

MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH CUNG CẤP NHIÊN LIỆU LINH HOẠT SYNGAS-BIOGAS-HYDROGEN CHO ĐỘNG CƠ TĨNH TẠI ĐÁNH LỬA CƯỜNG BỨC

SIMULATION OF SYNGAS-BIOGAS-HYDROGEN FLEXIBLE FUEL SUPPLY FOR A STATIONARY SI ENGINE

Bùi Văn Ga¹, Nguyễn Văn Đông^{2*}, Cao Xuân Tuấn³, Võ Anh Vũ¹

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

²Trường Đại học Giao thông Vận tải thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Đà Nẵng

*Tác giả liên hệ: dongnv@ut.edu.vn

(Nhận bài: 08/7/2022; Chấp nhận đăng: 05/9/2022)

Tóm tắt - Trong hệ thống năng lượng tái tạo hybrid năng lượng mặt trời-sinh khối, việc cung cấp nhiên liệu cho động cơ đánh lửa cưỡng bức cần được điều chỉnh một cách linh hoạt để thích nghi với thành phần syngas-biogas-hydrogen thay đổi trong phạm vi rộng. Tạo hỗn hợp bằng bộ chế hòa khí truyền thống không phù hợp do chênh lệch lớn về tỉ lệ không khí/nhiên liệu của syngas so với biogas hay hydrogen. Sử dụng công nghệ phun nhiên liệu trên đường nạp với vòi phun có đường kính lỗ phun lớn thì phù hợp với syngas nhưng không phù hợp với biogas hay hydrogen; Sử dụng vòi phun đường kính lỗ phun nhỏ thì ngược lại. Phối hợp sử dụng 2 vòi phun có đường kính lỗ phun 4mm và 6mm là phù hợp với động cơ Honda GX200 khi chuyển sang sử dụng nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen. Khi tăng thành phần biogas hay hydrogen thì góc mở vòi phun 6mm giảm còn góc mở vòi phun 4mm duy trì giá trị cực đại 130°TK đến 70% biogas hay 50% hydrogen sau đó giảm. Áp suất phun hợp lý là 1 bar.

Từ khóa - Hệ thống năng lượng tái tạo hybrid; Biogas; Syngas; Hydrogen; Động cơ gas.

1. Giới thiệu

Tại Hội nghị Thượng đỉnh về biến đổi khí hậu COP26 diễn ra ở Glasgow mới đây, Việt Nam đã cam kết thực hiện các cơ chế theo Thỏa thuận Paris, để đạt mức phát thải ròng bằng 0 (Net Zero) vào năm 2050 [1]. Đến nay đã có 74 quốc gia và vùng lãnh thổ cam kết thực hiện lộ trình Net Zero tương tự. Có khoảng 10 quốc gia cam kết thực hiện lộ trình Net Zero trước ngưỡng thời gian đó. Sử dụng năng lượng tái tạo đóng vai trò then chốt trong các chiến lược Net Zero.

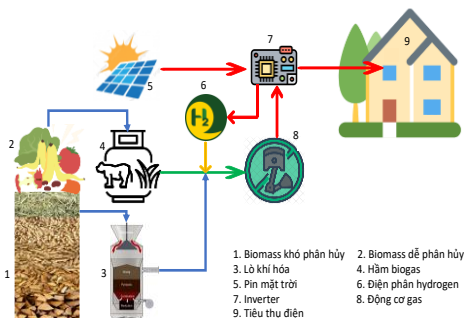
Để đạt mục tiêu phát thải ròng bằng 0, các nước cần dừng triển khai các dự án than mới, cũng như đưa ra lộ trình tiến tới loại bỏ các dự án điện than hiện tại và thay vào đó là phát triển các dự án điện tái tạo. Việt Nam là nước thuộc vùng nhiệt đới, tiềm năng về điện mặt trời, điện gió và sinh khối rất dồi dào. Tuy nhiên, nhược điểm chính của năng lượng tái tạo nói chung là không ổn định, công suất nguồn phát năng lượng thay đổi theo thời gian trong ngành hay thay đổi ngẫu nhiên theo điều kiện khí hậu, thời tiết. Vì vậy, để đảm bảo tính ổn định của hệ thống năng lượng, chúng ta cần phối hợp sử dụng nhiều nguồn năng lượng tái tạo khác nhau, gọi là hệ thống năng lượng tái tạo hybrid HRES [2-7].

Abstract - In the solar-biomass hybrid renewable energy system, the fuel supply for the spark ignition engine needed to be flexibly controlled because of the large variation of syngas-biogas-hydrogen compositions. Mixture preparation with a traditional carburetor is unsuitable due to the large difference in the air/fuel ratio of syngas compared to biogas or hydrogen. The technology of fuel injection on the intake manifold with a large nozzle diameter is suitable for syngas but not appropriate for biogas or hydrogen; However, it is contrary with using a small nozzle diameter. The combination of using 2 nozzles with 4mm and 6mm nozzle diameters is appropriate for Honda GX200 engine fueling with a syngas-biogas-hydrogen blend. When increasing the biogas or hydrogen composition, the injection duration of a 6mm-diameter injector decreases, while that of a 4mm-diameter injector maintains the maximum value of 130°CA to 70% biogas or 50% hydrogen, then decreases. The reasonable injection pressure is 1 bar.

Key words - Hybrid renewable energy system; Biogas; Syngas; Hydrogen; Gaseous SI engine.

Hình 1 trình bày hệ thống năng lượng tái tạo hybrid phối hợp năng lượng mặt trời và năng lượng sinh khối.

Nguyên lý làm việc của hệ thống năng lượng tái tạo hybrid solar-biomass (năng lượng mặt trời-sinh khối) như sau: Các chất thải rắn khó phân hủy trong sinh hoạt và sản xuất ở nông thôn được chế biến thành viên nén nhiên liệu RDF.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống năng lượng tái tạo hybrid năng lượng mặt trời - năng lượng sinh khối

Từ đó, RDF được chuyển thành khí tổng hợp syngas qua lò khí hóa [8]. Các chất thải hữu cơ dễ phân hủy được sử dụng để sản xuất biogas. Khi công suất của điện mặt trời

¹ The University of Danang - University of Science and Technology (Bui Van Ga, Vo Anh Vu)

² Ho Chi Minh City University of Transport (Nguyen Van Dong)

³ The University of Danang (Cao Xuan Tuan)

cao hơn công suất phụ tải thì phần công suất dư được sử dụng để sản xuất hydrogen qua hệ thống điện phân. Syngas, biogas và hydrogen được lưu trữ chung trong túi chứa nhiên liệu khí. Khi công suất tải yêu cầu lớn hơn công suất của hệ thống điện mặt trời thì cụm máy phát điện do động cơ chạy bằng nhiên liệu khí hoạt động để cung cấp năng lượng [7]. Do tính ngẫu nhiên của nguyên liệu sản xuất nhiên liệu khí nên thành phần của hỗn hợp khí biogas-syngas-hydrogen thay đổi. Vì vậy hệ thống cung cấp nhiên liệu cho động cơ sử dụng nhiên liệu khí cũng phải được điều chỉnh linh hoạt để nâng cao hiệu quả quá trình cháy và giảm phát thải ô nhiễm [9-10].

Tỉ lệ không khí/nhiên liệu (A/F) của syngas thấp hơn rất nhiều so với các loại nhiên liệu truyền thống là một thách thức kỹ thuật rất lớn đối với hệ thống cung cấp nhiên liệu cho động cơ. A/F thấp dẫn đến thời gian phun kéo dài khiến cho nhiên liệu cung cấp cho chu trình không được hút hoàn toàn vào xi lanh vào cuối kỳ nạp. Điều này khiến cho hệ số tương đương của động cơ không thể đạt được giá trị stoichiometric (thành phần hỗn hợp cháy hoàn toàn lý thuyết), đặc biệt khi động cơ chạy ở tốc độ cao. Sự tích lũy của nhiên liệu trên đường nạp ở chu kỳ trước làm mất kiểm soát hệ số tương đương của hỗn hợp ở các chu kỳ tiếp theo và gây ra hiện tượng nổ ngược. Do đó, đối với nhiên liệu có tỉ lệ A/F thấp thì thiết bị hòa trộn ngoài khả năng tạo hỗn hợp nhiên liệu-không khí đồng nhất còn phải đảm bảo rằng tất cả nhiên liệu được cung cấp cho chu trình phải được hút vào xi lanh ở cuối quá trình nạp.

Trong hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas-hydro thì thành phần hydrogen rất nhạy cảm đến quá trình tạo hỗn hợp và quá trình cháy. Những vấn đề liên quan đến hydrogen cần quan tâm như cháy sớm, nổ ngược, tốc độ tăng áp suất cao [11-12] và sự gia tăng nồng độ NO_x... Nhiều nghiên cứu về hệ thống cung cấp nhiên liệu cho động cơ đánh lửa cưỡng bức sử dụng nhiên liệu có chứa hydrogen đã được công bố [13-14]. Hangwei Ji và Shuofeng Wang [15] đã bổ sung thêm vòi phun hydrogen trên đường nạp để cải thiện hiệu suất của động cơ xăng SI. Điều chỉnh thời điểm bắt đầu phun để giảm lượng H₂ còn sót trên đường nạp có thể hạn chế hiện tượng cháy ngược của động cơ phun trước cửa nạp [16-18]. Đối với động cơ đánh lửa cưỡng bức, phun trực tiếp hydrogen vào buồng cháy giúp cải thiện hiệu suất động cơ và giảm phát thải ô nhiễm [19].

Bên cạnh bổ sung hydrogen vào hỗn hợp nhiên liệu khí nghèo, nhiều tác giả cũng nghiên cứu bổ sung HHO (hỗn hợp 2/3 hydrogen và 1/3 oxygen) vào nhiên liệu khí nghèo để cải thiện quá trình cháy. Cũng như hydrogen, HHO rất dễ bén lửa nên hiện tượng nổ ngược trên đường nạp cần được quan tâm. Bui và cộng sự đã nghiên cứu phát triển bộ tạo hỗn hợp đặc biệt để xử lý vấn đề này [20]. Nghiên cứu mô phỏng về phun nhiên liệu biogas-HHO được trình bày trong [21-22]. Kết quả nghiên cứu cho phép thiết lập được giản đồ phun biogas-HHO phù hợp [23-24]. Các giải pháp này đã được áp dụng thí điểm để cung cấp biogas được làm giàu bởi HHO trên động cơ tĩnh tại [25-27].

Áp suất phun là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến việc chuẩn bị hỗn hợp. Các loại vòi phun nhiên liệu khí có mặt trên thị trường có thể làm việc với áp suất phun thay đổi trong phạm vi rất rộng. Các vòi phun nhiên liệu khí thay

thể LPG, CNG trên động cơ phun trước cửa nạp thông thường có áp suất phun cực đại 4 bar, áp suất phun làm việc từ 1-3 bar [28]. Khi tăng áp suất phun nhiên liệu thì nồng độ NO_x tăng [29]. Trong khi đó, đối với động cơ CNG đánh lửa cưỡng bức (SI) hai kỳ cỡ nhỏ thì áp suất phun nhiên liệu phù hợp nhỏ hơn 0,5bar [30].

Trong hệ thống năng lượng tái tạo hybrid năng lượng mặt trời-sinh khối, động cơ được cung cấp nhiên liệu có thành phần thay đổi rất rộng. Động cơ có thể chạy hoàn toàn bằng một loại nhiên liệu thành phần, cũng có thể chạy bằng hỗn hợp 2 nhiên liệu thành phần hay 3 nhiên liệu thành phần. Tỉ số A/F của syngas rất khác biệt với các loại nhiên liệu còn lại nên là một thách thức kỹ thuật rất lớn đối với hệ thống cung cấp nhiên liệu cho động cơ của hệ thống năng lượng tái tạo hybrid năng lượng mặt trời-sinh khối. Trong công trình này, nhóm tác giả trình bày kết quả nghiên cứu mô phỏng hệ thống cung cấp phun nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen trên đường nạp để cải tạo động cơ đánh lửa cưỡng bức tĩnh tại truyền thống thành động cơ sử dụng nhiên liệu khí tái tạo linh hoạt.

2. Nghiên cứu mô phỏng

2.1. Động cơ và nhiên liệu

Nghiên cứu được tiến hành trên động cơ Honda GX200 có đường kính xi lanh 68mm, hành trình piston 45mm, tỉ số nén 8,5. Động cơ nguyên thủy chạy bằng xăng, cấp nhiên liệu bằng bộ chế hòa khí, đạt công suất 4,8 kW ở tốc độ 3600 v/ph.

Biogas, syngas và hydrogen có các đặc trưng chính được trình bày trên Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số đặc trưng của nhiên liệu

Nhiên liệu	Thành phần (mol/mol)					M (g/mol)	m _{kk} /m _{nl} (g/g)	V _{kk} /V _{nl} (l/l)
	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	N ₂			
Biogas	0,7	0	0	0,3	0	24,40	7,98	6,71
Syngas	0,05	0,18	0,20	0,12	0,45	24,64	1,64	1,39
Hydrogen	0	1	0	0	0	2	34,78	2,4
Nhiệt trị thấp (MJ/m ³)	33,906	10,24	12,03	-	-			

Các hỗn hợp nhiên liệu sử dụng trong tính toán có thành phần biogas, syngas và hydrogen cho trên Bảng 2.

Bảng 2. Thành phần hỗn hợp nhiên liệu

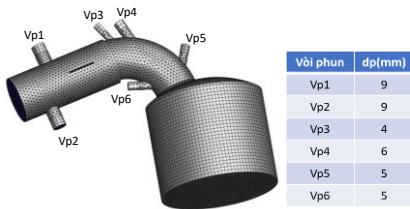
Hỗn hợp	Biogas (%)	Syngas (%)	Hydrogen (%)
Blend5	0	90	10
Blend6	0	80	20
Blend7	0	70	30
Blend8	0	60	40
Blend9	0	50	50
Blend10	10	90	0
Blend11	20	80	0
Blend12	30	70	0
Blend13	40	60	0
Blend14	50	50	0
Blend15	70	30	0

2.2. Thiết lập mô hình

Tính toán mô phỏng được thực hiện nhờ phần mềm Ansys Fluent 2021R1. Không gian tính toán gồm buồng cháy, xi lanh và đường nạp. Thể tích xi lanh thay đổi theo góc quay trục khuỷu. Khi quá trình nạp kết thúc thì đường nạp được tách rời khỏi xi lanh để giảm thời gian tính toán.

Hệ phương trình đối lưu - khuếch tán được kếp kín nhờ mô hình rối k- ϵ . Các thông số nhiệt động học của hỗn hợp được tính toán qua mô hình Partially Premixed. Mỗi khi thay đổi nhiên liệu, chúng ta tính toán lại bảng pdf thông số nhiệt động học. Nhờ vậy điều kiện biên tính toán sẽ được đơn giản hóa. Ở đầu vào đường nạp thì chỉ có không khí nên thành phần hỗn hợp f (fraction volumic) bằng 0. Ở đầu vào các vòi phun chỉ có nhiên liệu nên $f=1$. Hệ số tương đương cục bộ của hỗn hợp được tính qua thành phần nhiên liệu, oxygen hay tính qua f. Quá trình thiết lập mô hình cụ thể được trình bày trong [9, 31]. Để nghiên cứu ảnh hưởng của các phương án cung cấp nhiên liệu khác nhau đến sự hình thành hỗn hợp, mô phỏng được thực hiện với nhiều vòi phun có đường kính khác nhau.

Hình 2 giới thiệu vị trí các vòi phun và chia lưới không gian tính toán. Do quán tính của vòi phun, khi thời gian phun nhỏ hơn một giá trị giới hạn, vòi phun không mở được.



Hình 2. Chia lưới không gian tính toán và vị trí các vòi phun

Bảng 3. Điều kiện biên

Thông số	Nhiên liệu	Không khí
Nhiệt độ, K	320	310
Áp suất dư, bar	0,5; 1	0

Mặt khác, việc làm kín vòi phun đối với nhiên liệu khí khó hơn rất nhiều so với nhiên liệu lỏng. Vì thế nếu đường kính lỗ phun lớn thì áp suất phun phải giảm để tránh hiện tượng rò khí giữa kim phun và đến kim phun.

Thời gian phun cực đại của mỗi chu trình phụ thuộc vào tốc độ động cơ và khả năng hút toàn bộ nhiên liệu đã phun vào xi lanh. Đối với các loại nhiên liệu có tỉ lệ A/F bé thì đây là một thách thức. Theo tính chất nhiên liệu cho ở Bảng 1 thì A/F của syngas rất khác biệt so với biogas hay hydrogen. Vì vậy động cơ chạy bằng nhiên liệu linh hoạt syngas-biogas-hydrogen không thể sử dụng hệ thống cung cấp nhiên liệu kiểu carburetor hay phun nhiên liệu truyền thống. Phần sau đây sẽ trình bày kết quả mô phỏng sự hình thành hỗn hợp khí phun hỗn hợp nhiên liệu khí và đề xuất phương án phù hợp cho động cơ sử dụng nhiên liệu linh hoạt syngas-biogas-hydrogen.

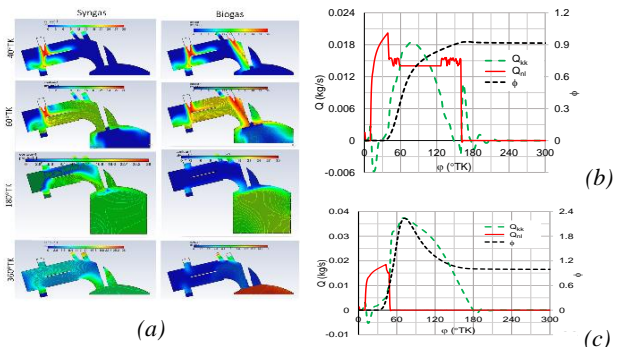
3. Kết quả và bình luận

3.1. Ảnh hưởng của đường kính lỗ phun và áp suất phun

Hình 3a giới thiệu các đường đồng mức nồng độ nhiên liệu trên mặt cắt dọc đối xứng của xi lanh và đường nạp khi động cơ được cung cấp syngas qua vòi phun Vp1 có đường

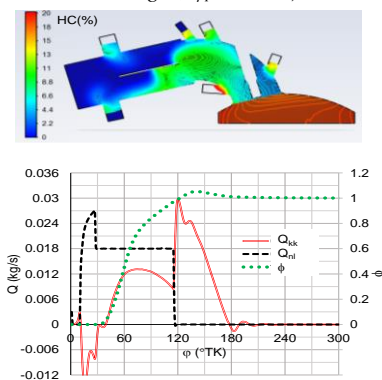
kính lỗ phun 9mm với áp suất phun 0,5 bar. Động cơ chạy ở tốc độ 3000 v/ph. Nhiên liệu được Khi bắt đầu phun nhiên liệu tại 10°TK và kết thúc phun ở 160°TK, áp suất trên đường nạp tăng cục bộ đây một lượng không khí ra khỏi ống nạp nên lưu lượng không khí tại cửa nạp âm (Hình 3b). Như ngay sau đó, lưu lượng không khí tăng do độ chân không trong xi lanh tạo ra do piston đi xuống. Trong điều kiện phun này, hệ số tương đương ϕ của hỗn hợp syngas-không khí trong kỳ nén đạt 0.91 tuy nhiên một lượng lớn nhiên liệu còn sót lại trên đường nạp khi quá trình nạp kết thúc. Sự tích lũy nhiên liệu sót trên đường nạp sẽ gây khó khăn trong kiểm soát hệ số tương đương trong các chu trình tiếp theo.

Trong cùng điều kiện áp suất phun pp và đường kính vòi phun dp, nếu phun biogas thì góc phun φ_p chỉ cần 38°TK để đạt hệ số tương đương $\phi=1$ (Hình 3b) và cuối quá trình nạp, toàn bộ nhiên liệu phun ra được hút hết vào xi lanh. Sự khác biệt lớn về tỉ lệ A/F giữa syngas và biogas dẫn đến sự chênh lệch về thời gian phun và điều kiện hình thành hỗn hợp trong xi lanh động cơ. Hình 3a và Hình 3b cho thấy syngas hay biogas đi vào xi lanh cùng thời điểm (khoảng 30°TK) nhưng đường cong hệ số tương đương trong trường hợp biogas tăng rất mạnh lên giá trị cực đại $\phi=2$ rồi giảm dần xuống giá trị ổn định. Trong khi đó, đường cong hệ số tương đương của syngas tăng chậm cho đến khi đạt giá trị ổn định do A/F thấp.



Hình 3. So sánh quá trình hình thành hỗn hợp nhiên liệu - không khí khi phun syngas và biogas qua vòi phun Vp1 có đường kính lỗ phun 9mm, áp suất phun 0,5 bar, tốc độ động cơ 3000 v/ph

(a: đường đồng mức nồng độ nhiên liệu; b: Syngas, $\varphi_p=150$ TK; c: Biogas, $\varphi_p=38$ TK)

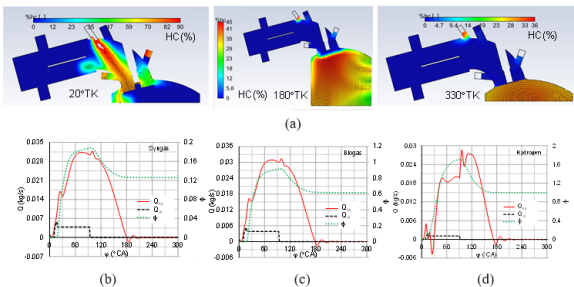


Hình 4. Đường đồng mức nồng độ nhiên liệu trước thời điểm đánh lửa $\varphi=330$ TK (a) và biến lưu lượng không khí, nhiên liệu, hệ số tương đương theo góc quay trục khuỷu khi phun syngas qua vòi phun 9mm, $p_p=1$ bar và $\varphi_p=105$ TK, $n=3000$ v/ph

Để giảm thời gian phun, ta có thể tăng áp suất phun nhiên liệu. Hình 4 giới thiệu kết quả mô phỏng quá trình tạo hỗn hợp của syngas khi áp suất phun tăng 1 bar với vòi phun có đường kính 9mm và góc phun 105°TK. Kết quả cho thấy hệ số tương đương của hỗn hợp trong buồng cháy đạt giá trị $\phi=1$ nhưng cuối quá trình nạp vẫn còn sót một lượng nhiên liệu đáng kể chưa hút vào xi lanh.

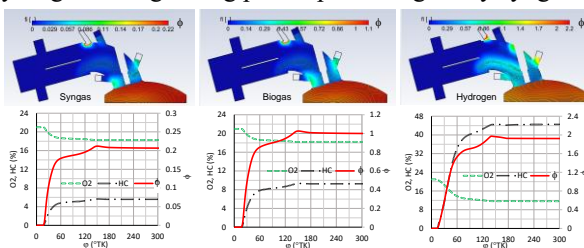
Rõ ràng nếu sử dụng phương án này để phun biogas thì thời gian phun sẽ rất ngắn, không thể điều chỉnh được chính xác lượng phun ở khu vực tái nhô. Mặt khác, như đã trình bày trên đây, việc tăng áp suất phun với đường kính vòi phun lớn đặt ra nhiều thách thức đối với kỹ thuật làm kín vòi phun nhiên liệu khí. Vì thế việc sử dụng một vòi phun đường kính lớn không phù hợp với động cơ sử dụng nhiên liệu linh hoạt syngas-biogas-hydrogen.

Trong trường hợp nhiên liệu có tỉ lệ A/F lớn, để mở rộng thời gian phun, chúng ta có thể sử dụng vòi phun đường kính lỗ phun nhỏ. Hình 5a giới thiệu đường đồng mức nồng độ nhiên liệu ở các vị trí góc quay trục khuỷu 20, 180 và 330°TK khi phun hydrogen qua vòi phun có đường kính lỗ phun 4mm và góc phun 83°TK. Với thời gian phun này cuối quá trình nạp nhiên liệu được hút hoàn toàn vào buồng cháy và hệ số tương đương của hỗn hợp đạt giá trị $\phi=1$ (Hình 5d). Tuy nhiên, trong cùng điều kiện phun này, hệ số tương đương chỉ đạt 0,12 đối với syngas (Hình 5b) và 0,6 đối với biogas (Hình 5c).



Hình 5. Phun hydrogen qua vòi phun $d_p=4\text{mm}$, $p_p=1\text{bar}$, $n=3000\text{ v/ph}$

Cùng đường kính vòi phun $d_p=4\text{mm}$ và áp suất phun $p_p=1\text{ bar}$, nếu tăng thời gian phun lên đến 130°CA thì hệ số tương đương đạt stoichiometric đối với biogas nhưng chỉ đạt 0,2 đối với syngas và tăng lên 1,7 đối với hydrogen (Hình 6). Mặt khác nếu thời gian phun tăng lên 130°CA thì khi kết thúc quá trình nạp, một bộ phận nhiên liệu vẫn không được hút hết vào xi lanh đối với tất cả các nhiên liệu nghiên cứu. Như vậy, khi sử dụng vòi phun có đường kính bé $d_p=4\text{mm}$ thì hệ thống phun phù hợp với nhiên liệu hydrogen nhưng không phù hợp với biogas hay syngas.

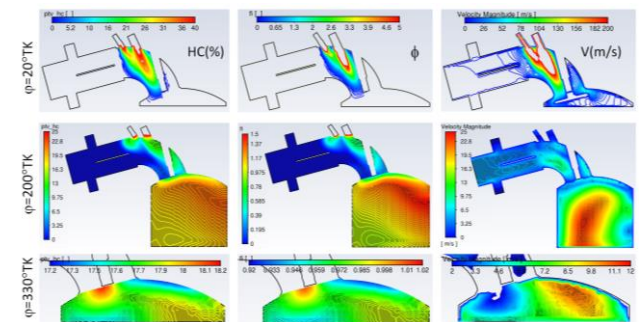


Hình 6. So sánh quá trình tạo hỗn hợp của syngas, biogas, hydrogen qua vòi phun $d_p=4\text{mm}$, $p_p=1\text{bar}$, $\phi_p=130^\circ\text{TK}$, $n=3000\text{ v/ph}$

Như vậy, sử dụng hệ thống cung cấp nhiên liệu 1 vòi phun có đường kính lỗ phun $d_p=9\text{mm}$ hay $d_p=4\text{mm}$ đều không phù hợp đối với động cơ sử dụng nhiên liệu linh hoạt syngas-biogas-hydrogen. Để đảm bảo hệ số tương đương trong buồng cháy đạt $\phi=1$ thì có thể sử dụng vòi phun đường kính lớn đối với syngas và vòi phun đường kính bé đối với hydrogen. Tuy nhiên, cả hai trường hợp này, cuối quá trình nạp vẫn còn một lượng nhiên liệu chưa hút hết vào buồng cháy. Điều này một mặt, gây trở ngại cho việc điều chỉnh thành phần hỗn hợp cho các chu kỳ tiếp theo và mặt khác, có thể gây ra hiện tượng nổ ngược, đặc biệt đối với nhiên liệu có chứa thành phần hydrogen.

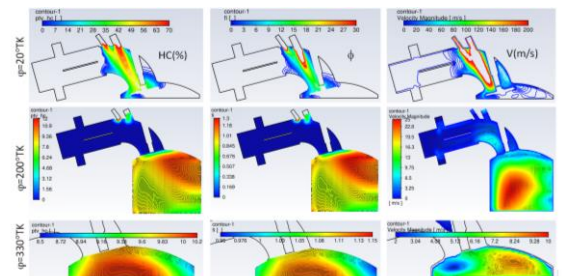
Trong phần tiếp theo nhóm tác giả sẽ trình bày phương án xử lý vấn đề kỹ thuật này.

3.2. Vòi phun kép

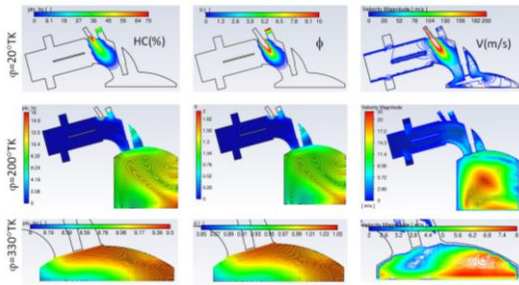


Hình 7. Đường đồng mức nhiên liệu, hệ số tương đương và tốc độ khí cung cấp nhiên liệu syngas qua vòi phun Vp3 ($\phi_p=130^\circ\text{TK}$) và Vp4 ($\phi_p=115^\circ\text{TK}$), áp suất phun 1 bar, $n=3000\text{ v/ph}$

Để có thể cung cấp hỗn hợp nhiên liệu trong trường hợp tỉ số A/F của nhiên liệu thành phần thay đổi trong phạm vi rộng nhóm tác giả đề xuất sử dụng 2 vòi phun: Vòi phun Vp3 có đường kính lỗ phun 4mm và vòi phun Vp4 có đường kính lỗ phun 6mm (Hình 7). Góc phun của vòi phun Vp3 là 130°TK còn góc phun của vòi phun Vp4 là 115°TK. Với điều kiện phun này, cuối quá trình nén, hệ số tương đương ϕ trong buồng cháy thay đổi trong phạm vi 0,98 đến 1,02 (Hình 7). Cuối quá trình nạp nồng độ HC còn sót lại trên đường nạp quanh vòi phun khoảng 6%, khá nhỏ so với nồng độ HC trong buồng cháy khoảng 25%. Vì thế, trong trường hợp động cơ chạy hoàn toàn bằng syngas, hệ thống hai vòi phun có đường kính 6mm và 4mm có thể chấp nhận được. Trong kỳ nén, khu vực nồng độ nhiên liệu cao tập trung trên đầu xi lanh về phía đối diện với cửa nạp. Tuy nhiên, tại thời điểm 330°TK, nhiên liệu gần như được phân bố đồng đều trong buồng cháy.

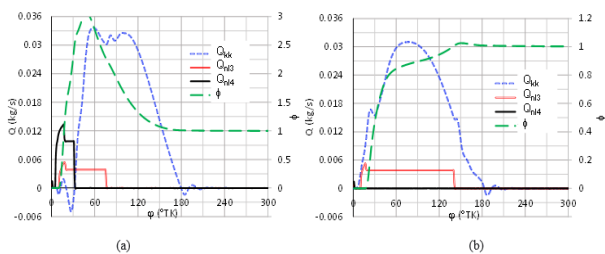


Hình 8. Đường đồng mức nhiên liệu, hệ số tương đương và tốc độ khí cung cấp nhiên liệu biogas qua vòi phun Vp3 ($\phi_p=65^\circ\text{TK}$) và Vp4 ($\phi_p=26^\circ\text{TK}$), áp suất phun 1 bar, $n=3000\text{ v/ph}$



Hình 9. Đường đồng mức nhiên liệu, hệ số tương đương và tốc độ khi cung cấp nhiên liệu biogas qua vòi phun Vp3 ($\phi_p=130^\circ\text{TK}$, áp suất phun 1 bar, $n=3000$ v/ph)

Trong trường hợp cung cấp biogas ta có thể thực hiện 2 phương án. Phương án thứ nhất, cấp biogas qua hai vòi phun đường kính 4mm và 6mm (Hình 8). Phương án thứ hai, cấp biogas qua vòi phun đường kính 4mm (Hình 9). So sánh phân bố đường đồng mức nồng độ nhiên liệu và hệ số tương đương trong 2 trường hợp cung cấp biogas ở Hình 8 và Hình 9 cho thấy, khi phun 2 vòi phun thì trong kỳ nén, nồng độ nhiên liệu cao tập trung ở khu vực trên đỉnh xi lanh còn cuối kỳ nén thì nồng độ nhiên liệu cao tập trung trên đỉnh piston. Khi phun biogas qua một vòi phun thì nồng độ nhiên liệu trong xi lanh tương đối đồng đều trong kỳ nén nhưng cuối kỳ nén thì khu vực nhiên liệu cao tập trung trên đỉnh buồng cháy, về phía đối diện với cửa xú-páp nạp. Sự khác biệt này là do động lượng của tia phun tạo ra sự khác biệt về trường tốc độ trong hai trường hợp. Khi sử dụng 2 vòi phun thì phân bố hệ số tương đương trong buồng cháy có tính đối xứng qua trục xi lanh vì vậy nó giúp cho quá trình cháy diễn ra đồng đều hơn trường hợp ϕ phân bố lệch khi sử dụng 1 vòi phun. Mặt khác, khi phun biogas qua vòi phun đường kính 4mm với thời gian phun 130°TK thì cuối quá trình nạp vẫn còn một lượng nhiên liệu chưa được hút vào xi lanh. Trong khi đó, khi sử dụng phương án 2 vòi phun thì toàn bộ nhiên liệu ra khỏi vòi phun được hút vào buồng cháy. Do đó, phương án cung cấp biogas qua hai vòi phun là hợp lý hơn.

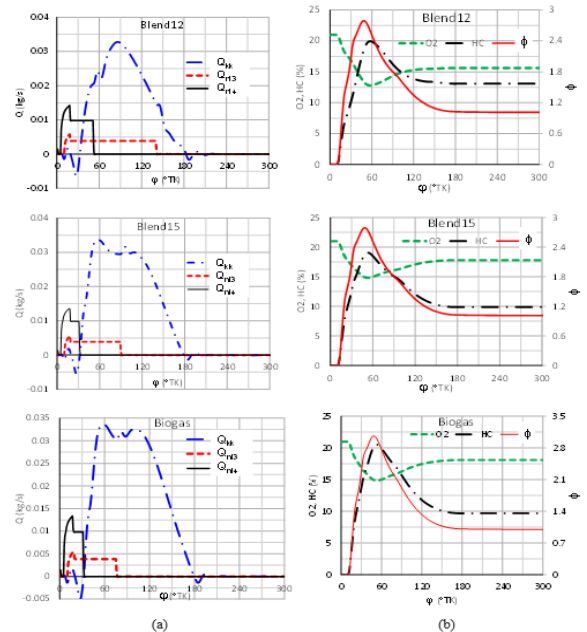


Hình 10. Biến thiên lưu lượng không khí, lưu lượng nhiên liệu và hệ số tương đương trong xi lanh khi phun biogas qua 2 vòi phun và qua 1 vòi phun, áp suất phun 1 bar, $n=3000$ v/ph

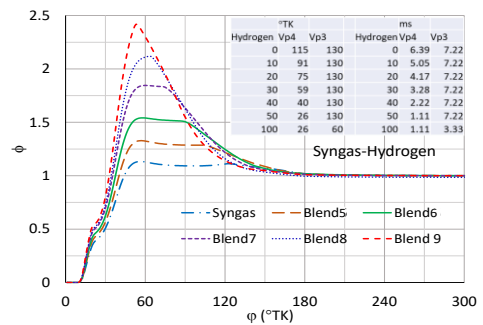
Hình 10 biểu diễn biến thiên lưu lượng không khí, lưu lượng nhiên liệu qua các vòi phun và hệ số tương đương theo góc quay trục khuỷu. Ta thấy, khi sử dụng 2 vòi phun với góc phun $\phi_p=65^\circ\text{TK}$ (Vp3) và $\phi_p=26^\circ\text{TK}$ (Vp4) và áp suất phun 1 bar thì hệ số tương đương trong buồng cháy đạt $\phi=1$ vào cuối quá trình nén. Trong trường hợp dùng 1 vòi phun Vp3 thì hệ số tương đương $\phi=1$ đạt được khi góc phun $\phi_p=130^\circ\text{TK}$. Khi phun 2 vòi phun thì lưu lượng nhiên liệu ban đầu lớn làm cho hệ số tương đương trong xi lanh tăng mạnh lên đến $\phi=3$, sau đó giảm dần và trở về giá trị

ổn định $\phi=1$. Khi sử dụng 1 vòi phun thì lượng nhiên liệu vào xi lanh tăng từ từ, ϕ trong xi lanh tăng dần đến giá trị ổn định.

Hình 11a so sánh biến thiên của lưu lượng không khí, nhiên liệu khi phun syngas, biogas và hỗn hợp 30% biogas-70% syngas (Blend12), 70% biogas-30% syngas (Blend15) qua 2 vòi phun Vp3 và Vp4 để đạt cùng hệ số tương đương $\phi=1$ vào cuối quá trình nén (Hình 11b). Chúng ta thấy, càng tăng hàm lượng biogas thì thời gian phun càng giảm. Lưu lượng không khí trong trường hợp phun syngas thấp và dao động mạnh hơn trường hợp phun hỗn hợp syngas-biogas. Điều này là do syngas chiếm một thể tích đáng kể trên đường nạp, làm giảm hệ số nạp của động cơ. Hình 11b cho thấy thành phần HC trong xi lanh giảm dần khi tăng hàm lượng biogas trong hỗn hợp với syngas. Điều này là do tỉ lệ A/F của biogas lớn hơn giá trị tương ứng của syngas.



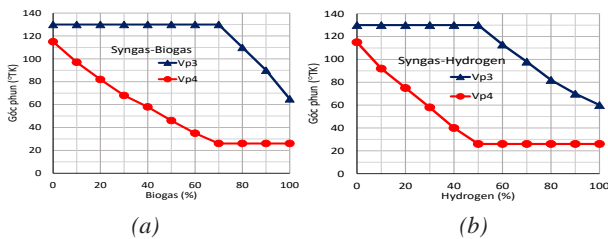
Hình 11. Biến thiên lưu lượng không khí, lưu lượng nhiên liệu (a) và biến thiên nồng độ HC, O₂, và hệ số tương đương ϕ (b) theo góc quay trục khuỷu khi phun syngas, biogas và hỗn hợp syngas-biogas với thành phần khác nhau



Hình 12. Biến thiên hệ số tương đương theo góc quay trục khuỷu khi phun hỗn hợp syngas-hydrogen với các thành phần khác nhau với góc phun Vp3, Vp4 thay đổi để $\phi=1$

Hình 12 cho thấy, khi tăng hàm lượng hydrogen trong hỗn hợp với syngas thì đỉnh đường cong hệ số tương đương theo góc quay trục khuỷu tăng nhưng sau đó giảm mạnh để đạt giá trị ổn định. Dạng đường cong ϕ này khác đáng kể

so với trường hợp phun syngas. Hỗn hợp cháy syngas-không khí cơ bản được hòa trộn ngay khi phun nên thành phần hỗn hợp trong xi lanh không thay đổi nhiều theo góc quay trục khuỷu. Góc mở vòi phun Vp3 giữ ổn định ở giá trị 130°TK đến khi thành phần hydrogen trong hỗn hợp với syngas đạt 50%. Trong khi đó, góc mở vòi phun Vp4 giảm từ 115°TK xuống 26°TK khi tăng hàm lượng hydrogen.



Hình 13. Biến thiên góc phun của vòi phun Vp3 và Vp4 theo hàm lượng biogas (a) và theo hàm lượng hydrogen (b) trong hỗn hợp với syngas để đảm bảo $\phi=1$ và cuối kỳ nén ($n=3000$ v/ph, áp suất phun $p_p=1$ bar)

Hình 13a giới thiệu biến thiên góc mở vòi phun Vp3 và Vp4 theo hàm lượng biogas trong hỗn hợp syngas-biogas để đảm bảo $\phi=1$ vào cuối kỳ nén. Ta thấy góc mở vòi phun Vp3 giữ ổn định 130°TK đến khi hàm lượng biogas trong hỗn hợp đạt 70%. Sau đó, góc mở vòi phun Vp3 giảm xuống đến 65°TK ứng với 100% biogas. Góc mở vòi phun Vp4 giảm từ 115°TK (ứng với 100% syngas) xuống 26°TK (ứng với 70% biogas) sau đó giữ ổn định giá trị này đến 100% biogas.

Tương tự như trên, Hình 13b giới thiệu góc mở các vòi phun theo hàm lượng trong hỗn hợp syngas-hydrogen. Để đảm bảo $\phi=1$ vào cuối kỳ nén, góc mở vòi phun Vp3 giữ ổn định 130°TK đến khi hàm lượng hydrogen trong hỗn hợp đạt 50%, sau đó giảm đến 60°TK khi động cơ chạy hoàn toàn bằng hydrogen. Góc mở vòi phun Vp4 giảm từ 115°TK (ứng với 100% syngas) xuống 26°TK (ứng với 50% hydrogen) sau đó giữ ổn định giá trị này đến 100% biogas.

Nhờ sự phối hợp này thời gian mở các vòi phun nằm trong giới hạn cực tiểu ($\varphi_p = 26^\circ\text{TK}$) và cực đại ($\varphi_p = 130^\circ\text{TK}$), một mặt đảm bảo cho nhiên liệu được hút hết vào buồng cháy và mặt khác, thời gian phun cực tiểu đủ lớn để hệ thống điều khiển có thể khống chế lượng phun chính xác khi động cơ chạy ở chế độ tải thấp.

4. Kết luận

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

- Động cơ làm việc trong hệ thống năng lượng tái tạo hybrid năng lượng mặt trời-sinh khối được cung cấp nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen có thành phần thay đổi trong phạm vi rộng nên hệ thống cung cấp nhiên liệu cho động cơ cần được điều chỉnh linh hoạt.

- So với biogas và hydrogen, syngas có tỉ lệ không khí/nhiên liệu thấp hơn nên các giải pháp cấp nhiên liệu truyền thống kiểu bộ chế hòa khí hay hệ thống phun nhiên liệu trên đường nạp sử dụng 1 vòi phun cho 1 xi lanh động cơ khó có thể cấp đủ nhiên liệu chu trình để đảm bảo $\phi=1$ và dễ gây hiện tượng nổ ngược trên đường nạp.

- Sử dụng vòi phun có đường kính lỗ phun lớn thì phù hợp với syngas nhưng không phù hợp với biogas, hydrogen; sử dụng vòi phun đường kính lỗ phun nhỏ thì ngược lại. Đối với động cơ Honda GX200 khi chuyển sang sử dụng nhiên liệu linh hoạt syngas-biogas-hydrogen thì phối hợp sử dụng 2 vòi phun có đường kính lỗ phun 4mm và 6mm là phù hợp.

- Góc mở các vòi phun phụ thuộc vào thành phần biogas hay hydrogen có mặt trong hỗn hợp với syngas. Khi tăng các thành phần này thì góc mở vòi phun có đường kính lỗ phun 6mm giảm còn góc mở vòi phun có đường kính lỗ phun 4mm duy trì giá trị cực đại 130°TK đến 70% biogas hay 50% hydrogen, sau đó giảm. Áp suất phun hợp lý là 1 bar.

Lời cảm ơn: Công trình này được thực hiện nhờ sự hỗ trợ của Bộ Giáo dục và Đào tạo thông qua đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ: “Mô đun điện-rác thông qua RDF sản xuất từ chất thải rắn ở nông thôn”, mã số: B2021-DNA-03.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C”, 2018, [Online] Available: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/pr_181008_P48_spm_en.pdf, accessed 7/2022.
- [2] BeyhanAkarsu, MustafaSerdar Genç. “Optimization of electricity and hydrogen production with hybrid renewable energy systems”. *Fuel*, Volume 324, Part A, 2022, 124465. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124465>
- [3] Rogel J., Geden O., Cowie A. & Reisinger A. “Net-zero emissions targets are vague: three ways to fix”. *Nature* 591, 2021, 365-368. <https://www.nature.com/articles/d41586-021-00662-3>
- [4] Yousefi H, Ghodusinejad MH, Kasaeian A., “Multi-objective optimal component sizing of a hybrid ICE + PV/T driven CCHP microgrid”. *Appl Therm Eng*, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.017>.
- [5] Shaopeng Guo, Qibin Liu, Jie Sun, Hongguang Jin., “A review on the utilization of hybrid renewable energy”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91, 2018 1121–1147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.105>
- [6] Van Ga Bui, Trung Hung Vo, Thi Minh Tu Bui, Le Bich Tram Truong, 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.
- [7] Van Ga Bui, Thi Minh Tu Bui, Hwai Chyuan Ong, Sandro Nižetić, Van Hung Bui, Thi Thanh Xuan Nguyen, A.E. Atabani, Libor Štěpánek, Le Hoang Phu Pham, Anh Tuan Hoang, “Optimizing operation parameters of a spark-ignition engine fueled with biogas-hydrogen blend integrated into biomass-solar hybrid renewable energy system”. *Energy*, Available online 18 April 2022, 124052. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124052>
- [8] Lanyu Li, Xiaonan Wang. “Design and operation of hybrid renewable energy systems: current status and future perspectives”. *Current Opinion in Chemical Engineering*, Volume 31, March 2021, 100669. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100669>
- [9] Mohammad HosseinJahangir, RaminCheraghi. “Economic and environmental assessment of solar-wind-biomass hybrid renewable energy system supplying rural settlement load”. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 42, December 2020, 100895. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100895>
- [10] RamanKumar, Harpreet KaurChanni. “A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis”. *Journal of Cleaner Production*, Volume 349, 15 May 2022, 131347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131347>
- [11] Harpreet Kaur, Surbhi Gupta, Arvind Dhingra. “Analysis of hybrid

- solar biomass power plant for generation of electric power". *Materials today*, Volume 48, Part 5, 2022, Pages 1134-1140. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.080>
- [12] SonjaKallio, MonicaSiroux. "Hybrid renewable energy systems based on micro-cogeneration". *Energy Reports*, Volume 8, Supplement 1, April 2022, Pages 762-769. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.158>
- [13] Akash Kumar, Shukla K. Sudhakar, Prashant Baredar. "Renewable energy resources in South Asian countries: Challenges, policy and recommendations". *Resource-Efficient Technologies*, Volume 3, Issue 3, September 2017, Pages 342-346. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.12.003>
- [14] World Economic Forum, "Visualizing the world's biggest rice producers", 2022, [Online] Available: <https://www.weforum.org/agenda/2022/03/visualizing-the-world-s-biggest-rice-producers/>, accessed 7/2022.
- [15] Shahbaz M, Al-Ansari T, Aslam M, Khan Z, Inayat A, Athar M, Naqvi SR, Ahmed MA, McKay G. "A state of the art review on biomass processing and conversion technologies to produce hydrogen and its recovery via membrane separation". *Int J Hydrogen Energy*, 2020;45(30):15166-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.009>.
- [16] Singh S, Singh M, Kaushik SC, "Feasibility study of an islanded microgrid in a rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system". *Energy Convers Manage*, 2016, 128:178-190 <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.046>
- [17] Rakibul Hassan, Barun K. Das, Mahmudul Hasan. "Integrated off-grid hybrid renewable energy system optimization based on economic, environmental, and social indicators for sustainable development". *Energy*. Volume 250, 1 July 2022, 123823. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123823>
- [18] Willian César Nadaleti, Grzegorz Przybyła. "Emissions and performance of a spark-ignition gas engine generator operating with hydrogen-rich syngas, methane and biogas blends for application in southern Brazilian rice industries". *Energy*, Volume 154, 1 July 2018, Pages 38-51. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.046>
- [19] J. Arroyo, F. Moreno, M. Muñoz, C. Monné, N. Bernal. "Combustion behavior of a spark ignition engine fueled with synthetic gases derived from biogas". *Fuel*, Volume 117, Part A, 30 January 2014, Pages 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.055>
- [20] C.Y. Acevedo-Arenas, A. Correcher, C. Sánchez-Díaz, E. Ariza, D. Alfonso-Solar, C. Vargas-Salgado, J.F. Petit-Suárez. "MPC for optimal dispatch of an AC-linked hybrid PV/wind/biomass/H2 system incorporating demand response". *Energy Convers Manag*, 186 (2019), pp. 241-257, [10.1016/j.enconman.2019.02.044](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.044)
- [21] XiangKan, DezhiZhou, WenmingYang, XiaoqiangZhai, Chi-HwaWang. "An investigation on utilization of biogas and syngas produced from biomass waste in premixed spark ignition engine". *Applied Energy*, Volume 212, 15 February 2018, Pages 210-222. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.037>
- [22] Willian César Nadaleti, Grzegorz Przybyła. "SI engine assessment using biogas, natural gas and syngas with different content of hydrogen for application in Brazilian rice industries: Efficiency and pollutant emissions". *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 43, Issue 21, 24 May 2018, Pages 10141-10154. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.073>
- [23] Carlos Vargas-Salgado, Jesús Águila-León, David Alfonso-Solar, Anders Malmquist, "Simulations and experimental study to compare the behavior of a genset running on gasoline or syngas for small scale power generation". *Energy*, Volume 244, Part A, 1 April 2022, 122633. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122633>
- [24] V.G. Bui, V.N. Tran, V.D. Nguyen, Q.T. Nguyen, T.T. Huynh, "Octane number stratified mixture preparation by gasoline-ethanol dual injection in SI engines". *International Journal of Environmental Science and Technology* 16(7), 2018, pp. 3021-3034, <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1942-1>.