



Tạp chí Khoa học và Kinh tế Phát triển
Trường Đại học Nam Cần Thơ

Website: jsde.nctu.edu.vn



Ứng dụng của động cơ piston tự do trên ô tô, tiềm năng và thách thức

Nguyễn Văn Trang^{1*}, Nguyễn Văn Tổng Em², Nguyễn Huỳnh Thi³

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM

²Trường Đại học Nam Cần Thơ

³Trường Đại học Tiền Giang

*Người chịu trách nhiệm bài viết: Nguyễn Văn Trang (email: trangnv@hcmute.edu.vn)

Ngày nhận bài: 25/10/2023

Ngày phản biện: 10/11/2023

Ngày duyệt đăng: 5/12/2023

Title: Application of free piston engine in cars, potential and challenges

Keywords: efficiency, free piston engine, internal combustion engine

Từ khóa: công suất, động cơ đốt trong, động cơ piston tự do

ABSTRACT

Nowadays, vehicles are an important part of life as they play a key role in helping people to move and transport goods quickly and conveniently. Despite their outstanding features, vehicles also have some disadvantages, such as their dependence on fossil fuels and contribution to environmental pollution. To address these issues, increasing power and efficiency while reducing air pollution are constant concerns in the development of internal combustion engines. In this article, the authors aimed to introduce the concept of a Free Piston Engine (FPE). This type of engine offers higher performance than traditional Internal Combustion Engines (ICEs) and can be used to generate electricity for electric and hybrid vehicles, thereby improving efficiency and reducing environmental pollution.

TÓM TẮT

Ngày nay, ô tô là một phương tiện không thể thiếu trong cuộc sống, nó đóng vai trò then chốt giúp con người di chuyển và vận chuyển hàng hóa được nhanh chóng và tiện lợi. Bên cạnh những tính năng vượt trội thì phương tiện này vẫn tồn tại một số nhược điểm như sự lệ thuộc vào nhiên liệu hoá thạch và gây ô nhiễm môi trường. Để khắc phục những nhược điểm trên, việc nâng cao công suất, hiệu suất đồng thời giảm ô nhiễm môi trường luôn là những vấn đề cần tập trung cải tiến trong động cơ đốt trong. Trong phạm vi bài viết này, nhóm tác giả muốn giới thiệu về động cơ piston tự do (FPE – Free Piston Engine). Loại động cơ này có hiệu suất cao hơn so với động cơ đốt trong truyền thống, được ứng dụng để phát điện dùng cho xe điện, xe lai nhằm cải thiện hiệu suất và giảm phát thải ô nhiễm môi trường.

1. GIỚI THIỆU

Việc dụng rộng rãi nhiên liệu hóa thạch cho các phương tiện giao thông dẫn đã sinh ra một lượng đáng kể CO₂ và các chất ô nhiễm khác. Nhằm từng bước giảm thiểu sự phụ thuộc vào nguồn nhiên liệu này đồng thời làm giảm ô nhiễm môi trường. Xe điện, xe lai sử dụng động cơ đốt trong truyền thống đã áp dụng nhiều giải pháp công nghệ để giảm phát thải, bên cạnh đó, nhiều nghiên cứu trong ngành ô tô đã và đang áp dụng các loại nhiên liệu thân thiện với môi trường, phương tiện dùng pin nhiên liệu là những công nghệ đầy hứa hẹn cho tương lai [1]. Sau khi bị bỏ rơi vào giữa thế kỷ 20, động cơ đốt trong không trực khuỷu hay còn gọi là động cơ piston tự do (FPE-Free Piston Engine), đang được nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới thực hiện để thay thế cho động cơ đốt trong truyền thống. Những ưu điểm tiềm năng của động cơ piston tự do bao gồm quá trình đốt cháy được tối ưu hóa thông qua tỷ số nén thay đổi, dẫn đến hiệu suất tải bộ phận cao hơn và khả năng vận hành đa nhiên liệu, và giảm tổn thất ma sát do thiết kế đơn giản với ít bộ phận chuyển động.

Thuật ngữ piston tự do được sử dụng phổ biến nhất để phân biệt động cơ tuyến tính với động cơ trực khuỷu quay. Piston được gọi là 'tự do' bởi vì chuyển động của nó không bị giới hạn bởi vị trí của trục khuỷu quay, như được biết đến từ các động cơ thông thường, mà chỉ được xác định bởi sự tương tác giữa áp suất và tải tác dụng lên nó. Điều này mang lại cho động cơ piston tự do một số đặc điểm khác biệt như: chiều dài hành trình thay đổi thông qua khả năng kiểm soát sự chuyển động của piston. Các tính năng quan trọng khác của động cơ piston tự do là khả năng giảm tổn thất ma sát và tối ưu hóa hoạt động của động cơ bằng cách sử dụng tỷ số nén thay đổi. FPE là một sự thay thế đầy hứa hẹn cho động cơ đốt trong truyền thống (ICE-Internal Combustion Engine) bởi nó có

khả năng hoạt động với hiệu suất cao hơn và tạo ra lượng khí thải độc hại thấp hơn. Việc loại bỏ hoàn toàn cơ cấu trục khuỷu là điểm khác biệt giữa FPE và ICE. Trong động cơ đốt trong có cơ cấu trục khuỷu, quá trình đốt cháy sẽ xảy ra khi piston ở gần vị trí điểm chết trên, do đó nhiệt độ và áp suất cao nhất được duy trì trong thời gian tương đối dài, dẫn đến tổn thất khá cao và làm giảm hiệu suất của động cơ. Ngoài ra, đối với động cơ đốt trong có cơ cấu trục khuỷu, cấu tạo khá phức tạp nên tổn thất ma sát là một vấn đề không thể tránh khỏi. Tổn thất này bao gồm ma sát giữa xéc măng, thành ly lanh và piston; ma sát bản thân trục khuỷu, ổ trục khuỷu và ổ trục cam; ma sát cơ cấu xupap. Cơ cấu trục khuỷu đóng góp đáng kể vào sự tổn thất mát sát thông qua việc hình thành các lực ngang lên piston, gây ra ma sát giữa piston và thành xylanh. Trong FPE, chuyển động của piston là tự do trong ly lanh, không có bất kỳ ràng buộc nào giữa vị trí piston và chuyển động quay của trục khuỷu [2],[3]. Trong khuôn khổ bài viết này, nhóm tác giả tập trung vào ứng dụng phát điện và những nghiên cứu tiềm năng của động cơ piston tự do như một trong những giải pháp nhằm từng bước thay thế cho những công nghệ đang sử dụng cho động cơ đốt trong truyền thống hiện nay.

2. PHƯƠNG PHÁP

Bài viết này áp dụng phương pháp nghiên cứu định tính qua việc tổng hợp các tài liệu có liên quan.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Lịch sử hình thành và phát triển

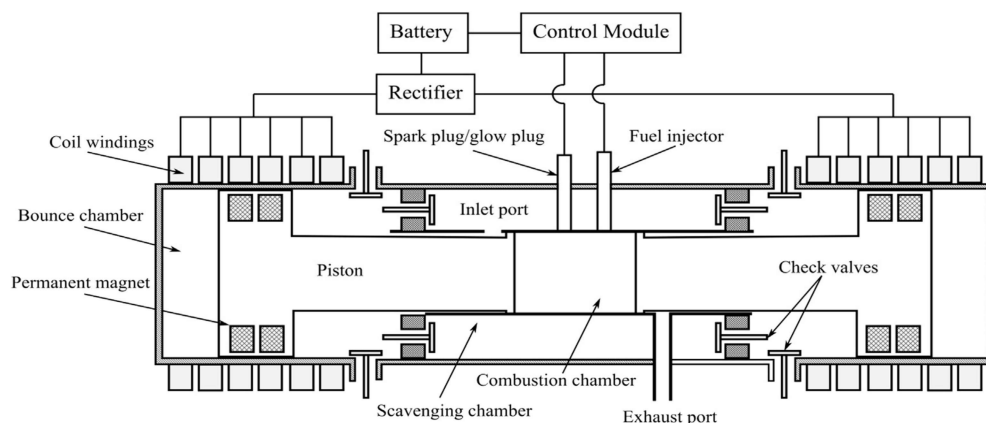
Pescara [2] lần đầu tiên đề xuất FPE và được ứng dụng trên máy nén khí piston. Pescara bắt đầu nghiên cứu FPE vào khoảng năm 1922 và ông đã phát triển mẫu động cơ dùng bugi đánh lửa vào năm 1925 và động cơ Diesel vào năm 1928. Sau đó, Pescara tiếp tục nghiên cứu và thiết kế cải tiến cho động cơ piston tự do và cũng được cấp bằng sáng chế cho động cơ máy

nén khí 1941. Với thiết kế động cơ gồm hai piston được liên kết cơ học để đảm bảo chuyển động đối xứng, thiết kế nhỏ gọn giảm tiếng ồn, giảm rung và nó được ứng dụng làm máy nén khí ứng dụng chạy tuabin máy phát điện cho ngành hàng hải. Kể từ đó nhiều nhà khoa học khác cũng đã công bố các công trình nghiên cứu về ứng dụng của loại động cơ này, chủ yếu là động cơ thủy lực và máy phát tuyến tính piston tự do. Các động cơ piston tự do ứng dụng máy phát tuyến tính chủ yếu dùng cho xe điện và xe lai. Máy phát tuyến tính tuyến tính piston tự do được cấp bằng sáng chế vào năm 1944 và đã được sự quan tâm của các nhà khoa học khắp thế giới bởi tiềm năng phát triển và khả năng thương mại hóa.

Vào năm 2007, mẫu động cơ FPE được nghiên cứu tại trường đại học Newcastle do Mikalsen và Roskilly thực hiện cho thấy chuyển động piston là không đối xứng xung quanh điểm chết trên và động cơ đã dành nhiều thời gian để nén hơn giai đoạn giãn nở của chu kỳ. Sau đó họ thực hiện mô phỏng bằng CFD (Computational Fluid Dynamics) về quá trình làm việc của động cơ, so sánh nó với hiệu suất của một động cơ truyền thống cho thấy FPE có một số lợi thế như nhiên liệu được đốt cháy nhanh hơn. Trong năm 2009 một nghiên cứu khác đã được thực hiện để kiểm tra chuyển động dòng khí trong lymanh và đã chứng minh rằng nhiệt độ cháy trong FPE thấp hơn so với động cơ truyền thống, điều này đã góp phần làm giảm khí NO_x [1].

Với sự nghiên cứu phát triển liên tục, FPE còn được ứng dụng làm động cơ thủy lực cho xe địa hình, máy phát tuyến tính piston tự do, piston đơn được triển lãm tại trung tâm hàng không vũ trụ Đức năm 2013. Trước đó đại học West Virginia là viện nghiên cứu đã thiết kế và xây dựng mẫu FPE bằng hai động cơ hai kỳ, các kiểm tra để đánh giá hiệu suất là công suất ra 316W trong khi hoạt động ở tần số 23,1Hz. Ủy ban Châu Âu cũng đã nghiên cứu và phát triển một nhà máy năng lượng vào năm 2002 về bộ chuyển đổi năng lượng FPEG (Free Piston Engine Generator), nghiên cứu đã trình bày các động lực học, nhiệt động học, phân tích một cách chính xác quá trình giải phóng nhiệt và quá trình nạp thông qua phương pháp mô phỏng đa chiều. Bên cạnh đó các hãng xe ô tô lớn cũng đã có những nghiên cứu và thiết kế FPE mang tính ứng dụng cao cho các dòng xe, bằng cách kế thừa từ các nghiên cứu được công bố. Một số công ty lớn ô tô trên thế giới đã nghiên cứu như:

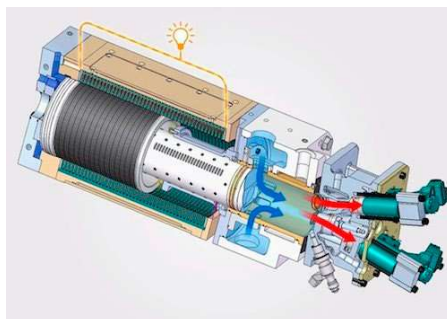
- Các bằng sáng chế gần đây của General Motor phát triển trên khái niệm piston tự do dạng đối nhau, hoạt động với loại động cơ hai kỳ (Hình 1). Quá trình tạo ra điện nhờ máy phát điện, nam châm vĩnh cửu được tích hợp trong piston và cuộn dây trong vỏ lymanh. Giải pháp này của GM sử dụng buồng đàn hồi và phanh điện từ để đồng bộ hóa và điều khiển hai piston, hành trình của piston được kiểm soát và điều khiển thông qua phanh điện từ cũng như kiểm soát áp suất.



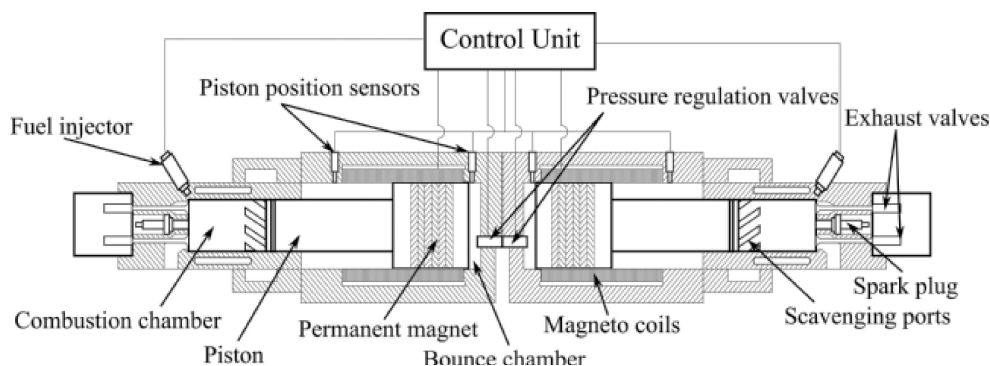
Hình 1. Máy phát điện tuyến tính dạng piston đối đỉnh [1]

- Một nhóm kỹ sư của trung tâm nghiên cứu và phát triển công nghệ Toyota đã nghiên cứu và chế tạo loại động cơ nhỏ gọn, chỉ có một piston và không có bánh đà, cho nên chuyển động tịnh tiến của piston không chuyển thành thành động năng quay của trục khuỷu mà nó thành điện năng cung cấp cho bộ accu thông qua hệ thống chuyển đổi. Range-Extended Vehicles là loại xe chạy điện có hỗ trợ thêm động cơ đốt trong để cung

cấp thêm năng lượng nhằm hỗ trợ thời gian hoạt động của xe. Mẫu FPE trên hình 2 có khả năng thay đổi áp suất thông qua việc điều chỉnh độ cứng của lò xo, thay đổi áp suất khí nén trong buồng đốt và điều khiển một cách linh hoạt để động cơ hoạt động hiệu quả nhất. Ngoài ra, Toyota còn nghiên cứu thêm kiểu hai piston đơn hoạt động ở dạng đối đỉnh không có buồng đốt chung hoặc buồng đẩy chung, như trên Hình 3.



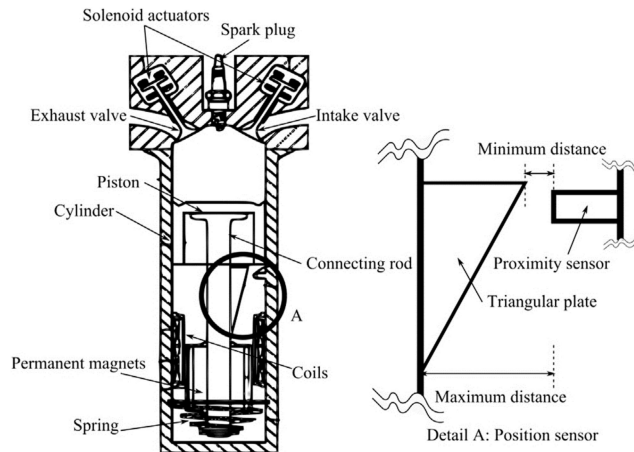
Hình 2. Động cơ piston tự do phát điện tuyến tính của Toyota



Hình 3. Kiểu hai piston đơn với hai buồng đốt riêng biệt [1]

- Một nghiên cứu ứng dụng đạt bằng sáng chế của Honda là kiểu FPE sử dụng động cơ bốn kỳ đánh lửa với một lyanh (Hình 4). Kỳ nổ cung cấp năng lượng động học và lưu trữ một phần năng lượng đó trong một lò xo cơ học và được giải phóng trong quá trình xả-nén. Việc điều khiển

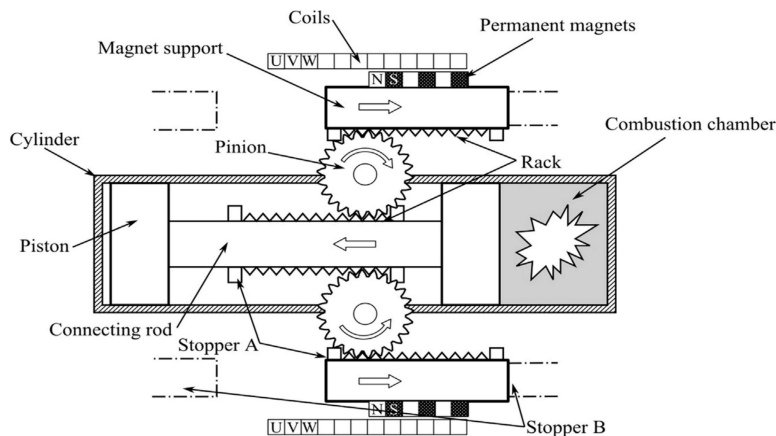
piston dựa trên áp lực trong lyanh và việc kiểm soát áp suất trong lyanh có hai phần chính, áp suất giả định và vận tốc piston giả định, kiểm soát áp suất trong quá trình nén và kiểm soát vận tốc trong quá trình giãn nở. Việc kiểm soát và điều khiển động cơ bốn kỳ khá phức tạp.



Hình 4. Động cơ phát điện tuyến tính piston tự do bốn kỳ

- Bằng sáng chế của Mazda JP2008051059 mô tả FPE là loại piston kép với máy phát tuyến tính đặt ở ngoài thông qua các cơ chế giá đỡ và khớp nối (Hình 5), mặc dù thiết kế cơ cấu này không tạo ra cấu trúc piston tự do thực sự, cơ cấu giá đỡ cơ học chi phối đến chuyển động của piston và tải trọng. Vì nó không có trục khuỷu

nên có cấu trúc tương tự như động cơ piston tự do, lực ngang tạo ra bởi chuyển động của cụm piston sẽ bị loại bỏ và một lợi thế của giải pháp này là nhiệt sinh ra từ quá trình đốt cháy ít hơn nên làm giảm khả năng ảnh hưởng đến tính năng của nam châm vĩnh cửu và cuộn dây.



Hình 5. Động cơ piston tự do loại piston kép của Mazda [1]

3.2 Phân loại động cơ piston tự do

Về cấu tạo FPE có thể cấu thành từ một trong hai kiểu động cơ là động cơ hai kỳ và bốn kỳ. Tuy

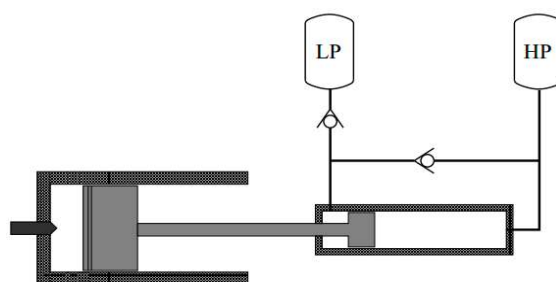
nhiên động cơ biến thể từ động cơ hai kỳ được nghiên cứu nhiều hơn vì FPE bốn kỳ gặp vấn đề lớn trong điều khiển chuyển động, do yêu cầu điều

khiến điện tử phức tạp về thời điểm đóng mở xupap nạp và xả. Về phân loại theo bố trí thì có nhiều dạng như piston đơn, piston kép, piston kép đối đỉnh và nhiều cấu hình piston phức tạp khác [1],[3],[6]. Chúng ta sẽ phân tích chủ yếu ba dạng piston đơn, piston đối đỉnh và piston kép.

3.2.1 Piston đơn

FPE với piston đơn được thể hiện trên Hình 7, động cơ này bao gồm ba phần cơ bản: xy lanh và buồng cháy, thiết bị nạp và bộ phận thu hồi để tích trữ năng lượng cần thiết (nén khí

nạp của ly lanh tiếp theo). Xylanh thủy lực đóng vai trò là thiết bị vừa tải vừa phục hồi vị trí. Thiết kế đơn giản với khả năng kiểm soát cao là điểm mạnh chính của thiết kế piston đơn so với các cấu hình động cơ piston tự do khác. Thiết bị phục hồi có thể tạo cơ hội để kiểm soát chính xác lượng năng lượng đưa vào quá trình nén và do đó điều chỉnh hành trình và tỷ số nén phù hợp. Hạn chế của động cơ này là khả năng cân bằng kém và khó kiểm soát chính xác chức năng hoạt động của bộ phận phục hồi.

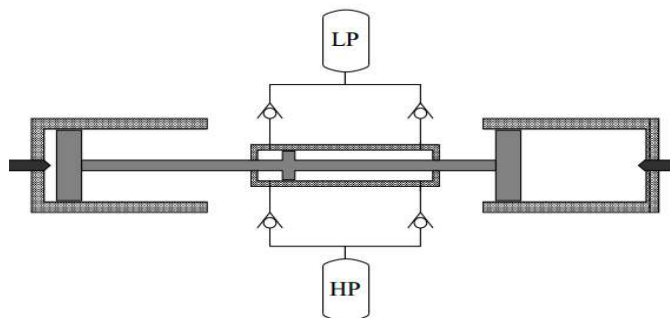


Hình 6. Cấu hình FPE dạng piston đơn [2]

3.2.2 Piston kép

Cấu hình piston kép (hoặc buồng đốt kép), được thể hiện trong Hình 8, là chủ đề cho nhiều nghiên cứu gần đây về công nghệ động cơ piston tự do. Dạng cấu hình piston kép có hai buồng đốt riêng biệt, được nghiên cứu nhiều nhất trong giai đoạn gần đây. Cấu hình này loại bỏ sự cần thiết của thiết bị phục hồi, vì piston làm việc (bất kỳ lúc nào) cung cấp công việc để dẫn động quá trình nén trong ly lanh. Điều này cho phép một thiết bị đơn giản và nhỏ gọn hơn với tỷ lệ công suất trên trọng lượng cao hơn.

Tuy nhiên, một số vấn đề với thiết kế piston kép như việc kiểm soát chuyển động của piston, đặc biệt là chiều dài hành trình và tỷ số nén, tỏ ra khó khăn, điều này là do quá trình đốt cháy trong một xy lanh dẫn đến ảnh hưởng áp lực nén ở xy lanh kia, và những thay đổi nhỏ trong quá trình đốt cháy sẽ có ảnh hưởng lớn đến lần nén tiếp theo. Đây là một thách thức kiểm soát nếu quá trình đốt cháy được kiểm soát một cách chính xác để tối ưu hóa khí thải và / hoặc hiệu quả [4],[5].

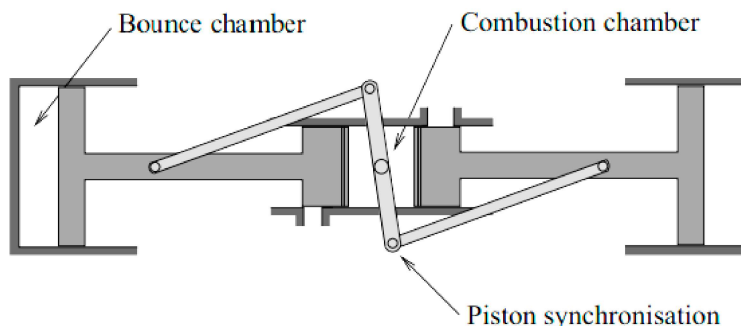


Hình 7. Cấu hình dạng piston kép có hai buồng đốt [2]

3.2.3 Piston kép đối đỉnh

Động cơ piston tự do đối đỉnh (Hình 9), về cơ bản bao gồm hai piston đơn với một buồng đốt chung. Mỗi piston sẽ có một buồng đẩy riêng biệt và hai piston phải chuyển động tương xứng với nhau. Thiết kế này cân bằng

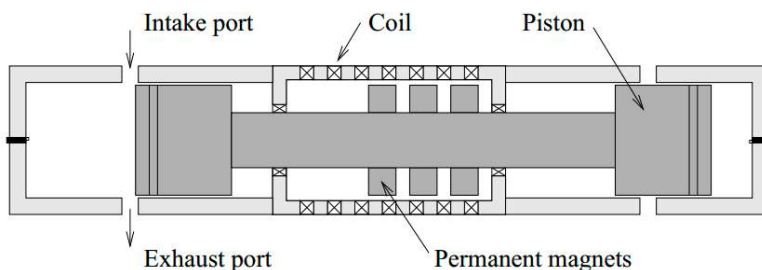
hoàn hảo vì piston được đồng bộ hóa bằng các liên kết cơ học. Tuy nhiên, việc sử dụng buồng đốt chung gây mất nhiệt, quá trình điều khiển cũng phức tạp và kích thước lớn, công kênh do phải dùng đến cơ cấu để đồng bộ hóa và cụm điều khiển.



Hình 8. Mô hình FPE piston đối đỉnh với cơ chế đồng bộ hóa piston

Ngoài ra còn có loại piston kép (Hình 10) đã được nghiên cứu bởi nhiều nhóm khác như Đại học West Virginia, Đại học Teknologi PETRONAS và Volvo technology Corporation. Hiệu quả làm việc của động cơ được thực hiện bằng sự kết hợp chặt chẽ sự chuyển động của hai piston bởi áp suất trong một lyngan thay đổi

sẽ ảnh hưởng đến lyngan còn lại. Ngày nay bằng tiến bộ khoa học kỹ thuật thì chúng ta có thể cải thiện độ ổn định hoạt động của động cơ, có thể kiểm soát quá trình cháy, lợi dụng quá trình cháy của buồng này để sinh lực nén của buồng kia, đạt được hiệu suất cao nhất.



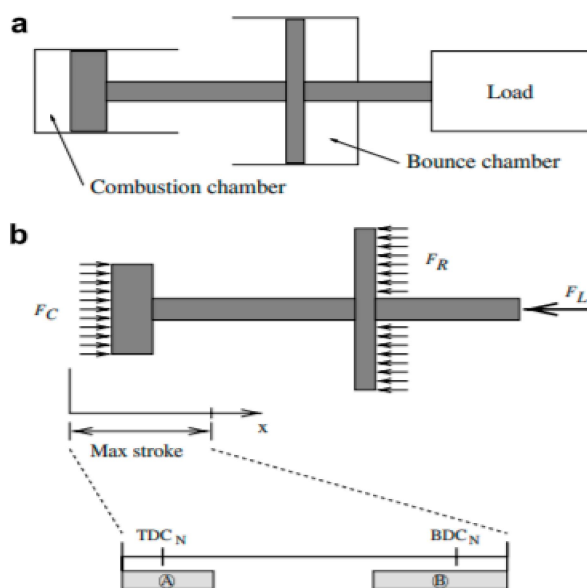
Hình 9. Mẫu động cơ piston tự do được phát triển tại Đại học West Virginia

3.3 Nguyên lý làm việc và ứng dụng trên ô tô

3.3.1 Nguyên lý làm việc

Nguyên lý làm việc cũng tương tự như ICE, đều thực hiện đủ các quá trình nạp; nén; cháy-giãn nở sinh công và xả. Nhưng ở ICE cơ cấu trục khuỷu, bánh đà đóng vai trò điều khiển chuyển động của piston và dự trữ năng lượng, lưu trữ năng lượng của quá trình cháy giãn nở

để làm năng lượng nén cho quá trình nén tiếp theo. Trong FPE chuyển động của piston ở bất kỳ thời điểm nào cũng sẽ được kiểm soát bằng tổng lực tác dụng lên nó, do đó sự tương tác của các lực tác dụng lên piston phải được sắp xếp theo cách đảm bảo để chuyển động của động cơ nằm trong giới hạn cho phép.



Hình 10. Động lực học của động cơ piston tự do: (a) cấu hình động cơ piston đơn; (b) sơ đồ các lực tác dụng lên khối chuyển động

Đối với một loại động cơ như Hình 11a, người ta có thể rút ra chuyển động của động cơ bằng cách tính toán các lực trên khối chuyển động tự do như Hình 11b. Các lực tác dụng lên khối lượng chuyển động là: lực áp suất buồng đốt F_C , lực nảy (lực bật lại) F_R , lực tải F_L , vị trí điểm chết trên (TDC_N) và điểm chết dưới (BDC_N), thông qua bộ giới hạn của chuyển động. Buồng nảy sẽ có đặc điểm tương tự như lò xo khí, chúng sẽ tạo ra một chuyển động bật lại piston. Trong trường hợp có tải, khi đó cần phải có sự điều chỉnh cho phù hợp để kiểm soát chuyển động tịnh tiến của piston. Ưu điểm của FPE so với ICE là một trong những động lực để các nhà nghiên cứu tiếp tục phát triển như việc loại bỏ cơ cấu quay giúp giảm đáng kể số lượng chi tiết, cũng như giảm độ phức tạp và điều này có khả năng mang lại một số lợi thế:

- Giảm đáng kể số các chi tiết chuyển động trong FPE, điều này cũng giảm các yêu cầu bôi trơn trong ly nhớt và làm giảm chi phí bảo dưỡng, sửa chữa.

- Ngoài ra, việc không có trục khuỷu giúp loại bỏ tổn thất ma sát và chuyển động tịnh tiến hoàn toàn dẫn đến giảm tải trọng ngang tác dụng lên piston.

- Số lượng bộ phận giảm nên chi phí sản xuất của FPE.

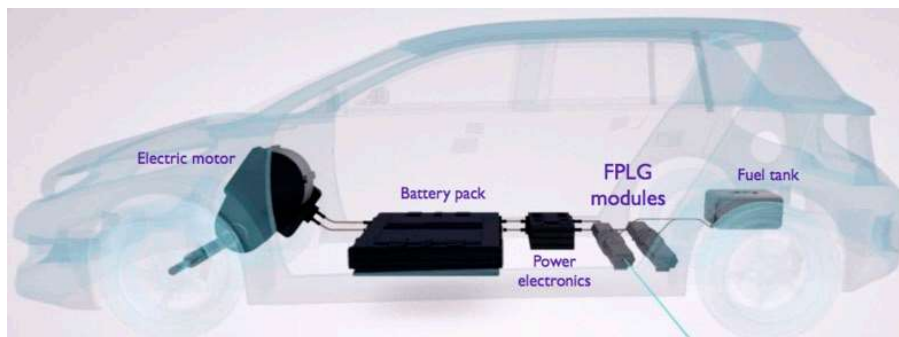
- Với số lượng các bộ phận chi tiết giảm, sẽ giảm kích thước và trọng lượng đồng thời giảm chi phí sản xuất cho động cơ không trục khuỷu FPE.

3.3.2 Ứng dụng trên ô tô

Máy phát tuyến tính tích hợp với động cơ piston tự do (FPLG-Free Piston Linear Generator), công nghệ này hiện đang được quan tâm rất nhiều của các nhà sản xuất ô tô. Với ưu điểm hiệu suất cao của máy điện, cùng với tính linh hoạt và khả năng điều khiển càng làm cho FPE ngày càng được quan tâm nhiều hơn. Động lực thúc đẩy sự phát triển của động cơ piston tự do ứng dụng phát điện hướng vào của ngành công nghiệp ô tô đối với công nghệ xe điện và xe lai (Hình 12). Với khả năng áp dụng của các thiết bị điện tử công suất thích hợp có thể cho phép sử dụng động cơ ở chế độ

hiệu suất vận hành tốt nhất trong mọi chế độ. Để hệ thống thiết bị mang lại hiệu quả cao thì phải dùng bộ phận chuyển đổi năng lượng một cách tối ưu. Chế độ làm việc hiệu quả của FPE và khả năng chịu tải của máy phát điện được

kết hợp tối ưu, việc khởi động cũng như điều khiển cho tải ổn định, đòi hỏi phải được kiểm soát và điều khiển. Một số ứng dụng thành công FPE vào máy phát điện như của hãng General Motor, Ford Motor.



Hình 11. Vị trí của FPE dùng trên ô tô điện [7]

4. KẾT LUẬN

Động cơ piston tự do là động cơ đốt trong được loại bỏ cơ cấu tay quay con trượt trên động cơ đốt trong truyền thống. Ưu điểm lớn của động cơ này là triệt tiêu hoàn toàn lực ngang tác dụng lên xylanh, giảm thiểu ma sát và tăng hiệu suất làm việc. Ngoài ra kiểu kết cấu này còn cho phép động cơ thay đổi tỷ số nén, có thể tối ưu hóa quá trình đốt cháy, sử dụng với nhiều loại nhiên liệu khác nhau góp phần hạn chế sự phụ

thuộc vào nhiên liệu hoá thạch và giảm tối thiểu ô nhiễm môi trường. Với thiết kế đơn giản về mặt cơ học và tích hợp máy phát điện tuyến tính nhỏ gọn, giúp giảm tối đa ma sát và nâng cao hiệu suất. Trong tương lai không xa, cùng với sự phát triển và hỗ trợ của các công nghệ điều khiển, động cơ piston tự do sẽ là một thiết bị chuyển đổi năng lượng đầy hứa hẹn với những lợi thế tiềm năng vượt trội so với các loại động cơ đang sử dụng phổ biến hiện nay.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Mikalsen, R., & Roskill, A.P. (2007). A review of free-piston engine history and applications. *Applied Thermal Engineering*, Volume 27, Issues 14–15, October 2007, Pages 2339-2352.
- [2] Pescara, R.P. (1928). *Motor compressor apparatus*, US Patent 1,657,641.
- [3] Nguyen Ba Hung, Lim, O. (2016). A review of free piston linear engines. *Applied Energy* 178 (2016) 78-97.
- [4] Aichlmayr, H.T. (2002). *Design Considerations, Modeling, and Analysis of Micro-Homogeneous Charge Compression*
- Ignition Combustion Free-Piston Engines* (Ph.D Thesis). University of Minnesota.
- [5] Achten, P.A.J. (1994). A review of free piston engine concepts. *SAE Paper* 941776.
- [6] Nguyen Ba Hung, Lim, O., & Iida, N. (2015). The effects of key parameters on the transition from SI combustion to HCCI combustion in a two-stroke free piston linear engine. *Applied Energy* 137 (2015) 385-401.
- [7] <https://www.greencarcongress.com/2013/02/dlr-20120220.html>. Truy cập ngày 20/12/2020.