

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP.HCM

NGUYỄN HUỲNH THI

TÊN ĐỀ TÀI LUẬN ÁN  
NGHIÊN CỨU VÀ CHẾ TẠO THỬ NGHIỆM ĐỘNG CƠ ĐỐT TRONG  
KHÔNG TRỰC KHUYỬ

Chuyên ngành: Kỹ Thuật Cơ Khí Động Lực  
Mã số chuyên ngành: 9520116

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2025

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS. Huỳnh Thanh Công

Người hướng dẫn khoa học 2: TS. Nguyễn Văn Trọng

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp Cơ sở  
họp tại Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

vào ngày      tháng      năm

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

# MỞ ĐẦU

## 1. Lý do chọn đề tài

Dưới tác động của công nghiệp hóa và hiện đại hóa, hệ thống giao thông tại Việt Nam đóng vai trò quan trọng trong tăng trưởng kinh tế nhưng đồng thời gây ra nhiều vấn đề về môi trường và sức khỏe cộng đồng. Việc tìm kiếm các giải pháp nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng và giảm thiểu ô nhiễm trở nên cấp thiết. Các phương tiện giao thông thân thiện với môi trường, như ô tô điện và ô tô hybrid, được coi là giải pháp tiềm năng, nhưng vẫn đối mặt với các hạn chế như trọng lượng pin lớn, thời gian sạc dài và phạm vi hoạt động hạn chế. Trong bối cảnh đó, động cơ đốt trong không trực khuỷu phát điện tuyến tính (FPEG) nổi lên như một giải pháp triển vọng, với hiệu suất nhiệt cao, lực ma sát thấp, và kết cấu nhỏ gọn, phù hợp để nạp điện cho ô tô điện. Tuy nhiên, các vấn đề về hiệu suất và độ ổn định của FPEG vẫn cần được tiếp tục nghiên cứu. Do đó, đề tài “Nghiên cứu và chế tạo thử nghiệm động cơ đốt trong không trực khuỷu” được triển khai nhằm giải quyết các thách thức này, mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong tương lai.

## 2. Mục đích nghiên cứu

Luận án phân tích tổng quan về những khoảng trống của các công trình nghiên cứu trước để đưa ra giả thiết nghiên cứu, đặt mục tiêu trọng tâm và mục tiêu cụ thể của luận án như sau:

*Khoảng trống nghiên cứu:*

Cơ cấu hỗ trợ đảo chiều piston và máy phát điện tuyến tính quá phức tạp, cần một giải pháp nghiên cứu kết cấu động cơ không trực khuỷu đơn giản hơn để giảm độ phức tạp của động cơ không trực khuỷu, giúp phát triển mạnh và phát huy tiềm năng của động cơ không trực khuỷu.

*Giả thiết nghiên cứu:*

Cơ cấu khởi động cơ khí điều khiển tốc độ khởi động và biên độ dao động của piston ổn định.

Có thể sử dụng áp suất của xy lanh đối diện để đảo chiều piston một cách tin cậy mà không sử dụng cơ cấu hỗ trợ đảo chiều piston hoặc máy phát điện tuyến tính điều khiển phức tạp

*Mục tiêu trọng tâm của luận án:*

Từ khoảng trống nghiên cứu và giả thiết nghiên cứu trên, mục tiêu trọng tâm của luận án là nghiên cứu điều kiện để piston tự đảo chiều một cách tin cậy bằng áp suất xy lanh đối diện trong động cơ không trực khuỷu xy lanh kép.

*Mục tiêu cụ thể:*

Thiết kế và chế tạo mô hình động cơ không trực khuỷu loại piston kép, hai kỳ, đánh lửa cưỡng bức có thể tự hoạt động mà không cần cơ cấu hỗ trợ đảo chiều phức tạp.

Thiết kế và phát triển một cơ cấu khởi động phù hợp cùng hệ thống điều khiển điện tử để động cơ có thể khởi động và vận hành thỏa mãn điều kiện làm việc để piston tự đảo chiều.

Nghiên cứu khảo nghiệm đánh giá khả năng khởi động và tính ổn định khi động cơ làm việc ở điều kiện không tải ở động cơ nguyên mẫu, để chứng minh tính đúng đắn của điều kiện piston tự đảo chiều đã nghiên cứu.

### **3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu**

Động cơ đốt trong không trực khuỷu loại piston kép, 2 kỳ, cỡ nhỏ ( $30 \text{ cm}^3$ ), đánh lửa cưỡng bức, sử dụng nhiên liệu xăng truyền thống.

### **4. Phạm vi nghiên cứu**

Khảo sát và phân tích đặc tính động học, động lực học của động cơ không trực khuỷu 2 kỳ, cỡ nhỏ khoảng  $30 \text{ cm}^3$ , đánh lửa cưỡng bức.

Thiết kế, chế tạo mô hình FPE và đề xuất cơ cấu khởi động cơ khí.

Mô hình hóa, mô phỏng áp suất cháy của quá trình khởi động và thực nghiệm khảo sát một số thông số cơ bản của quá trình khởi động và hoạt động ở điều kiện không tải dựa trên mô hình đã thiết kế. Bên cạnh đó, nghiên cứu này chưa đi sâu vào phân tích các vấn đề bôi trơn, làm mát và cơ sở lý thuyết của các quá trình cháy, truyền nhiệt diễn ra bên trong động cơ.

### **5. Phương pháp nghiên cứu**

Luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết, thiết kế, kết hợp với mô phỏng và chế tạo thử nghiệm mô hình cụ thể như sau:

*Nghiên cứu lý thuyết:* Nghiên cứu về động lực học của động cơ đốt trong không trực khuỷu, lý thuyết đánh lửa, lý thuyết khởi động và lý thuyết về quá trình cháy của động cơ

*Nghiên cứu tính toán, thiết kế:* Tính toán các thông số cơ bản của động cơ, nguyên lý khởi động cơ khí cho động cơ piston tự do, tính toán các thông số của hệ thống khởi động, điều khiển động cơ piston tự do

*Nghiên cứu mô phỏng:* Từ cơ sở thiết kế sử dụng phần mềm Matlab Simulink mô phỏng để đánh giá quá trình cháy.

*Nghiên cứu thực nghiệm:* Từ cơ sở lý thuyết và mô phỏng, thực hiện chế tạo mô hình thực nghiệm để đánh giá lại các thông số mô phỏng.

### **6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án**

*Ý nghĩa khoa học:* Bổ sung cơ sở phương pháp luận xác định điều kiện để piston tự đảo chiều ở động cơ không trực khuỷu xylanh kép.

*Ý nghĩa thực tiễn:* Kết quả của đề tài bổ sung cơ sở tính toán, thiết kế và điều khiển động cơ không trực khuỷu xylanh kép không dùng cơ cấu hỗ trợ đảo chiều piston nhằm phát triển và phát huy tiềm năng động cơ không trực khuỷu piston kép hai kỳ, đánh lửa cưỡng bức bằng tia lửa điện định hướng phát điện.

### **7. Cấu trúc**

#### **Mở đầu**

## **Nội dung**

Chương 1: Tổng quan

Chương 2: Cơ sở lý thuyết

Chương 3: Nghiên cứu xây dựng mô hình và mô phỏng động cơ đốt trong không trục khuỷu FPE

Chương 4: Nghiên cứu thực nghiệm

## **Kết luận và hướng phát triển**

### **Chương 1: TỔNG QUAN**

Chương này cung cấp một tổng quan về các thông tin cơ bản liên quan đến động cơ không trục khuỷu, cùng với những tiến bộ nghiên cứu gần đây trong lĩnh vực này. Các công trình đã công bố về mô hình hóa, thiết kế và thử nghiệm nguyên mẫu, cũng như chiến lược điều khiển của động cơ không trục khuỷu, được tóm lược và phân tích. Mục tiêu của đánh giá này là mang đến một cái nhìn tổng quan về hiện trạng nghiên cứu, đồng thời xác định các thách thức chính để làm cơ sở đề xuất mô hình nghiên cứu phù hợp trong tương lai.

#### **1.1. Lịch sử ra đời của động cơ không trục khuỷu**

Động cơ không trục khuỷu (Free Piston Engine - FPE) là loại động cơ đốt trong hoạt động dựa trên chuyển động tuyến tính của cụm piston, không sử dụng trục khuỷu. Được đề xuất từ những năm 1930, FPE ban đầu ứng dụng làm máy nén khí và máy tạo khí. Loại động cơ này vượt trội hơn động cơ đốt trong truyền thống nhờ hiệu suất nhiệt cao, đạt khoảng 40% – 50%, so với 30% – 40% của các động cơ thông thường. Những tiến bộ trong công nghệ điều khiển và hệ thống truyền động thời gian thực gần đây đã mở ra cơ hội phát triển FPE như một giải pháp thay thế hiệu quả cho các công nghệ truyền thống. Hiện nay, FPE đang được nghiên cứu và ứng dụng trong các lĩnh vực sản xuất điện và thủy lực, đặc biệt là trong xe điện hybrid, nhờ khả năng giảm tiêu thụ năng lượng và giảm thiểu tác động môi trường.

#### **1.2. Đánh giá ưu và nhược điểm của động cơ không trục khuỷu**

Động cơ không trục khuỷu (FPE) sở hữu nhiều ưu điểm vượt trội nhờ thiết kế loại bỏ cơ cấu trục khuỷu, giúp giảm tổn thất ma sát, tổn thất truyền nhiệt và tối ưu hóa tỷ số nén. Động cơ này có cấu trúc nhỏ gọn, giảm chi phí bảo trì, tăng độ tin cậy và khả năng sử dụng đa nhiên liệu. Tuy nhiên, FPE cũng đặt ra những thách thức lớn về kỹ thuật, như kiểm soát đánh lửa và phun nhiên liệu khi không có trục khuỷu làm tham chiếu. Khởi động động cơ, kiểm soát hành trình piston, thiết bị hỗ trợ đảo chiều piston và duy trì ổn định vận hành là các vấn đề cần được giải quyết. Việc phát triển các hệ thống điều khiển và cảm biến tiên tiến là chìa khóa để khắc phục các hạn chế này, mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong tương lai.

#### **1.3. Động cơ không trục khuỷu phát điện tuyến tính (FPEG)**

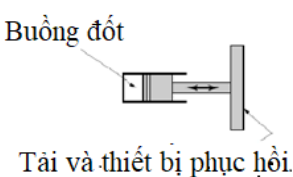
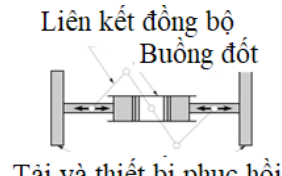
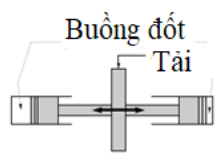
#### **1.4. Tình hình nghiên cứu liên quan đến đề tài**

### 1.4.1.Đánh giá cấu hình piston

Theo các kết quả nghiên cứu, FPE có thể được chia thành ba loại theo cấu hình piston: piston đơn, piston kép và piston đối xứng. Sơ đồ cấu tạo và đánh giá những ưu điểm và nhược điểm của từng loại được minh họa trong Bảng 1.1.

Cấu hình động cơ piston kép loại bỏ sự cần thiết của thiết bị đổi chiều, vì hành trình làm việc của piston này cung cấp công việc dẫn động quá trình nén trong xy lanh kia. Điều này cho phép thiết bị đơn giản và nhỏ gọn hơn với hiệu suất cao hơn. Vì thế, cấu hình này được lựa chọn.

**Bảng 1.1:** Các kiểu động cơ không trục khuỷu

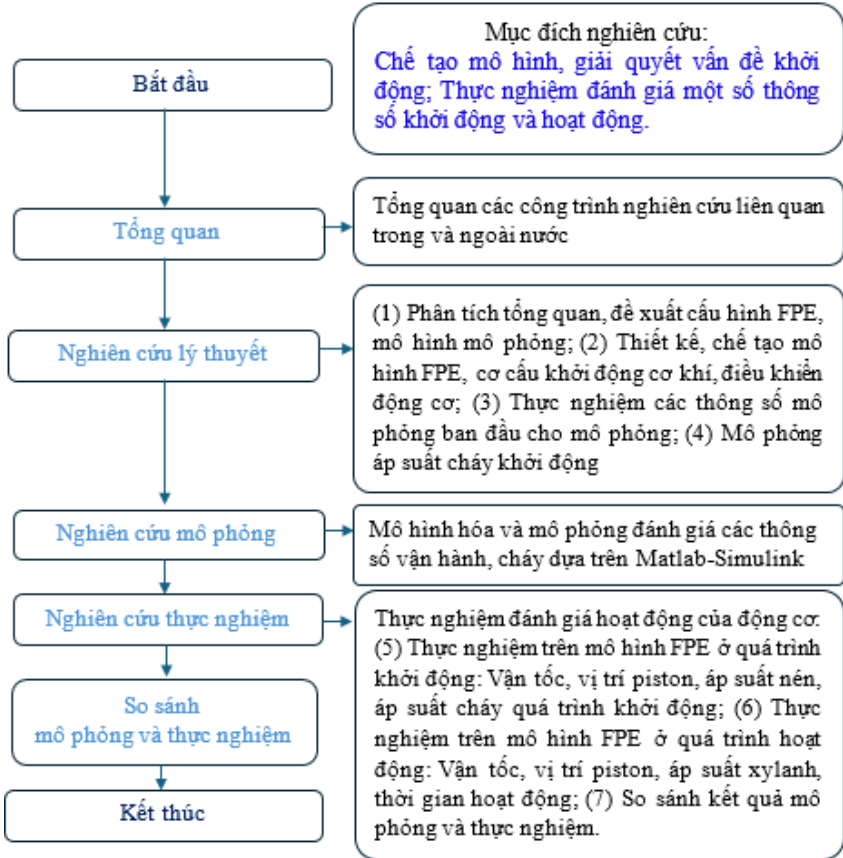
Kiểu piston	Cấu tạo	Đánh giá
Piston đơn	 <p>Buồng đốt</p> <p>Tải và thiết bị phục hồi.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Đơn giản và dễ kiểm soát;</li> <li>• Không cân bằng;</li> <li>• Có thể sử dụng đối trọng.</li> <li>• Cần phải có thiết bị phục hồi hỗ trợ đảo chiều piston để duy trì hoạt động</li> </ul>
Piston đối xứng	 <p>Liên kết đồng bộ</p> <p>Buồng đốt</p> <p>Tải và thiết bị phục hồi</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cân bằng trọng tâm;</li> <li>• Không dao động với khối lượng piston bằng nhau;</li> <li>• Yêu cầu đồng bộ hóa piston.</li> <li>• Cần phải có thiết bị phục hồi hỗ trợ đảo chiều piston để duy trì hoạt động</li> </ul>
Piston kép	 <p>Buồng đốt</p> <p>Tải</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mật độ công suất cao hơn;</li> <li>• Hiệu quả tiềm năng cao hơn; không cân bằng;</li> <li>• Tự duy trì hoạt động mà không cần thiết bị hỗ trợ đảo chiều piston.</li> <li>• Tương đối khó kiểm soát.</li> </ul>

### 1.4.2.Lựa chọn nguyên lý khởi động

Nghiên cứu này sẽ tập trung vào FPE loại piston kép đánh lửa cưỡng bức. Một cơ cấu khởi động cơ khí được đề xuất áp dụng cả hai chiến lược nêu trên, cơ cấu có khả năng đưa piston đi hết hành trình và dao động tuyến tính.

### 1.5. Thiết lập hướng nghiên cứu

Định hướng nghiên cứu này không chỉ tập trung vào việc phát triển và cải tiến mô hình FPE piston kép mà còn nhấn mạnh việc tìm kiếm một phương pháp khởi động đáng tin cậy. Hình 1.1 minh họa định hướng nghiên cứu và phương pháp tiếp cận của đề tài này.



Hình 1.1 Định hướng nghiên cứu của luận án

### 1.6. Kết luận chương 1

#### Chương 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Chương này trình bày các thông tin nền tảng về cơ sở lý thuyết của động cơ không trục khuỷu, phân tích và đánh giá các nghiên cứu trước đây,

cung cấp cái nhìn toàn diện về tiềm năng cũng như thách thức của động cơ FPE, từ đó đặt nền móng cho việc đề xuất và phát triển mô hình thiết kế FPE trong nghiên cứu này.

**2.1. Động lực học động cơ không trục khuỷu**

Các lực tác dụng lên FPLE bao gồm:

- Lực khí thể tác dụng lên xylanh 1  $F_{p1}$  và xylanh 2  $F_{p2}$
- Lực ma sát do các bề mặt tiếp xúc  $F_f$
- Lực từ trường do cuộn dây máy phát tuyến tính gây ra  $F_{cog}$
- Lực quán tính của các khối lượng chuyển động  $m\ddot{x}$

Theo định luật II Newton, phương trình động lực học của khối lượng chuyển động có thể được biểu diễn:

$$m\vec{x} = \vec{F}_{p1} + \vec{F}_{p2} + \vec{F}_f + \vec{F}_{cog} \tag{2.1}$$

**2.2. Lý thuyết quá trình cháy trong động cơ đánh lửa cưỡng bức**

**2.2.1. Hệ nhiệt động động cơ đốt trong**

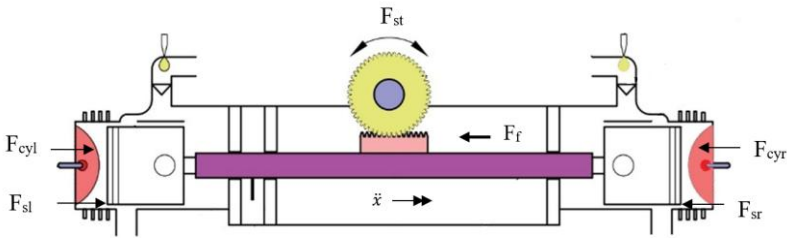
**2.2.2. Hệ nhiệt động chu trình nhiệt động cơ đánh lửa cưỡng bức**

**2.3. Mục tiêu mô phỏng**

**2.4. Động lực học của mô hình FPE**

Piston được điều khiển dao động từ điểm giới hạn trên đến điểm giới hạn dưới hoặc ngược lại với khoảng cách cố định. Có thể xem như piston dao động dưới dạng hình Sin, được biểu diễn dưới dạng:

$$x_s = A \times (1 - \frac{1}{\epsilon}) \sin(2\pi f \times t) \tag{2.2}$$



**Hình 2.1:** Sơ đồ động lực học học FPE

Động lực học của piston có thể được xác định bằng định luật Newton II.

$$F_{st} - F_{st} - F_{sr} - F_f = m \frac{d^2x}{dt^2} \text{ (quá trình khởi động)} \tag{2.3}$$

$$F_{cyl} - F_{cyr} - F_f = m \frac{d^2x}{dt^2} \text{ (quá trình hoạt động)} \tag{2.4}$$

$$F_{cyl} = P_{cyl} \times S \tag{2.5}$$

$$F_{cyr} = P_{cyr} \times S \tag{2.6}$$

$$P_{cyl} = P_{lep} + P_{lh} \times \sigma_1 \tag{2.7}$$

$$P_{cyr} = P_{rep} + P_{rh} \times \sigma_r \tag{2.8}$$



$$\sigma_1 = \begin{cases} 1, & \frac{dx}{dt} \geq 0 \\ 0, & \frac{dx}{dt} < 0 \end{cases}$$

$$\sigma_r = \begin{cases} 1, & \frac{dx}{dt} \geq 0 \\ 0, & \frac{dx}{dt} < 0 \end{cases}$$

$$F_{cyr} (\sigma_r = 0) \leq m \frac{d^2x}{dt^2} \leq F_{cyr} (\sigma_r = 1) \quad (2.9)$$

## 2.5. Mô hình áp suất cháy trong xylanh

Sự thay đổi áp suất trong xylanh do quá trình đốt cháy của FPE có thể thu được dưới dạng đạo hàm của phương trình nhiệt động lực học thứ nhất:

$$\frac{dp}{dt} = -\gamma \frac{p}{V} \frac{dV}{dt} + (\gamma - 1) \frac{Q_{in}}{V} \frac{dx_b}{dt} \quad (2.47)$$

Trong đó:

p: áp suất trong xylanh (bar)

$\gamma = 1,4$ : chỉ số tỷ lệ nhiệt riêng

V: thể tích xylanh ( $m^3$ )

$Q_{in}$ : nhiệt lượng đầu vào

$x_b$ : khối lượng nhiên liệu bị đốt cháy (mass fraction burned – mfb)

Quá trình đốt cháy, mô phỏng phần khối lượng bị đốt cháy được thực hiện bằng hàm Wiebe:

$$x_b = 1 - \exp \left[ -a \left( \frac{t-t_s}{C_d} \right)^{b+1} \right] \quad (2.10)$$

Trong đó:

$C_d$ : % thời gian cháy

$t_s$ : Thời điểm bắt đầu đánh lửa

Các hằng số của a = -5 và b = 2 được sử dụng. Những hằng số được sử dụng rộng rãi cho động cơ đánh lửa nói chung và nó đã được chứng minh rằng chúng tương quan tốt với dữ liệu thực nghiệm. Lưu đồ mô phỏng và mô hình mô phỏng Matlab Simulink.

## 2.6. Kết luận chương 2

Chương này giới thiệu các mô hình động lực học của động cơ không trực khuỷu, cung cấp cơ sở lý thuyết quan trọng để mô phỏng và phân tích FPE trong nghiên cứu. Mô hình mô phỏng quá trình cháy của FPE trong giai đoạn khởi động được xây dựng dựa trên phương trình nhiệt động lực học thứ nhất kết hợp với hàm Wiebe, và toàn bộ hệ thống mô phỏng được triển khai trên nền tảng Matlab Simulink.

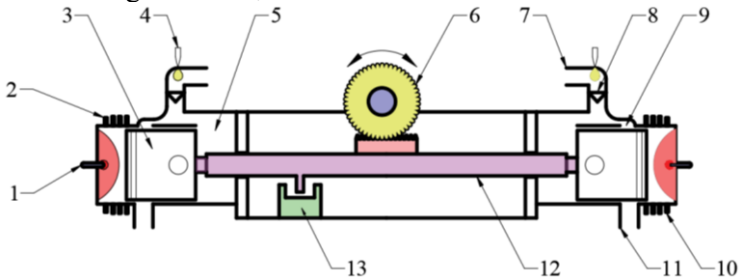
### Chương 3.      **NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH VÀ MÔ PHỎNG ĐỘNG CƠ ĐÓT TRONG KHÔNG TRỤC KHUỖY FPE**

Trong phần này, các thông số của cơ cấu khởi động cơ khí được tính toán và thiết kế một cách chi tiết. Sau khi hoàn thiện thiết kế, mô hình FPE đã được chế tạo và tiến hành thử nghiệm ban đầu nhằm xác định các thông số quan trọng như áp suất nén và tốc độ khởi động ban đầu – những yếu tố có ý nghĩa quyết định đối với hiệu quả hoạt động của động cơ.

Phương pháp điều khiển quá trình khởi động và vận hành của FPE cũng được đề xuất nhằm đảm bảo động cơ có thể duy trì sự ổn định trong suốt quá trình hoạt động. Các thông số kỹ thuật ban đầu, sau khi đã được tính toán và kiểm chứng thông qua thực nghiệm, sẽ trở thành nền tảng quan trọng cho các mô phỏng áp suất trong quá trình cháy cũng như các thử nghiệm sâu hơn về quá trình khởi động và vận hành động cơ, được trình bày trong Chương 4.

#### **3.1. Các thông số cơ bản của động cơ**

Mô hình FPE được thể hiện trong Hình 3.1, sử dụng hai động cơ hai thì với hệ thống đánh lửa bằng tia lửa điện.



**Hình 3.1:** Sơ đồ của FPE

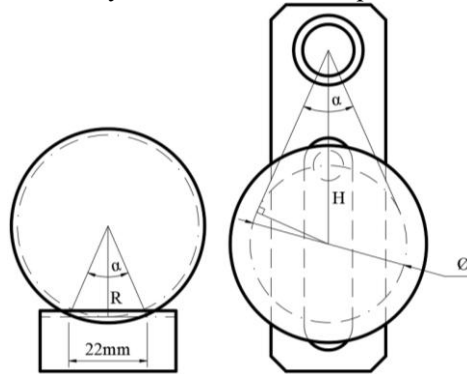
1. Bugi; 2. Xylanh trái; 3. Piston; 4. Vòi phun nhiên liệu; 5. Buồng chứa phụ; 6. Khởi động cơ khí; 7. Cửa nạp khí; 8. Van một chiều; 9. Cửa quét; 10. Xylanh phải; 11. Cửa xả; 12. Trục kết nối chính; 13. Giới hạn hành trình piston.

**Bảng 3.1:** Thông số kỹ thuật của động cơ

Số xylanh	2
Loại động cơ	2 kỳ
Đường kính xylanh	34 mm
Hành trình khởi động	22mm
Hành trình tối đa	30 mm
Khối lượng dịch chuyển	0.5 kg
Tỉ số nén tối đa	9:1
Nhiên liệu	xăng

#### **3.2. Nguyên lý khởi động cơ khí cho mô hình FPE**

Nguyên lý khởi động cơ khí cho mô hình động cơ piston tự do như sau: Về cơ bản, hệ thống khởi động cơ khí cho FPE là một cơ cấu Culit, được tính toán để đảm bảo biên độ dịch chuyển 22mm, thể hiện qua Hình 3.2



**Hình 3.2:** Cơ cấu Culit

### 3.3. Các bộ phận chính của mô hình

#### 3.3.1. Cụm piston xy lanh

#### 3.3.2. Khoang nạp

#### 3.3.3. Cơ cấu chống xoay

#### 3.3.4. Trục chính

#### 3.3.5. Cơ cấu giới hạn hành trình

### 3.4. Thiết kế hệ thống khởi động cơ khí cho mô hình FPE

#### 3.4.1. Tính toán áp suất cuối quá trình nén khởi động

#### 3.4.2. Cụm trục bánh lệch tâm và cơ cấu Culit

#### 3.4.3. Chọn động cơ điện khởi động

### 3.5. Điều khiển mô hình FPE

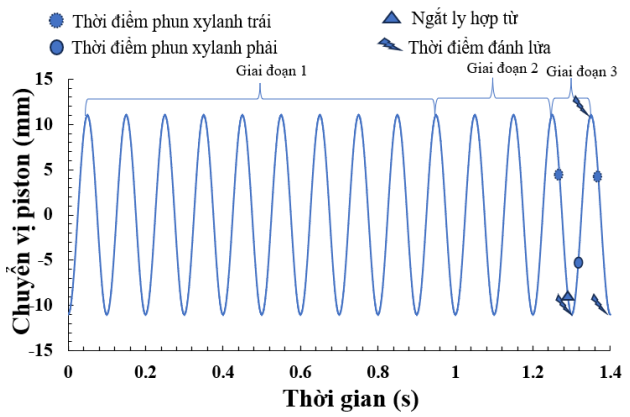
#### 3.5.1. Hệ thống điều khiển

Quá trình khởi động có thể được chia thành ba giai đoạn:

**Giai đoạn một:** Cơ cấu khởi động vẫn áp dụng nguyên lý khởi động cộng hưởng, trong đó piston được dẫn động với tốc độ tuyến tính cao nhất đạt khoảng 0,7 m/s, duy trì lực khởi động không đổi là 435 N. Piston được dẫn động nhờ một động cơ điện kết hợp với bộ truyền động xích, cho phép dịch chuyển với biên độ không đổi 22 mm (piston cách giới hạn trên 9 mm), đạt tỷ số nén thấp,  $\epsilon = 3$ .

**Giai đoạn hai:** Nhiên liệu được phun vào đường ống nạp để tạo thành hòa khí. Dưới tác động của chênh lệch áp suất trong buồng nạp, hòa khí được hút vào buồng nạp và giữ lại nhờ van một chiều. Trong giai đoạn này, piston vẫn duy trì chuyển động tuyến tính, đẩy hòa khí vào buồng cháy thông qua cửa quét.

**Giai đoạn ba:** Ly hợp từ trong cơ cấu khởi động cơ khí tách khỏi trục chính, ngay lập tức quá trình đánh lửa được thực hiện, và động cơ chuyển sang giai đoạn hoạt động tự do. Các giai đoạn trên được minh họa cụ thể trong Hình 3.3.



**Hình 3.3:** Chiến lược điều khiển mô hình FPE

**3.5.2. Điều khiển hệ thống phun nhiên liệu - đánh lửa điện tử**

**3.5.3. Điều khiển hệ thống phun nhiên liệu**

**3.6. Mô phỏng quá trình cháy trong quá trình khởi động FPE**

**3.6.1. Mục đích và phạm vi mô phỏng**

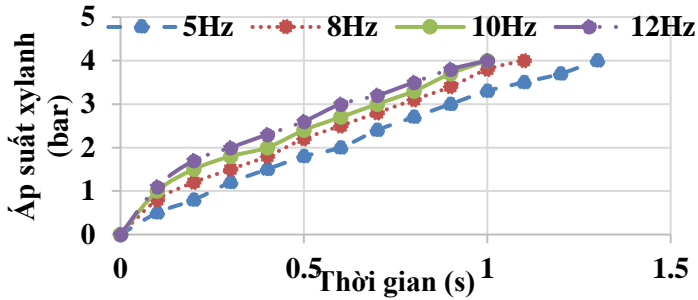
Mô phỏng là cơ sở ban đầu để đánh giá đề xuất khởi động cơ khí có phù hợp với mô hình động cơ FPE hay không. Các thông số mô phỏng được thể hiện dưới bảng sau:

**Bảng 3.2:** Các thông số mô phỏng quá trình cháy đầu tiên

Thông số kỹ thuật	Kí hiệu	Giá trị
Tần số khởi động (Hz)	$f$	10
Tỷ số nén khởi động	$\epsilon$	$\approx 3$
Áp suất cuối quá trình nén khởi động (bar)	$p_c$	4
Thời gian cháy (ms)	$t$	2 – 5
Lượng nhiên liệu đầu vào (mg)	$m_f$	2 – 4
Tỷ lệ nhiệt riêng	$\gamma$	1,4
Nhiệt trị thấp của xăng (MJ/kg)	LHV	43,96

### 3.6.2. Thực nghiệm áp suất cuối quá trình nén khởi động

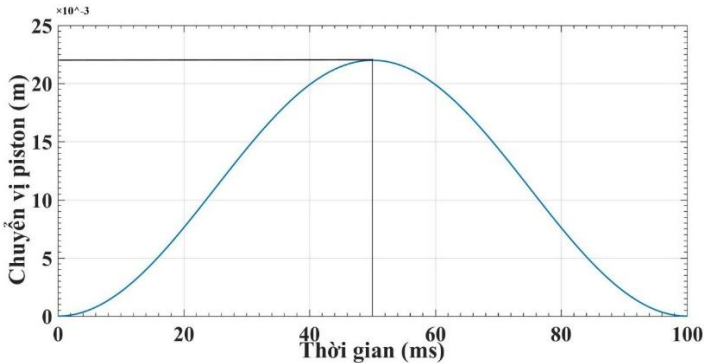
Thực nghiệm với bốn tần số tuyến tính 5Hz, 8Hz, 10Hz và 12 Hz, thay đổi tần số bằng cách thay đổi tỷ số truyền giữa mô tơ điện đến bộ phận khởi động, thể hiện ở Hình 3.4.



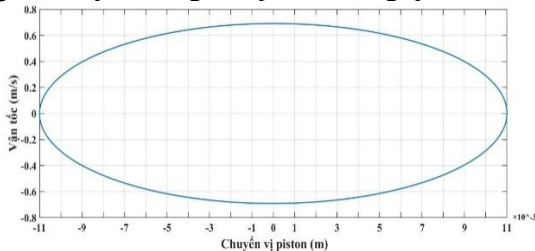
Hình 3.4: Đồ thị thời gian đạt áp suất khởi động với các tần số khác nhau

### 3.6.3. Kết quả mô phỏng

Thời điểm đánh lửa được xác định tại vị trí piston đạt 22 mm (9 mm tính từ ĐGHT), tương ứng với thời gian dịch chuyển của piston hơn 50 ms, như được thể hiện trong Hình 3.5. Tốc độ khởi động ở 10 Hz (với vận tốc piston khoảng 0,7 m/s) cũng được minh họa trong Hình 3.6.



Hình 3.5: Thời gian chuyển động của piston trong quá trình khởi động

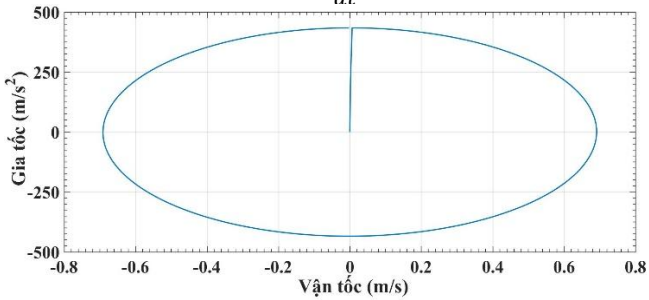


Hình 3.6: Vận tốc và chuyển vị của piston trong quá trình khởi động

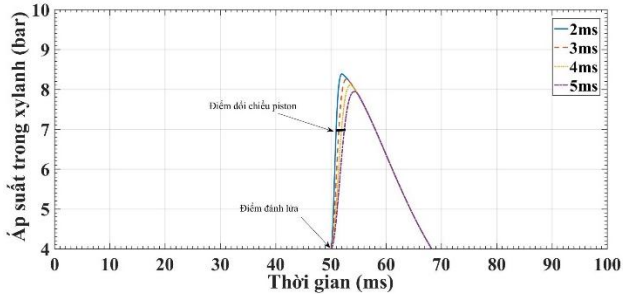
Điều kiện để FPE duy trì hoạt động sau lần đánh lửa đầu tiên:

$$F_{cyr} > m \frac{d^2x}{dt^2} + F_{sl}$$

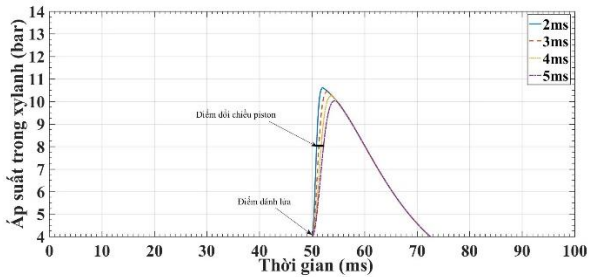
$$F_{cyl} > m \frac{d^2x}{dt^2} + F_{sr}$$



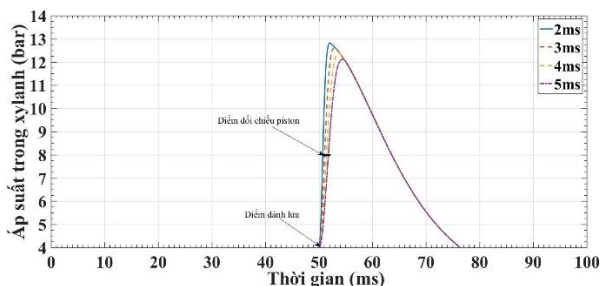
**Hình 3.7:** Vận tốc và gia của piston trong quá trình khởi động



**Hình 3.8:** Kết quả mô phỏng áp suất xy lanh với lượng phun nhiên liệu 2 mg, thời gian cháy 2 ms – 5 ms, áp suất ban đầu 4 bar, tần số khởi động 10 Hz



**Hình 3.9:** Kết quả mô phỏng áp suất xy lanh với lượng phun nhiên liệu 3 mg, thời gian cháy 2 ms – 5 ms, áp suất ban đầu 4 bar, tần số khởi động 10 Hz



**Hình 3.10:** Kết quả mô phỏng áp suất xylanh với lượng phun nhiên liệu 4 mg, thời gian cháy 2 ms – 5 ms, áp suất ban đầu 4 bar, tần số khởi động 10 Hz

### 3.7 Kết luận chương 3

Chương này trình bày quá trình thiết kế và chế tạo mô hình động cơ không trục khuỷu với cấu hình đặc biệt, sử dụng động cơ không trục khuỷu, loại piston kép, hoạt động hai kỳ và đánh lửa bằng tia lửa điện. Cấu hình này sử dụng cơ cấu khởi động cơ khí tự phát triển.

Để nghiên cứu quá trình hoạt động của động cơ, mô phỏng động học và nhiệt động lực học của động cơ được thực hiện bằng mô hình máy Wiebe trong môi trường Matlab Simulink. Những kết quả mô phỏng này chỉ ra rằng động cơ có thể khởi động ổn định với cơ cấu khởi động cơ khí hoạt động ở tần số 10 Hz, và khi lượng nhiên liệu phun vào mỗi chu kỳ dao động từ 2mg đến 4 mg, động cơ có thể duy trì hoạt động liên tục, đảm bảo hiệu suất cao trong quá trình vận hành.

## Chương 4: NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

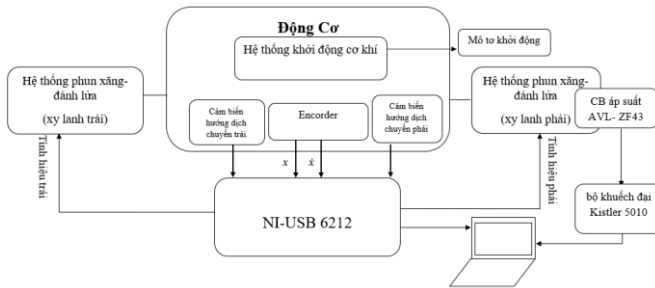
Trong chương này, một loạt các thực nghiệm đã được tiến hành nhằm kiểm tra các yếu tố quan trọng như áp suất, tốc độ động cơ, lượng nhiên liệu phun, thời điểm đánh lửa, v.v. Các thực nghiệm này được thực hiện ở hai chế độ: chế độ khởi động và chế độ hoạt động của động cơ. Việc điều khiển các tham số này ở hai chế độ khác nhau đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá hoạt động động cơ. Ở chế độ khởi động, cần có những điều chỉnh khác biệt so với chế độ hoạt động để đảm bảo động cơ có thể khởi động dễ dàng và ổn định ngay cả trong các điều kiện môi trường khác nhau. Trong khi đó, ở chế độ hoạt động, các tham số như áp suất và thời điểm đánh lửa cần được điều chỉnh để động cơ có thể hoạt động.

### 4.1. Mục đích và phạm vi thực nghiệm

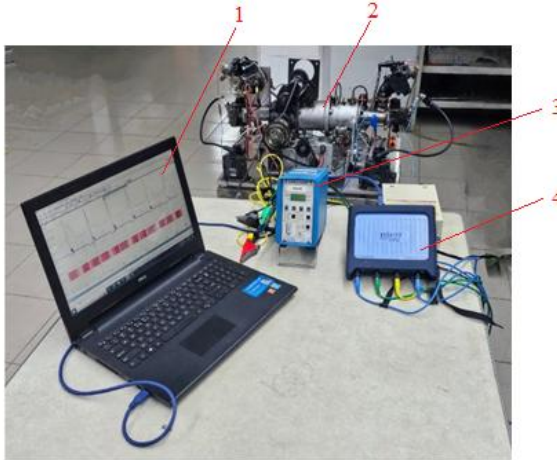
Thực nghiệm được tiến hành nhằm khảo sát các thông số chủ yếu ở hai giai đoạn: giai đoạn khởi động và giai đoạn hoạt động. Trong giai đoạn khởi động, lần đánh lửa đầu tiên sau khi tách ly hợp đóng vai trò quyết định. Trong giai đoạn này, cần phải đảm bảo độ chính xác cao vì nếu ly hợp không tách hoàn toàn, piston sẽ không thể đổi chiều hoặc chỉ có thể đổi chiều với lực quán tính không đủ lớn, khiến động cơ không thể khởi động.

## 4.2. Bố trí mô hình thực nghiệm

Mô hình thực nghiệm FPE được trình bày trong Hình 4.1 và Hình 4.2.



**Hình 4.1:** Sơ đồ bố trí thí nghiệm

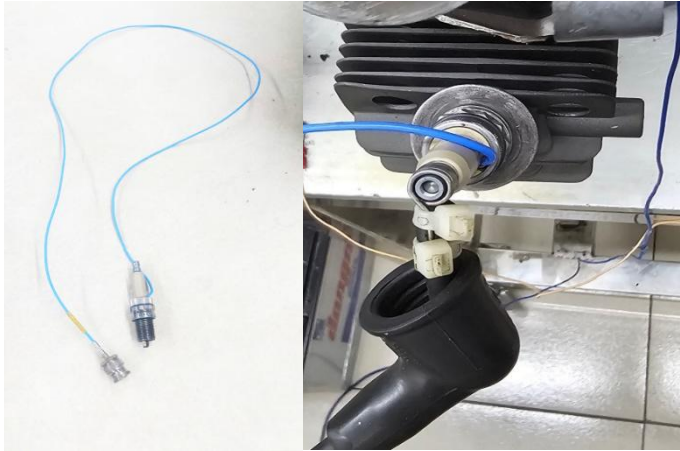


**Hình 4.2:** Mô hình thí nghiệm FPE

1. Máy tính; 2. Mô hình FPE; 3. Bộ khuếch đại Kistler 5010; 4. Bộ đo xung PicoScope 4425

Trong các thí nghiệm, thời điểm đánh lửa được xác định khi tia lửa đầu tiên xuất hiện. Hệ thống thu thập dữ liệu của FPE, được phát triển bằng phần mềm LabView, tích hợp với thiết bị thu thập dữ liệu PicoScope 4425. Để đo áp suất cháy trong xy lanh, cảm biến áp suất AVL-ZF43 (Hình 4.3 và Bảng 4.1) được sử dụng kết hợp với bộ khuếch đại Kistler 5010. Một encoder có độ phân giải 0,2 mm/xung được lắp trên động cơ để cung cấp dữ liệu về vị trí và vận tốc của động cơ. Các tín hiệu điều khiển và dữ liệu từ các cảm biến được truyền về máy tính qua thiết bị NI-USB 6212.





**Hình 4.3:** Cảm biến AVL-ZF43

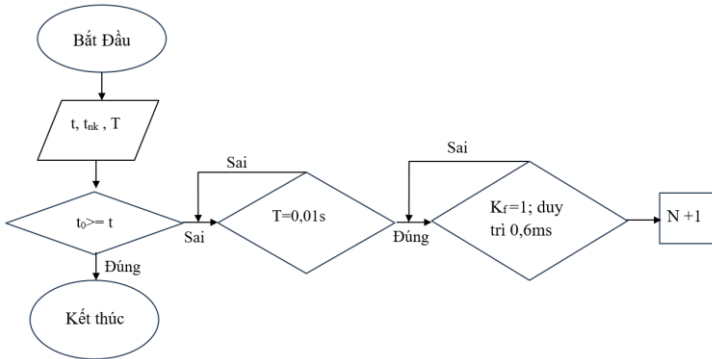
**Bảng 4.1:** Thông số kỹ thuật của cảm biến AVL-ZF43

Thông số	Giá trị
Phạm vi đo lường	0...250bar
Độ nhạy	16 pC/bar
Độ chính xác	$\pm 0,3\%$
Tần số đáp ứng	115 kHz
Nhiệt độ hoạt động	-40°C...400°C

### 4.3. Xác định lượng nhiên liệu phun

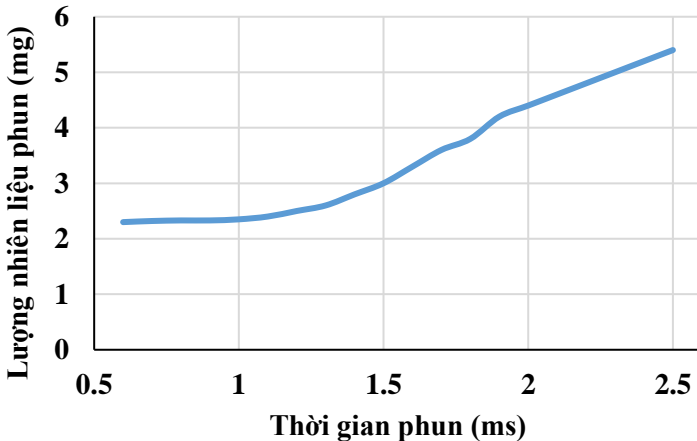
#### 4.3.1. Thực nghiệm nhiên liệu phun

Khi tín hiệu từ bộ điều khiển truyền đến bộ chấp hành (kim phun), thời gian đáp ứng là cần thiết, do đó thời gian phun từ tín hiệu điều khiển và thời gian phun thực tế có sự chênh lệch. Do vậy, cần tiến hành thực nghiệm để xác định chính xác lượng nhiên liệu phun thực tế tương ứng với thời gian phun.



**Hình 4.4:** Sơ đồ thực toán thử nghiệm lượng nhiên liệu phun

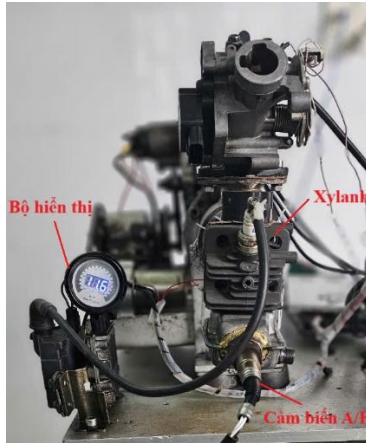
Thực nghiệm tiếp tục với các thời gian phun khác nhau để thu thập kết quả so sánh, được trình bày trong Hình 4.5.



**Hình 4.5:** Lượng nhiên liệu phun theo thời gian

#### 4.3.2. Thực nghiệm tỷ lệ A/F

Trong mô hình thực nghiệm này, tỷ lệ A/F trong quá trình khởi động được đo bằng cảm biến A/F, với phạm vi đo từ 10:1 đến 20:1. Xác định A/F được tiến hành khi động cơ chưa hoạt động để xác định tỷ lệ không khí trên nhiên liệu trong buồng đốt thông qua cửa thải, vì thế cảm biến được đặt tại đường ống thải. Kết quả thực nghiệm cho thấy tỷ lệ trung bình của không khí trên nhiên liệu trong quá trình khởi động là 11,6:1 khi lượng nhiên liệu phun vào là 3 mg. khởi động, đảm bảo động cơ đạt được điều kiện hoạt động ổn định một cách nhanh chóng, Hình 4.6.



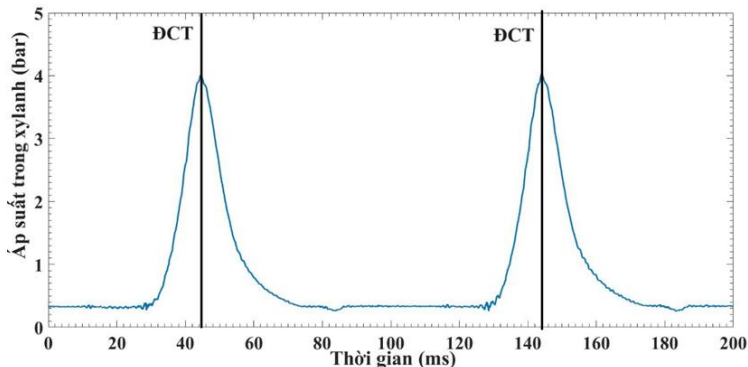
**Hình 4.6:** Thực nghiệm tỷ lệ A/F

Trong quá trình động cơ hoạt động, tỷ lệ không khí trên nhiên liệu duy trì ở mức khoảng 19,7:1 với lượng nhiên liệu phun vào là 3 mg.

#### 4.4. Kết quả thực nghiệm

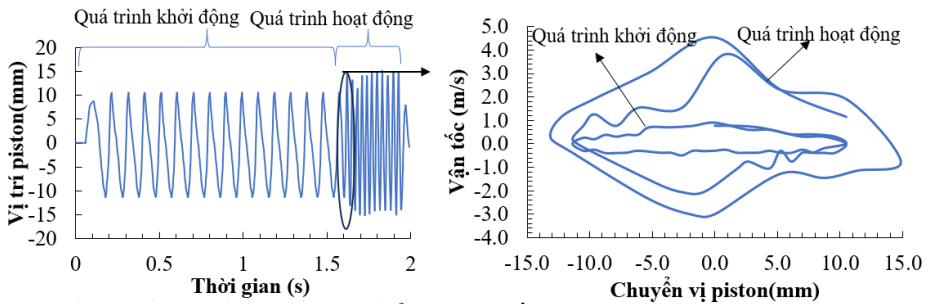
##### 4.4.1. Quá trình khởi động

Khi bắt đầu khởi động tín hiệu sẽ được chuyển đến bộ điều khiển, piston được dao động không đổi với biên độ là 22 mm, tần số cố định 10 Hz. Áp suất nén ban đầu 4 bar với áp suất này động cơ thực hiện đánh lửa để quá trình cháy xảy ra. Thể hiện ở Hình 4.7.



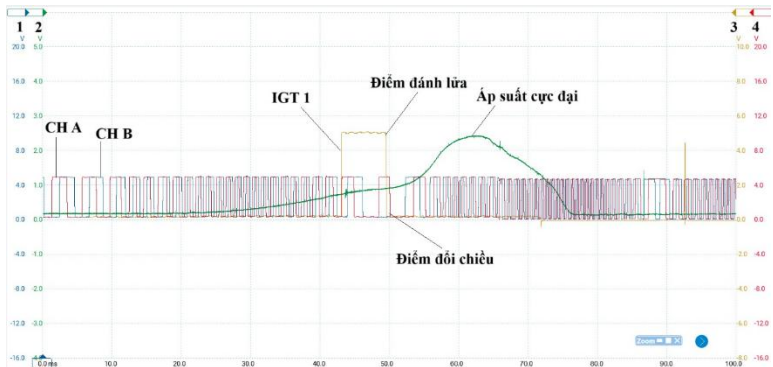
**Hình 4.7:** Áp suất khởi động

Quá trình chuyển tiếp giữa khởi động và hoạt động được thể hiện ở Hình 4.8. Trong 1,4 giây đầu, piston dịch chuyển tuyến tính với biên độ 22 mm nhờ cơ cấu khởi động cơ khí, duy trì vị trí dịch chuyển ổn định. Trong 0,5 giây tiếp theo, động cơ chuyển sang chế độ hoạt động tự do, khiến vị trí piston trở nên không ổn định, với vị trí cao nhất đạt 30 mm. Tốc độ cực đại của động cơ thay đổi từ 0,7 m/s trong giai đoạn khởi động đến 5 m/s khi hoạt động tự do.



**Hình 4.8:** Quá trình chuyển giao chế độ khởi động và hoạt động

Khi cơ cấu khởi động cơ khí tách khỏi trục chính, piston tiếp tục dịch chuyển do quán tính, làm áp suất nén và lực nén tăng dần. Khi lực nén cân bằng với lực quán tính, piston dừng lại, và áp suất từ quá trình cháy sau khi đánh lửa đẩy piston ngược chiều. Trong quá trình này, áp suất cực đại xuất hiện ngay sau điểm đổi chiều. Hình 4.9 minh họa cho thấy điểm đổi chiều là điểm chuyển pha giữa CH A và CH B; xung 2 hiển thị áp suất cực đại với 1V tương đương 4 bar.



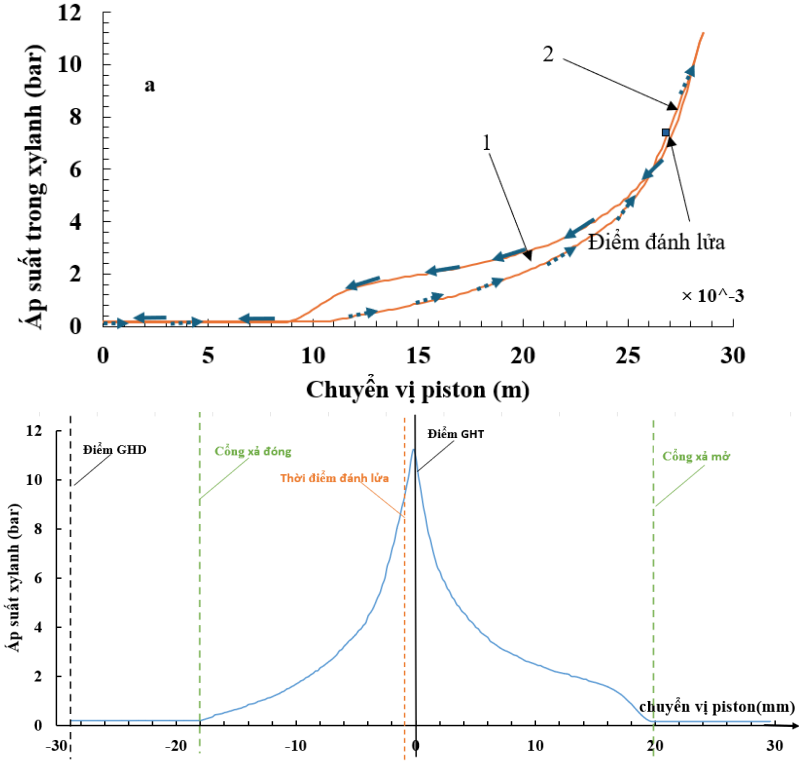
**Hình 4.9:** Quan hệ giữa áp suất cực đại, điểm đánh lửa và điểm đổi chiều piston trong quá trình cháy đầu tiên

#### 4.4.2. Quá trình hoạt động

Trong quá trình cháy đầu tiên, áp suất trong xylanh dao động từ 8 bar đến 14 bar với lượng nhiên liệu phun là 3 mg mỗi lần và tỷ lệ nhiên liệu trên không khí (A/R) là 11,6:1. Thời gian từ khi xuất hiện tia lửa đến khi đạt áp suất cực đại dao động từ 6-8 ms, cũng là thời gian cháy thực nghiệm.

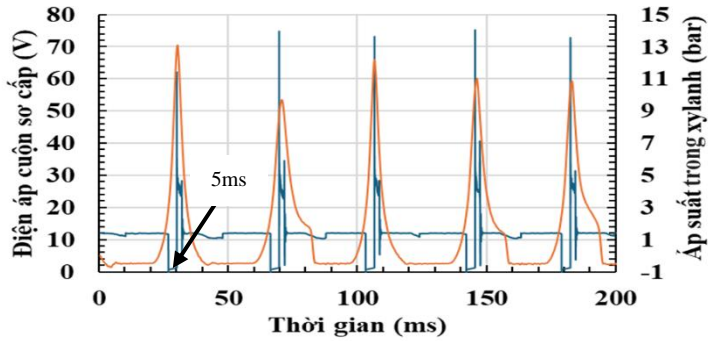
Hình 4.10a cho thấy động cơ có hai vùng hoạt động: Vùng 1 là vùng hoạt động hiệu quả, trong đó áp suất cháy cao hơn áp suất nén, tương tự động cơ đốt trong truyền thống; Vùng 2 là vùng mất công suất ("công âm"), khi áp suất cháy thấp hơn áp suất nén. Nguyên nhân gây ra "công âm" là do lực quán tính lớn từ piston đối diện; khi piston đối diện đổi chiều, một phần năng lượng

cháy bị tiêu hao (do không có trục khuỷu để dẫn động). Hai vùng này có thể thay đổi tùy theo lực quán tính và lực khí nén của hai xy lanh.

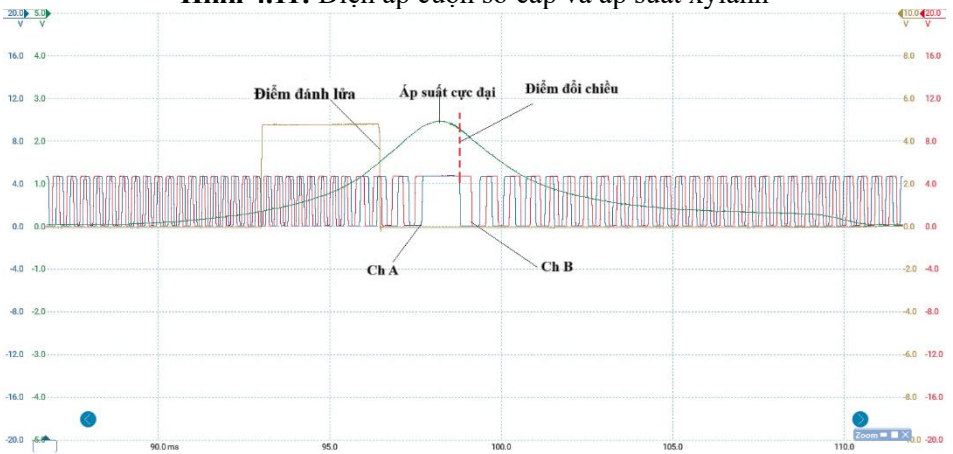


**Hình 4.10 (a,b):** Áp suất trong xy lanh và vị trí của piston

Thời gian từ lúc đánh lửa đến khi hình thành áp suất cực đại không ổn định, dao động từ 1 ms đến 2 ms. Tại thời điểm đánh lửa, áp suất nén dao động từ 6 bar đến 8 bar. Do tốc độ piston tăng rất nhanh trong chế độ hoạt động, nhưng thời gian tích trữ năng lượng không thay đổi và vẫn kéo dài cho đến khi xuất hiện tia lửa. Áp suất nén tăng một phần cũng do khí sót từ quá trình cháy giãn nở trong chu kỳ trước. Thời gian tích trữ năng lượng ổn định ở 5 ms; do đó, nếu tốc độ piston càng nhanh, thời điểm xuất hiện tia lửa càng trễ và ngược lại. Điều này dẫn đến sự khác biệt về thời điểm đánh lửa và áp suất cực đại trong mỗi chu kỳ, khiến khoảng dịch chuyển thay đổi theo từng chu kỳ, như thể hiện ở Hình 4.11. Áp suất cực đại hình thành trước điểm đổi chiều, khi piston chuyển động ngược chiều nhờ lực khí thể, tức là khi lực khí thể đủ lớn để thắng quán tính từ phía đối diện, Hình 4.12.

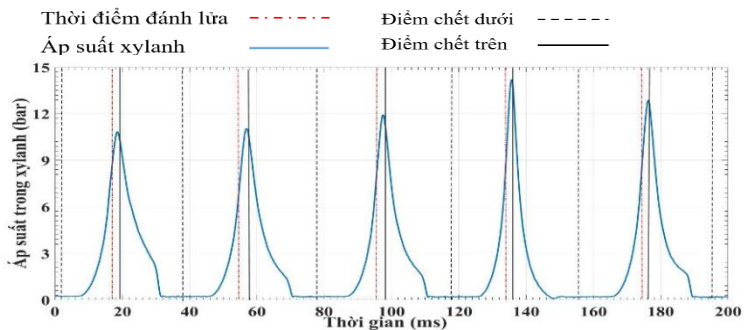


**Hình 4.11:** Điện áp cuộn sơ cấp và áp suất xy lanh



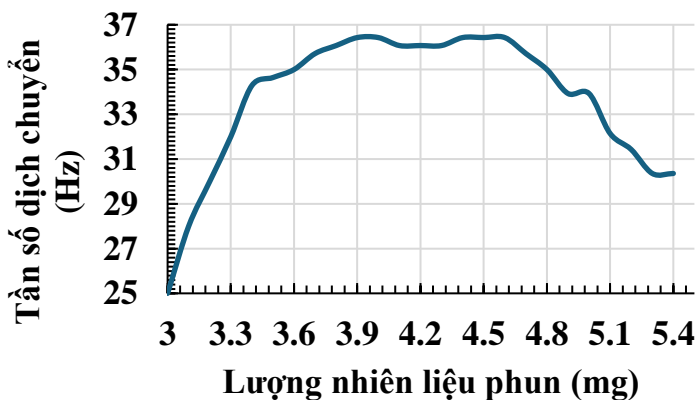
**Hình 4.12:** Quan hệ giữa áp suất cực đại, điểm đánh lửa và điểm đổi chiều piston trong quá trình hoạt động

Thời điểm phun nhiên liệu, thời điểm đánh lửa, điểm đổi chiều chuyển động, và áp suất trong quá trình cháy trong xy lanh được thể hiện trong Hình 4.13. Áp suất cực đại dao động từ 10 bar đến 15 bar trong 5 chu kỳ liên tiếp, với tần số dao động tuyến tính của piston khoảng 25 Hz.



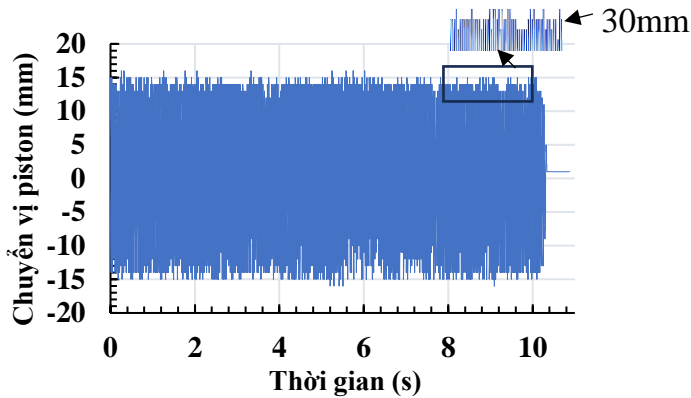
**Hình 4.13:** Áp suất trong xylanh trong 5 chu kỳ liên tục

Lượng nhiên liệu được điều chỉnh để khảo sát khả năng khởi động và tốc độ tối đa của động cơ, như minh họa trong Hình 4.14. Tốc độ tối đa đạt khoảng 35 Hz khi lượng nhiên liệu phun mỗi lần là 4-4,5 mg và thấp nhất là 25 Hz với lượng phun 3 mg



**Hình 4.14:** Khối lượng nhiên liệu phun và tần số ở chế độ hoạt động

Hiện tại, động cơ chưa hoàn thiện hệ thống bôi trơn và làm mát. Do đó, để tránh hư hỏng, thời gian thử nghiệm động cơ ở chế độ hoạt động được giới hạn trong khoảng 10 giây, như thể hiện trong Hình 4.15. Hành trình tối đa của piston đạt đến 30 mm, giới hạn bởi cơ cấu giới hạn hành trình; phạm vi dịch chuyển chủ yếu của piston là từ 26 mm đến 29 mm.



**Hình 4.15:** Quá trình hoạt động trong 10 s của mô hình FPE

#### 4.5. So sánh giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Mô phỏng được chấp nhận khi đảm bảo độ chính xác, tin cậy trên đối tượng được mô phỏng. Vì đây là mô hình động cơ tự phát triển nên các cơ sở để đánh giá độ chính xác của mô phỏng là các kết quả thí nghiệm được thực hiện tại phòng thí nghiệm.

**Bảng 4.2:** So sánh kết quả thực nghiệm và mô phỏng

	<b>Kết quả thực nghiệm</b>	<b>Kết quả mô phỏng</b>	<b>Sai số giới hạn (%)</b>
Vận tốc khởi động (m/s)	0,7 - 0,8	0,7	3
Áp suất cực đại với lượng nhiên liệu phun 3mg (bar)	10	10 – 10.5	0 – 5
Thời điểm đánh lửa (ms)	48	50	4
Thời điểm piston đổi chiều (ms)	51	51 – 53	0 – 3

#### 4.6. Kết luận chương 4

Kết quả thực nghiệm đã chứng minh khả năng xác định đặc tính chuyển động của piston trong mô hình động cơ FPE ở các tốc độ hoạt động khác nhau. Cơ cấu khởi động cơ khí vận hành ổn định với tần số khởi động 10 Hz (tương đương vận tốc khoảng 0,7 m/s) và tỷ lệ nhiên liệu A/F ổn định khoảng 11,6:1, đảm bảo quá trình cháy diễn ra trong xylanh. Áp suất trong xylanh trong quá trình nén khởi động duy trì ổn định và nhất quán. Tuy nhiên, khi chuyển sang chế độ hoạt động, áp suất cực đại trong xylanh không còn ổn định mà biến đổi



liên tục theo từng chu kỳ, điều này liên quan đến yêu cầu lực khí thể đủ lớn để thắng lực quán tính của piston đối diện.

## **KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN**

### **1. Kết luận**

Luận án giới thiệu nguyên mẫu FPE kép hai kỳ, hai xy lanh, dùng xăng và đánh lửa cưỡng bức, với điểm mới là cơ cấu khởi động cơ khí dựa trên nguyên lý cộng hưởng cơ học, thay vì động cơ điện tuyến tính. Cơ cấu này giúp khởi động nhanh hơn, ổn định hơn và giảm sự phụ thuộc vào nguồn điện. Đề tài ưu hóa quá trình khởi động, bộ điều khiển dẫn hướng piston di chuyển theo quỹ đạo cố định 22 mm. Cơ cấu Culit khai thác dao động tự nhiên để khởi động nhanh chóng, giảm thời gian khởi động và tăng độ tin cậy, đáp ứng yêu cầu hiệu suất và ổn định của FPE. Vi xử lý PIC 18F4550 đóng vai trò trung tâm trong điều khiển đánh lửa và khởi động, đảm bảo hoạt động hiệu quả. Kết hợp với bộ điều khiển NI USB 6212 và phần mềm LabVIEW, hệ thống này kiểm soát chính xác lượng nhiên liệu và các thông số động cơ, giúp nâng cao hiệu suất tổng thể.

Mô phỏng bằng Matlab Simulink cho thấy động cơ khởi động ở tốc độ 0,7 m/s với tỷ số nén 3, đạt áp suất cháy từ 8 đến 12 bar trong 2 – 5 ms. Thử nghiệm áp dụng lực kéo trong 1,4 giây giúp piston đạt tốc độ 0,7 m/s, đạt tỷ số nén 3 và áp suất cực đại 10 bar, đáp ứng yêu cầu hiệu suất của FPE.

Thử nghiệm cho thấy áp suất nén 4 bar đạt trong 1,4 giây, đủ cho quá trình cháy, chứng minh tính khả thi của cơ cấu khởi động cơ khí. Hệ thống này giảm phụ thuộc vào động cơ điện tuyến tính và mở ra hướng nghiên cứu mới cho động cơ không trục khuỷu, tập trung vào tối ưu hóa hiệu suất và giảm chi phí. Đồng thời, sau khi khởi động FPE có thể tự vận hành bằng cách sử dụng áp suất cháy để đảo chiều piston của xy lanh đối diện, chứng minh được giả thiết nghiên cứu.

### **2. Đóng góp của luận án**

Luận án góp phần tổng hợp, phân tích các công trình khoa học liên quan và bổ sung lý thuyết về mô phỏng và mô hình mô phỏng quá trình cháy động cơ không trục khuỷu FPE.

Luận án phát triển và giới thiệu một giải pháp kỹ thuật mới, khả thi về cơ cấu khởi động FPE theo nguyên tắc cộng hưởng cơ học, thiết kế phù hợp với FPE kiểu piston kép, hai kỳ hai xy lanh. Chứng minh được giả thiết FPE này có thể tự duy trì hoạt động ổn định mà không cần thiết kế hệ thống hỗ trợ đảo chiều phức tạp.

Luận án cũng đề xuất phương pháp điều khiển phun xăng, đánh lửa điện tử cho FPE dựa trên các cơ sở lý thuyết về quá trình cháy và đối sánh với kết quả thực nghiệm.

Thực hiện mục tiêu chính, luận án đã thiết kế và chế tạo một mô hình FPE hiệu quả, có khả năng khởi động và hoạt động phù hợp (thời gian hoạt động liên tục trên 10s) cho công tác nghiên cứu đặc tính dòng động cơ FPE. Các phương pháp được trình bày trong luận án này có thể được sử dụng làm cơ sở cho các thiết kế, mô hình hóa và điều khiển FPE.

### 3. Hướng phát triển

Bước đầu động cơ 2 kỳ FPE được chế tạo và vận hành thành công với hệ thống khởi động kiểu cơ khí và piston có thể tự đảo chiều ở điều kiện hoạt động không tải. Tuy nhiên, điều kiện vận hành ổn định khi kéo tải vẫn là thách thức lớn.

Để có thể ứng dụng thực tiễn, cần nghiên cứu đánh giá cơ sở lý thuyết về quá trình cháy và truyền nhiệt bên trong xy lanh, nghiên cứu về bôi trơn, làm mát và tối ưu về thời điểm đánh lửa, phun nhiên liệu nhằm tăng hiệu suất nhiệt của động cơ... Mô hình này cần tích hợp máy phát điện tuyến tính để đánh giá được toàn diện quá trình hoạt động ổn định và hiệu suất của động cơ.

#### DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Ho Van Phuc, **Nguyen Huynh Thi**, Huynh Thanh Cong, Nguyen Van Trang, “A Cfd Simulation On Effects Of Methane/Biogas Ratio On 2-Stroke Free-Piston Linear Engine’s Scavenging”,

*Journal of Technical Education Science No.59 (08/2020) Ho Chi Minh City University of Technology and Education, pp.130-139, 2020.*

2. **Nguyen Huynh Thi**; Nguyen Van Trang; Huynh Thanh Cong; Huynh Van Loc; Dao Huu Huy; Ngo Duc Huy. “A Preliminary Study of a Two Stroke Free-Piston Engine for Electricity Generation”. *5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*,2020. (IEEE)

3. **Nguyen Huynh Thi**; Nguyen Van Trang; Huynh Thanh Cong; Huynh Van Loc; Dao Huu Huy; Ngo Duc Huy; Truong Hoa Hiep; Vo Bao Toan. “An Investigation on Power Generation Characteristics of Linear Generator Driven by a Free-piston Engine”. *2021 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, 2021. (IEEE)

4. **Nguyen Huynh Thi**; Nguyen Van Trang; Huynh Thanh Cong; Huynh Van Loc; Dao Huu Huy; Ngo Duc Huy; Truong Hoa Hiep; Vo Bao Toan. “A Study of the Scavenging Process in a Two-stroke Free Piston Linear Engine at Low Velocity Using CFD and DPM”. *6th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, 2022. (IEEE)

5. Nguyen Van Trang; **Nguyen Huynh Thi**; Huynh Thanh Cong; Dao Huu Huy. “A Preliminary Study of Spark-Ignition System for Free-Piston Linear Engine”. *Journal Of Technical Education Science (JTE)*, 2023.

6. **Nguyen Huynh Thi**; Nguyen Van Trang; Huynh Thanh Cong; Dao Huu Huy . “Preliminary Design of a Single-Phase Linear Generator for Free-Piston Engine Application”. *From Smart City to Smart Factory for Sustainable Future: conceptual framework, scenarios, and multidiscipline perspectives SCFF24*, 2024. (Scopus)