

COMBUSTION CHARACTERISTICS OF DUAL FUEL ENGINE FUELED WITH HIGH-HEAT VALUE SYNGAS

Bui Thi Minh Tu¹, Truong Le Bich Tram¹, Ho Tran Ngoc Anh^{2*}, Nguyen Le Chau Thanh², Ngo Tan Thong²

¹University of Science and Technology - The University of Da Nang

²University of Technology and Education - The University of Da Nang

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 13/11/2023 Revised: 29/01/2024 Published: 30/01/2024 KEYWORDS Syngas Renewable fuel Biomass gasification RDF Dual fuel engine	Syngas from refuse-derived fuel gasification is a potential fuel for use in heat engines. In this research, Ansys Fluent 2021R1 software was used to study the influence of the content of oxygen in the oxidant on the quality of syngas obtained from refuse-derived fuel wood gasifier, the fuel supply and combustion of dual fuel engine converted from Vikyno RV165 diesel engine. The heat value of syngas from refuse-derived fuel gasification can be improved by using oxygen-enriched air as oxidant. The total mass compositions of combustible gases in the syngas is 35%, 41%, 54% and 66%, respectively, when the air oxidant is enriched by 0%, 10%, 30% and 50% oxygen. Compared to diesel operating mode, the power reduction of dual fuel engine fueled with these syngas is 32.30%, 22.65%, 10.96% and 5.40%, respectively. It is possible to approximate characteristics parameters of the combustion process concentration of the dual fuel syngas engine increasing linearly according to the content of oxygen enriched air supplied to the biomass refuse-derived fuel gasifier. The results of this research as a basis for the widespread use of syngas in heat engines.

ĐẶC TRƯNG QUÁ TRÌNH CHÁY ĐỘNG CƠ DUAL FUEL CHẠY BẰNG SYNGAS NHIỆT TRỊ CAO

Bùi Thị Minh Tú¹, Trương Lê Bích Trâm¹, Hồ Trần Ngọc Anh^{2*}, Nguyễn Lê Châu Thành², Ngô Tấn Thống²

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, ²Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 13/11/2023 Ngày hoàn thiện: 29/01/2024 Ngày đăng: 30/01/2024 TỪ KHÓA Khí tổng hợp Nhiên liệu tái tạo Khí hóa sinh khối RDF Động cơ Dual fuel	Syngas thu được từ quá trình khí hóa là nhiên liệu tiềm năng sử dụng trên động cơ nhiệt. Trong công trình này, phần mềm Ansys Fluent 2021R1 được sử dụng trong nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng oxygen trong chất oxy hóa đến chất lượng syngas thu được từ lò khí hóa viên nén nhiên liệu gỗ, quá trình cung cấp nhiên liệu và quá trình cháy của động cơ dual fuel được cải tạo từ động cơ diesel Vikyno RV165. Khi khí hóa viên nén nhiên liệu sinh khối với chất oxy hóa là không khí được làm giàu oxygen thì nhiệt trị syngas tăng. Tổng thành phần khối lượng các chất khí cháy được trong syngas lần lượt là 35%, 41%, 54% và 66% khi chất oxy hóa là không khí được làm giàu bởi 0%, 10%, 30% và 50% oxygen; mức giảm công suất của động cơ dual fuel so với động cơ diesel trước khi cải tạo khi sử dụng các mẫu syngas này lần lượt là 32,30%, 22,65%, 10,38% và 5,40%. Có thể xem gần đúng các thông số đặc trưng quá trình cháy của động cơ dual fuel syngas tăng theo quy luật tuyến tính theo hàm lượng oxygen làm giàu không khí cung cấp cho lò khí hóa viên nén nhiên liệu sinh khối. Kết quả của nghiên cứu này làm cơ sở để nghiên cứu sử dụng rộng rãi syngas trên động cơ nhiệt.

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.9198>

* Corresponding author. Email: htnanh@ute.udn.vn

1. Giới thiệu

Với đặc điểm khí hậu nhiệt đới và sản xuất nông nghiệp, nước ta có nhiều tiềm năng về năng lượng biomass. Tuy nhiên cho đến nay, việc khai thác nguồn năng lượng tái tạo này chưa được phát triển rộng rãi. Phương pháp chuyển hóa năng lượng bằng công nghệ đốt truyền thống thường đi kèm theo những yêu cầu xử lý khí thải phức tạp và tốn kém. Khí hóa RDF biomass là giải pháp có nhiều ưu điểm và đang được các nước phát triển áp dụng [1]. Giải pháp này giúp xử lý triệt để biomass từ chất thải rắn, làm giảm chất thải còn phải chôn lấp xuống còn khoảng 20%, do đó tiết kiệm được quỹ đất dành cho bãi chôn lấp rác [2]. Syngas (khí tổng hợp) thu được từ quá trình khí hóa là hỗn hợp khí gồm CO , H_2 , CH_4 , CO_2 , N_2 là nhiên liệu tiềm năng sử dụng trên động cơ nhiệt [3].

Việc chuyển đổi động cơ truyền thống sang sử dụng syngas vấp phải hai thách thức về mặt kỹ thuật. Thứ nhất là nhiệt trị nhiên liệu thấp làm giảm công suất động cơ và giảm tầm hoạt động của phương tiện vận chuyển sử dụng syngas. Thứ hai là tỉ số không khí/nhiên liệu A/F của syngas rất thấp. A/F thấp dẫn đến thời gian cung cấp nhiên liệu kéo dài làm cho một bộ phận nhiên liệu không hút hết vào xi lanh. Điều này gây ra một số bất cập trong quá trình động cơ hoạt động như hiện tượng nổ ngược, hỗn hợp cháy nghèo và sự mất ổn định khi động cơ làm việc ở chế độ tốc độ cao. Do đó hệ thống cung cấp syngas cho động cơ ngoài yêu cầu phải đảm bảo hỗn hợp đồng nhất còn phải đảm bảo lượng nhiên liệu còn sót lại trên đường nạp ở mức tối thiểu để không xảy ra hiện tượng nổ ngược.

Các phương pháp truyền thống cung cấp nhiên liệu khí cho động cơ phổ biến hiện nay gồm phương pháp hút qua bộ chế hòa khí và phương pháp phun nhiên liệu trước cửa nạp. Đối với nhiên liệu có chứa hydrogen, bộ chế hòa khí cần được thiết kế đặc biệt để giảm thiểu khả năng nổ ngược [4], [5]. Điều chỉnh góc phun phù hợp cũng là một giải pháp hạn chế hiện tượng nổ ngược khi sử dụng nhiên liệu có hàm lượng hydrogen cao [6]. Cả hai giải pháp này đều có bất cập chung là hệ số nạp giảm làm giảm công suất động cơ [6], [7]. Bất cập này có thể được khắc phục nhờ phương pháp phun trực tiếp nhiên liệu khí vào xi lanh động cơ [7], [8].

Ngoài những khó khăn liên quan đến quá trình cung cấp nhiên liệu, khi sử dụng syngas nghèo, công suất động cơ còn giảm sâu so với động cơ cùng cỡ chạy bằng nhiên liệu truyền thống. Thông thường công suất động cơ xăng dầu giảm 30%-40% khi chuyển sang chạy bằng syngas. Để khắc phục sự sụt giảm công suất, chúng ta cần làm giàu syngas bằng những loại nhiên liệu có nhiệt trị cao hơn như khí thiên nhiên, hydrogen hay biogas [9]. Nguyên nhân chính gây ra sự sụt giảm công suất động cơ syngas là do nhiên liệu chứa trên 50% khí trơ N_2 . Do đó, để nâng cao nhiệt trị của syngas, lò khí hóa cần được cung cấp chất oxy hóa giàu oxygen.

Công trình này trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng oxygen trong chất oxy hóa đến chất lượng syngas thu được từ lò khí hóa RDF gỗ. Trên cơ sở đó, tính năng của động cơ dual fuel sử dụng syngas này được phân tích dựa trên kết quả mô phỏng.

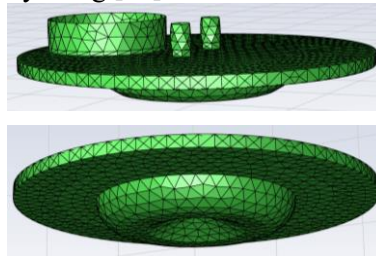
2. Phương pháp và trang thiết bị nghiên cứu

Thiết bị nghiên cứu gồm lò khí hóa kiểu hút lên [10] và động cơ dual fuel được cải tạo từ động cơ diesel Vikyno RV165. Lò khí hóa sử dụng chất oxy hóa là không khí được làm giàu oxygen với hàm lượng khác nhau. Nhiên liệu cung cấp vào lò là RDF gỗ. Động cơ Vikyno RV165 có đường kính xi lanh 105 mm, hành trình piston 97 mm, tỉ số nén 20. Động cơ phát công suất tối đa 12,23 kW ở tốc độ 2400v/ph khi chạy bằng diesel. Sau khi cải tạo, tỉ số nén động cơ được giảm xuống còn 17,1. Hỗn hợp syngas-không khí được hòa trộn trước khi được hút vào xi lanh [11].

Phần mềm Ansys Fluent 2021R1 được sử dụng trong nghiên cứu mô phỏng. Quá trình mô phỏng lò khí hóa RDF gỗ được trình bày trong [9]. Mô phỏng quá trình cung cấp nhiên liệu và quá trình cháy của động cơ được trình bày cụ thể trong các công trình [11] - [13].

Hình 1 giới thiệu không gian tính toán động cơ khi piston ở điểm chết trên. Khi piston dịch chuyển, thể tích xi lanh thay đổi, do đó lưới động được áp dụng trong không gian xi lanh. Nhiên

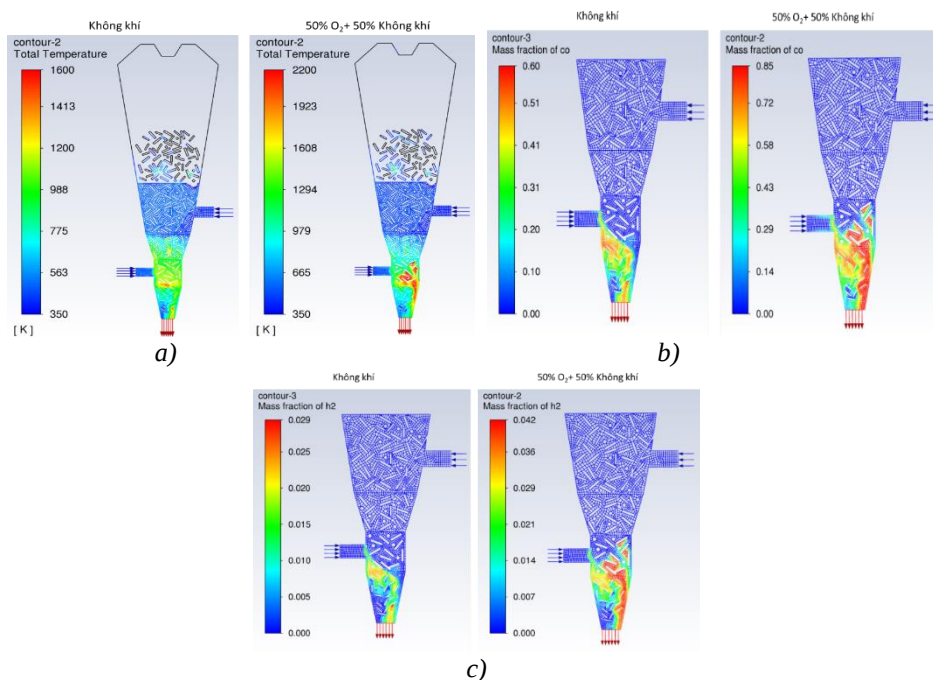
liệu diesel được phun vào buồng cháy ở cuối kỳ nạp. Mô phỏng tia nhiên liệu lỏng và quá trình bốc hơi hạt nhiên liệu được trình bày trong [11].



Hình 1. Không gian tính toán khí piston ở điểm chết trên

3. Kết quả và bình luận

3.1. Thành phần syngas khi khí hóa RDF với chất oxy hóa là không khí được làm giàu bởi oxygen

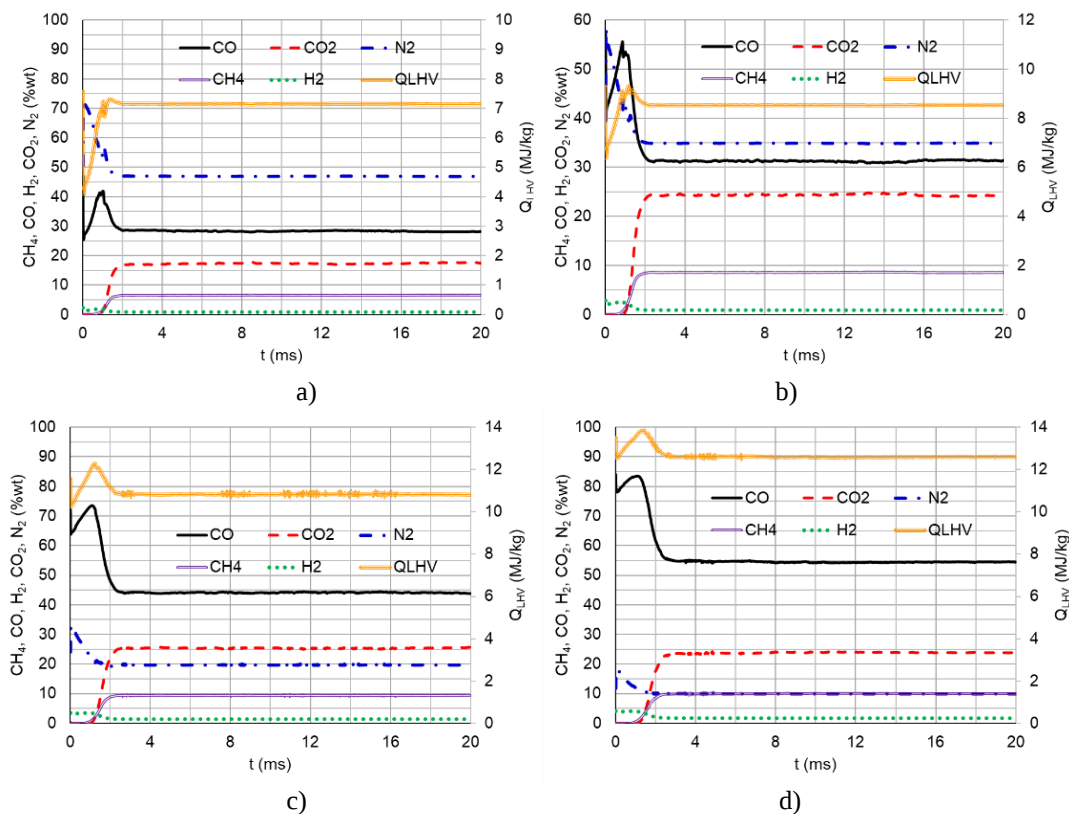


Hình 2. Phân bố nhiệt độ (a), nồng độ CO (b) và nồng độ H₂ (c) trong khu vực cháy và hoàn nguyên khi sử dụng không khí và 50% O₂+50% không khí làm chất oxy hóa (ER=0,35)

Khi làm giàu không khí bằng oxygen thì nồng độ ni tơ giảm, nhiệt độ cháy tăng dẫn đến tăng nhiệt độ của khu vực hoàn nguyên, do đó nồng độ các chất khí cháy được trong syngas tăng dần đến tăng nhiệt trị của nhiên liệu. Mô phỏng quá trình khí hóa biomass với chất oxy hóa là không khí đã được giới thiệu trong [14] - [18]. Trong công trình này chúng tôi phát triển mô hình để tính toán tính chất của syngas khi sử dụng chất oxy hóa là không khí được làm giàu bởi oxygen với hàm lượng khác nhau. Syngas này được dùng làm nhiên liệu cho động cơ dual fuel. Hình 2a so sánh phân bố nhiệt độ khu vực cháy và khu vực hoàn nguyên khi lò khí hóa được cung cấp không khí và 50% O₂+50% không khí. Chúng ta thấy khi không khí được làm giàu oxygen thì nhiệt độ cực đại của khu vực cháy tăng và khu vực cháy chính dịch về phía đối diện với cửa cấp khí. Nhiệt độ cháy cực đại đạt 2200 K ứng với chất oxy hóa 50% O₂+50% không khí. Khi không khí được dùng làm chất oxy hóa thì nhiệt độ cháy lớn nhất đạt khoảng 1600K.

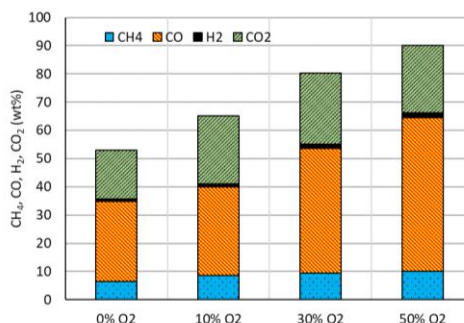
Nhiệt độ cháy cao làm tăng nhiệt độ khu vực hoàn nguyên do đó thúc đẩy các phản ứng chuyển hóa giữa CO₂, CO, CH₄, H₂, H₂O để đạt trạng thái cân bằng nhiệt động học. Hình 2b cho thấy nồng độ cực đại của CO ở khu vực hoàn nguyên lên đến 85% khi làm giàu không khí bằng

50% oxygen và đạt 60% khi sử dụng chất oxy hóa là không khí. Nồng độ H_2 cũng tăng từ 2,9% với chất oxy hóa là không khí lên 4,2% khi sử dụng không khí được làm giàu bởi 50% oxygen làm chất oxy hóa.



Hình 3. Ảnh hưởng của hàm lượng oxygen làm giàu không khí đến tính chất syngas ($ER=0,35$, $T_{hn}=800K$) (a) 0% O₂; (b) 10% O₂; (c) 30% O₂; (d) 50% O₂.

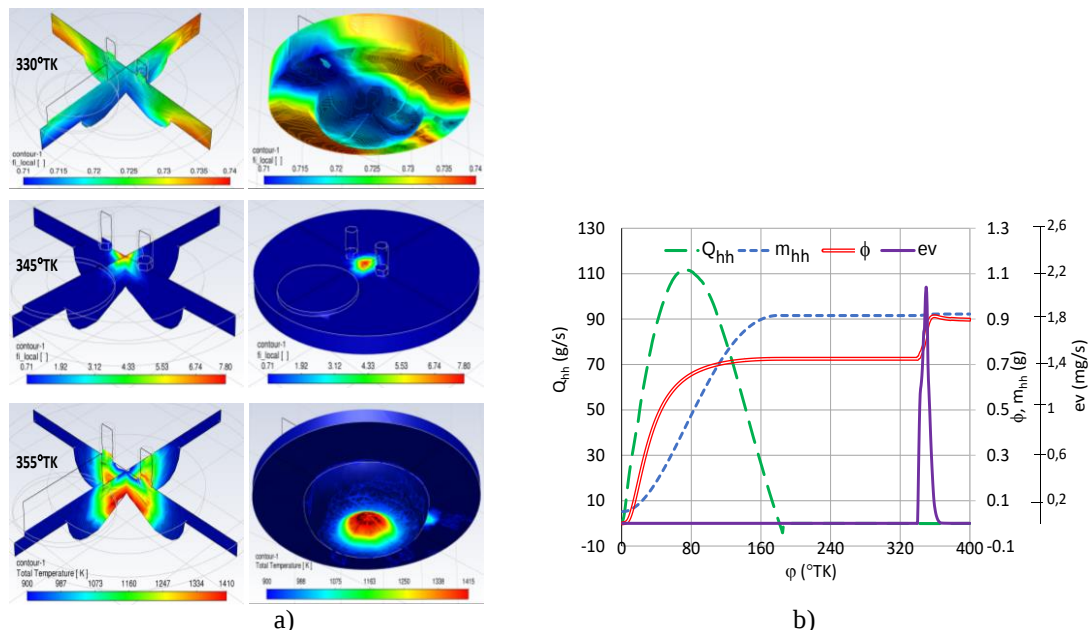
Hình 3 giới thiệu ảnh hưởng của hàm lượng oxy làm giàu không khí đến thành phần và nhiệt trị syngas. Hệ số dư lượng không khí $ER=0,35$, nhiệt độ vùng hoàn nguyên T_{hn} được giữ ổn định ở 800K. Trong điều kiện đó chúng ta thấy nồng độ CO trong syngas tăng nhanh khi tăng hàm lượng oxygen làm giàu không khí từ 0%, 10%, 30% và 50%. Do nhiệt độ khu vực hoàn nguyên được giữ ổn định như nhau trong tất cả các trường hợp nên tốc độ diễn ra các phản ứng hoàn nguyên không thay đổi nhiều. Thành phần CO tăng theo hàm lượng oxygen là do quá trình cháy không hoàn toàn của nhiên liệu ở phía trước khu vực hoàn nguyên.



Hình 4. Ảnh hưởng của thành phần oxygen làm giàu không khí đến thành phần những chất khí trong syngas ($ER=0,35$, $T_{hn}=800K$)

Khi sử dụng chất oxy hóa là không khí được làm giàu oxygen trong điều kiện giữ ổn định nhiệt độ khu vực khí hóa thì thành phần CO_2 trong syngas không thay đổi nhiều nhưng thành phần ni tơ giảm do đó thành phần các chất khí cháy được trong syngas tăng. Hình 4 cho thấy tổng thành phần khối lượng các chất khí cháy được trong syngas lần lượt là 35%, 41%, 54% và 66% khi chất oxy hóa là không khí được làm giàu bởi 0%, 10%, 30% và 50% oxygen.

3.2. Cung cấp syngas cho động cơ dual fuel



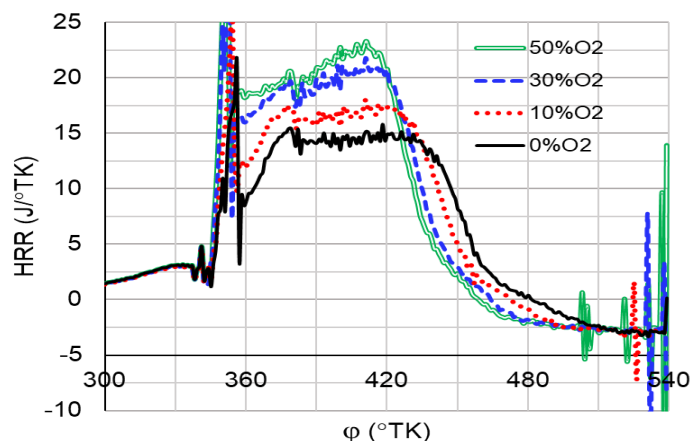
Hình 5. Phân bố nhiệt độ và hệ số tương đương trong buồng cháy tại thời điểm 330 TK, 345 TK và 355 TK (a); biến thiên lưu lượng hỗn hợp, khối lượng hỗn hợp, hệ số tương đương và tốc độ bốc hơi diesel theo góc quay trục khuỷu (b) ($n=2400\text{v/ph}$)

Trong công trình này, syngas được cung cấp vào động cơ bằng phương pháp hút thông qua bộ tạo hỗn hợp. Do có nhiều thời gian hòa trộn nên độ đồng đều của hỗn hợp được cải thiện. Cuối quá trình nén, hệ số tương đương của hỗn hợp chỉ dao động từ 0,71 đến 0,74 (Hình 5a). Hỗn hợp nhát tập trung về phía xú páp nạp. Độ đậm đặc cục bộ của hỗn hợp tăng cao khi phun diesel để đánh lửa. Hình 5a cho thấy tại vị trí 345 TK (5°TK sau khi phun) nhiên liệu diesel tập trung quanh vòi phun diesel. Ngọn lửa mới bắt đầu cháy ở đầu tia phun. Tại vị trí 355 TK (10°TK sau khi phun), khu vực cháy bao trùm ở tâm buồng cháy omega về phía đáy.

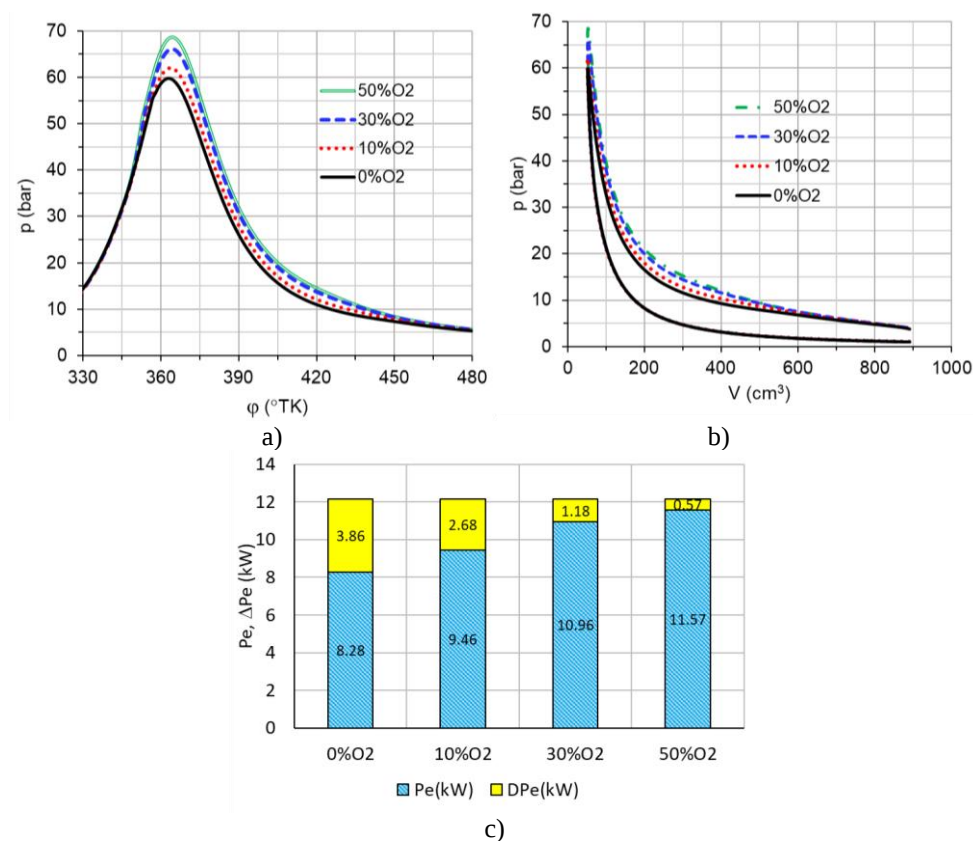
Hình 5b biểu diễn biến thiên lưu lượng hỗn hợp, khối lượng hỗn hợp, tốc độ bốc hơi của diesel và hệ số tương đương của hỗn hợp theo góc quay trục khuỷu. Hỗn hợp đi vào cửa nạp nhờ độ chân không trong xi lanh. Khi piston đạt tốc độ cao nhất cũng là lúc lưu lượng hỗn hợp đi vào xi lanh lớn nhất. Khi nạp syngas thì hệ số tương đương tăng dần từ 0, lúc bắt đầu nạp đến giá trị ổn định ϕ_{syn} . Cuối quá trình nén, khi phun nhiên liệu diesel thì hệ số tương đương đạt giá trị ổn định mới, $\phi_{tong} = \phi_{syn} + \phi_{die}$. Trong điều kiện cung cấp nhiên liệu kiểu hút, khối lượng hỗn hợp tổng cộng nạp vào xi lanh ứng với mỗi chu trình là 0,91 gam.

3.3. Ảnh hưởng chất lượng syngas đến tính năng công tác động cơ dual fuel

Khi tăng hàm lượng O_2 trong không khí cung cấp cho lò khí hóa thì nhiệt trị của nhiên liệu tăng, tốc độ tỏa nhiệt tăng do tốc độ cháy được cải thiện. Hình 6 cho thấy đường cong tỏa nhiệt có 2 đỉnh và giá trị cực đại của các đỉnh này giảm theo hàm lượng O_2 làm giàu không khí khi khí hóa RDF. Tốc độ tỏa nhiệt tăng từ $15\text{J}/^\circ\text{TK}$ lên $23\text{J}/^\circ\text{TK}$ khi hàm lượng O_2 làm giàu không khí tăng từ 0% lên 50%.



Hình 6. Ảnh hưởng syngas thu được từ khí hóa RDF với hàm lượng oxygen trong không khí khác nhau đến tốc độ tỏa nhiệt của động cơ dual fuel ($ER = 0,35$, $\phi_{syn} = 0,8$, $n = 2400$ v/ph)



Hình 7. Ảnh hưởng của O₂ làm giàu không khí khi khí hóa RDF đến biến thiên áp suất theo góc quay trục khuỷu và đồ thị công động cơ dual fuel

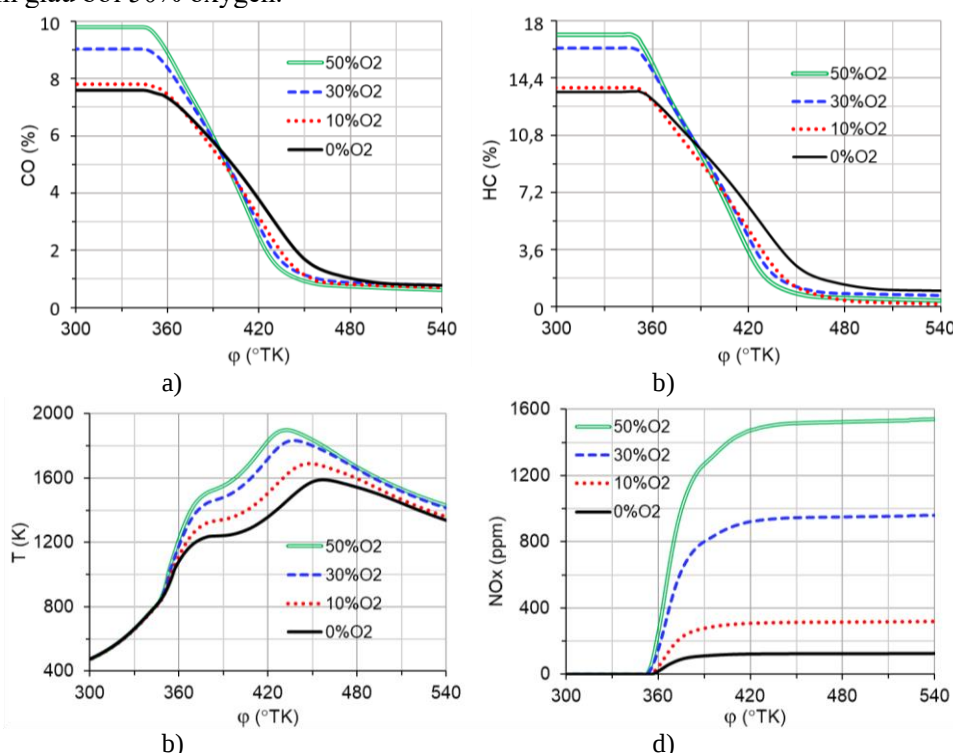
Do tốc độ tỏa nhiệt tăng nên áp suất cực đại tăng theo hàm lượng O₂ pha vào không khí để làm chất oxy hóa (hình 7a). Mặt khác, do nhiệt trị của hỗn hợp tăng khi tăng hàm lượng O₂ nên nhiệt lượng tỏa ra trong kỳ giãn nở tăng dẫn đến tăng diện tích đồ thị công, tức tăng công chỉ thị chu trình (hình 7b). Hình 7c cho thấy công suất của động cơ lần lượt là 8,28kW, 9,46kW, 10,96kW và 11,57kW tương ứng với hàm lượng O₂ pha vào không khí làm chất oxy hóa là 0%, 10%, 30% và 50%. Công suất động cơ dual fuel syngas-diesel giảm lần lượt là 32,30%, 22,65%, 10,38% và 5,40% so với công suất động cơ diesel trước khi cải tạo (12,23kW) thì tương ứng với

hàm lượng O_2 pha vào không khí làm chất oxy hóa như trên. Như vậy khi oxy hóa RDF với chất oxy hóa là không khí thì công suất động cơ giảm khoảng 30%, phù hợp với số liệu công bố trong các tài liệu tham khảo. Mức giảm công suất này khiến cho động cơ dual fuel syngas-diesel không đảm bảo cung cấp đủ năng lượng cho các mục đích sử dụng mà động cơ diesel thực hiện. Để công suất động cơ dual fuel không giảm quá 10% chúng ta có thể sử dụng giải pháp khí hóa RDF với chất oxy hóa là không khí được làm giàu 30% oxygen. Nếu hàm lượng O_2 là giàu không khí tăng lên 50% thì mức giảm công suất chỉ còn 5%.

Do động cơ dual fuel đánh lửa bằng tia diesel phun môi nên khu vực quanh tia phun giàu nhiên liệu dẫn đến cháy không hoàn toàn cục bộ. Hình 8a và hình 8b cho thấy trong trường hợp cực đoạn ($\phi_{\text{tong}}=1$) hàm lượng CO trong khí thải khoảng 0,8% còn hàm lượng HC trong khí thải khoảng 0,6%. Trong thực tế để đảm bảo tia phun môi có thể tự bốc cháy thì hỗn hợp phải nghèo để có dư oxy quanh tia phun diesel. Do đó hàm lượng CO và HC trong khí thải động cơ dual fuel trong thực tế thấp hơn giá trị tính toán trong trường hợp cực đoạn này.

Hình 8c cho thấy nhiệt độ cực đại của quá trình cháy tăng khi tăng hàm lượng oxygen trong không khí làm chất oxy hóa do nhiệt trị syngas tăng. Nhiệt độ cực đại của quá trình cháy đạt lần lượt là 1590K, 1690K, 1834K và 1899K tương ứng với hàm lượng O_2 pha và không khí làm chất oxy hóa là 0%, 10%, 30% và 50%.

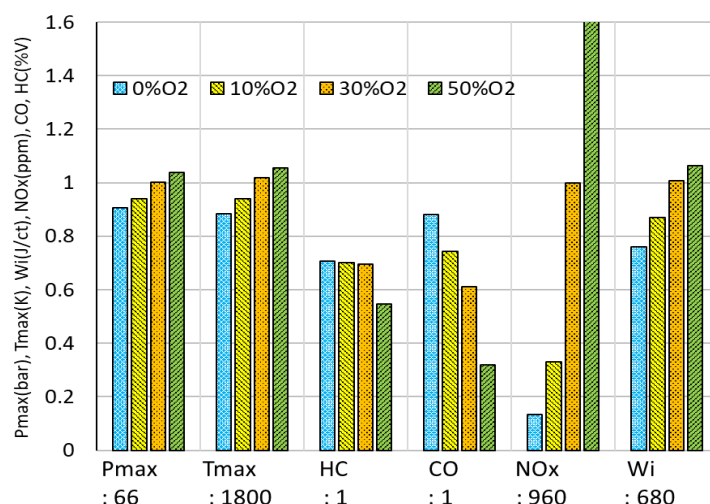
Theo cơ chế Zeldovich thì nhiệt độ ảnh hưởng rất lớn đến sự hình thành NO_x . Do đó nồng độ NO_x trong khí thải động cơ cũng tăng theo nhiệt độ cháy. Trên hình 8d, nồng độ NO_x tăng từ 127ppm ứng với chất oxy hóa là không khí lên đến 1540ppm ứng với chất oxy hóa là không khí được làm giàu bởi 50% oxygen.



Hình 8. Ảnh hưởng của hàm lượng O_2 làm giàu không khí làm chất oxy hóa RDF đến nhiệt độ và nồng độ các chất ô nhiễm trong khí thải động cơ dual fuel

Hình 9 so sánh tổng hợp ảnh hưởng của hàm lượng O_2 pha vào không khí làm chất oxy hóa RDF đến các thông số đặc trưng của quá trình cháy. Chúng ta thấy rõ quy luật biến thiên của các thông số quá trình cháy khi động cơ sử dụng syngas từ RDF với chất oxy hóa là không khí được làm giàu bằng oxygen với hàm lượng khác nhau. Kết quả tổng hợp này cho thấy có thể xem gần

đúng $P_{\max}$, $T_{\max}$, W_i và nồng độ NO_x tăng theo quy luật tuyến tính với hàm lượng O_2 làm giàu không khí. Điều này là do khi tăng hàm lượng O_2 trong không khí làm chất oxy hóa RDF thì nhiệt trị nhiên liệu tăng, tốc độ cháy và tốc độ tỏa nhiệt tăng giúp cải thiện chất lượng quá trình cháy, làm giảm phát sinh những sản phẩm cháy không hoàn toàn CO, HC.



Hình 9. Ảnh hưởng của hàm lượng O_2 pha vào không khí làm chất oxy hóa RDF đến các thông số đặc trưng quá trình cháy động cơ dual fuel

4. Kết luận

Khi sử dụng chất oxy hóa là không khí được làm giàu oxygen, nhiệt trị syngas tăng theo hàm lượng oxygen, với tỷ lệ các chất khí cháy trong syngas tăng từ 35%, 41%, 54% đến 66% khi lượng oxygen trong không khí làm chất oxy hóa tăng từ 0% lên đến 50%.

Ngoài ra công suất động cơ dual fuel được cải tạo từ động cơ diesel RV165 sử dụng syngas nhận được từ khí hóa RDF gỗ đạt lần lượt là 8,28kW, 9,46kW, 10,96kW và 11,57kW tương ứng với hàm lượng O_2 pha vào không khí làm chất oxy hóa là 0%, 10%, 30% và 50%, với mức giảm công suất động cơ dual fuel lần lượt tương ứng là 32,30%, 22,65%, 10,38% và 5,40% so với công suất động cơ diesel trước khi cải tạo (12,23kW).

Tuy nhiên, cần lưu ý rằng việc tăng hàm lượng oxygen cũng gắn liền với tăng nồng độ NO_x trong khí thải. Nồng độ NO_x tăng từ 127ppm ứng với chất oxy hóa là không khí lên đến 1540ppm ứng với chất oxy hóa là không khí được làm giàu bởi 50% oxygen. Đồng thời các kết quả mô phỏng cho thấy rằng có thể xem gần đúng các thông số đặc trưng của quá trình cháy của động cơ dual fuel syngas như là $P_{\max}$, $T_{\max}$, W_i và nồng độ NO_x tăng theo quy luật tuyến tính với hàm lượng O_2 làm giàu không khí do khi tăng hàm lượng O_2 trong không khí làm chất oxy hóa RDF thì nhiệt trị nhiên liệu tăng, tốc độ cháy và tốc độ tỏa nhiệt tăng giúp cải thiện chất lượng quá trình cháy, làm giảm phát sinh những sản phẩm cháy không hoàn toàn CO, HC.

Lời cảm ơn

Công trình này được thực hiện nhờ tài trợ của Bộ Giáo dục và Đào tạo thông qua đề tài "Bộ điều khiển thông minh cho động cơ sử dụng nhiên liệu khí linh hoạt trong hệ thống năng lượng tái tạo lai", Mã số: B2024.DNA.12.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] W. Envirotech, "The Benefits of RDF," *wiscon-tech.com*, February 5, 2022. [Online]. Available: <https://www.wiscon-tech.com/the-benefits-of-rdf/>. [Accessed May 11, 2022].

-
- [2] V. G. Bui, T. M. T. Bui, L. B. T. Truong, and V. H. Bui, "Technique of Biogas-HHO Gas Supply for SI Engine," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 8, no. 5, pp. 669-674, 2019.
- [3] V. G. Bui and V. N. Tran, "Mixer Design for High Performance SI Engine Converted from A Diesel Engine," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 2743-2760, 2014.
- [4] S. J. Lee, H. S. Yi, and E. S. Kim, "Combustion characteristics of intake port injection type hydrogen fueled engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 20, no. 4, pp. 317-22, 1995.
- [5] F. Y. Hagos, A. Rashid, A. Aziz, and S. A. Sulaiman, "Syngas (H_2/CO) in a spark-ignition direct-injection engine. Part 1: Combustion, performance and emissions comparison with CNG," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, pp. 17884-17895, 2014.
- [6] F. Y. Hagos, A. R. A. Aziz, S. A. Sulaiman, and B. K. M. Mahgoub, "Low and Medium Calorific Value Gasification Gas Combustion in IC Engines," *Developments in Combustion Technology. InTech*, 2016, pp. 233-264.
- [7] H. L. Yip, A. Srna, A. C. Y. Yuen, S. Kook, R. A. Taylor, G. H. Yeoh, P. R. Medwell, and Q. N. Chan, "A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion," *Applied Sciences*, vol. 9, 2019, Art. no. 4842.
- [8] T. T. X. Nguyen, T. M. T. Bui, and V. G. Bui. "Simulation and experimental study of refuse-derived fuel gasification in an updraft gasifier," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 12, no. 3, pp. 601-614, 2023, doi: 10.14710/ijred.2023.53994.
- [9] V. G. Bui, T. T. X. Nguyen, and T. M. T. Bui, "Simulation on direct injection of flexible syngas-biogas-hydrogen blend into combustion chamber of dual fuel engine," *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 68-74, 2023.
- [10] V. G. Bui, A. V. Vo, V. P. Nguyen, D. T. Trieu, N. D. Le, M. T. Nguyen, D. Q. Tran, and V. T. Nguyen, "Comparison between simulation and experiment results on gasification of rdf from solid waste in rural area," *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 78-83, 2023.
- [11] V. G. Bui, T. M. T. Bui, and T. N. A. Ho, "A comparison study on combustion characteristics of dual fuel engine with syngas supplying through premixed mixture and direct injection," *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 45-51, 2023.
- [12] V. G. Bui, T. M. T. Bui, N. V. Dong, V. H. Bui, and M. T. Phung, "Equivalence ratio adjustment for engine fueled with biogas-syngas-hydrogen in hybrid renewable energy system," *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 50-57, 2022.
- [13] V. G. Bui, V. D. Nguyen, X. T. Cao, and V. A. Vu, "Simulation of syngas-biogas-hydrogen flexible fuel supply for a stationary SI engine," *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 20, no. 9, pp. 17-23, 2022.
- [14] V. G. Bui, V. D. Nguyen, L. B. T. Truong, and N. T. Huynh, "Gasification efficiency of different solid wastes from agriculture production," *24th Vietnam National Scientific Conference on Fluid Mechanics*, 2022, pp. 135-147.
- [15] V. G. Bui, T. M. T. Bui, T. H. T. Tran, and D. L. Pham, "Gasification simulation of refuse derived fuel RDF in a downdraft gasifier," *24th Vietnam National Scientific Conference on Fluid Mechanics*, 2022, pp. 120-134.
- [16] T. T. X. Nguyen, T. M. T. Bui, and L. B. T. Truong. "Effects of Syngas from Various Biomass Gasification on Combustion of Spark Ignition Engine," *GMSARN International Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 123-129, 2024.
- [17] T. T. X. Nguyen, T. M. T. Bui, and V. G. Bui. "Simulation and experimental study of refuse-derived fuel gasification in an updraft gasifier," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 12, no. 3, pp. 601-614, 2023, doi: 10.14710/ijred.2023.53994.
- [18] M. T. Phung, V. G. Bui, T. S. Tran, M. T. Nguyen, and D. Q. Tong, "Simulation and Experimental Study on Refuse Derived Fuel Gasification in a Downdraft Gasifier," *14th Asia-Pacific Conference on Combustion*, 2023, pp. 1-5.
-