

THÀNH PHẦN NHIÊN LIỆU VÀ GÓC ĐÁNH LỬA SỚM TỐI ƯU CỦA ĐỘNG CƠ SỬ DỤNG HỖN HỢP SYNGAS-BIOGAS-HYDROGEN

OPTIMAL FUEL COMPOSITIONS AND ADVANCED IGNITION ANGLE OF SI ENGINE FUELED WITH SYNGAS-BIOGAS-HYDROGEN BLENDS

Bùi Thị Minh Tú¹, Bùi Văn Ga^{2*}, Cao Xuân Tuấn², Võ Anh Vũ¹

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

²Đại học Đà Nẵng

*Tác giả liên hệ: buivanga@ac.udn.vn

(Nhận bài: 11/6/2022; Chấp nhận đăng: 08/7/2022)

Tóm tắt - Biogas, hydrogen giúp cải thiện quá trình cháy của syngas. Hàm lượng tối ưu của hydrogen và biogas pha vào syngas lần lượt là 20% và 30%. Khi vượt các ngưỡng này thì công suất chu trình tăng chậm hơn sự gia tăng nồng độ NO_x. Ở tốc độ động cơ 3000 rpm, với cùng hàm lượng hydrogen, biogas thì góc đánh lửa sớm của hỗn hợp syngas-hydrogen nhỏ hơn góc đánh lửa sớm của hỗn hợp syngas-biogas khoảng 4°TK. Góc đánh lửa sớm tối ưu tương ứng với syngas, biogas và hydrogen lần lượt là 38°TK, 24°TK và 18°TK. Trong điều kiện động cơ làm việc với thành phần hỗn hợp và góc đánh lửa sớm tối ưu, công suất chu trình động cơ giảm 35% và 32% lần lượt tương ứng với khi chuyển nhiên liệu từ hydrogen và biogas sang syngas. Để đạt được cùng mức tăng công suất thì hàm lượng biogas pha vào syngas lớn hơn 10% so với hàm lượng hydrogen pha vào biogas. Nhưng để đạt cùng mức phát thải NO_x thì hàm lượng hydrogen pha vào syngas bằng 50% hàm lượng biogas pha vào syngas.

Từ khóa - Năng lượng tái tạo; Biogas; Syngas; Hydrogen; Động cơ nhiên liệu khí

1. Giới thiệu

Để đảm bảo nhiệt độ bầu khí quyển không vượt quá ngưỡng cực đoan 2°C vào cuối thế kỷ này thì ngay từ bây giờ chúng ta phải cắt giảm phát thải các chất khí gây hiệu ứng nhà kính [1]. Việt Nam cũng như phần lớn các quốc gia trên thế giới đều đã cam kết thực hiện Hiệp định Khí hậu Paris COP21 [2] nhằm nỗ lực đưa mức phát thải ròng các chất khí gây hiệu ứng nhà kính về 0 vào năm 2050 (Net Zero) [3]. Chuyển đổi từ năng lượng hóa thạch sang năng lượng tái tạo là trọng tâm của chiến lược Net Zero [4]. Nhiều quốc gia đã áp dụng các chính sách ưu tiên phát triển năng lượng sạch vì vậy tỉ trọng năng lượng tái tạo trong sản xuất điện năng tăng nhanh trên toàn thế giới [5]. Tuy nhiên, việc sử dụng năng lượng tái tạo nói chung gặp phải nhiều thách thức kỹ thuật do mật độ năng lượng thấp, công suất dao động ngẫu nhiên và không liên tục [6]. Hệ thống năng lượng tái tạo lai (HRES), kết hợp sử dụng nhiều nguồn năng lượng tái tạo khác nhau là một giải pháp hữu hiệu để khắc phục các bất cập này [7]. So với các hệ thống năng lượng tái tạo chỉ dựa vào một nguồn năng lượng đơn lẻ, HRES làm việc ổn định, độ tin cậy cao và giảm nhu cầu lưu trữ năng lượng [8]. Ưu điểm nổi bật của HRES là mức độ phát thải CO₂ thấp, có thể bỏ qua so với hệ thống điện

Abstract - The combustion of syngas can be improved with the addition of biogas or hydrogen. The optimal content of hydrogen and biogas in the mixture with syngas is 20% and 30%, respectively. When these thresholds are exceeded, the indicated engine cycle work increases more slowly than the increase in NO_x concentration. At an engine speed of 3000 rpm, with the same content of hydrogen and biogas, the advanced ignition angle of the syngas-hydrogen blend is about 4°CA smaller than that of the syngas-biogas blend. The optimal advanced ignition angle for syngas, biogas and hydrogen is 38°CA, 24°CA and 18°CA, respectively. With optimal mixture compositions and advanced ignition angle, the indicated engine cycle work is reduced by 35% and 32%, respectively, when converting fuel from hydrogen and biogas to syngas. To achieve the same increase in power, the biogas content in the syngas is 10% larger than the hydrogen content in the biogas. But to achieve the same level of NO_x emission, the hydrogen content of the syngas is equal to 50% of the biogas content in the syngas.

Key words - Renewable energy system; Biogas; Syngas; Hydrogen; Gaseous fuel engine

sử dụng nhiên liệu hóa thạch truyền thống [9]. Ngoài ra, HRES có thể vận hành độc lập nên dễ dàng áp dụng ở các vùng nông thôn, các khu vực hẻo lánh chưa có điện lưới quốc gia [10].

Việt Nam nằm trong vùng nhiệt đới có nguồn năng lượng mặt trời và sinh khối rất dồi dào. Do đó, HRES điện mặt trời-sinh khối (solar-biomass) có rất nhiều tiềm năng [11]. Kết hợp sử dụng các nguồn năng lượng mặt trời dao động ngẫu nhiên với nguồn năng lượng sinh khối có thể kiểm soát được sẽ đảm bảo hệ thống HRES vận hành liên tục [12]. Bức xạ mặt trời trung bình ở nước ta nằm ở mức cao, khoảng 4-6 kWh/m²/ngày [13]. Mặt khác, nước ta đứng thứ hai trên thế giới về xuất khẩu gạo nên chất thải từ sản xuất nông nghiệp chiếm tỉ trọng lớn trong sinh khối [14]. Sinh khối ướt phù hợp với sản xuất khí sinh học (biogas) thông qua quá trình sinh hóa còn sinh khối khô, phù hợp với sản xuất khí tổng hợp (syngas) thông qua quá trình chuyển đổi nhiệt hóa [15]. Do đó, các chất thải hữu cơ nói chung có thể được phân tách thành các hai dòng: Dòng vật chất dễ phân hủy để sản xuất biogas và dòng vật chất khó phân hủy để sản xuất syngas. Ngoài ra, trong hệ thống năng lượng tái tạo lai điện mặt trời-sinh khối, khi công suất của các tấm pin năng lượng mặt trời cao hơn công

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

² The University of Danang (Bui Van Ga, Cao Xuan Tuan)

suất của phụ tải, năng lượng dư thừa sẽ được sử dụng để sản xuất hydrogen thông qua quá trình điện phân nước [6, 7]. Syngas, biogas và hydrogen được trộn với nhau và làm nhiên liệu cho động cơ kéo máy phát điện. Trong trường hợp HRES không hòa lưới thì cụm động cơ - máy phát điện này được sử dụng như nguồn năng lượng dự trữ [16].

Các thành phần của HRES phụ thuộc vào đặc tính của các nguồn năng lượng sơ cấp. Chúng có thể bao gồm pin năng lượng mặt trời, tuabin gió, tuabin thủy điện, máy phát điện diesel, máy phát chạy bằng nhiên liệu khí, accu, inverter và lưu trữ hydrogen [2, 9, 17]. Ngày nay, phần lớn các cấu phần này có thể tìm thấy dễ dàng trên thị trường, trừ động cơ đốt trong chạy bằng syngas-biogas-hydrogen. Đối với một loại nhiên liệu cho trước, các vấn đề liên quan đến hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nhiên liệu, các thông số vận hành của động cơ như góc đánh lửa sớm, tỉ lệ không khí/nhiên liệu và mối quan hệ của chúng với tính năng kỹ thuật và phát thải ô nhiễm cần phải được nghiên cứu tường tận trước khi áp dụng trong thực tế [18]. Động cơ đốt trong sử dụng nhiên liệu hóa thạch tuy đã được áp dụng từ cả trăm năm nhưng đến nay vẫn còn đang tiếp tục nghiên cứu. Việc áp dụng các loại nhiên liệu tái tạo trên động cơ càng đòi hỏi nhiều nghiên cứu chuyên sâu hơn, vì chúng mới đưa vào sử dụng trong những năm gần đây nên không phải tất cả các khía cạnh về hiệu quả và phát thải ô nhiễm đều đã được làm rõ [18]. Vì thế, động cơ đốt trong chạy bằng hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen, cấu phần quan trọng của HRES solar-biomass, cần phải được nghiên cứu tường tận.

Trong hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen thì hydrogen có những ưu điểm nổi bật như tốc độ cháy cơ bản cao, giới hạn cháy rộng, năng lượng đánh lửa thấp nên sự hiện diện của hydrogen trong hỗn hợp nhiên liệu cải thiện đáng kể chất lượng quá trình cháy. Do tốc độ cháy của hydrogen cao dẫn đến đỉnh đường cong áp suất xuất hiện gần điểm chết trên làm tăng áp suất cực đại so với các loại nhiên liệu truyền thống [6]. Dù chỉ một hàm lượng bé hydrogen, hỗn hợp nhiên liệu có thể cháy với hệ số tương đương thấp làm tăng hiệu suất nhiệt của động cơ [19]. Khi pha hydrogen vào biogas thì động cơ có thể làm việc với hỗn hợp cháy nghèo [7]. Điều này là do hydrogen cải thiện khả năng bắt lửa của hỗn hợp nhiên liệu [20]. Bui và cộng sự [6, 7] thấy rằng, khi tăng hàm lượng hydrogen trong biogas thì góc đánh lửa sớm tối ưu giảm, công suất chu trình của động cơ tăng nhẹ nhưng phát thải NO_x tăng rất mạnh. Ngay cả khi HRES solar-biomass không sản sinh hydrogen thì việc kết hợp sử dụng syngas và biogas từ biomass cũng đem lại hiệu quả cao hơn việc sử dụng riêng rẽ từng nhiên liệu thành phần. Trong biogas có CH_4 mang nhiệt trị cao còn syngas chứa hydrogen có tốc độ cháy cao. Vì vậy, khi sử dụng hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas thì hiệu suất nhiệt động cơ có thể được duy trì ở mức tương ứng của nhiên liệu thành phần nhưng phát thải NO_x và xu hướng kích nổ giảm [21]. Đối với cả hai loại nhiên liệu syngas, biogas, sự phát thải NO_x gần như bằng không khi sử dụng hỗn hợp nghèo [22]. Khi HRES bổ sung thêm hydrogen vào syngas hay biogas thì quá trình cháy được cải thiện mạnh mẽ hơn.

Trên thị trường hiện nay rất khó tìm được động cơ được

thiết kế đặc biệt để chạy bằng syngas [23]. Động cơ chạy bằng hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen phù hợp với HRES solar-biomass lại càng khó tìm hơn, thậm chí những công trình nghiên cứu liên quan đến động cơ này vẫn còn rất hiếm hoi trong cơ sở dữ liệu khoa học. Các công trình đã công bố liên quan đến lĩnh vực này chỉ mới đề cập đến tính năng của động cơ sử dụng riêng rẽ syngas, biogas hay syngas, biogas được làm giàu bằng methan, hydrogen. Bài báo này tập trung nghiên cứu đặc tính quá trình cháy của hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen với thành phần thay đổi linh hoạt, phù hợp với động cơ làm việc trong HRES solar-biomass. Kết quả của công trình là chỉ ra thành phần hỗn hợp nhiên liệu tối ưu, các thông số vận hành tối ưu của động cơ sử dụng hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen. Trên cơ sở đó định hướng hệ thống điều khiển động cơ để đạt được các thông số vận hành tối ưu nhằm tăng hiệu suất và giảm phát thải ô nhiễm của động cơ.

2. Trang thiết bị và phương pháp nghiên cứu

Mô phỏng được thực hiện trên động cơ Honda GX200. Động cơ có đường kính xi lanh 68mm, hành trình piston 45mm, tỉ số nén 8,5. Khi chạy bằng xăng, động cơ phát công suất cực đại 4,8kW ở tốc độ $n=3600$ vòng/phút. Động cơ được cải tạo sang chạy bằng hỗn hợp khí syngas-biogas-hydrogen. Hệ thống nạp của động cơ được thay thế bằng hệ thống phun nhiên liệu điều khiển linh hoạt để phù hợp với thành phần nhiên liệu thay đổi. Trong công trình này nhóm tác giả nghiên cứu quá trình cháy và phát thải ô nhiễm để xác định các thông số điều khiển tối ưu của động cơ.

Do tính phức tạp của vấn đề, nghiên cứu được thực hiện thông qua mô phỏng nhờ phần mềm FLUENT 2021R1. Không gian tính toán gồm xi lanh, buồng cháy và đường nạp động cơ. Lưới động được áp dụng trong không gian xi lanh do thể tích thay đổi trong quá trình piston chuyển động. Để tiết kiệm thời gian tính toán, khi kết thúc quá trình nén, đường nạp được tách ra khỏi không gian tính toán. Chia lưới không gian tính toán và xác định tính độc lập của lưới được trình bày trong công trình [7].

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	24,4	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)	33,90	10,24	12,03	-	-			

Quá trình cháy được mô phỏng thông qua mô hình Partially Premixed Combustion. Hiện tượng cháy rối được mô phỏng thông qua mô hình k- ϵ . Sự hình thành NO_x được tính toán thông qua mô hình Zeldovitch. Các chất trong sản phẩm cháy được xem ở trạng thái cân bằng nhiệt động học. Phương pháp giải hệ phương trình đối lưu-khuếch tán được trình bày trong [24].

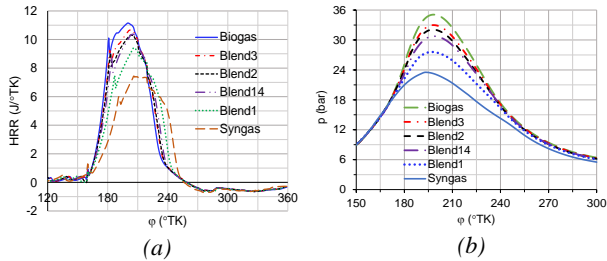
Biogas, syngas và hydrogen có các đặc trưng chính được trình bày trên Bảng 1. Các hỗn hợp nhiên liệu sử dụng trong tính toán được trình bày trên Bảng 2.

Bảng 2. Thành phần hỗn hợp nhiên liệu

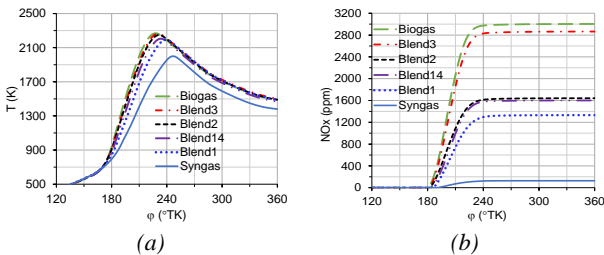
Hỗn hợp	Biogas (%)	Syngas (%)	Hydrogen (%)
Blend1	20	60	20
Blend2	40	40	20
Blend3	60	20	20
Blend9	0	50	50
Blend14	50	50	0

3. Kết quả và bình luận

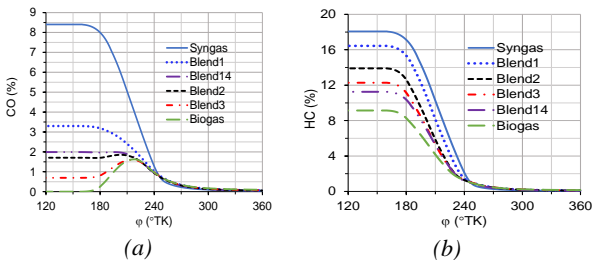
3.1. Ảnh hưởng của thành phần nhiên liệu



Hình 1. Ảnh hưởng của nhiên liệu đến biến thiên tốc độ tỏa nhiệt HRR (a) và áp suất p (b) theo góc quay trục khuỷu ($n=3000$ v/ph, $\phi=1$, $\phi_s=23$ TK)



Hình 2. Ảnh hưởng của nhiên liệu đến biến thiên nhiệt độ T (a) và nồng độ NO_x (b) theo góc quay trục khuỷu ($n=3000$ v/ph, $\phi=1$, $\phi_s=23$ TK)

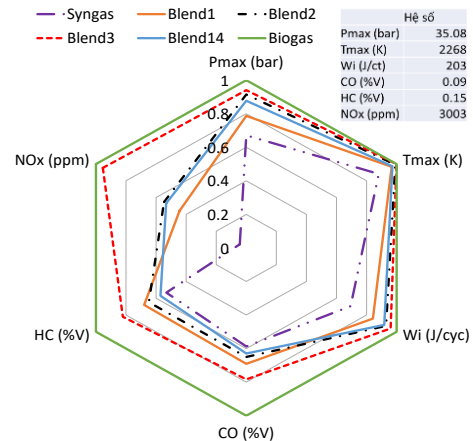


Hình 3. Ảnh hưởng của nhiên liệu đến biến thiên nồng độ CO (a) và nồng độ HC (b) theo góc quay trục khuỷu ($n=3000$ v/ph, $\phi=1$, $\phi_s=23$ TK)

Hình 1a so sánh biến thiên tốc độ tỏa nhiệt của hỗn hợp cháy theo góc quay trục khuỷu khi động cơ chạy bằng biogas, syngas và hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen với cùng hệ số tương đương $\phi=1$ và cùng góc đánh lửa sớm $\phi_s=23^\circ$ TK. Do syngas nghèo, tốc độ cháy thấp nên tốc độ tỏa nhiệt cực đại chỉ bằng 65% so với tốc độ tỏa nhiệt của biogas. Đỉnh đường cong tốc độ tỏa nhiệt của biogas đạt sớm hơn 10° TK so với đỉnh đường cong tốc độ tỏa nhiệt của syngas. Khi pha 50% biogas vào syngas (Blend14), tốc độ tỏa nhiệt cực đại đạt gần 90% tốc độ tỏa nhiệt của biogas. Điều này cho thấy khi pha biogas vào syngas thì chất lượng quá trình cháy được cải thiện dẫn đến

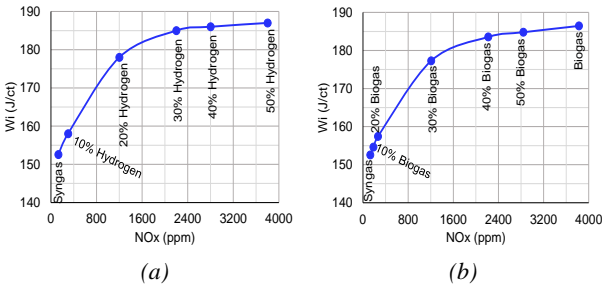
tăng áp suất cực đại (Hình 1b). Áp suất cực đại khi động cơ chạy bằng syngas chỉ đạt 23 bar, so với 35 bar khi động cơ chạy bằng biogas. Nhiệt độ cháy cực đại của biogas cũng cao hơn nhiệt độ cháy cực đại của syngas khoảng 300K (Hình 2a). Điều này là do nhiệt trị của syngas thấp và sự tồn tại nhiều tạp chất CO₂, N₂ trong nhiên liệu. Tuy nhiên, nhiệt độ cháy thấp của syngas làm cho mức độ phát thải NO_x cực thấp so với biogas. Hình 2b cho thấy, nồng độ NO_x khi động cơ chạy bằng biogas gần gấp 20 lần so với nồng độ của nó khi chạy bằng syngas. Hình 3a giới thiệu biến thiên nồng độ CO trong hỗn hợp khí. Do syngas có chứa CO nên nồng độ CO ban đầu cao và giảm dần khi hàm lượng biogas trong hỗn hợp tăng. Biogas không chứa CO nhưng CO là sản phẩm cháy trong điều kiện cân bằng nhiệt động học. Do tỉ lệ không khí/nhiên liệu (V_{kk}/V_{nl}) của CO và H₂ đều bé hơn so với V_{kk}/V_{nl} của CH₄ nên nồng độ HC tổng trong hỗn hợp cháy đối với syngas cao gần gấp đôi so với trường hợp biogas (Hình 3b). Trong điều kiện $\phi=1$, nồng độ CO, HC trong khí thải rất thấp và không có sự khác biệt đáng kể khi sử dụng nhiên liệu syngas-biogas có thành phần khác nhau.

Trong các Hình 1, Hình 2 và Hình 3, hỗn hợp nhiên liệu blend1, blend2 và blend3 chứa syngas, biogas và hydrogen, trong đó thành phần hydrogen được cố định 20%, thành phần biogas tăng từ 20% lên 60%. Chúng ta thấy khi thành phần biogas tăng từ 20% lên 40% thì áp suất cực đại tăng từ 27 bar lên 32 bar (Hình 1b). Trong khi đó, khi thành phần biogas tăng từ 40% lên 60% thì áp suất cực đại chỉ tăng từ 32 bar lên 33 bar so với 35 bar khi động cơ chạy bằng biogas. Khi hàm lượng biogas thấp thì hiệu quả cải thiện quá trình cháy cao hơn khi hàm lượng biogas cao vì khi biogas chiếm đa số trong hỗn hợp nhiên liệu thì tạp chất CO₂ trong hỗn hợp chiếm tỉ lệ gần như ổn định. Do đó, sự thay đổi thành phần biogas trong hỗn hợp nhiên liệu không làm thay đổi đáng kể tỉ lệ HC trên tổng số các tạp chất CO₂, N₂. Hình 1a thấy khi cố định thành phần hydrogen thì tốc độ tỏa nhiệt trong giai đoạn đầu quá trình cháy tăng theo hàm lượng biogas, điều này giúp áp suất tăng nhanh như Hình 1b. Khi động cơ sử dụng syngas thì tốc độ tỏa nhiệt thấp và đỉnh đường cong tỏa nhiệt dịch về phía đường dẫn nơ làm giảm áp suất cực đại và công chỉ thị chu trình.



Hình 4. So sánh các đặc trưng quá trình cháy syngas, biogas và hỗn hợp syngas-biogas-hydrogen ($n=3000$ v/ph, $\phi=1$, $\phi_s=23$ TK)

So sánh tổng hợp các đặc trưng quá trình cháy của syngas, biogas và hỗn hợp syngas-biogas được trình bày trên Hình 4. Trong điều kiện hệ số tương đương của hỗn hợp $\phi=1$, phát thải CO nhỏ hơn 0,097%, phát thải HC nhỏ hơn 0,156%. Hai thông số đặc trưng quan trọng khi so sánh là công suất chu trình W_i và nồng độ NO_x . Kết quả cho thấy, W_i đạt 203 J/cyc đối với biogas. Khi chuyển sang chạy bằng syngas thì W_i giảm hơn 30%. Phát thải NO_x trong trường hợp syngas chỉ đạt khoảng 180ppm có thể bỏ qua so với 3003ppm trong trường hợp biogas. Khi pha 50% biogas vào syngas (Blend14) thì nồng độ NO_x giảm 41% so với nồng độ của chúng khi chạy bằng biogas trong khi đó công suất chu trình giảm khoảng 5%. Do đó khi pha syngas vào biogas, hiệu quả giảm NO_x rõ rệt hơn giảm W_i . Khi giữ cố định hàm lượng hydrogen và tăng hàm lượng biogas trong hỗn hợp với syngas thì công suất chu trình tăng đồng thời với sự gia tăng nồng độ NO_x .



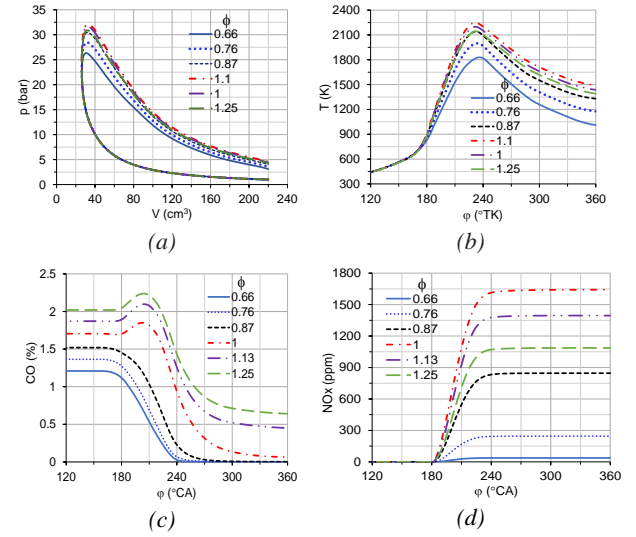
Hình 5. Quan hệ giữa W_i và NO_x theo hàm lượng hydrogen (a) và hàm lượng biogas (b) trong hỗn hợp với syngas ($n=3000$ v/ph, $\phi=1$, $\varphi_s=23$ TK)

Hình 5a biểu diễn quan hệ $W_i(NO_x)$ ứng với hỗn hợp nhiên liệu syngas-hydrogen có hàm lượng hydrogen khác nhau. Kết quả cho thấy, công suất chu trình tăng rất mạnh so với sự gia tăng nồng độ NO_x khi hàm lượng hydrogen nhỏ hơn 20%. Khi hàm lượng hydrogen vượt quá ngưỡng 20% thì công suất chu trình tăng chậm vì tác động của việc cải thiện quá trình cháy ít thay đổi. Trong khi đó, phát thải NO_x tăng gần như tuyến tính theo hàm lượng hydrogen pha vào syngas. Điều này một mặt là do nhiệt trị hỗn hợp tăng và mặt khác, do hydrogen cải thiện chất lượng quá trình cháy. Kết quả tổng hợp trên cho thấy khi pha 50% hydrogen vào syngas thì công suất chu trình tăng 22% nhưng nồng độ NO_x trong khí thải tăng đến 20 lần so với khi động cơ chạy bằng syngas. Trong khi đó nếu pha 20% hydrogen vào syngas thì công suất chu trình tăng 17% còn nồng độ NO_x chỉ tăng 7 lần so với khi động cơ chạy bằng syngas. Đối với hỗn hợp syngas-biogas, Hình 5b cho thấy khi thành phần biogas trong hỗn hợp với syngas nhỏ hơn 30% thì W_i tăng nhanh hơn NO_x . Khi hàm lượng biogas vượt quá ngưỡng này thì W_i tăng không đáng kể trong khi NO_x tăng rất mạnh. Vì vậy, có thể nói hàm lượng hydrogen tối ưu trong hỗn hợp với syngas là 20% còn hàm lượng biogas tối ưu trong hỗn hợp với syngas là 30%.

3.2. Ảnh hưởng của hệ số tương đương

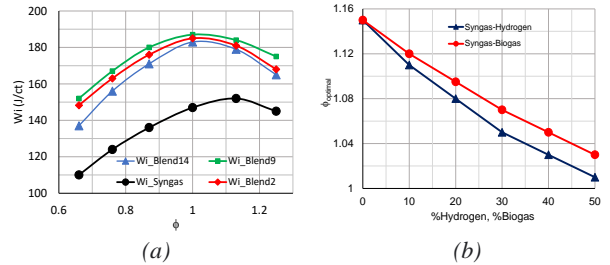
Hình 6a giới thiệu ảnh hưởng của hệ số tương đương đến đồ thị công khi động cơ chạy bằng hỗn hợp Blend2 ở tốc độ 3000 v/ph, hệ số tương đương của hỗn hợp $\phi=1$. Chúng ta thấy, khi hỗn hợp nghèo hay giàu, diện tích đồ thị công đều giảm. Đồ thị công lớn nhất tương ứng với hỗn

hợp hơi giàu. Điều này là do khi hỗn hợp giàu hay nghèo tốc độ cháy đều giảm, hiện tượng cháy không hoàn toàn diễn ra cục bộ, dẫn đến giảm nhiệt độ cháy (Hình 6b) và giảm áp suất trong xi lanh.



Hình 6. Ảnh hưởng của hệ số tương đương đến đồ thị công (a), đến biến thiên nhiệt độ (b) phát thải CO (c) và NO_x (d) theo góc quay trục khuỷu (Blend2, $n=3000$ v/ph, $\phi=1$, $\varphi_s=23$ TK)

Hệ số tương đương rất nhạy cảm đối với phát thải CO. Hình 6c cho thấy khi $\phi < 1$ thì phát thải CO hầu như bằng 0, nhưng nồng độ CO tăng rất nhanh theo ϕ khi $\phi > 1$. Do phát thải NO_x phụ thuộc vào nhiệt độ cháy nên nồng độ NO_x cao khi ϕ tiến gần đến 1. Hình 6d giới thiệu ảnh hưởng của ϕ đến biến thiên NO_x theo góc quay trục khuỷu. Chúng ta thấy, nồng độ NO_x khi $\phi=1$ gấp 5 lần so với nồng độ NO_x khi $\phi=0,76$ và gấp 1,5 lần khi $\phi=1,25$.

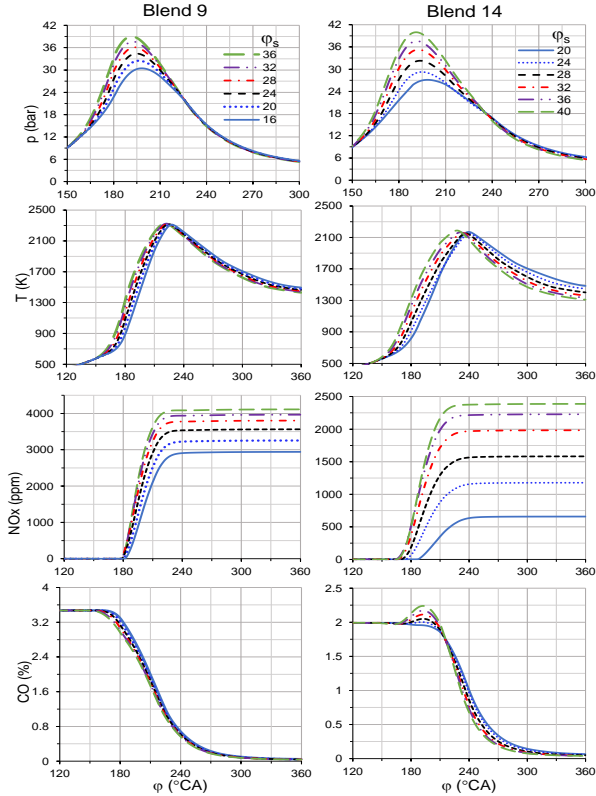


Hình 7. Ảnh hưởng của nhiên liệu đến biến thiên công suất chu trình theo hệ số tương đương (a) và biến thiên hệ số tương đương tối ưu theo hàm lượng biogas, hydrogen pha vào syngas ($n=3000$ v/ph, $\varphi_s=23$ TK)

Hình 7a cho thấy, các đường cong $W_i(\phi)$ có một giá trị cực đại tương ứng với ϕ tối ưu. Khi động cơ chạy hoàn toàn bằng syngas thì đường cong $W_i(\phi)$ thấp nhất và đỉnh đường cong dịch về phía hệ số tương đương lớn. Tại giá trị ϕ tối ưu, áp suất cực đại cũng như nhiệt độ cháy cực đại đạt giá trị cao nhất. Hình 7b cho thấy, khi hàm lượng hydrogen hay biogas pha vào syngas tăng thì ϕ tối ưu tiến về sát giá trị $\phi=1$ hơn. Tại cùng một hàm lượng hydrogen hay biogas pha vào syngas thì ϕ tối ưu của hỗn hợp syngas-hydrogen thấp hơn ϕ tối ưu của hỗn hợp syngas-biogas. Điều này là do khi pha hydrogen vào syngas thì chất lượng quá trình cháy được cải thiện tốt hơn. Trong điều kiện hoạt động bình thường, động cơ tĩnh tại phải phát huy công suất tối đa vì

vậy chúng thường xuyên làm việc với thành phần hỗn hợp tối ưu. Trong điều kiện đó thì hỗn hợp nhiên liệu syngas-hydrogen có lợi hơn hỗn hợp biogas-hydrogen do hệ số tương đương tối ưu của hỗn hợp syngas-hydrogen thấp hơn giá trị tương ứng của hỗn hợp syngas-biogas.

3.3. Ảnh hưởng của góc đánh lửa sớm

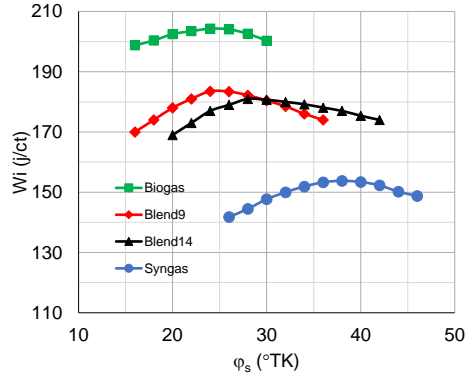


Hình 8. So sánh ảnh hưởng của góc đánh lửa sớm đến biến thiên p, T, CO, NO_x theo góc quay trục khuỷu khi động cơ chạy bằng nhiên liệu Blend9 và Blend14 (n=3000 v/ph, phi=1, phi_s=23 TK)

Hình 8 giới thiệu ảnh hưởng của góc đánh lửa sớm đến các đặc trưng của quá trình cháy khi động cơ chạy bằng hỗn hợp nhiên liệu Blend9 (50% syngas và 50% hydrogen) và hỗn hợp nhiên liệu Blend14 (50% syngas và 50% biogas). Tính toán được thực hiện trong phạm vi thay đổi góc đánh lửa sớm 20°TK-36°TK (đối với Blend9) và 20°TK-40°TK (đối với Blend14). Chúng ta thấy cùng một góc đánh lửa sớm cho trước thì áp suất cực đại của Blend9 cao hơn dẫn đến nhiệt độ cháy cực đại cũng cao hơn. Tốc độ gia tăng nhiệt độ trong quá trình cháy của Blend9 cao hơn Blend14. Nhiệt độ hỗn hợp trong quá trình dẫn nở đối với Blend9 không khác biệt nhiều khi thay đổi góc đánh lửa sớm trong khi đó đối với hỗn hợp Blend14 thì có sự chênh lệch đáng kể giữa nhiệt độ khi góc đánh lửa sớm 20°TK và 40°TK.

Do hỗn hợp cháy có phi=1 nên trên lý thuyết quá trình cháy diễn ra hoàn toàn. Tuy nhiên, do cân bằng của phản ứng khí-nước nên CO vẫn có mặt trong sản phẩm cháy. Khi bổ sung biogas vào syngas, thành phần CO₂ trong hỗn hợp nhiên liệu Blend14 tăng. Điều này làm tăng nồng độ CO trong sản phẩm cháy trong giai đoạn cháy nhanh. Tuy nhiên sau đó thì hỗn hợp cháy đạt trạng thái cân bằng nhiệt động học. Cuối quá trình cháy, nồng độ CO trong khí thải

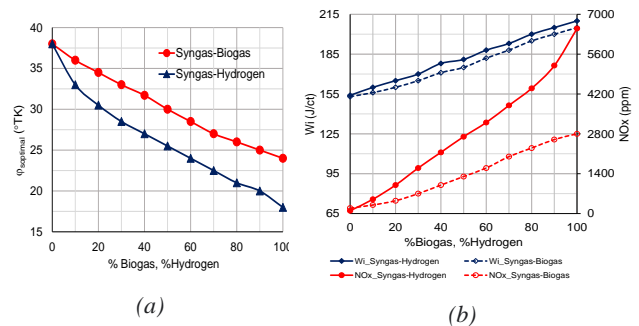
của hai trường hợp Blend9 và Blend14 không khác biệt nhau nhiều. Đối với phát thải NO_x, Hình 8 cho thấy, trong cả hai trường hợp Blend9 và Blend14, nồng độ NO_x đều tăng theo góc đánh lửa sớm. Điều này có thể giải thích là do tăng thời gian tồn tại của sản phẩm cháy ở môi trường nhiệt độ cao. Khác biệt lớn nhất trong hai trường hợp này là nồng độ NO_x đối với Blend14 thấp hơn rất nhiều so với nồng độ của nó khi động cơ sử dụng Blend9. Nhiệt độ cháy của Blend9 cao hơn nhiệt độ cháy của Blend14 là lý do của sự khác biệt này.



Hình 9. Ảnh hưởng của nhiên liệu đến biến thiên công chỉ thị chu trình theo góc đánh lửa sớm (n=3000 v/ph, phi=1)

Hình 9 cho thấy với một loại nhiên liệu cho trước, khi thay đổi góc đánh lửa sớm thì đường cong Wi có một giá trị cực đại ứng với góc đánh lửa sớm tối ưu. Khi tăng hàm lượng hydrogen hay biogas pha vào syngas thì công chỉ thị chu trình tăng đồng thời góc đánh lửa sớm tối ưu giảm. Điều này là do khi thay thế syngas bằng hydrogen hay biogas thì năng lượng nhiên liệu mang vào động cơ tăng và tốc độ cháy tăng do đó làm tăng công chỉ thị chu trình.

Khi chuyển từ syngas sang hydrogen, công chỉ thị chu trình của động cơ tăng từ 155 J/cyc lên 210 J/cyc, tức tăng 35%. Khi chuyển từ syngas sang biogas thì công chỉ thị chu trình tăng 32%. Tuy nhiên phát thải NO_x tăng rất nhanh theo hàm lượng hydrogen pha vào syngas so với khi pha biogas vào syngas. Khi động cơ làm việc với góc đánh lửa sớm tối ưu, nồng độ NO_x tăng từ vài trăm ppm (đối với syngas) lên đến trên 6000 ppm (đối với hydrogen). Trong khi đó nếu chuyển từ syngas qua biogas thì nồng độ NO_x tăng từ vài trăm ppm lên 2800ppm. Điều này là do nhiệt độ cháy của syngas, biogas đều thấp hơn nhiệt độ cháy của hydrogen.



Hình 10. Biến thiên góc đánh lửa sớm tối ưu (a) và biến thiên Wi, NO_x (b) theo hàm lượng biogas, hydrogen pha vào syngas (n=3000 v/ph, phi=1, phi_s=23 TK)

Hình 10a cho thấy, góc đánh lửa sớm tối ưu giảm từ 38°TK (ứng với syngas) xuống 24°TK (ứng với biogas) và 18°TK (ứng với hydrogen). Góc đánh lửa sớm tối ưu thay đổi nhanh ở vùng hàm lượng hydrogen thấp và hàm lượng hydrogen cao. Trong khoảng hàm lượng hydrogen từ 20% đến 90%, góc đánh lửa sớm tối ưu thay đổi tuyến tính với hàm lượng hydrogen trong nhiên liệu.

Kết quả tổng hợp trên Hình 10a và Hình 10b cho thấy, với cùng hàm lượng hydrogen và biogas pha vào syngas thì công suất chu trình của hỗn hợp syngas-hydrogen lớn hơn khoảng 5 J/cyc tuy nhiên nồng độ NO_x tăng gấp đôi so với các giá trị tương ứng khi động cơ chạy bằng hỗn hợp syngas-biogas. Góc đánh lửa sớm tối ưu của hỗn hợp nhiên liệu syngas-hydrogen nhỏ hơn 4°TK so với hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas cùng hàm lượng. Để có cùng mức độ phát thải NO_x thì hàm lượng hydrogen pha vào syngas bằng khoảng 50% hàm lượng biogas pha vào syngas. Khi đó công suất chu trình của động cơ chạy bằng syngas-hydrogen nhỏ hơn 5 J/cyc so với khi chạy bằng syngas-biogas.

Để đạt được cùng mức tăng công suất thì hàm lượng biogas pha vào syngas lớn hơn 10% so với hàm lượng hydrogen pha vào biogas. Nhưng để đạt cùng mức phát thải NO_x thì hàm lượng hydrogen pha vào syngas bằng 50% hàm lượng biogas pha vào syngas. Khi sử dụng hỗn hợp nhiên liệu syngas-biogas-hydrogen thì góc đánh lửa sớm tối ưu bé nhất ứng với hydrogen và góc đánh lửa sớm tối ưu lớn nhất ứng với syngas. Khi cố định thành phần syngas trong hỗn hợp thì góc đánh lửa sớm tối ưu nằm trong giới hạn của đường cong biến thiên góc đánh lửa sớm tối ưu theo hàm lượng hydrogen và đường cong biến thiên góc đánh lửa sớm tối ưu theo hàm lượng biogas. Nếu có số liệu phân tích khí, chúng ta có thể điều chỉnh tự động góc đánh lửa sớm tối ưu. Trong thực tế, khi không có thông tin chính xác về thành phần hỗn hợp nhiên liệu, chúng ta có thể điều chỉnh góc đánh lửa sớm từ giá trị nhỏ nhất tương ứng với hydrogen đến giá trị lớn nhất tương ứng với syngas.

4. Kết luận

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

- Khi hàm lượng hydrogen pha vào syngas nhỏ hơn 20% thì công suất chu trình tăng nhanh nhưng khi vượt qua ngưỡng giá trị này thì công suất chu trình tăng chậm trong khi nồng độ NO_x tăng nhanh.

- Hàm lượng biogas tối ưu pha vào syngas là 30%. Dưới ngưỡng này, công suất chu trình tăng nhanh theo hàm lượng biogas nhưng khi vượt qua giá trị này thì sự gia tăng nồng độ NO_x cao hơn nhiều so với sự gia tăng Wi.

- Ở tốc độ động cơ 3000 rpm, với cùng hàm lượng hydrogen, biogas trong hỗn hợp với syngas thì góc đánh lửa sớm của hỗn hợp hydrogen-syngas nhỏ hơn góc đánh lửa sớm của hỗn hợp syngas-biogas khoảng 4°TK. Góc đánh lửa sớm tối ưu giảm từ 38°TK (ứng với syngas) xuống 24°TK (ứng với biogas) và 18°TK (ứng với hydrogen). Góc đánh lửa sớm tối ưu của hỗn hợp syngas-biogas-hydrogen nằm trong khoảng góc đánh lửa sớm của hydrogen và góc đánh lửa sớm của syngas.

- Hệ số tương đương tối ưu tiến dần đến 1 khi tăng hàm lượng hydrogen hay biogas pha vào syngas. Cùng hàm lượng hydrogen hay biogas, hệ số tương đương tối ưu của hỗn hợp syngas-hydrogen nhỏ hơn hệ số tương đương của hỗn hợp syngas-biogas do đó khi động cơ làm việc với thành phần hỗn hợp tối ưu thì phát thải CO của hỗn hợp syngas-hydrogen thấp hơn mức phát thải CO đối với hỗn hợp syngas-biogas.

- Trong điều kiện động cơ làm việc với thành phần hỗn hợp tối ưu và góc đánh lửa sớm tối ưu, công suất chu trình động cơ giảm 35% và 32% tương ứng với khi chuyển từ hydrogen sang syngas và từ biogas sang syngas. Để đạt được cùng mức tăng công suất thì hàm lượng biogas pha vào syngas lớn hơn 10% so với hàm lượng hydrogen pha vào biogas. Nhưng để đạt cùng mức phát thải NO_x thì hàm lượng hydrogen pha vào syngas bằng 50% hàm lượng biogas pha vào syngas.

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] PCC Special Report on Global Warming of 1.5°C. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/pr_181008_P48_spm_en.pdf
- [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] Rogelj J., Geden O., Cowie A. & Reisinger A. (2021): Net-zero emissions targets are vague: three ways to fix. *Nature* 591, 365-368. <https://www.nature.com/articles/d41586-021-00662-3>
- [4] Yousefi H, Ghoduseinejad MH, Kasaeian A., 2017, *Multi-objective optimal component sizing of a hybrid ICE + PV/T driven CCHP microgrid*. *Appl Therm Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.017>.
- [5] Shaopeng Guo, Qibin Liu, Jie Sun, Hongguang Jin., 2018. A review on the utilization of hybrid renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91 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 Štěpanec, 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.refit.2016.12.003>
- [14] <https://www.weforum.org/agenda/2022/03/visualizing-the-world-s-biggest-rice-producers/>
- [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 Przybyla. 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 Manage*, 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 Przybyla. 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), pp. 3021-3034 (2018), <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1942-1>