

# JTST - JOURNAL OF TRANSPORTATION SCIENCE & TECHNOLOGY

MANUSCRIPT ID: JIST-2022-0010

## NGHIÊN CỨU QUÁ TRÌNH BAY HƠI VÀ HÒA TRỘN HỖN HỢP TRONG ĐỘNG CƠ PHUN XĂNG TRỰC TIẾP SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG SỐ

<b>Manuscript ID</b>	JIST-2022-0010
<b>Full title</b>	Nghiên Cứu Quá Trình Bay Hơi Và Hòa Trộn Hỗn Hợp Trong Động Cơ Phun Xăng Trực Tiếp Sử Dụng Phương Pháp Mô Phỏng Số
<b>Summary</b>	<p>Động cơ phun xăng trực tiếp (GDI) cho thấy các ưu điểm so với kiểu động cơ phun xăng trên đường ống nạp, về tính kinh tế nhiên liệu và giảm thiểu ô nhiễm. Nghiên cứu này trình bày các thay đổi của tia phun nhiên liệu sau khi phun vào trong xi lanh cho một động cơ GDI vận hành tại chế độ một phần tải. Nghiên cứu tập trung vào quá trình hình thành hỗn hợp sau khi phun nhiên liệu tại cuối quá trình nén (từ 60oCA quay trực khuỷu (CA) trước điểm chết trên (bTDC) đến 40oCA bTDC). Qua đó, đã cho thấy quá trình bay hơi nhiên liệu hấp thụ nhiệt của không khí nén; giúp hiệu quả trong việc tăng tỉ số nén động cơ. Trong quá trình phun và sau khi phun, một phần nhiên liệu chạm vào bề mặt đỉnh piston. Hơn nữa, nghiên cứu còn chỉ ra sự chạm bay hơi của nhiên liệu trong buồng đốt động cơ.</p>
<b>Research Topic</b>	Cơ khí ô tô
<b>Keywords</b>	Bay hơi nhiên liệu; GDI; hình thành hỗn hợp; phun xăng trực tiếp
<b>Authors</b>	- Sa Nguyễn Thành, Email: sa.nguyen@ut.edu.vn, School: Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, Faculty: .
<b>Corresponding author</b>	Sa Nguyễn Thành, Email: sa.nguyen@ut.edu.vn, School: Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, Faculty: .
<b>Funding</b>	NO

# Nghiên cứu quá trình bay hơi và hòa trộn hỗn hợp trong động cơ phun xăng trực tiếp sử dụng phương pháp mô phỏng số

## Research on evaporation and mixture process in gdi engine using numerical simulation method

Nguyễn Thành Sa

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Email liên hệ: sa.nguyen@ut.edu.vn

### Tóm tắt:

Động cơ phun xăng trực tiếp (GDI) cho thấy các ưu điểm so với kiểu động cơ phun xăng trên đường ống nạp, về tính kinh tế nhiên liệu và giảm thiểu ô nhiễm. Nghiên cứu này trình bày các thay đổi của tia phun nhiên liệu sau khi phun vào trong xi lanh cho một động cơ GDI vận hành tại chế độ một phần tải. Nghiên cứu tập trung vào quá trình hình thành hỗn hợp sau khi phun nhiên liệu tại cuối quá trình nén (từ 60° góc quay trục khuỷu (CA) trước điểm chết trên (bTDC) đến 40°CA bTDC). Qua đó, đã cho thấy quá trình bay hơi nhiên liệu hấp thụ nhiệt của không khí nén; giúp hiệu quả trong việc tăng tỉ số nén động cơ. Trong quá trình phun và sau khi phun, một phần nhiên liệu chạm vào bề mặt đỉnh piston. Hơn nữa, nghiên cứu còn chỉ ra sự chậm bay hơi của nhiên liệu trong buồng đốt động cơ.

**Từ khóa:** Bay hơi nhiên liệu; GDI; hình thành hỗn hợp; phun xăng trực tiếp.

### Abstract:

GDI engines indicated an improvement in fuel efficiency and reducing emission in comparison with intake port-fuel injection engines. This study research the behaviors of injected fuel into the GDI engine chamber for a part load. The study focus on the mixture process after fuel injection in compression stroke (from 60°CA BTDC to 40°CA BTDC). The study results indicated that the gasoline evaporation process will absorb an amount of heat from compressed air. This is an advantage factor for increasing of compression ratio. During the injection process and after injection, the fuel within the combustion chamber nearly touches the top surface of the piston. Moreover, the study also shows the vapor delay timing of fuel in the chamber.

**Keywords:** Fuel evaporation; GDI; mixture formation; direct injection.

### 1. Giới thiệu

Cuối những năm 1990, động cơ xăng phun nhiên liệu trực tiếp trong buồng đốt đã được sử dụng cho ô tô nhằm mục đích cải thiện tính kinh tế nhiên liệu và giảm thiểu khí thải CO<sub>2</sub> [1]. Công nghệ then chốt của những động cơ GDI so với các động cơ phun xăng trên đường ống nạp

là nhiên liệu được phun trực tiếp đến xi lanh với áp suất cao lên đến 120 bar [2].

Các động cơ GDI vận hành trong hai chế độ: Chế độ đốt cháy sạch và chế độ công suất cao. Do đó, các động cơ GDI có khả năng cho hiệu suất nhiên liệu tốt và cả công suất – moment lớn [3]. Các động cơ GDI được thiết kế vận hành theo hai chế độ. Ở chế độ một phần tải, động cơ phun nhiên liệu cuối kỳ nén, hỗn hợp nhiên liệu

có đặc tính đậm ở vùng gần bugi và loãng ở các vùng khác. Tuy nhiên ở chế độ đầy tải nhiên liệu được phun vào suốt quá trình nạp nhằm tạo điều kiện hòa trộn hỗn hợp khi tốc độ động cơ cao do đó có công suất động cơ tăng [4]. Như vậy, trong động cơ GDI, quá trình tạo hỗn hợp đóng vai trò quyết định đến tỉ lệ hòa khí, vận tốc cháy và chất lượng quá trình cháy. Vận động xoáy lốc dòng khí trong buồng đốt, quá trình bay hơi, hòa trộn nhiên liệu là yếu tố quan trọng, là cơ sở thiết kế kết cấu động cơ phù hợp.

Rossella Rotondi [5] nghiên cứu động cơ xăng một xi lanh, dung tích 459,5 cm<sup>3</sup>, áp suất phun nhiên liệu thay đổi trong phạm vi từ 40 đến 130 bar. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng tia phun nhiên liệu sau khi phun là khá tương đồng với kết quả thực nghiệm; từ đó giải thích các vấn đề về bay hơi nhiên liệu.

Áp suất buồng đốt cũng ảnh hưởng đến đặc tính tia nhiên liệu, điều này được thể hiện khá rõ trong nghiên cứu của J. Gao [6]. Tác giả kết hợp nghiên cứu mô phỏng và thực nghiệm xem xét ảnh hưởng tia phun nhiên liệu ở các áp suất khác nhau trong động cơ GDI. Nghiên cứu chỉ ra khác biệt giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng số ở đặc tính tia phun như cấu trúc tia, độ sâu tia phun thâm nhập buồng đốt, kích cỡ hạt tia phun. Ngoài ra so sánh sự tương đồng giữa các chương trình mô phỏng số và với kết quả thực nghiệm cũng được xem xét. Yong Jin Kim [7] đánh giá về ảnh hưởng của chuyển động dòng không khí đến đặc tính tia phun nhiên liệu động cơ GDI sử dụng KIVA-3V và STAR CD. Tác giả giải thích ảnh hưởng của đỉnh piston đến cường độ xoáy và phân bố tỉ lệ hỗn hợp thông qua mô phỏng số hai kiểu đỉnh piston khác nhau.

Alessandro Montanaro nghiên cứu những thay đổi của tia phun sau quá trình phun nhiên liệu với áp suất rất cao trong kim phun nhiều lỗ. Từ các kết quả, tác giả đề xuất giải pháp cải thiện chất lượng phun dựa trên các yếu tố về độ

sâu thâm nhập tia phun trong buồng đốt, đường kính hạt nhiên liệu [8].

Ngoài ra, trong quá trình thâm nhập vào trong xi lanh của tia nhiên liệu, một phần nhiên liệu có thể chạm vào thành buồng đốt. Quá trình bay hơi nhiên liệu có tác dụng làm mát đỉnh piston [9]. Mô phỏng quá trình bay hơi dựa trên mô hình bay hơi đa thành phần và so sánh với kết quả thực nghiệm sử dụng camera quan sát tốc độ cao. Các kết quả nghiên cứu bay hơi, phân bố nhiên liệu là cơ sở đánh giá sự hình thành của khí thải hydro carbon HC và hạt muội PM.

Trong động cơ xăng, sự cháy của hỗn hợp không khí – nhiên liệu vừa phụ thuộc vào sự phân bố của chính hỗn hợp trong buồng đốt, vừa phụ thuộc vào tác nhân gây kích thích sự cháy. Kết quả nghiên cứu về sự bay hơi, hòa trộn hỗn hợp là tiền đề cho việc bố trí kim phun, bố trí bugi đánh lửa, thời điểm đánh lửa [10].

## 2. Mô hình mô phỏng

Trong nghiên cứu này, AVL Fire được sử dụng cho mô phỏng dòng không khí nén bên trong xi lanh và quá trình hình thành của hỗn hợp hòa khí. Chương trình ứng dụng cho trường hợp mô phỏng dòng chảy nén được. Mô hình rối cũng được kết hợp trong quá trình giải bài toán dòng khí nén ở vận tốc cao, đặc biệt ảnh hưởng trên các bề mặt biên khảo sát. Lý thuyết mô phỏng dòng chảy chủ yếu chi phối bởi các phương trình bảo toàn: Bảo toàn khối lượng (phương trình liên tục), bảo toàn động lượng và bảo toàn năng lượng.

### 2.1. Các phương trình bảo toàn

Mô phỏng số dựa trên phương pháp thể tích hữu hạn; sau khi rời rạc miền tính toán, xác định các giá trị tại tâm của từng thể tích nhỏ trong toàn bộ miền tính toán. Phương trình chi phối dòng lưu chất khí trong xi lanh được áp dụng giải các giá trị vận tốc, áp suất, nhiệt độ tại từng tâm thể tích hữu hạn như:

- Phương trình liên tục

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j)$$

Trong đó:

$\rho$ : Mật độ dòng chảy;

$U$ : Vận tốc dòng lưu chất trong một thể tích xem xét.

- Phương trình moment

Dạng cuối cùng của phương trình bảo toàn moment được diễn tả như sau:

$$\rho \frac{DU_i}{Dt} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right]$$

Trong đó:

$g$ : Gia tốc trọng trường;

$p$ : Áp suất bên trong thể tích xem xét;

$\mu$ : Độ nhớt phân tử;

$\sigma_{ij}$ : Ứng suất nhớt.

- Phương trình năng lượng

Nghiên cứu dòng khí bên trong xi lanh có liên quan đến quá trình truyền nhiệt giữa môi chất và vách xi lanh, giữa các phân tử trong môi chất khảo sát với nhau. Do đó phương trình năng lượng được sử dụng và diễn tả như sau:

$$\rho \frac{DH}{Dt} = \rho q + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} U_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)$$

Trong đó:

$H$ : Năng lượng bên trong thể tích xem xét;

$q$ : Nhiệt năng;

$\tau_{ij}$ : Tensor ứng suất;

$T$ : Nhiệt độ;

$\lambda$ : Hệ số dẫn nhiệt.

Trong quá trình mô phỏng, dạng chung của các phương trình bảo toàn sẽ được phân tích Reynolds. Sau khi phân tích Reynolds, dạng chuyển đổi của các phương trình bảo toàn còn

được gọi là các phương trình trung bình Reynolds.

Trong các phương trình trung bình Reynolds, xuất hiện một số biến chưa biết. Để xác định các biến này có thể kết hợp với các mô hình rối khác nhau. Trong nghiên cứu này, mô hình rối k- $\epsilon$  được sử dụng.

- Phương trình mô hình rối k- $\epsilon$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P + G - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)$$

Trong đó:

$P$ : ứng suất trung bình;

$G$ : lực vật thể

Các hệ số mô hình rối như sau:

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_{\epsilon 3}$	$C_{\epsilon 4}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$\sigma_\rho$
0.09	1.44	1.92	0.8	0.33	1	1.3	0.9

Việc áp dụng mô hình rối k- $\epsilon$  nhằm kết hợp với các phương trình bảo toàn giải bài toán dòng lưu chất có tính rối. Các giá trị về động năng rối  $k$  và độ tiêu tán rối  $\epsilon$  được xác định nhờ vào kết hợp từ mô hình rối, từ đó cho lời giải chính xác hơn.

## 2.2. Mô hình phun nhiên liệu

Nghiên cứu quá trình hình thành hỗn hợp có liên quan đến sự vận động của dòng khí nạp trong xi lanh và sự phun nhiên liệu, bay hơi, hòa trộn của tia phun nhiên liệu. Trong đó, mô phỏng tia phun nhiên liệu liên quan đến dòng chảy nhiều pha và yêu cầu giải quyết cho bài toán của pha khí – pha lỏng. Đối với pha lỏng, việc tính toán tia phun chủ yếu dựa vào phương pháp thống kê (Discrete Droplet Method–DDM) bằng cách giải các phương trình moment, truyền nhiệt và khối lượng cho từng hạt nhiên liệu riêng biệt. Sau đó, biến đổi của toàn bộ tia phun nhiên liệu được xác định dựa theo tính toán của từng hạt nhiên liệu riêng biệt.

- Phương trình tia phun nhiên liệu

$$m_d \frac{du_{id}}{dt} = F_{idr} + F_{ig} + F_{ip} + F_{ib}$$

Trong đó:

$F_{idr}$ : Lực cản;

$F_{ig}$ : Ảnh hưởng bởi lực trọng trường và lực căng bề mặt;

$F_{ip}$ : Lực áp suất trong xi lanh;

$F_{ib}$ : Tổng của các ngoại lực khác.

- Mô hình bay hơi hạt nhiên liệu

Có nhiều mô hình khác nhau cho sự mô phỏng hấp thụ nhiệt, hâm nóng và bay hơi của tia nhiên liệu sau khi phun vào xi lanh. Trong đó, các giá trị về hệ số truyền nhiệt, truyền khối lượng được sử dụng từ các kết quả thực nghiệm.

Trong nghiên cứu này, mô hình bay hơi đa thành phần (Multi-component Evaporation Model) được sử dụng; mô hình chủ yếu dựa trên tiếp cận của Abramzon–Sirignano [11]. Theo Abramzon–Sirignano, sự truyền nhiệt và truyền khối lượng trong các hạt nhiên liệu được mô hình bởi các màng khí có ma sát với độ dày các màng không đổi. Tỷ lệ về truyền khối lượng được sử dụng qua số thực nghiệm của Sherwood và Nusselt [12]. Trong mô hình bay hơi đa thành phần, sự bay hơi của từng thành phần được tính toán riêng biệt và chia tách nhau; sau đó sự bay hơi cho toàn bộ tia nhiên liệu được tính toán từ tổng của các hạt nhiên liệu thành phần.

- Mô hình phát tán nhiên liệu

Để đánh giá sự phát tán của tia phun nhiên liệu, nghiên cứu chủ yếu dựa vào mô hình WAVE tiêu chuẩn. Mô hình cho rằng sự phát triển của nhiễu loạn trên các bề mặt hạt nhiên liệu có liên quan đến độ dài sóng của chính hạt nhiên liệu đó. Sự nhiễu loạn của hạt nhiên liệu sau khi ra khỏi kim phun trong một tia phun nhiên liệu phụ thuộc nhiều vào các thông số của hệ thống phun nhiên liệu động cơ đang sử dụng.

Sau khi phun nhiên liệu vào xi lanh, hình thành hai vùng phát tán căn cứ theo vận tốc tương đối giữa hạt nhiên liệu và dòng khí trong xi lanh. Vùng có vận tốc tương đối cao, kích cỡ các hạt nhiên liệu bị triệt tiêu nhanh trong sự cân bằng với chiều dài sóng ở tốc độ nhanh nhất.

Vùng có vận tốc tương đối thấp, các hạt nhiên liệu có kích cỡ lớn hơn, thậm chí lớn hơn so với trước đó do sự gắn kết nhiều hạt với nhau. Cho các động cơ có hệ thống phun nhiên liệu áp suất cao, vùng phát tán có vận tốc tương đối thấp chiếm tỉ lệ rất ít và có thể bỏ qua trong tính toán.

### 3. Mô phỏng động cơ đốt trong

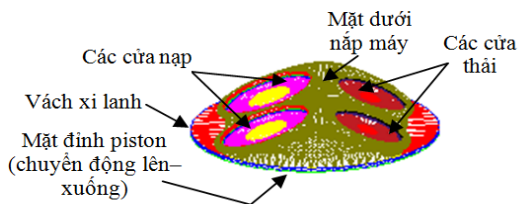
Mô hình động cơ sử dụng cho nghiên cứu là một động cơ GDI đối xứng qua đường trục xi lanh, các thông số như bảng 1. Vị trí của bugi được đặt trên nắp máy và hướng xuống đường tâm piston, trong khi đó vị trí kim phun được đặt gần bugi và nghiêng một góc 45° so với đường tâm xi lanh.

**Bảng 1.** Các thông số động cơ mô phỏng.

Thông số	Giá trị
Loại động cơ	GDI xi lanh đơn
Tỉ số nén	13
Đường kính [mm]	80
Khoảng chạy [mm]	81.4
Dung tích [cm <sup>3</sup> ]	441
Số vòng quay (rpm)	2000
Điểm phun nhiên liệu (°CA)	60

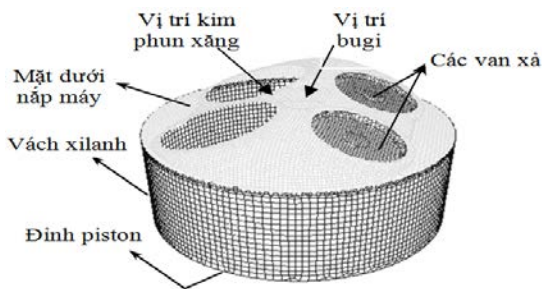
Vùng mô phỏng cho nghiên cứu quá trình bay hơi và hòa trộn nhiên liệu sau khi phun được hình thành bởi các cửa nạp, các cửa thải, mặt dưới nắp máy, piston, vách xi lanh,... Tùy theo vị trí của piston làm thay đổi thể tích bên trong xi lanh, vùng mô phỏng nhỏ nhất khi piston ở TDC như minh họa hình 1. Mô phỏng CFD của động cơ trong nghiên cứu này sử dụng lưới động, mỗi vị trí của piston tương ứng với những

lưới khác nhau và quá trình mô phỏng từ bắt đầu của hành trình nén (180°CA) đến kết thúc của hành trình nén (0°CA).



**Hình 1.** Buồng đốt động cơ GDI khi piston ở TDC.

Cấu trúc lưới lục giác được sử dụng trong nghiên cứu này, thực hiện việc tạo lưới động theo góc quay trục khuỷu. Số lượng các ô lưới tạo ra khác nhau 250,000 - 450,000 ô cho các vị trí piston khác nhau từ điểm chết trên đến điểm chết dưới; trong đó 50% của mật độ lưới tập trung ở vùng đỉnh piston và các van nạp.



**Hình 2.** Minh họa lưới tại kỳ nén khi piston ở 100°CA bTDC.

Trong quá trình mô phỏng, các điều kiện biên cần được cung cấp cho việc tính toán nội suy các giá trị áp suất, vận tốc bên trong vùng tính toán; một số giá trị điều kiện biên như minh họa ở bảng 2. Ngoài ra các giá trị ban đầu về thông số dòng khí cũng được cung cấp trước khi bắt đầu mô phỏng.

**Bảng 2.** Một số giá trị điều kiện biên.

Điều kiện biên	Giá trị, nhiệt độ [K]
Piston	450 [K], di chuyển
Van nạp	330 [K]
Van xả	550 [K]
Buồng đốt	450 [K]
Vách xi lanh	450 [K]

Mô hình và các thông số của sự phun nhiên liệu được đưa vào cho việc phân tích quá trình hình thành hỗn hợp trong động cơ GDI. Kim phun nhiên liệu là loại có 6 lỗ tia phun với góc phun 60°. Các thông số cho phun nhiên liệu được trình bày ở bảng 3.

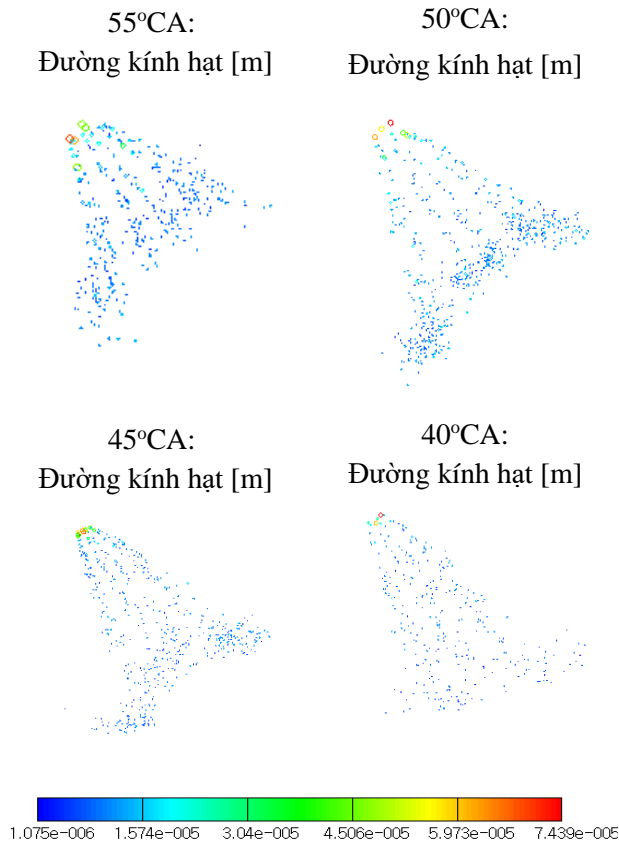
**Bảng 3.** Các thông số kim phun.

Thông số	Giá trị
Vị trí đặt	Nghiêng 45° so với đường tâm piston
Số lỗ tia	6
Góc phun [°]	60
Tỉ lệ phun	1 (tuyến tính theo CA)
Kích cỡ hạt [µm]	10-50

Như trên đã trình bày, mô hình rối k-ε được sử dụng cho bài toán dòng chảy tốc độ cao. Nghiên cứu sử dụng giải thuật SIMPLE để xác định các giá trị vận tốc và áp suất tại các ô lưới. Vùng mô phỏng sau khi được rời rạc thành các thể tích hữu hạn và hệ các tọa độ tại tâm từng thể tích hữu hạn, căn cứ vào điều kiện ban đầu, điều kiện biên để xác định các giá trị vận tốc, áp suất tại các điểm biên dựa trên phương trình liên tục và phương trình moment. Phương pháp ngoại suy được áp dụng để xác định giá trị áp suất, vận tốc cho điểm của thể tích hữu hạn lân cận. Sau đó sử dụng phương trình năng lượng, phương trình rối để xác định yếu tố nhiệt và mật độ trong dòng chất lưu. Giải pháp lặp tuần tự để cập nhật giá trị áp suất, vận tốc mới cho điểm thể tích hữu hạn đến khi thỏa điều kiện hội tụ về số dư sau mỗi lần lặp.

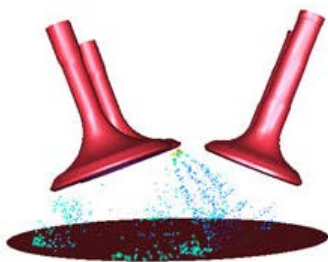
#### 4. Kết quả mô phỏng

Sự phun nhiên liệu trực tiếp và các quá trình diễn ra sau đó có thể được xác định bằng việc xem xét những thay đổi của tia phun nhiên liệu sau khi phun. Nhiên liệu bắt đầu phun tại 60°CA trước điểm chết trên và thời đoạn phun là 20°CA.



**Hình 3.** Tia phun nhiên liệu sau khi vào buồng đốt tại các góc quay trục khuỷu khác nhau.

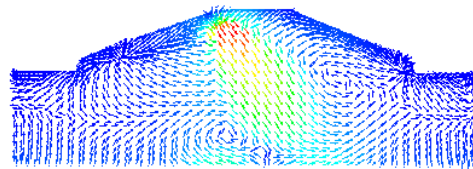
Trong suốt quá trình phun, các hạt nhiên liệu có đường kính lớn nhất tập trung chủ yếu tại gần vòi phun. Dưới áp lực phun lớn các hạt nhiên liệu thâm nhập vào buồng đốt và bị bay hơi. Tại kết thúc quá trình phun, các hạt nhiên liệu có đường kính rất bé và sẽ tiếp tục bay hơi hình thành hỗn hợp hòa khí. Sự bay hơi nhanh của tia phun nhiên liệu là hệ quả của việc phun tới dưới áp suất phun cao, nhiệt độ môi chất trong buồng cháy cao và đặc tính dễ bay hơi của nhiên liệu xăng.



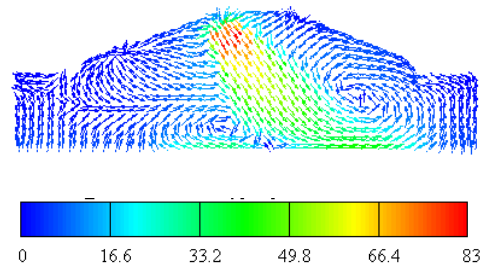
**Hình 4.** Phương của tia phun nhiên liệu sau khi ra khỏi vòi phun.

Trong các động cơ cao tốc, chuyển động lên xuống với tốc độ cao của piston là một trong các nguyên nhân gây ra những chuyển động xoáy lốc dòng khí bên trong xi lanh. Sự vận động xoáy lốc dòng khí có vai trò rất lớn trong việc hình thành, phân tán hòa khí và giúp cho quá trình cháy sau đó diễn ra mãnh liệt hơn, triệt để hơn. Trên các động cơ GDI, thiết kế động cơ với sự tăng cường vận động xoáy lốc dòng khí càng có ý nghĩa quan trọng. Tại cuối quá trình nén, dưới sự thâm nhập của tia phun nhiên liệu chắc chắn sẽ ảnh hưởng đến sự vận động của dòng khí đang bị nén.

45°C: Vận tốc dòng khí



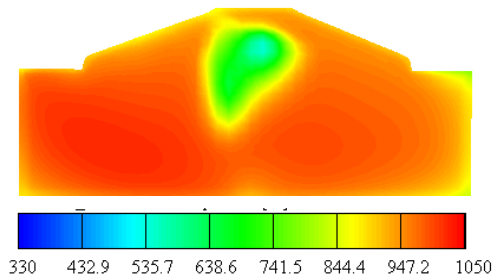
40°C: Vận tốc dòng khí



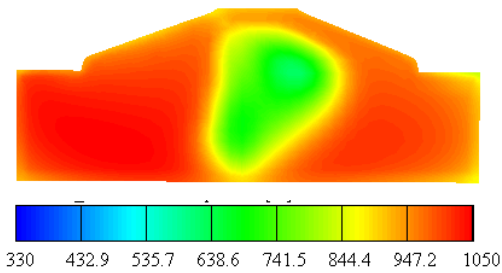
**Hình 5.** Vận động dòng khí trong xi lanh dưới ảnh hưởng của tia phun nhiên liệu.

Vận tốc không khí nén tại các vị trí hạt nhiên liệu đi qua có giá trị cao theo vận tốc nhiên liệu ra khỏi vòi phun (hình 5). Vùng gần lỗ tia kim phun có giá trị cao nhất. Sau khi phun nhiên liệu, bên trong buồng đốt đã hình thành hai vùng xoáy lốc dòng khí nén ngược chiều nhau. Dòng nhiên liệu có khuynh hướng lướt qua đỉnh piston và xoáy theo hai chiều. Như vậy, tia nhiên liệu phun ra khỏi kim phun cũng có ý nghĩa giúp tăng cường vận động xoáy lốc dòng khí bên trong xi lanh. Điều này sẽ giúp quá trình bay hơi, hòa trộn và phân tán của nhiên liệu trong buồng đốt động cơ tốt hơn.

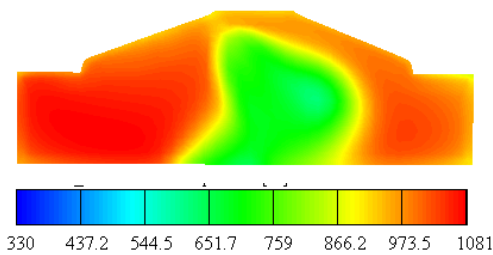
55°CA: Trường nhiệt độ [K]



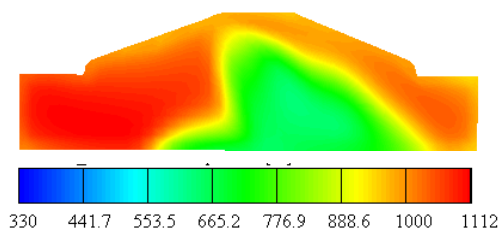
50°CA: Trường nhiệt độ [K]



45°CA: Trường nhiệt độ [K]



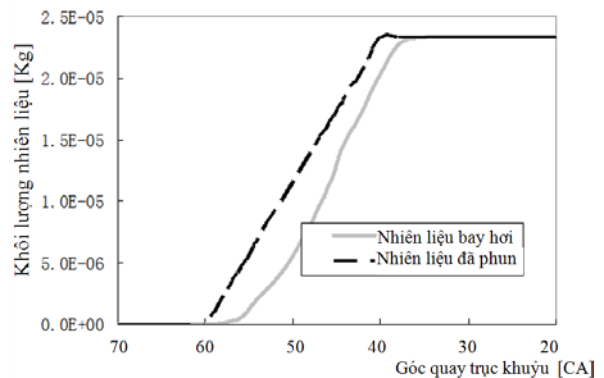
40°CA: Trường nhiệt độ [K]



**Hình 6.** Phân bố nhiệt độ tại một mặt cắt xi lanh theo các góc quay trục khuỷu.

Dưới các ảnh hưởng bởi sự cản và sự xoáy lốc dòng khí đang nén trong xi lanh, hình dạng của tia nhiên liệu trong buồng đốt đã bị biến dạng. Tại 50°CA trước điểm chết trên, sau thời điểm phun 10°CA, một phần nhiên liệu đã chạm vào bề mặt đỉnh piston. Dưới sức nóng của không khí nén và nhiệt độ đỉnh piston, nhiên liệu trên bề mặt đỉnh bay hơi và hòa trộn với không khí nén. Tuy nhiên, nhiên liệu tiếp xúc đỉnh piston

có thể không hiệu quả trong việc bay hơi tốt nhiên liệu và trong quá trình cháy. Ngoài ra, việc nhiên liệu tiếp xúc quá nhiều trên bề mặt đỉnh piston có thể dẫn đến việc bay hơi không hoàn toàn của nhiên liệu, sự cháy trên bề mặt piston và các vấn đề về ứng suất nhiệt piston. Điều này có thể cải thiện bằng việc thiết kế vị trí kim phun và góc phun nhiên liệu phù hợp. Hơn nữa, trong các động cơ GDI, thiết kế piston đỉnh lõm là một trong những giải pháp hiệu quả, giảm sự tập trung của nhiên liệu trên bề mặt piston. Động cơ GDI được đánh giá có khả năng nâng cao hiệu suất nhiệt nhờ vào việc tăng tỉ số nén động cơ mà ít bị ảnh hưởng đến tính kích nổ khi so sánh với động cơ phun xăng trên đường ống nạp có cùng các thông số thiết kế. Điều này nhờ vào sự hấp thụ một lượng nhiệt của không khí nén qua sự bay hơi của nhiên liệu. Xăng có đặc tính dễ bay hơi và hấp thụ nhiệt môi trường xung quanh khi bay hơi. Sự hấp thụ nhiệt này giúp giảm nhiệt độ không khí nén trong buồng đốt, từ đó giảm kích nổ xảy ra. Hình 5 minh họa nhiệt độ không khí nén giảm mạnh tại những vùng tia nhiên liệu đi qua, góp phần giảm nhiệt độ trung bình bên trong xi lanh.



**Hình 7.** Độ trễ bay hơi nhiên liệu sau khi phun.

Hình 7 chỉ ra khối lượng nhiên liệu trong xi lanh như là một hàm của góc quay trục khuỷu. Khối lượng nhiên liệu trong xi lanh thể hiện dưới hai dạng: Lượng nhiên liệu đã được phun và lượng nhiên liệu đã bay hơi. Kết thúc quá trình phun có thể thấy rằng toàn bộ lượng nhiên liệu đã phun trong một chu trình là 2.33 mg. Mô phỏng đã không xét đến ảnh hưởng của yếu tố kim

phun và xem xét tỉ lệ phun tuyến tính theo góc quay trục khuỷu trong suốt thời gian phun.

Độ trễ bay hơi của nhiên liệu khi so sánh khối lượng nhiên liệu đã phun và khối lượng nhiên liệu bay hơi thể hiện qua hình 7. Sau khi phun nhiên liệu 10°C<sub>A</sub>, độ trễ bay hơi là lớn nhất và giảm dần về cuối quá trình phun. Tuy nhiên, chỉ sau khi kết thúc phun khoảng 3 - 4°C<sub>A</sub> toàn bộ nhiên liệu đã bay hơi hoàn toàn. Độ trễ bay hơi phụ thuộc nhiều vào đặc tính vật lý của chính loại nhiên liệu sử dụng cũng như thông số nhiệt động trong xi lanh.

Việc nghiên cứu độ trễ bay hơi có vai trò quan trọng trong việc thiết lập thời điểm phun, tỉ lệ phun, áp suất phun đối với các động cơ phun nhiên liệu trực tiếp (cả trên động cơ xăng và động cơ diesel). Các động cơ phun xăng hiện đại, nhiên liệu phun vào buồng đốt có thể được điều khiển một cách tuần tự nhiều lần trong một chu trình. Nghiên cứu độ trễ bay hơi giúp tối ưu bố trí thời gian giữa phun môi (pilot injection) và phun chính (main injection).

Nghiên cứu độ trễ bay hơi còn là cơ sở để điều chỉnh góc phun sớm, thời điểm kết thúc phun đối với một nhiên liệu thay thế khi muốn thay thế xăng trên động cơ xăng. Căn cứ trên yếu tố bay hơi của nhiên liệu thay thế so với xăng, việc điều chỉnh kết thúc phun có thể thực hiện muộn hơn nếu nhiên liệu thay thế có đặc tính bay hơi tốt hơn xăng hoặc ngược lại.

## 5. Kết luận

Nghiên cứu sử dụng phương pháp mô phỏng số đối với một mô hình động cơ GDI có tỉ số nén cao và chế độ tải nhỏ nhằm mục đích đánh giá quá trình hình thành hỗn hợp nhiên liệu sau khi phun nhiên liệu.

Do ảnh hưởng của đặc tính vật lý nhiên liệu, thông số nhiệt động không khí nén; nhiên liệu sau khi phun bay hơi rất nhanh trong buồng đốt. Sau khi phun, một phần nhiên liệu có thể chạm vào bề mặt piston. Bay hơi – hấp thụ nhiệt môi

trường (không khí nén) là một đặc tính giúp giảm kích nổ ở các động cơ GDI của nhiên liệu sau khi phun trực tiếp vào buồng đốt.

Tồn tại một độ trễ bay hơi của nhiên liệu, là cơ sở cho việc tính toán, thiết kế góc phun sớm, áp suất phun và thời điểm dứt phun trong các động cơ phun nhiên liệu trực tiếp.

## Tài liệu tham khảo

- [1] F. Zhao et al.; “Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines”. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1999; 25 (5):437-562. DOI: 10.1016/S0360-1285(99)00004-0.
- [2] W. -C. Tsai, T. -S. Zhan; “An Experimental Characterization for Injection Quantity of a High-pressure Injector in GDI Engines”. *Journal of Low Power Electronics and Applications*. 2018, 8(4):36-56. DOI: 10.3390/jlpea8040036.
- [3] S. P. Chincholkara, J. G. Suryawanshi; “Gasoline Direct Injection: An Efficient Technology”. *Energy Procedia*. 2016; 90:666 – 672. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.11.235.
- [4] M. Costa, U. Sorge, P. Sementa, B. M. Vaglicco; “Modeling and Performance Optimization of a Direct Injection Spark Ignition Engine for the Avoidance of Knocking”. In *Proc. 4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Application*; 28-30 August, 2014; Vienna, Austria. Setúbal, Portugal: Science and Technology Publications; 2014; pp.484-496. DOI: 10.5220/0005040204840496.
- [5] R. Rotondi; “Modeling mixture formation in a GDI engine”. *Journal of Applied Mechanics*. 2006; 73(6): 931-93. DOI: 10.1115/1.2173284.
- [6] J. Gao, D. Jiang, Z. Huang, X. Wang; “Experimental and numerical study of high-pressure-swirl injector sprays in a direct injection gasoline engine”. In *Proc. Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power and Energy*. 2005; 219(8):617-629. DOI: 10.1243/095765005X31333.

- [7] Y.-J. Kim, S. H. Lee, N. H. Cho; “Effect of Air Motion on Fuel Spray Characteristics in a Gasoline Direct Injection Engine”. International Congress & Exposition; 1-4 March, 1999; Detroit, Michigan. USA: SAE International; 1999. DOI: 10.4271/1999-01-0177.
- [8] A. Montanaro, L. Allocca, G. Meccariello, A. D. Vita; “Very High-Pressure Sprays of Gasoline from a GDI Multi-hole Injector”. In Proc. ILASS–Europe 2019, 29th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems; 2-4 September, 2019; Paris, France. Paris, France: ILASS-EUROPE; 2019.
- [9] F. Catapano, M. Costa, G. Marseglia, P. Sementa; “An Experimental and Numerical Investigation of GDI Spray Impact over Walls at Different Temperatures”. In Proc. SAE 2016 World Congress and Exhibition; 12-14 April, 2016; Detroit, Michigan. USA: SAE International; 2016. DOI: 10.4271/2016-01-0853.
- [10] L. Fu, T. Ishima, W.Q. Long; “Research on the Ignition-chamber GDI engine combustion system”. Journal of Thermal Science and Technology. 2009; 4(1):53-62. DOI: 10.1299/jtst.4.53.
- [11] B. Abramzon, W. A. Sirignano; “Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculations”. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1989; 32(9):1605-1618. DOI: 10.1016/0017-9310(89)90043-4.
- [12] C. Fink; “A Multi-Component Evaporation Model for the 3D-CFD-Code FIRE 8–Development and Validation with Experimental Data”. 2005.

**Ngày nhận bài: 27/07/2021**

**Ngày chuyển phản biện: 30/07/2021**

**Ngày hoàn thành sửa bài: 20/08/2021**

**Ngày chấp nhận đăng: 27/08/2021**