CẢI TẠO ĐỘNG CƠ XĂNG GX390 THÀNH ĐỘNG CƠ SỬ DỤNG SYNGAS-BIOGAS-HYDROGEN VỚI BỘ ĐIỀU KHIỂN ECU-MASTER/ECU-SLAVE

ECU-MASTER/ECU-SLAVE CONTROL FOR FLEXIBLE SYNGAS-BIOGAS-HYDROGEN FUELING: SIMULATION AND GX390 ENGINE RETROFIT

Đỗ Phú Ngưu[1], Bùi Văn Hùng[1], Lê Khắc Bình[2,*]

DOI: https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.056

TÓM TẮT

Mô hình điều khiển quá trình cung cấp nhiên liệu cho động cơ kiểu ECU-Master/ECU-Slave, trong đó 1 ECU được thiết lập với nhiên liệu gốc và ECU còn lại điều chỉnh thời gian phun theo thành phần nhiên liệu, phù hợp với động cơ làm việc với hỗn hợp nhiên liệu linh hoạt. Mô phỏng hoạt động của ECU-Master/ECU-Slave bằng phần mềm Proteus và lập trình vi điều khiển với sự hỗ trợ của AI giúp đơn giản hóa quá trình nghiên cứu hệ thống điều khiển động cơ trước khi chế tạo. Động cơ xăng tĩnh tại Honda GX390 có thể được cải tạo thành động cơ sử dụng nhiên liệu khí linh hoạt syngas-biogas-hydrogen với bộ cảm biến của xe gắn máy phun xăng điều khiển điện tử, bộ vòi phun cặp đôi và bộ ECU-Master/ECU-Slave. Khi chuyển Honda GX390 sang chạy bằng hỗn hợp 30% syngas-40% biogas-30% hydrogen, công suất động cơ giảm 20,2% so với khi chạy bằng xăng.

Từ khóa: *Nhiên liệu tái tạo, Syngas, Biogas, Hydrogen, vòi phun kép.*

ABSTRACT

A control model for the fuel supply process using an ECU-Master/ECU-Slave architecture is proposed. In this model, one ECU is configured with a base fuel map, while the other adjusts the injection duration based on the fuel composition, making it suitable for engines operating with flexible fuel mixtures. The operation of the ECU-Master/ECU-Slave system is simulated using Proteus software, and microcontroller programming supported by AI simplifies the research process for the engine control system before fabrication. A stationary Honda GX390 gasoline engine can be retrofitted to run on a flexible gaseous fuel mixture of syngas-biogas-hydrogen by utilizing twining injector system, and the ECU-Master/ECU-Slave control model. When the Honda GX390 is converted to operate on a 30% syngas-40% biogas-30% hydrogen blend, the engine power decreases by 20.2% compared to its performance when running on gasoline.

Keywords**:** *Renewable fuels; Syngas; Biogas; Hydrogen; twining injectors.*

[1]Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng
[2]Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh
[*]Email: khacbinhktv@gmail.com
Ngày nhận bài: 11/12/2025
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/01/2026
Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

1. GIỚI THIỆU

Khí tổng hợp (Syngas) và Biogas là hai loại nhiên liệu sinh học có nguồn gốc từ sinh khối thông qua các quá trình nhiệt hóa học và sinh hóa [1]. Thành phần thể tích điển hình của syngas bao gồm 15 - 20% H_2, 15 - 20% CO, 1 - 5% CH_4, 10 - 15% CO_2 và phần còn lại chủ yếu là N_2 [2]. Khi oxy hoặc hơi nước được sử dụng làm chất oxy hóa trong lò khí hóa, giá trị nhiệt thấp (LHV) của syngas dao động từ 10 đến 28MJ/Nm^3. Tuy nhiên, nếu sử dụng không khí làm chất oxy hóa, LHV giảm xuống còn khoảng

4 - 7MJ/Nm^3 [3]. Do LHV thấp, động cơ chạy bằng syngas thường có công suất đầu ra thấp hơn so với nhiên liệu truyền thống. Tuy nhiên, tỷ lệ không khí/nhiên liệu (A/F) cho quá trình đốt cháy của syngas xấp xỉ 1,2, thấp hơn nhiều so với xăng (A/F=14,9) hoặc dầu diesel (A/F = 14,5) [4-6], dẫn đến giảm công suất không tỷ lệ thuận với LHV. Thông thường, việc chuyển từ dầu diesel sang sử dụng nhiên liệu syngas dẫn đến giảm công suất 15 - 20% và 30 - 40% so với động cơ chạy bằng xăng [7, 8]. Nếu LHV của syngas quá thấp, quá trình đốt cháy không ổn định có thể xảy ra [9], làm giảm hiệu suất của động cơ. Do đó, để động cơ đánh lửa bằng bugi (SI) hoạt động hiệu quả, LHV của syngas phải vượt quá 4,2MJ/Nm^3 [10].

So với syngas, biogas cần năng lượng đánh lửa cao hơn, có thể dẫn đến đánh lửa sai và cháy không hoàn toàn trong một số điều kiện nhất định, do đó làm giảm hiệu suất động cơ và tăng lượng khí thải gây ô nhiễm [11]. Thành phần điển hình của biogas bao gồm 50 - 75% CH_4, 25 - 45% CO_2, 0 - 10% N_2, 1 - 2% H_2 và 0 - 2% O_2, với LHV khoảng 25MJ/Nm^3 [12]. Trong khi CO_2 và N_2 làm giảm giá trị nhiệt lượng, nhưng chúng làm tăng khả năng chống kích nổ và giảm nhiệt độ cháy, góp phần giảm sự hình thành NO_x [13].

Hydrogen là nhiên liệu không chứa carbon, có đặc điểm là phạm vi dễ cháy rộng và tốc độ ngọn lửa cao [14]. Những đặc tính này cho phép động cơ chạy bằng hydro đạt được áp suất và nhiệt độ trong xi lanh cao trong khi không thải ra CO_2, CO hoặc hydrocarbon. Tuy nhiên, hydro cũng đặt ra những thách thức như mật độ năng lượng thể tích thấp, làm giảm công suất đầu ra của động cơ và nhiệt độ cháy cao làm tăng lượng khí thải NO_x. Hơn nữa, năng lượng đánh lửa thấp và phạm vi cháy rộng khiến nó dễ xảy ra các hiện tượng cháy bất thường như cháy sớm và cháy ngược.

Những thông tin trên cho thấy syngas, biogas và hydrogen đều có những ưu điểm và hạn chế riêng. Việc sử dụng chúng riêng lẻ làm nhiên liệu cho động cơ sẽ gặp một số thách thức về mặt kỹ thuật. Tuy nhiên, pha trộn các loại nhiên liệu này thích hợp, có thể khai thác được thế mạnh của từng loại, qua đó cải thiện hiệu suất của động cơ. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu được công bố về syngas, biogas, hydrogen hoặc syngas/biogas làm giàu với CH_4 hoặc H_2, nhưng rất ít nghiên cứu về động cơ sử dụng hỗn hợp syngas-biogas-hydrogen có thành phần thay đổi trong phạm vi rộng. Hơn nữa, các nghiên cứu hệ thống cung cấp nhiên liệu hiện có chủ yếu tập trung cung cấp nhiên liệu khí có thành phần cố định. Vì syngas, biogas, hydrogen có đặc tính cháy rất khác biệt nên các kiểu cung cấp nhiên liệu truyền thống cho động cơ không phù hợp [15]. Trong các tài liệu nghiên cứu gần đây, GS. Bùi Văn Ga và cộng sự đã đề xuất giải pháp cung cấp hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen cho động cơ qua bộ vòi phun kép (Twining injectors) [16]. Giải pháp cung cấp nhiên liệu này đã được chứng minh bằng mô phỏng có nhiều ưu điểm vượt trội so với các phương pháp cung cấp nhiên liệu truyền thống [17-19]

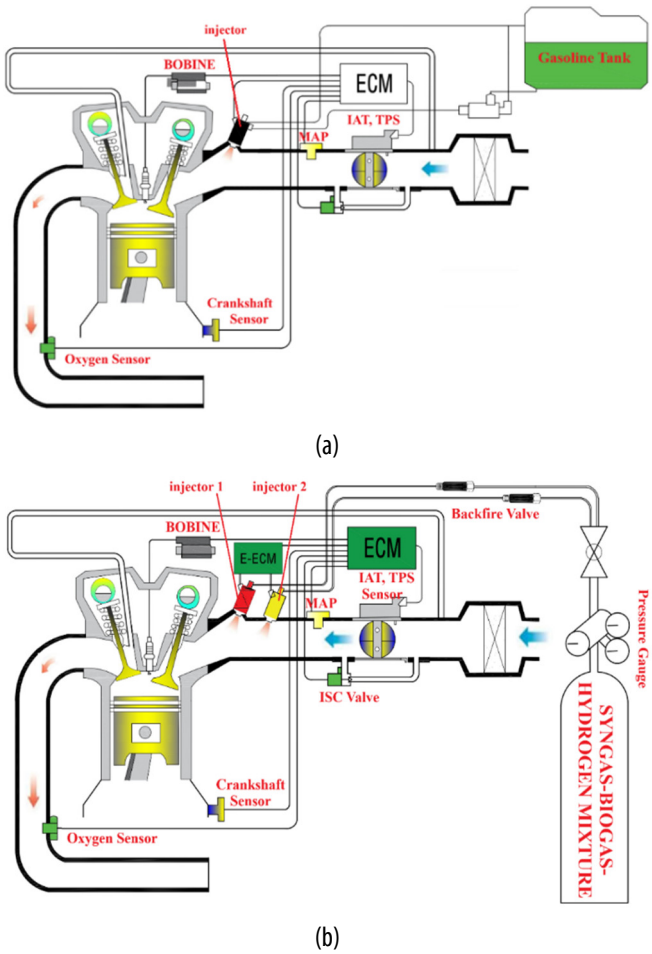
Các công trình nghiên cứu điều khiển phun nhiên liệu linh hoạt và vòi phun kép trong các nghiên cứu trước đây tại Việt Nam, tuy nhiên chỉ dừng ở mô phỏng hoặc sử dụng tín hiệu từ cảm biến trục khuỷu để thay đổi thời gian phun nhiên liệu khí khó khăn xử lý nhiễu tín hiệu điều khiển và đáp ứng trong thời gian thực. Trong nghiên cứu này, chúng tôi phát triển hệ thống điều khiển quá trình cung cấp nhiên liệu cho động cơ sử dụng hỗn hợp syngas-biogas-hydrogen có thành phần thay đổi linh hoạt. Hệ thống điều khiển nghiên cứu theo mô hình ECU-Master/ECU Slave, thiết lập sử dụng bộ cảm biến công nghiệp và ECU, độ chính xác cao, giảm nhiễu trên thời gian thực lắp trên xe gắn máy để cải tạo trên động cơ GX390, đây là ECU-Master với map điều khiển phun và góc đánh lửa chuẩn được thiết lập tối ưu sẵn, ECU-Slave nhận tín hiệu từ ECU-Master và sự thay đổi thành phần nhiên liệu để điều khiển mở rộng ở chế độ vòi phun kép phù hợp sự thay đổi của nhiên liệu linh hoạt.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Nghiên cứu mô phỏng

Nghiên cứu được thực hiện bằng mô phỏng và thực nghiệm. Mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm Proteus với vi điều khiển Arduino Mega. Nguyên tắc điều khiển dựa trên sơ đồ ECU-Master/ECU-Slave. ECU-Master phát tín hiệu điều khiển đánh lửa và phun nhiên liệu chuẩn. ECU-Slave nhận tín hiệu của ECU-Master và các thông số đầu vào nhiên liệu, chế độ công tác của động cơ để tính toán, điều chỉnh thời điểm đánh lửa và thời gian phun. ECU-Master có thể là ECU có sẵn trên các loại động cơ phun xăng điều khiển điện tử hay ECU được thiết kế chuyên biệt cho một loại nhiên liệu chuẩn.

Hình 1a trình bày sơ đồ hệ thống điều khiển động cơ truyền thống, trong đó ECU-Master được cấu hình cho một loại nhiên liệu cố định. Trong cấu trúc này, ECU-Master thu nhận các tín hiệu từ các cảm biến phản ánh chế độ làm việc của động cơ (tải và tốc độ), trạng thái nhiệt (nhiệt độ nước làm mát), vị trí góc quay trục khuỷu, cũng như hệ số tương đương từ cảm biến lambda. Dựa trên các tín hiệu đầu vào này, ECU phát lệnh điều khiển thời điểm đánh lửa và thời gian phun nhiên liệu.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống điều khiển động cơ với ECU-Master (a) và hệ thống điều khiển động cơ với ECU-Master/ECU-Slave (b)

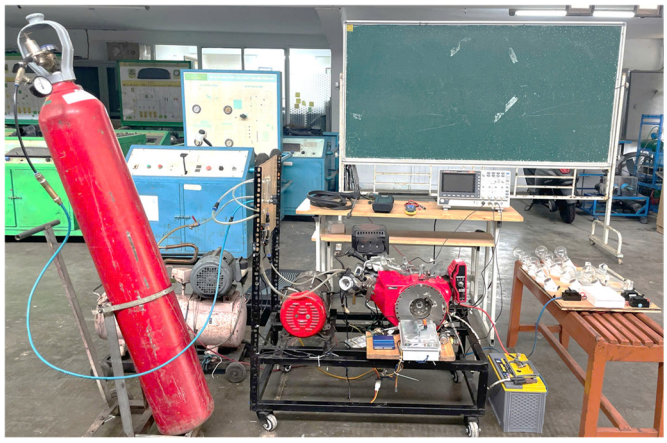
Hình 1b mô tả hệ thống điều khiển theo cấu trúc ECU-Master/ECU-Slave áp dụng cho động cơ sử dụng nhiên liệu linh hoạt. Trong cấu trúc này, ECU-Slave tiếp nhận cả tín hiệu đầu ra của ECU-Master và thông tin về thành phần hỗn hợp nhiên liệu, từ đó tính toán và hiệu chỉnh thời điểm đánh lửa và lượng phun phù hợp. Đối với động cơ vận hành bằng hỗn hợp nhiên liệu khí linh hoạt có thành phần biến thiên trong phạm vi rộng, hệ thống phải sử dụng cấu hình vòi phun kép; khi đó ECU-Slave thực hiện điều khiển đồng thời hai vòi phun theo thuật toán định sẵn.

ECU-Master có thể là ECU gốc của động cơ phun xăng điều khiển điện tử hoặc một ECU vạn năng được hiệu chỉnh theo bản đồ nhiên liệu (engine MAP) của một loại nhiên liệu chuẩn. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng phương án thứ hai, tức ECU-Master được chuẩn hóa từ một ECU vạn năng. ECU-Slave được thiết kế và chế tạo mới nhằm đáp ứng yêu cầu điều khiển với hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen có thành phần biến thiên trong dải rộng.

2.2. Nghiên cứu thực nghiệm

Hình 2 trình bày cấu hình thí nghiệm của động cơ GX390 sau khi được cải tạo để vận hành bằng hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen. Hỗn hợp nhiên liệu được chứa trong bình áp suất 15bar, sau đó được giảm áp xuống 3 bar trước khi cấp vào động cơ thông qua hệ thống vòi phun kép được điều khiển bởi bộ ECU-Master/ECU-Slave. Tải của động cơ được tạo bởi cụm bóng đèn sợi đốt.

Syngas gồm các thành phần CO, CH_4, H_2, CO_2 và N_2, trong khi biogas chủ yếu chứa CH_4 và CO_2. Do đó, hỗn hợp syngas-biogas-hydrogen sử dụng trong nghiên cứu bao gồm các khí CO, CH_4, H_2, CO_2 và N_2. Dựa trên thành phần các loại nhiên liệu đơn lẻ, thành phần hỗn hợp có thể được tính toán dựa trên định luật Dalton về áp suất riêng phần, cho phép pha chế nhiên liệu theo tỷ lệ mong muốn. Trong các thí nghiệm được trình bày dưới đây, hỗn hợp nhiên liệu được thiết lập theo tỷ lệ 30% syngas, 30% hydrogen và 40% biogas.



Hình 2. Sơ đồ bố trí hệ thống thí nghiệm động cơ GX390 cải tạo dùng hỗn hợp nhiên liệu khí

3. KẾT QUẢ VÀ BÌNH LUẬN

3.1. Lập trình vi điều khiển ECU-Slave với sự hỗ trợ của AI

Trong phần này chúng tôi sử dụng trí tuệ nhân tạo (AI) để lập trình vi điều khiển. Vi điều khiển sử dụng trong ECU-Slave là Arduino Mega. Với sự hỗ trợ của AI, chúng ta không cần phải viết các dòng lệnh mà chỉ cần nêu nguyên lý, điều khiển, cấu hình phần cứng của hệ thống. AI sẽ viết toàn bộ chương trình để cài đặt vào ECU. Trong quá trình chạy thử, nếu xảy ra lỗi hay kết quả chưa hợp lý thì chúng ta có thể yêu cầu AI chỉnh sửa chương trình. Dưới đây là yêu cầu để AI viết chương trình điều khiển ECU-Master:

"I would like to implement a project in Proteus to simulate a Slave ECU for ignition and injection of a

4-stroke spark ignition engine fuled with renewable fuels converted from gasoline engine.

Please write the arduino code to implement the project according to the following specifications.

Principle of Operation:

- Master ECU initially is used for gasoline fueling mode; Slave ECU is designed for renewable fuels fueling mode.
- The Slave ECU takes the original control pulses (for gasoline) of the Master ECU, modifies the pulses specifications and generates news control pulses (for renewable fuels).
- Ignition delay, injection pulse width vary with renewable fuels compositions.
- Slave ECU receives Top Dead Center (TDC) pulse, Ignition (IGN) pulse and Injection (INJ) pulse from Master ECU.
- Slave ECU calculates Ignition delay, injection pulse width for each injectors of current engine cycle (of renewable fuels) based on input pulses of previous engine cycle (of gasoline).
- Slave ECU generates the pulses: IGN_out, INJ1_out, INJ2_out to control engine fueled with renewable fuels.

Hardware Requirements:

- Arduino Mega (referred to as MC).
- LCD 20x4 with I2C interface (address 0x3F).
- Serial Monitor set at 115200 baud rate.
- Potentiometer1 connected to PIN A0 of MC, providing Bio_Flow values ranging from 0 to 100.
- Potentiometer2 connected to PIN A1 of MC, providing Hydro_Flow values ranging from 0 to 100.
- Potentiometer3 connected to PIN A2 of MC, providing Syn_Flow values ranging from 0 to 100

Project Implementation Steps:

Read input pulses:

- TDC_in pulse INPUT at PIN SD2, RISING at t1.

- IGN_in pulse INPUT at PIN SD3, RISING at t2.

- INJ_in pulse INPUT at PIN SD4, RISING at t3.

Determine pulse width of INJ pulse: INJ_PulseWidth_ref

Determine IGN pulse timing: IGN_timing_ref=t2-t1.

Determine INJ pulse timing: INJ_timing=t3-t1.

Read Bio_Flow at A0.

Read Hydro_Flow at A1.

Read Syn_Flow at A2.

Calculate:

Bio_Conc= Bio_Flow/(Bio_Flow+ Hydro_Flow+ Syn_Flow)*100.

Hydro_Conc= Hydro_Flow/(Bio_Flow+ Hydro_Flow+ Syn_Flow)*100.

Syn_Conc=100-(Bio_Conc+Hydro_Conc).

INJ1_PulseWidth= INJ_PulseWidth_ref+10*Syn_Conc.

INJ2_PulseWidth= INJ_PulseWidth_ref+5*Hydro_Conc.+3*Bio_Conc.

IGN_delay= IGN_timing_ref-5*Syn_Conc-2*Bio_Conc+4*Hydro_Conc.

Pulses generation:

- TDC_out pulse:

Timing_ref is RISING moment of TDC_in pulse (us)

OUTPUT at D10.

RISING at Timing_ref,

Pulse width of TDC_out: TDC_PulseWidth=200 us.

- IGN_out pulse:

OUTPUT at D11.

RISING at Timing_ref+IGN_delay.

Pulse width of IGN_out: IGN_PulseWidth=250 us.

- INJ1_out pulse

OUTPUT at D12.

RISING at Timing_ref+100 us.

Pulse width of INJ1_out: INJ1_PulseWidth.

- INJ2_out pulse

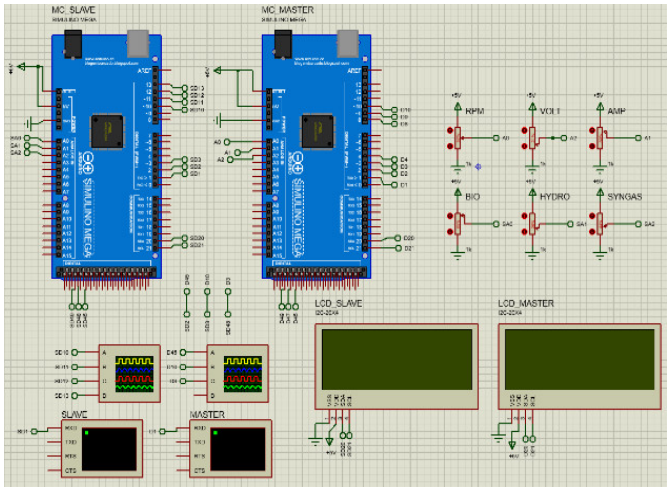
OUTPUT at D13.

RISING at Timing_ref+200 us.

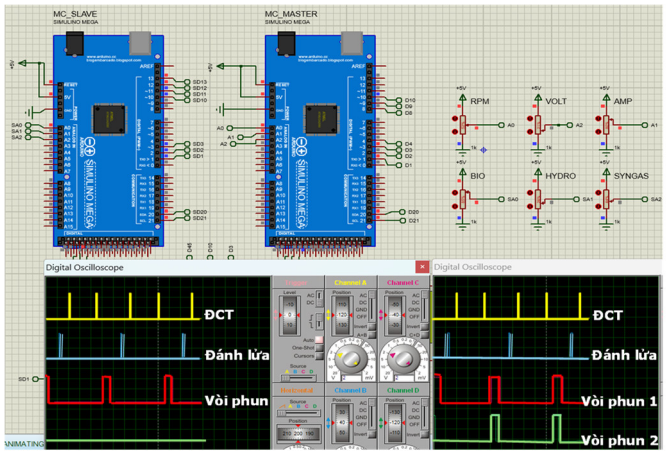
Pulse width of INJ2_out: INJ2_PulseWidth."

3.2. Kết quả mô phỏng thử chương trình trong Proteus

Hệ thống điều khiển ECU-Master/ECU-Slave được kiểm tra bằng mô phỏng trên phần mềm Proteus trước khi tiến hành chế tạo thực tế. Hình 3a trình bày sơ đồ mô phỏng của hệ thống trong Proteus. ECU-Master tiếp nhận tín hiệu tốc độ động cơ và tải (suy ra từ điện áp và dòng điện) để xác định thời gian phun nhiên liệu chuẩn và thời điểm đánh lửa tương ứng. Các tín hiệu đầu ra này được truyền tới ECU-Slave cùng với thông tin về thành phần hỗn hợp syngas, biogas và hydrogen. Dựa trên các dữ liệu vào, ECU-Slave tạo xung điều khiển thời gian mở của hai vòi phun trong hệ thống vòi phun kép, đồng thời phát lệnh đánh lửa.



Hình 3. Sơ đồ mô phỏng hệ thống điều khiển ECU-Master/ECU-Slave



Hình 4. Minh họa kết quả phối hợp hoạt động của ECU-Master và ECU-Slave

Hình 4 minh họa một kết quả mô phỏng tiêu biểu của hệ thống ECU-Master/ECU-Slave trong Proteus khi động cơ vận hành ở tốc độ 3000 vòng/phút với hỗn hợp nhiên liệu gồm 30% syngas, 30% hydrogen và 40% biogas. ECU-Master tạo các tín hiệu điểm chết trên (ĐCT), xung đánh lửa và xung phun nhiên liệu chuẩn; trong khi đó ECU-Slave điều chỉnh thời điểm đánh lửa, đồng thời sinh hai xung điều khiển riêng cho vòi phun thứ nhất và vòi phun thứ hai theo thành phần nhiên liệu cung cấp. Khi thay đổi điều kiện vận hành của động cơ hoặc tỷ lệ phối trộn nhiên liệu, các xung điều khiển đánh lửa và phun nhiên liệu được ECU-Slave điều chỉnh theo thuật toán đã lập trình. Nhờ sự phối hợp giữa hai bộ ECU, động cơ có thể vận hành ổn định với hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen có thành phần biến thiên trong dải rộng.

3.3. Cải tạo động cơ Honda GX390 với bộ điều khiển ECU-Master/ECU-Slave

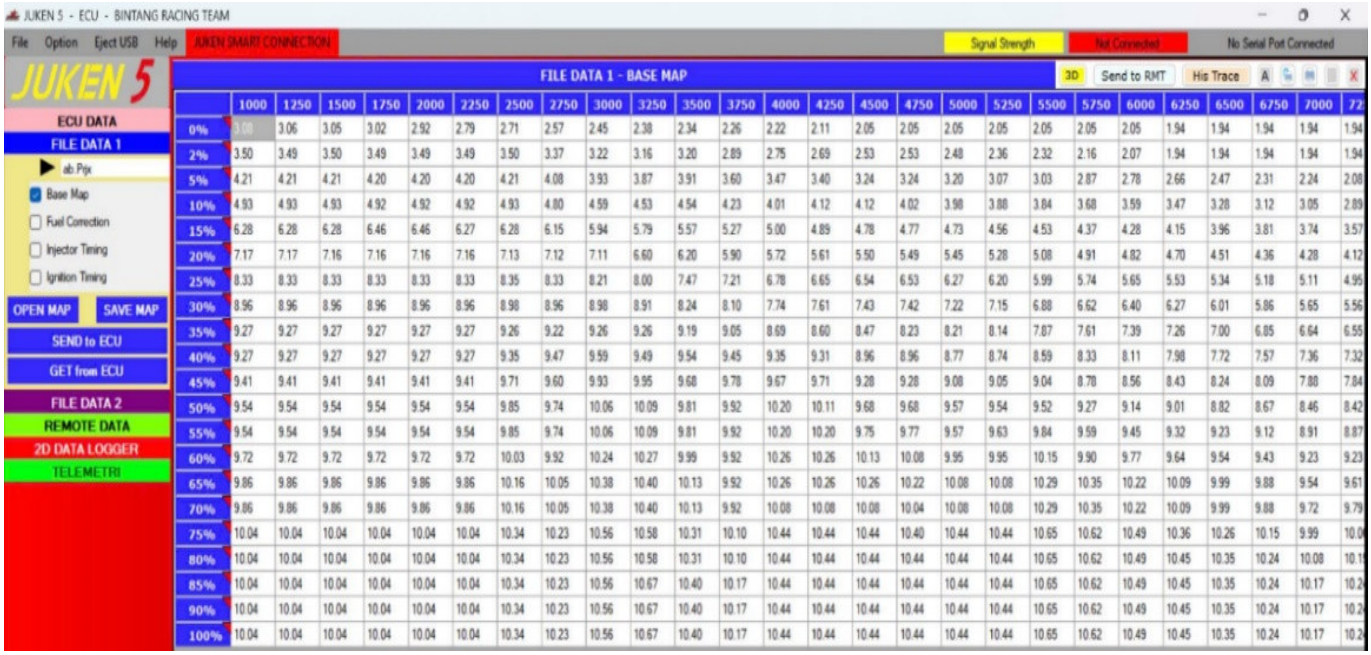
Động cơ GX390 (hình 5a) được cải tạo để vận hành với hệ thống phun xăng điện tử. Bộ chế hòa khí truyền thống được thay thế bằng cụm phun nhiên liệu do ECU-Master điều khiển. Các cảm biến vị trí trục khuỷu, nhiệt độ dầu bôi trơn và bộ ba cảm biến áp suất đường nạp, vị trí bướm ga, nhiệt độ khí nạp được thiết kế lắp đặt lên động cơ nhằm cung cấp dữ liệu đầu vào cho hệ thống điều khiển. Hệ thống đánh lửa magneto được thay thế bằng mô-đun đánh lửa điện tử, cho phép điều khiển chính xác thời điểm đánh lửa. ECU-Master sử dụng trong nghiên cứu là ECU vạn năng JUKEN 5 PRO (hình 5b). Một hệ thống điều khiển mở cho phép hiệu chỉnh đặc tính phun và đặc tính đánh lửa theo từng loại nhiên liệu và chế độ vận hành của động cơ.

Hình 4c trình bày một giản đồ phun xăng tiêu biểu của ECU JUKEN 5 PRO, trong đó thời gian phun được tối ưu hóa theo các điều kiện vận hành (tốc độ động cơ, độ mở bướm ga, nhiệt độ, áp suất khí nạp…). Sau khi hoàn thiện giản đồ phun, ECU-Master hoạt động như bộ điều khiển chuẩn cho động cơ GX390 sử dụng nhiên liệu xăng. Khi hệ thống phun xăng vận hành ổn định, ECU-Slave được bổ sung để điều khiển hệ thống vòi phun kép, đảm bảo cung cấp hỗn hợp nhiên liệu tối ưu cho động cơ tại mọi chế độ làm việc.

3.4. Lắp đặt các cảm biến

Động cơ Honda GX390 là loại động cơ tĩnh tại truyền thống sử dụng bộ chế hòa khí và hệ thống đánh lửa kiểu magneto. Do đó, khi chuyển đổi sang cấu hình phun nhiên liệu điều khiển điện tử, cần bổ sung hệ thống cảm biến. Trước tiên, cảm biến vị trí trục khuỷu (CKP) của xe gắn máy được gia công và lắp đặt phù hợp lên động cơ GX390. Bánh đà nguyên bản (hình 6a) được thay thế bằng bánh đà mới (hình 6b), trên đó bố trí chín chốt từ. Một cảm biến từ được cố định trên vỏ động cơ (hình 6c). Khi các chốt từ đi qua cảm biến, các xung tín hiệu được tạo ra và gửi đến ECU. Dựa trên chuỗi xung này, ECU xác định chính xác thời điểm đánh lửa và điều khiển quá trình đóng - mở kim phun nhiên liệu phù hợp với trình tự vận hành của chu trình công tác động cơ.

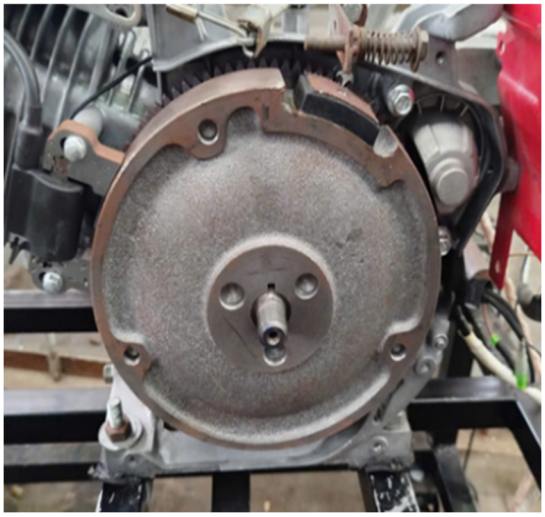
(a) (b)



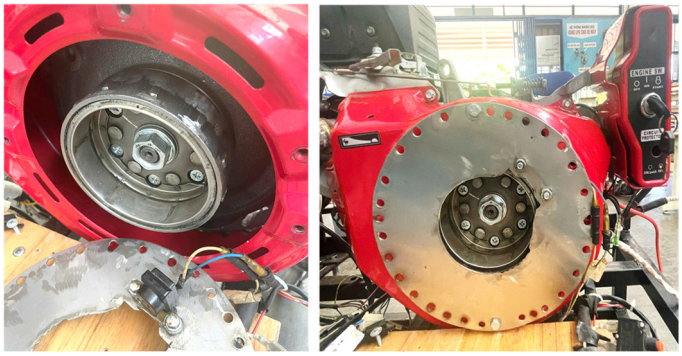
	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000	6250	6500	6750	7000	72
0%	3.00	3.06	3.05	3.02	2.92	2.79	2.71	2.57	2.45	2.38	2.34	2.26	2.22	2.11	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94
2%	3.50	3.49	3.50	3.49	3.49	3.49	3.50	3.37	3.22	3.16	3.20	2.89	2.75	2.69	2.53	2.53	2.48	2.36	2.32	2.16	2.07	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94
5%	4.21	4.21	4.21	4.20	4.20	4.20	4.21	4.08	3.93	3.87	3.91	3.60	3.47	3.40	3.24	3.24	3.20	3.07	3.03	2.87	2.78	2.66	2.47	2.31	2.24	2.08
10%	4.93	4.93	4.93	4.92	4.92	4.92	4.93	4.80	4.59	4.53	4.54	4.23	4.01	4.12	4.12	4.02	3.98	3.88	3.84	3.68	3.59	3.47	3.28	3.12	3.05	2.89
15%	6.28	6.28	6.28	6.46	6.46	6.27	6.28	6.15	5.94	5.79	5.57	5.27	5.00	4.89	4.78	4.77	4.73	4.56	4.53	4.37	4.28	4.15	3.96	3.81	3.74	3.57
20%	7.17	7.17	7.16	7.16	7.16	7.16	7.13	7.12	7.11	6.60	6.20	5.90	5.72	5.61	5.50	5.49	5.45	5.28	5.08	4.91	4.82	4.70	4.51	4.36	4.28	4.12
25%	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.35	8.33	8.21	8.00	7.47	7.21	6.78	6.65	6.54	6.53	6.27	6.20	5.99	5.74	5.65	5.53	5.34	5.18	5.11	4.95
30%	8.96	8.96	8.96	8.96	8.96	8.96	8.98	8.96	8.98	8.91	8.24	8.10	7.74	7.61	7.43	7.42	7.22	7.15	6.88	6.62	6.40	6.27	6.01	5.86	5.65	5.56
35%	9.27	9.27	9.27	9.27	9.27	9.27	9.26	9.22	9.26	9.26	9.19	9.05	8.69	8.60	8.47	8.23	8.21	8.14	7.87	7.61	7.39	7.26	7.00	6.85	6.64	6.55
40%	9.27	9.27	9.27	9.27	9.27	9.27	9.35	9.47	9.59	9.49	9.54	9.45	9.35	9.31	8.96	8.96	8.77	8.74	8.59	8.33	8.11	7.98	7.72	7.57	7.36	7.32
45%	9.41	9.41	9.41	9.41	9.41	9.41	9.71	9.60	9.93	9.95	9.68	9.78	9.67	9.71	9.28	9.28	9.08	9.05	9.04	8.78	8.56	8.43	8.24	8.09	7.88	7.84
50%	9.54	9.54	9.54	9.54	9.54	9.54	9.85	9.74	10.06	10.09	9.81	9.92	10.20	10.11	9.68	9.68	9.57	9.54	9.52	9.27	9.14	9.01	8.82	8.67	8.46	8.42
55%	9.54	9.54	9.54	9.54	9.54	9.54	9.85	9.74	10.06	10.09	9.81	9.92	10.20	10.20	9.75	9.77	9.57	9.63	9.84	9.59	9.45	9.32	9.23	9.12	8.91	8.87
60%	9.72	9.72	9.72	9.72	9.72	9.72	10.03	9.92	10.24	10.27	9.99	9.92	10.26	10.26	10.13	10.08	9.95	9.95	10.15	9.90	9.77	9.64	9.54	9.43	9.23	9.23
65%	9.86	9.86	9.86	9.86	9.86	9.86	10.16	10.05	10.38	10.40	10.13	9.92	10.26	10.26	10.26	10.22	10.08	10.08	10.29	10.35	10.22	10.09	9.99	9.88	9.54	9.61
70%	9.86	9.86	9.86	9.86	9.86	9.86	10.16	10.05	10.38	10.40	10.13	9.92	10.08	10.08	10.08	10.04	10.08	10.08	10.29	10.35	10.22	10.09	9.99	9.88	9.72	9.79
75%	10.04	10.04	10.04	10.04	10.04	10.04	10.34	10.23	10.56	10.58	10.31	10.10	10.44	10.44	10.44	10.40	10.44	10.44	10.65	10.62	10.49	10.36	10.26	10.15	9.99	10.0
80%	10.04	10.04	10.04	10.04	10.04	10.04	10.34	10.23	10.56	10.58	10.31	10.10	10.44	10.44	10.44	10.44	10.44	10.44	10.65	10.62	10.49	10.45	10.35	10.24	10.08	10.1
85%	10.04	10.04	10.04	10.04	10.04	10.04	10.34	10.23	10.56	10.67	10.40	10.17	10.44	10.44	10.44	10.44	10.44	10.44	10.65	10.62	10.49	10.45	10.35	10.24	10.17	10.2
90%	10.04	10.04	10.04	10.04	10.04	10.04	10.34	10.23	10.56	10.67	10.40	10.17	10.44	10.44	10.44	10.44	10.44	10.44	10.65	10.62	10.49	10.45	10.35	10.24	10.17	10.2
100%	10.04	10.04	10.04	10.04	10.04	10.04	10.34	10.23	10.56	10.67	10.40	10.17	10.44	10.44	10.44	10.44	10.44	10.44	10.65	10.62	10.49	10.45	10.35	10.24	10.17	10.2

(c)

Hình 5. Động cơ Honda GX390 nguyên bản (cung cấp xăng qua bộ chế hòa khí, đánh lửa magneto), ECU Juken 5 pro và map điều khiển phun nhiên liệu



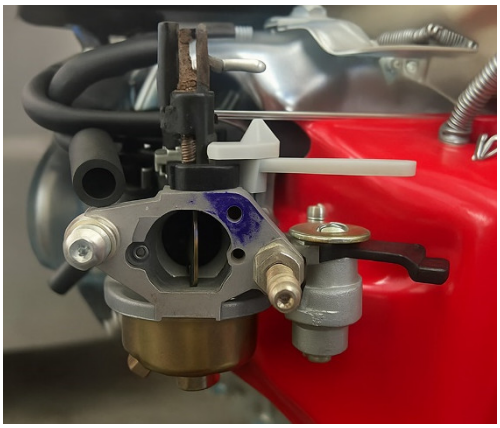
(a)



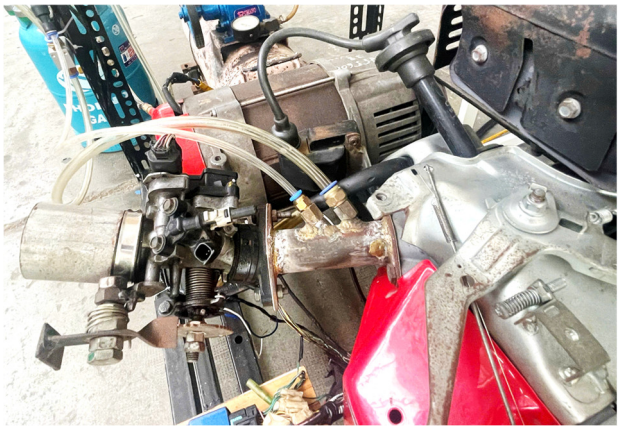
(b) (c)

Hình 6. Lắp đặt, điều chỉnh cảm biến vị trí trục khuỷu

Để bố trí các vòi phun nhiên liệu khí trên đường nạp, bộ chế hòa khí nguyên bản của động cơ GX390 (hình 6a) được tháo bỏ và thay thế bằng một ống thép không gỉ đường kính 27mm và chiều dài 155mm. Trên ống này, hai đầu nối được khoan và hàn để lắp đặt hai vòi phun kép có đường kính thay đổi từ 4 đến 10mm, được bố trí nghiêng khoảng 45° so với trục ống nạp (hình 6b). Cấu hình này giúp tối ưu hóa lưu lượng và khả năng hòa trộn của nhiên liệu khí đi vào buồng đốt, đồng thời đảm bảo phù hợp với các điều kiện vận hành khác nhau và các kích thước ống dẫn tương ứng. Ngoài ra, họng nạp của xe máy sử dụng hệ thống phun xăng điện tử Honda được lắp đặt phía trước cụm đường nạp cải tạo. Họng nạp này tích hợp ba cảm biến gồm cảm biến vị trí bướm ga (TPS), cảm biến áp suất đường nạp (MAP) và cảm biến nhiệt độ khí nạp (IAT), cung cấp tín hiệu đầu vào cho ECU nhằm ước lượng lưu lượng khí nạp và điều chỉnh chính xác lượng nhiên liệu phun vào động cơ.



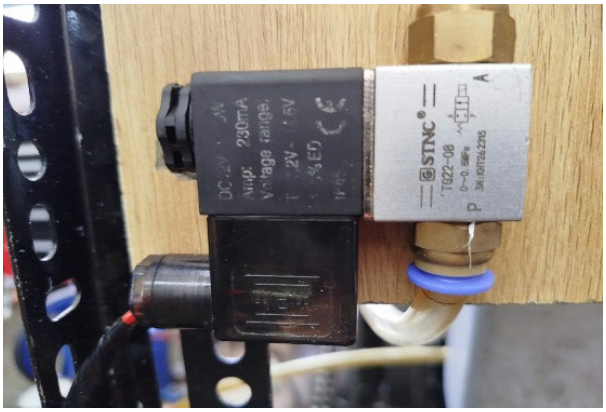
(a)



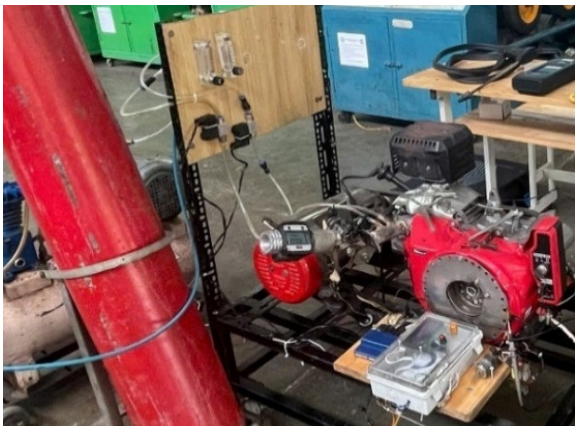
(b)

Hình 7. Cải tạo đường nạp và lắp đặt cụm vòi phun kép

Hai van điện từ IP65 (vòi phun kép nhiên liệu khí) với đường kính van ống dẫn nhiên liệu khí 10mm được lắp đặt với hai đường cấp nhiên liệu khí, việc thay đổi kích thước đầu nối giúp thay đổi đường kính ống dẫn nhiên liệu khí, phù hợp sử dụng điều khiển đa nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen. Van được điều khiển bằng nguồn điện 8 - 12V.



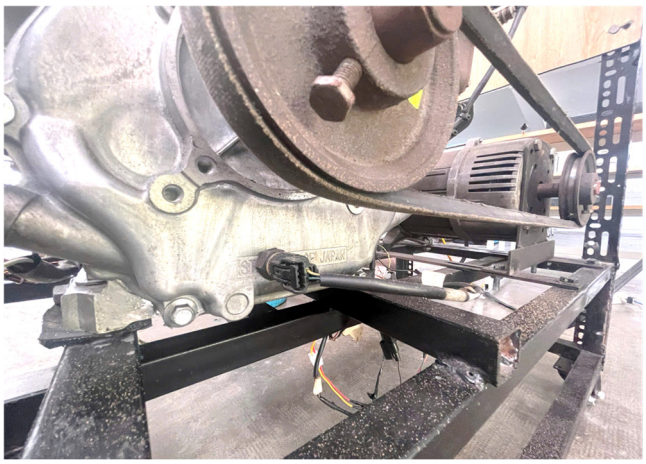
(a)



(b)

Hình 8. Van điện từ cấp nhiên liệu khí IP65 (a) và hệ thống cấp nhiên liệu khí (b)

Ngoài các cảm biến nêu trên, cảm biến nhiệt độ dầu bôi trơn được lắp đặt tại cácte (hình 8a) để ECU nhận biết chính xác trạng thái làm việc của động cơ. Bên cạnh đó, nhằm hiệu chỉnh hệ số tương đương của hỗn hợp nhiên liệu không khí, oxy dư trong khí thải được xác định thông qua cảm biến lambda (hình 9b). Tín hiệu từ cảm biến này được truyền về ECU, cho phép xác định hỗn hợp đang ở trạng thái giàu hay nghèo và điều chỉnh lượng nhiên liệu phun tương ứng.



(a)

(b)

Hình 9. Lắp đặt cảm biến nhiệt độ dầu bôi trơn (a) và cảm biến lambda (b)

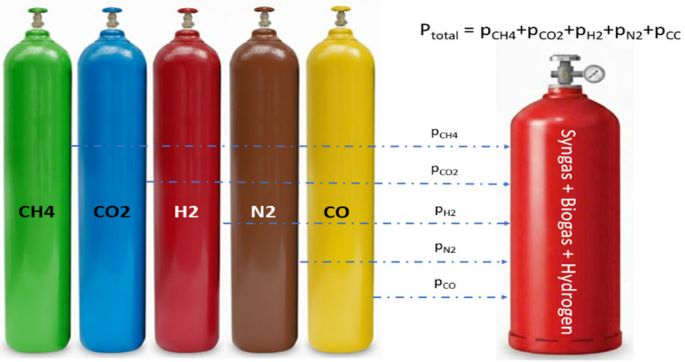
Hệ thống đánh lửa magneto nguyên bản của động cơ GX390 (hình 10a) được thay bằng cụm đánh lửa điện tử tổ hợp sử dụng trên ô tô đời mới. Bộ đánh lửa này tích hợp các bộ phận tạo điện thế cao áp, mạch đóng ngắt dòng điện sơ cấp để tạo tia lửa điện vào chụp bugi (hình 10b). Khi ECU phát tín hiệu điều khiển thì cụm đánh lửa tổ hợp phát sinh tia lửa tại bugi để đốt cháy hỗn hợp nhiên liệu khí.

(a) b)

Hình 10. Bôbin đánh lửa magnheto nguyên bản (a) và hệ thống đánh lửa điều khiển điện tử cải tạo trên động cơ GX390 (b)

Các cảm biến được kết nối với đầu vào ECU-Master. Tín hiệu điều khiển đánh lửa và điều khiển vòi phun ở đầu ra của ECU-Master được gửi đến ECU-Slave. Dựa vào thành phần hỗn hợp nhiên liệu, ECU-Slave tính toán thời gian mở vòi phun thứ nhất và vòi phun thứ hai của bộ vòi phun kép và phát tín hiệu điều khiển các vòi phun. Đồng thời, dựa vào thành phần hỗn hợp nhiên liệu, ECU-Slave điều khiển hệ thống đánh lửa theo góc đánh lửa sớm ứng với thành phần hỗn hợp nhiên liệu xác định.

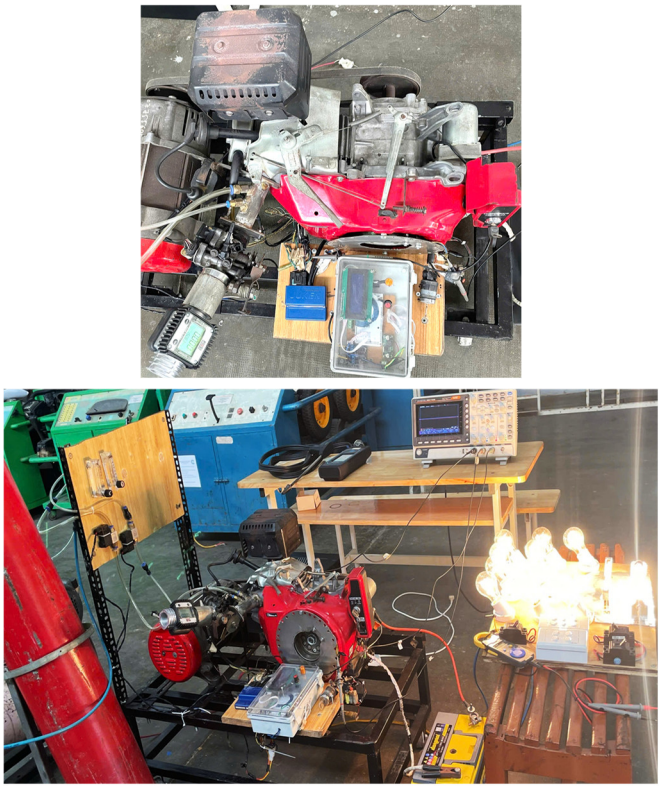
3.5. Thử nghiệm động cơ



Hình 11. Sơ đồ pha trộn hỗn hợp nhiên liệu sygnas-biogas-hydrogen

Các khí thành phần gồm CH_4, H_2, CO và CO_2 được nạp vào bình chứa theo áp suất riêng phần nhiên liệu gồm 30% Syngas, 30% Hydrogen và 40% Biogas. Bình trộn sử dụng là bình chứa khí nén công nghiệp, có khả năng chịu áp suất đến 200bar. Trong mỗi thí nghiệm, tổng áp suất nạp đạt 15bar, tương ứng với khoảng 900 lít hỗn hợp ở điều kiện thường đối với bình 60 lít. Hình 11 minh họa sơ đồ hệ thống pha trộn hỗn hợp syngas-biogas-hydrogen trong thí nghiệm.

Hình 12 thể hiện quá trình thử nghiệm động cơ sử dụng nhiên liệu khí syngas-biogas-hydrogen. Trong quá trình chuyển đổi từ nhiên liệu xăng sang hỗn hợp nhiên liệu khí linh hoạt syngas-biogas-hydrogen, không cần xây dựng lại giản đồ phun. Thay vào đó, với giản đồ phun xăng đã thiết lập trong ECU JUKEN 5 PRO (ECU-Master) được sử dụng kết hợp với ECU-Slave để xử lý thời điểm đánh lửa và thời gian phun phù hợp với hỗn hợp nhiên liệu linh hoạt, đồng thời phát các xung điều khiển cho hệ thống vòi phun kép và mô-đun đánh lửa mới. Phương pháp này cho phép chuyển đổi thuận tiện các động cơ phun xăng thành động cơ sử dụng nhiên liệu khí linh hoạt mà không cần tái hiệu chỉnh toàn bộ bản đồ phun, vốn đòi hỏi nhiều thời gian và công sức.



Hình 12. Động cơ Honda GX390 sau cải tạo và quá trình thử nghiệm

Kết quả thử nghiệm cho thấy, động cơ sử dụng nhiên liệu khí linh hoạt syngas-biogas-hydrogen hoạt động ổn định, ECU kiểm soát thành công quá trình cung cấp nhiên liệu theo kết quả mô phỏng. Công suất cực đại của máy phát điện khi chạy bằng xăng là 5,0kW ở tốc độ động cơ 3600 vòng/phút. Khi động cơ chạy ở tốc độ 3000 vòng/phút thì công suất đạt xấp xỉ 4,0kW. Như vậy khi chuyển sang chạy bằng hỗn hợp syngas-biogas-hydrogen, công suất động cơ giảm khoảng 20,2% so với khi chạy bằng xăng. Kết quả này phù hợp với các công trình đã công bố trong các tài liệu tham khảo.

4. KẾT LUẬN

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

- Do tính chất của các nhiên liệu trong hỗn hợp syngas-biogas-hydrogen khác biệt lớn nên chúng cần được cung cấp cho động cơ thông qua bộ vòi phun cặp

đôi để đảm bảo hệ số tương đương của hỗn hợp ổn định khi thành phần nhiên liệu thay đổi trong phạm vi rộng.

- Mô hình điều khiển cung cấp nhiên liệu cho động cơ kiểu ECU-Master/ECU-Slave, trong đó 1 ECU được thiết lập với nhiên liệu gốc và ECU còn lại điều chỉnh thời gian phun theo thành phần nhiên liệu, phù hợp với động cơ làm việc với hỗn hợp nhiên liệu linh hoạt.

- Mô phỏng hoạt động của ECU-Master/ECU-Slave bằng phần mềm Proteus và lập trình vi điều khiển với sự hỗ trợ của AI giúp đơn giản hóa quá trình nghiên cứu hệ thống điều khiển động cơ trước khi chế tạo.

- Động cơ xăng tĩnh tại Honda GX390 có thể được cải tạo thành động cơ sử dụng nhiên liệu khí linh hoạt syngas-biogas-hydrogen với bộ cảm biến của xe gắn máy phun xăng điều khiển điện tử, bộ vòi phun cặp đôi và bộ ECU-Master/ECU-Slave.

- Khi chuyển Honda GX390 sang chạy bằng hỗn hợp 30% syngas-40% biogas-30% hydrogen, công suất động cơ giảm khoảng 20,2% so với khi chạy bằng xăng.

LỜI CẢM ƠN

Công trình này được thực hiện nhờ tài trợ của Bộ Giáo dục và Đào tạo thông qua đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ "Nghiên cứu phát triển mẫu xe máy điện với tầm hoạt động được mở rộng nhờ động cơ chạy bằng nhiên liệu mang hydrogen (EREM)" - Mã số: B2026-DNA-09.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. R. Bates, K. Doelle, "Syngas Use in Internal Combustion Engines - A Review," *Advances in Research*, 10, 1-8, 2017.

[2]. G Sridhar, H V Sridhar, S Dasappa, P J Paul, N K S Rajan, H S Mukunda, "Development of producer gas engines," in *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers*, 219, 423-438, 2005.

[3]. H. Fy, A. Ara, S. Sa, "Trends of syngas as a fuel in internal combustion engines," *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 401587, 2014.

[4]. C. D. Rakopoulos, C. N. Michos, "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*, 49, (10), 2924-2938, 2008.

[5]. M. Christensen, A. Hultqvist, B. Johansson, "Demonstrating the Multi Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Variable Compression Ratio," *SAE Technical Papers,* 108, 1999.

[6]. Wood BD, *Applications of thermo-dynamics*. Addison-Wesley, 1982.

[7]. Food and Agricultural Organization of the United Nation, *Wood gas as engine fuel*. Rome, Italy, 1986

[8]. U. Bossel, "Well-to-Wheel Studies, Heating Values, and the Energy Conservation Principle," *European Fuel Cell Forum,* 2003.

[9]. S. Szwaja, V. B. Kovacs, A. Bereczky, A. Penninger, "Sewage sludge producer gas enriched with methane as a fuel to a spark ignited engine," *Fuel Processing Technology*, 110, 160-166, 2013.

[10]. A. Shah, R. Srinivasan, S. D. F. To, E. P. Columbus, "Performance and emissions of a spark-ignited engine driven generator on biomass based syngas," *Bioresource technology*, 101, (12), 4656-4661, 2010.

[11]. F. Y. Hagos, A. R. A. Aziz, S. A. Sulaiman, "Methane enrichment of syngas (H_2/CO) in a spark-ignition direct-injection engine: Combustion, performance and emissions comparison with syngas and Compressed Natural Gas," *Energy*, 90, 2006-2015, 2015.

[12]. X. Kan, D. Zhou, W. Yang, X. Zhai, C. H. Wang, "An investigation on utilization of biogas and syngas produced from biomass waste in premixed spark ignition engine," *Applied Energy*, 212, 210-222, 2018.

[13]. B. V. Ga, T. V. Nam, T. T. Tung, "A Simulation of Effects of Compression Ratios on the Combustion in Engines Fueled With Biogas with Variable CO_2 Concentrations," *Journal of Engineering Research and Application*, 3, 5, 516-523, 2013.

[14]. H. L. Yip, et al., "A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion," *Applied Sciences*, 9, (22), 4842, 2019.

[15]. B. V. Ga et al., "Flexible syngas-biogas-hydrogen fueling spark-ignition engine behaviors with optimized fuel compositions and control parameters," *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, (18), 6722-6737, 2023.

[16]. V. G. Bui, T. M. T. Bui, V. G. Nguyen, V. N. Tran, L. B. T. Truong, L. H. P. Pham, "Concept of twining injector system for spark-ignition engine fueled with syngas-biogas-hydrogen operating in solar-biomass hybrid energy system," *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, (18), 6871-6890, 2023.

[17]. Bùi Thị Minh Tú, Ngô Tấn Thống, Bùi Văn Hùng, "Nghiên cứu phát triển bộ điều khiển điện tử cho động cơ sử dụng nhiên liệu khí tái tạo linh hoạt Syngas-Biogas-Hydrogen," *Tuyển tập Hội nghị Cơ học Thủy khí toàn quốc lần thứ 25,* 724-735, 2022.

[18]. Nguyen Huu Hieu, Bui Van Hung, Ho Tran Ngoc Anh, Nguyen Minh Tien, "Simulation of ECU in proteus for direct injection controlling flexible syngas-biogas-hydrogen blend in dual fuel engine," *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, 23, 9B, 114-121, 2025

[19]. B. T. M. Tu, P. Van Quang, V. A. Vu, "Technique of Supplying Syngas-Biogas-Hydrogen to SI Engine," in *Proceedings of the 4th Annual International Conference on Material, Machines, and Methods for Sustainable Development* (MMMS2024), Springer Nature Switzerland, 183-189, 2025.

AUTHORS INFORMATION

Do Phu Nguu[1], Bui Van Hung[1], Le Khac Binh[2]

[1]Danang University of Technology and Education, The University of Danang, Vietnam

[2]Vinh University of Technology Education, Vietnam