

CẢI THIỆN QUÁ TRÌNH CHÁY ĐỘNG CƠ CHẠY BẰNG BIOGAS NGHÈO NHỜ CUNG CẤP BỔ SUNG HYDROXYL (HHO)

COMBUSTION IMPROVEMENT OF ENGINE FUELED WITH POOR BIOGAS BY BLENDING HYDROXYL (HHO)

Bùi Văn Ga, Bùi Thị Minh Tú, Trương Lê Bích Trâm, Võ Như Tùng, Đỗ Xuân Huy

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; buivanga@ac.udn.vn

Tóm tắt - Hiệu suất của động cơ chạy bằng biogas nghèo pha HHO với hàm lượng bé được cải thiện nhờ tính năng ưu việt của hydrogen đối với quá trình cháy. Thêm vào đó, khi pha HHO vào biogas với hàm lượng cao, công suất của động cơ tăng mạnh do giảm lượng khí trơ CO_2 , N_2 nạp vào xi lanh. Hỗn hợp HHO và biogas giúp động cơ làm việc ổn định với hệ số tương đương rất bé nên hiệu suất của động cơ được cải thiện khi hoạt động ở tải cục bộ. Khi tăng hàm lượng HHO pha vào biogas thì góc đánh lửa sớm tối ưu của động cơ giảm. Khi cố định góc đánh lửa sớm, nếu tăng hàm lượng HHO trong biogas thì áp suất và nhiệt độ cực đại của quá trình cháy đều tăng đồng thời đỉnh đường cong của các đại lượng này dịch chuyển về gần điểm chết trên. Nồng độ NO_x tăng theo hàm lượng HHO pha vào biogas. Nồng độ NO_x tăng 1,5 lần và 3,5 lần tương ứng với khi pha 20% và 30% HHO vào biogas chứa 60% CH_4 so với khi chạy bằng biogas.

Từ khóa - Nhiên liệu tái tạo; Biogas; Hydroxyl HHO; Hydrogen; Động cơ biogas

Abstract - The performance of the engine fueled with poor biogas enriched with HHO is enhanced due to excellent properties of hydrogen for combustion. Besides, with high HHO content in the biogas, the power of the engine increases sharply due to the reduction of inert gas CO_2 , N_2 supplied into the cylinder. The engine fueled with HHO-biogas blend can operate with high stability under low equivalence ratio, thereby the performance of the engine is improved at part load regimes. When the HHO content in the biogas increases, the optimum advanced ignition angle of the engine decreases. At a given ignition timing, if the HHO content in the biogas is increased, the maximum pressure and temperature of the combustion process increase simultaneously with the peak of the curves moving towards the top dead center. NO_x concentrations increase with the HHO content in biogas. As the engine fueled with biogas containing 60% CH_4 enriched by 20% and 30% HHO, the NO_x concentration in exhaust gas increases by 1.5 times and 3.5 times, respectively, compared to biogas only running mode.

Key words - Renewable fuels; Biogas; Hydroxyl HHO; Hydrogen; Biogas engines

1. Giới thiệu

Tiết kiệm nhiên liệu hóa thạch và giảm phát thải chất khí gây hiệu ứng nhà kính để hạn chế mức độ gia tăng nhiệt độ trái đất đã thôi thúc các nhà khoa học trên thế giới nghiên cứu tìm kiếm các nguồn nhiên liệu thay thế và hoàn thiện thiết kế động cơ. Trong số các giải pháp đó, giải pháp sử dụng biogas hay kết hợp biogas và hydrogen như nhiên liệu thay thế có nhiều triển vọng [1], [2]. Khó khăn của giải pháp này liên quan đến việc lưu trữ hydrogen để sử dụng trên các thiết bị khác nhau, đặc biệt là trên phương tiện vận chuyển cơ giới. Hydrogen có mật độ năng lượng theo thể tích thấp, rất khó hóa lỏng nên đòi hỏi thiết bị lưu trữ đặc biệt. Trên ô tô thường phải nén hydrogen trong bình chứa đến 700 bar so với bình chứa 200 bar đối với khí thiên nhiên để đảm bảo cùng quãng đường vận hành. Việc chế tạo thiết bị sinh khí hydrogen và tích hợp nó vào phương tiện vận chuyển cơ giới cũng rất khó khăn và tốn kém [3]. Vì thế, phương án sử dụng hydrogen trong hỗn hợp khí với oxygen (gọi là khí hydroxyl, HHO) được giới khoa học quan tâm trong những năm gần đây [4-5].

Hỗn hợp hydrogen-oxygen được điều chế từ quá trình điện phân nước, gồm H_2 và O_2 theo tỉ lệ 2:1. Trong điều kiện áp suất khí trời và hệ số tương đương $\phi = 1$, HHO cháy khi nhiệt độ đạt 570°C . Năng lượng cần thiết để đánh lửa hỗn hợp này là $20 \mu\text{J}$. Quá trình cháy xảy ra khi hàm lượng thể tích hydrogen trong hỗn hợp HHO nằm trong khoảng 4% - 95%. Khi cháy, lượng nhiệt sinh ra là $241,8 \text{ kJ}$ đối với 1 mole HHO. Khí HHO có thể sử dụng phối hợp với các loại nhiên liệu truyền thống trên động cơ đốt trong để cải thiện hiệu suất và giảm phát thải ô nhiễm môi trường [6-7].

HHO được sản xuất theo nhu cầu sử dụng tại chỗ, không lưu trữ. Đối với động cơ đốt trong, HHO được sản xuất từ bình điện phân và được cung cấp bổ sung trực tiếp vào đường nạp cùng với các loại nhiên liệu khác. Thiết bị sinh khí HHO hoạt động khi động cơ chạy và dừng khi động cơ tắt. Thiết bị sản xuất HHO nhỏ gọn, có thể bố trí tích hợp trên phương tiện giao thông cơ giới. Do không phải lưu trữ nhiên liệu khí nên khắc phục được những nhược điểm đối với bình chứa nhiên liệu áp lực cao.

Hiệu quả công tác của động cơ khi bổ sung HHO vào các loại nhiên liệu khác đã được nhiều nhà khoa học công bố. Musmar và Al-Rousan đã thiết kế, chế tạo, lắp đặt và thực nghiệm bộ sinh khí HHO trên động cơ xăng. Kết quả cho thấy, mức độ phát thải NO_x , CO và mức tiêu hao nhiên liệu giảm tương ứng 50%, 20%, và 30%, khi bổ sung khí HHO [8-9]. Hydrogen trong hỗn hợp HHO có tốc độ cháy cao nên khi hòa trộn với nhiên liệu truyền thống, hỗn hợp nhiên liệu với không khí đồng đều và cháy hoàn toàn. Mặt khác, hydrogen có giới hạn cháy rộng nên nó có thể cháy với hỗn hợp nghèo. Việc giảm thời gian lan truyền lửa và tăng tốc độ tỏa nhiệt là do hydrogen có năng lượng đánh lửa thấp và tốc độ cháy cao hơn các loại nhiên liệu truyền thống [10]. Do H_2 có thể cháy với hỗn hợp rất nghèo nên có thể thay đổi thành phần hỗn hợp để điều chỉnh tải động cơ [11]. Khi làm việc với hỗn hợp nghèo, nhiệt độ cháy thấp nên mức độ phát thải NO_x giảm đáng kể.

So sánh tính năng của động cơ khi bổ sung cùng thể tích HHO và H_2 vào đường nạp được trình bày trong công trình [12-13]. Một cách tổng quát mà nói, hỗn hợp nhiên liệu HHO-xăng có tính năng tương tự với hỗn hợp H_2 -xăng, nếu không muốn nói là tốt hơn. Hỗn hợp nhiên liệu HHO-xăng cải thiện hiệu suất nhiệt, và đặc biệt là sự

ổn định khi động cơ làm việc với hỗn hợp nghèo tốt hơn so với hỗn hợp H_2 -xăng. HHO làm giảm thời gian tỏa nhiệt. Điều này có lợi vì khởi đầu và kết thúc quá trình cháy diễn ra trong điều kiện đẳng tích (chu trình nhiệt động học lý tưởng), vì thế hiệu suất nhiệt của động cơ được cải thiện. Điểm khác biệt ở đây là HHO có chứa O_2 với hệ số tương đương $\phi = 1$ nên khí cháy không cần cấp không khí. Trong khi đó, H_2 phải hòa trộn với O_2 từ không khí có chứa N_2 . Vì vậy công suất động cơ bổ sung HHO cao hơn công suất động cơ bổ sung H_2 trong cùng điều kiện vận hành [12]. Khi bổ sung thêm H_2 vào đường nạp thì nó chiếm chỗ của không khí làm giảm hệ số nạp và có thể gây ra hiện tượng cháy không hoàn toàn do thiếu O_2 . Động cơ chạy bằng nhiên liệu bổ sung HHO có mức độ phát thải CO thấp hơn [14] nhờ hỗn hợp cháy hoàn toàn.

Nghiên cứu ứng dụng HHO trên động cơ cỡ nhỏ cũng được các nhà khoa học quan tâm [15-16]. Musmar và Al-Rousan [9], nghiên cứu tính năng của động cơ 1 xy lanh Honda G 200 chạy bằng khí HHO. HHO sinh ra từ bộ điện phân nước sử dụng điện cực bằng thép không gỉ 316-L. Kết quả cho thấy, khi chạy bằng khí HHO, NO_x giảm 54% và CO giảm 20%. Do không có bộ điều chỉnh công suất điện cung cấp cho bình sinh khí nên nồng độ HHO thay đổi theo tốc độ động cơ. Mới đây Leelakrishnan và Suriyan [17] nghiên cứu ảnh hưởng của HHO bổ sung đến tính năng của động cơ xăng 4 kỳ, 1 xi lanh, 5.4 kW. HHO được nạp vào đường nạp động cơ giữa lọc khí và bộ chế hòa khí. Kết quả cho thấy, công suất có ích tăng 5%, hiệu suất tăng 7%, suất tiêu hao nhiên liệu giảm 6%, phát thải HC, CO, NO_x giảm lần lượt 88%, 94% và 58% ở chế độ toàn tải. Kết quả tương tự cũng được công bố trong công trình của Al-Rousan [8]. Trong công trình này, Al-Rousan cung cấp HHO tương quan với lượng không khí nạp vào động cơ bằng cách điều chỉnh dòng điện cung cấp cho bộ điện phân HHO. Kết quả nghiên cứu của Musmar và Rousan [5] cho thấy, việc bổ sung HHO vào hỗn hợp nạp giúp làm giảm suất tiêu hao nhiên liệu, NO_x , CO lần lượt là 30%, 50% và 20%.

Khí HHO có nhiều ưu điểm nên việc nghiên cứu áp dụng nó trên động cơ đốt trong luôn là vấn đề thời sự. Các nghiên cứu tập trung phát huy những lợi thế của nó về cải thiện quá trình cháy, tăng hiệu suất, đồng thời hạn chế mức độ gia tăng NO_x ở chế độ toàn tải do tăng nhiệt độ cháy.

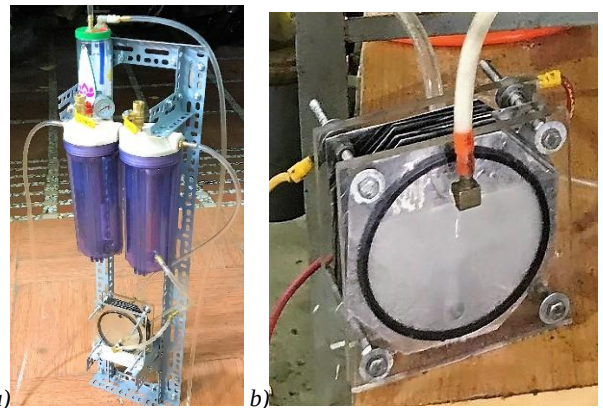
Để góp phần phát triển công nghệ ứng dụng năng lượng tái tạo nhằm tiết kiệm nhiên liệu hóa thạch và giảm phát thải chất khí gây hiệu ứng nhà kính, nhóm GATEC của Đại học Đà Nẵng từ nhiều năm nay đã nghiên cứu ứng dụng biogas trên động cơ tĩnh tại và động cơ của phương tiện vận chuyển cơ giới [18]. Biogas có chỉ số octane cao nên có thể tăng tỉ số nén của động cơ để nâng cao hiệu suất nhiệt [19]. Tuy nhiên, do biogas có chứa tạp chất CO_2 nên tốc độ cháy của hỗn hợp giảm. Để nâng cao hiệu quả công tác của động cơ chạy bằng biogas chúng ta cần lựa chọn các thông số động cơ phù hợp để tận dụng những ưu điểm và hạn chế nhược điểm của nhiên liệu [20-21].

Khó khăn chính liên quan đến chuyển đổi động cơ truyền thống sang chạy bằng biogas, nhất là biogas có hàm lượng CH_4 thấp, liên quan đến tốc độ cháy của hỗn hợp biogas - không khí thấp, kể cả động cơ đánh lửa cưỡng bức cũng như động cơ tự cháy do nén [22-24]. Do đó, việc pha

vào biogas một loại nhiên liệu bổ sung có tính năng cháy cao sẽ góp phần khắc phục khó khăn này. Trong chiều hướng đó thì việc pha hydrogen vào biogas [25] rất phù hợp.

Nhóm GATEC hiện đang tiến hành nghiên cứu làm giàu biogas bằng hydrogen sản xuất từ năng lượng mặt trời. Hai phương án ứng dụng hydrogen được nhóm nghiên cứu phát triển: hydrogen đơn chất H_2 và hydroxyl HHO. Hydrogen đơn chất được sản xuất và lưu trữ sau đó pha vào biogas để làm giàu nhiên liệu. Hydroxyl được sản xuất và cung cấp trực tiếp vào động cơ, không qua khâu lưu trữ. Hình 1a là hệ thống sản xuất hydroxyl để cung cấp cho động cơ tĩnh tại. Hình 1b là bình sinh khí hydroxyl kiểu khô mà nhóm nghiên cứu đã thiết kế, chế tạo.

Trong công trình này, nhóm tác giả trình bày kết quả nghiên cứu mô phỏng tính năng công tác và mức độ phát thải ô nhiễm của động cơ kéo máy phát điện Honda GX390 chạy bằng biogas nghèo chứa 60% methane được làm giàu bởi khí hydroxyl với các tỉ lệ khác nhau. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm và đánh giá mô hình tính toán sẽ được giới thiệu trong những công trình sau.



Hình 1. Hệ thống sản xuất khí hydroxyl (a) và bình sinh khí hydroxyl (b)

2. Thiết lập mô hình tính toán

Mô phỏng được thực hiện trên động cơ Honda GX390 có các thông số kỹ thuật cơ bản giới thiệu trên Bảng 1. Không gian tính toán gồm buồng cháy và xi lanh động cơ có thể tích thay đổi trong quá trình hoạt động. Do đó lưới động (dynamic mesh) được áp dụng trong không gian tính toán [26].

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của động cơ Honda GX390

	Đường kính xi lanh (mm)	88
	Hành trình piston (mm)	64
	Dung tích xi lanh (cm^3)	389
	Tỉ số nén	8,2
	Công suất cực đại (kW)/tải tốc độ (vòng/phút)	8,7/3600

Quá trình tính toán được bắt đầu từ đầu kỳ nén đến khi bắt đầu quá trình thải. Trong nghiên cứu mô phỏng này, tính toán được thực hiện theo chu trình lý thuyết với giả định các quá trình bắt đầu và kết thúc tại các điểm chết trên (ĐCT) và điểm chết dưới (ĐCD). Để tiện theo dõi diễn biến của quá

trình sinh công (nén-cháy-dãn nở), trong công trình này, góc 0°TK (0° góc quay trục khuỷu) của góc quay trục khuỷu φ được qui ước tại ĐCD khi bắt đầu quá trình nén và góc đánh lửa sớm φ_s được tính theo 0°TK trước ĐCT khi kết thúc quá trình nén. Quá trình cháy rời của hỗn hợp khí được mô phỏng bằng mô hình k- ϵ . Quá trình hình thành các chất chính trong sản phẩm cháy được xác định theo cân bằng nhiệt động hóa học, riêng nồng độ NO_x được xác định theo động học phản ứng.

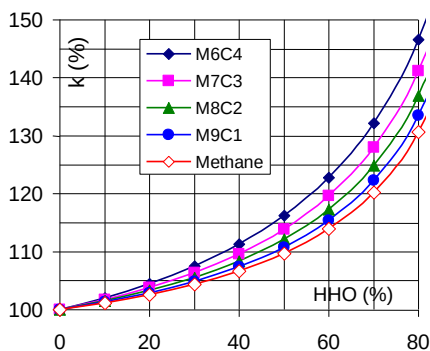
Trên thực tế tốc độ hình thành NO_x bé hơn nhiều so với những chất khác trong sản phẩm cháy. Tốc độ này phụ thuộc mạnh vào nhiệt độ thường được biểu diễn bằng cơ chế Zeldovich mở rộng như sau [27]:



Trong đó, k_i là hằng số tốc độ phản ứng theo chiều thuận và k_{-i} là hằng số tốc độ phản ứng theo chiều ngược.

Nhiên liệu biogas được ký hiệu MxCy , trong đó $10x$ là tỉ lệ phần trăm của CH_4 và $10y$ là tỉ lệ phần trăm của CO_2 trong biogas. Trong phần tính toán sau đây, nhóm tác giả sử dụng nhiên liệu biogas nghèo M6C4. Hàm lượng HHO trong nhiên liệu được tính bằng tỉ lệ thể tích HHO trong tổng thể tích của hỗn hợp HHO và biogas. Ví dụ, hỗn hợp nhiên liệu biogas M6C4 được pha 20% HHO có thành phần như sau: CH_4 (48%), CO_2 (32%), H_2 (13,32%) và O_2 (6,68%).

Hydrogen có nhiệt độ cháy đoạn nhiệt cao, tốc độ cháy lớn và có thể cháy với hỗn hợp rất nghèo. Tuy nhiên, nhiệt trị thấp tính theo thể tích chỉ $10,8 \text{ MJ/m}^3$, thấp hơn nhiều so với nhiệt trị thấp của methane là $35,8 \text{ MJ/m}^3$. Trong điều kiện tiêu chuẩn, để cháy hoàn toàn 1 m^3 hydrogen chỉ cần $0,5 \text{ m}^3$ oxygen. Trong khi đó, để đốt cháy hoàn toàn 1 m^3 methane phải cần đến 2 m^3 oxygen. Như vậy, với cùng một thể tích xy lanh động cơ cho trước, hydrogen chiếm thể tích lớn hơn methane nhưng do nhiệt trị thể tích của hydrogen thấp nên nhiệt lượng cung cấp cho động cơ nên năng lượng hydrogen mang vào động cơ không chênh lệch nhiều so với khi chạy bằng methane.



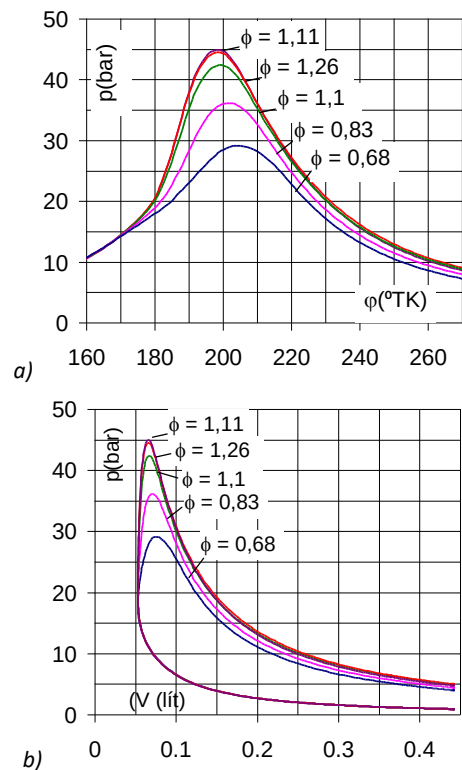
Hình 2. Biến thiên tỉ lệ năng lượng của hỗn hợp nhiên liệu trên năng lượng biogas (hệ số năng lượng k) theo hàm lượng HHO pha vào biogas trong điều kiện tiêu chuẩn (0°C , 1 bar)

Khi pha HHO vào biogas, do HHO có chứa sẵn oxygen đủ để đốt cháy hoàn toàn lượng hydrogen nên chỉ cần lượng

không khí đủ để đốt cháy methane. Cùng một thể tích xy lanh cho trước, phần oxygen cần thiết để đốt cháy hydrogen không lấy từ không khí nên không kèm theo khí trơ N_2 . Do đó, lượng nhiên liệu tổng thể cung cấp cho động cơ tăng nên tỉ lệ năng lượng của hỗn hợp nhiên liệu trên năng lượng biogas, gọi là hệ số năng lượng k , tăng theo hàm lượng HHO pha vào nhiên liệu. Khi tỉ lệ HHO dưới 50%, hệ số k tăng chậm nhưng khi vượt quá giá trị này, k tăng rất nhanh. Biogas càng nghèo thì ảnh hưởng của HHO đến hệ số k càng lớn (Hình 2).

Khi pha HHO vào biogas với hàm lượng nhỏ hơn 40%, hệ số năng lượng k chỉ dao động quanh giá trị 10%. Điều này cho thấy tác động về mặt năng lượng khi pha HHO vào biogas không lớn. Tuy nhiên, do hydrogen có những tính năng vượt trội về tốc độ lan truyền ngọn lửa nên nó giúp cải thiện quá trình cháy từ đó hiệu suất tổng thể của động cơ được cải thiện. Những đặc điểm này sẽ được phân tích, đánh giá trong phần tiếp theo của công trình.

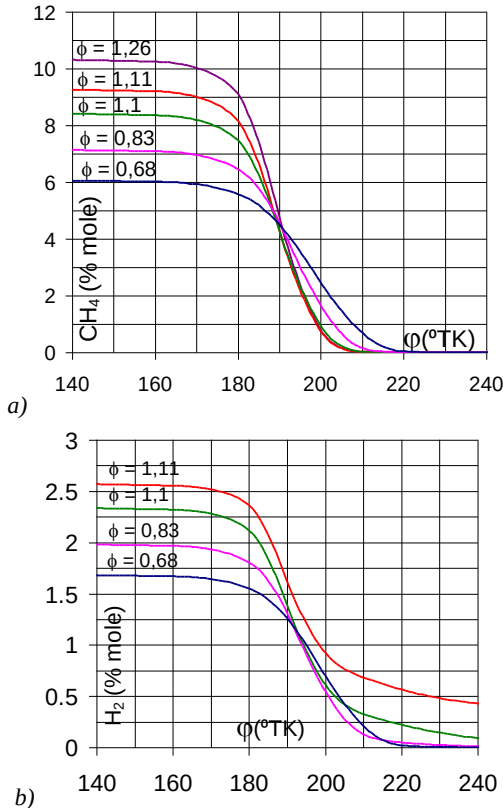
3. Kết quả và bình luận



Hình 3. Ảnh hưởng của hệ số tương đương ϕ đến đường cong áp suất (a) và đồ thị công chi thị (b) (Biogas M6C4 pha 20% HHO, $n=3000$ vòng/phút, $\varphi_s = 20^\circ\text{TK}$)

Hình 3a và Hình 3b, giới thiệu ảnh hưởng của hệ số tương đương ϕ đến biến thiên áp suất trong xy lanh và đồ thị công của động cơ chạy bằng biogas M6C4 được pha 20% HHO ở tốc độ 3000 vòng/phút với góc đánh lửa sớm $\varphi_s = 20^\circ\text{TK}$. Cũng như các loại nhiên liệu khác, khi hỗn hợp nghèo, tốc độ cháy thấp nên áp suất cực đại thấp và cách xa điểm chết trên (ĐCT). Tính toán mô phỏng cho thấy, khi sử dụng biogas nghèo M6C4, động cơ không chạy được với hỗn hợp có hệ số tương đương nhỏ hơn 0,8. Khi pha 20% HHO, động cơ có thể chạy với hỗn hợp nghèo đến 0,6. Diện tích đồ thị công (tỉ lệ với công chi thị của động cơ) giảm theo hệ số tương đương của hỗn hợp.

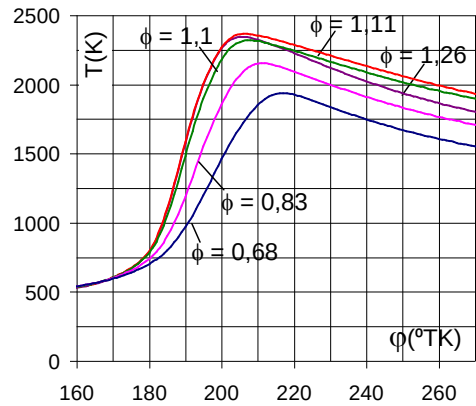
Công chi thị đạt giá trị cực đại khi hỗn hợp hơi giàu ($\phi = 1,11$). Sau đó, nếu tăng hệ số tương đương thì công chi thị giảm.



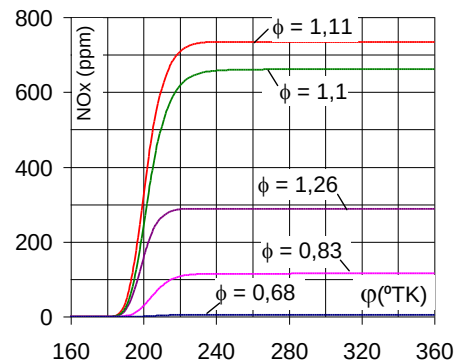
Hình 4. Ảnh hưởng của hệ số tương đương ϕ đến biến thiên nồng độ CH_4 (a) và nồng độ H_2 (b) trong quá trình cháy động cơ chạy bằng biogas M6C4 pha 20% HHO ($n=3000$ vòng/phút, $\phi_s = 20^\circ\text{TK}$, $\phi=1$)

Hình 4a và Hình 4b giới thiệu biến thiên nồng độ CH_4 và H_2 trong quá trình cháy động cơ chạy bằng biogas M6C4 pha 20% HHO. Chúng ta thấy khi hệ số tương đương giảm thì tốc độ tiêu thụ CH_4 , H_2 cũng giảm nhanh. Khi hỗn hợp đậm, phản ứng khí-nước diễn ra mạnh sinh ra hydrogen trong quá trình dẫn nổ theo phản ứng thuận nghịch $\text{CO}_2 + \text{H}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ [28]. Trong điều kiện hoạt động bình thường, CH_4 bắt đầu cháy sau khi đánh lửa ở 160°TK và kết thúc khoảng 220°TK . Trong khi đó, nồng độ H_2 tiến về giá trị 0 phụ thuộc vào điều kiện cân bằng nhiệt động hóa học, tức phụ thuộc vào nhiệt độ, áp suất và thành phần hỗn hợp. Với $\phi < 1$ thì quá trình cháy CH_4 và H_2 kết thúc cùng lúc. Nhưng với $\phi > 1$ thì hầu như chỉ có H_2 còn dư trong khí thải.

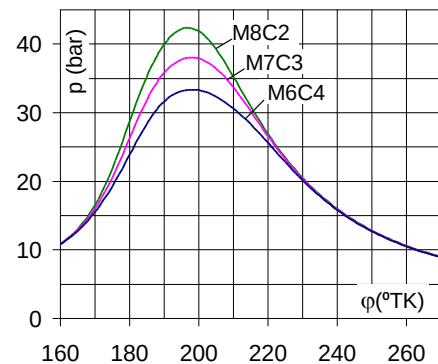
Nhiệt độ trung bình của hỗn hợp khí trong buồng cháy phụ thuộc vào thành phần hỗn hợp. Nhiệt độ trung bình cực đại của hỗn hợp biến thiên từ 1900K đến 2300K khi ϕ thay đổi từ 0,68 đến 1,11 đối với động cơ chạy bằng biogas M6C4 pha 20% HHO (Hình 5). Khi hệ số tương đương tăng quá 1,11 thì nhiệt độ cực đại của hỗn hợp bắt đầu giảm vì hỗn hợp đậm. Nhiệt độ của hỗn hợp ảnh hưởng rất lớn đến nồng độ NO_x trong khí thải động cơ. Hình 6 cho thấy, khi $\phi = 0,68$ hầu như không có NO_x trong khí thải. Khi $\phi = 1,11$ thì nồng độ NO_x đạt giá trị lớn nhất khoảng 720ppm, tương ứng với nhiệt độ trung bình của hỗn hợp cao nhất. Khi ϕ lớn hơn 1,11 thì nồng độ NO_x giảm tương ứng với giảm nhiệt độ trung bình của hỗn hợp.



Hình 5. Biến thiên nhiệt độ trung bình trong buồng cháy động cơ khi thay đổi hệ số tương đương ϕ (Biogas M6C4 pha 20% HHO, $n=3000$ vòng/phút, $\phi_s = 20^\circ\text{TK}$)



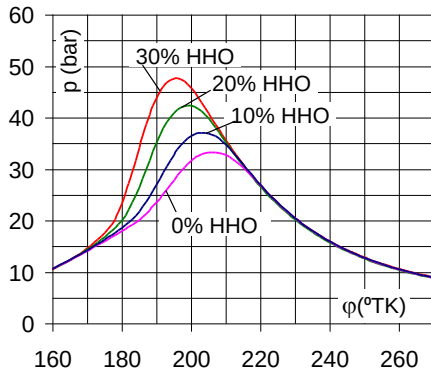
Hình 6. Biến thiên nồng độ NO_x trong buồng cháy động cơ khi thay đổi hệ số tương đương ϕ (Biogas M6C4 pha 20% HHO, $n = 3000$ vòng/phút, $\phi_s = 20^\circ\text{TK}$)



Hình 7. So sánh biến thiên áp suất trong xi lanh khi động cơ chạy bằng biogas M6C4, M7C3, M8C2 pha 10% HHO ($n = 3000$ vòng/phút, $\phi_s = 20^\circ\text{TK}$, $\phi = 1$)

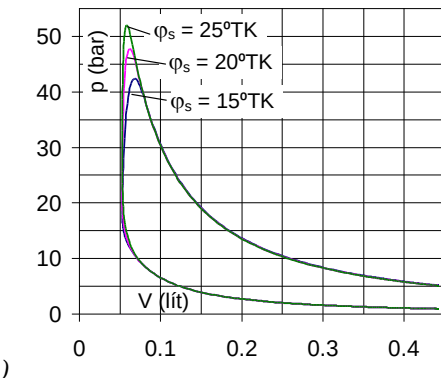
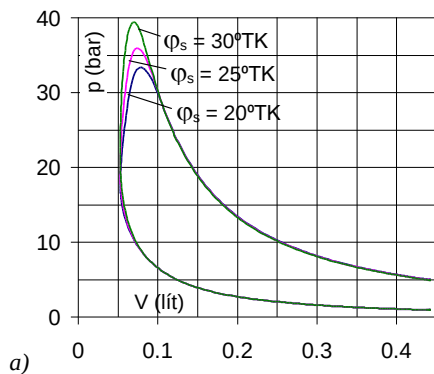
Cùng điều kiện vận hành và cùng lượng pha HHO thì áp suất cực đại càng cao và đỉnh đường cong áp suất càng gần ĐCT khi hàm lượng CH_4 trong biogas càng lớn. Hình 7 cho thấy, áp suất cực đại đạt được 33,32, 38,01 và 42,34 bar tương ứng với hàm lượng CH_4 trong biogas 60%, 70% và 80% với cùng lượng pha HHO 10%. Công chi thị chu trình W_i tương ứng với các nhiên liệu này lần lượt là 0,327, 0,344 và 0,356 kJ/cít. Kết quả này cho thấy, khi động cơ chạy bằng biogas nghèo, công suất động cơ giảm rõ rệt. Trong điều kiện đó, nếu tăng hàm lượng HHO pha vào nhiên liệu thì tính năng công tác của động cơ được cải thiện như thể hiện trên Hình 8. Cùng nhiên liệu M6C4, cùng điều

kiện vận hành 3000 vòng/phút, góc đánh lửa sớm giữ cố định 20°TK và hệ số tương đương $\phi = 1$, áp suất cực đại đạt 33, 36, 42 và 48 bar tương ứng với khi chạy bằng biogas và khi chạy bằng biogas pha HHO với hàm lượng 10, 20 và 30%. Công chi thị chu trình tương ứng với các điều kiện này lần lượt là 0,319, 0,327, 0,342 và 0,367 kJ/ct. Như vậy để duy trì được công suất động cơ khi làm việc với biogas nghèo thì việc pha HHO vào nhiên liệu là giải pháp hiệu quả.



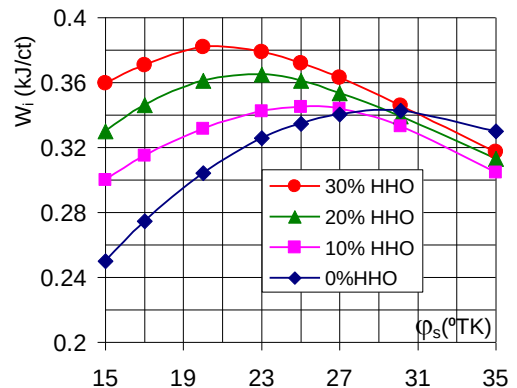
Hình 8. Ảnh hưởng của hàm lượng HHO pha vào biogas M6C4 đến biến thiên đường cong áp suất trong xi lanh ($n = 3000$ vòng/phút, $\phi_s = 20^{\circ}\text{TK}$, $\phi = 1$)

Do nhiên liệu biogas có chứa CO_2 nên tốc độ cháy của hỗn hợp giảm so với khi động cơ chạy bằng xăng. Việc tăng góc đánh lửa sớm là cần thiết để nâng cao hiệu quả quá trình cháy của động cơ. Khi chuyển động cơ tĩnh tại chạy xăng sang chạy bằng biogas thì việc điều chỉnh góc đánh lửa sớm gặp khó khăn về mặt kỹ thuật. Khi pha HHO vào biogas thì tốc độ cháy được cải thiện, do đó góc đánh lửa sớm tối ưu giảm so với khi chạy bằng biogas thuần túy.

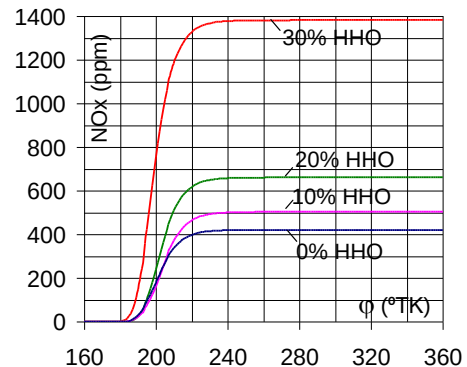


Hình 9. Ảnh hưởng của góc đánh lửa sớm đến đồ thị công khi động cơ chạy bằng biogas M6C4 không pha HHO (a) và khi chạy bằng biogas M6C4 pha 30% HHO (b) ($n = 3000$ vòng/phút, $\phi = 1$)

Các Hình 9a, b giới thiệu ảnh hưởng của góc đánh lửa sớm đến đồ thị công khi động cơ chạy bằng biogas M6C4 không pha HHO và khi pha HHO với hàm lượng 30%. Kết quả cho thấy, khi góc đánh lửa sớm tăng thì áp suất cực đại tăng và đỉnh áp suất cực đại tiến đến gần ĐCT hơn. Tuy nhiên, áp suất cực đại không quyết định công chi thị chu trình mà là diện tích đồ thị công. Hình 10 giới thiệu biến thiên công chi thị chu trình theo góc đánh lửa sớm của động cơ chạy bằng biogas M6C4 không pha HHO và khi pha HHO với hàm lượng 10%, 20% và 30%. Kết quả này cho thấy góc đánh lửa sớm tối ưu là 30, 27, 23 và 18°TK khi động cơ chạy bằng biogas M6C4 và khi chạy bằng biogas M6C4 pha 10%, 20%, 30% HHO. Công chi thị chu trình cực đại tương ứng với các trường hợp này theo thứ tự là 0,342, 0,345, 0,365 và 0,382 kJ/ct. Động cơ Honda GX390 có công suất cực đại 8,7kW ở tốc độ 3600 vòng/phút khi chạy bằng xăng. Nếu hiệu suất cơ giới của động cơ là 0,8 thì công suất có ích của động cơ khi chưa kể tổn thất công bơm là 8,22, 8,28, 8,76 và 9,17kW khi chạy bằng biogas M6C4 và khi chạy bằng biogas M6C4 pha 10, 20, 30% HHO.

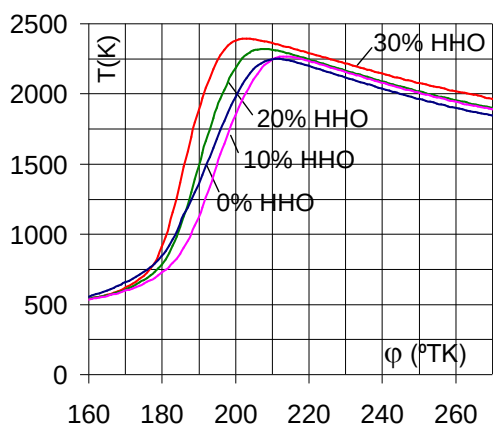


Hình 10. Biến thiên công chi thị chu trình theo góc đánh lửa sớm khi thay đổi hàm lượng HHO pha vào biogas M6C4 ($n = 3000$ vòng/phút, $\phi = 1$)



Hình 11. Ảnh hưởng của hàm lượng HHO pha vào biogas M6C4 đến nồng độ NO_x trong khí thải động cơ ($n = 3000$ vòng/phút, $\phi_s = 20^{\circ}\text{TK}$, $\phi = 1$)

Hình 11, giới thiệu biến thiên của nồng độ NO_x trong hỗn hợp khí cháy khi thay đổi thành phần HHO pha vào nhiên liệu biogas M6C4. Kết quả cho thấy, nồng độ NO_x tăng theo hàm lượng HHO pha vào biogas. Khi pha 10%, 20% HHO, nồng độ NO_x tăng nhẹ. Nhưng khi hàm lượng HHO tăng lên 30% thì nồng độ NO_x tăng rất mạnh. Nồng độ NO_x trong khí thải đạt 500, 670, 1390ppm khi pha 10%, 20% và 30% HHO so với 410ppm khi động cơ chạy bằng biogas M6C4 không pha HHO.



Hình 12. Ảnh hưởng của hàm lượng HHO pha vào biogas M6C4 đến biến thiên nhiệt độ trung bình của hỗn hợp trong buồng cháy ($n = 3000$ vòng/phút, $\phi_s = 20^\circ\text{TK}$, $\phi = 1$)

NO_x hình thành theo cơ chế Zeldovich mở rộng (các phản ứng 1, 2 và 3). Theo đó, tốc độ hình thành NO_x phụ thuộc mạnh vào nhiệt độ cháy. Hình 12 giới thiệu ảnh hưởng của hàm lượng HHO pha vào biogas đến biến thiên nhiệt độ trung bình của khí cháy. Kết quả cho thấy, khi động cơ chạy bằng biogas M6C4 không pha HHO thì nhiệt độ cực đại đạt 2247K. Nhiệt độ cực đại đạt 2265, 2319 và 2392K tương ứng với khi pha 10, 20 và 30% HHO vào biogas M6C4. Điều này giải thích sự gia tăng nồng độ NO_x theo hàm lượng HHO pha vào biogas.

4. Kết luận

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

- Khi pha dưới 50% HHO vào nhiên liệu biogas thì mức tăng năng lượng chỉ đạt khoảng dưới 15% so với khi sử dụng hoàn toàn biogas, nhưng khi hàm lượng HHO trong hỗn hợp nhiên liệu vượt quá 50% thì tỉ lệ năng lượng tăng rất nhanh do HHO không chứa các khí trơ CO_2 , N_2 .

- Công chỉ thị chu trình của động cơ tăng khi pha HHO vào biogas với hàm lượng bé chủ yếu nhờ cải thiện quá trình cháy do các tính năng ưu việt của hydrogen về tốc độ lan truyền màn lửa cao, năng lượng đánh lửa bé và giới hạn cháy mở rộng.

- Khi pha 30% HHO vào biogas M6C4, động cơ có thể làm việc ổn định với hỗn hợp có $\phi = 0,6$. Do đó khi động cơ làm việc với tải cục bộ, có thể giảm hệ số tương đương của hỗn hợp để nâng cao hiệu suất và giảm phát thải ô nhiễm.

- Công chỉ thị chu trình của động cơ tăng theo hàm lượng HHO pha vào biogas. Khi pha trên 20% HHO vào biogas chứa 60% CH_4 thì công suất của động cơ có thể đạt được công suất khi chạy bằng xăng.

- Góc đánh lửa sớm tối ưu của động cơ giảm khi tăng hàm lượng HHO pha vào biogas. Khi động cơ chạy ở tốc độ 3000 vòng/phút, góc đánh lửa sớm tối ưu là 30, 27, 23 và 18°TK tương ứng với khi động cơ chạy bằng biogas M6C4 và khi chạy bằng biogas M6C4 pha 10%, 20%, 30% HHO.

- Khi cố định góc đánh lửa sớm, nếu tăng hàm lượng HHO trong biogas thì áp suất và nhiệt độ cực đại đều tăng

đồng thời đỉnh của các đường cong này dịch chuyển về phía gần ĐCT.

- Nồng độ NO_x tăng theo hàm lượng HHO pha vào biogas. Với hàm lượng HHO dưới 20%, nồng độ NO_x chỉ tăng nhẹ, khoảng 1,5 lần so với khi sử dụng biogas M6C4. Nhưng khi hàm lượng HHO trên 30%, nồng độ NO_x tăng mạnh, gấp 3,5 lần so với khi chạy bằng M6C4.

Cảm tạ: Các tác giả chân thành cảm ơn Bộ Giáo dục và Đào tạo đã tài trợ việc thực hiện công trình này thông qua Chương trình nghiên cứu Khoa học và Công nghệ cấp Bộ CTB2018-DNA.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Boretti: *Comparison of fuel economies of high efficiency diesel and hydrogen engines powering a compact car with a flywheel based kinetic energy recovery systems*. Int. J. Hydrogen Energy 35 (2010) 8417-8424.
- [2] Bui Van Ga, Tran Van Nam, Nguyen Thi Thanh Xuan: *Utilization of biogas engines in rural area: A contribution to climate change mitigation*. Colloque International RUNSUD 2010, pp. 19-31, Universite Nice-Sophia Antipolis, France, 23-25 Mars 2010.
- [3] C.M. White, R.R. Steeper, A.E. Lutz: *The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review*. Int. J. Hydrogen Energy 31 (2006) 1292-1305.
- [4] F. Ma, Y. Wang, H. Liu, Y. Li, J. Wang, S. Zhao: *Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine*. Int. J. Hydrogen Energy 32 (2007) 5067-5075.
- [5] F. Ma, Y. Wang: *Study on the extension of lean operation limit through hydrogen enrichment in a natural gas spark-ignition engine*. Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) 1416-1424.
- [6] Rajasekaran T.1, Duraiswamy K.2, Bharathiraja M.1 and Poovaragavan S.: *Characteristics of engine at various speed conditions by mixing of HHO with gasoline and LPG*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 10, No. 1, January 2015.
- [7] Changwei Ji and Wang, S.: *Combustion and emissions performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine at idle and lean conditions*. International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010) 346-355.
- [8] A.A. Al-Rousan: *Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold*. Int. J. Hydrogen Energy 35 (2010) 12930-12935.
- [9] S.e.A. Musmar, A.A. Al-Rousan: *Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines*. Fuel 90 (10) (2011) 3066-3070.
- [10] C. Ji, S. Wang: *Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark ignition gasoline engine at lean conditions*. Int. J. Hydrogen Energy 34 (2009) 7823-7834.
- [11] S. Wang, C. Ji, B. Zhang, X. Liu: *Realizing the part load control of a hydrogen-blended gasoline engine at the wide open throttle condition*. Int. J. Hydrogen Energy 39 (2014) 7428-7436.
- [12] S. Wang, C. Ji, J. Zhang, B. Zhang: *Comparison of the performance of a spark-ignited gasoline engine blended with hydrogen and hydrogen-oxygen mixtures*. Energy 36 (2011) 5832-5837.
- [13] S. Wang, C. Ji, J. Zhang, B. Zhang: *Improving the performance of a gasoline engine with the addition of hydrogen-oxygen mixtures*. Int. J. Hydrogen Energy 36 (2011) 11164-11173.
- [14] S. Wang, C. Ji, B. Zhang, X. Liu: *Performance of a hydroxygenblended gasoline engine at different hydrogen volume fractions in the hydroxygen*. Int. J. Hydrogen Energy 37 (2012) 13209-13218.
- [15] Bhardwaj, S., Verma, A.S., and Sharma, S.K.: *Effect of Brown gas on the performance of a four stroke gasoline engine*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (Online), Volume 4, Special Issue 1, February 2014.

- [16] Mohamed M. EL-Kassaby, Yehia A. Eldrainy, Mohamed E. Khidr, Kareem I. Khidr: *Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions*. Alexandria Engineering Journal (2016) 55, 243-251. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.016>.
- [17] E. Leelakrishnan and H. Suriyan: *Performance and emission characteristics of Brown's gas enriched air in spark ignition engine*. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 393-404, February 2013.
- [18] Bùi Văn Ga, Lê Minh Tiến, Trương Lê Bích Trâm, Nguyễn Văn Đông: *Khả năng giảm phát thải CO₂ ở Việt Nam nhờ sản xuất điện năng bằng biogas*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng, số 1(30)/2009, pp. 7-13.
- [19] Bui Van Ga, Tran Van Nam, Tran Thanh Hai Tung: *A Simulation of Effects of Compression Ratios on the Combustion in Engines Fueled with Biogas with Variable CO₂ Concentrations*. Journal of Engineering Research and Application www.ijera.com Vol. 3, Issue 5, Sep-Oct 2013, pp.516-523.
- [20] Bui Van Ga, Tran Van Nam: *Mixer Design for High Performance Biogas SI Engine Converted from A Diesel Engine*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), <http://www.ijert.org>, Vol. 3 Issue 1, January - 2014, pp. 2743-2760.
- [21] Bui Van Ga, Tran Van Nam: *Appropriate structural parameters of biogas SI engine converted from diesel engine*. IET Renewable Power Generation, Volume: 9, Issue: 3, (2015), pp. 255-261, DOI:10.1049/iet-rpg.2013.0329.
- [22] Bui Van Ga, Tran Van Nam, Le Minh Tien, Bui Thi Minh Tu: *Combustion Analysis of Biogas Premixed Charge Diesel Dual Fuelled Engine*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 3 Issue 11, November-2014, pp. 188-194.
- [23] B.V.Ga, N.V.Hai, B.T.M.Tu, B.V.Hung: *Utilization of Poor Biogas as Fuel for Hybrid Biogas-Diesel Dual Fuel Stationary Engine*. International Journal of Renewable Energy, Vol. 5, No. 4, pp. 1007-1015, 2015.
- [24] Ga Van BUI, Tu Thi Minh BUI: *Soot Emission Analysis in Combustion of Biogas Diesel Dual Fuel Engine*. Environmental Science and Sustainable Development, Vol 1, No 2 (2017), pp.1-9.
- [25] 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.
- [26] Bùi Văn Ga, Nguyễn Văn Đông, Bùi Văn Tấn, Nguyễn Quang Trung: *Ảnh hưởng của thành phần H₂ làm giàu biogas đến tính năng công tác và mức độ phát thải ô nhiễm của động cơ dual fuel biogas-diesel*. Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học Thủy khí Toàn quốc lần thứ 20, Cần Thơ, 27-29 tháng 7 năm 2017, Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Tp. HCM, 2018, pp. 238-245.
- [27] Zeldovich, Y. A., D. Frank-Kamenetskii, and P. Sadovnikov: *Oxidation of nitrogen in combustion*. Publishing House of the Acad of Sciences of USSR, 1947.
- [28] Bùi Văn Ga, Phạm Xuân Mai, Trần Văn Nam, Trần Thanh Hải Tùng: *Mô hình hóa quá trình cháy trong động cơ đốt trong*. Nhà Xuất bản Giáo dục, 1997.

(BBT nhận bài: 07/11/2018, hoàn tất thủ tục phản biện: 03/01/2019)