# NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG ĐIỀU KHIỂN TẢI ĐỘNG CƠ VỚI MÔ HÌNH CHÁY BẰNG NÉN VỚI HÕN HỢP HÒA TRỘN TRƯỚC HOÀN TOÀN VỚI NHIÊN LIỆU XĂNG

AN EXPERIMENT INVESTIGATION OF LOAD CONTROLLABLE OF GASOLINE HOMOGENEOUS CHARGE COMPRESSION IGNITION

Ngô Văn Thanh<sup>1</sup>, Nguyễn Tùng Lâm<sup>2,\*</sup>

DOI: http://doi.org/10.57001/huih5804.2025.018

### TÓM TẮT

Nghiên cứu động cơ đốt trong hiện nay tập trung vào việc giảm thiểu tiêu thụ nhiên liệu và khí thải độc hại. Trong đó, phương pháp đốt cháy ở nhiệt độ thấp nổi lên như một giải pháp tiềm năng với nhiều ưu điểm vượt trội về hiệu suất và khả năng giảm phát thải. Động cơ cháy bằng nén với nhiên liệu xăng, là quá trình cháy với nhiệt độ cháy thấp (LTC - Low Temperature Combustion), với loại hình cháy quá trình cháy bằng nén hỗn hợp hòa trộn đồng nhất (HCCI - Homogeneous Charge Compression Ignition) mang nhiều tiềm năng lớn về hiệu quả. Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của các thông số tỷ lệ hòa khí tương đương đến đặc tính cháy, trong phạm vi hoạt động của động cơ HCCI với nhiên liệu xăng PRF80. Động cơ nguyên bản là động cơ diesel được sử dụng để nghiên cứu mô hình cháy cháy bằng nén hỗn hợp đồng nhất được sử dụng trong thí nghiệm. Nhiên liệu PRF80 được chọn sử dụng có tính chất tương đương với nhiên liệu xăng, với chỉ số ốc tan cao. Kết quả cho thấy, tỷ lệ hòa khí tương đương có khả năng điều khiển tải của động cơ, tuy nhiên giới hạn tải khá thấp từ 1,5 đến 3,5bar IMEP (Indicated Mean Effective Pressure). Tỷ lệ hòa khí tương đương ảnh hưởng khá mạnh đến đặc tính cháy của mô hình cháy HCCI, từ thời điểm bắt đầu cháy, mức độ tăng áp suất và rung ồn của động cơ. Kết quả nghiên cứu chỉ ra tỷ lệ hòa khí tương đương phù hợp với chế độ vận hành: tốc độ động cơ và điều kiện nạp (áp suất, nhiệt độ khí nạp).

Từ khóa: Quá trình cháy, hòa trộn hoàn toàn, điều khiển tải, nhiên liệu xăng.

### ABSTRACT

Current research on internal combustion engines is highly focused on mitigating fuel consumption and reducing harmful emissions. Low-temperature combustion (LTC) has emerged as a promising solution in this regard, offering significant advantages in terms of both efficiency and emissions reduction capabilities. Gasoline compression ignition engines operate with low-temperature combustion, and the Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) method, particularly, holds great potential for efficiency improvements. In this study, the influence of equivalence ratio parameters on the combustion characteristics within the operating range of HCCI engines using PRF80 gasoline fuel was investigated. The original engine, a diesel engine, was utilized in experiments to explore the combustion model involving HCCI. PRF80 fuel, possessing characteristics equivalent to gasoline with a high octane number, was chosen for the study. The results indicate that the equivalence ratio can effectively control the engine load, but the load range is limited, ranging from 1.5 to 3.5bar IMEP. The equivalence ratio significantly affects the combustion characteristics of the HCCI combustion model, including the start of combustion, pressure rise rate, and engine noise. The research findings highlight the suitable equivalence ratio for operational conditions such as engine speed and intake conditions (pressure, intake air temperature).

Keywords: Combustion process, homogeneous charged, load control, gasoline fuel.

<sup>1</sup>Khoa Cơ khí - Ô tô và Xây dựng, Trường Đại học Điện lực
<sup>2</sup>Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải
\*Email: lamnt@utc.edu.vn
Ngày nhận bài: 23/7/2024
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 23/9/2024
Ngày chấp nhận đăng: 26/01/2025

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, các mối quan tâm về tiết kiệm nhiên liệu và đồng thời giảm thiểu phát thải độc hại, động cơ đốt trong đang có những bước chuyển đổi lớn để tìm kiếm các giải pháp hữu hiệu hơn so với động cơ đốt trong truyền thống, động cơ xăng và động cơ diesel. Vì vậy các nhà nghiên cứu đang thực hiện các nghiên cứu sâu rộng về các mô hình cháy hiện đại [1-3], nhiên liệu mới [4] ứng dụng cho động cơ nhiệt [5, 6] hoặc xe điện [7].

Mô hình cháy "Tự cháy bằng nén hỗn hợp đồng nhất" HCCI (Homogeneous Charged Compression Ignition) là một mô hình cháy mới, được nghiên cứu phổ biến trong những năm gần đây [8-10]. Đây là mô hình tự cháy do nén với hỗn hợp đồng nhất. Mô hình cháy HCCI mang lại nhiều ưu điểm vượt trội so với động cơ truyền thống, nổi bật là: (1) hiệu suất cao hơn so với động cơ xăng và (2) khí thải sạch hơn so với động cơ diesel.

Khi so sánh với động cơ xăng, mô hình cháy HCCI cho phép hoạt động ở tỷ số nén cao hơn, và hỗn hợp nhiên liệu không khí thấp hơn. Đồng thời, so với động cơ diesel, thì không tồn tại các vùng hỗn hợp giàu cục bộ vì phương pháp cung cấp nhiên liệu của HCCI cho phép hỗn hợp đồng nhất.

Với quá trình làm việc của mô hình cháy HCCI, mức tiêu thụ nhiên liệu riêng thấp hơn, lượng khí thải độc hại  $NO_x$  và bồ hóng thấp hơn, do sự hình thành hỗn hợp nghèo và đồng nhất trong xy lanh [11].



Hình 1. Phát thải bồ hóng và  $NO_x$  theo tỷ lệ tương đương và nhiệt độ cục bộ của động cơ HCCI [11]

Bên cạnh những ưu điểm vượt trội thì mô hình cháy HCCI còn tồn tại các nhược điểm chính [12]: (1) Khó khăn trong việc kiểm soát trực tiếp thời điểm bắt đầu cháy; (2) Khó khăn trong việc mở rộng phạm vi tải ở mức cao; (3) Phạm vi thay đổi tốc độ động cơ khá hẹp. Kiểm soát thời điểm bắt đầu cháy rất khó khăn ở mức tải thấp vì điều kiện nhiệt độ và áp suất xy lanh khá thấp. Ngược lại, ở mức tải cao thì sự cố rung ồn động cơ xảy ra khá mạnh. Trong mô hình cháy HCCI, quá trình tự cháy là yếu tố quan trọng để kiểm soát sự hoạt động của động cơ này, nó chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi các yếu tố sau: (1) Điều kiện trong xy lanh, áp suất và nhiệt độ trong xy lanh và thành phần khí sót của chu trình trước [13]; (2) Tính chất của các thành phần nhiên liệu [14, 15] và (3) Thành phần hỗn hợp khí nạp (tỷ lệ luân hồi khí thải [16], bổ sung thành phần khí thúc đẩy quá trình cháy, ví dụ ozone [17, 18].

Nhiệt độ và áp suất trong xy lanh ở thời điểm trước khi quá trình cháy diễn ra, có thể được kiểm soát bằng nhiệt độ khí nạp, tỷ số nén động cơ, mức độ tăng áp suất khí nạp. Riêng với điều kiện nhiệt độ, thì có thể sử dụng: tỷ lệ khí sót, tỷ lệ luân hồi khí thải, với nhiệt độ khí thải luân hồi có thể được làm mát hoặc không làm mát.

Các dạng biến thể của mô hình cháy HCCI để cải thiện các nhược điểm của động cơ này bằng cách giảm tốc độ phản ứng của quá trình đốt cháy [19, 20] như: (1) hệ thống nhiên liệu kép (ví dụ: diesel - xăng, diesel - CNG,...); (2) chiến lược phun nhiên liệu tạo hỗn hợp phân lớp; (3) nhiên liệu thay thế có chỉ số ốc tan cao.

Bài báo này thực hiện biện pháp điều khiển tải động cơ bằng phương pháp thay đổi lượng cung cấp nhiên liệu chu trình, hay còn thể hiện bằng tỷ lệ tương đương ER (Equivalence ratio). Điều kiện thực hiện thí nghiệm là: áp suất nạp 1bar, nhiệt độ khí nạp 110°C.

Khi thực hiện thay đổi tỷ lệ tương đương ER, với giới hạn tải thấp nhất là đảm bảo cháy ổn định (COV < 5) hoặc tải nhỏ nhất IMEP 2bar, với giới hạn tải lớn nhất với điều kiện tốc độ tăng áp suất xy lanh cao là RI < 5MW/mm.

Vì vậy nghiên cứu này tập trung vào đánh giá khả năng điều khiển lượng cung cấp nhiên liệu để điều khiển tải động cơ, đồng thời cũng xem xét quá trình cháy của động cơ sử dụng mô hình cháy hòa trộn hỗn hợp đồng nhất.

### 2. THIẾT LẬP THÍ NGHIỆM

## 2.1. Sơ đồ bố trí động cơ thử nghiệm và thiết bị thí nghiệm

Thí nghiệm này được thực hiện trên động cơ nghiên cứu một xy lanh, cải tiến từ động cơ diesel 4 xy lanh, có dung tích xy lanh 0,499 lít và tỷ số nén 16, với hệ thống cung cấp nhiên liệu bên ngoài. Các thông số kỹ thuật của động cơ được liệt kê trong bảng 1. Hình 2 thể hiện sơ đồ thí nghiệm động cơ.

Không khí nạp được cung cấp từ máy nén khí và được làm nóng đến nhiệt độ mong muốn bằng bộ gia nhiệt ở khoảng đường ống trước cửa nạp, tại đó nhiệt độ và áp suất không khí nạp được đo bằng cảm biến nhiệt (loại K) với độ chính xác ±2K và cảm biến áp suất áp điện trở (Kistler 4075A) với độ chính xác tương ứng là  $\pm 0,3\%$  của toàn thang đo. Mức tiêu thụ nhiên liệu được đo bằng bộ điều khiển lưu lượng khối chất lỏng (Bronkhorst M13-CORI-FLOW) có độ chính xác  $\pm 0,2\%$  trên phép đo.



Hình 2. Sơ đồ bố trí thí nghiệm

1: Máy nén khí; 2: Bình chứa N<sub>2</sub>; 3: Đo lưu lượng khí; 4: Đo lưu lượng nhiên liệu; 5: Bình cung cấp nhiên liệu; 6: Bình gia nhiệt khí nạp; 7: Động cơ thí nghiệm; 8: Động cơ điện; 9: Tủ phân tích khí thải; 10: Máy tính; 11: Bộ ghi dữ liệu; 12: Bộ khuếch đại; 13: Đầu đo áp suất xy lanh; 14: Tín hiệu tốc độ quay động cơ; 15: Tín hiệu áp suất khí nạp; 16: Tín hiệu nhiệt độ khí nạp.

Bảng 1.	Thôna số k	ỹ thuật đông	a cơ thí nahiêm
		/ ** **	

N⁰.	Thông số	Giá trị
1	Kiểu động cơ	Peugeot PSA DW10
2	Số xy lanh làm việc	1
3	Đường kính xy lanh (mm) x hành trình Piston (mm)	85 x 88
4	Thể tích công tác 1 xylanh (cc)	499
5	Tỷ số nén $\epsilon$	16:1

Vị trí góc quay trục khuỷu được xác định bằng cảm biến quang học với độ chính xác ±0,1 CAD và áp suất trong xy lanh bằng cảm biến áp suất (Kistler 6043A) được gắn trong nắp xy lanh với độ chính xác ±2%. Đối với tất cả các thí nghiệm, dữ liệu áp suất trong xy lanh được ghi lại và tính trung bình trong 100 chu kỳ liên tiếp để tính toán các đặc tính cháy bằng cách sử dụng phân tích nhiệt động lực học. Máy phân tích khí Horiba MEXA-7100HEGR được sử dụng để đo các thành phần khí thải CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO và THC.

### 2.2. Một số thông số cơ bản của tiến trình thí nghiệm

Các điều kiện thí nghiệm được trình bày trong bảng 2. Quá trình thực hiện thí nghiệm khảo sát điều kiện cung cấp nhiên liệu thay đổi.

Nhiên liệu thử nghiệm là nhiên liệu tham chiếu cơ bản (PRF - Primary Reference Fuels), bao gồm n-heptan và isooctane, với PRF80 bao gồm tỷ lệ về thể tích của 80% isooctane và 20% n-heptane. Nhiên liệu có chỉ số ốc tan 80, ở mức chỉ số ốc tan thấp. Đây là nhiên liệu thí nghiệm, có nhiều tính chất giống với xăng thương mại: chỉ số ốc tan, khối lượng riêng.

Thông số	Giá trị
Nhiệt độ khí nạp	110°C
Áp suất khí nạp	1bar
Tốc độ quay động cơ	1500v/p
IMEP	1,0 - 3,5bar
Nhiên liệu thử nghiệm	PRF80

Bảng 2. Điều kiện vận hành động cơ thí nghiệm

Hệ thống băng thử nghiệm được sử dụng để khởi động và làm nóng động cơ đến mức tương ứng với điều kiện hoạt động của động cơ diesel thông thường: nhiệt độ dầu bôi trơn đạt 85°C và nước làm mát động cơ đạt 90°C. Sau đó, động cơ được thực hiện thử nghiệm với mô hình cháy HCCI. Nhiên liệu PRF80 được cung cấp vào bình gia nhiệt, thực hiện hòa trộn đều với không khí. Với điều kiện bắt đầu quá trình cháy, thì cần tăng cường kích hoạt cháy bằng việc tăng áp suất nạp, với mức nhiên liệu cung cấp ở mức nhạt, tỷ lệ tương đương 0,3. Khi quá trình cháy đã diễn ra ổn định, thì giảm dần áp suất nạp về điều kiện thử nghiệm 1bar. Từ đó có thể thực hiện quá trình thử nghiệm với các trường hợp thí nghiệm.

### 2.3. Phương pháp phân tích quá trình cháy

Áp suất đầu vào lấy giá trị trung bình của 100 chu kỳ tín hiệu áp suất xy lanh tại một điểm vận hành nhất định. Áp suất xy lanh trung bình được sử dụng để tính tốc độ giải phóng nhiệt. Tốc độ giải phóng nhiệt được xác định từ dữ liệu áp suất xy lanh trung bình, nhờ vào định luật 1 nhiệt động học và phương trình trạng thái khí lý tưởng:

$$\frac{dQ}{da} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} . p. dV + \frac{\gamma}{\gamma - 1} . V. dp$$
(1)

Với Q - nhiệt lượng tỏa ra;  $\gamma$  - tỷ lệ nhiệt dung riêng ( $\gamma = C_p / C_v$ ); p - áp suất trong xy lanh; V - thể tích buồng đốt và  $\alpha$  - góc quay.

Hiệu suất chỉ thị, hay hiệu suất nhiệt ( $\eta_t)$  được tính theo công thức sau:

$$\eta_{t} = \frac{L_{t}}{m_{fuel}.Q_{LHV}}$$
(2)

Trong đó, L<sub>t</sub> - công sinh ra của chu trình, m<sub>fuel</sub> - khối lượng nhiên liệu cung cấp,  $Q_{LHV}$  - Nhiệt trị thấp của nhiên liệu.

Hiệu suất cháy tính theo công thức:

$$\eta_{c} = \left(\int \frac{dQ}{d\alpha}\right) / \left(m_{fuel}.Q_{LHV}\right)$$
(3)



Hình 3. Phân tích quá trình cháy

Tốc độ tỏa nhiệt của động cơ đốt trong là thông số quan trọng cung cấp các thông tin về thời điểm bắt đầu và kết thúc quá trình cháy và thông tin về cường độ ngọn lửa giải phóng năng lượng nhiệt của quá trình đốt cháy nhiên liệu trong buồng cháy. Ngoài ra, tổn thất năng lượng do truyền nhiệt giữa hòa khí, khí cháy và thành vách xy lanh - piston - nắp máy, cũng được mô tả trong giá trị của tốc độ tỏa nhiệt. Từ tốc độ tỏa nhiệt, các thời điểm quan trọng của quá trình cháy: CA10, CA50, CA90 được chỉ ra trên hình 3, trên đường cong tỷ lệ tích lũy tỏa nhiệt, với CA10, CA50 CA90 là thời điểm góc quay trục khuỷu khi tích lũy tỏa nhiệt 10%, 50% và 90%.

IMEP (Indicated Mean Effective Pressure), áp suất có ích trung bình, là tỷ số của công sinh ra của chu trình ( $L_t$ ) chia cho thể tích công tác ( $V_s$ ):

$$\mathsf{IMEP} = \frac{\mathsf{L}_{\mathsf{t}}}{\mathsf{V}_{\mathsf{c}}} [\mathsf{bar}] \tag{4}$$

Độ ổn định cháy của quá trình cháy ở tải nhỏ lấy làm thông số kiểm soát điều kiện bắt đầu làm việc của động cơ, COV (Coefficient of Variation) của IMEP được đánh giá thông qua giá trị thay đổi trung bình của áp suất có ích  $\sigma_{IMEP}$  và áp suất có ích trung bình của chu trình.

$$COV_{IMEP} = \frac{\sigma_{IMEP}}{IMEP_{mean}}.100\%$$
 (5)

Trong đó:

$$\sigma_{\text{IMEP}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} \left[ \text{IMEP}(i) - \text{IMEP}_{\text{mean}} \right]^2}$$
(6)

Với, N: số lần đo cho 1 điểm khảo sát, trong thí nghiệm ở nghiên cứu này, N = 100.

#### 3. ÐÁNH GIÁ PHÂN TÍCH

### 3.1. Ảnh hưởng của tỷ lệ tương đương đến sự phát triển cháy HCCI

Ánh hưởng của hỗn hợp nhiên liệu - không khí, hay còn gọi là tỷ lệ tương đương (ký hiệu ER: equivalence ratio), đến áp suất trong xy lanh và tốc độ giải phóng nhiệt được chỉ ra trong hình 4, với nhiên liệu PRF80, điều kiện nạp: nhiệt độ nạp 110°C và áp suất nạp 1bar. Giá trị cực đại của áp suất xy lanh và đỉnh của tốc độ tỏa nhiệt được quan sát thấy đều nằm sau điểm chết trên, trong quá trình giãn nở, với thời điểm bắt đầu cháy ngay gần điểm chết trên.

Khi tỷ lệ tương đương tăng lên từ 0,29 đến 0,39, thì thời điểm cháy sớm lên, từ đó áp suất trong xy lanh tăng lên, tốc độ tỏa nhiệt cũng tăng cao và pha cháy sớm hơn với các đỉnh của tốc độ tỏa nhiệt về phía sớm hơn. Với mức tỷ lệ tương đương nhỏ nhất 0,29 thì quá trình cháy diễn ra không ổn định, với giá trị COV ở mức cao 5.

Khi tỷ lệ tương đương tăng lên thì đỉnh cũng như độ dốc của tốc độ tỏa nhiệt cũng khá lớn, làm cho động cơ làm việc cứng hơn, với giá trị RI cao hơn. Khi động cơ làm việc cứng, với tốc độ tăng áp suất cao, có thể gây ra tiếng ồn khá lớn cho động cơ, và từ đó có thể làm hư hỏng động cơ. Khi hỗn hợp nhiên liệu - không khí giàu lên, từ ER 0,29 đến ER 0,39, thì các phản ứng của nhiên liệu và ô xy trong xy lanh diễn ra ở điều kiện nhiệt độ áp suất cao trong xy lanh cũng diễn ra nhanh hơn.

Vì rằng mô hình cháy HCCI thực hiện tự cháy với hỗn hợp hòa trộn đồng nhất, mà không sử dụng bu gi để châm cháy, nên không có cơ chế nào kiểm soát trực tiếp quá trình cháy trong động cơ HCCI. Để hiểu rõ hơn về quá trình cháy trong động cơ HCCI, thời điểm bắt đầu cháy theo góc quay trục khuỷu là rất quan trọng, vì thời điểm bắt đầu cháy ảnh hưởng trực tiếp đến các quá trình phát triển cháy tiếp theo.

Ở tỷ lệ tương đương nhỏ, ER = 0,29, hay hỗn hợp nhiên liệu - không khí loãng hơn, thì quá trình bắt đầu cháy trễ hơn. Với mức rất loãng nhiên liệu - không khí trong buồng đốt, có thể làm gián đoạn các phản ứng ô xi hóa tạo thành quá trình tự bốc cháy. Khi giảm tỷ lệ tương đương, hay là tỷ lệ nhiên liệu trong hỗn hợp ít hơn, năng lượng cung cấp của hỗn hợp nhiên liệu - không khí nhỏ hơn, làm giá trị cực đại của áp suất xy lanh và nhiệt độ khí cháy có xu hướng giảm tương ứng. Chính sự giảm nhiệt độ của thành vách xy lanh và tình trạng này làm ảnh hưởng đến các chu kỳ của động cơ về sau về mặt phản ứng hóa học của hỗn hợp nhiên liệu và không khí. Sự giảm nhiệt độ trung bình của xy lanh tiếp theo sẽ gây ra hiệu ứng mất lửa với mức độ hòa khí nhạt hơn. Quá trình cháy với tỷ lệ tương đương nhỏ, với pha cháy muộn, thể hiện ở đỉnh của đường cong tốc độ tỏa nhiệt lùi về phía sau, cỡ khoảng 8 CAD ATDC với tỷ lệ tương đương 0,29. Với pha cháy khá muộn sau điểm chết trên, làm giảm hiệu quả sinh công của chu trình nhiệt.

Với điều kiện tỷ lệ tương đương lớn nhất, quá trình tự bốc cháy hình thành sớm hơn và sau đó quá trình cháy phát triển mạnh mẽ, thể hiện ở độc dốc lớn của đường cong áp suất trong xy lanh và độ cao của đỉnh đường cong tốc độ tỏa nhiệt. Với quá trình cháy tập trung gần điểm chết trên, có thể nâng cao hiệu quả nhiệt của chu trình.



Hình 4. Diễn biến áp suất xy lanh và tốc độ tỏa nhiệt trong xy lanh theo tỷ lệ tương đương khác nhau

Với phần cháy với ngọn lửa lạnh, thể hiện ở đỉnh đường cong tốc độ tỏa nhiệt ở thời điểm góc quay trục khuỷu -22 CAD ATDC, thì ở điều kiện thí nghiệm này, không cho thấy sự khác biệt quá nhiều giữa các tỷ lệ tương đương khác nhau. Điều này được lý giải rằng, khi tỷ lệ tương đương tăng lên, thì tỷ nhiệt dung của hỗn hợp hòa khí giảm, làm giảm nhẹ nhiệt độ của hỗn hợp trong quá trình nén, do đó, nhiệt độ cần thiết để bắt đầu quá trình ô xy hóa với ngọn lửa lạnh tăng theo lượng nhiên liệu cung cấp trong quá trình tăng lên, vậy nên hỗn hợp hòa khí giàu hơn sẽ cần nhiệt độ ban đầu cao hơn hỗn hợp nhạt hơn. Hơn nữa, nhiên liệu sử dụng là PRF80, có trị số ốc tan cao và có quá trình ô xy hóa với ngọn lửa lạnh là nhỏ nên không quan sát được ảnh hưởng của tỷ lệ hòa khí đến sự ô xy hóa với ngọn lửa lạnh.

### 3.2. Ảnh hưởng của tỷ lệ tương đương đến các giai đoạn phát triển cháy HCCI

Hình 5 giới thiệu pha cháy, với CA02, CA10, CA50, và thời gian cháy (CD, CD = CA90 - CA10) theo tỷ lệ tương đương thay đổi. Khi tăng tỷ lệ tương đương, tức là hỗn hợp đồng nhất đậm nhiên liệu hơn, thì thời điểm bắt đầu cháy CA02, CA10 đều sớm hơn. CA10 có giá trị nằm trong khoảng từ 1 đến 4 CAD ATDC, nằm ở hành trình giãn nở, điều này có tác động tích cực đến hiệu suất nhiệt và khí thải động cơ.

Để đạt được hiệu suất nhiệt tối đa từ chu trình lý tưởng, pha cháy CA50 cần phải xảy ra tại điểm chết trên. Tuy nhiên, đối với động cơ đốt trong được sử dụng trong thực tế thì CA50 nằm trong khoảng từ 7 đến 11 CAD ATDC [21]. Trong bài báo này, CA50 thay đổi từ 3 đến 9 CAD ATDC (hình 5), pha cháy chính CA50 sớm hơn khi tăng tỷ lệ tương đương, CA50 sớm có khả năng nâng cao hiệu suất nhiệt của động cơ. Khi CA50 nằm ở phía xa điểm chết trên đến quá trình giãn nở, thì nhiệt lượng mất đi do tăng thời gian truyền vào thành xy lanh và năng lượng mất đi theo khí thải tăng lên.



Hình 5. CA02, CA10, CA50 và CD là hàm theo tỷ lệ tương đương

Thời gian cháy dài hơn khi giảm tỷ lệ tương đương, trong khi thời điểm cháy muộn lên và đỉnh của tốc độ tỏa nhiệt giảm đáng kể (hình 4). Điều này có thể giải thích bởi quá trình cháy với tỷ lệ tương đương nhỏ thì quá trình cháy nằm ở hành trình giãn nở với thời điểm bắt đầu cháy muộn nên tốc độ cháy cũng giảm.

Để tăng mô men xoắn của động cơ hay IMEP, nhiên liệu cung cấp và phải tăng lên, hay thực hiện tăng tỷ lệ tương đương ER. Tuy nhiên, như kết quả thực nghiệm cho thấy, thời điểm bắt đầu cháy CA10, pha cháy CA50 sớm lên và thời gian cháy CA giảm, làm cho IMEP có khả năng tăng phi tuyến với tỷ lệ tương đương và nhanh chóng gặp giới hạn rung ồn của động cơ.

# 3.3. Ảnh hưởng của tỷ lệ tương đương đến thông số vận hành

IMEP tăng khi tăng tỷ lệ tương đương, tăng mạnh ở vùng ER từ 0,29 đến 0,33, tăng nhẹ ở cùng 0,33 đến 0,39. Ở chế độ thử nghiệm, IMEP tối đa mà không có hiện tượng động cơ làm việc cứng, khoảng 3,3bar với tỷ lệ tương đương 0,39, còn IMEP tối thiểu để động cơ có thể làm việc ổn định (COV < 5) khoảng 2bar, với tỷ lệ tương đương 0,30.

Không giống như động cơ xăng hay động cơ diesel truyền thống, động cơ sử dụng mô hình cháy HCCI không có bộ điều khiển thời điểm cháy trực tiếp, mà thời điểm bắt đầu quá trình cháy HCCI được kiểm soát bằng động học phản ứng. Vì vậy, thời điểm bắt đầu cháy khá nhay cảm với tỷ lệ tương đương không khí - nhiên liệu, nhiệt độ khí nạp, tỷ số nén, khí sót, nhiệt độ thành xy lanh và động học phản ứng ô xy hóa của hỗn hợp không khí nhiên liệu. Ở chế độ tải cao, do nhiệt độ cao hơn của khí sót và thành xy lanh, quá trình cháy phát triển sớm và tốc độ cháy nhanh có thể dẫn đến dao động áp suất, sau đó quá trình cháy cứng và có thể phá hủy các bộ phận của động cơ. Ngược lại, ở chế độ tải nhẹ, nhiệt độ trong xy lanh thấp hơn và hỗn hợp nhiên liệu - không khí nghèo hơn thì thường dẫn đến dao động có chu kỳ, có thể là thời điểm bắt đầu cháy sai và đốt cháy một phần. Vì vậy, quá trình đốt cháy kém hơn dẫn đến lượng khí thải CO và HC cao. Giá trị COV thể hiện sự ổn định chu kỳ của quá trình cháy, COV giảm dần thi tăng tỷ lệ tương đương được chỉ ra trên hình 6a.



Hình 6. (a) IMEP và COV là hàm theo tỷ lệ tương đương và (b) Hiệu suất cháy và hiệu suất chỉ thị là hàm theo tỷ lệ tương đương

Hiệu suất cháy (CE) được tính theo tỷ lệ tích lũy tỏa nhiệt và nhiệt lượng của nhiên liệu cung cấp, nằm trong khoảng 75% đến 95% trong nghiên cứu này, hiệu suất cháy tăng khi tỷ lệ tương đương tăng (hình 6b). Điều này có thể giải thích bởi quá trình cháy với tỷ lệ tương đương cao diễn ra nhanh và ngay gần điểm chết trên nên thể tích buồng cháy khi đó nhỏ giúp cho quá trình cháy triệt để hỗn hợp có trong buồng cháy. Hiệu suất chỉ thị (IE), tăng khá mạnh khi tăng tỷ lệ tương đương nhỏ, từ 0,29 đến 0,33, tăng nhẹ khi tăng tỷ lệ tương đương ở mức 0,33 đến 0,39. Điều này lý giải do lợi ích của nâng cao CA50 để nâng hiệu suất chỉ thị trở nên giảm đi khi tiến gần điểm chết trên, do gia tăng tốc truyền nhiệt [22], có tác dụng làm giảm hiệu suất nhiệt.

### 4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày ảnh hưởng của tỷ lệ tương đương đến khả năng điều khiển tải động cơ sử dụng mô hình cháy HCCI thông qua phân tích đánh giá thực nghiệm đặc tính cháy của mô hình cháy HCCI, với các đánh giá về áp suất xy lanh, tốc độ tỏa nhiệt, thời gian cháy (CD) và các thời điểm cháy đặc trưng (CA02, CA10, CA50). Các kết quả cho thấy, với động cơ HCCI thì điều khiển tăng tải là rất khó khăn, khi điều khiển tăng tải bằng tăng tỷ lệ tương đương thì diễn biến quá trình cháy tiến triển sớm lên điểm chết trên với quá trình cháy sớm và nhanh hơn, làm động cơ làm việc cứng, gây rung ồn lớn mặc dù hiệu suất cháy và hiệu suất chỉ thị đều được cải thiện. Vì vậy, cần có các nghiên cứu trong tương lai để giúp cho động cơ HCCI sử dụng nhiên liệu xăng có thể mở rộng vùng hoạt động công suất.

### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được thực hiện với sự hỗ trợ thí nghiệm của Phòng thí nghiệm PRISME, Đại học Orleans, Cộng hòa Pháp.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Rashwan SS, Nemitallah MA, Habib MA., "Review on Premixed Combustion Technology: Stability, Emission Control, Applications, and Numerical Case Study," *Energy and Fuels*, 30:9981-10014, 2016. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02386.

[2]. Johnson T., "Vehicular Emissions in Review," *SAE Int J Engines*, 9:1258-75, 2016. https://doi.org/10.4271/2016-01-0919.

[3]. Soid SN, Zainal ZA., "Spray and combustion characterization for internal combustion engines using optical measuring techniques - A review," *Energy*, 2011. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.11.022.

[4]. Onorati A, Payri R, Vaglieco B, Agarwal A, Bae C, Bruneaux G, et al., "The role of hydrogen for future internal combustion engines," *International Journal of Engine Research*, 23:529-40, 2022. https://doi.org/10.1177/14680874221081947.

[5]. Reitz RD, Ogawa H, Payri R, Fansler T, Kokjohn S, Moriyoshi Y, et al., "IJER editorial: The future of the internal combustion engine," *International* 

### KHOA HỌC CÔNG NGHỆ

Journal of Engine Research, 21:3-10, 2020. https://doi.org/10.1177/1468087419877990.

[6]. Yu S, Zheng M., "Future gasoline engine ignition: A review on advanced concepts," *International Journal of Engine Research*, 22:1743-75, 2021. https://doi.org/10.1177/1468087420953085.

[7]. Stefano AF., *Analysis and development of Battery Management System for electric vehicles*. Master Thesis in Electronic Engineering, Politecnico di Torino, 2022.

[8]. Duan X, Lai M-C, Jansons M, Guo G, Liu J., "A review of controlling strategies of the ignition timing and combustion phase in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine," *Fuel*, 285:119142, 2021. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119142.

[9]. Saxena S, Bedoya ID., "Fundamental phenomena affecting low temperature combustion and HCCI engines, high load limits and strategies for extending these limits," *Prog Energy Combust Sci*, 2013. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.05.002 Review.

[10]. Singh A, Maurya RK., "Effects of intake charge temperature and relative air-fuel ratio on the deterministic characteristics of cyclic combustion dynamics of a HCCI engine," *International Journal of Engine Research*, 24:1973-98, 2023. https://doi.org/10.1177/14680874221106571.

[11]. Neely GD, Sasaki S, Huang Y, Leet JA, Stewart DW., "New Diesel Emission Control Strategy to Meet US Tier 2 Emissions Regulations," *SAE Technical Paper*, 2005-01-1091, 2005. https://doi.org/10.4271/2005-01-1091.

[12]. Lee K, Cho S, Kim N, Min K., "A study on combustion control and operating range expansion of gasoline HCCI," *Energy*, 91:1038-48, 2015. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.031.

[13]. Dubreuil A, Foucher F, Mounaïm-Rousselle C, Dayma G, Dagaut P., "HCCI combustion: Effect of NO in EGR," in *Proceedings of the Combustion Institute*, 31 II:2879-86, 2007. https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.168.

[14]. Starck L, Lecointe B, Forti L, Jeuland N., "Impact of fuel characteristics on HCCI combustion: Performances and emissions," *Fuel*, 89:3069-77, 2010. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.05.028.

[15]. Machrafi H, Cavadiasa S., "An experimental and numerical analysis of the influence of the inlet temperature, equivalence ratio and compression ratio on the HCCI auto-ignition process of Primary Reference Fuels in an engine," *Fuel Processing Technology*, 89:1218-26, 2008. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.019.

[16]. Wu YY, Chen BC, Wang JH., "Experimental study on HCCI combustion in a small engine with various fuels and EGR," *Aerosol Air Qual Res*, 16:3338-48, 2016. https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.08.0358.

[17]. Masurier JB, Foucher F, Dayma G, Dagaut P., "Ozone applied to the homogeneous charge compression ignition engine to control alcohol fuels combustion," *Appl Energy*, 2015. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.004.

[18]. Masurier JB, Foucher F, Dayma G, Dagaut P., "Homogeneous charge compression ignition combustion of primary reference fuels influenced by ozone addition," *Energy and Fuels*, 27:5495-505, 2013. https://doi.org/10.1021/ef401009x.

[19]. Khandal SV, Banapurmath NR, Gaitonde VN., "Performance studies on homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine powered with alternative fuels," *Renew Energy*, 132:683-93, 2019. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.035.

[20]. Aroonsrisopon T, Werner P, Waldman JO, Sohm V, Foster DE, Morikawa T, et al., "Expanding the HCCI operation with the charge stratification," *SAE Technical Papers*, 2004. https://doi.org/10.4271/2004-01-1756.

[21]. Solmaz H., "Combustion, performance and emission characteristics of fusel oil in a spark ignition engine," *Fuel Processing Technology*, 133, 2015. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.010.

[22]. Tsurushima T, Kunishima E, Asaumi Y, Aoyagi Y, Enomoto Y., "The effect of knock on heat loss in homogeneous charge compression ignition engines," *SAE Technical Papers*, 2002. https://doi.org/10.4271/2002-01-0108.

#### **AUTHORS INFORMATION**

#### Ngo Van Thanh<sup>1</sup>, Nguyen Tung Lam<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical Engineering - Automotive and Construction, Electric Power University, Vietnam

<sup>2</sup>Faculty of Mechanical Engineering, University of Transport and Communications, Vietnam