

# THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN ĐỘC LẬP ÁP SUẤT NHIÊN LIỆU TRONG ĐIỀU KIỆN MÔ PHỎNG HỆ THỐNG NHIÊN LIỆU COMMON-RAIL

VÔ TẤN CHÂU, NGUYỄN QUỐC SỸ, TRẦN VĂN NGUYỄN, HOÀNG HỮU ĐỨC, TRỊNH QUỐC HÙNG, DƯƠNG MINH HOÀNG

*Khoa Công nghệ Động lực, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh  
votanchau@iuh.edu.vn*

**Tóm tắt.** Áp suất nhiên liệu trong hệ thống diesel common-rail ảnh hưởng trực tiếp đến công suất và khí thải động cơ, điều khiển áp suất phun nhiên liệu độc lập với tốc độ động cơ là một trong các giải pháp tiềm năng để đánh giá ảnh hưởng của áp suất phun tới khí thải và công suất của động cơ. Bài báo này nghiên cứu về việc xây dựng hệ thống điều khiển cung cấp áp suất phun cao áp với dải áp suất từ 400bar tới 1600bar để mô phỏng áp suất nhiên liệu hệ thống common rail. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng hệ thống điều khiển và cung cấp chính xác áp suất phun nhiên liệu trong dải áp suất thiết kế, hệ thống thiết kế linh động và có khả năng ứng dụng cao trong thực tế.

**Từ khóa.** Common-rail system, Diesel engine, High injection pressure, Exhaust gas emissions.

## DESIGN AND MANUFACTURING INDEPENDENT FUEL PRESSURE CONTROL SYSTEM UNDER SIMULATING COMMON-RAIL SYSTEM CONDITIONS

**Abstract.** Fuel pressure in the common-rail diesel system directly affects engine power and emissions, independent fuel injection pressure control with engine speed is one of the potential solutions to investigate the influences of injection pressure on engine power and emissions. This paper studies the establishment of a control system that provides high-pressure fuel injection with a pressure range from 400bar to 1600bar to simulate fuel pressure of the 2<sup>nd</sup> generation common-rail system. The research results show that the system controls and provides precise fuel injection pressure in the designed pressure range, flexible design and high potential of application in the practical situation.

**Keywords.** Common-rail system, Diesel engine, High injection pressure, Exhaust gas emissions.

### 1 GIỚI THIỆU

Động cơ diesel được sử dụng ngày càng rộng rãi trong xã hội với khả năng ứng dụng cao trong nhiều lĩnh vực (giao thông vận tải, xây dựng, nông nghiệp...) bởi vì hiệu suất nhiệt cao hơn động cơ xăng cũng như tỉ số nén và giới hạn công suất hoạt động lớn hơn. Khí thải động cơ diesel là một vấn đề nghiêm trọng đối với môi trường. Nghiên cứu của Sydbom và ctg. (2001) [1] về sự phát thải của động cơ diesel, và ảnh hưởng của khí thải động cơ diesel đến môi trường và sức khỏe con người. Nghiên cứu của Fresderic Tschanz và ctg. (2010) [2] cho thấy sự thay đổi áp suất phun nhiên liệu ảnh hưởng tới nồng độ bồ hóng (soot) hình thành trong khí thải. Nghiên cứu của Rashid Ali (2011) [3] đã chỉ ra rằng khí thải của động cơ diesel ảnh hưởng tiêu cực tới sức khỏe con người, gây ra các bệnh về đường hô hấp cũng như ung thư. Vì các vấn đề nêu trên đã thúc đẩy các nhà sản xuất ô tô chú trọng việc phát triển mạnh mẽ các công nghệ để giảm thiểu lượng khí thải động cơ gây hại đến sức khỏe và môi trường. Nghiên cứu của Junheng Liu và ctg. (2015) [4]; C.Syed Aalam và ctg. (2015) [5]; Mohammad Reza Herfatmanesh và ctg. (2016) [6] đều chỉ ra rằng khi tăng áp suất phun, hàm lượng của CO, HC, soot giảm đi rõ rệt. Đồng quan điểm với các nghiên cứu trên, nghiên cứu của Hari Viswanath và ctg. (2018) [7] cho thấy tăng áp suất phun của nhiên liệu cũng làm cải thiện hiệu suất của động cơ. Việc điều khiển áp suất phun với sự thay đổi linh hoạt áp suất từ 100bar đến 1800bar, đặc biệt ở dải áp suất phun cao đang là phương pháp được nghiên cứu nhiều nhằm mục đích cải thiện quá trình cháy của nhiên liệu diesel và giảm khí thải. Một nghiên cứu về ảnh

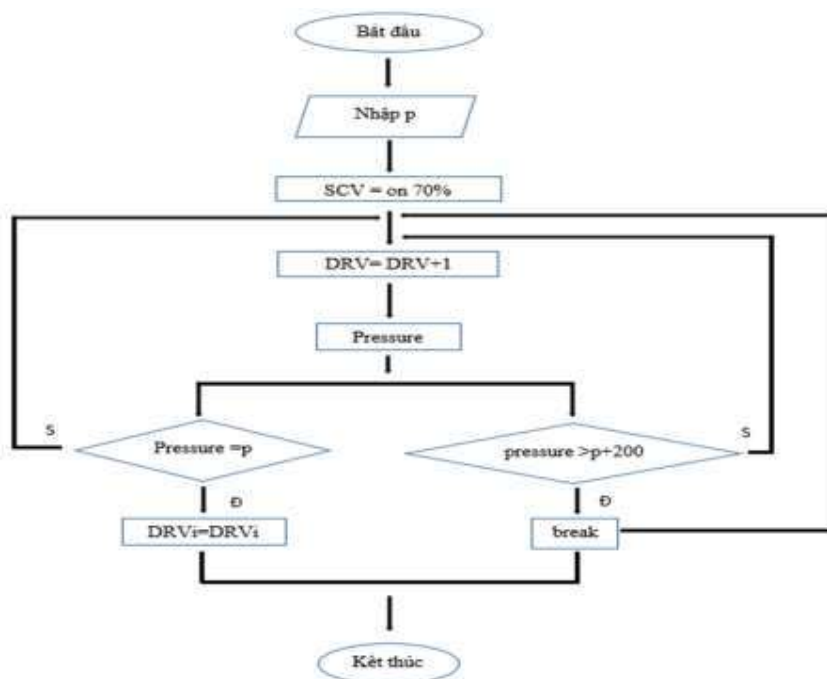
hường của dây áp suất phun tới đặc tính phun nhiên liệu của Dernotte và ctg. [8] chỉ ra rằng sự chênh lệch áp suất phun ảnh hưởng mạnh tới lưu lượng phun nhiên liệu. Các nghiên cứu của Srinath Pai và ctg. (2013) [9]; Taizo Shimada và ctg. (1989) [10]; S.V.Channapattana và ctg. (2015) [11] chỉ ra rằng khi tăng áp suất phun nhiên liệu thì giảm lượng khí thải và suất tiêu thụ nhiên liệu. Nghiên cứu của V.S.Hariharan và K.Vijayakumar Reddy (2011) [12] cho thấy khi tăng áp suất phun nhiên liệu thì hiệu suất nhiệt của động cơ tăng lên, lượng HC giảm xuống. Nghiên cứu về ảnh hưởng của áp suất phun tới khí thải động cơ diesel của Tero Lähde và ctg. (2011) [13]; Zhen Xu và ctg. (2014) [14] cho thấy áp suất phun cao sẽ giảm được hàm lượng soot.

Từ các nghiên cứu trên cho thấy sự cần thiết trong việc thay đổi áp suất phun cao áp trong việc nâng cao hiệu suất động cơ và giảm khí thải. Nghiên cứu này bước đầu chế tạo hệ thống điều khiển linh hoạt áp suất phun trong dây áp suất điều khiển từ 400bar đến 1600bar mô phỏng áp suất cung cấp của hệ thống common-rail và đánh giá khả năng hoạt động ổn định của dây áp suất thiết kế. Hệ thống này tiếp tục phát triển có khả năng nghiên cứu chuyên sâu về đặc tính phun nhiên liệu ứng với các chế độ hoạt động của động cơ và nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của đặc tính các thể hệ nhiên liệu sinh học lên công suất và khí thải động cơ diesel.

## 2 PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Thuật toán điều khiển

Hình 1 trình bày sơ đồ thuật toán điều khiển hệ thống cung cấp áp suất nhiên liệu cao áp từ 400bar đến 1600bar. Từ sơ đồ cho thấy khi nhập áp suất ( $p$ ) theo áp suất điều khiển mong muốn, dòng điện đến van SCV (Suction Control Valve) van SCV sẽ mở 20% chu kỳ xung để hút nhiên liệu, mở quá lớn dẫn đến áp suất trên thanh tích áp dao động mạnh, sau đó khi van SCV ở chế độ ON, độ rộng xung áp dụng là 70% chu kỳ (duty ratio) để hút lượng nhiên liệu vào xilanh nén. Van điều tiết nhiên liệu (DRV, Diesel Regulator Valve) trên thanh tích áp đóng dần làm tăng áp suất nhiên liệu và duy trì áp suất  $p$ . Khi bước nhảy áp suất cho mỗi lần tăng áp vượt quá 200bar (vượt quá giá trị điều khiển mong muốn) thì van DRV mở hoàn toàn để giảm áp và tăng áp suất  $p$  trở lại.



Hình 1: Sơ đồ thuật toán hệ thống điều khiển cung cấp áp suất nhiên liệu

## 2.2. Phương pháp chọn motor và bơm cao áp

Motor 3 pha được sử dụng để điều khiển bơm cao áp. Việc lựa chọn motor phù hợp điều kiện hoạt động của bơm cao áp được tính toán với điều kiện đặc tính công suất motor phải lớn hơn công suất bơm cao áp trong hệ thống.

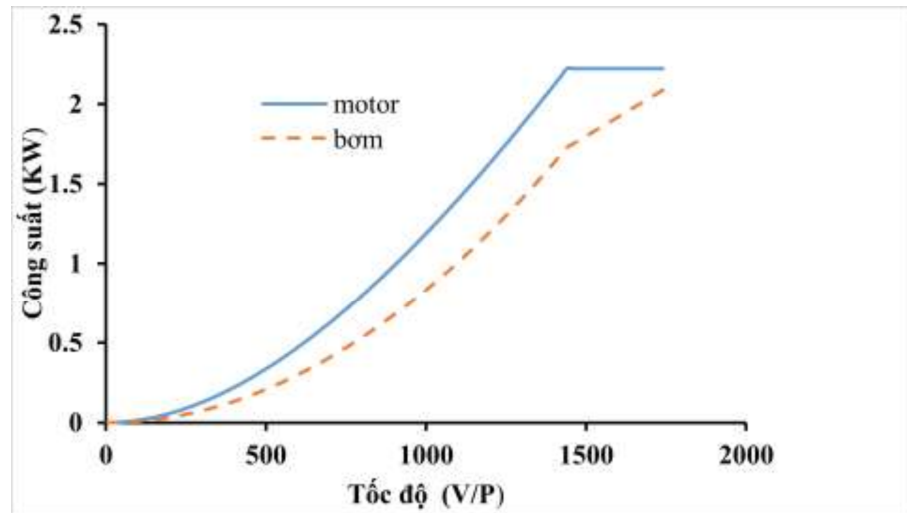
Công suất bơm cao áp được tính theo phương trình (1) [15]:

$$Power(kW) = \frac{q \left( \frac{m^3}{h} \right) \times P(Pa)}{3.6 \times 10^6} \quad (1)$$

Công suất motor 3 pha được tính theo phương trình (2):

$$N = f(n) = M \times \omega = K_M \times \omega \times I_0 \left[ 1 - e^{-\left( \frac{n}{k} \right)} \right] (n \leq 1500) \quad (2)$$

Từ (1) và (2) ta được biểu đồ so sánh đặc tính công suất motor 3 pha và bơm cao áp:



Hình 2: Công suất motor và bơm cao áp HP3

Hình 2 trình bày mối tương quan về công suất của motor điều khiển và dãy công suất hoạt động của bơm cao áp. Từ đồ thị cho thấy công suất motor 3 pha được lựa chọn hoàn toàn đáp ứng được khả năng vận hành hoạt động của bơm cao áp trong dãy áp suất cao từ 400bar đến 1600bar.

Thông số kỹ thuật của bơm cao áp và motor 3 pha sử dụng trong hệ thống được thể hiện dưới bảng 1

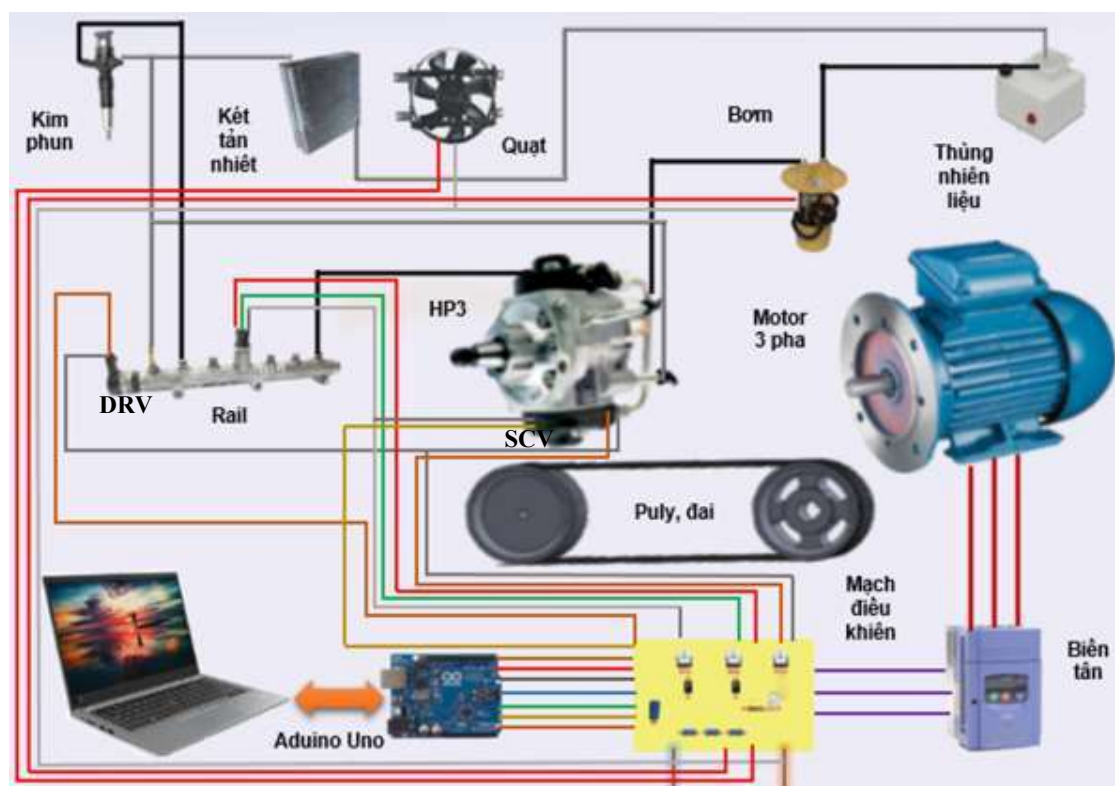
Bảng 1: Thông số kỹ thuật

	Thông số	Giá trị
Bơm cao áp HP3	Tỉ số truyền giữa bơm trục khuỷu động cơ	1:1
	Đường kính piston bơm x số lượng	8.5mm x 2
	Hành trình piston	5.6mm
	Loại van SCV	Thường mở

Motor điện 3 pha	Công suất	2,2 KW
	Điện áp đầu vào	220V, 50Hz
	Cường độ dòng điện	8,7A
	Số vòng quay	1430 rpm

### 3 THIẾT KẾ HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM VÀ ĐIỀU KIỆN THÍ NGHIỆM

#### 3.1. Sơ đồ hệ thống thí nghiệm



Hình 3: Sơ đồ hệ thống lắp đặt thí nghiệm

Sơ đồ hệ thống được trình bày trong hình 3. Từ sơ đồ, hệ thống sử dụng bơm cao áp HP3 được dẫn động bởi motor 3 pha (3HP-4poles) thông qua cơ cấu truyền động đai có tỷ số truyền 1:1. Motor 3 pha được điều khiển bởi biến tần (Hitachi L100-005LFR) để thay đổi tần số từ đó điều khiển tốc độ motor. Bơm cao áp HP3 hút nhiên liệu từ thùng chứa thông qua một bơm thấp áp (3 bar) loại có tích hợp lọc nhiên liệu. Nhiên liệu từ bơm HP3 được nén lên thành tích áp với áp suất có thể thay đổi từ 400bar đến 1600bar và đưa tới kim phun nhiên liệu (Solenoid Denso G2). Hệ thống được thiết kế có đường dầu hồi về từ kim phun điện tử, bơm cao áp, thanh tích áp qua hệ thống làm mát để đưa về thùng chứa nhiên liệu, khi nhiệt độ lớn hơn 40°C hệ thống sẽ tự động kích hoạt quạt làm mát. Mạch điều khiển trong hệ thống là mạch arduino có khả năng mô phỏng tín hiệu giả lập của ECU để điều khiển van SCV với mục đích điều khiển lưu lượng hút vào bơm cao áp (kiểm soát thể tích và thời gian cung cấp nhiên liệu cho bơm cao áp để nén nhiên liệu tăng áp suất và đưa lên thanh tích áp), và điều khiển van DRV trên thanh tích áp nhằm điều tiết độ ổn định dao động của sóng nhiên liệu trong thanh tích áp, ECU giả lập cũng điều khiển đồng thời quạt làm mát.

Van điều chỉnh áp suất nhiên liệu (DRV) được kích hoạt bởi mô-đun điều khiển với tín hiệu điều chế

độ rộng xung (PWM). Sau khi có dòng điện, từ trường được tạo ra trong cuộn dây điện từ. Nền van được siết chặt và ấn kim van vào vị trí của nó. Một lực từ chống lại áp suất nhiên liệu trong thanh tích áp, áp suất trong thanh tích áp dần dần tăng lên. Van điều tiết (DRV) mở hoàn toàn khi áp suất trong thanh tích áp lớn hơn 1800bar để đảm bảo an toàn cho hệ thống (Denso, 2007) [16].

### 3.2. Điều kiện thí nghiệm

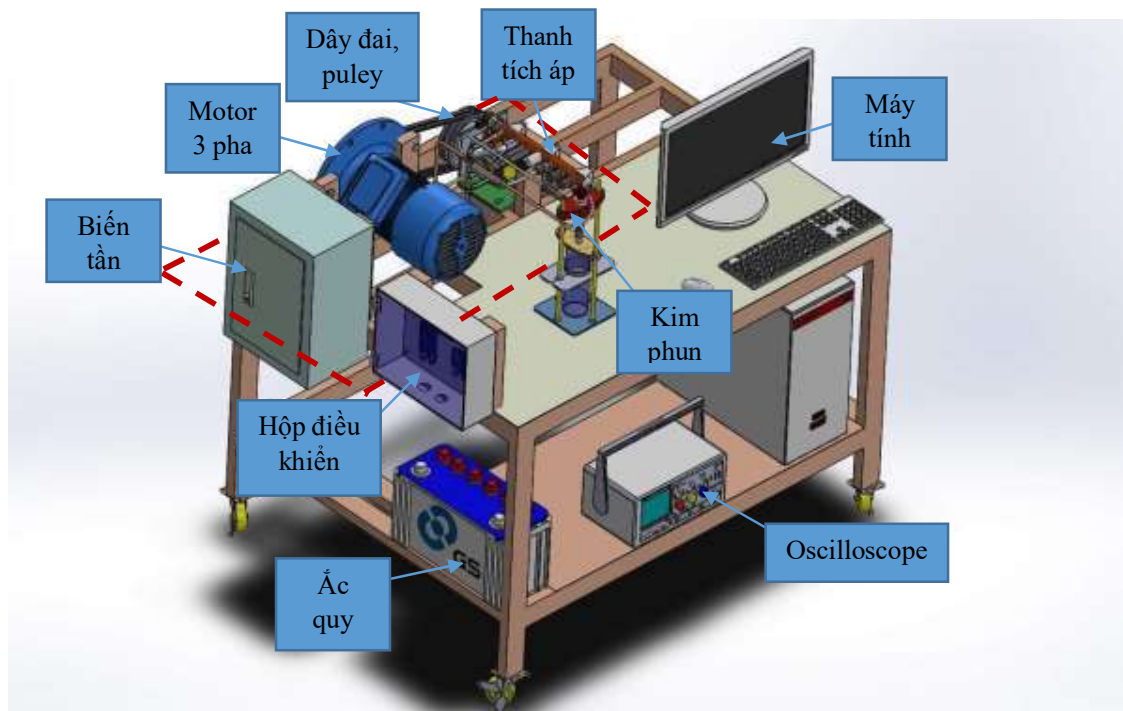
Bảng 2 trình bày các thông số thí nghiệm của nghiên cứu này. Nhiên liệu được sử dụng để kiểm tra hệ thống là dầu diesel thương mại ngoài thị trường để có tính chất phù hợp điều kiện hoạt động thực tế của hệ thống common- rail. Dây áp suất điều khiển là từ 0bar tới 1600bar. Tại mỗi điều kiện cung cấp áp suất của hệ thống, thí nghiệm được lặp lại 20 lần để thu thập dữ liệu phân tích và so sánh tính hoạt động ổn định của hệ thống.

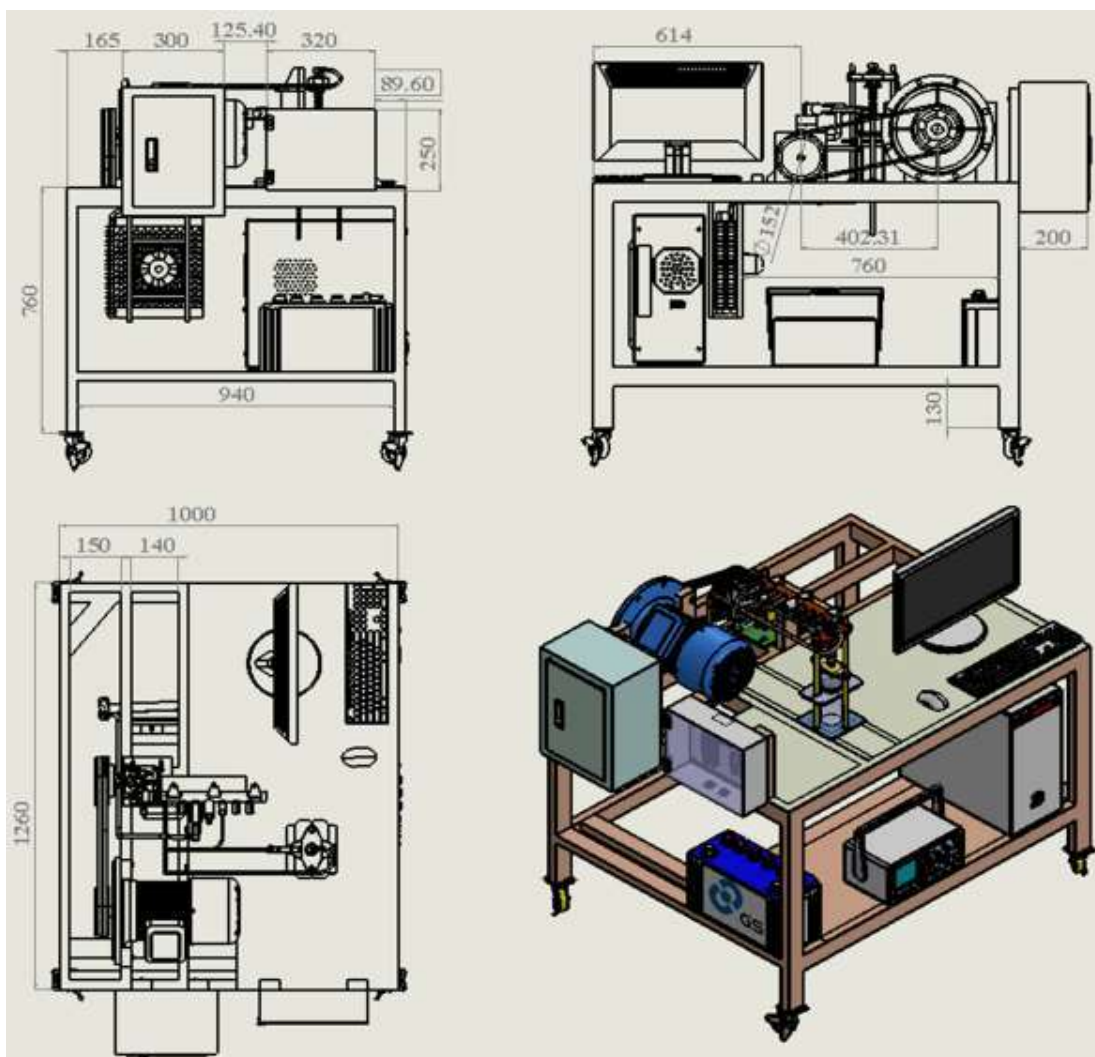
Bảng 2: Thông số thí nghiệm

Thông số	Giá trị
Nhiên liệu sử dụng	Diesel thương mại
Áp suất điều khiển	0 đến 1600 bar
Điện áp cấp vào mạch điện	12V DC
Điện áp cấp cho biến tần	220V AC
Số lần đo	20 lần

## 4 KẾT QUẢ

### 4.1. Thiết kế hệ thống





Hình 5: Bản vẽ kích thước 2D

Hình 4: Mô hình thiết kế 3D của hệ thống

Hình 4 trình bày hình ảnh thiết kế 3D của hệ thống thí nghiệm trước khi chế tạo. Mục đích của thiết kế nhằm tăng tính chính xác của hệ thống khi chế tạo cũng như tạo hình ảnh tổng quan của hệ thống, cách bố trí, sắp xếp các bộ phận, lên danh mục các chi tiết cần tính toán. Từ thiết kế 3D, hệ thống sau chế tạo có khả năng linh hoạt chuyển động trong các khu vực.

Hình 5 trình bày bản vẽ 2D của hệ thống với các kích thước cụ thể (mm). Từ hình 5 ta thấy rằng hệ thống được thiết kế nhỏ gọn, phù hợp với các không gian làm việc nhỏ hẹp. Ngoài ra bản vẽ chỉ ra khoảng cách lắp đặt tương quan giữa các chi tiết.

Hình 6 là chế tạo hệ thống thực tế từ bản vẽ thiết kế 3D. Hệ thống được chế tạo đáp ứng đầy đủ các yêu cầu kỹ thuật từ thiết kế với đặc tính nhỏ gọn, linh hoạt.

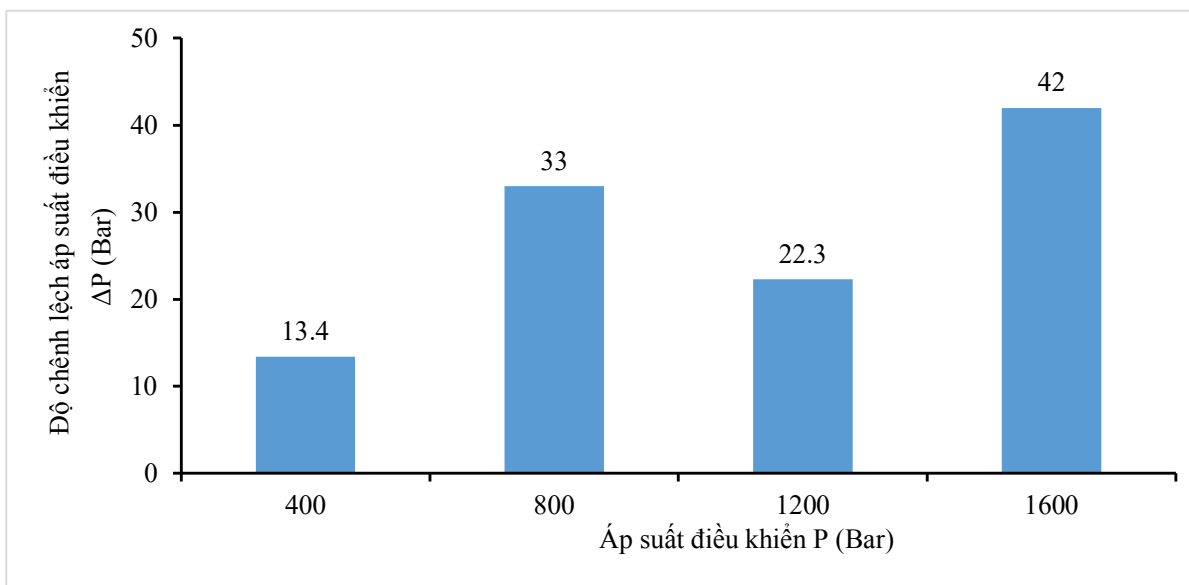
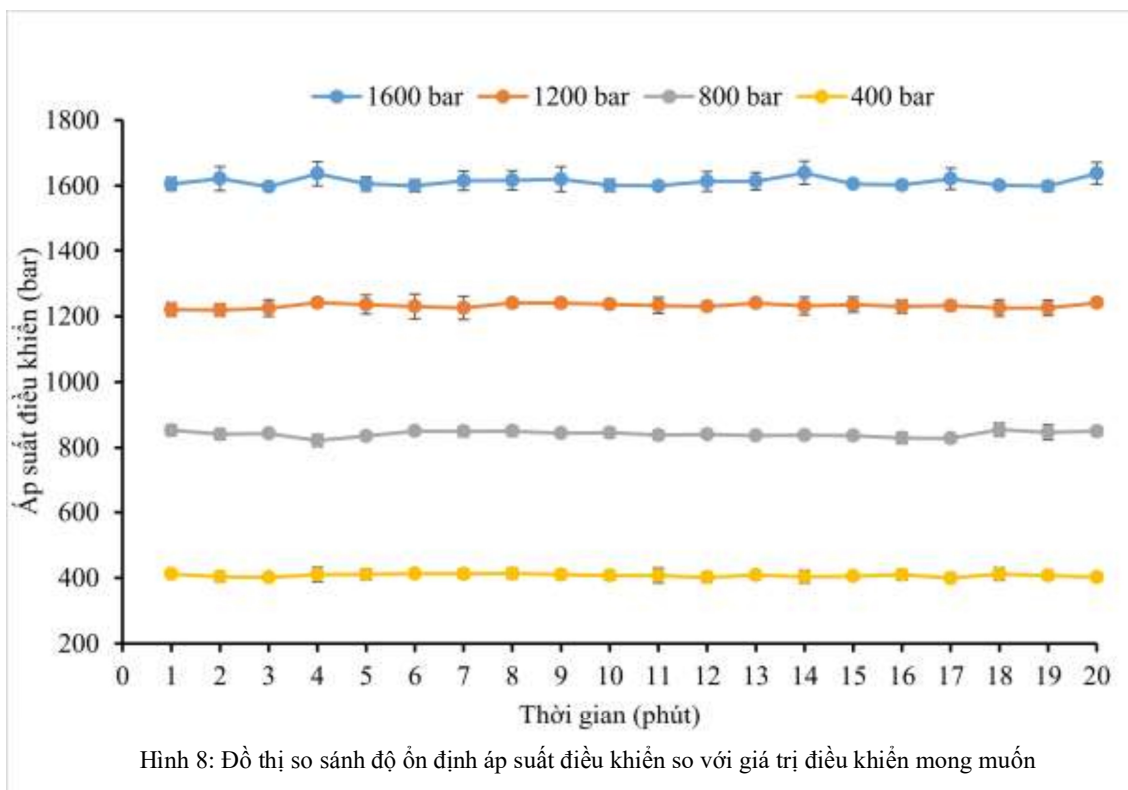




Hình 6: Hệ thống thí nghiệm được chế tạo thực tế thực tế

#### 4.2. **Mối tương quan giữa tính toán lí thuyết và thực tế điều khiển bơm cao áp**

Hình 7 trình bày biểu đồ so sánh độ ổn định áp suất điều khiển, với số lần lặp lại tại mỗi giá trị áp suất là 20 lần đo tương ứng với 20 phút (với 1 lần đo là giá trị áp suất trung bình trong 1 phút) và đồ thị 8 hiển thị độ lệch áp suất trung bình so với áp suất điều khiển mong muốn. Trong hình 7, tại một điểm áp suất là giá trị áp suất trung bình đo trong 1 phút, trong 1 phút tín hiệu điện áp từ cảm biến áp suất được gửi liên tục về máy tính sau đó sử dụng hàm quy đổi giá trị điện áp thành giá trị áp suất, như vậy để đánh giá độ ổn định điều khiển của áp suất mong muốn, thí nghiệm thu thập kết quả của 20 lần đo. Tương tự với các giá trị áp suất khác ta được biểu đồ dao động áp suất. Nhìn chung từ đồ thị 7, kết quả thí nghiệm cho thấy sự hoạt động ổn định của hệ thống cung cấp áp suất nhiên liệu cao áp, sai số của giá trị đo nhỏ hơn 3%. Hình 8 cung cấp rõ hơn giá trị áp suất chênh lệch so với giá trị áp suất chuẩn cần điều khiển (ví dụ 400bar, 800bar, 1200bar, 1600bar), độ sai lệch giá trị áp suất nhỏ hơn 50 bar với giá trị áp suất điều khiển trên 1000bar. Bảng 3 thể hiện độ chênh lệch giữa áp suất đo thực tế so với áp suất điều khiển.



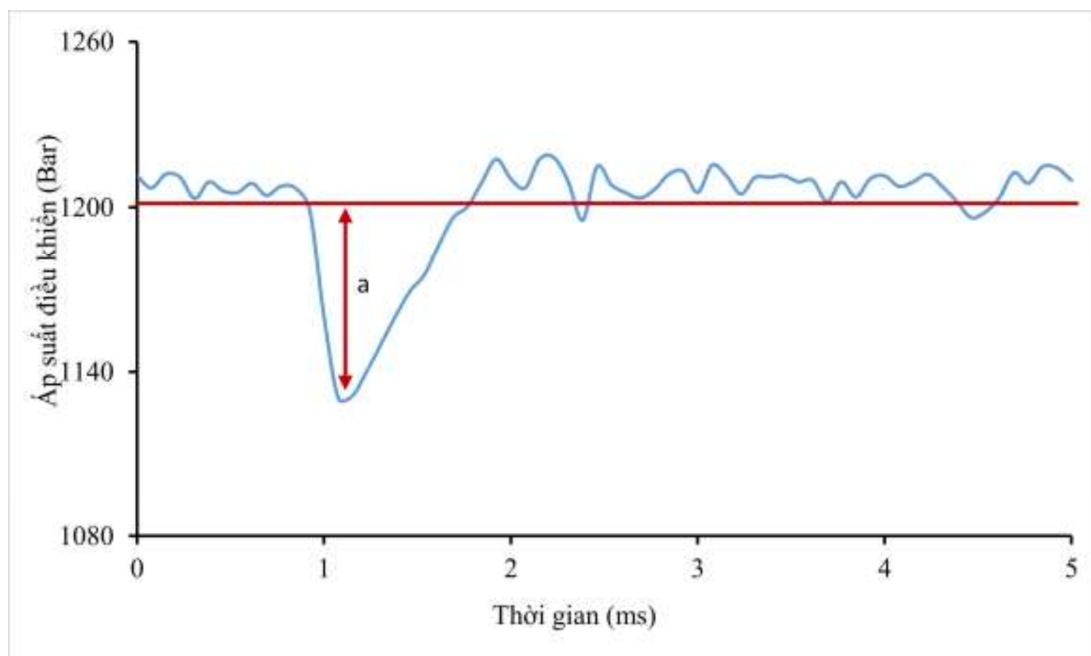
Hình 7: Sơ Biểu đồ dao động áp suất ở các áp suất đo khác nhau



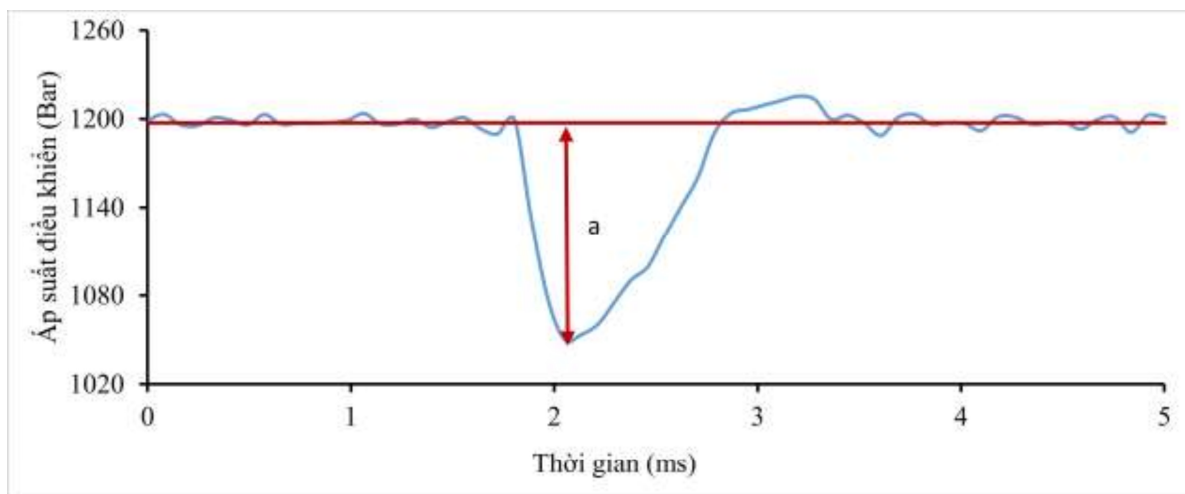
Bảng 3: Độ chênh lệch giữa áp suất đo thực tế so với áp suất điều khiển

Áp suất điều khiển ( $\Delta 1$ , bar)	Áp suất đo thực tế ( $\Delta 2$ , bar)	Độ chênh lệch áp suất ( $\Delta 2 - \Delta 1$ , bar)
400	413,4	<b>13,4</b>
800	833	<b>33</b>
1200	1222,3	<b>22,3</b>
1600	1642	<b>42</b>

Hình 9 hiển thị độ sụt giảm áp suất khi phun nhiên liệu ở chế độ phun 1 lần với áp suất phun là 1200bar. Trên đồ thị, đường a là độ giảm áp suất cực đại khi phun so sánh với giá trị áp suất điều khiển (1200bar). áp suất giảm từ 1200bar xuống 1130bar, áp suất sau đó đã được phục hồi lên lại 1200bar trong khoảng 1 ms. Tương tự hình 9, hình 10 cũng cho thấy sự sụt giảm áp suất khi phun nhiên liệu ở chế độ phun 3 lần (giả lập chế độ phun môi - phun chính - phun trễ của hệ thống nhiên liệu common-rail) từ 1200bar xuống 1050bar, áp suất sau đó đã được đưa lên lại 1200bar trong khoảng 1.3ms. Các tín hiệu thời gian đo được ghi nhận bởi thiết bị đo xung oscilloscope. Sự sụt giảm áp suất càng tăng sẽ ảnh hưởng đến độ dao động áp suất nhiên liệu ở khu vực chứa nhiên liệu áp suất nén bên trong kim phun và làm giảm thời gian nâng đốt kim (needle lift). Điều này sẽ tác động đến chế độ phun nhiều lần như đã được đánh giá từ các nghiên cứu của Junxing Hou và ctg. (2014) [17], Stefano Ubertini (2005) [18]. Nhìn chung, kết quả này phù hợp với các nghiên cứu khác và cho thấy hệ thống đáp ứng được áp suất mong muốn một cách nhanh chóng ở các chế độ phun khác nhau.



Hình 9: Độ sụt giảm áp suất khu phun ở chế độ phun 1 lần



Hình 10. Độ sụt giảm áp suất khu phun ở chế độ phun 3 lần

## 5 KẾT LUẬN

Nghiên cứu chế tạo hệ thống điều khiển linh hoạt áp suất phun trong dãy áp suất điều khiển từ 400bar đến 1600bar mô phỏng áp suất cung cấp của hệ thống common rail với các kết luận như sau:

- Hệ thống được xây dựng với khả năng di chuyển linh hoạt trong khu vực làm việc.
- Hệ thống điều khiển áp suất chính xác trong dãy áp suất từ 400bar đến 1600bar với biên độ dao động nhỏ hơn 50bar và sai số nhỏ hơn 3%.
- Hệ thống có khả năng đáp ứng đủ áp suất một cách nhanh chóng sau khi phun nhiên liệu (một lần, nhiều lần).

## LỜI CẢM ƠN

Công trình nghiên cứu này được thực hiện từ kinh phí được cấp từ trường Đại Học Công Nghiệp TPHCM, mã số đề tài 19.1ĐL01.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Sydbom, A. Blomberg, S. Parnia, N. Stenfors, T. Sandström, S-E. Dahlén, Health effects of diesel exhaust emissions, *European Respiratory Journal*, vol. 17(4), pp.733-46, 2001.
- [2] F. Tschanz, A. Amstutz, C. H. Onder, L. Guzzella, A Real-Time Soot Model for Emission Control of a Diesel Engine, *IFAC proceedings volumes*, vol. 43(7), pp.222-227, 2010.
- [3] R. Ali, Effect of Diesel Emissions on Human Health: A Review, *International Journal of Applied Engineering Research*, ISSN 0973-4562, vol. 6(11), 2013.
- [4] J. Liu, A. Yao, C. Yao, Effects of diesel injection pressure on the performance and emission of a HD common-rail diesel engine fueled with diesel/methanol dual fuel, *Fuel*, vol.140, pp. 192-200, 2014.
- [5] C.S. Aalam, C.G.Saravanan, Effects of Fuel Injection Pressure on CRDI Diesel Engine Performance and Emissions using CCD, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol.2(05), 2015.
- [6] M. R. Herfatmanesh, Z. Peng, A. Ihracska, Y. Lin, L. Lu, C. Zhang, *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8(5), 2016.

- [7] H. Viswanath, A. Kumarasamy, J. Samuel, Effect of injection pressure on engine parameters of a high-power density heavy duty diesel engine for armored fighting vehicles, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 402(1), 2018.
- [8] J. Dernet, C. Hespel, F. Foucher, S. Houillé, C. Mounaim-Rousselle, Influence of physical fuel properties on the injection rate in a Diesel injector, *Fuel*, vol. 96, pp. 153-160, 2011.
- [9] S. Pai, A. Sharief, B. Shreeprakash, Study of the effect of fuel injection pressure on diesel engine performance and emission-a review, *IEEE - International Conference on Research and Development Prospectus on Engineering and Technology*, Vol 1, pp.221-226, 2013.
- [10] T. Shimada, T. Shoji and Y. Takeda, The effect of Fuel Injection Pressure on Diesel Engine Performance, *SAE Technical Paper 891919*, 1989.
- [11] S. V. Channapattana, A. A. Pawar, P. G. Kamble, Effect of Injection Pressure on the Performance and Emission Characteristics of VCR engine using Honne Biodiesel as a Fuel, *Materials Today: Proceedings*, vol. 2(4-5), pp.1316 – 1325, 2015.
- [12] V.S.Hariharan, K. Vijayakumar Reddy, Effect of injection pressure on diesel engine performance with Sea lemon oil, *Indian Journal of Science and Technology* ,Vol. 4, No.8, 2011, pp.907 – 909.
- [13] T. Lähde, T. Rönkkö, M. Happonen, C. Söderström, A. Virtanen, A. Solla, M. Kytö, D. Rothe, and J. Keskinen, Effect of Fuel Injection Pressure on a Heavy-Duty Diesel Engine Nonvolatile Particle Emission, *Environmental Science & Technology*, vol. 45, pp.2504 – 2509, 2011.
- [14] Z. Xu, X. Li, C. Guan & Z. Huang, Effects of Injection Pressure on Diesel Engine Particle Physico-Chemical Properties, *Aerosol Science and Technology*, Vol 48(2), pp.128 – 138, 2014.
- [15] T. J. Okkema, Design and implementation of a mobile test cell. *Master's Thesis, Michigan Technological University*, 2015.
- [16] COMMON RAIL SYSTEM (CRS) SERVICE MANUAL: General Edition, *Denso Corporation*, 2007.
- [17] J. Hou, Z. Wen, Y. Liu, Z. Jiang, Experimental study on the injection characteristics of dimethyl ether–biodiesel blends in a common-rail injection system. *Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part D: J. Automobile Engineering*, vol. 228(3), pp. 263–271, 2014.
- [18] S. Ubertini, Injection Pressure Fluctuations Model Applied to a Multidimensional Code for Diesel Engines Simulation, *ASME 7th Biennial Conf. Engineering Systems Design and Analysis*, pp. 437–445, 2008.

Ngày nhận bài: 12/09/2019  
Ngày chấp nhận đăng: 17/02/2020