

ĐÁNH GIÁ ĐẶC TÍNH PHÁT THẢI CỦA ĐỘNG CƠ DIESEL SỬ DỤNG NHIÊN LIỆU DIESEL SINH HỌC KẾT HỢP BỔ SUNG HYDRO TRÊN ĐƯỜNG NẠP BẰNG MÔ PHỎNG SỐ

EVALUATION OF EMISSION CHARACTERISTICS OF DIESEL ENGINE USING BIODIESEL FUEL COMBINED WITH HYDROGEN ENRICHMENT BY THE NUMERICAL SIMULATION

PHẠM VĂN VIỆT*, ĐỖ VĂN ĐOÀN

Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: phamvanviet@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Trong bối cảnh yêu cầu ngày càng cao về giảm phát thải độc hại từ động cơ diesel tàu thủy, việc kết hợp nhiên liệu thay thế như diesel sinh học và bổ sung nhiên liệu sạch như hydro đang thu hút sự quan tâm lớn. Nghiên cứu này nhằm đánh giá ảnh hưởng của việc bổ sung H_2 ở các tỷ lệ từ 0-5% (tính theo hàm lượng năng lượng) đến các đặc tính phát thải của động cơ diesel sử dụng hai loại nhiên liệu: D100 (diesel nguyên chất) và B20, ở hai chế độ tốc độ 1400 vòng/phút và 2200 vòng/phút. Kết quả cho thấy việc bổ sung H_2 ở mức 2-3% mang lại hiệu quả rõ rệt trong việc giảm phát thải CO, HC và khói. Đặc biệt, tại tỷ lệ này, thời gian cháy trễ tăng vừa phải, giúp ổn định quá trình cháy mà không làm gia tăng đáng kể phát thải NOx. Tuy nhiên, khi tỷ lệ H_2 vượt quá 3%, phát thải NOx tăng mạnh, đồng thời có xu hướng làm tăng trở lại CO và HC do hiện tượng cháy nghèo và mất cân bằng hòa khí. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy việc kiểm soát tỷ lệ H_2 bổ sung trong khoảng tối ưu (2-3%) là một hướng đi hiệu quả trong chiến lược giảm phát thải, đồng thời mở ra cơ hội kết hợp với các công nghệ điều khiển hiện đại như EGR hoặc phun đa điểm để tối ưu hóa hơn nữa hiệu suất cháy sạch của động cơ diesel trong tương lai.

Từ khóa: Động cơ diesel tàu thủy, diesel sinh học, hydro, đặc tính phát thải, mô phỏng số.

Abstract

In the context of increasing demands for reducing harmful emissions from marine diesel engines, the integration of alternative fuels such as biodiesel and the addition of clean fuels like hydrogen (H_2) has drawn significant attention. This study aims to evaluate the effects of H_2 supplementation at

energy-based ratios ranging from 0-5% on the emission characteristics of a diesel engine operating with two fuel types: D100 and B20, under two engine speeds: 1400 and 2200 rpm. The results indicate that adding H_2 at a rate of 2-3% significantly reduces CO, HC, and smoke emissions. Notably, at this ratio, ignition delay increases moderately, helping to stabilize the combustion process without causing a substantial rise in NOx emissions. However, when the H_2 ratio exceeds 3%, NOx emissions increase sharply, and there is a tendency for CO and HC emissions to rise again due to lean combustion and imbalance in the air-fuel mixture. Furthermore, it opens up opportunities to combine this approach with advanced engine control technologies such as Exhaust Gas Recirculation (EGR) or multi-stage injection to further enhance clean combustion performance in diesel engines in the future.

Keywords: Marine diesel engines, biodiesel, hydrogen, emission characteristics, numerical simulation.

1. Đặt vấn đề

Vận tải biển giữ vai trò then chốt trong thương mại quốc tế, chiếm hơn 80% tổng lượng hàng hóa toàn cầu. Tuy nhiên, phần lớn đội tàu hiện nay sử dụng động cơ diesel, tạo ra lượng phát thải đáng kể gồm khí nhà kính, nitơ oxit (NO_x) và lưu huỳnh oxit (SO_x), làm gia tăng nguy cơ biến đổi khí hậu. Để giải quyết vấn đề này, ngành vận tải biển phải đáp ứng các tiêu chuẩn môi trường ngày càng nghiêm ngặt, đặc biệt là mục tiêu giảm 50% phát thải carbon vào năm 2050 [1]. Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) đã liên tục cập nhật các tiêu chuẩn khí thải thông qua Công ước MARPOL, tập trung vào giảm hàm lượng lưu huỳnh trong nhiên liệu và kiểm soát khí thải NO_x . Năm 2018, IMO công bố "Chiến lược ban đầu về

giảm phát thải khí nhà kính từ tàu" [2], đưa ra các giải pháp theo từng giai đoạn cụ thể, trong đó chuyển đổi sang nhiên liệu thay thế được xem là giải pháp nổi bật.

Hiện có nhiều loại nhiên liệu thay thế tiềm năng cho vận tải biển, bao gồm khí tự nhiên hóa lỏng, khí sinh học hóa lỏng, metanol, diesel sinh học và hydro. Diesel sinh học nổi bật như một lựa chọn tiềm năng bởi tính khả thi trong sản xuất, khả năng tái tạo và thân thiện hơn với môi trường [3]. Tuy nhiên, khi sử dụng diesel sinh học, động cơ thường gặp phải một số hạn chế như khả năng cháy không hoàn toàn, suất tiêu hao nhiên liệu gia tăng, và phát thải NO_x có xu hướng tăng nhẹ. Để khắc phục các hạn chế này, việc bổ sung hydro (H_2) - một nhiên liệu giàu năng lượng với tốc độ cháy cao vào đường nạp đang được quan tâm nghiên cứu sâu rộng nhằm cải thiện hiệu suất cháy và giảm phát thải độc hại [4].

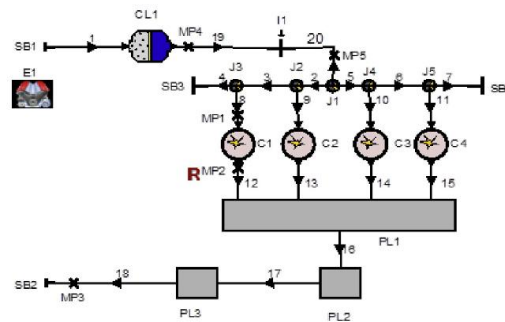
Việc tiến hành các nghiên cứu thực nghiệm đối với nhiên liệu thay thế trên tàu thủy hiện gặp nhiều trở ngại, chủ yếu do yêu cầu an toàn khắt khe và điều kiện thử nghiệm thực tế bị giới hạn. Vì thế, phương pháp sử dụng mô hình hóa với công cụ mô phỏng số đang được ưu tiên để đánh giá đặc tính kỹ thuật và phát thải của động cơ. Bài viết này trình bày nghiên cứu mô phỏng bằng AVL Boost để đánh giá ảnh hưởng của việc bổ sung khí H_2 vào đường nạp tới đặc tính phát thải của động cơ diesel tàu thủy cỡ nhỏ. Các mô hình tính toán được thiết lập cho động cơ diesel D243 sử dụng nhiên liệu diesel sinh học gốc dầu cò (B20). Trọng tâm nghiên cứu là phân tích ảnh hưởng của tỷ lệ bổ sung H_2 (với hàm lượng năng lượng của nhiên liệu được bổ sung từ 1% đến 5%) đến diễn biến sự hình thành các phát thải CO , HC , NO_x và khói (smoke), từ đó xác định tỷ lệ Hydro tối ưu, đồng thời cung cấp phương pháp tiếp cận khả thi nhằm tối ưu hóa vận hành động cơ diesel sử dụng nhiên liệu kép diesel sinh học - Hydro.

2. Nội dung

2.1. Tiến trình mô phỏng

Nhờ những tiến bộ trong phần cứng tính toán, AVL Workspace đã trở thành một lựa chọn đáng tin cậy để nghiên cứu quá trình hình thành hỗn hợp cháy, đặc tính động cơ, đặc tính cháy và phát thải trong nhiều loại động cơ đốt trong khác nhau. Trong nghiên cứu này, mô hình mô phỏng số đã được xây dựng bằng AVL Boost phiên bản 2019 để tính toán các đặc tính phát thải của động cơ. Các thông số hiệu chuẩn động cơ của quá trình mô phỏng với mỗi xy lanh đã được lựa chọn bằng cách sử dụng tài liệu tham khảo và

hướng dẫn của AVL Boost [5]. Do đó, các thành phần của động cơ bao gồm ống góp khí nạp và ống góp khí xả, đặc trưng hình học của xy lanh, bộ lọc không khí, kim phun Hydro, các ranh giới hệ thống và khoang chứa được triển khai trong giao diện Boost dựa trên các giá trị được lấy từ mô hình hình học động cơ trên bộ thử thực tế tại Trung tâm nghiên cứu các Nguồn động lực và Phương tiện tự hành của Đại học Bách khoa Hà Nội. Các thành phần được liên kết với nhau bằng đường ống như thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Mô hình mô phỏng bằng AVL Boost

Số lượng lớn các lần chạy thử mô phỏng được thiết lập để xác định chính xác các tham số của mô hình cháy. Các giá trị của các tham số hiệu chuẩn được lựa chọn có tính đến mô hình cháy AVL-MCC và mô hình truyền nhiệt Woschni 1990 [6].

Tiến trình tính toán mô phỏng được thực hiện trên AVL Boost với các bước chính sau:

Bước 1: Xây dựng mô hình hình học động cơ diesel D243 trên AVL Boost. Sử dụng giao diện AVL Boost để xây dựng sơ đồ mô phỏng động cơ diesel. Chọn mô-đun động cơ diesel (Diesel Cylinder). Kết nối các mô-đun: Cylinder, Intake System, Exhaust System, Injector. Thiết lập mô hình đường nạp, hệ thống xả, xy lanh và piston dựa trên thông số thực tế động cơ D243 được trình bày trong Bảng 1.

Bước 2: Thiết lập nhiên liệu diesel sinh học B20 trong AVL Boost với các thông số từ mẫu nhiên liệu được trình bày trong Bảng 2.

Bước 3: Thiết lập bổ sung H_2 vào đường nạp. Tạo thêm mô-đun bổ sung khí nạp (Gas injector) tại Intake manifold. Khai báo khí H_2 trong AVL Boost dựa trên tỷ lệ bổ sung được xác định theo hàm lượng năng lượng của H_2 . Công thức tính khối lượng H_2 bổ sung theo năng lượng (kg) [7]:

$$m_{H_2} = \frac{\%E_{H_2} \cdot m_{B20} \cdot LVH_{B20}}{HHV_{H_2}} \quad (1)$$

Trong đó:

$\%E_{H_2}$: Tỷ lệ năng lượng bổ sung;

m_{B20} : Khối lượng nhiên liệu B20 mỗi chu kỳ (kg);

LVH_{B20} : Nhiệt trị thấp của B20 (J/kg);

HHV_{H_2} : Nhiệt trị cao của Hydro (J/kg).

Bước 4: Thiết lập mô hình tính toán phát thải trong AVL Boost.

Bước 5: Thiết lập chế độ hoạt động và vận hành động cơ (điều kiện biên và điều kiện khởi tạo cho mỗi trường hợp). Các mô hình phát thải: NO_x - mô hình Zeldovich, CO, HC - mô hình phát thải equilibrium (cân bằng hóa học), Soot - mô hình AVL Smoke.

Bước 6: Chạy mô phỏng, theo dõi, thu thập dữ liệu kết quả.

Bước 7: Phân tích dữ liệu và vẽ các đồ thị đặc tính phát thải.

Bảng 1. Thông số động cơ D243

Hãng động cơ	MTZ, Minsk (Belarus)
Đường kính xylanh	110 mm
Hành trình piston	125 mm
Dung tích công tác	4,75 dm ³
Tỉ số nén	16:1
Công suất cực đại	56kW ở 2200 vòng/phút
Mômen cực đại	740Nm ở 1400 vòng/phút
Áp suất phun	180 bar
Góc phun sớm	24° GQTK trước ĐCT
Góc mở sớm xu páp nạp	16° GQTK trước ĐCT
Góc đóng muộn xu páp nạp	36° GQTK sau ĐCT
Góc mở sớm xu páp thải	46° GQTK trước ĐCT
Góc đóng muộn xu páp thải	14° GQTK sau ĐCT

Bảng 2. Tính chất của nhiên liệu [8]

Tính chất	D100	B20
Khối lượng riêng tại 15°C (kg/m ³)	838	850
Độ nhớt động học tại 40°C (mm ² /s)	3,34	3,89
Nhiệt trị thấp (MJ/kg)	42,8	41,6
Số Xê tan	45	46,5
Điểm chớp cháy (°C)	66	84

2.2. Tính toán mô phỏng

Trong nghiên cứu này, động cơ diesel tàu thủy cỡ nhỏ 4 kỳ, 4 xylanh một hàng thẳng đứng, làm mát bằng nước, không tăng áp, buồng cháy thống nhất và phun nhiên liệu trực tiếp có các thông số cơ bản được mô tả trong Bảng 1 được chọn làm đối tượng mô phỏng.

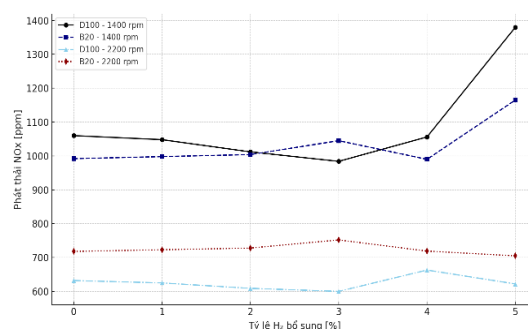
Nhiên liệu diesel sinh học nguồn gốc từ dầu cò được pha trộn với nhiên liệu diesel (D100) với tỷ lệ 20% (B20). Các đặc tính của diesel và diesel sinh học sử dụng cho các tính toán mô phỏng được trình bày trong Bảng 2. Các nhiên liệu thử nghiệm mới được tạo

ra khi cả 2 nhiên liệu D100 và B20 được làm giàu bởi H_2 bổ sung qua đường nạp với hàm lượng nhiên liệu được bổ sung từ 1% đến 5%. Động cơ mô phỏng được thiết lập ở chế độ toàn tải và hai mức tốc độ khác nhau (ở 1400 vòng/phút khi mômen đạt cực đại và 2200 vòng/phút khi công suất đạt cực đại). Thông số đầu ra của quá trình tính toán mô phỏng là đặc tính phát thải (NO_x , CO, HC và smoke).

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Phát thải NO_x

Phát thải NO_x chủ yếu bao gồm các khí như NO và NO_2 , đều gây tác động tiêu cực đến sức khỏe con người và môi trường xung quanh. Đối với động cơ diesel, đặc tính cháy không đồng đều là yếu tố làm gia tăng đáng kể sự hình thành các hợp chất NO_x . Sự thay đổi lượng phát thải NO_x trong quá trình cháy của động cơ chịu tác động của nhiều yếu tố kỹ thuật và vận hành. Trước tiên, thành phần nhiên liệu đóng vai trò quan trọng; nhiên liệu sinh học B20, có hàm lượng Oxy cao hơn diesel D100, tạo điều kiện cho quá trình cháy diễn ra triệt để hơn [9]. Điều này có thể dẫn đến nhiệt độ cháy cục bộ cao hơn, làm gia tăng sự hình thành NO_x . Khi bổ sung Hydro, tốc độ cháy tăng lên đáng kể do đặc tính dễ cháy và lan truyền nhanh của Hydro, gây ảnh hưởng trực tiếp đến nhiệt độ cháy cực đại và thời gian phản ứng nhiệt động học, qua đó làm biến đổi lượng NO_x phát sinh. Hàm lượng Hydro bổ sung qua đường nạp càng lớn thì tốc độ phản ứng cháy càng gia tăng, làm nhiệt độ cực đại trong buồng cháy tăng nhanh hơn, thúc đẩy mạnh cơ chế nhiệt hình thành NO_x .



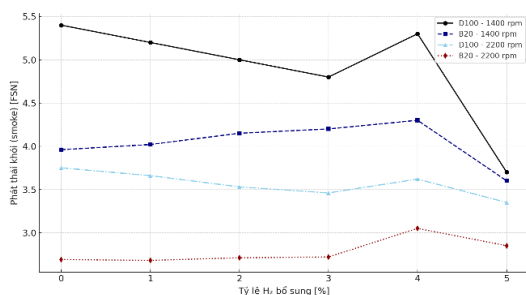
Hình 2. Sự thay đổi về phát thải NO_x

Dữ liệu mô tả trong Hình 2 cho thấy ở tất cả các mức H_2 (0-4%), nhiên liệu B20 đều tạo ra NO_x cao hơn D100, với mức chênh lệch dao động từ 56 đến 152 ppm. Nguyên nhân có thể do sự tương tác giữa H_2 và Oxy trong B20 làm tăng nhiệt độ cháy, dẫn đến phát thải NO_x cao hơn, điều này cũng khá tương đồng với kết quả nghiên cứu của Kanth và cộng sự [10]. Kết quả mô phỏng trong Hình 2 cho thấy ở cả hai tốc độ, nhiên liệu B20 cho NO_x thấp hơn D100 ở các tỷ lệ H_2 thấp (0-2%),

nhưng ở mức H_2 cao (3-5%), B20 lại cho NO_x cao hơn hoặc gần bằng. Điều này có thể xuất phát từ tính chất cháy của B20 - có thể góp phần tăng nhiệt độ cháy khi kết hợp với H_2 . Do đó, tỷ lệ H_2 tối ưu để giảm NO_x có thể là khoảng 2-3%, đặc biệt ở 2200 vòng/phút.

3.2. Phát thải khói (smoke)

Khi động cơ diesel hoạt động, quá trình cháy không hoàn toàn do thiếu Oxy cục bộ sẽ làm xuất hiện các vùng giàu nhiên liệu, dẫn tới sự hình thành bồ hóng và phát thải khói. Các yếu tố ảnh hưởng chính đến cơ chế hình thành phát thải khói trong quá trình cháy của động cơ diesel bao gồm chất lượng hòa trộn nhiên liệu và không khí, điều kiện cháy cục bộ, lượng Oxy sẵn có, và các đặc tính lý - hóa của nhiên liệu sử dụng. Việc sử dụng nhiên liệu sinh học B20 đã được chứng minh giúp cải thiện quá trình cháy nhờ đặc tính giàu Oxy của diesel sinh học, góp phần làm giảm đáng kể lượng phát thải khói so với diesel thông thường [11]. Tuy nhiên, độ nhớt cao hơn của B20 có thể gây ảnh hưởng đến khả năng phun sương và tốc độ bay hơi của nhiên liệu, ảnh hưởng đến hiệu quả hòa trộn nhiên liệu và không khí. Dữ liệu mô phỏng cho thấy rằng D100 có phát thải khói ban đầu cao hơn B20, do đó khi bổ sung H_2 thì sự thay đổi phát thải khói trở nên rõ rệt hơn đối với D100. Trong khi đó, B20 đã có tính oxy hóa tốt hơn nên tác dụng của H_2 bị "giảm dần" về mặt hiệu quả.



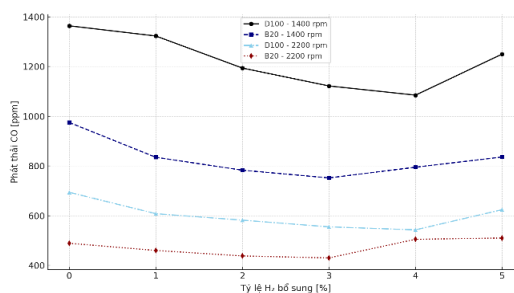
Hình 3. Sự thay đổi về phát thải khói (smoke)

Khi bổ sung Hydro vào đường nạp động cơ diesel sử dụng B20 sẽ làm tăng tốc độ cháy, cải thiện đáng kể chất lượng hỗn hợp và hiệu quả cháy. Hydro, với tốc độ cháy nhanh và giới hạn cháy rộng, giúp rút ngắn thời gian cháy trễ, nâng cao nhiệt độ cháy cục bộ và thúc đẩy sự oxy hóa hoàn toàn các phân tử nhiên liệu. Nhờ đó, lượng phát thải khói hình thành giảm đi đáng kể [12]. Kết quả mô phỏng thể hiện trong Hình 3 cũng diễn tả xu hướng giảm phát thải khói tổng thể khi tăng tỷ lệ H_2 , đặc biệt rõ ở mức 5%. Phát thải khói giảm dần từ 5,4 (0% H_2) xuống 4,8 (3% H_2), sau đó tăng nhẹ ở 4% H_2 và giảm mạnh xuống còn 3,7 tại 5% H_2 . Với tất cả các mẫu nhiên liệu và chế độ tốc độ, tại 5% H_2 , phát thải khói luôn thấp nhất hoặc gần thấp nhất.

Đây có thể được coi là mức H_2 tối ưu trong bối cảnh thử nghiệm này để giảm phát thải khói mà không làm tăng NO_x quá nhiều.

3.3. Phát thải CO

Phát thải CO trong động cơ diesel hình thành chủ yếu do quá trình cháy không hoàn toàn, chịu tác động bởi các yếu tố như tỷ lệ nhiên liệu/không khí, nhiệt độ buồng đốt, chất lượng hòa trộn nhiên liệu - không khí, thời gian cháy và tính chất hóa lý của nhiên liệu. Trong đó, quá trình oxy hóa CO thành CO_2 phụ thuộc chặt chẽ vào nhiệt độ và lượng Oxy dư thừa trong môi trường cháy. Khi động cơ vận hành với nhiên liệu sinh học B20, đặc tính hóa học của nhiên liệu thay đổi rõ rệt. Do diesel sinh học chứa Oxy trong phân tử nên sẽ cải thiện đáng kể khả năng cháy hoàn toàn, thúc đẩy quá trình oxy hóa CO thành CO_2 diễn ra hiệu quả hơn, qua đó làm giảm nồng độ CO trong khí thải [13].



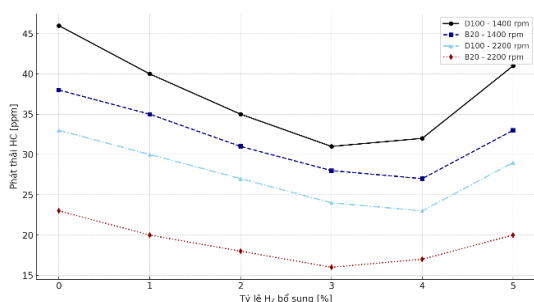
Hình 4. Sự thay đổi về phát thải CO

Việc bổ sung Hydro vào đường nạp góp phần cải thiện đáng kể cơ chế cháy. Hydro có tốc độ cháy nhanh, khả năng khuếch tán mạnh, giúp thúc đẩy quá trình cháy triệt để hơn. Sự hiện diện của Hydro làm tăng nhiệt độ cực đại trong buồng cháy, cải thiện điều kiện oxy hóa CO thành CO_2 , qua đó giảm mạnh lượng CO phát thải. Khi hàm lượng Hydro tăng dần từ 1% đến khoảng 5%, lượng CO giảm rõ rệt do điều kiện cháy hoàn toàn được tăng cường, tuy nhiên, nếu vượt quá ngưỡng tối ưu, xu hướng này có thể giảm đi do sự xuất hiện các vùng cháy cục bộ giàu nhiên liệu và điều kiện hòa trộn không đồng đều trong buồng đốt [14]. Kết quả mô phỏng trong Hình 4 cho thấy H_2 giúp cải thiện phát thải CO ở mức bổ sung vừa phải (1-3%), nhưng từ mức bổ sung 4-5% cần thận trọng vì có xu hướng tăng trở lại do thay đổi điều kiện cháy. Ở tốc độ cao hơn, việc bổ sung H_2 là giải pháp hiệu quả nhất để giảm CO, đặc biệt với nhiên liệu D100. Đối với B20, nhiên liệu có chứa hàm lượng Oxy trong phân tử nên ít bị ảnh hưởng bởi H_2 (giảm nhẹ phát thải CO từ mức bổ sung 1% đến 3%, sau đó tăng nhẹ khi tăng lượng Hydro bổ sung lên 4% và 5%). Do đó, việc tối ưu hóa lượng Hydro bổ sung là hết sức quan trọng nhằm đảm bảo hiệu quả giảm

phát thải CO, kết quả mô phỏng cho thấy tỷ lệ bổ sung Hydro từ 2% - 3% là tối ưu trong việc kiểm soát phát thải CO, xu hướng này cũng được thể hiện trong nghiên cứu của Kesharvani và cộng sự [15].

3.4. Phát thải HC

Phát thải Hydrocarbon (HC) trong động cơ diesel chủ yếu được hình thành do quá trình cháy không hoàn toàn hoặc do nhiên liệu bị giữ lại tại các vùng có nhiệt độ thấp trong buồng đốt, nơi điều kiện cháy không thuận lợi. Các yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến cơ chế hình thành HC bao gồm nhiệt độ buồng đốt, chất lượng hòa trộn giữa nhiên liệu và không khí, thời gian cháy, đặc tính hóa lý của nhiên liệu và chất lượng phun nhiên liệu. Khi động cơ sử dụng nhiên liệu sinh học B20, hàm lượng Oxy có trong diesel sinh học giúp tăng khả năng bắt cháy, hỗ trợ quá trình oxy hóa hydrocarbon cục bộ, nhất là ở vùng giàu nhiên liệu nên cải thiện điều kiện cháy cục bộ, giảm thiểu sự xuất hiện các vùng cháy không hoàn toàn, do đó làm giảm lượng phát thải HC [16]. Kết quả mô phỏng trong Hình 5 đã cho thấy, so với D100 ở cùng điều kiện, B20 có mức phát thải HC thấp hơn đáng kể, ở 1400 vòng/phút giảm khoảng 29%, ở 2200 vòng/phút giảm khoảng 30%.



Hình 5. Sự thay đổi về phát thải HC

Hydro với đặc tính cháy nhanh (nó có vận tốc cháy rất cao, khoảng 2,9m/s trong không khí, gấp khoảng 7 lần so với nhiên liệu diesel) nên hỗn hợp cháy lan truyền nhanh hơn [17]. Do đó khi bổ sung Hydro sẽ cải thiện rõ rệt điều kiện hòa trộn và nâng cao nhiệt độ cháy cục bộ, qua đó thúc đẩy quá trình cháy triệt để hơn, giảm các vùng nhiên liệu không được oxy hóa hoàn toàn, ngay cả ở những vùng biên hoặc vùng nghèo nhiên liệu, dẫn đến giảm thiểu lượng phát thải HC. Dữ liệu mô phỏng thể hiện trong Hình 5 cho thấy bổ sung H₂ đến khoảng 2-3% giúp giảm rõ rệt phát thải HC, cụ thể với nhiên liệu D100 ở 1400 vòng/phút giảm khoảng 33%. Với B20, H₂ tăng cường khả năng cháy vốn đã tốt của nó, H kết hợp O nguyên tử trong B20 có vai trò cộng hưởng nên HC giảm thêm nhưng tác động không mạnh mẽ như ở D100. Tuy nhiên, từ

mức bổ sung 4-5%, lượng phát thải HC có dấu hiệu tăng lại, ví dụ như với D100 ở 1400 vòng/phút HC lại tăng trở lại (lên 41ppm) ở mức bổ sung 5% H₂, nguyên nhân có thể do H₂ quá dư, gây mất cân bằng hòa khí, hỗn hợp cháy quá nghèo nên cháy không hoàn toàn lại xuất hiện, điều này có thể thấy trong nghiên cứu liên quan của Mustafa và cộng sự [14]. Như vậy, tỷ lệ bổ sung H₂ tối ưu để giảm phát thải HC là mức 2-3%, nếu vượt quá dễ gây mất cân bằng hòa khí và cháy không hoàn toàn xuất hiện trở lại.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày nghiên cứu mô phỏng số xác định đặc tính phát thải của động cơ D243 sử dụng nhiên liệu D100 và B20 có bổ sung Hydro qua đường nạp với mức tỷ lệ từ 1% đến 5% (dựa trên hàm lượng năng lượng) ở điều kiện toàn tải với hai chế độ tốc độ là 1400 vòng/phút và 2200 vòng/phút. Kết quả nghiên cứu đã cho thấy:

Phát thải CO và HC giảm đáng kể khi bổ sung H₂ đến mức 2-3%, nhờ H₂ cải thiện khả năng cháy, tăng vận tốc ngọn lửa và nhiệt độ buồng cháy. Tuy nhiên, khi tỷ lệ H₂ vượt quá 3-4%, lượng CO và HC có xu hướng tăng nhẹ trở lại, có thể do hòa khí quá nghèo gây cháy không hoàn toàn.

Phát thải khói giảm rõ rệt theo tỷ lệ H₂, đặc biệt với D100 ở cả hai tốc độ. B20 vốn có sẵn Oxy nguyên tử nên phát thải khói thấp hơn ngay từ đầu, và ít bị ảnh hưởng bởi H₂ hơn.

Bổ sung H₂ làm tăng đáng kể phát thải NO_x, đặc biệt ở tỷ lệ 4-5% và tại tốc độ thấp (1400 vòng/phút). Nguyên nhân là do nhiệt độ buồng cháy tăng cao, thúc đẩy phản ứng tạo NO_x. Ở 2200 vòng/phút, xu hướng tăng NO_x nhẹ hơn và ổn định hơn.

Tóm lại, tỷ lệ H₂ bổ sung tối ưu là từ 2% đến 3%, giúp giảm hiệu quả phát thải CO, HC, khói mà không gây gia tăng đáng kể NO_x. Tỷ lệ H₂ bổ sung trên 3% có thể làm tăng NO_x mạnh và gây mất cân bằng cháy, đặc biệt ở điều kiện vận hành thấp tốc. Các chiến lược điều khiển nhiên liệu (như phun nhiều giai đoạn, sử dụng EGR, kiểm soát H₂ theo tải) có thể được nghiên cứu thêm để hạn chế NO_x khi bổ sung H₂ ở mức cao hơn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT24-25.21.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. Li, M. Wu, X. Gu, K. F. Yuen, and Y. Xiao (2020), *Determinants of ship operators' options for compliance with IMO 2020*, Transp. Res. Part D Transp. Environ., Vol.86, p.102459.

- [2] T.-H. Joung, S.-G. Kang, J.-K. Lee, and J. Ahn (2020), *The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050*, J. Int. Marit. Safety, Environ. Aff. Shipp., Vol.4, No.1, pp.1-7.
- [3] D. Christopher Selvam et al. (2025), *The role of biodiesel in marine decarbonization: Technological innovations and ocean engineering challenges*, Results Eng., Vol.25, p.103974.
doi: 10.1016/j.rineng.2025.103974.
- [4] P. Murugesan et al. (2021), *Role of hydrogen in improving performance and emission characteristics of homogeneous charge compression ignition engine fueled with graphite oxide nanoparticle-added microalgae biodiesel/diesel blends*, Int. J. Hydrogen Energy.
doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.107.
- [5] A. V. L. BOOST-version (2010), *Users Guide and Theory*, Edition, Vol.11, p.2010.
- [6] J. B. Heywood (2018), *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education.
- [7] Y. Wang, X. Zhou, and L. Liu (2021), *Theoretical investigation of the combustion performance of ammonia/hydrogen mixtures on a marine diesel engine*, Int. J. Hydrogen Energy, Vol.46, No.27, pp. 14805-14812.
doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.233.
- [8] I. Örs, S. Sarikoç, A. E. Atabani, S. Ünal, and S. O. Akansu (2018), *The effects on performance, combustion and emission characteristics of DIC engine fuelled with TiO₂ nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends*, Fuel, Vol.234, pp.177-188.
doi: 10.1016/j.fuel.2018.07.024.
- [9] M. M. Hasan and M. M. Rahman (2017), *Performance and emission characteristics of biodiesel-diesel blend and environmental and economic impacts of biodiesel production: A review*, Renew. Sustain. Energy Rev., Vol.74, pp.938-948.
doi: 10.1016/j.rser.2017.03.045.
- [10] S. Kanth, S. Debbarma, and B. Das (2022), *Experimental investigations on the effect of fuel injection parameters on diesel engine fuelled with biodiesel blend in diesel with hydrogen enrichment*, Int. J. Hydrogen Energy, Vol.47, No.83, pp.35468-35483.
doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.095.
- [11] S. Mohite, S. Kumar, and S. Maji (2016), *Performance Characteristics of Mix Oil Biodiesel Blends with Smoke Emissions*, Int. J. Renew. Energy Dev., Vol.5, No.2.
- [12] S. Vadlamudi, S. K. Gugulothu, J. Kumar Panda, K. S. Chalapathi, and D. Mohanty (2024), *An ideal investigation on conventional CRDI engine for optimum paradigm analysis of performance and exhaust emissions by using oxygenated and hydrogen fuel: An experimental green dual fuel approach*, Fuel, Vol.372, p.132160.
doi:10.1016/j.fuel.2024.132160.
- [13] I. Lawan, W. Zhou, Z. N. Garba, M. Zhang, Z. Yuan, and L. Chen (2019), *Critical insights into the effects of bio-based additives on biodiesels properties*, Renew. Sustain. Energy Rev., Vol.102, Bo. November 2018, pp.83-95.
doi: 10.1016/j.rser.2018.12.008.
- [14] M. A. Akar, E. Kekilli, O. Bas, S. Yildizhan, H. Serin, and M. Ozcanli (2018), *Hydrogen enriched waste oil biodiesel usage in compression ignition engine*, Int. J. Hydrogen Energy, Vol.43, No.38, pp.18046-18052.
doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.045.
- [15] H. Dembinski (2014), *In-cylinder flow characterisation of heavy duty diesel engines using combustion image velocimetry*. KTH Royal Institute of Technology.
- [16] Ü. Ağbulut, M. Ayyıldız, and S. Sarıdemir (2020), *Prediction of performance, combustion and emission characteristics for a CI engine at varying injection pressures*, Energy.
doi: 10.1016/j.energy.2020.117257.
- [17] A. Sanyal and A. K. Choudhary (2024), *Environmental impact of waste plastic oil and hydrogen-enriched diesel engines: A comprehensive review on performance, combustion, and emissions*, J. Renew. Sustain. Energy, Vol.16, No.5.

Ngày nhận bài:	24/03/2025
Ngày nhận bản sửa:	01/04/2025
Ngày duyệt đăng:	02/04/2025