

ẢNH HƯỞNG HÀM LƯỢNG HYDROGEN ĐẾN ĐỘNG CƠ CHẠY BẰNG HỖN HỢP BIOGAS-HYDROGEN TRONG HỆ THỐNG NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO HYBRID

EFFECT OF HYDROGEN CONTENT ON ENGINE USING BIOGAS-HYDROGEN IN HYBRID RENEWAL ENERGY SYSTEM

Hồ Trần Ngọc Anh, Nguyễn Minh Tiến, Nguyễn Lê Châu Thành, Phùng Minh Tùng, Đỗ Phú Nguru, Phạm Minh Mận, Tống Duy Quốc, Trần Phước Dinh, Bùi Văn Hùng*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng¹

Tác giả liên hệ: bvhung@ute.udn.vn

(Nhận bài: 06/9/2022; Chấp nhận đăng: 19/10/2022)

Tóm tắt - Hydrogen có những đặc tính như giới hạn cháy mở rộng, tốc độ cháy cao, hệ số khuếch tán lớn, nhiệt độ đoạn nhiệt cao nên khi pha trộn vào biogas giúp cải thiện hiệu suất và giảm phát thải ô nhiễm. Tuy nhiên, khi hàm lượng hydrogen cao thì phát thải NO_x tăng do tăng nhiệt độ cháy. Mức độ phát thải NO_x có mối quan hệ chặt chẽ với áp suất cực đại trong xi lanh, áp suất cực đại càng cao, mức độ phát thải NO_x càng lớn. Khi động cơ làm việc với $\phi=1$, với hàm lượng hydrogen từ 10-20% thì tính năng kinh tế, kỹ thuật và mức độ phát thải ô nhiễm của động cơ được cải thiện. Tuy nhiên, khi hàm lượng hydrogen trong hỗn hợp tăng vượt quá 20% thì phát thải NO_x tăng mạnh trong khi công chỉ thị chu trình của động cơ thay đổi rất ít theo hàm lượng hydrogen. Nghiên cứu đề xuất hàm lượng thể tích hydrogen trong hỗn hợp với biogas khoảng 20% là tối ưu cả về hiệu suất nhiệt và mức độ phát thải ô nhiễm.

Từ khóa - Năng lượng tái tạo; hydrogen; ô nhiễm không khí; động cơ đánh lửa cưỡng bức.

1. Giới thiệu

Thế giới đang đối mặt với sự gia tăng nhanh chóng nhiệt độ bầu khí quyển do phát thải CO_2 . Theo thỏa thuận khung về chống biến đổi khí hậu toàn cầu tại COP 21, Paris 2015, để đạt được mục tiêu giữ cho nhiệt độ bầu khí quyển không tăng quá 2°C thì ngay từ bây giờ thế giới cần hành động cắt giảm phát thải các chất khí gây hiệu ứng nhà kính để đưa mức phát thải này về mức của thời kỳ tiền công nghiệp vào năm 2050. Mới đây, tại Hội nghị thượng đỉnh thường niên về chống biến đổi khí hậu COP 26, lãnh đạo các quốc gia đã đề ra chiến lược Net-Zero (tức chiến lược trung hòa carbon, mức độ phát thải các chất khí gây hiệu ứng nhà kính thấp hơn mức độ loại bỏ chúng từ môi trường). Tại hội nghị này, Việt Nam cũng cam kết giảm phát thải CO_2 , CH_4 đạt mục tiêu Net-Zero vào năm 2050 [1].

Trong khi chờ đợi sự phát triển công nghệ ứng dụng rộng rãi hydrogen trên động cơ đốt trong thì việc nghiên cứu ứng dụng nhiên liệu tái tạo này để làm giàu những nhiên liệu nghèo khác có ý nghĩa thực tế. Trong số các nhiên liệu khí tái tạo nghèo thì biogas phổ biến nhất. Biogas được sản xuất từ các chất thải hữu cơ, đặc biệt các chất thải trong sản xuất nông nghiệp và chăn nuôi. Biogas chứa CH_4

Abstract - Hydrogen has special properties such as extended combustion limit, high combustion rate, large diffusion coefficient, high adiabatic temperature, so when added to biogas, it helps to improve efficiency and reduce pollutant emissions. However, when the hydrogen content is high, NO_x emissions increase due to the increase in combustion temperature. The level of NO_x emissions is closely related to the maximum pressure in the cylinder, the higher the peak pressure, the greater the NO_x emission level. When the engine is working with $\phi=1$, with a hydrogen content of 10-20%, the economic, technical and emission levels of the engine are improved. However, when the hydrogen content in the mixture increases beyond 20%, NO_x emissions increase sharply while the indicated engine cycle work of the engine increases insignificantly with the hydrogen content. Hydrogen content in the mixture with biogas about 20% is optimal both in terms of thermal efficiency and pollutant emission level.

Key words - Renewable energy; hydrogen; air pollution; SI engine.

có hàm lượng dao động khoảng 60% đến 80%. Nhiệt trị thấp của biogas vì vậy thấp hơn khí thiên nhiên. Mặt khác, do biogas có chứa CO_2 nên tốc độ cháy của nó thấp. Điều này gây ảnh hưởng đến tính năng kinh tế và mức độ phát thải ô nhiễm của động cơ, nhất là các động cơ cỡ nhỏ. Để cải thiện tính năng của biogas người ta có thể pha vào nhiên liệu những chất khí có nhiệt trị cao. Hydrogen có nhiều ưu điểm để làm giàu biogas. Nghiên cứu thực nghiệm của Leung và cộng sự [2] cho thấy, pha một lượng nhỏ hydrogen vào biogas có thể cải thiện đáng kể phạm vi ổn định của ngọn lửa. Zhang và cộng sự [3] nghiên cứu pha hydrogen vào biogas để chạy động cơ đánh lửa cưỡng bức và thấy khi pha hydrogen vào biogas thì tốc độ tỏa nhiệt gia tăng và tính ổn định của quá trình cháy được cải thiện.

Về mức độ phát thải ô nhiễm, các nghiên cứu đã công bố cho thấy, khi pha hydrogen vào khí thiên nhiên thì phát thải hydrocarbon và carbon monoxide (CO) giảm [4]. Tuy nhiên, do tăng tốc độ tỏa nhiệt và tăng nhiệt độ đoạn nhiệt khi pha hydrogen vào nhiên liệu dẫn đến tăng áp suất và nhiệt độ cháy, điều này làm tăng phát thải NO_x và hiện tượng kích nổ [5-7]. Vì thế bên cạnh hiệu quả cải thiện tính năng động cơ khi pha hydrogen vào biogas cũng cần quan tâm đến mức độ phát thải NO_x [8]. Jeong và cộng sự [9]

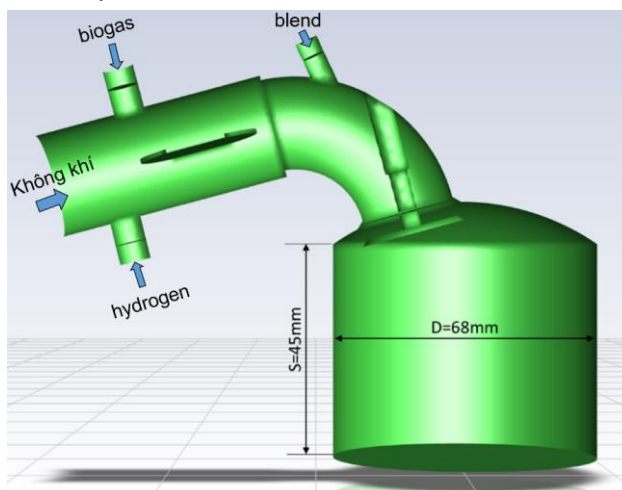
¹ The University of Danang - University of Technology and Education (Ho Tran Ngoc Anh, Nguyen Minh Tien, Nguyen Le Chau Thanh, Phùng Minh Tùng, Do Phu Nguru, Phạm Minh Mận, Tống Duy Quốc, Trần Phước Dinh, Bùi Văn Hùng)

cho rằng, hàm lượng H_2 pha vào biogas cần phải được hạn chế để đảm bảo mức độ phát thải NO_x nằm trong giới hạn cho phép.

Kết quả nghiên cứu trên đây cho thấy, việc phối hợp sử dụng biogas và hydrogen giúp nâng cao hiệu quả quá trình cháy và giảm phát thải ô nhiễm. Giải pháp này có nhiều triển vọng trong việc mở rộng ứng dụng nhiên liệu tái tạo trên động cơ đốt trong [10-12]. Nghiên cứu bằng quan trên đây cho thấy việc làm giàu biogas bằng hydrogen rõ ràng cải thiện được quá trình cháy của động cơ. Tuy nhiên, mặt trái của nó là làm tăng phát thải NO_x , gây ô nhiễm môi trường. NO_x phụ thuộc vào sự phân bố nhiệt độ và thành phần hỗn hợp nhiên liệu/ không khí trong buồng cháy. Vì thế việc nghiên cứu tường tận quá trình tạo hỗn hợp khí động cơ chạy bằng biogas được làm giàu bởi hydrogen là rất cần thiết để nâng cao tối đa hiệu quả sử dụng nhiên liệu tái tạo.

2. Nghiên cứu mô phỏng

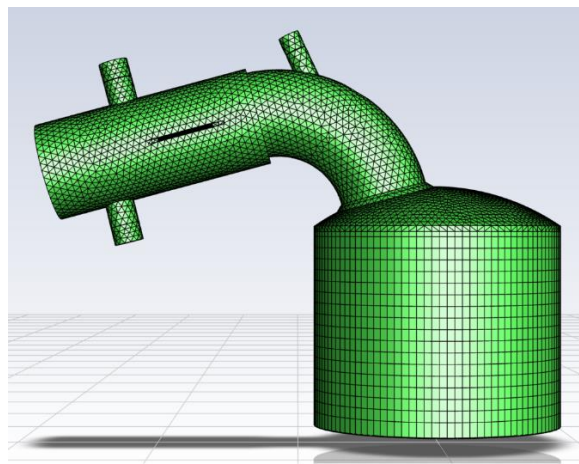
Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng động cơ tĩnh tại đánh lửa cưỡng bức Honda GX200 để cải tạo thành động cơ chạy bằng biogas-hydrogen điều khiển điện tử phù hợp với điều kiện làm việc trong hệ thống năng lượng tái tạo hybrid. Động cơ có đường kính xi lanh 68mm, hành trình piston 45mm, tỉ số nén 8,5. Động cơ phát công suất cực đại 4,8kW ở tốc độ 3600 v/ph khi chạy bằng xăng. Động cơ nguyên thủy được cấp nhiên liệu qua bộ chế hòa khí, đánh lửa magneto với góc đánh lửa sớm ban đầu cố định. Để động cơ có thể chạy bằng nhiên liệu biogas-hydrogen với tỷ lệ thành phần thay đổi, bộ chế hòa khí và hệ thống đánh lửa nguyên thủy của động cơ được thay thế bằng hệ thống phun và đánh lửa điều khiển điện tử. Hình 1 giới thiệu xi lanh và đường nạp động cơ sau khi cải tạo



Hình 1. Xi lanh và đường nạp động cơ sau khi cải tạo

Nghiên cứu được giới hạn ở nội dung tạo hỗn hợp và cháy nên không gian tính toán gồm đường nạp, xi lanh và buồng cháy động cơ. Thiết kế các không gian trên được thực hiện trong GAMBIT. Chia lưới được thực hiện tự động bằng Fluent. Do thể tích xi lanh thay đổi trong quá trình piston chuyển động nên các phần tử trong xi lanh bị biến dạng. Để đảm bảo thể tích các phần tử không quá bé dẫn đến dừng chương trình trong quá trình tính toán,

không gian xi lanh được chia lưới rộng hơn các không gian còn lại. Trong nghiên cứu này, không gian tính toán được chia làm 3 khu vực: Xi lanh, buồng cháy và đường nạp. Mỗi khu vực có kích cỡ chia lưới khác nhau. Hình 2 giới thiệu kết quả chia lưới không gian tính toán. Không gian xi lanh hình dạng các phần tử đơn giản; Không gian buồng cháy, kích thước phần tử bé nhất để tăng độ chính xác khi tính toán sự lan tràn màng lửa; Không gian đường nạp kích thước phần tử lớn hơn để giảm thời gian tính toán. Có tổng số 317.243 phần tử trong không gian tính toán.

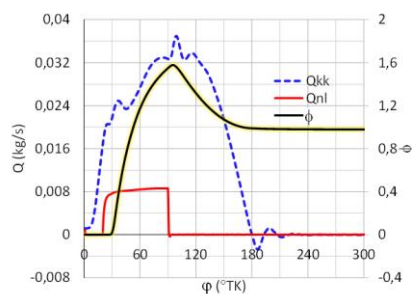
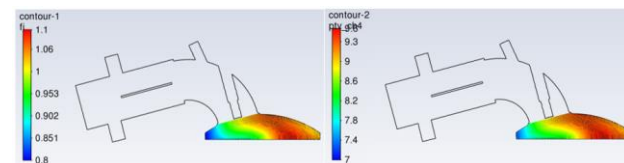


Hình 2. Chia lưới không gian tính toán

Gói động lực học chất lỏng tính toán thương mại (CFD) ANSYS Fluent 2021R1 được sử dụng cho mô phỏng. Sự hỗn loạn của dòng không khí được mô tả bằng mô hình k- ϵ . Các thông số nhiệt động học của hỗn hợp và quá trình cháy được tính toán bằng mô hình Đốt trộn hỗn hợp một phần. Mô hình đốt cháy dẫn đến trạng thái cân bằng nhiệt động của các loài bao gồm cả nồng độ CO . Phát thải NO_x được tính bằng mô hình NO_x nhiệt tích hợp trong phần mềm Fluent dựa trên cơ chế Zeldovich mở rộng

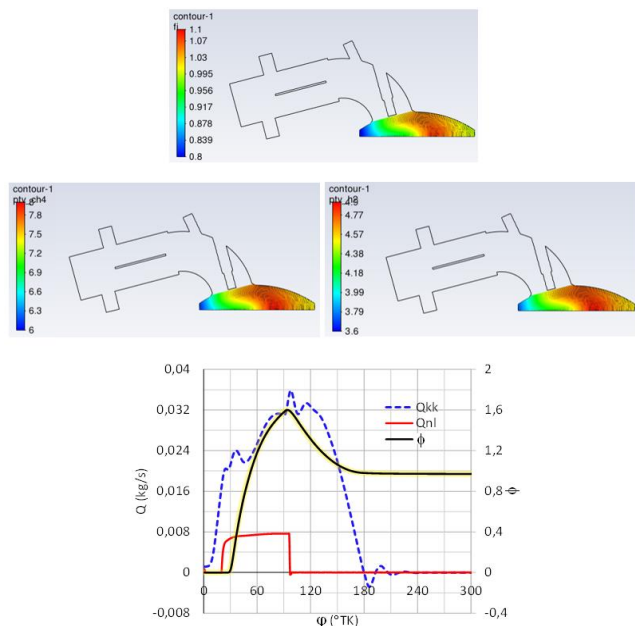
3. Kết quả và bàn luận

3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng hydrogen đến quá trình tạo hỗn hợp



Hình 3. Biến thiên lưu lượng không khí, lưu lượng nhiên liệu và hệ số tương đương theo góc quay trục khuỷu ($n=3600$ v/ph, $M7C3$, $\varphi_p=70^\circ TK$, $p_p=0,5$ bar, $d_p=5,5$ mm)

Hình 3 giới thiệu đường đồng mức hệ số tương đương, nồng độ CH₄ trên mặt cắt ngang buồng cháy tại thời điểm 340°TK (20°TK trước ĐCT) và biên thiên lưu lượng không khí, lưu lượng nhiên liệu, hệ số tương đương theo góc quay trục khuỷu. Động cơ chạy ở tốc độ 3600 vòng/phút. Nhiên liệu M7C3 được cung cấp qua vòi phun đường kính 5,5mm, áp suất phun 0,5 bar. Chúng ta thấy hệ số tương đương trung bình trong buồng cháy đạt giá trị $\phi=1$ nhưng sự phân bố nồng độ CH₄ cũng như hệ số tương đương trong buồng cháy không hoàn toàn đồng nhất. Hệ số tương đương dao động trong khoảng từ 0,8 đến 1,1 với khu vực hỗn hợp nghèo nằm về phía xu pấp nạp. Tại thời điểm đánh lửa, hệ số tương đương của hỗn hợp quanh nền đánh lửa khoảng $\phi=1$. Điều này giúp cho quá trình đánh lửa diễn ra thuận lợi. Để đạt được hệ số tương đương trung bình $\phi=1$ thì thời gian phun nhiên liệu trong trường hợp này là $\varphi_p=70^\circ\text{TK}$.



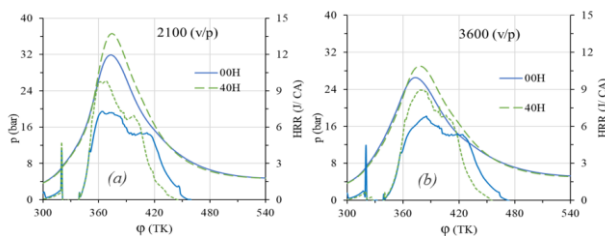
Hình 4. Biến thiên lưu lượng không khí, lưu lượng nhiên liệu và hệ số tương đương theo góc quay trục khuỷu ($n=3600$ v/ph, M7C3-30H, $\varphi_p=77^\circ\text{TK}$, $p_p=0,5$ bar, $d_p=5,5\text{mm}$)

Hình 4 giới thiệu diễn biến các thông số của quá trình nạp khi phun nhiên liệu M7C3 được làm giàu bởi 30% hydrogen. Chúng ta thấy, phân bố nồng độ CH₄, H₂ và hệ số tương đương trong buồng cháy cũng tương tự như trường hợp động cơ chạy bằng biogas M7C3. Để đạt cùng hệ số tương đương $\phi=1$ như trường hợp trên, góc phun nhiên liệu trong trường hợp này là $\varphi_p=77^\circ\text{TK}$, lớn hơn 7°TK so với trường hợp động cơ chạy bằng biogas M7C3.

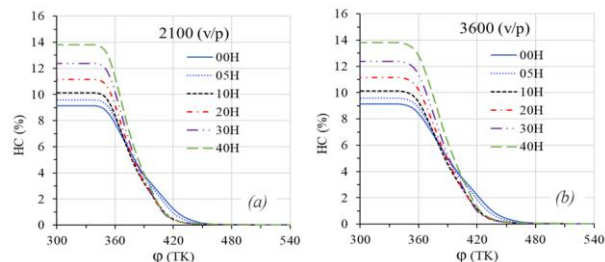
3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng hydrogen đến quá trình cháy và phát thải ô nhiễm

Hình 5a và Hình 5b giới thiệu biến thiên áp suất và tốc độ tỏa nhiệt khi động cơ chạy bằng biogas M7C3 và M7C3-40H ở tốc độ 2100 v/ph và 3600 v/ph. Kết quả cho thấy, khi tăng hàm lượng hydrogen trong hỗn hợp với biogas thì tốc độ tỏa nhiệt tăng và đỉnh cực đại tiến về gần ĐCT trên. Điều này dẫn đến tăng áp suất cực đại của động cơ. Cùng một chế độ cung cấp nhiên liệu, khi tốc độ động

cơ tăng thì đỉnh đường cong tỏa nhiệt dịch ra xa ĐCT khiến cho áp suất cực đại giảm. Sự gia tăng công chỉ thị chu trình theo hàm lượng hydrogen là do chất lượng quá trình cháy được cải thiện, tốc độ cháy tăng làm tăng hiệu quả sử dụng nhiệt.

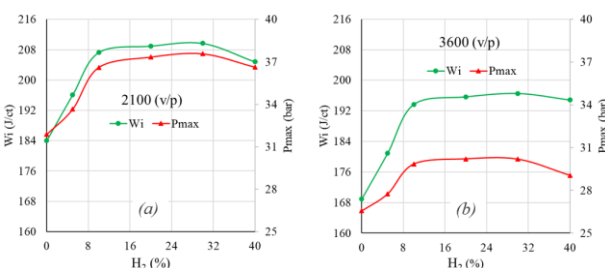


Hình 5. Ảnh hưởng của hàm lượng hydrogen pha vào biogas M7C3 đến biến thiên tốc độ tỏa nhiệt và áp suất trong xi lanh khi động cơ chạy ở tốc độ 2100 v/ph (a) và 3600 v/ph (b)



Hình 6. Ảnh hưởng của hàm lượng hydrogen pha vào biogas M7C3 đến biến thiên nồng độ nhiên liệu theo góc quay trục khuỷu khi động cơ chạy ở tốc độ 2100 v/ph và 3600 v/ph

Ứng với biogas có thành phần CH₄ cho trước, khi tăng hàm lượng H₂ thì nồng độ mol của nhiên liệu tăng để đảm bảo hệ số tương đương không thay đổi (Hình 6a và Hình 6b). Kết quả tính toán ở các hình này cho thấy, khi hàm lượng hydrogen tăng thì độ dốc của đường cong tiêu thụ nhiên liệu tăng lên rõ rệt dù động cơ chạy ở tốc độ 2100 v/ph hay 3600 v/ph. So với khi chạy bằng biogas M7C3 thì thời gian cháy giảm 60°TK và 30°TK tương ứng với khi động cơ chạy ở tốc độ 3600 v/ph và 2100 v/ph với nhiên liệu M7C3-40H.



Hình 7. Biến thiên áp suất cực đại và công chỉ thị chu trình theo hàm lượng hydrogen pha vào biogas M7C3 khi động cơ chạy ở tốc độ 2100 v/ph (a) và 3600 v/ph (b)

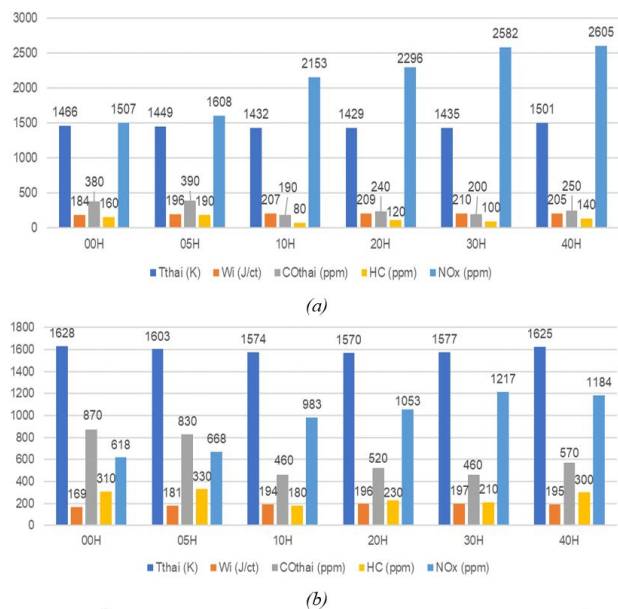
Biến thiên công chỉ thị chu trình theo hàm lượng H₂ pha vào biogas M7C3 khi động cơ chạy ở tốc độ 2100 v/ph và 3600 v/ph được trình bày trên Hình 7a và Hình 7b. Chúng ta thấy khi hàm lượng hydrogen pha vào biogas thấp hơn 20% thì công chỉ thị chu trình của động cơ tăng nhanh theo hàm lượng H₂. Khi hàm lượng H₂ tăng vượt quá ngưỡng này thì công chỉ thị chu trình của động cơ thay đổi rất ít theo hàm lượng hydrogen. Điều này có thể giải thích là do nhiệt lượng nhiên liệu mang vào động cơ giảm khi tăng hàm lượng H₂. Mặt khác, ảnh hưởng của

việc gia tăng tốc độ cháy đến chất lượng quá trình cháy không tăng tuyến tính theo hàm lượng H₂ pha vào biogas. Vì vậy khi hàm lượng H₂ vượt quá 20% thì tác động của việc cải thiện tốc độ cháy không còn gia tăng như khi hàm lượng H₂ thấp. Do đó, về mặt hiệu quả sử dụng nhiệt thì việc pha 20% hydrogen vào biogas là tối ưu. Điều này rất phù hợp với hệ thống năng lượng hybrid do lượng điện sử dụng để điện phân nước sản xuất hydrogen của hệ thống có giới hạn.

Hình 8a biểu diễn tổng hợp biến thiên của T_{thai}, W_i, CO, HC và NO_x theo hàm lượng hydrogen pha vào biogas M7C3 khi động cơ chạy ở tốc độ 2100 v/ph với hệ số tương đương $\phi=1$. Chúng ta thấy, nhiệt độ khí thải chỉ biến thiên trong phạm vi hẹp từ 1430 đến 1500K, đạt giá trị nhỏ nhất ứng với hàm lượng 20% hydrogen. W_i tăng từ 184 J/ct lên 209 J/ct khi hàm lượng hydrogen tăng từ 0% lên 20%. Tuy nhiên, sau đó W_i hầu như không thay đổi khi hàm lượng hydrogen tăng từ 20% lên 40%. Như đã giải thích trên đây, sự gia tăng W_i chủ yếu là do cải thiện tốc độ cháy. Với hàm lượng hydrogen trong khoảng từ 10-20% ảnh hưởng của tốc độ cháy đến hiệu quả sử dụng nhiệt đạt được mức tối đa nên sự gia tăng hàm lượng hydrogen vào biogas không đem lại hiệu quả tiếp tục. Về mức độ phát thải ô nhiễm, NO_x tăng theo hàm lượng hydrogen pha vào biogas do sự gia tăng nhiệt độ cực đại. Trong khi đó, CO và HC đạt giá trị cực tiểu khi hàm lượng hydrogen trong biogas khoảng 10-20%. Với hàm lượng hydrogen này, việc giảm năng lượng do nhiên liệu mang vào động cơ ở mức vừa phải nhưng ảnh hưởng của tốc độ cháy đến hiệu quả sử dụng nhiệt tăng nên quá trình cháy diễn ra hoàn hảo nhất.

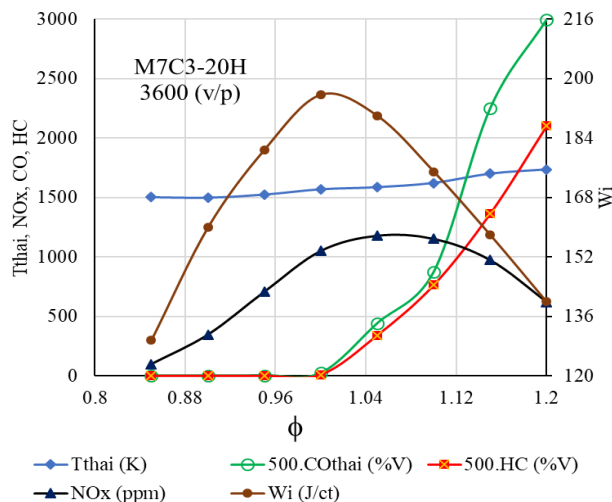
ôn định quanh giá trị W_i=196 J/ct khi hàm lượng hydrogen tăng từ 20% lên 40%. Trong cả hai trường hợp, CO và HC đạt cực tiểu khi hàm lượng hydrogen nằm trong khoảng 10% đến 20%. Trong khi đó NO_x tăng nhanh theo hàm lượng hydrogen khi %H nhỏ hơn 20% nhưng tốc độ tăng chậm lại khi hàm lượng hydrogen cao hơn giá trị này.

Khi pha hydrogen vào biogas thì tốc độ cháy tăng, quá trình cháy có thể diễn ra với hỗn hợp nghèo hơn do đó hệ số tương đương tối ưu tiến gần đến $\phi=1$ hơn. Hình 9 giới thiệu biến thiên công chi thị chu trình và mức độ phát thải ô nhiễm khi động cơ chạy bằng nhiên liệu M7C3-20H. Chúng ta thấy đỉnh đường cong W_i(ϕ) nằm gần sát $\phi=1$. Mức độ phát thải CO, HC, NO_x vì thế thấp hơn rất nhiều so với trường hợp động cơ chạy bằng biogas đã mô tả ở Hình 8a và Hình 8b.



Hình 8. Ảnh hưởng của hàm lượng hydrogen pha vào biogas M7C3 đến quá trình cháy và phát thải ô nhiễm của động cơ khi chạy ở tốc độ 2100 v/ph (a) và 3600 v/ph (b) với $\phi=1$

Hình 8b biểu diễn biến thiên của các đại lượng tương tự như trường hợp trên nhưng ứng với tốc độ động cơ 3600 v/ph. Quy luật biến thiên của W_i theo %H tương tự như trường hợp trên. W_i tăng 16% khi hàm lượng hydrogen tăng từ 0% đến 20% nhưng sau đó W_i gần như



Hình 9. Biến thiên các thông số đặc trưng quá trình cháy theo hệ số tương đương khi động cơ chạy ở tốc độ 3600 v/ph với nhiên liệu M7C3-20H

4. Kết luận

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

- Hiệu quả công tác của động cơ biogas được cải thiện tối đa khi pha 20% hydrogen vào biogas M7C3. Quá ngưỡng này, tính năng của động cơ hầu như không thay đổi khi tăng hàm lượng hydrogen pha vào biogas.

- Khi pha hydrogen vào biogas tính năng động cơ được cải thiện không phải do năng lượng nó mang vào buồng cháy mà do sự gia tăng tốc độ cháy và mở rộng giới hạn cháy giúp cho quá trình cháy tối ưu diễn ra gần giá trị $\phi=1$ hơn khi động cơ chạy bằng biogas.

- Trong điều kiện vận hành tối ưu, khi pha 20% hydrogen vào biogas M7C3 thì công chi thị tăng trung bình 16%, phát thải CO và HC giảm trung bình từ 5-10 lần, phát thải NO_x tăng khoảng 10-15%.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ kinh phí bởi Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng trong đề tài “Nghiên cứu chuyển đổi động cơ tĩnh tại dùng bộ chế hòa khí sang động cơ phun LPG điều khiển điện tử” có mã số: T2021-06-09.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] VNA/VNS, "Việt Nam strives to achieve 'net zero' by 2050, with international support: PM", *Việt Nam News*, November, 02/2021
- [2] <https://vietnamnews.vn/environment/1071075/viet-nam-strives-to-achieve-net-zero-by-2050-with-international-support-pm.html>
- [3] Leung, T., and I. Wierzba, "The effect of hydrogen addition on biogas non-premixed jet flame stability in a co-flowing air stream", *International Journal of Hydrogen Energy*, 33.14, 2008, 3856-3862.
- [4] Xin, Zhang, et al. "The experimental study on cyclic variation in a spark ignited engine fueled with biogas and hydrogen blends", *International Journal of Hydrogen Energy*, 38.25, 2013, 11164-11168.
- [5] Sunyoup Lee, Cheolwoong Park, Seunghyun Park, Changgi Kim, "Comparison of the effects of EGR and lean burn on an SI engine fueled by hydrogen-enriched low calorific gas" *International journal of hydrogen energy*, 39.2, 2014, 1086-1095.
- [6] Porpatham, E., A. Ramesh, and B. Nagalingam. "Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine", *International journal of Hydrogen energy*, 32.12, 2007 2057-2065.
- [7] Park C, Park S, Lee Y, Kim C, Lee S, Moriyoshi Y (2011): "Performance and emission characteristics of a SI engine fueled by low calorific biogas blended with hydrogen", *International Journal of hydrogen energy*, 36.16, 2011, 10080-10088.
- [8] Park, Seunghyun, Cheolwoong Park, and Changgi Kim, "Effect of exhaust gas recirculation on a spark ignition engine fueled with biogas-hydrogen blends", *SAE Technical Paper*, No. 2011-24-0115.
- [9] Ibrahim, Amr, and Saiful Bari. "A comparison between EGR and lean-burn strategies employed in a natural gas SI engine using a two-zone combustion model". *Energy Conversion and Management*, 50.12, 2009, 3129-3139.
- [10] Jeong C, Kim T, Lee K, Song S, Chun K, "Generating efficiency and emissions of a spark-ignition gas engine generator fuelled with biogas-hydrogen blends", *International Journal of hydrogen energy*, 34.23, 2009, 9620-9627.
- [11] 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*, 12.10, 2018, 1111-1118.
- [12] Boretta, Alberto. "Comparison of fuel economies of high efficiency diesel and hydrogen engines powering a compact car with a flywheel based kinetic energy recovery systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35.16, 2010, 8417-8424.
- [13] 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*, Universite Nice-Sophia Antipolis, France, 23-25 Mars 2010, pp. 19-31.