

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ VÀ THỰC NGHIỆM QUÁ TRÌNH CHÁY TRONG ĐỘNG CƠ PISTON TỰ DO KHỞI ĐỘNG BẰNG CƠ KHÍ

Nguyễn Huỳnh Thi, Trương Hòa Hiệp, Huỳnh Văn Lộc, Đào Hữu Huy
Trường Đại học Tiền Giang

Tóm tắt: Bài báo này trình bày thiết kế và đánh giá thực nghiệm của Động cơ Piston tự do (FPE) hai kỳ, hai piston sử dụng cơ cấu khởi động cơ học độc lập. Trái ngược với các phương pháp thông thường dựa trên máy phát điện tuyến tính, nghiên cứu này đề xuất một cơ cấu khởi động dựa trên nguyên lý Scotch Yoke để tạo ra dao động cộng hưởng ổn định. Kết quả thử nghiệm cho thấy động cơ đạt được áp suất nén khởi động là 4 bar và áp suất cháy cực đại lên đến 13 bar, đảm bảo quá trình chuyển đổi thành công từ giai đoạn khởi động sang giai đoạn tự duy trì.

Từ khóa: động cơ Piston tự do (FPE), chu trình hai kỳ, cấu hình piston kép, xác thực thực nghiệm, cơ cấu khởi động cơ học

RESEARCH ON DESIGN AND EXPERIMENT OF COMBUSTION PROCESS IN MECHANICALLY STARTED FREE PISTON ENGINE

Abstract: This paper presents the design and experimental evaluation of a two-stroke, dual-piston Free-Piston Engine (FPE) utilizing an independent mechanical starting mechanism. In contrast to conventional approaches that rely on linear electric generators, this study proposes a starting mechanism based on the Scotch Yoke principle to induce stable resonant oscillation. Test bench results demonstrate that the engine attained a starting compression pressure of 4 bar and a peak combustion pressure of up to 13 bar, ensuring a successful transition from the starting phase to self-sustaining operation.

Keywords: Free-Piston Engine (FPE), Two-stroke cycle, Dual-piston configuration, Experimental validation, Mechanical starting mechanism

Nhận bài: 16/09/2025

Phản biện: 20/10/2025

Duyệt đăng: 24/10/2025

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh nhu cầu năng lượng toàn cầu ngày càng tăng và các quy định về khí thải ngày càng thắt chặt, công nghệ động cơ đốt trong đang trải qua những bước chuyển mình mạnh mẽ. Động cơ Piston Tự do (FPE) đã nổi lên như một giải pháp chuyển đổi năng lượng tiên tiến, thu hút sự quan tâm sâu sắc từ cộng đồng nghiên cứu quốc tế. Bằng cách loại bỏ hoàn toàn cơ cấu trục khuỷu - thanh truyền ràng buộc động học, FPE giải phóng chuyển động của piston, cho phép đạt được những đặc tính ưu việt mà động cơ truyền thống không thể có được: khả năng biến thiên tỉ số nén (Variable Compression Ratio - VCR) theo thời gian thực, giảm thiểu tối đa lực ngang và ma sát piston, cũng như tối ưu hóa quá trình cháy cho đa dạng các loại nhiên liệu. Những đặc tính này định vị FPE là ứng cử viên sáng giá cho các hệ thống phát điện hybrid và các trạm phát điện phân tán hiệu suất cao.

Tuy nhiên, chính sự tự do về động học lại đặt ra thách thức kỹ thuật cốt lõi cản trở việc thương mại hóa FPE: vấn đề điều khiển chuyển động piston, đặc biệt là trong giai đoạn khởi động. Không giống như động cơ truyền thống có thể dựa vào mô-men quán tính của bánh đà để vượt qua điểm chết, FPE yêu cầu một nguồn ngoại lực chính xác để kích hoạt dao động và nén hỗn hợp khí đến điều kiện tự cháy hoặc đánh lửa.

Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào việc tích hợp máy phát điện tuyến tính (Linear Generator - LG) vận hành ở chế độ động cơ để khởi động. Các chiến lược như “chuyển đổi tức thời” (instantaneous switching) hay “cộng hưởng dao động” (resonance oscillation) đã được đề xuất. Tuy nhiên, việc sử dụng LG để khởi động thường gặp phải các hạn chế nghiêm trọng: công suất máy phát thường không đủ lớn để thắng áp suất nén trong một hành trình đơn, và việc điều khiển cộng hưởng điện từ đòi hỏi các thuật toán phức tạp để xử lý sự thay đổi liên tục của tải và chiều dòng điện.

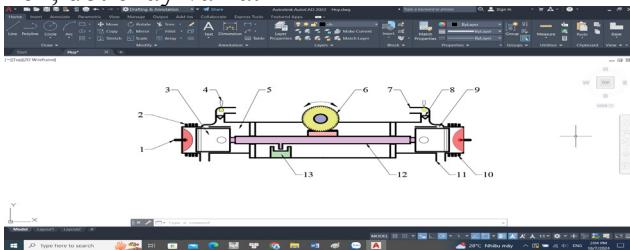
Để giải quyết vấn đề này, nghiên cứu đề xuất một phương pháp tiếp cận khác biệt: phát triển một cơ cấu khởi động cơ khí độc lập dựa trên nguyên lý cơ cấu Culit. Giải pháp này nhằm mục đích tách biệt hoàn toàn chức năng khởi động khỏi hệ thống phát điện, đơn giản hóa bài toán điều khiển và đảm bảo tính ổn định của hành trình piston trong giai đoạn nhạy cảm nhất. Bài báo đề cập đến thiết kế hệ thống và cung cấp các bằng chứng thực nghiệm xác thực tính khả thi của mô hình đề xuất.

II. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình động cơ và hệ thống thực nghiệm

2.1.1. Cấu hình động cơ

Mô hình FPE được thể hiện trong hình 1, sử dụng hai động cơ hai kỳ với hệ thống đánh lửa bằng tia lửa điện. Các thông số kỹ thuật của nguyên mẫu được tóm tắt trong bảng 1. Một cơ cấu cơ khí được sử dụng để khởi động động cơ bằng cách dẫn động piston với tần số tuyến tính cho đến khi đạt đến áp suất đánh lửa. Hệ thống đánh lửa bao gồm cuộn dây đánh lửa, IC đánh lửa và bugi đánh lửa. Khi cơ cấu vận hành, nhiên liệu được phun vào đường ống nạp để tạo thành hỗn hợp không khí – nhiên liệu. Hỗn hợp này sau đó đi vào buồng phụ trong hành trình nạp qua van một chiều. Trong quá trình quét, hỗn hợp được chuyển từ buồng phụ đến xylanh, nơi diễn ra các quá trình nén, đốt cháy và xả.



Hình 1. Sơ đồ của FPE

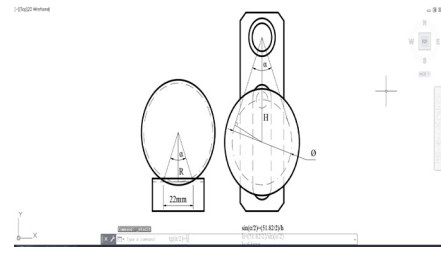
Ghi chú: 1. Bugi; 2. Xylanh trái; 3. Piston; 4. Vòi phun nhiên liệu; 5. Buồng chứa phụ; 6. Khởi động cơ khí; 7. Cửa nạp khí; 8. Van một chiều; 9. Cửa quét; 10. Xylanh phải; 11. Cửa xả; 12. Trục kết nối chính; 13. Giới hạn hành trình piston.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của động cơ

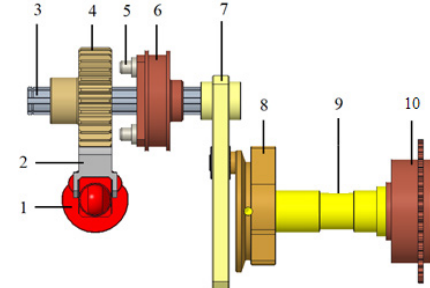
Số xylanh	2
Loại động cơ	2 kỳ
Đường kính xylanh	34 mm
Hành trình khởi động	22mm
Hành trình tối đa	30 mm
Tỉ số nén tối đa	10,5:1
Nhiên liệu	Xăng

2.1.2. Cơ cấu khởi động cơ khí

Hệ thống khởi động được thiết kế để chuyển đổi chuyển động quay từ động cơ điện thành chuyển động tịnh tiến dao động của trục piston thông qua cơ cấu Culit và bộ truyền bánh răng - thanh răng. Cơ chế hoạt động: Một động cơ điện 500W dẫn động bánh lệch tâm. Chuyển động của bánh lệch tâm được truyền qua tay quay và con trượt, tạo ra dao động tịnh tiến cho thanh răng gắn trên trục chính. Ly hợp từ: Một cơ cấu ly hợp từ được tích hợp để kết nối cơ cấu khởi động với trục động cơ trong giai đoạn đầu và ngắt kết nối ngay lập tức khi quá trình cháy bắt đầu, cho phép piston chuyển sang dao động tự do, thể hiện ở hình 2 và hình 3.



Hình 2. Cơ cấu culit



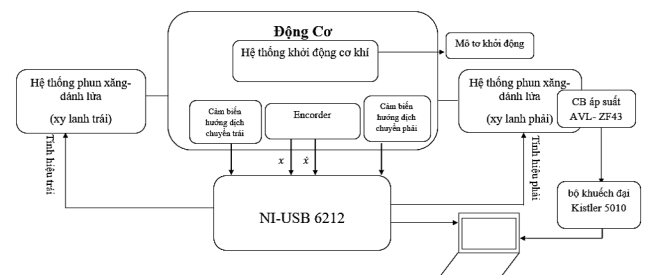
Hình 3. Cơ cấu khởi động cơ khí

Ghi chú: 1. Trục chính; 2. Thanh răng; 3. Trục trung gian; 4. Bánh răng định vị; 5. Chốt kết nối; 6. Ly hợp từ; 7. Tay quay; 8. Bánh lệch tâm; 9. Trục khởi động; 10. Đĩa xích khởi động

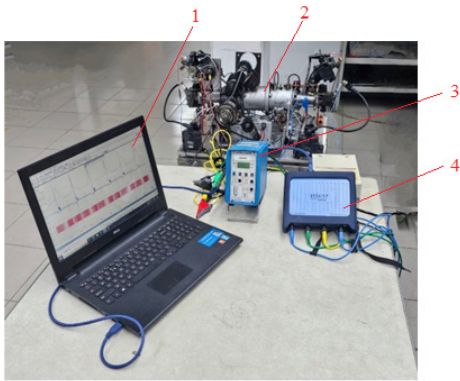
2.1.3. Hệ thống điều khiển và thu thập dữ liệu

Mô hình thực nghiệm của động cơ FPE được thể hiện chi tiết tại hình 4 và hình 5. Quy trình thực nghiệm được chia thành hai giai đoạn chính gồm khởi động và vận hành. Giai đoạn khởi động kéo dài 1,4 giây và tuân theo trình tự nghiêm ngặt bắt đầu bằng thao tác đóng ly hợp từ song song với việc kích hoạt bộ đếm thời gian khi có tín hiệu. Ngay khi xác nhận động cơ đã chuyển động, hệ thống tiến hành phun nhiên liệu, sau đó thực hiện ngắt ly hợp từ và đánh lửa khi thời gian chờ hoàn tất.

Hệ thống sẽ chuyển sang chế độ vận hành ổn định ngay khi quá trình cháy khởi phát thông qua chu trình xác định vị trí piston để điều khiển phun nhiên liệu và đánh lửa. Động cơ FPE hoạt động ở chế độ không tăng áp tại mức 1,05 bar và khối lượng nhiên liệu được thay đổi để khảo sát tác động lên tốc độ động cơ. Các tham số của hệ thống đánh lửa trong thử nghiệm này được thiết lập cố định bao gồm thời điểm ngắt dòng sơ cấp cách điểm chết trên 22 mm, thời gian tích trữ năng lượng 5 ms và lượng nhiên liệu phun duy trì ở mức 2 mg.



Hình 4. Sơ đồ bố trí thí nghiệm



Hình 5. Mô hình thí nghiệm FPE
Ghi chú: 1. Máy tính; 2. Mô hình FPE; 3. Bộ khuếch đại Kistler 5010; 4. Bộ đo xung PicoScope 4425.

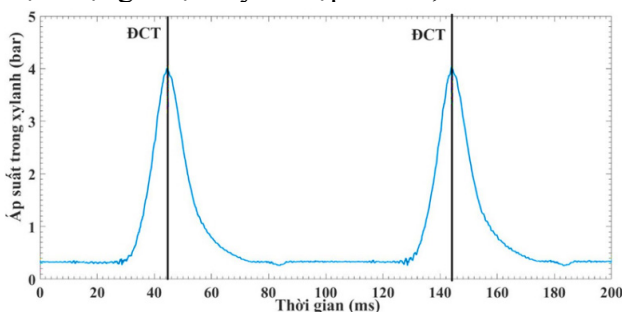
Trong các thí nghiệm, thời điểm đánh lửa được xác định ngay khi tia lửa điện đầu tiên xuất hiện. Hệ thống điều khiển và giám sát FPE được xây dựng trên nền tảng phần mềm LabView, tích hợp cùng thiết bị đo lường PicoScope 4425.

Để thu thập dữ liệu áp suất cháy trong xy-lanh, nghiên cứu sử dụng cảm biến áp suất AVL-ZF43 kết nối qua bộ khuếch đại tín hiệu Kistler 5010. Các thông số động học như vị trí và vận tốc piston được ghi nhận thông qua một encoder có độ phân giải 0,2 mm/xung. Cuối cùng, thiết bị NI-USB 6212 đóng vai trò trung gian, truyền tải toàn bộ tín hiệu điều khiển và dữ liệu từ cảm biến về máy tính xử lý.

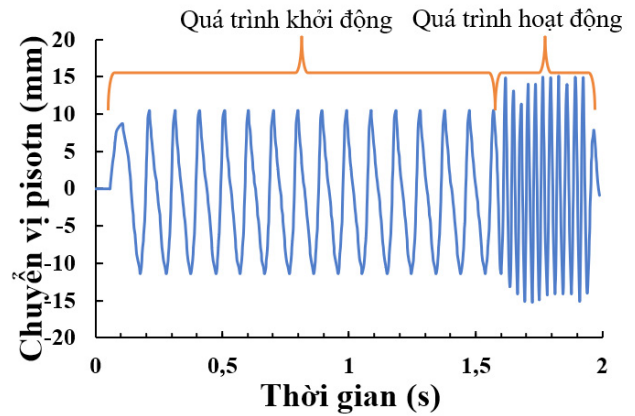
2.2. Kết quả thực nghiệm và thảo luận

2.2.1. Đặc tính giai đoạn khởi động

Thực nghiệm cho thấy cơ cấu Culit hoạt động ổn định, duy trì biên độ dao động piston chính xác ở mức 22 mm với tần số 10 Hz. Áp suất nén tại cuối quá trình nén khởi động, áp suất xy-lanh đạt trung bình 4 bar, Hình 6. Đây là ngưỡng tối hạn đủ để hỗ trợ quá trình bắt cháy đối với nhiên liệu xăng. Về mặt ổn định cơ khí, cơ cấu truyền động hoạt động mượt mà trong 1.4 giây khởi động, không xuất hiện hiện tượng trượt hay va đập cơ khí, Hình 7.



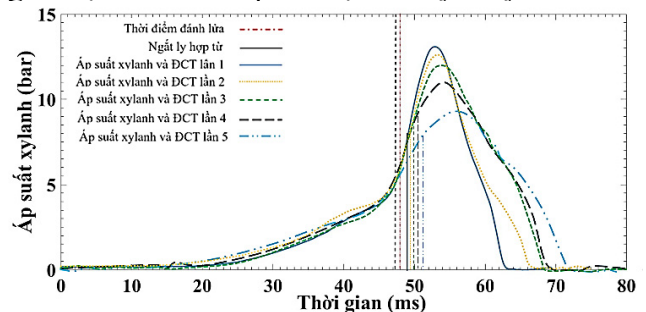
Hình 6. Kết quả quá trình nén khởi động



Hình 7. Vị trí dịch chuyển của piston trong quá trình khởi động và hoạt động

2.2.2. Quá trình cháy và chuyển tiếp

Kết quả đo đạc từ cảm biến áp suất AVL-ZF43 ghi nhận diễn biến áp suất tại chu kỳ cháy đầu tiên.



Hình 8. Áp suất xy-lanh sau khi đánh lửa ở 5 lần đánh lửa đầu tiên

Đặc tính vận hành ngay sau thời điểm ngắt ly hợp và kích hoạt đánh lửa, áp suất trong xy-lanh gia tăng đột biến từ 4 bar lên ngưỡng 8 – 13 bar, tùy thuộc vào chất lượng hòa khí của từng chu trình. Sự bùng nổ áp suất này kéo theo sự thay đổi lớn về động học, đẩy vận tốc piston tăng vọt từ 0.7 m/s (giai đoạn khởi động) lên đến 5 m/s (giai đoạn chuyển động tự do). Đặc biệt, do piston không còn chịu ràng buộc cứng bởi cơ cấu Culit, điểm chết trên (TDC) trong quá trình cháy có xu hướng dịch chuyển xa hơn khoảng 30 mm. Hiện tượng này làm tăng tỷ số nén thực tế, tạo tiền đề quan trọng giúp áp suất cháy đạt mức cao hơn ở các chu kỳ kế tiếp.

Phân tích sự ổn định Mặc dù quá trình khởi động diễn ra thành công, cho thấy sự dao động đáng kể về áp suất đỉnh giữa các chu kỳ liên tiếp. Sự bất ổn định này chủ yếu xuất phát từ hai nguyên nhân. Thứ nhất là độ trễ đánh lửa: dù thời điểm đánh lửa được cố định ở mức 22 mm trước TDC, sự biến thiên lớn của vận tốc piston (từ 0.7 m/s lên 5 m/s) dẫn đến sai lệch vị trí thực tế của

piston khi màng lửa hình thành. Thứ hai là do lưu lượng khí nạp: cơ chế quét khí 2 kỳ hoạt động dưới vận tốc biến thiên liên tục đã gây ra sự không ổn định trong tỷ lệ hòa khí (AFR).

III. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế và vận hành thành công hệ thống FPE hai kỳ tích hợp cơ cấu khởi động cơ khí độc lập. Về tính khả thi, cơ cấu Culit đã chứng minh hiệu quả vượt trội khi tạo ra áp suất nén ổn định ở mức 4 bar, đảm bảo điều kiện

tối ưu để khởi phát quá trình cháy. Ngay trong chu kỳ đầu tiên, động cơ đạt áp suất đỉnh tới 13 bar, tạo đủ lực để thắng quán tính và chuyển tiếp mượt mà sang chế độ vận hành tự do. Những kết quả này mang lại đóng góp quan trọng, cung cấp một giải pháp khởi động đơn giản và tin cậy thay thế cho phương pháp sử dụng máy phát điện tuyến tính phức tạp, đồng thời mở ra hướng đi tiềm năng cho việc phát triển các nguyên mẫu FPE chi phí thấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- R. Mikalsen, A. P. Roskilly, *A review of free-piston engine history and applications*, Applied Thermal Engineering, 2007.
- B. Jia et al., *Development approach of a spark-ignited free-piston engine generator*, SAE Technical Paper, 2014.
- Zulkifli et al., *Starting of a free-piston linear engine-generator by mechanical resonance*, IEEE VPPC, 2008.
- Guo, C., Zuo, Z., Feng, H., Jia, B., & Roskilly, T. (2020). *Review of recent advances of free-piston internal combustion engine linear generator*. Applied Energy, 269, 115084.
- Hung, N. B., & Lim, O. (2016). A review of free-piston linear engines. *Applied Energy*, 178, 78-97.
- C. Yuan, H. Feng, Y. He, *An experimental research on the combustion and heat release characteristics of a free-piston diesel engine generator*, Fuel 188 (2017) 390–400, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.057>.
- A. T. Raheem, A. R. A. Aziz, S. A. Zulkifli, W. B. Ayandotun, E. Z. Zainal, and S. M. Elfakki, *Experimental Analysis for the Influence of Ignition Time on Combustion Characteristics of a Free Piston Engine Linear Generator*, in Journal of Physics: Conference Series, 2021, vol. 1793, no. 1: IOP Publishing, p. 012051.
- Zhang, C., & Sun, Z. (2017). *Trajectory-based combustion control for renewable fuels in free piston engines*. Applied Energy, 187, 72-83.
- Qingfeng Li, Jin Xiao, Zhen Huang, *Simulation of a two-stroke free-piston engine for electrical power generation*. Energy & fuels, 2008. 22(5): p. 3443- 3449.
- Hidemasa Kosaka, Tomoyuki Akita, Kazunari Moriya, Shigeaki Goto, Yoshihiro Hotta, Takaji Umeno, Kiyomi Nakakita, *Development of free piston engine linear generator system part 1-investigation of fundamental characteristics*. 2014, SAE Technical Paper, No. 2014-01-1203.
- 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.