

# TỰ ĐỘNG ĐIỀU CHỈNH HỆ SỐ TƯƠNG ĐƯƠNG VÀ GÓC ĐÁNH LỬA SỚM CỦA ĐỘNG CƠ TĨNH TẠI ĐÁNH LỬA CƯỜNG BỨC PHUN NHIÊN LIỆU KHÍ TÁI TẠO

## AUTOMATIC CONTROL EQUIVALENCERATIO AND ADVANCE IGNITION ANGLE OF RENEWABLE GASEOUS FUEL PORT INJECTION SI STATIONARY ENGINE

Bùi Thị Minh Tú<sup>1\*</sup>, Bùi Văn Ga<sup>2</sup>, Cao Xuân Tuấn<sup>2</sup>, Trương Lê Bích Trâm<sup>2</sup>, Võ Anh Vũ<sup>1</sup>, Bùi Văn Hùng<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

<sup>2</sup>Đại học Đà Nẵng

<sup>3</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng

\*Tác giả liên hệ: btmtu@dut.udn.vn

(Nhận bài: 19/01/2022; Chấp nhận đăng: 11/3/2022)

**Tóm tắt** - Động cơ tĩnh tại đánh lửa cưỡng bức truyền thống có thể chuyển đổi thành động cơ sử dụng nhiên liệu khí linh hoạt nhờ hệ thống điều khiển điện tử gồm một cảm biến duy nhất làm mốc xác định thời điểm đánh lửa và ECU đơn giản. Góc đánh lửa sớm và thời gian phun nhiên liệu được điều chỉnh theo thành phần nhiên liệu và chế độ tải trên đường đặc tính điều tốc. Thời gian phun nhiên liệu phụ thuộc vào độ mở bướm ga theo hàm số sin. Độ lệch giữa thời gian phun thực nghiệm và lý thuyết khoảng 8% ở áp suất phun 1,2 bar và 5% ở áp suất phun 0,6 bar. Cùng điều kiện vận hành, khi pha hydrogen hay syngas vào biogas thì góc đánh lửa sớm giảm và giới hạn cháy mở rộng. Góc đánh lửa sớm tối ưu của động cơ Honda GX200 chạy bằng LPG tăng từ 12,2°TK lên 22,4°TK khi tốc độ động cơ tăng từ 1000 v/ph lên 3000 v/ph. Sau khi cải tạo, động cơ có thể đáp ứng yêu cầu của hệ thống năng lượng tái tạo lai biomass-năng lượng mặt trời.

**Từ khóa** - Nhiên liệu tái tạo; Biogas; Syngas; Hydrogen; Hệ thống năng lượng tái tạo lai

### 1. Giới thiệu

Xử lý chất thải trong sinh hoạt và sản xuất là vấn đề cấp bách ở nước ta hiện nay, đặc biệt ở khu vực nông thôn nơi có hơn 70% dân số đang sinh sống và hạ tầng xử lý chất thải còn rất thô sơ, ô nhiễm môi trường ngày càng trầm trọng. Lượng chất thải rắn sinh hoạt ở nước ta phát sinh trung bình khoảng 25,5 triệu tấn/năm. Trong đó, khu vực đô thị phát sinh khoảng 38 nghìn tấn/ngày, khu vực nông thôn phát sinh khoảng 32 nghìn tấn/ngày [1]. Ước tính lượng chất thải rắn sinh hoạt ở các đô thị phát sinh trên toàn quốc tăng trung bình 10÷16 % mỗi năm. Hiện, có 28,9% chất thải rắn được xử lý đốt hoặc sản xuất phân hữu cơ; 71,1% chôn lấp trực tiếp và 6% chôn sau khi đốt [2]. Các phương pháp truyền thống này không xử lý được triệt để chất thải rắn, sử dụng nhiều quỹ đất, gây ảnh hưởng đến không khí nguồn nước ngầm... [3].

Thu hồi năng lượng từ rác bằng cách chuyển chúng thành nhiên liệu là giải pháp công nghệ nhiên liệu sinh học mới. Theo Luật Bảo vệ môi trường của nước ta có hiệu lực từ ngày 01-01-2022 thì người dân phải phân loại rác tại nguồn. Luật này ra đời tạo điều kiện ứng dụng công nghệ chuyển hóa rác thành năng lượng để xử lý triệt để chất thải

**Abstract** - The traditional spark ignition stationary engine can be converted into a flexible gas-fueled engine thanks to an electronic control system consisting of a single sensor for ignition timing control and a simple ECU. The advance ignition angle and fuel injection time are adjusted according to the fuel composition and load mode base on the speed regulation characteristic. The fuel injection time depends on the throttle opening position according to a sine function. The deviation between experimental and theoretical injection time is about 8% at 1.2 bar injection pressure and 5% at 0.6 bar injection pressure. Under the same operating conditions, when adding hydrogen or syngas into biogas, the optimal advance ignition angle is reduced and the combustion limit is expanded. The optimal advance ignition angle of the Honda GX200 engine fueled with LPG increases from 12.2°C to 22.4°C when the engine speed increases from 1000 rpm to 3000 rpm. After the conversion, the engine can meet the requirements of the biomass-solar hybrid renewable energy system.

**Key words** - Renewable fuel; Biogas; Syngas; Hydrogen; Hybrid Renewable Energy System

rắn. Khi rác đã được phân loại cơ bản thì những chất hữu cơ dễ phân hủy có thể được sử dụng để sản xuất biogas. Đối với phần lớn các thành phần còn lại có thể khí hóa thành syngas thông qua sản xuất viên nhiên liệu nén RDF. Công nghệ này ngày càng thể hiện tính ưu việt trong xử lý chất thải rắn sinh hoạt [4, 5]. Mật độ cao của RDF giúp cho sự lưu trữ, vận chuyển chúng đến nơi sử dụng dễ dàng hơn, đồng thời nó làm tăng tính đồng nhất của nhiên liệu trong quá trình chuyển hóa năng lượng.

Ứng dụng biogas trên động cơ đốt trong đã được giới thiệu trong nhiều công trình đã công bố [6-8]. CO<sub>2</sub> trong biogas làm giảm nhiệt trị và tốc độ cháy nhiên liệu. Do đó, hệ thống cung cấp nhiên liệu và góc đánh lửa sớm của động cơ cần phải thay đổi theo thành phần biogas sử dụng. Về ứng dụng syngas trên động cơ đốt trong, các nghiên cứu gần đây cho thấy, cần lưu ý 2 vấn đề phát sinh liên quan đến tạp chất trong syngas và sự tụt giảm công suất động cơ do nhiệt trị nhiên liệu thấp. So với ứng dụng syngas trên turbine khí thì việc ứng dụng nhiên liệu này trên động cơ đốt trong phù hợp hơn do mức độ yêu cầu về tạp chất trong nhiên liệu ít khác khe hơn [9, 10]. Thành phần thể tích của syngas khi sử dụng không khí làm chất ô xy hóa thường 18-20% H<sub>2</sub>, 18-20%

<sup>1</sup> The University of Danang - University of Science and Technology (Bui Thi Minh Tu, Vo Anh Vu)

<sup>2</sup> The University of Danang (Bui Van Ga, Cao Xuan Tuan, Truong Le Bich Tram)

<sup>3</sup> The University of Danang - University of Technology and Education (Bui Van Hung)

CO, 2% CH<sub>4</sub>, 11-13% CO<sub>2</sub>, một ít H<sub>2</sub>O, còn lại là N<sub>2</sub> [11]. Nhiệt trị thấp của syngas thông thường trong khoảng 4-6 MJ/kg [9], chỉ bằng khoảng 10% nhiệt trị của khí thiên nhiên, LPG hay xăng dầu. Tuy nhiên, do lượng không khí cần thiết để đốt cháy một đơn vị khối lượng syngas cũng chỉ bằng 10% các loại nhiên liệu truyền thống nên việc tận giảm công suất động cơ không tỉ lệ với nhiệt trị nhiên liệu. Thực tế cho thấy, khi chạy bằng syngas công suất động cơ giảm khoảng 15%-20% so với động cơ diesel và giảm 30%-40% so với động cơ xăng [12]. So với phương pháp đốt cháy cùng một khối lượng biomass thì phương pháp khí hóa có mức độ phát thải CO, S, NO<sub>x</sub> thấp hơn [10].

Việc ứng dụng nhiên liệu khí nói chung và biogas, syngas để chạy động cơ đốt trong đã được phát triển ở nước ta từ rất sớm. Những năm đầu thập niên 1980 của thế kỷ trước do thiếu nhiên liệu xăng dầu truyền thống nên chúng ta đã sử dụng syngas để chạy ô tô và kéo máy công tác. Ứng dụng biogas để chạy máy phát điện được nhiều tác giả thực hiện trong thực tế [13, 14]. Tuy nhiên, các ứng dụng này dừng lại ở mức áp dụng những kinh nghiệm thực tiễn cá nhân, chưa phải là những nghiên cứu khoa học bài bản để ngày càng nâng cao chất lượng và hoàn thiện sản phẩm. Nhóm nghiên cứu của Bùi Văn Ga, Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng đã bắt đầu nghiên cứu động cơ sử dụng nhiên liệu khí từ những năm 1990 [15]. Những kết quả nghiên cứu về nhiên liệu LPG đã được ứng dụng trên xe gắn, ô tô [16, 17]. Qua nhiều năm nghiên cứu chuyên sâu, nhóm đã hoàn thiện dần sản phẩm và làm chủ công nghệ cải tạo động cơ truyền thống sang chạy bằng biogas [18, 19]. Các kết quả nghiên cứu đã được phát triển để ứng dụng hỗn hợp biogas và hydrogen hay HHO [20, 21].

Việc sử dụng đơn lẻ biogas, syngas hay bất kỳ một loại năng lượng tái tạo nào có nguồn gốc từ năng lượng mặt trời cũng có bất cập cơ bản là sự dao động ngẫu nhiên của nguồn năng lượng. Sự thay đổi thất thường về công suất năng lượng tái tạo phụ thuộc thời tiết, khí hậu... khó có thể lường trước. Vì vậy hệ thống năng lượng tái tạo thường đi kèm với hệ thống lưu trữ năng lượng rất tốn kém và phức tạp. Để khắc phục bất cập này người ta phát triển hệ thống năng lượng tái tạo hybrid [22]. Hệ thống năng lượng hybrid sử dụng nhiều nguồn năng lượng khác nhau để hỗ trợ, bù công suất, giúp cho hệ thống năng lượng ổn định. Ở các nước vùng nhiệt đới sản xuất nông nghiệp thì năng lượng mặt trời và biomass có nhiều lợi thế. Sử dụng hydrogen nhận được từ điện phân nước, biogas ủ từ các chất hữu cơ dễ phân hủy và syngas từ khí hóa chất thải rắn như đã nêu trên đây để phát điện có thể xem là giải pháp hữu hiệu để phát triển ứng dụng năng lượng tái tạo ở nước ta.

Do thành phần của hỗn hợp nhiên liệu biogas-syngas-hydrogen thay đổi trong phạm vi rộng nên động cơ cần được điều chỉnh một cách linh hoạt để đảm bảo hiệu quả công tác. Hai thông số chính cần điều chỉnh là hệ số tương đương và góc đánh lửa sớm. Các thông số này thay đổi theo điều kiện vận hành của động cơ và thành phần nhiên liệu. Các loại động cơ tĩnh tại truyền thống được thiết kế tối ưu cho một loại nhiên liệu nhất định không phù hợp trong điều kiện vận hành của hệ thống năng lượng tái tạo lai. Trong công trình này, nhóm tác giả trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm cải tạo động cơ tĩnh tại đánh lửa cưỡng bức

truyền thống thành động cơ tĩnh tại điều khiển điện tử có thể sử dụng nhiên liệu khí tái tạo một cách linh hoạt.

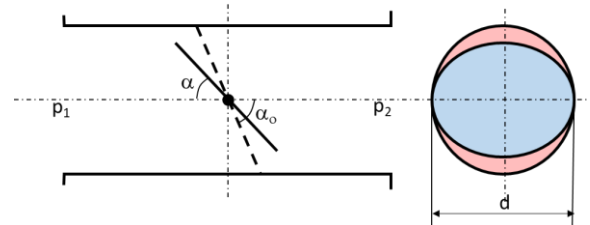
## 2. Ảnh hưởng của nhiên liệu đến hệ số tương đương và tốc độ cháy

### 2.1. Quan hệ giữa lưu lượng không khí và lưu lượng nhiên liệu

Bảng 1 giới thiệu tỉ lệ không khí/ nhiên liệu tính theo khối lượng và tính theo mol ứng với điều kiện cháy hoàn toàn lý thuyết ( $\phi=1$ ). LPG có tỉ lệ không khí/ nhiên liệu cao nhất trong các loại nhiên liệu nghiên cứu trong công trình này. Syngas có tỉ lệ không khí/nhiên liệu bé nhất. Tỉ lệ không khí/ nhiên liệu ảnh hưởng trực tiếp đến các thông số của hệ thống phun.

**Bảng 1.** Các loại nhiên liệu sử dụng trong nghiên cứu

Nhiên liệu	Ký hiệu (theo % mol)	M <sub>nl</sub> (g/mol)	m <sub>kk</sub> /m <sub>nl</sub> (kg/kg)	V <sub>kk</sub> /V <sub>nl</sub> (mol/mol)
H	100H <sub>2</sub>	2	34,78	2,4
CH <sub>4</sub>	100CH <sub>4</sub>	16	17,39	9,52
LPG	50C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> -50C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	51	15,69	27,59
B1	60CH <sub>4</sub> -40CO <sub>2</sub>	27,2	6,14	5,76
B2	70CH <sub>4</sub> -30CO <sub>2</sub>	24,4	7,98	6,71
B3	80CH <sub>4</sub> -20CO <sub>2</sub>	21,6	10,31	7,68
S1	25CO-10CH <sub>4</sub> -8H <sub>2</sub> -5CO <sub>2</sub> -52N <sub>2</sub>	25,52	2	1,76
S2	20CO-12CH <sub>4</sub> -10H <sub>4</sub> -8CO <sub>2</sub> -50N <sub>2</sub>	25,24	2,15	1,87
S3	15CO-18CH <sub>4</sub> -12H <sub>2</sub> -10CO <sub>2</sub> -45N <sub>2</sub>	24,32	2,83	2,37
HH1	50B1-30S1-20H	21,66	5,2	3,88
HH2	40B2-50S2-10H	22,58	4,96	3,86
HH3	30B3-60S3-10H	21,27	5,41	3,97



**Hình 1.** Sơ đồ tiết diện lưu thông trên đường nạp qua bướm ga

Hình 1 giới thiệu sơ đồ tiết diện lưu thông trên đường nạp khí thay đổi vị trí bướm ga. Góc đóng bướm ga thay đổi từ 0° (bướm ga mở hoàn toàn) đến 60° (bướm ga đóng hoàn toàn). Tiết diện lưu thông của dòng khí có thể được xem là hiệu số tiết diện hình tròn và hình elip của bướm ga chiếu lên mặt phẳng vuông góc với trục đường nạp.

Diện tích lưu thông qua bướm ga theo sơ đồ Hình 1 được tính toán như sau:

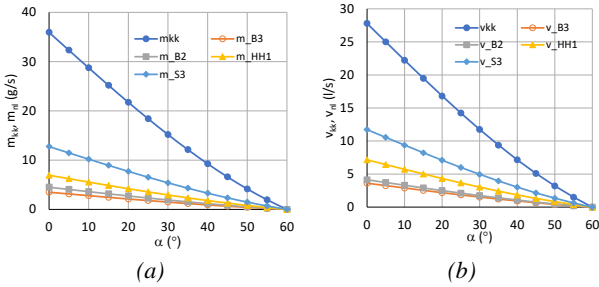
$$S(\alpha) = \frac{\pi d_{\text{nạp}}^2}{4} \left( 1 - \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_0} \right) \quad (1)$$

Bỏ qua các yếu tố ảnh hưởng đến dòng chảy, lưu lượng không khí đi qua bướm ga được đơn giản hóa như sau:

$$m_{\text{kk}}(\alpha) = S(\alpha) \sqrt{2\rho_{\text{kk}}(p_1 - p_2)} \quad (2)$$

Trong các biểu thức trên, S là tiết diện lưu thông qua bướm ga,  $d_{\text{nạp}}$  là đường kính đường nạp,  $\alpha$  là góc giữa

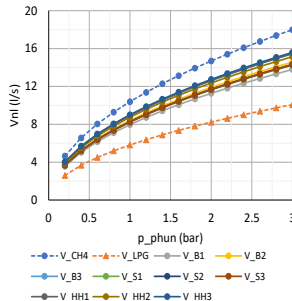
bướm ga và mặt phẳng tạo nên bởi trục quay của bướm ga và trục đường nạp.



**Hình 2.** Biến thiên lưu lượng không khí và lưu lượng nhiên liệu theo góc đóng bướm ga để đảm bảo  $\phi=1$  (a: lưu lượng khối lượng, b: lưu lượng thể tích)

Hình 2a và Hình 2b biểu diễn biến thiên của lưu lượng không khí, lưu lượng nhiên liệu theo góc đóng  $\alpha$  của bướm ga tính theo khối lượng và tính theo thể tích. 4 loại nhiên liệu được thể hiện trên hình vẽ gồm biogas B2, B3, syngas S3 và hỗn hợp nhiên liệu HH1. Lưu lượng không khí được tính theo biểu thức (2). Lưu lượng nhiên liệu được xác định theo mối quan hệ tương ứng cho ở Bảng 1. Tính toán được thực hiện trong điều kiện tiêu chuẩn với khối lượng riêng không khí  $\rho_{kk}=1,293\text{kg/m}^3$ , chênh lệch áp suất trung bình giả định  $\Delta p=1000\text{Pa}$  và đường kính ống nạp  $d_{\text{nạp}}=30\text{mm}$ . Chúng ta thấy biến thiên lưu lượng không khí, nhiên liệu giảm theo nhánh hình sin, giảm chậm khi bướm ga gần đóng hoàn toàn. Để đảm bảo điều kiện cháy hoàn toàn lý thuyết, lưu lượng syngas cao nhất trong 4 loại nhiên liệu được chọn.

Hình 3 biểu diễn biến thiên lưu lượng nhiên liệu ra khỏi vòi phun theo áp suất phun. Đường kính lưu thông của lỗ phun sử dụng trong tính toán là  $d_p = 5\text{mm}$ . Ta thấy, đường cong lưu lượng nhiên liệu ra khỏi vòi phun có dạng parabol. Lưu lượng tăng nhanh khi áp suất bé và tốc độ tăng giảm dần ở áp suất phun cao.



**Hình 3.** Biến thiên lưu lượng nhiên liệu ra khỏi vòi phun theo áp suất phun ( $d_p=5\text{mm}$ )

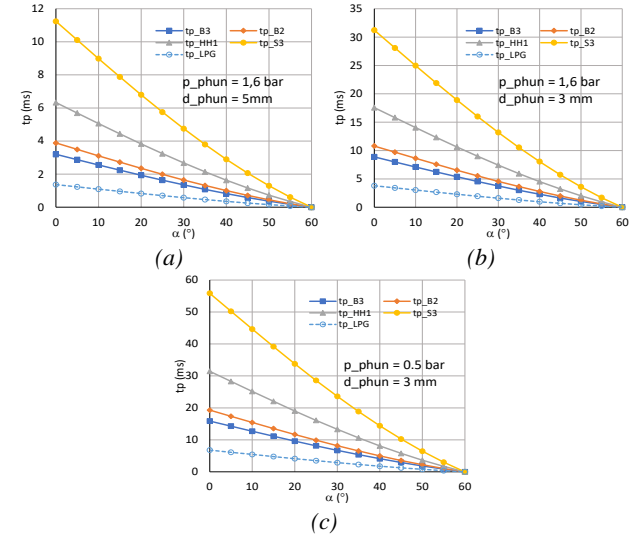
Cùng điều kiện phun thì lưu lượng  $\text{CH}_4$  cao nhất còn lưu lượng LPG thấp nhất trong các loại nhiên liệu nghiên cứu.

Hình 4a biểu diễn biến thiên thời gian phun theo góc đóng bướm ga  $\alpha$  ứng với 4 loại nhiên liệu khảo sát khi áp suất phun 1,6 bar, đường kính lưu thông vòi phun  $d_p=5\text{mm}$ . Chúng ta thấy, trong điều kiện này, thời gian mở vòi phun ứng với LPG quá bé, nhỏ hơn xung tối thiểu mở vòi phun. Ứng với các loại nhiên liệu còn lại thì vòi phun có thể đảm bảo được cung cấp nhiên liệu ở khu vực tải lớn.

Khi giảm đường kính lưu thông của vòi phun xuống còn 3mm (Hình 4b) thì thời gian mở vòi phun phù hợp với B2, B3, HH1. Đối với nhiên liệu S3 thời gian phun kéo dài vượt quá thời gian của kỳ nạp, do đó nhiên liệu được phun vào trong chu trình trước được lưu lại trên đường nạp để hút vào cùng với không khí mới ở chu trình tiếp theo.

Trên cơ sở lưu lượng không khí qua bướm ga, lưu lượng nhiên liệu qua vòi phun chúng ta có thể tính được thời gian phun theo góc đóng bướm ga  $\alpha$ . Tính toán được thực hiện với tốc độ động cơ 3000 v/ph. Thời gian kỳ nạp trong trường hợp này là 10ms (thời gian ứng với nửa vòng quay trục khuỷu).

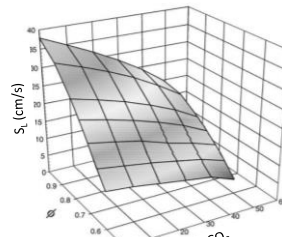
Khi giảm cả đường kính lưu thông của vòi phun và áp suất phun (Hình 4c) ( $d_p=3\text{mm}$ ,  $p_p = 0,5\text{ bar}$ ) thì thời gian phun tăng, phù hợp với LPG nhưng lại không phù hợp với các loại nhiên liệu còn lại do thời gian phun kéo dài. Trong trường hợp đó, có thể sử dụng vòi phun CNG có áp suất phun 5-10 bar hay vòi phun hydrogen có áp suất phun lên đến 14 bar.



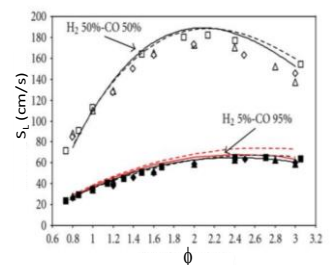
**Hình 4.** Biến thiên thời gian phun theo góc đóng bướm ga để đảm bảo  $\phi=1$  khi  $p_p=1,6\text{bar}$ ,  $d_p=5\text{mm}$  (a),  $p_p=1,6\text{bar}$ ,  $d_p=3\text{mm}$ (b) và  $p_p=0,5\text{bar}$ ,  $d_p=3\text{mm}$  (c)

Tuy nhiên, khi tăng áp suất phun chúng ta phải xử lý nhiều vấn đề liên quan đến lưu trữ nhiên liệu và an toàn. Do đó, giải pháp phun kéo dài có tính khả thi hơn.

**2.2. Tốc độ cháy chảy tầng**



**Hình 5.** Biến thiên tốc độ cháy chảy tầng theo hệ số tương đương  $\phi$  và thành phần  $\text{CO}_2$  trong hỗn hợp  $\text{CH}_4$  [23]



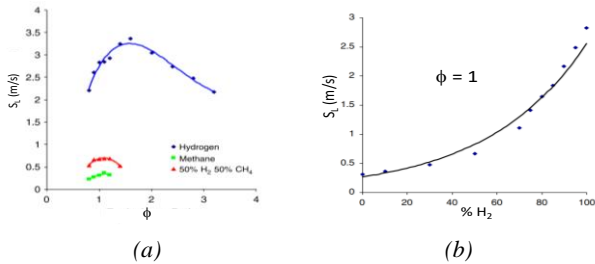
**Hình 6.** Biến thiên tốc độ cháy chảy tầng của hỗn hợp nhiên liệu  $\text{H}_2\text{-CO}$  theo hệ số tương đương [24]

Hình 5 giới thiệu ảnh hưởng của hàm lượng  $\text{CO}_2$  đến biến thiên tốc độ cháy chảy tầng của hỗn hợp  $\text{CH}_4\text{-CO}_2$  với không khí theo hệ số tương đương [23]. Chúng ta thấy tốc độ cháy đạt cực đại trong vùng hệ số tương đương cháy hoàn toàn lý thuyết. Khi hàm lượng  $\text{CO}_2$  tăng thì tốc độ cháy giảm rõ rệt.

Hình 6 cho thấy, hỗn hợp 95%  $\text{CO}$ -5%  $\text{H}_2$  có tốc độ cháy chảy tầng cực đại khoảng 60  $\text{cm/s}$  tại  $\phi=2,3$ . Với hỗn

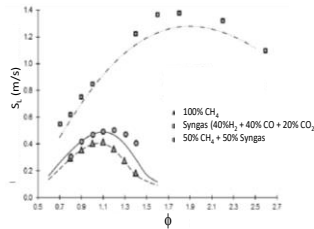
hợp 50% H<sub>2</sub>-50% CO tốc độ cháy tăng gấp đôi đạt khoảng 190 cm/s ứng với  $\phi = 2$  [24].

Kết quả nghiên cứu của Ilbas và cộng sự [25] cho thấy, tốc độ cháy tăng dần nhất của hydrogen khoảng 3,2 m/s ở  $\phi = 1,8$  trong khi đó tốc độ cháy tăng của methan khoảng 0,25 m/s ở  $\phi = 1,1$  (Hình 7a). Hydrogen có thể cháy trong phạm vi rất rộng  $\phi$  từ 0,8 đến 3,2 trong khi đó methan chỉ có thể cháy được trong phạm vi hẹp  $\phi$  từ 0,8 đến 1,2. Khi pha 50% hydrogen vào methan, tốc độ cháy cực đại đạt 0,8m/s và giới hạn cháy mở rộng đến  $\phi = 1,8$  (Hình 7b).



**Hình 7.** Tốc độ cháy tăng của hydrogen, methane (a) và ảnh hưởng của hàm lượng hydrogen đến tốc độ cháy tăng của hỗn hợp CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> (b) [25]

Tốc độ cháy tăng của syngas phụ thuộc vào thành phần H<sub>2</sub> trong nhiên liệu. Hình 8 giới thiệu tốc độ cháy tăng của hỗn hợp nhiên liệu biogas-syngas-hydrogen. Syngas chứa 40% H<sub>2</sub> + 40% CO + 20% CO<sub>2</sub>.



**Hình 8.** Tốc độ cháy tăng của biogas+syngas [26]

Nhờ thành phần hydrogen trong syngas, tốc độ cháy tăng của nhiên liệu được cải thiện đáng kể khi bổ sung syngas vào biogas nghèo [26].

Hỗn hợp nhiên liệu biogas-syngas-hydrogen có chứa các chất CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub> và các tạp chất CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>. Đối với các thành phần nhiên liệu trong hỗn hợp thì hydrogen có tốc độ cháy cao nhất nhưng nhiệt trị thể tích của nó thấp nhất. Ngược lại, CH<sub>4</sub> có tốc độ cháy thấp nhất nhưng nhiệt trị cao nhất. Trong biogas hay syngas, thành phần các chất khí trơ như CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> chiếm tỷ lệ lớn nên tốc độ cháy của hỗn hợp nhiên liệu giảm. Để nâng cao hiệu quả quá trình cháy chúng ta phải tăng góc đánh lửa sớm đối với nhiên liệu nghèo. Ngược lại, khi thành phần hydrogen tăng thì góc đánh lửa sớm tối ưu giảm. Việc điều chỉnh linh hoạt góc đánh lửa sớm theo thành phần nhiên liệu như vậy rất khó được thực hiện bằng hệ thống đánh lửa truyền thống.

Như vậy để chuyển đổi động cơ truyền thống thành động cơ có thể sử dụng nhiên liệu khí tái tạo phù hợp, chúng ta cần sử dụng công nghệ điều khiển điện tử để cung cấp nhiên liệu và điều chỉnh góc đánh lửa sớm. Đối với động cơ tĩnh tại, tốc độ động cơ chỉ thay đổi trong phạm vi rất hẹp vì thế chúng ta có thể bỏ qua ảnh hưởng của tốc độ đến quá trình cung cấp nhiên liệu hay điều chỉnh góc đánh lửa sớm. Do đó, các thông số này chỉ cần được điều chỉnh theo chế độ tải và thành phần nhiên liệu.

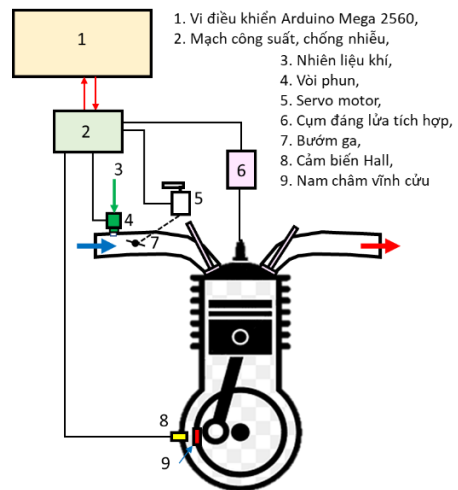
Trong các công trình trước đây, nhóm tác giả đã nghiên cứu cải tạo động cơ truyền thống thành động cơ điều khiển

điện tử. Trong các công trình này, ECU vạn năng APITECH và bộ cảm biến của xe gắn máy phun nhiên liệu đã được sử dụng [27-29]. Tuy động cơ có thể hoạt động được với các loại nhiên liệu khác nhau nhưng hệ thống phức tạp, không phù hợp với động cơ tĩnh tại. Như trên đã phân tích, động cơ tĩnh tại có tốc độ thay đổi trong phạm vi hẹp nên việc cung cấp nhiên liệu và góc đánh lửa sớm chỉ cần điều chỉnh trên đường đặc tính điều tốc.

### 3. Cải tạo động cơ

#### 3.1. Sơ đồ hệ thống cải tạo động cơ

Động cơ kéo máy phát điện Honda GX200 truyền thống được cải tạo thành động cơ phun nhiên liệu khí điều khiển điện tử. Sơ đồ hệ thống cung cấp nhiên liệu và điều chỉnh góc đánh lửa sớm động cơ được trình bày trên Hình 9.



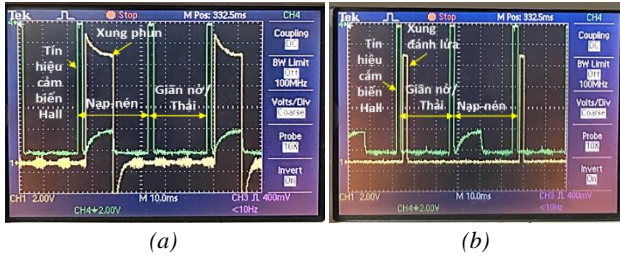
**Hình 9.** Sơ đồ cải tạo động cơ tĩnh tại đánh lửa cưỡng bức truyền thống thành động cơ tĩnh tại phun nhiên liệu khí điều khiển điện tử

Hệ thống điều khiển động cơ gồm: Cảm biến Hall 8 để làm mốc xác định thời điểm phun và thời điểm đánh lửa, đồng thời cũng cung cấp xung tín hiệu để xác định tốc độ động cơ; Vi điều khiển 1 là board mạch Arduino Mega 2560 được cài đặt chương trình điều khiển vòi phun 4, servo motor 5 và hệ thống đánh lửa 6. Giao tiếp giữa cảm biến 8 và các bộ phận 4, 5, 6 với vi điều khiển 1 thông qua mạch công suất và chống nhiễu 2.

Mạch 2 bảo vệ vi điều khiển, khử nhiễu phát sinh do tia lửa điện và do đóng mở vòi phun. Mạch này đóng vai trò quan trọng trong đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định và vi điều khiển không bị treo. Hệ thống chỉ sử dụng duy nhất một cảm biến Hall, loại bỏ các cảm biến khác sử dụng thông thường trên động cơ ô tô, xe gắn máy.

Nguyên lý hoạt động của hệ thống điều khiển động cơ như sau: Khi nam châm vĩnh cửu 9 gắn trên bánh đà quét qua cảm biến Hall 8 thì một xung điện phát sinh được gửi đến vi điều khiển 1 thông qua mạch công suất/ chống nhiễu 2. Xung tín hiệu được đưa vào chân số 3 của vi điều khiển. Chương trình cài đặt trong vi điều khiển sẽ xử lý tín hiệu, xác định độ rộng xung, loại bỏ các tín hiệu nhiễu ngẫu nhiên, tính tốc độ động cơ, đồng thời xác định thời điểm đánh lửa và thời điểm phun nhiên liệu. Vi điều khiển được kết nối với 3 biến trở: Biến trở thứ nhất kết nối với chân

A0 để điều khiển vị trí bướm ga thông qua servo motor 5; Biến trở thứ hai kết nối với chân A1 điều chỉnh thời gian mở vòi phun; Biến trở thứ ba kết nối với chân A2 điều chỉnh góc đánh lửa sớm. Trong quá trình thử nghiệm, tốc độ động cơ, độ mở bướm ga, thời gian mở vòi phun và góc đánh lửa sớm được hiển thị trên màn hình LCD.



Hình 10. Tín hiệu phun nhiên liệu (a) và tín hiệu đánh lửa (b) tương đối so với tín hiệu cảm biến Hall

Trong giai đoạn khởi động do động cơ hoạt động chưa ổn định chương trình cài đặt đánh lửa và phun mỗi vòng quay động cơ. Khi động cơ hoạt động ổn định thì vòi phun chỉ mở trong kỳ nạp và xung đánh lửa chỉ xuất hiện cuối kỳ nén (Hình 10a và Hình 10b).

### 3.2. Lắp đặt các bộ phận lên động cơ cải tạo

- Lắp cảm biến Hall: Là cảm biến công nghiệp, có vỏ inox, kín nước, chịu được rung, xóc. Trong thí nghiệm này 2 cảm biến Hall được sử dụng. Một cảm biến cho tín hiệu cách điểm chết trên (ĐCT)  $35^\circ\text{TK}$ , cảm biến còn lại phát tín hiệu ngay tại ĐCT. Cảm biến thứ hai chỉ dùng để kiểm tra vị trí đánh lửa so với ĐCT. Trong sử dụng không cần cảm biến này. Hai cảm biến được lắp trên đồ gá và bắt vào vị trí của bô-bine đánh lửa của động cơ đã tháo bỏ (Hình 11a).

- Lắp đặt servo motor: Servo motor làm nhiệm vụ điều khiển bướm ga. Nó được bắt chặt trên giá. Trục của servo motor được bắt vào càng gạt kết nối với bướm ga động cơ. Càng gạt quay từ  $0^\circ$  đến  $60^\circ$  tương ứng với vị trí bướm ga mở hoàn toàn và đóng hoàn toàn (Hình 11 b). Một biến trở kép được sử dụng để đồng thời điều khiển servo motor và cho giá trị độ mở tương ứng của bướm ga.

Khi vận hành, servo motor rất dễ bị nhiễu do tia lửa điện của nến đánh lửa. Vì vậy, trong mạch công suất - chống nhiễu cần có biện pháp đảm bảo cho servo motor hoạt động ổn định.

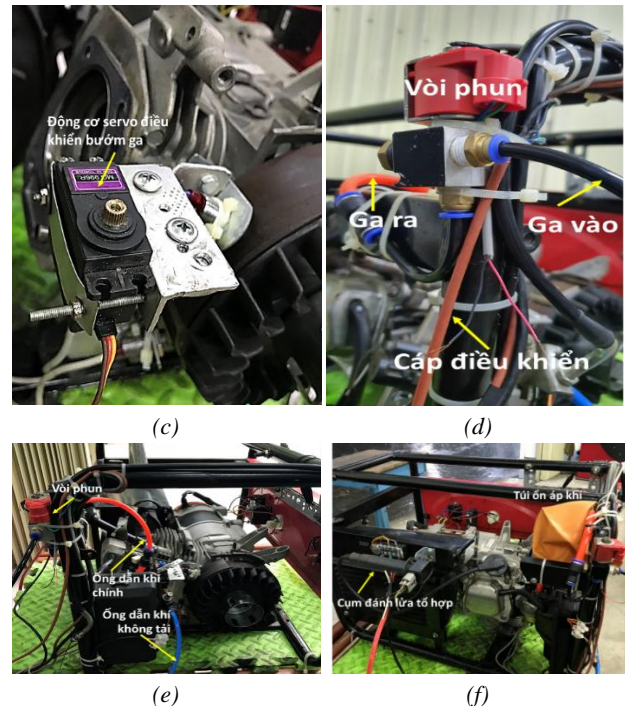
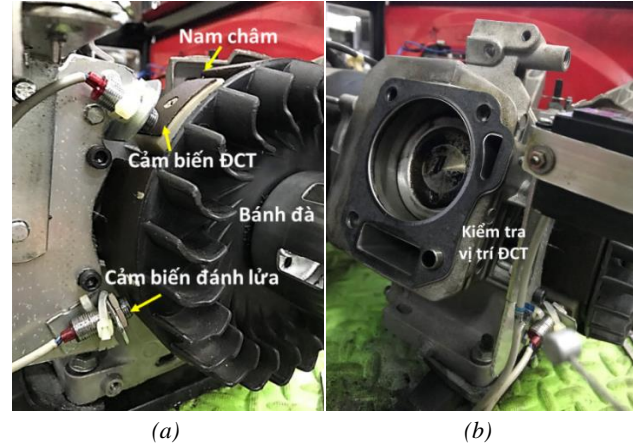
- Lắp đặt vòi phun: Vòi phun LPG sử dụng trên ô tô của hãng Valtek được sử dụng để cung cấp nhiên liệu khí cho động cơ cải tạo. Áp suất nhiên liệu khí làm việc có thể thay đổi từ 0,5 đến 2 bar. Áp suất cực đại 3 bar. Điện áp làm việc từ 10,8 đến 14,4 volts. Điện trở cuộn dây 5 ohms. Vòi phun được bắt chặt trên giá động cơ. Nhiên liệu khí từ bình chứa áp lực, sau khi giảm áp suất xuống đến mức phù hợp được dẫn đến vòi phun bằng ống ga vào. Nhiên liệu khí từ vòi phun được dẫn đến lỗ phun nhờ ống ga ra (Hình 11c). Do vòi phun không thể hoạt động khi độ rộng xung quá bé nên để đảm bảo cho động cơ hoạt động ổn định ở chế độ không tải chúng ta phải bổ sung thêm đường ống cấp ga không tải vào phía sau bướm ga (Hình 11d). Lưu lượng ga không tải được điều chỉnh bởi van khí chính tinh.

Trong thí nghiệm, để xác định lượng phun phù hợp ban đầu, nhiên liệu cung cấp vào đường nạp được phun gián tiếp qua một túi chứa. Quan sát hình dạng của túi chứa khí

chúng ta có thể biết được lượng nhiên liệu phun vào dư hay thiếu. Nhiên liệu khí cung cấp cho động cơ được mở, đóng nhờ van điện tử để đảm bảo an toàn khi vận hành.

- Lắp đặt cụm đánh lửa: Cụm đánh lửa tích hợp của ô tô được sử dụng để thay thế hệ thống đánh lửa cũ của động cơ. Toàn bộ hệ thống điều khiển, chuyển đổi điện áp 12 volts thành điện áp 25 kV để tạo tia lửa điện được tích hợp vào đầu chụp nên đánh lửa.

Để đảm bảo độ tin cậy của hệ thống khi làm việc, cụm đánh lửa được bắt chặt trên giá động cơ, đầu ra của cụm đánh lửa được dẫn đến nến đánh lửa bằng dây cao áp (Hình 11f). Cụm đánh lửa được cung cấp điện 12 volts. Dây điều khiển được kết nối vào mạch công suất - chống nhiễu của vi điều khiển.



Hình 11. Lắp đặt các bộ phận cải tạo động cơ

## 4. Nghiên cứu thực nghiệm

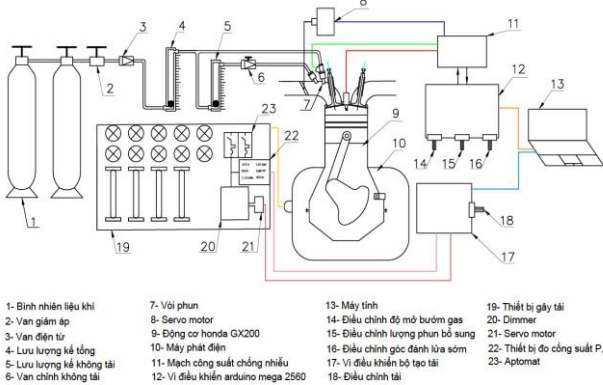
### 4.1. Bố trí hệ thống thí nghiệm

- Bộ tạo tải: Gồm 10 bóng đèn dây tóc, công suất mỗi bóng 100W và 4 bóng đèn halogen, công suất mỗi bóng 500W. Công suất tải cực đại 3 kW. Công suất tải được điều chỉnh bởi dimmer công suất cực đại 4 kW. Dimmer được

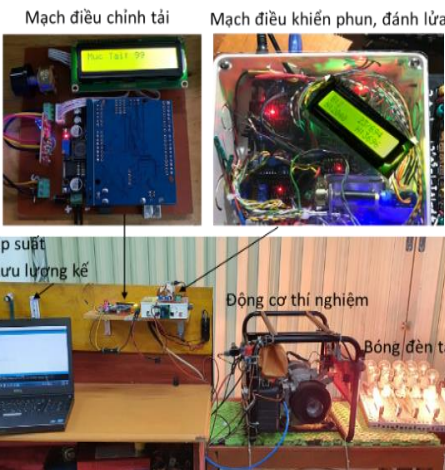
điều khiển bởi servo-motor thông qua bộ vi điều khiển.

- Bàn điều khiển: Gồm các hộp điều khiển động cơ, điều khiển tải, đóng/mở nhiên liệu khí, các bộ phận hiển thị thông số động cơ, tải điện và lưu lượng ga.

Hình 12 giới thiệu sơ đồ bố trí hệ thống thí nghiệm. Hình 13 là ảnh chụp toàn bộ hệ thống thí nghiệm.



Hình 12. Sơ đồ bố trí hệ thống thí nghiệm



Hình 13. Ảnh chụp hệ thống thí nghiệm

4.2. Trình tự thí nghiệm

Như đã trình bày ở phần giới thiệu, động cơ tĩnh tại làm việc ở chế độ tốc độ định mức nên việc xác định các thông số công tác cơ bản của động cơ cũng được thực hiện trong vùng tốc độ này. Trong thí nghiệm với động cơ GX200 được cải tạo thành động cơ điều khiển điện tử, nhóm tác giả xác định tốc độ định mức khi chạy bằng nhiên liệu khí là 3000 v/ph. Hình 14 là ảnh chụp độ sáng của các bóng đèn khi thay đổi tải động cơ ở tốc độ cố định 3000 v/ph.

Trong thí nghiệm này, nhóm tác giả chia độ mở bướm ga tương ứng với 5 độ quay của servo-motor. Trình tự thí nghiệm như sau:

- Điều chỉnh biến trở 14 để đạt được độ mở bướm ga thí nghiệm.
- Điều chỉnh biến trở 15 để thay đổi thời gian mở vòi phun (tương ứng với thay đổi lượng nhiên liệu cung cấp vào động cơ) đồng thời với điều chỉnh biến trở tải 18 để động cơ giữ tốc độ ổn định 3000 v/ph và lưu lượng kế tổng cho giá trị thấp nhất.
- Điều chỉnh nhẹ biến trở 16 để tăng/giảm góc đánh lửa sớm, quan sát sự thay đổi công suất tải và lưu lượng nhiên liệu.

- Ghi các giá trị độ mở bướm ga, thời gian phun nhiên liệu, góc đánh lửa sớm, tốc độ động cơ, công suất tải lớn nhất ứng với chế độ công tác xác định của động cơ.

- Lặp lại các bước thí nghiệm như trên ứng với các độ mở bướm ga khác.

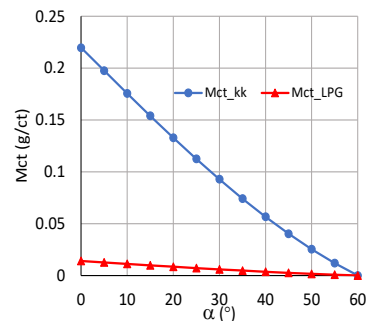


Hình 14. Điều chỉnh các mức tải động cơ

4.3. Kết quả thí nghiệm

- Điều chỉnh thời gian phun nhiên liệu

Thí nghiệm được tiến hành với nhiên liệu LPG, đường kính lưu thông của vòi phun 2,5mm, áp suất phun 1,2 bar, 1 bar và 0,6 bar. Lưu lượng không tải được giữ ở mức 2 l/ph. Thí nghiệm được tiến hành trên động cơ Honda GX200 đã được cải tạo sang điều khiển điện tử nêu trên. Động cơ có dung tích xi lanh 196cm<sup>3</sup>. Tại tốc độ động cơ 3000 v/ph, bướm ga mở hoàn toàn, nếu hệ số nạp của động cơ là 0,9 thì lượng không khí nạp vào xi lanh 0,228 g/ct. Biến thiên lượng không khí, lượng LPG cung cấp cho mỗi chu trình động cơ GX200 theo góc đóng bướm ga được trình bày trên Hình 15. Trên cơ sở lượng nhiên liệu cung cấp cho mỗi chu trình, chúng ta tính toán được thời gian phun ứng với điều kiện áp suất phun và đường kính lưu thông của vòi phun.

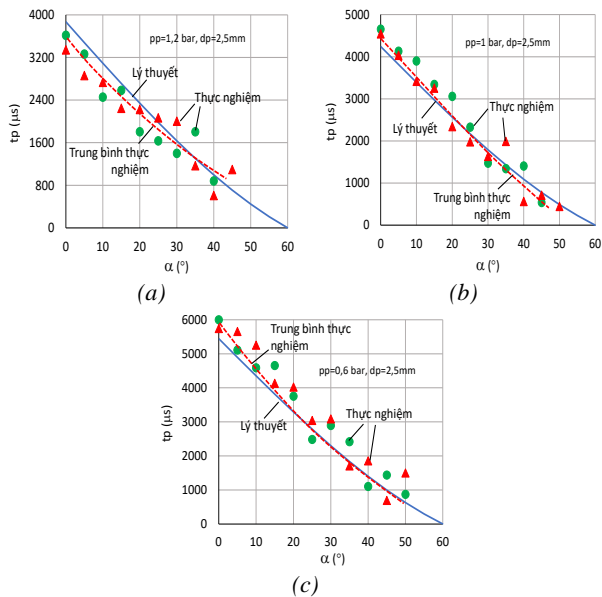


Hình 15. Biến thiên lượng không khí và lượng LPG nạp vào xi lanh động cơ trong mỗi chu trình theo góc đóng bướm ga

Hình 16a, b, c giới thiệu biến thiên thời gian phun cho bởi tính toán lý thuyết và thực nghiệm theo vị trí bướm ga. Đường kính lưu thông của lỗ phun  $d_p=2,5mm$ . Trong tất cả các trường hợp, thời gian phun khi bướm ga gần đóng dao động mạnh. Điều này do thời gian mở vòi phun nhỏ làm vòi phun hoạt động không ổn định.

Khi giảm áp suất phun, thời gian phun tăng giúp cho vòi phun có thể hoạt động trong vùng tải thấp. Để giữ cho động cơ không tắt khi bướm ga đóng nhỏ, phải bố trí đường cấp ga không tải. Như đã trình bày ở trên, lưu lượng ga không tải khoảng 2 l/ph đủ để động cơ duy trì hoạt động khi bướm ga đóng hoàn toàn.

So sánh kết quả các Hình 16a, Hình 16b và Hình 16c cho thấy, khi áp suất phun 1,2 bar thì thời gian phun thực tế thấp hơn thời gian phun theo tính toán lý thuyết khoảng 8% khi  $\alpha < 20^\circ$ . Khi áp suất phun 1 bar thì thời gian phun thực tế cao hơn thời gian phun theo tính toán lý thuyết khoảng 5% khi bướm ga mở hoàn toàn.



**Hình 16.** So sánh lý thuyết và thực nghiệm thời gian phun nhiên liệu

Điều này có thể giải thích khi áp suất phun cao thì nhiên liệu có thể phun sớm hơn, ngay lúc vòi phun vừa mở, và kết thúc phun muộn hơn khi vòi phun sắp đóng kín so với khi áp suất phun thấp. Ở áp suất phun 0,6 bar, sai số giữa thời gian phun thực nghiệm và lý thuyết nhỏ hơn 3% khi bướm ga mở hoàn toàn hay khi bướm ga đóng nhỏ. Trong trường hợp động cơ Honda GX200 sử dụng trong nghiên cứu này, ở tốc độ 3000 v/ph, thời gian dành cho kỳ nạp là 10.000  $\mu\text{s}$ , lớn hơn thời gian phun khi tải cực đại (6.000  $\mu\text{s}$  khi áp suất phun 0,6 bar và đường kính vòi phun 2,5mm). Khi chọn áp suất phun thấp, thời gian mở vòi phun tăng, do đó tăng khả năng ổn định cung cấp nhiên liệu khi tải thấp. Vì vậy, khi động cơ GX200 chạy bằng LPG thì áp suất phun trong khoảng 0,6-1 bar là phù hợp.

#### - Điều chỉnh góc đánh lửa sớm

Như đã trình bày ở phần cải tạo động cơ, cảm biến Hall đánh lửa được lắp trên thân động cơ sao cho nam châm trên bánh đà quay qua cảm biến trước khi qua ĐCT. Góc quay trục khuỷu kể từ lúc kết xung cảm biến Hall đến khi mép cuối nam châm qua ĐCT là  $\varphi_0$ . Trong trường hợp thí nghiệm này, nhóm tác giả chọn  $\varphi_0 = 35^\circ$ .

Nếu tốc độ động cơ là  $n$  v/ph thì thời gian tương ứng 1 độ góc quay trục khuỷu là  $10^6/(6n)$  ( $\mu\text{s}/^\circ$ ). Nếu tia lửa điện bắt đầu sau khi kết thúc xung Hall một thời gian  $t_{dl}$  thì góc đánh lửa sớm là  $\varphi_s = \varphi_0 - 6 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot t_{dl}$ .

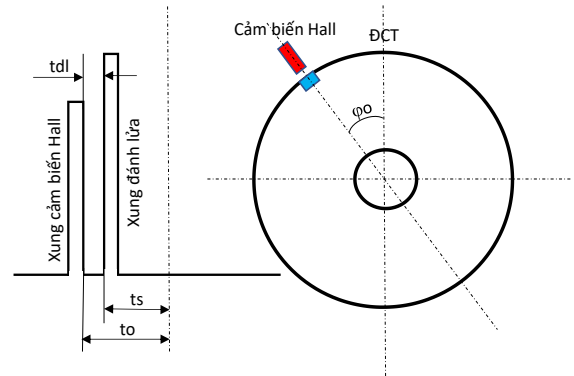
Hình 17 giới thiệu sơ đồ điều chỉnh góc đánh lửa sớm. Mốc thời gian để xác định góc đánh lửa sớm là khi kết thúc xung của cảm biến Hall.

Trong quá trình thí nghiệm, ở một chế độ công tác của động cơ chúng ta điều chỉnh thời gian đánh lửa  $t_{dl}$  bằng biến

trở để xác định được góc đánh lửa tốt nhất tương ứng với công suất động cơ đạt được giá trị cao nhất.

Trong công trình này chúng ta chỉ thử nghiệm với một loại nhiên liệu LPG nên chúng ta chỉ xem xét biến thiên góc đánh lửa sớm thực tế theo tốc độ động cơ.

Thời gian từ lúc đánh lửa đến khi piston đến ĐCT là 2033  $\mu\text{s}$  và 1244  $\mu\text{s}$  tương ứng với tốc độ động cơ 1000 v/ph và 3000 v/ph. Khi tốc độ động cơ tăng thì cường độ xoáy lốc của dòng khí tăng làm tăng tốc độ lan tràn màn lửa. Vì vậy thời góc đánh lửa sớm tăng khi tăng tốc độ động cơ nhưng không tăng tuyến tính.



**Hình 17.** Sơ đồ điều chỉnh góc đánh lửa sớm

## 5. Kết luận

Kết quả nghiên cứu trên đây cho phép chúng ta rút ra được những kết luận sau:

- Để đảm bảo cho hệ số tương đương của hỗn hợp cháy ổn định thì thì lưu lượng không khí và lưu lượng nhiên liệu tương ứng thay đổi theo quan hệ hàm sin với góc đóng bướm ga. Khi bướm ga mở hoàn toàn, ở áp suất phun 1,2 bar thì thời gian phun thực tế nhỏ hơn giá trị lý thuyết 8%; ở áp suất phun 0,6 bar, thì thời gian phun thực tế lớn hơn giá trị lý thuyết 5%.

- Với đường kính vòi phun cho trước, lưu lượng thể tích nhiên liệu ra khỏi vòi phun thay đổi theo hàm parabol với áp suất phun. Trong cùng điều kiện phun thì lưu lượng thể tích  $\text{CH}_4$  cao nhất, lưu lượng thể tích LPG thấp nhất. Các nhiên liệu biogas, syngas và hỗn hợp của chúng chỉ khác biệt nhẹ theo áp suất phun. Đối với LPG, đường kính lỗ phun 2,5mm, áp suất phun từ 0,6-1 bar là phù hợp.

- Cùng điều kiện vận hành, khi hàm lượng hydrogen trong hỗn hợp nhiên liệu tăng thì góc đánh lửa sớm tối ưu giảm. Khi pha hydrogen hay syngas vào biogas thì thời gian cháy giảm và giới hạn cháy mở rộng giúp cải thiện quá trình cháy của động cơ. Góc đánh lửa sớm tối ưu khi động cơ Honda GX200 chạy LPG tăng từ 12,2°TK lên 22,4°TK khi tốc độ động cơ tăng từ 1000 v/ph lên 3000 v/ph.

- Có thể cải tạo động cơ tĩnh tại đánh lửa cưỡng bức truyền thống thành động cơ sử dụng nhiên liệu khí tái tạo một cách linh hoạt nhờ hệ thống điều khiển động cơ gồm một cảm biến xác định mốc thời điểm đánh lửa, cơ cấu điều khiển bướm ga, vòi phun, cụm đánh lửa tích hợp và ECU đơn giản. Để đảm bảo cho vi điều khiển hoạt động ổn định và tin cậy, tất cả kết nối giữa các bộ phận chấp hành và ECU của động cơ đều phải qua bộ chống nhiễu.

**Lời cảm tạ:** Công trình này được thực hiện nhờ tài trợ của Quỹ NAFOSTED thông qua đề tài "Mô-đun sản xuất điện hòa lưới công suất nhỏ từ chất thải sinh hoạt và sản xuất ở nông thôn". Mã số: NCUD.02-2019.22

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Thái Sơn, "Xử lý hiệu quả chất thải rắn sinh hoạt", *Báo Nhân Dân*, 2019, [Online] <https://www.nhandan.com.vn/chinhtri/item/40880802-xu-ly-hieu-qua-chat-thai-ran-sinh-hoat.html>, truy cập 05/01/2022.
- [2] "Quản lý rác thải vì môi trường nông thôn bền vững: Mở lối cho rác thải nông thôn", *Báo Tài nguyên và Môi trường*, 2019 [Online] <https://baotainguyenmoitruong.vn/moi-truong/quan-ly-rac-thai-vi-moi-truong-nong-thon-ben-vung-mo-loi-cho-rac-thai-nong-thon-1267856.html>, truy cập 05/01/2022.
- [3] "Tổng cục Môi trường: Đánh giá, lựa chọn mô hình xử lý chất thải rắn để nhân rộng tại các địa phương", *Quyển báo về môi trường Việt Nam*, 2018, [Online] <https://www.vepf.vn/tin-tuc/khoa-hoc-cong-nghe/tong-cuc-moi-truong-danh-gia-lua-chon-mo-hinh-xu-ly-chat-thai-ran-de-nhan-rong-tai-cac-dia-phuong-803.html>, truy cập 05/01/2022.
- [4] Johari A, Mat R, Alias H, Hashim H, Hassim MH, Zakaria ZY & Rozainee M, "Combustion characteristics of refuse derived fuel (RDF) in a fluidized bed combustor", *Sains Malaysiana* 43(1), 2014, 103-109.
- [5] Dinesh Surroop and Romeela Mohee, "Power generation from refuse derived fuel", *2011 2nd International Conference on Environmental Engineering and Applications*, IPCBEE vol.17, 2011, pp. 242-246
- [6] Bùi Văn Ga, Bùi Thị Minh Tú, Trương Lê Bích Trâm, Võ Như Tùng, Đỗ Xuân Huy, "Cải thiện quá trình cháy động cơ chạy bằng biogas nghèo nhờ cung cấp bổ sung hydroxyl (HHO)", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Vol. 17, No. 1.1, 2019, pp. 35-41.
- [7] Bùi Văn Ga, Võ Anh Vũ, Bùi Thị Minh Tú, Bùi Văn Hùng, Trương Lê Bích Trâm, Phạm Văn Quang, "Kiểm soát tỉ lệ không khí/nhiên liệu của động cơ đánh lửa cưỡng bức chạy bằng biogas nghèo pha HHO", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Vol. 17, No. 3, 2019, pp. 1-6.
- [8] Bùi Văn Ga, Trần Thanh Hải Tùng, Lê Minh Tiến, Bùi Thị Minh Tú, Đặng Văn Nghĩa, Tôn Nguyễn Thành Sang, "Tính năng kỹ thuật và phát thải ô nhiễm động cơ phun biogas-HHO trên đường nạp", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Vol.18, No.1, 2020, pp. 43-48.
- [9] Hagos F, Aziz A, Sulaiman S., "Trends of syngas as a fuel in internal combustion engines", *Advances in Mechanical Engineering*, 2014;1-10. Article id: 401587.
- [10] Whitty K, Zhang H, Eddings E., "Emissions from syngas combustion", *Combustion Science and Technology*, 2008; (180): 1117-19.
- [11] Rakopoulos C, Michos N., "Development and validation of a multi-zone combustion model for performance and nitric oxide formation in syngas fueled spark ignition engine", *Energy Conversion and Management*, 2008;(49):2924-14.
- [12] Keith W, *Have wood will travel complete plans for the Keith gasifier*, 1st edn, Wayne Keith, 2013.
- [13] Huỳnh Văn Sĩ, "Cải tiến máy phát điện sử dụng khí biogas", *Khoa học Phổ thông*, 2016, [Online] <http://www.khoahocphothong.com.vn/cai-tien-may-phat-dien-su-dung-khi-biogas-45868.html>, truy cập 05/01/2022.
- [14] "Nông dân làm máy phát điện bằng khí biogas", *khoahoc.tv*, [Online] <https://khoahoc.tv/nong-dan-la-m-may-phat-dien-bang-khi-biogas-28195>, truy cập 05/01/2022.
- [15] Bui Van Ga, "Nghiên cứu kỹ thuật tạo hỗn hợp phân lớp cho động cơ dùng nhiên liệu khí dầu mỏ hóa lỏng LPG", *International Conference on Automotive Technology ICAT'99*, Hà Nội, October 21-24, 1999, pp. 101-107.
- [16] Bùi Văn Ga, Trần Văn Nam, Trần Thanh Hải Tùng, Hồ Tấn Quyền, "Một số kết quả thực nghiệm trên xe máy sử dụng nhiên liệu khí dầu mỏ hóa lỏng LPG", *Tạp chí Giao thông Vận tải*, số 5, 2000, pp. 35-37.
- [17] Bùi Văn Ga, Lê Văn Tụy, Huỳnh Bá Vang, "Xe chở rác ba bánh chạy bằng LPG", *Tuyển tập Hội Nghị Cơ học toàn quốc lần thứ VIII*, Hà Nội, 7-8/12/2007.
- [18] Bùi Văn Ga, Trần Văn Nam, Lê Minh Tiến, "Mô phỏng quá trình cháy dual fuel biogas-diesel", *Tạp chí Giao thông Vận tải*, số 4/2011, pp. 32-34.
- [19] Bui Van Ga, Tran Van Nam, Bui Thi Minh Tu, Nguyen Quang Trung, "Numerical simulation studies on performance, soot and NOx emissions of dual-fuel engine fuelled with hydrogen enriched biogas mixtures", *IET Renewable Power Generation*, Volume 12, Issue 10, (2018), pp. 1111-1118, DOI: 10.1049/iet-rpg.2017.0559.
- [20] Bui Van Ga, Bui Thi Minh Tu, Trương Lê Bích Trâm, Bui Van Hùng, "Technique of Biogas-HHO Gas Supply for SI Engine", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 8 Issue 05, May-2019, pp. 669-674.
- [21] Bùi Văn Ga, Bùi Thị Minh Tú, Trương Lê Bích Trâm, Võ Như Tùng, Đỗ Xuân Huy, "Cải thiện quá trình cháy động cơ chạy bằng biogas nghèo nhờ cung cấp bổ sung hydroxyl (HHO)", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Vol. 17, No. 1.1, 2019, pp. 35-41.
- [22] Van Ga Bui, Trung Hung Vo, Thi Minh Tu Bui, Le Bích TramTruong and Thanh Xuan Nguyen Thi, "Characteristics of Biogas-Hydrogen Engines in a Hybrid Renewable Energy System", *International Energy Journal*, Volume 21, Issue 4, December 2021, pp. 467-480.
- [23] Qin W., Egolfopoulos F.N., Tsotsis T.T., "Fundamental and environmental aspects of landfill gas utilization for power generation", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 82, 1-3, 2001, pp. 157-172.
- [24] Ratna Kishore, M. R. Ravi, and Anjan Ray, "Effect of Hydrogen Content and Dilution on Laminar Burning Velocity and Stability Characteristics of Producer Gas-Air Mixtures", *International Journal of Reacting Systems*, Volume 2008, Article ID 310740, 8 pages, doi:10.1155/2008/310740
- [25] M.Ilbaz, A.P.Crayford, İ.Yilmaz, P.J.Bowen, N.Syred, "Laminar-burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-methane-air mixtures: An experimental study", *Hydrogen Energy*, Volume 31, Issue 12, September 2006, Pages 1768-1779. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.007>
- [26] Ilbaz, M., A. P. Crayford, I. Yilmaz, et al., "Laminar Burning Velocities of Hydrogen-Air and Hydrogen-Methane-Air Mixtures: An Experimental Study", *Int J Hydrogen Energy*, 31(12), 1768-1779, 2006.
- [27] Bùi Văn Ga, Lê Minh Tiến, Bùi Văn Tấn, Võ Như Tùng, "Mô phỏng Engine Map của động cơ được cung cấp nhiên liệu kiểu hybrid biogas-xăng", *Tuyển tập Công trình Hội nghị khoa học Cơ học Thủy khí toàn quốc lần thứ 22*, Hải Phòng, 25-27/7/2019, pp. 250-259.
- [28] Van Ga Bui, Van Nam Tran, Anh Tuan Hoang, Thi Minh Tu Bui & Anh Vu Vo, "A simulation study on a port-injection SI engine fueled with hydroxy-enriched biogas", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, ISSN 15567036, 15567230, 2020, <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1804487>
- [29] Bùi Thị Minh Tú, Bùi Văn Hùng, Trương Lê Bích Trâm, "Nghiên cứu công nghệ phun Biogas-HHO trên đường nạp động cơ tĩnh tại đánh lửa cưỡng bức", *Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học thủy khí toàn quốc lần thứ 23*, tháng 11-2020, 636-647.