



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

Website: jsde.nctu.edu.vn



Mô phỏng quá trình quét và nén của động cơ đốt trong không trục khuỷu hai kỳ sử dụng mô hình CFD

Nguyễn Huỳnh Thi^{1*}, Nguyễn Văn Tổng Em², Nguyễn Hoàng Việt², Đào Hữu Huy²

¹Khoa Kỹ thuật Công nghệ, Trường Đại học Tiền Giang, Việt Nam

²Khoa Cơ khí Động lực, Trường Đại học Nam Cần Thơ, Việt Nam

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Nguyễn Huỳnh Thi (email: nguyenhuynhthi@tgu.edu.vn)

Ngày nhận bài: 30/12/2023

Ngày phân biên: 15/1/2024

Ngày duyệt đăng: 10/2/2024

Title: Simulation of the sweep and compression process of a two-stroke crankless internal combustion engine using a CFD model

Keywords: computational fluid dynamics, free-piston engine, internal combustion engine, starting system

Từ khóa: động lực học chất lỏng, động cơ piston tự do, động cơ đốt trong, hệ thống khởi động

ABSTRACT

The air exchange and motion of the free piston linear engine (FPLE) are closely related and affect the intake efficiency during the engine start-up process. In this study, a computational fluid dynamics (CFD) simulation model was built based on the actual FPLE model with two 25cc twin-cylinder engines. The piston start-up strategy was move at two speeds of 0.32 m/s and 0.64 m/s. The results showed that the intake efficiency at a speed of 0.32 m/s was 78% and the intake efficiency at a speed of 0.64 m/s was 54%. The final pressure of the compression process at a speed of 0.32 m/s was 4.7 kg/cm², and at 0.64 m/s it was 3.9 kg/cm². Based on the results of the final pressure of the compression stroke, the engine can successfully ignite and start-up in one piston stroke.

TÓM TẮT

Sự trao đổi khí và chuyển động của động cơ piston tự do (FPLE - free piston linear engine) có liên quan chặt chẽ với nhau ảnh hưởng đến hiệu suất nạp trong quá trình khởi động của động cơ. Trong nghiên cứu này, một mô hình mô phỏng số động lực học chất lỏng (CFD - Computational Fluid Dynamics) được xây dựng dựa trên mô hình FPLE thực tế với hai động cơ 2 thì kép dung tích 25cc mỗi động cơ. Chiến lược khởi động piston dịch chuyển với hai vận tốc 0.32m/s và 0.64 m/s. Kết quả cho thấy, hiệu suất nạp ở tốc độ 0.32m/s là 78% và hiệu suất nạp ở tốc độ 0.64m/s là 54%, áp suất cuối quá trình nén ở tốc độ 0.32m/s là 4.7 kg/cm², áp suất cuối quá trình nén ở tốc độ 0.64m/s là 3.9 kg/cm². Dựa trên kết quả mô phỏng áp suất cuối quá trình nén cho thấy rằng, động cơ có thể đánh lửa thành công và khởi động trong một lần dịch chuyển piston.

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, cùng với sự gia tăng dân số và sự phát triển của nền kinh tế, số lượng phương tiện cá nhân cũng tăng lên nhanh chóng. Khi hoạt động, động cơ đốt trong thải ra nhiều thành phần gây ô nhiễm môi trường như carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), oxit nitric (NO và NO₂), sulfur dioxide (SO₂), hydrocarbon và chất này ở nồng độ cao sẽ trực tiếp ảnh hưởng đến sức khỏe con người, môi trường và bầu không khí. Đây là một trong những thách thức lớn đối với lĩnh vực động cơ đốt trong, năng lượng và môi trường. Do những hạn chế của nhiên liệu hóa thạch và tiêu chuẩn khí thải khắt khe hơn, động cơ thông thường có xu hướng thay thế bằng động cơ hiệu quả hơn. Động cơ piston tự do (FPLE - free piston linear engine) xem xét giải pháp có ưu điểm là giảm phát thải NO_x [1], sử dụng đa nhiên liệu [2] và hiệu suất cao [3]. Việc không có trục khuỷu khiến kết cấu của động cơ tuyến tính có piston tự do (FPLE) đơn giản, giảm ma sát so với động cơ thông thường [4]. Nhiều nhóm nghiên cứu đang nghiên cứu các nguyên mẫu FPLE như một giải pháp thay thế cho động cơ thông thường, trong đó đa phần là động cơ piston tự do hai thì [5-7]. Mặc dù động cơ piston tự do hai thì không có trục khuỷu, nhưng quá trình trao đổi khí khí, quá trình hoạt động ở động cơ piston tự do cũng tương tự như động cơ hai thì thông thường. Đối với piston tự do hai thì quá trình trao đổi khí được coi là chìa khóa để tăng hiệu suất đánh lửa của động cơ [8]. Do quá trình trao đổi khí diễn ra bên trong xy-lanh nên rất khó để phân tích tính toán.

CFD (Computational Fluid Dynamics) là một công cụ rất hữu ích để phân tích khí trao đổi khí. Trong bài báo này, trình bày một mô phỏng CFD để khảo sát các thông số của quá trình trao đổi khí khí FPLE 2 thì. Các tham số kích thước

được chọn dựa trên mô hình FPLE thực, chuyển động của piston tự do được xây dựng dựa trên mô hình động lực học, trong quá trình chuyển động của piston các thông số trong quá trình trao đổi khí được tính toán. Có hai chiến lược khởi động phổ biến hiện nay là “chuyển đổi chiến lược ngay lập tức” và “chuyển đổi chiến lược dần dần” [9]. Nghiên cứu chỉ tập trung mô phỏng, tính toán quá trình trao đổi khí trong quá trình khởi động, ở hai tốc độ 0,32 m/s và 0,64 m/s. Với mục tiêu khởi động ngay lập tức trong một lần dịch chuyển tuyến tính của piston, các thông số trong quá trình quét khí, nén được đưa ra phân tích, áp suất cuối quá trình nén được xem là thông số mục tiêu vì nó quyết định thành công của quá trình đánh lửa khởi động.

2. PHƯƠNG TIỆN VÀ PHƯƠNG PHÁP

Nghiên cứu này được thực hiện bằng phương pháp nghiên cứu định tính qua tổng hợp các nội dung có liên quan.

2.1 Mô hình hóa và mô phỏng

2.1.1 Mô hình chuyển động

Các lực cơ học tác dụng lên piston bao gồm lực khí thể trong xilanh trái và phải, lực ma sát cơ học, lực quán tính và lực kéo của cơ cấu chấp hành. Động lực học của piston có thể được xác định bởi định luật Newton II.

$$F_{st} + F_{cyl} - F_{cyr} - F_f = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1)$$

F_{cyl} , F_{cyr} là lực khí thể tác dụng lên piston bên trái và bên phải động cơ

$$F_{cyl} = P_{cyl} S \quad (2)$$

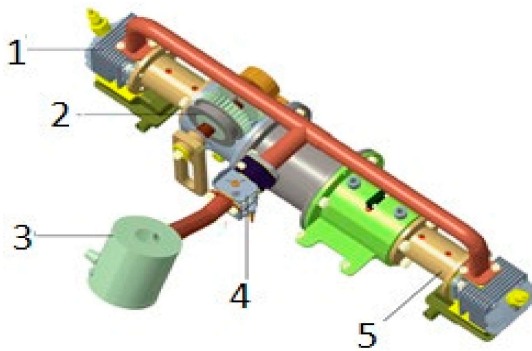
$$F_{cyr} = P_{cyr} S \quad (3)$$

P_{cyl} , P_{cyr} là áp suất trong xilanh trái và phải, S là diện tích của đỉnh piston. F_f là lực ma sát, m là khối lượng của chuyển động tịnh tiến, d^2x/dt^2 là gia tốc của piston, F_{st} , F_{sr} lần lượt là lực lò xo ở bên trái và bên phải. F_{st} lực nhận được từ thiết bị khởi động. Vận tốc của piston được tính theo phương trình:

$$\frac{dx}{dt} = \left(\frac{dx}{dt}\right)_0 + \frac{d^2x}{dt^2} t \tag{4}$$

Trên mô hình thực tế, tốc độ ban đầu V_0 dựa trên bộ khởi động cơ học Hình 1. Tốc độ này bị cản trở bởi lực lò xo ở bên trái hoặc bên phải. Vận tốc của piston từ BDC đến TDC được xác định bởi:

$$V = V_0 - \frac{Ft}{m} \tag{5}$$



Hình 1. 1- Xi lanh; 2- Cơ cấu khởi động; 3- Tầng áp; 4- Bộ chế hoà khí, 5- Buồng khí nén

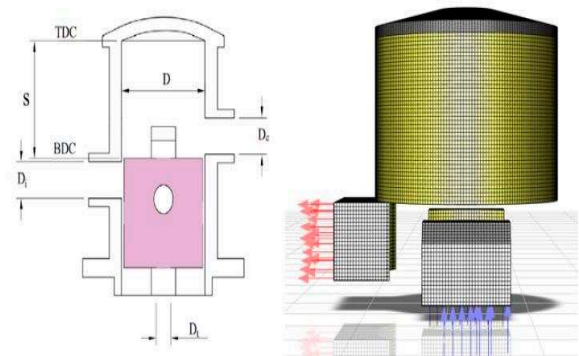
2.1.2 Mô hình CFD

Mô hình piston và các thông số chính của FPLE được thể hiện trong Hình 2 và Bảng 1. Tham số của FPLE được nhập vào phần mềm CFD thương mại Ansys Fluent v.21 để xác định các bề mặt và thể tích tính toán cũng như tạo lưới. Sau đó là quá trình chia lưới, lưới xilanh được tạo theo phương pháp đa vùng (multi-zone method) và tạo lưới trong phương pháp quét (sweep method). Vận tốc của piston được tính toán bởi một chương trình viết bằng Microsoft Visual C++ trước khi nhập nó vào phần mềm Ansys như một cơ sở dữ liệu đầu vào, cơ sở dữ liệu đầu vào là một chức năng do người dùng định nghĩa. Trong lưới động, sự phân lớp được sử dụng để thêm hoặc bớt các lớp lưới theo vị trí của piston. Ngoài ra, lưới động lực thay đổi theo vị trí của piston để thay đổi tỷ số nén, áp

suất,... Vị trí của piston có thể thay đổi từng bước với mỗi bước là 0,5 mm, từ đó có thể kiểm soát được áp suất ở cuối hành trình nén ở các vị trí khác nhau.

Mô hình mô phỏng với áp suất đầu vào được điều chỉnh từ 1,05 bar; tốc độ ban đầu là 0,32 m/s và 0,64 m/s tương ứng với tần số dịch chuyển tuyến tính từ 5 Hz đến 10 Hz. Nhiệt độ đầu vào và đầu ra được đặt ở 300⁰K trong quá trình mô phỏng. Hỗn hợp đầu vào được giả định là khí lý tưởng. Ngoài ra, mô hình dòng chảy rối $k - \epsilon$ được sử dụng. Các thông số đầu vào được cung cấp cho mô hình tính toán động lực học chất lỏng (CFD) để tính toán hiệu suất nạp của hỗn hợp. Các tham số đầu vào được cung cấp cho mô hình tính toán động lực học chất lỏng (CFD) để tính toán hiệu suất quá trình quét. Trong hai hành trình, hiệu quả bẫy được định nghĩa như sau [10]:

$$\eta_c = \frac{\text{khối lượng khí nạp mới cung cấp được giữ lại trong xilanh}}{\text{khối lượng khí nạp mới được đưa vào qua tất cả các cổng quét}}$$



Hình 2. a) Thông số của FPLE, b) Tính toán lưới của FPLE

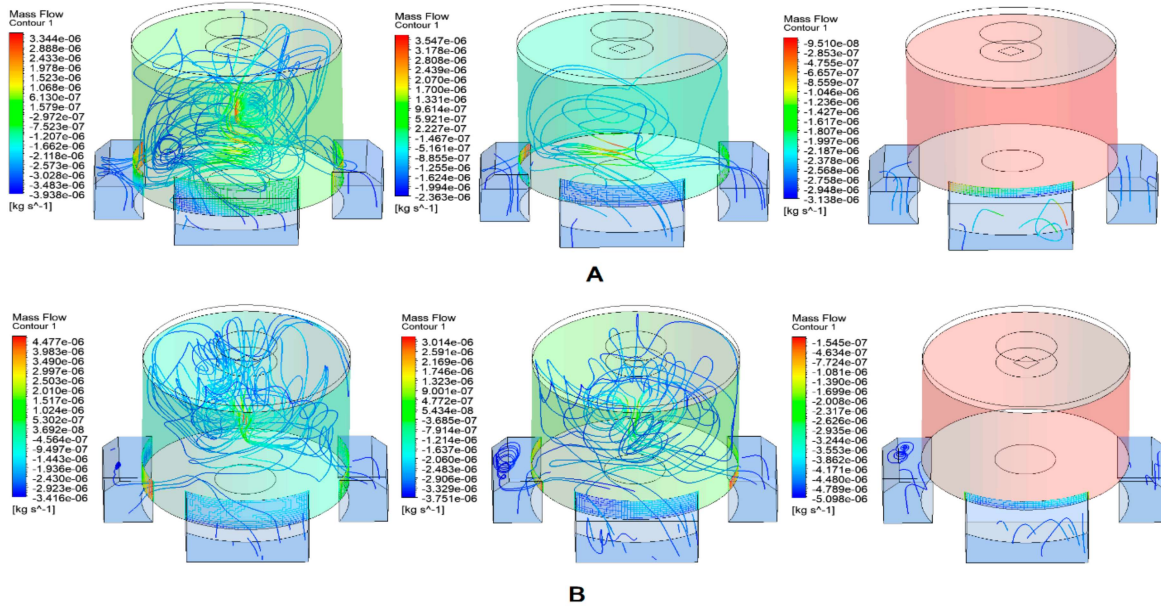
Bảng 1. Thông số kỹ thuật động cơ và điều kiện hoạt động

Thông số	Giá trị
Khoảng chạy (S)	28 mm
Đường kính (D)	34 mm
Cửa nạp (Di)	0-6 mm

Cửa xả (D_e)	0-13 mm
Cửa chuyển (D_i)	10 mm
Áp suất khí nạp (P_{in})	1,05 bar
Nhiệt độ khí nạp (T_{in})	300°K

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

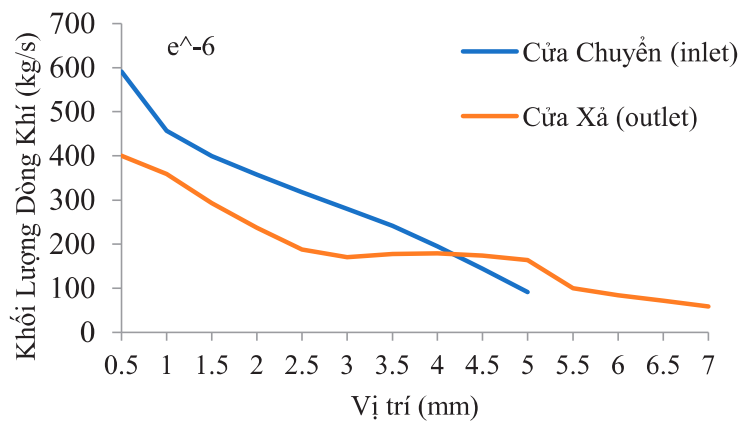
3.1 Kết quả mô phỏng quá trình quét



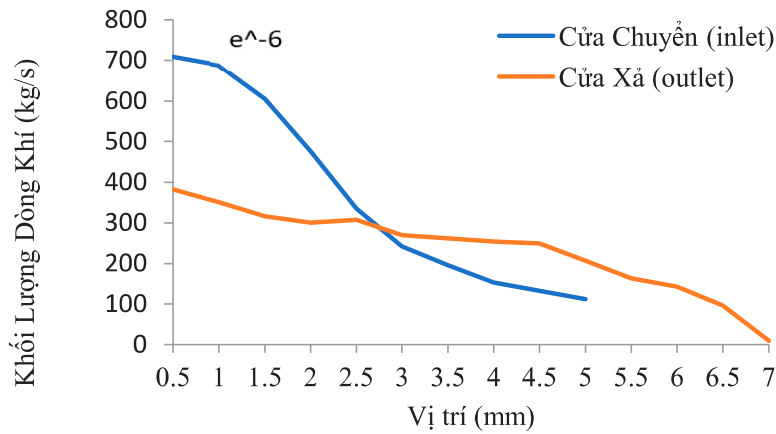
**Hình 3. A) Khối lượng dòng khí tại vị trí piston 0 mm, 2,5 mm, 5 mm tại tốc độ 0,32 m/s;
B) Khối lượng dòng khí tại vị trí piston 0 mm, 2,5 mm, 5 mm tại tốc độ 0,64m/s**

Khối lượng khí đi vào xy lanh qua cổng quét ở các vị trí dịch chuyển được thể hiện qua Hình 3. Cả hai trường hợp cho thấy khối lượng dòng khí thay đổi theo sự dịch chuyển của piston nhưng có sự khác nhau giữa hai tốc độ. Kết quả mô khối lượng dòng khí phỏng thể hiện qua đồ

thị Hình 4, Hình 5. Khối lượng dòng khí đi vào qua cổng quét ở tốc 0,32m/s nhỏ hơn tốc độ 0,64m/s. nhưng khối lượng dòng khí ở cửa ra lớn hơn làm cho hiệu suất nạp ở tốc độ 0,64 m/s nhỏ hơn 0,32 m/s. Hiệu suất nạp ở tốc độ 0,32 m/s là 78% và hiệu suất nạp ở tốc độ 0,64 m/s.



Hình 4. Khối lượng dòng khí vào xy lanh ở tốc độ 0,32m/s

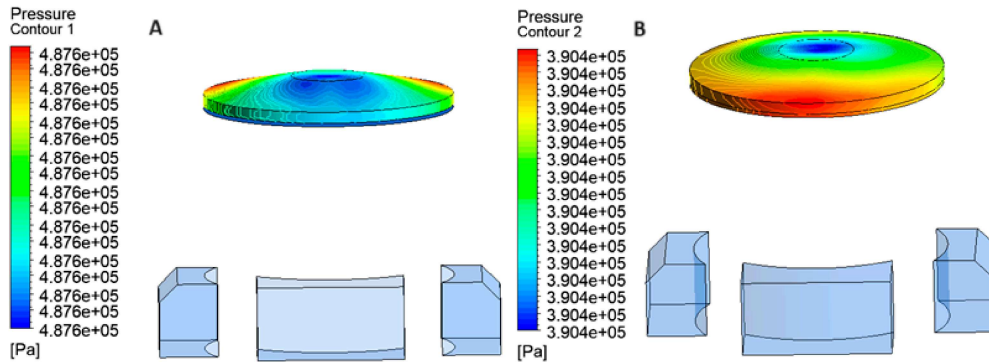


Hình 5. Khối lượng dòng khí vào xylanh ở tốc độ 0,64 m/s

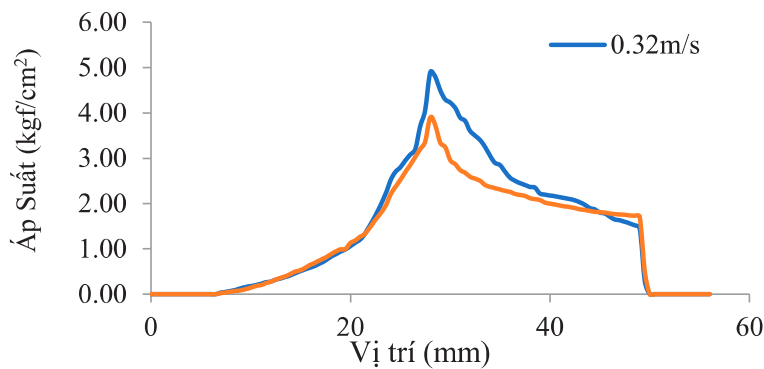
3.2 Kết quả mô phỏng quá trình nén

Quá trình quét khí ảnh hưởng lớn đến quá trình nạp, do hiệu suất nạp ở tốc độ 0,64 m/s nhỏ hơn 0,32 m/s vì thế áp suất cuối quá trình nén nhỏ hơn ở tốc độ 0,64 m/s nhỏ hơn 0,32 m/s. Áp suất cuối quá trình nén ở tốc độ 0,32 m/s là

4,7 kg/cm², ở 0,64 m/s là 3,9 kg/cm². Trong quá trình nén còn nhiều yếu tố ảnh hưởng như nhiệt độ quá trình nén, lọt khí qua xét-măng,... mô hình mô phỏng coi như quá trình nén là lý tưởng. Với hai kết quả thông số áp suất cuối quá trình nén khả đánh lửa thành công là rất cao.



Hình 6. A) Áp suất cuối kỳ nén tại tốc độ 0.32m/s; B) Áp suất cuối kỳ nén tại tốc độ 0.64m/s



Hình 7. Đồ thị so sánh áp suất cuối kỳ nén tại tốc độ 5Hz và 10Hz

4. KẾT LUẬN

Từ kết quả mô phỏng mô phỏng cho thấy khả năng khởi động ngay lập tức trong một là dịch chuyển của piston là có khả thi với hai tần số dịch chuyển 0,32 m/s và 0,64 m/s. Hiệu suất nạp và áp suất cuối kỳ nén ở tốc độ dịch chuyển 0,32 m/s cao hơn 0,64 m/s do hiện tượng lọt khí ở hai

tốc độ là khác nhau. Trong các nghiên cứu tiếp theo, vận tốc piston, cửa áp suất cửa được thay đổi nhiều giá trị hơn để tìm ra giá trị tối ưu các thông số cho động cơ. Ngoài ra, các thông số hình học như kích thước cổng quét, cổng xả cũng được xem xét.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Pescara, R.P. (1928). *Motor compressor apparatus*. US patent 1,657,641.
- [2] Mikalsen, R., & Roskilly, A.P. (2007). A review of free-piston engine history and application. *Appl Therm Eng*, 27:2339–52.
- [3] Mao, J.L., Zuo, Z.X, Li, W, & Feng, H. (2011). Multi-dimensional scavenging analysis of a free-piston linear alternator based on numerical simulation. *Applied Energy*, vol.88.
- [4] Huang, L. (2012). An opposed-piston free-piston linear generator development for HEV. *SAE paper* 2012-01-1021.
- [5] Hung, N.B., & Lim, O. (2014). A study of a two-stroke free piston linear engine using numerical analysis. *J Mech Sci Technol*, 28:1545–57.
- [6] Oh, Y, & Lim, O. (2012). A study for generating power on operating parameters of powerpack utilizing linear engine”. *SAE paper*, 32-0061.
- [7] Kim, J., Bae, C., & Kim, G. (2013). Simulation on the effect of the combustion parameters on the piston dynamics and engine performance using the Wiebe function in a free piston engine. *Appl Energy*, 107:446–55.
- [8] Goldsborough, S.S, & Blarigan, P.V. (2003). Optimizing the scavenging system for a two-stroke cycle, free piston engine for high efficiency and low emission: A computational approach. *SAE Paper*, 01-0001.
- [9] Guo, C.D., Zuo, Z.X., & Feng, H.H. (2020). Review of recent advances of free-piston internal combustion engine linear generator. *Applied Energy*, 269, 115084.
- [10] Sofianopoulos, A., Zhou, Y.C., Lawler, B., & Mamalis, S. (2017). Gas exchange processes of a small HCCI free piston engine - A computational study. *Appl. Therm. Eng.* 127, 1582–1597.