt độ buồng cháy đến biến thiên nồng độ hơi nhiên liệu khi phun tia diesel trong môi trường chứa hỗn hợp biogas-không khí cũng theo qui luật tương tự như trường hợp tia phun trong môi trường không khí. Hình 7a và Hình 7b giới thiệu ảnh hưởng của nhiệt độ buồng cháy đến biến thiên nồng độ hơi nhiên liệu diesel

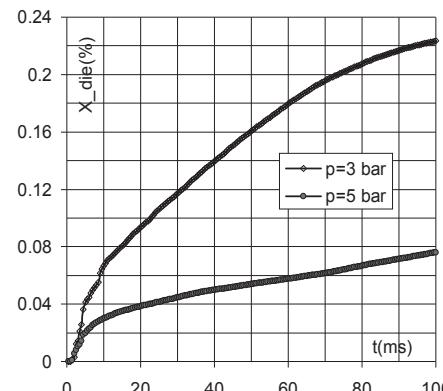
theo thời gian với cùng điều kiện phun trong môi trường hỗn hợp không khí-biogas chứa thành phần CH_4 khác nhau. Chúng ta thấy ở điều kiện nhiệt độ buồng cháy thấp, nồng độ hơi nhiên liệu diesel đạt giá trị bão hòa sớm hơn trong trường hợp nhiệt độ buồng cháy cao. Tại thời điểm $t=100\text{ms}$ nồng độ hơi nhiên liệu diesel trong buồng cháy trong trường hợp nhiệt độ buồng cháy 450K gấp khoảng 2 lần so với trường hợp nhiệt độ buồng cháy 300K.

3.3. Ảnh hưởng của áp suất trong buồng cháy

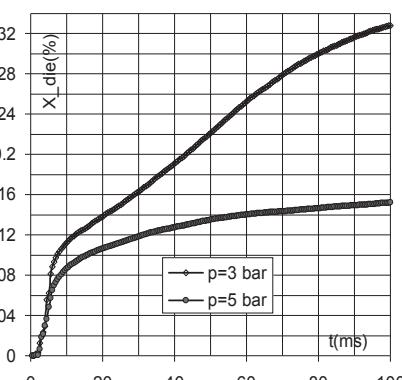
Như đã phân tích sự phát triển đám mây hạt nhiên liệu diesel trong buồng cháy ở áp suất khác nhau trình bày trên các Hình 2 và Hình 3, khi áp suất buồng cháy tăng cao, độ xuyênh thâm của tia phun rút ngắn, đám mây hạt bay hơi chậm dần đến nồng độ hơi nhiên liệu trong buồng cháy ổn định sớm, nhưng ở mức thấp hơn trong trường hợp áp suất buồng cháy thấp.



Hình 8. Ảnh hưởng áp suất buồng cháy đến biến thiên nồng độ hơi diesel (CH_4 , $T=450\text{K}$, $Q=0,01\text{kg/s}$)

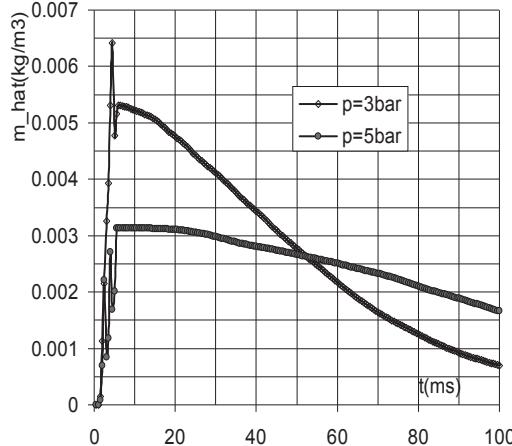


Hình 9a. Ảnh hưởng áp suất buồng cháy đến biến thiên nồng độ hơi diesel ($M6C4$, $T=450\text{K}$, $Q=0,01\text{kg/s}$)

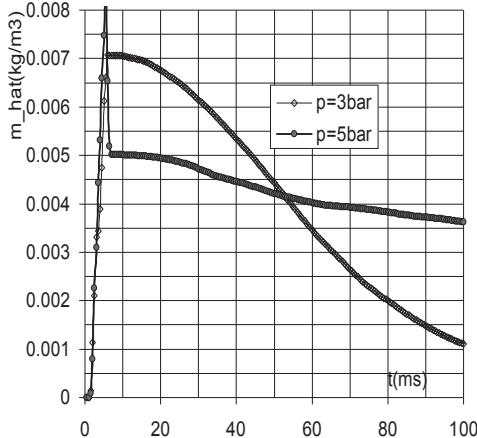


Hình 9b. Ảnh hưởng áp suất buồng cháy đến biến thiên nồng độ hơi diesel ($M8C2$, $T=450\text{K}$, $Q=0,01\text{kg/s}$)

Hình 8 so sánh biến thiên nồng độ hơi nhiên liệu diesel theo thời gian khi phun trong môi trường chứa CH₄ ở áp suất 3 bar và 5 bar. Chúng ta thấy nồng độ hơi nhiên liệu gần như tỉ lệ nghịch với áp suất trong buồng cháy. Kết quả tương tự cũng nhận được khi phun trong môi trường hỗn hợp không khí-biogas chứa thành phần CH₄ khác nhau (Hình 9a và Hình 9b). Khi nồng độ CH₄ trong biogas càng cao thì ảnh hưởng của áp suất càng giảm. Ở thời điểm 100ms, tỉ lệ nồng độ hơi nhiên liệu diesel trong hỗn hợp ở áp suất 3 bar và 5 bar đối với nhiên liệu M8C2 và M6C4 theo thứ tự là 2,2 và 3.



Hình 10a. Ảnh hưởng của áp suất buồng cháy đến biến thiên mật độ khối lượng hạt nhiên liệu theo thời gian ($M6C4, T=450K, Q=0,01kg/s$)



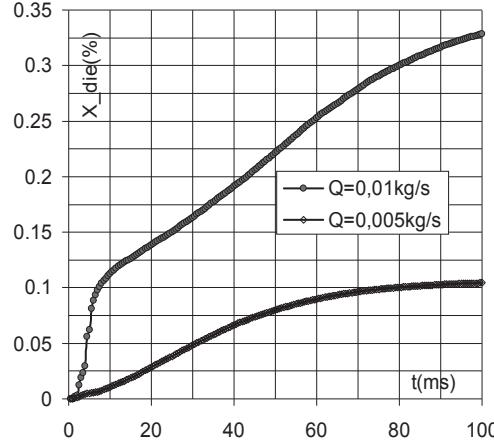
Hình 10b. Ảnh hưởng của áp suất buồng cháy đến biến thiên mật độ khối lượng hạt nhiên liệu theo thời gian ($M8C2, T=450K, Q=0,01kg/s$)

Ảnh hưởng của áp suất trong buồng cháy đến quá trình bay hơi của hạt nhiên liệu diesel có thể giải thích rõ ràng hơn trên các Hình 10a và Hình 10b về biến thiên mật độ hạt (kg/m³) theo thời gian. Kết quả mô phỏng cho thấy sau khi kết thúc phun, mật độ hạt trong trường hợp p=5 bar gần như ổn định. Trong khi đó, trong trường hợp p=3 bar, mật độ hạt tiếp tục giảm do các hạt tiếp tục bay hơi.

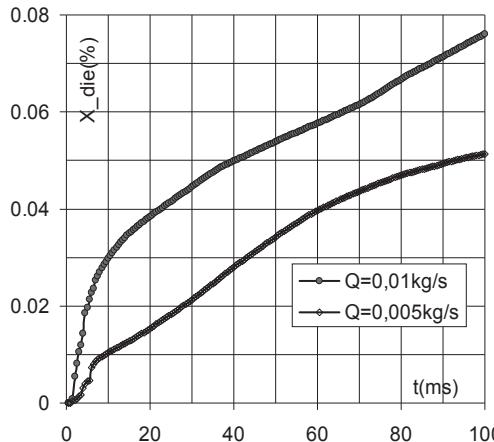
3.4. Ảnh hưởng của lưu lượng phun

Ảnh hưởng của lưu lượng phun đến biến thiên nồng độ hơi diesel theo thời gian được trình bày trên các Hình 11a và Hình 11b. Kết quả tính toán cho thấy, khi lưu lượng phun tăng thì nồng độ hơi nhiên liệu diesel tại một thời điểm cho trước sau khi phun cũng tăng. Tốc độ tăng nồng

độ hơi nhiên liệu khi lưu lượng phun lớn cao hơn tốc độ tăng nồng độ hơi nhiên liệu khi tốc độ phun bé. Do đó để hỗn hợp bay hơi nhanh, tạo điều kiện cho quá trình cháy diễn ra hoàn toàn chúng ta nên tăng lưu lượng phun, nhưng giảm thời gian phun để đảm bảo lượng nhiên liệu cung cấp cho một chu trình không thay đổi.



Hình 11a. Ảnh hưởng của lưu lượng phun đến biến thiên nồng độ hơi nhiên liệu diesel ($M8C2, T=450K, p=3 \text{ bar}$)



Hình 11b. Ảnh hưởng của lưu lượng phun đến biến thiên nồng độ hơi nhiên liệu diesel ($M6C4, T=450K, p=5 \text{ bar}$)

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu trên đây cho phép chúng ta rút ra được những kết luận sau đây:

Bay hơi của tia phun diesel trong môi trường không khí gần với môi trường CO₂ ở điều kiện áp suất buồng cháy thấp và gần với môi trường CH₄ ở điều kiện áp suất buồng cháy cao. Ảnh hưởng của hỗn hợp không khí-biogas trong buồng cháy phụ thuộc vào tỉ lệ CH₄/CO₂ trong nhiên liệu.

Trong cùng điều kiện phun và thành phần hỗn hợp môi chất, bay hơi của tia diesel giảm khi áp suất buồng cháy tăng, nhưng tăng mạnh khi tăng nhiệt độ của hỗn hợp trong buồng cháy. Nồng độ hơi nhiên liệu diesel giảm 2 đến 3 lần khi áp suất tăng từ 3 bar lên 5 bar trong cùng điều kiện nhiệt độ.

Cùng một lượng phun, khi tăng lưu lượng phun theo thời gian thi tốc độ bay hơi của hạt nhiên liệu diesel tăng. Do đó, để cải thiện quá trình bay hơi và đánh lửa của động cơ dual fuel biogas-diesel chúng ta nên rút ngắn thời gian nhưng tăng lưu lượng phun.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Faeth, G.M., Hsiang, L.-P., Wu, P.-K., Structure and Breakup Properties of Sprays, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 21, Suppl. pp. 99-127, 1995.
- [2] Chryssakis, C., Assanis, D.N., A Unified Fuel Spray Breakup Model for Internal Combustion Engine. Applications, *Atomization and Sprays*, Vol. 18, No. 5, pp. 375-426, 2008.
- [3] Zhao H; Ladommatos N (1998) Optical diagnostics for in-cylinder mixture formation measurements in IC engines. *Progr. Energy Combust. Sci.* 24, 297-336.
- [4] Bruneaux G (2005), *Mixing process in high pressure Diesel jets by normalized laser induced exciplex fluorescence – Part I: free jet*, SAE Technical Paper Series 2005-01-2100.
- [5] Kim T; Ghandhi J B (2001), Quantitative 2-D Fuel Vapor Concentration Measurements in an Evaporating Diesel Spray using the Exciplex Fluorescence Method, *SAE Technical Paper Series* 2001-01-3495.
- [6] Payri F; Pastor J V; Pastor J M; Julia J E (2006), Diesel Spray Analysis by Means of Planar Laser-Induced Exciplex Fluorescence,
- [7] Arai M., Tabata M., Shimizu M. y Hiroyasu H. (1984) "Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle". SAE Technical Paper 840275.
- [8] Payri F., Desantes J. M. y Arruegle J. (1996) "Characterization of D.I. Diesel Sprays in High Density Conditions". SAE Technical Paper 960774.
- [9] Bùi Văn Ga, Lê Minh Tiết, Nguyễn Văn Anh, Võ Anh Vũ, "Mô phỏng quá trình cháy động cơ dual fuel biogas-diesel", *Tuyển tập Hội nghị Khoa học Cơ học Thủy khí toàn quốc*, Phan Rang, 24-26/7/2014, pp. 164-173.
- [10] Bui Van Ga, Tran Van Nam, Le Minh Tien, Bui Thi Minh Tu: Combustion Analysis of Biogas Premixed Charge Diesel Dual Fuelled Engine. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 3 Issue 11, November-2014, pp. 188-194.
- [11] Bùi Văn Ga, Nguyễn Việt Hải, Nguyễn Văn Anh, Võ Anh Vũ, Bùi Văn Hùng, "Phân tích biến thiên áp suất trong động cơ dual fuel biogas-diesel cho bối mô phỏng và thực nghiệm", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng*, số 01(86), 2015, pp.24-29.

(BBT nhận bài: 26/02/2016, phản biện xong: 14/3/2016)