

NGHIÊN CỨU THAY THỂ NHIÊN LIỆU DIESEL CỦA ĐỘNG CƠ ISUZU 4JA1 SANG SỬ DỤNG BIOGAS

RESEARCH ON REPLACING DIESEL FUEL IN ISUZU 4JA1 ENGINES WITH BIOGAS

Nguyễn Tường Vi^{1*}, Trịnh Xuân Phong², Nguyễn Văn Nam³

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

²Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Nam Định

³Trường Trung cấp nghề Giao thông Công chính Hà Nội

Đến Tòa soạn ngày 09/3/2026, chấp nhận đăng ngày 05/4/2026

Tóm tắt: Bài báo thể hiện nghiên cứu thay thế nhiên liệu diesel của động cơ Isuzu 4JA1 kiểu tĩnh tại sử dụng nhiên liệu thuần biogas nhằm phục vụ phát điện quy mô trang trại. Phương pháp nghiên cứu được thực hiện thông qua các bước trong quy trình mô phỏng số (sử dụng phần mềm AVL BOOST), đánh giá công suất Ne, tiêu thụ nhiên liệu ge, áp suất, nhiệt độ trong xilanh và nồng độ khí thải CO, HC, NOx, Soot của động cơ sau chuyển đổi. Các thông số làm việc, quá trình cháy, trao đổi khí và phát thải được phân tích tại các tốc độ khác nhau, đặc biệt tại chế độ 1500 v/ph. Kết quả cho thấy động cơ sử dụng biogas có khả năng vận hành ổn định, phát thải NOx và muội than giảm đáng kể so với động cơ diesel sử dụng 100% diesel, tuy nhiên công suất và hiệu suất nhiệt có xu hướng giảm do nhiệt trị thấp (QLVH) của nhiên liệu biogas. Các kết quả của nghiên cứu của bài báo này làm tài liệu tham khảo và định hướng cho việc thử nghiệm thực tế cũng như mở rộng khả năng ứng dụng hệ thống máy phát điện chạy biogas trong lĩnh vực chăn nuôi quy mô vừa và lớn.

Từ khóa: Biogas, chuyển đổi động cơ diesel, AVL BOOST, phát thải, phát điện trang trại.

Abstract: This paper presents a study on replacing diesel fuel in a stationary Isuzu 4JA1 engine with pure biogas for farm-scale power generation. The research methodology is carried out through numerical simulation using AVL BOOST software, evaluating engine performance parameters such as effective power (Ne), specific fuel consumption (ge), in-cylinder pressure and temperature, and exhaust emissions including CO, HC, NOx, and soot after conversion. Operating parameters, combustion process, gas exchange, and emissions are analyzed at different engine speeds, with particular emphasis on the 1500 rpm condition. The results indicate that the biogas-fueled engine can operate stably, with significantly reduced NOx and soot emissions compared to the conventional diesel engine operating on 100% diesel. However, the engine power and thermal efficiency tend to decrease due to the lower heating value (QLVH) of biogas. The findings of this study provide a useful reference and orientation for experimental validation, as well as for expanding the application of biogas-powered generator systems in medium- and large-scale livestock farming.

Keywords: Biogas, diesel engine conversion, AVL BOOST, emissions, power generation

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong nhiều năm trở lại đây, yêu cầu “phát triển nông nghiệp bền vững và giảm thiểu tác

động môi trường” đã thúc đẩy việc tìm kiếm các giải pháp tận dụng nguồn chất thải trong trồng trọt và chăn nuôi để có thêm năng lượng

tái tạo. Trong số này, biogas được xem là một dạng nhiên liệu (NL) khí có tiềm năng lớn do được hình thành từ chu trình phân hủy các chất thải hữu cơ (như phân gia súc, gia cầm) và phụ phẩm nông nghiệp. Để giảm phát thải khí nhà kính khi dùng biogas góp phần tận dụng nguồn năng lượng sẵn có tại các trang trại chăn nuôi [1-4].

Biogas có thể được sử dụng là nguồn nhiệt (đun nấu, sưởi ấm hoặc phát điện), trong đó, ứng dụng biogas làm NL cho động cơ đốt trong (ĐCĐT) để phát điện tĩnh tại đã và đang được nghiên cứu nhờ khả năng cung cấp nguồn điện tại chỗ cho các trang trại và khu vực nông thôn. Tuy nhiên, so với các NL truyền thống như diesel, biogas có nhiệt trị thấp hơn và chứa hàm lượng CO₂ tương đối cao, nên làm thay đổi quá trình cháy (QTC), đặc tính làm việc cũng như các chỉ tiêu phát thải của động cơ [2, 3].

Các động cơ diesel truyền thống có ưu điểm về độ bền, khả năng làm việc rất ổn định và hiệu suất nhiệt cao, do đó thường được lựa chọn làm nền tảng để chuyển đổi sang sử dụng NL khí trong các hệ thống phát điện tĩnh tại. Tuy nhiên, việc thay thế NL diesel bằng biogas có thể làm thay đổi tương đối nhiều sự hình thành hỗn hợp, diễn biến cháy trong xilanh cũng như các thông số làm việc của ĐCĐT. Vì vậy, cần có các nghiên cứu MP và đánh giá chi tiết nhằm làm rõ ảnh hưởng của NL biogas đến các đặc tính công suất Ne, suất tiêu hao nhiên liệu g_e và nồng độ các chất thải của động cơ sau khi thay nhiên liệu khác [3, 4].

Hiện nay, cùng với sự phát triển của các công cụ mô phỏng (MP), phần mềm MP động cơ như AVL BOOST cho phép xây dựng mô hình (MH) động cơ và phân tích quá trình làm việc của động cơ trong các điều kiện làm việc khác nhau được sử dụng đáng tin cậy [5]. Phương pháp MP giúp đánh giá các thông số kỹ thuật

và khí thải ảnh hưởng đến môi trường và góp phần giảm chi phí và thời gian thực hiện các thí nghiệm thực tế [1, 5, 6-9].

Xuất phát từ những vấn đề trên, bài báo này tập trung nghiên cứu chuyển đổi động cơ diesel Isuzu 4JA1 sang động cơ tĩnh tại sử dụng NL biogas [7]. MH động cơ được xây dựng và MP trên phần mềm AVL BOOST nhằm phân tích các đặc điểm làm việc của động cơ sau khi thay thế NL, bao gồm công suất, mômen, suất tiêu hao NL, QTC và các chỉ tiêu phát thải [10-12]. Kết quả của bài báo này làm tài liệu tham khảo và định hướng cho việc thử nghiệm thực tế và tăng cường khả năng ứng dụng hệ thống máy phát điện chạy biogas trong lĩnh vực chăn nuôi quy mô vừa và lớn [13-16].

2. THIẾT LẬP MÔ HÌNH VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình động cơ Isuzu 4JA1

Động cơ Isuzu 4JA1 là động cơ diesel 4 xilanh trang bị hệ thống làm mát bằng nước cưỡng bức, được lựa chọn do tính phổ biến, độ bền cao và phù hợp cho ứng dụng tĩnh tại. Các thông số của động cơ (thông số hình học và thông số làm việc) được xây dựng trong phần mềm AVL BOOST dựa trên dữ liệu kỹ thuật và tài liệu nhà sản xuất. thể hiện MH động cơ Isuzu 4JA1 sử dụng NL biogas. Một số dữ liệu kết cấu của động cơ được cho trong Bảng 1 [5-9].

Bảng 1. Thông số kỹ thuật động cơ Isuzu 4JA1

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Đường kính xilanh	93	mm
Hành trình piston	92	mm
Số xilanh/Thể tích công tác 1 xilanh	4/2499	-
Tỷ số nén ϵ	18,4	-
Công suất lớn nhất	50/3600	kW/v/ph
Mômen lớn nhất Nm- v/ph	152-2000	

làm việc theo thực tế của động cơ được hiệu chỉnh nhằm đảm bảo MH làm việc theo đúng tính năng làm việc của động cơ gốc khi dùng thuần NL diesel.

Tiếp theo, cấu hình động cơ được điều chỉnh để MP trường hợp sử dụng NL biogas. Trong bước này, các thông số liên quan đến thành phần NL, lưu lượng cấp NL và điều kiện hòa trộn giữa NL và không khí được thiết lập phù hợp với đặc tính của biogas trong điều kiện thực tế tại các trang trại chăn nuôi.

Cuối cùng, các thông số đầu ra của động cơ (chẳng hạn: công suất, mômen, suất tiêu hao NL, áp suất và nhiệt độ trong xilanh và các chỉ tiêu phát thải...) được xuất ra theo các kịch bản MP đã thống nhất, sau đó được xử lý nhằm phân tích những ảnh hưởng khi dùng biogas đến đặc tính làm việc của động cơ so với động cơ thuần túy diesel.

2.4. Thiết lập chế độ mô phỏng

Các kịch bản MP được xây dựng theo các chế độ tải đặc trưng của động cơ phát điện tĩnh tại. Động cơ Isuzu 4JA1 được MP tại tốc độ không đổi 1500 v/ph (tương ứng tần số phát điện 50 Hz), với các mức tải khác nhau được biểu diễn thông qua mômen và lưu lượng NL cấp vào động cơ. Cụ thể, các chế độ tải được thiết lập theo các mức: tải thấp ($\approx 25\%$), tải trung bình ($\approx 50\%$), tải cao ($\approx 75\%$) và tải định mức ($\approx 100\%$). Tại mỗi chế độ tải, MP được thực hiện trong điều kiện thành phần NL biogas không đổi (tỷ lệ CH_4/CO_2 đặc trưng cho biogas trang trại), hệ số dư lượng không khí (λ) được điều chỉnh phù hợp để đảm bảo QTC ổn định. Các thông số đầu ra được ghi nhận bao gồm: Công suất N_e , mômen M_e , suất tiêu hao NL g_e , hệ số nạp η_v , áp suất - nhiệt độ buồng đốt, đặc tính cháy và các chỉ tiêu khí thải (NO_x , CO, HC, muội than). Cuối cùng, sử dụng kết quả để phân tích ảnh hưởng của chế

độ tải đến đặc tính làm việc của động cơ và so sánh giữa cấu hình động cơ diesel nguyên bản thuần diesel và cấu hình sử dụng NL biogas.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô phỏng mômen, công suất, phát thải ở 100% tải

3.1.1. Mômen và công suất

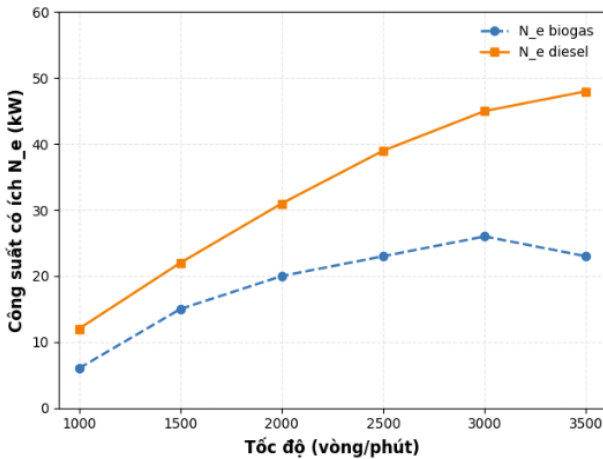
Công suất N_e , mômen M_e của động cơ giảm khi NL biogas được sử dụng so với khi sử dụng NL thuần diesel trong phạm vi tốc độ từ 1000 v/ph đến 3600 v/ph (Hình 2 và 3). Mức suy giảm công suất N_e , mômen M_e dao động trong khoảng từ 25% đến 40% tùy theo từng tốc độ của động cơ. Sự suy giảm công suất N_e và hiệu suất nhiệt η_v của động cơ khi sử dụng biogas chủ yếu liên quan đến nhiệt trị thấp và tốc độ cháy chậm của NL khí. Ngoài ra, việc cấp NL biogas vào đường nạp ở dạng khí cũng làm giảm lượng không khí nạp vào xi lanh, từ đó làm giảm khối lượng hỗn hợp cháy trong buồng đốt. Hơn nữa, do biogas được cung cấp vào hệ thống nạp ở trạng thái khí, chiếm một phần thể tích của dòng khí nạp. Điều này làm giảm lượng không khí thực tế đi vào xi lanh, dẫn đến giảm hệ số nạp η_v của động cơ. Khi khối lượng hỗn hợp cháy trong buồng đốt giảm, năng lượng giải phóng trong QTC cũng giảm theo, đây là nguyên nhân chính làm giảm công suất và mômen của động cơ Isuzu 4JA1 [17, 18].

3.1.2. Suất tiêu hao nhiên liệu

Có thể nhận thấy sự thay đổi của g_e khi sử dụng hai loại NL khác nhau (Hình 4). Do biogas và diesel có bản chất NL khác nhau, g_e của động cơ sử dụng biogas được quy đổi tương đương sang NL diesel dựa trên giá trị nhiệt trị thấp của hai loại NL theo công thức (1).

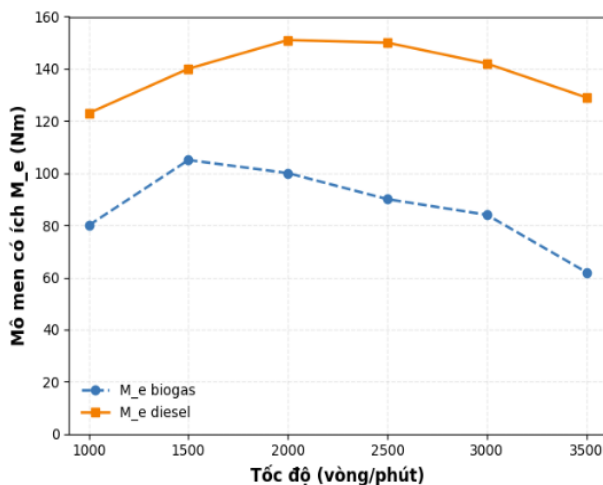
$$g_e = \frac{m_{Biogas} \cdot LHV_{Biogas}}{LHV_D \cdot N_e} \quad (1)$$

Trong đó m_{Biogas} là lượng NL biogas tiêu thụ (kg/h); N_e là công suất có ích (kW); LHV_{Biogas} là nhiệt trị thấp của NL biogas; LHV_D là nhiệt trị thấp của NL diesel.

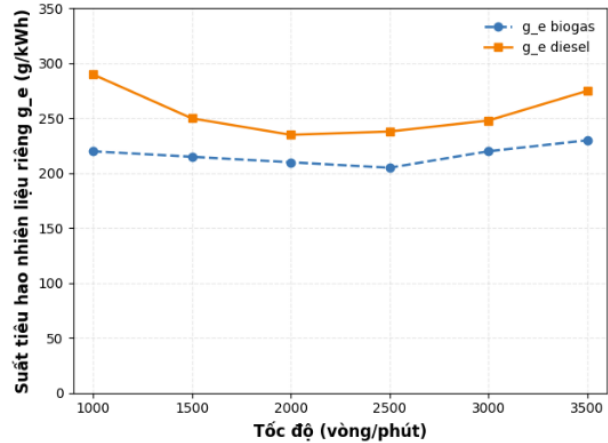


Hình 2. Công suất N_e của động cơ ở 100% tải

Qua kết quả MP, có thể nhận thấy cho thấy khi sử dụng biogas, suất tiêu hao NL g_e của động cơ có xu hướng giảm so với trường hợp sử dụng diesel thuần túy. Giá trị giảm trung bình đạt khoảng 12%. Như vậy, dù công suất bị ảnh hưởng khi chuyển sang biogas, QTC vẫn cho thấy khả năng tận dụng năng lượng ở một số chế độ vận hành của động cơ nghiên cứu.



Hình 3. Mômen M_e của động cơ ở 100% tải



Hình 4. Tiêu thụ NL g_e của động cơ ở 100% tải

3.1.3. Phát thải động cơ

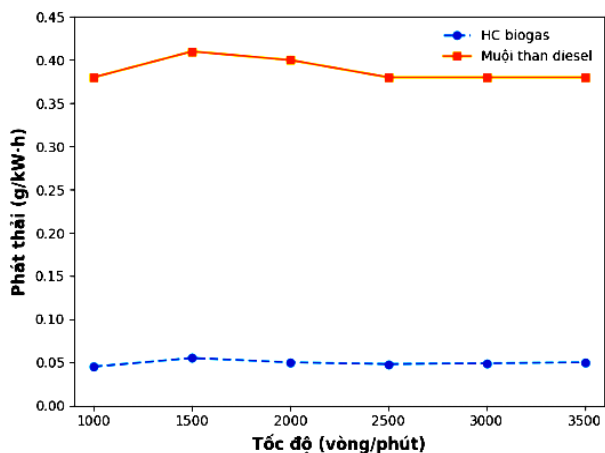
- Lượng phát thải soot và HC:

Hình 5 thể hiện sự thay đổi của lượng phát thải soot và hydrocarbon chưa cháy (HC). Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng khi động cơ sử dụng biogas thì hầu như không còn phát sinh phát thải soot, trong khi đó lại xuất hiện một lượng phát thải HC nhất định.

Soot thường được hình thành trong điều kiện hoà khí của NL và không khí ở mức giàu ($\lambda < 1$) và nhiệt độ cháy t° cao. Trong động cơ diesel, các hợp chất hydrocarbon mạch dài trong NL dễ bị phân hủy và hình thành các tiền chất như axetylen, từ đó dẫn đến quá trình hình thành muội than. Tuy nhiên, khi sử dụng biogas - một loại NL khí chủ yếu chứa methane - quá trình hình thành các tiền chất tạo soot gần như không xảy ra, do đó lượng phát thải muội than giảm mạnh.

Ngược lại, phát thải HC xuất hiện chủ yếu do QTC không hoàn toàn của hoà khí. Hiện tượng này có thể xảy ra khi hoà khí được phân bố không đồng đều trong buồng cháy hoặc trong giai đoạn trùng điệp của các xupap nạp - xả. Mặc dù xuất hiện phát thải HC, nhưng giá trị trung bình của HC chỉ tương đương khoảng 13% lượng soot phát sinh trong trường hợp động cơ sử dụng diesel, cho thấy lợi ích rõ rệt

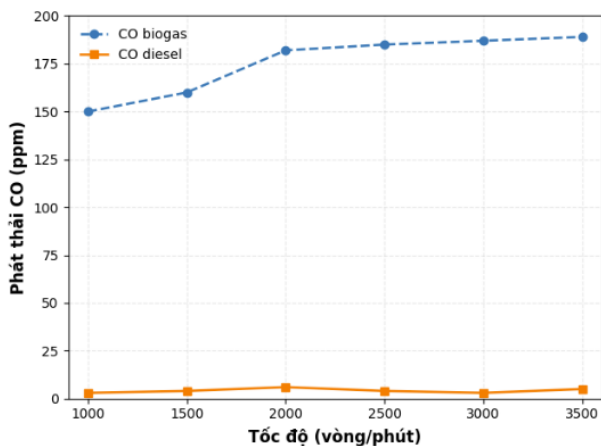
về mặt giảm nồng độ muội than khi sử dụng biogas làm NL.



Hình 5. Lượng phát thải soot và HC ở 100% tải

Phát thải CO:

Theo kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 6, động cơ khi vận hành bằng biogas tạo ra lượng phát thải CO cao hơn so với khi sử dụng diesel. Giá trị CO tăng trung bình khoảng 180%, tương ứng khoảng 170 ppm. Hiện tượng này có thể liên quan đến đặc điểm của hoà khí khi sử dụng biogas, trong đó dễ hình thành các vùng hỗn hợp nghèo trong buồng cháy. QTC vì vậy diễn ra không hoàn toàn, làm tăng lượng hydrocarbon chưa cháy và dẫn đến sự gia tăng phát thải CO.

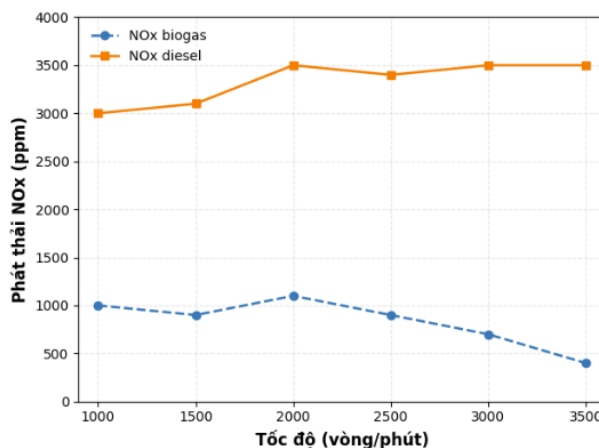


Hình 6. Lượng phát thải CO ở 100% tải

Nồng độ khí thải NO_x:

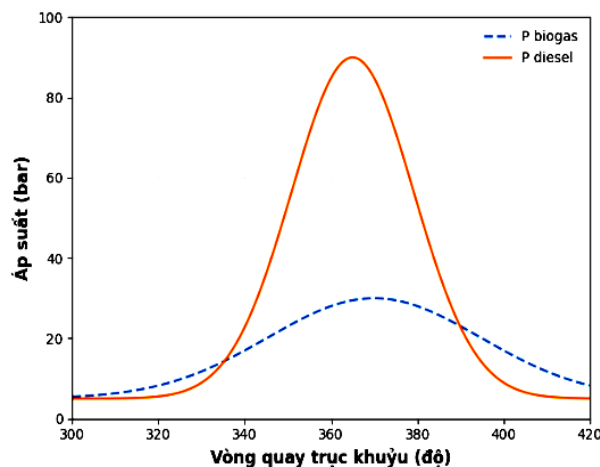
Nồng độ khí thải NO_x của động cơ có xu

hướng giảm mạnh khi nhiên liệu biogas được sử dụng thay cho diesel, như thể hiện trong Hình 7. Kết quả mô phỏng cho thấy nồng độ NO_x trung bình giảm khoảng 2600 ppm, tương ứng gần 90% so với trường hợp sử dụng nhiên liệu diesel. Nguyên nhân có thể hiểu chủ yếu liên quan đến nhiệt độ cháy cực đại trong xilanh giảm khi động cơ hoạt động với biogas. Nhiệt độ cháy thấp hơn làm cho quá trình hình thành NO_x trở nên kém thuận lợi. Kết quả MP về áp suất và nhiệt độ của QTC cũng cho thấy xu hướng tương tự.



Hình 7. Lượng phát thải NO_x ở 100% tải

Áp suất trong xilanh:



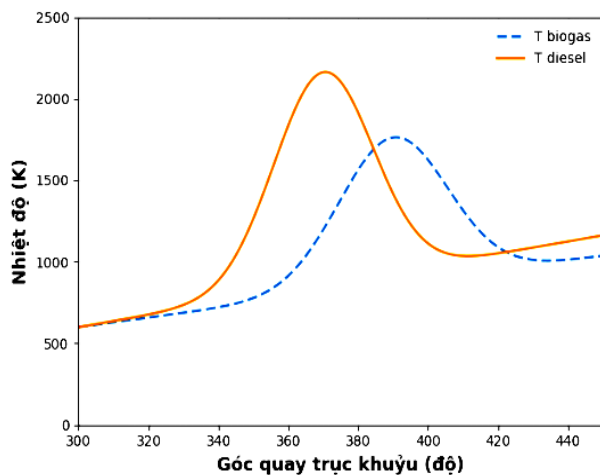
Hình 8. Áp suất trong xilanh ở 100% tải

Khi động cơ vận hành bằng biogas, áp suất trong xilanh thấp hơn khi so sánh với việc sử dụng nhiên liệu thuần diesel, điều này được

thể hiện trong Hình 8. Áp suất cực đại khi sử dụng diesel là 90 bar ở góc quay trục khuỷu 366°, với biogas là 30 bar với góc quay trục khuỷu 380°.

▪ Nhiệt độ cháy trong xilanh:

Sự thay đổi nhiệt độ trong xilanh của động cơ khi sử dụng hai loại NL là diesel và biogas. Kết quả cho thấy khi động cơ hoạt động với biogas, nhiệt độ cực đại của môi chất công tác thấp hơn so với trường hợp sử dụng diesel. Cụ thể, đối với NL diesel, nhiệt độ cực đại đạt khoảng 2235 K tại góc quay trục khuỷu khoảng 375°. Trong khi đó, khi sử dụng biogas, giá trị nhiệt độ cực đại chỉ đạt khoảng 1950 K và xuất hiện muộn hơn, vào khoảng góc quay trục khuỷu 390°. Bên cạnh sự giảm của nhiệt độ và áp suất cực đại, đường cong biểu diễn QTC khi sử dụng biogas cũng dịch chuyển về phía góc quay trục khuỷu lớn hơn, cho thấy QTC diễn ra muộn hơn khi so sánh với khi động cơ sử dụng nhiên liệu thuần diesel.



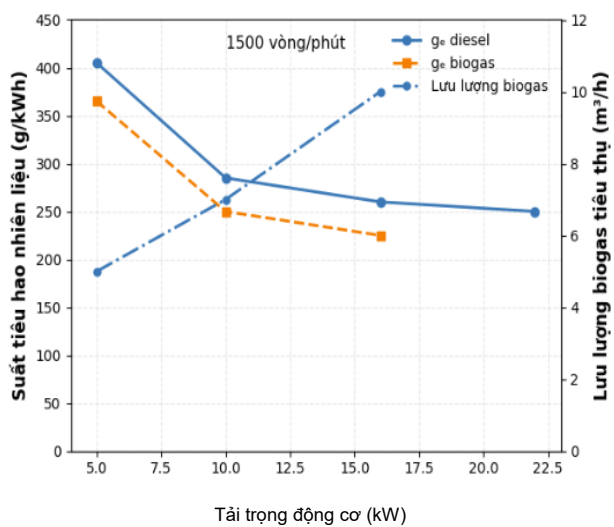
Hình 9. Nhiệt độ cháy trong xilanh ở 100% tải

3.2. Mô phỏng suất tiêu hao nhiên liệu g_e ở tốc độ 1500 v/ph tại các chế độ tải khác nhau

Tại tốc độ 1500 v/ph, sự thay đổi của suất tiêu hao nhiên liệu g_e theo tải trọng của động cơ

khi sử dụng diesel và biogas được trình bày trong Hình 10.

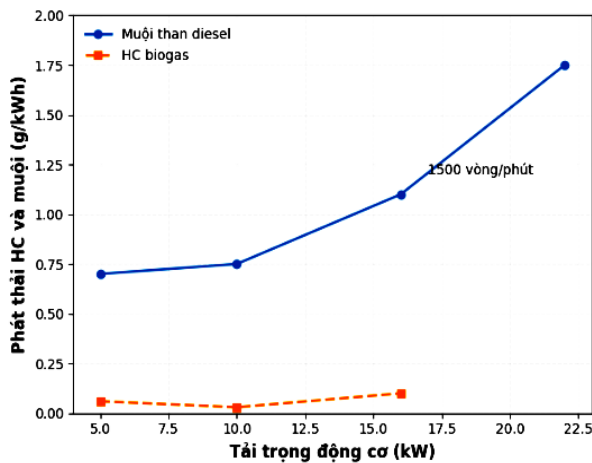
Trong quá trình làm việc, lưu lượng biogas tiêu thụ của động cơ thay đổi trong khoảng 5,0 đến 9,7 m³/h tương ứng với dải công suất từ 5 đến 16 kW. Sau khi quy đổi suất tiêu hao NL biogas sang tương đương NL diesel theo nhiệt trị thấp của hai loại NL, kết quả cho thấy suất tiêu hao NL của động cơ biogas giảm trung bình khoảng 11,2% so với động cơ diesel.



Hình 10. Diễn biến suất tiêu hao NL tại tốc độ 1500 v/ph

3.3. Phát thải Soot và HC tại tốc độ 1500 v/ph tại các chế độ tải khác nhau

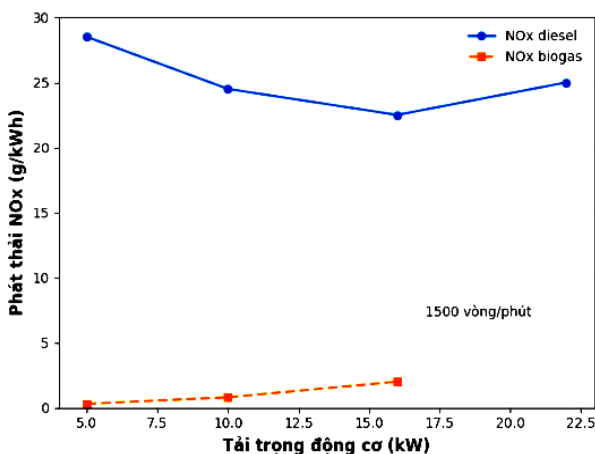
Hình 11 thể hiện diễn biến của phát thải soot và HC của 2 loại động cơ tại tốc độ 1500 v/ph với các tải trọng khác nhau. Có thể thấy động cơ diesel thì khi tăng tải trọng thì phát thải soot tăng, điều này là do lượng NL diesel cung cấp cho một chu trình tăng. Tuy nhiên đối với động cơ biogas, phát thải soot không còn vì không còn NL diesel tham gia QTC. Đối với động cơ biogas, phát thải HC không vượt quá 0,2 g/kWh với mọi tải trọng. Lượng phát thải HC của động cơ biogas tạo ra trung bình chỉ bằng 7,61% lượng soot tạo ra trên động cơ diesel.



Hình 11. Phát thải Soot và HC tại tốc độ 1500 v/ph

3.4. Phát thải NO_x tại tốc độ 1500 v/ph tại các chế độ tải khác nhau

Hình 12 thể hiện diễn biến phát thải NO_x của 2 loại động cơ tại tốc độ 1500 v/p với các tải trọng khác nhau. Có thể thấy khi tăng tải thì phát thải NO_x của động cơ diesel tăng mạnh do nhiệt độ và áp suất cháy tăng cao. Tuy nhiên đối với động cơ biogas thì phát thải NO_x là rất thấp. Lượng phát thải này lớn nhất chỉ đạt 3 g/kWh tại 16 kW thấp hơn 91% so với động cơ diesel ở cùng công suất N_e. Phát thải NO_x giảm trung bình lên tới 95,61% trên toàn bộ dải công suất.

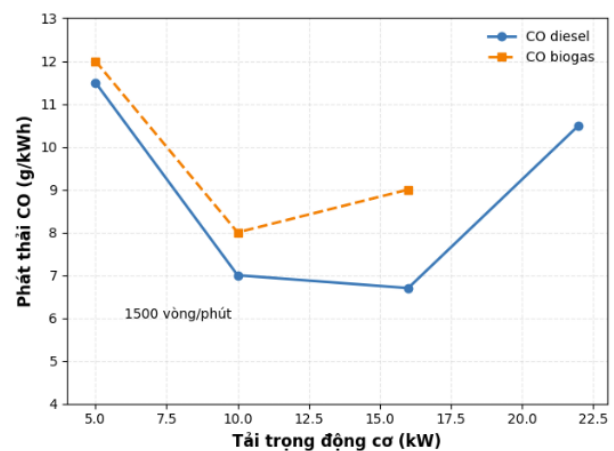


Hình 12. Phát thải NO_x tại tốc độ 1500 v/ph

Phát thải NO_x giảm khi sử dụng biogas chủ yếu do nhiệt độ cháy trong xi lanh thấp hơn so với diesel, bắt nguồn từ nhiệt trị thấp và hàm

lượng CO₂ cao trong nhiên liệu. CO₂ đóng vai trò như khí trơ gây hiệu ứng pha loãng, làm giảm nồng độ oxy và hấp thụ nhiệt, từ đó hạ nhiệt độ đỉnh của quá trình cháy. Đồng thời, áp suất cực đại trong xi lanh giảm và hỗn hợp cháy có xu hướng nghèo ($\lambda > 1$) cũng làm giảm thời gian và điều kiện hình thành NO_x theo cơ chế nhiệt, dẫn đến nồng độ NO_x giảm rõ rệt.

3.5. Phát thải CO tại tốc độ 1500 v/ph tại các chế độ tải khác nhau



Hình 13. Phát thải CO tại tốc độ 1500 v/ph

Hình 13 thể hiện diễn biến phát thải CO của 2 loại động cơ tại tốc độ 1500 v/ph với các tải trọng khác nhau. Có thể thấy phát thải CO của động cơ diesel rất lớn ở các tải trọng 5 kW và 22 kW. Điều này là do tại tải trọng thấp nhiệt độ cháy thấp nên môi trường không thuận lợi để oxy hóa CO thành CO₂, còn tại tải trọng lớn thì mặc dù nhiệt độ cao nhưng lại thiếu oxy để oxy hóa CO thành CO₂. Đối với động cơ biogas phát thải CO lớn hơn so với động cơ diesel trung bình là 14,08%. Ngoài ra, sự cháy không hoàn toàn của NL biogas tạo ra nồng độ CO cao hơn động cơ diesel thuần túy.

4. KẾT LUẬN

Kết quả MP thu được đối với động cơ Isuzu 4JA1, có thể đưa ra bốn kết luận quan trọng sau:

- Mô hình mô phỏng động cơ đốt trong sử dụng 100% biogas đã được thực hiện thành công và cho kết quả tính toán ổn định trong các chế độ làm việc khảo sát.
- Khi chuyển đổi từ NL diesel sang biogas, công suất N_e và hiệu suất nhiệt η_v của động cơ giảm, chủ yếu do nhiệt trị thấp và đặc tính cháy của NL khí.
- Phát thải NO_x và muội than giảm đáng kể so với động cơ diesel, cho thấy tiềm năng cải thiện rõ rệt về mặt môi trường khi sử dụng biogas.
- Việc kết hợp các giải pháp như tối ưu góc đánh lửa, tăng thêm lượng biogas, tối ưu quá trình nạp nhằm đảm bảo công suất và hạn chế tăng phát thải CO.
- Kết quả của nghiên cứu này góp phần định hướng đối với các nghiên cứu thực nghiệm và thay thế nhiên liệu diesel thành chạy biogas trên động cơ trong hệ thống phát điện trang trại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H.T. Công, "A study on Performance, combustion and emission characteristics of simulated biogas engine," Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, tập 60, số 3, trang 25-30, 2016.
- [2] T.C. Minh, "Nghiên cứu MP tính năng kinh tế, kỹ thuật và phát thải của động cơ sử dụng NL biogas chuyển đổi từ động cơ diesel," Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, tập 57, số 5, trang 75–79, 2021.
- [3] N.K. Tùng et al., "Nghiên cứu cải tạo máy phát điện sử dụng NL khí biogas từ chăn nuôi," Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, số 51, trang 62–66, 2019.
- [4] N. Peters, *Turbulent Combustion*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2000.
- [5] AVL List GmbH, *AVL BOOST Combustion Model*. Graz, Austria: AVL List GmbH, 2011.
- [6] V. Makareviciene et al., "Performance and emission characteristics of biogas used in diesel engine operation," *Energy*, vol. 23, pp. 12–15, 2013.
- [7] Isuzu Motors Ltd., *Technical Documentation of Isuzu 4JA1 Diesel Engine*. Tokyo, Japan: Isuzu Motors Ltd, 1999.
- [8] S. Siripornakarachai, "Conversion of large diesel engine to run on biogas for high efficiency electrical power generation," in Proc. Int. Conf. on Energy Systems, 2013.
- [9] K. Takeuchi et al., "The New Isuzu 2.5 and 2.8 Liter 4-Cylinder Direct Injection Diesel Engine," SAE Technical Paper 851554, 1985.
- [10] S. Siripornakarachai and T. Sucharitkul, "Modification and tuning of diesel bus engine for biogas electricity generation," in Proc. Int. Conf. on Renewable Energy Systems, 2007.
- [11] A. Monyem and J.H. Van Gerpen, "The effect of biodiesel oxidation on engine Performance and emissions," *Biomass and Bioenergy*, vol. 20, no. 4, pp. 317-325, 2001.
- [12] M. Lapuerta, O. Armas, and J. Rodríguez-Fernández, "Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, no. 2, pp. 198-223, 2008.
- [13] S. Bari, T.H. Lim, and C.W. Yu, "Effects of preheating of crude palm oil on injection system, Performance and emission of a diesel engine," *Renewable Energy*, vol. 27, no. 3, pp. 339-351, 2002.
- [14] H. Raheman and A. Ghadge, "Performance of compression ignition engine with mahua (*Madhuca indica*) biodiesel," *Fuel*, vol. 87, no. 12, pp. 2568-2573, 2008.

- [15] M.G. Leykun and M. W. Mekonen, “*Investigation of the performance and emission characteristics of diesel engine fueled with biogas–diesel dual fuel*,” *Fuels*, vol. 3, no. 1, pp. 15-30, 2022.
- [16] Q.K. Nguyen, T.C. Huynh, and T.T. Nguyen, “*A simulation study on performance characteristics of simulated biogas engine with high compression ratio*,” *Journal of Technical Education Science*, vol. 13, no. 3, pp. 1-8, 2018.
- [17] C. Jung, J. Park, and S. Song, “*Performance and NOx emissions of a biogas-fueled turbocharged internal combustion engine*,” *Energy*, vol. 86, pp. 186-195, 2015.
- [18] B. Rama Krishna, M.V.S. Murali Krishna, and P. Usha Sri, “*Experimental investigations on exhaust emissions of diesel engine fueled with biogas*,” *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 12, no. 7, pp. 1-9, 2021.

Thông tin liên hệ: **Nguyễn Tường Vi**

Điện thoại: 098.919.9280 - Email: ntv@uneti.edu.vn

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.