XÂY DỰNG
TẠP CHÍ ĐIỆN TỬ CỦA BỘ XÂY DỰNG
JOURNAL OF CONSTRUCTION

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Nghiên cứu mô phỏng đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ bổ sung hydro theo tỷ lệ năng lượng đến đặc tính phát thải của động cơ diesel D243

Numerical assessment of the effects of hydrogen energy share on the emission characteristics of a D243 diesel engine

THS Hoàng Đức Tuấn, THS Nguyễn Văn Hải*
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: hainv.vck@vimaru.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO
Chuyên mục: Khoa học công nghệ
Ngày nhận bài: 26/6/2026
Ngày sửa bài: 03/7/2026
Ngày chấp nhận đăng: 14/7/2026
Ngày xuất bản Online: 21/7/2026
Tác giả liên hệ:
Email: hainv.vck@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Hydro là nhiên liệu thay thế có tiềm năng giảm phát thải cho động cơ diesel nhờ không chứa cacbon, tốc độ cháy cao và giới hạn cháy rộng. Nghiên cứu này sử dụng phần mềm AVL BOOST để mô phỏng động cơ diesel D243 nhằm đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ năng lượng hydro đến đặc tính phát thải của động cơ. Hydro được cấp vào đường nạp với các mức là 3%, 6%, 9% và 12% theo tỷ lệ thay thế năng lượng, trong khi lượng nhiên liệu diesel được điều chỉnh tương ứng để duy trì cùng điều kiện làm việc ở chế độ toàn tải. Các chỉ tiêu phát thải được khảo sát gồm NOx, CO, HC và soot trong dải tốc độ từ 1.000 đến 2.200 vòng/phút. Kết quả mô phỏng cho thấy phát thải NOx tăng theo tốc độ động cơ và tỷ lệ năng lượng hydro, trong khi CO, HC và soot giảm rõ rệt nhờ giảm lượng diesel tiêu thụ và cải thiện quá trình cháy. Tại tốc độ 2.200 vòng/phút, so với diesel nguyên chất, trường hợp HES12 làm giảm 45,1% CO, 47,1% HC và 71,7% soot, nhưng làm tăng 42,2% NOx. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc lựa chọn tỷ lệ năng lượng hydro phù hợp có thể cải thiện đáng kể đặc tính phát thải của động cơ diesel D243, đồng thời tạo cơ sở cho các nghiên cứu tối ưu hóa nhằm cân bằng giữa giảm phát thải chứa cacbon và kiểm soát NOx.

Từ khóa: Động cơ diesel D243; nhiên liệu thay thế; hydro; AVL BOOST; phát thải.

A B S T R A C T

Hydrogen is considered a promising alternative fuel for reducing diesel engine emissions owing to its carbon-free nature, high flame propagation speed and wide flammability limits. This study numerically investigates the effects of Hydrogen Energy Share (HES) on the emission characteristics of a D243 diesel engine using AVL BOOST. Hydrogen was introduced through the intake manifold at energy shares of 3%, 6%, 9% and 12%, while the diesel fuel quantity was proportionally reduced to maintain the same full-load operating condition. Emission characteristics, including nitrogen oxides (NOx), carbon monoxide (CO), unburned hydrocarbons (HC) and soot, were evaluated over an engine speed range of 1.000 - 2.200 rpm. The simulation results indicate that increasing HES leads to a gradual increase in NOx emissions because of higher in-cylinder combustion temperatures and faster heat release rates. In contrast, CO, HC and soot emissions decrease significantly due to improved combustion, enhanced oxidation and reduced diesel consumption. At the rated speed of 2200 rpm, the HES12 case decreases CO, HC, and soot emissions by 45.1%, 47.1% and 71.7%, respectively, compared with conventional diesel operation, while NOx emissions increase by 42.2%. These findings demonstrate that hydrogen supplementation is an effective approach for reducing carbon-based emissions from the D243 diesel engine, although appropriate HES selection is required to achieve a balance between emission reduction and NOx control.

Keywords: D243 diesel engine; hydrogen; alternative fuels; AVL BOOST; emissions.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động cơ diesel vẫn giữ vai trò quan trọng trong lĩnh vực vận tải, nông nghiệp, công nghiệp và hàng hải nhờ hiệu suất nhiệt cao, độ tin cậy lớn và khả năng làm việc ổn định trong nhiều điều kiện khai thác khác nhau [1, 2]. Tuy nhiên, quá trình cháy khuếch tán đặc trưng của động cơ diesel cũng là nguyên nhân tạo ra nhiều thành phần phát thải độc hại như NOx, CO, HC và soot. Trong bối cảnh các quy định về phát thải ngày càng nghiêm ngặt, việc nghiên cứu các giải pháp giảm phát thải cho động cơ diesel hiện hữu có ý nghĩa khoa học và thực tiễn rõ rệt [3].

Một trong những hướng tiếp cận được quan tâm hiện nay là bổ sung nhiên liệu không chứa cacbon vào quá trình cháy diesel. Trong đó, hydro là nhiên liệu có nhiều ưu điểm nổi bật như không chứa nguyên tử cacbon, nhiệt trị khối lượng cao, tốc độ lan truyền ngọn lửa lớn, năng lượng đánh lửa thấp và giới hạn cháy rộng [4]. Khi được cấp vào đường nạp của động cơ diesel, hydro hòa trộn với không khí trước khi đi vào xy-lanh, trong khi nhiên liệu diesel vẫn được phun trực tiếp vào buồng cháy để đóng vai trò nguồn mồi cháy. Cách tiếp cận này cho phép tận dụng kết cấu sẵn có của động cơ diesel, hạn chế mức độ cải tạo hệ thống nhiên liệu, đồng thời có khả năng cải thiện quá trình cháy và giảm các phát thải có nguồn gốc cacbon [5].

Về bản chất, khi tăng tỷ lệ năng lượng hydro trong tổng năng lượng cấp cho động cơ, lượng diesel phun vào xy-lanh có thể được giảm tương ứng. Điều này làm giảm lượng cacbon tham gia vào quá trình cháy, từ đó có khả năng giảm CO, HC và soot [6, 7]. Ngoài ra, sự hiện diện của hydro trong hỗn hợp nạp có thể làm tăng tốc độ cháy, cải thiện quá trình oxy hóa nhiên liệu diesel và hạn chế sự hình thành vùng cháy giàu nhiên liệu cục bộ. Tuy nhiên, hydro cũng có thể làm tăng nhiệt độ cháy cục bộ và tốc độ giải phóng nhiệt, dẫn đến nguy cơ tăng phát thải NOx [8]. Vì vậy, ảnh hưởng của hydro đến đặc tính phát thải không đơn thuần theo một chiều hướng có lợi mà cần được đánh giá định lượng theo từng mức bổ sung cụ thể.

Động cơ D243 là loại động cơ diesel cỡ nhỏ, không tăng áp, được sử dụng trong nhiều ứng dụng công nghiệp và có khả năng phù hợp với các nghiên cứu chuyển đổi nhiên liệu. Tuy nhiên, các nghiên cứu mô phỏng chuyên sâu về ảnh hưởng của tỷ lệ năng lượng hydro đến đặc tính phát thải của động cơ D243 vẫn còn hạn chế. Đặc biệt, việc khảo sát các mức bổ sung hydro thấp và trung bình như 3%, 6%, 9% và 12% theo tỷ lệ năng lượng có ý nghĩa thực tiễn, vì đây là vùng làm việc có thể giúp giảm phát thải chứa cacbon trong khi vẫn hạn chế các rủi ro liên quan đến cháy sớm, cháy bất thường hoặc tăng NOx quá mức.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này sử dụng phần mềm AVL BOOST để xây dựng mô hình mô phỏng động cơ diesel D243 và đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ năng lượng hydro đến đặc tính phát thải ở chế độ toàn tải. Các mức tỷ lệ năng lượng hydro được khảo sát gồm 0%, 3%, 6%, 9% và 12%. Các thông số phát thải được phân tích gồm NOx, CO, HC và soot trong dải tốc độ từ 1.000 đến 2.200 vòng/phút. Mục tiêu chính của nghiên cứu là làm rõ xu hướng thay đổi phát thải khi tăng tỷ lệ hydro, qua đó đề xuất cơ sở lựa chọn mức bổ sung hydro phù hợp cho động cơ diesel D243.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là động cơ diesel D243, loại động cơ 4 kỳ, 4 xy-lanh, không tăng áp, phun nhiên liệu trực tiếp. Đây là động cơ diesel cỡ nhỏ, có kết cấu tương đối điển hình và phù hợp để nghiên cứu ảnh hưởng của nhiên liệu thay thế trong điều kiện mô phỏng. Trong nghiên cứu này, động cơ được khảo sát ở chế độ toàn tải trong dải tốc độ từ 1.000 đến 2.200 vòng/phút. Các thông số cơ bản của động cơ D243 được trình bày trong Bảng 1.

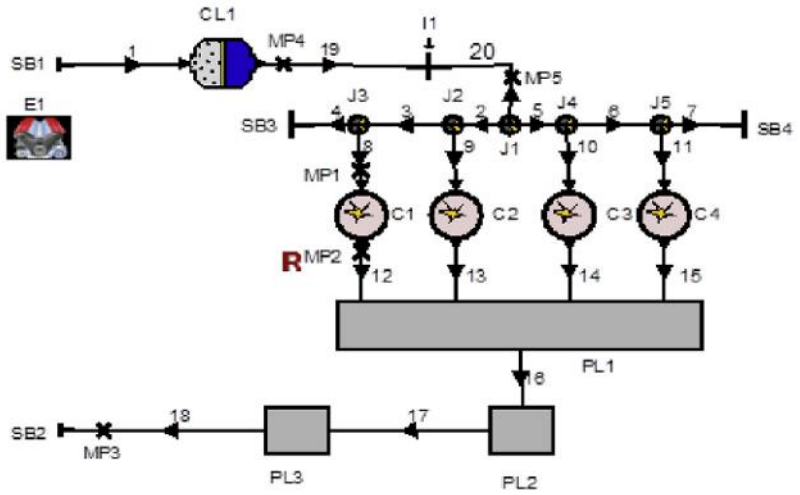
Bảng 1. Thông số kỹ thuật cơ bản của động cơ D243

Thông số	Giá trị
Kiểu động cơ	Diesel 4 kỳ, không tăng áp
Số xy-lanh	4
Đường kính xy-lanh	110 mm
Hành trình piston	125 mm
Dung tích công tác	4,75 L
Tỷ số nén	16:1
Công suất định mức	56 kW
Tốc độ định mức	2.200 vòng/phút
Phương thức cấp diesel	Phun trực tiếp
Phương thức cấp hydro	Cấp vào đường nạp

2.2. Xây dựng mô hình mô phỏng trên AVL BOOST

Mô hình động cơ D243 được xây dựng trên phần mềm AVL BOOST theo cấu trúc một chiều của hệ thống nạp, xy-lanh, hệ thống phun nhiên liệu và đường thải [9]. Các phần tử chính trong mô hình gồm bộ lọc khí, đường ống nạp, xy-lanh, vòi phun diesel, đường thải và phần tử môi trường. Quá trình cháy trong xy-lanh được mô phỏng dựa trên mô hình cháy phù hợp với động cơ diesel phun trực tiếp, trong đó nhiên liệu diesel đóng vai trò nguồn mồi cháy, còn hydro được hòa trộn trước với không khí trên đường nạp.

Trong mô hình (Hình 1), hydro được cấp vào đường nạp trước xu-páp nạp. Cách bố trí này giúp hydro có thời gian hòa trộn với không khí trước khi đi vào xy-lanh, tạo thành hỗn hợp khí nạp tương đối đồng nhất. Diesel vẫn được phun trực tiếp vào buồng cháy gần cuối kỳ nén để khởi phát quá trình cháy. Khi tăng tỷ lệ năng lượng hydro, lượng diesel được giảm tương ứng nhằm đảm bảo tổng năng lượng cấp cho động cơ phù hợp với điều kiện làm việc toàn tải.



Hình 1. Mô hình động cơ D243

2.3. Xác định tỷ lệ năng lượng hydro

Tỷ lệ năng lượng hydro (Hydrogen Energy Share - HES) được sử dụng để biểu thị phần năng lượng do hydro cung cấp trong tổng năng lượng nhiên liệu cấp cho động cơ. Chỉ tiêu này phản ánh chính xác mức độ thay thế năng lượng của hydro đối với nhiên liệu diesel và được xác định theo công thức:

$$HES = \frac{\dot{m}_{H_2} * LHV_{H_2}}{\dot{m}_{H_2} * LHV_{H_2} + \dot{m}_{diesel} * LHV_{diesel}} \quad (1)$$

Trong đó:

$\dot{m}_{H_2}$: Lưu lượng khối lượng hydro (kg/s);

$\dot{m}_{Diesel}$: Lưu lượng khối lượng diesel (kg/s);

LHV_{H_2}: Nhiệt trị thấp của hydro (≈120 MJ/kg);

LHV_{Diesel}: Nhiệt trị thấp của diesel (≈42,5 MJ/kg).

Trong nghiên cứu này, hydro được bổ sung theo 4 mức tỷ lệ năng lượng gồm 3%, 6%, 9% và 12%, tương ứng với các trường hợp HES3, HES6, HES9 và HES12. Để đảm bảo điều kiện so sánh, tổng năng lượng cấp vào động cơ được giữ không đổi ở từng chế độ làm việc.

2.4. Điều kiện mô phỏng

Các tính toán được thực hiện ở chế độ toàn tải với các tốc độ động cơ 1.000, 1.200, 1.400, 1.600, 1.800, 2.000 và 2.200 vòng/phút. Đối với mỗi tốc độ, mô hình được tính toán lần lượt cho diesel nguyên chất và các mức bổ sung hydro theo tỷ lệ năng lượng 3%, 6%, 9% và 12%. Các chỉ tiêu phát thải được tập trung đánh giá gồm: NOx, CO, HC và soot. Nghiên cứu này chỉ tập trung phân tích đặc tính phát thải, không đi sâu vào các chỉ tiêu công suất, suất tiêu hao nhiên liệu, hiệu suất nhiệt hoặc đặc tính cháy. Việc giới hạn phạm vi như vậy nhằm làm rõ vai trò của hydro đối với quá trình hình thành các chất ô nhiễm trong động cơ diesel D243.

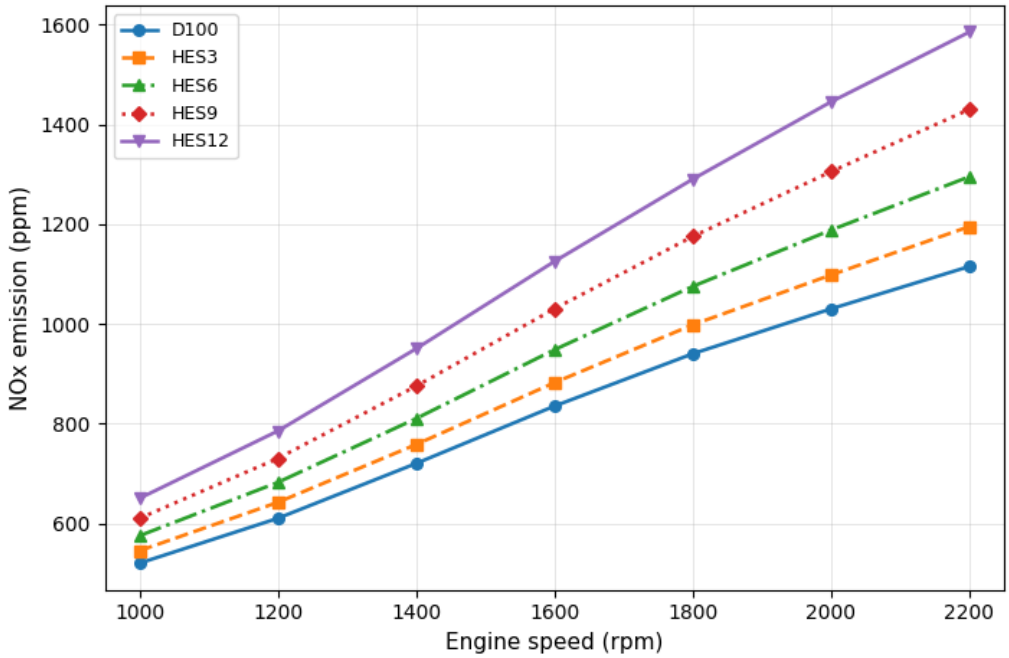
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phát thải NOx

Hình 2 trình bày sự thay đổi phát thải NOx của động cơ diesel D243 khi bổ sung hydro theo các tỷ lệ năng lượng khác nhau trong dải tốc độ từ 1.000 đến 2.200 vòng/phút ở chế độ toàn tải. Kết quả cho thấy phát thải NOx tăng theo tốc độ động cơ đối với tất cả các trường hợp nhiên liệu. Ở chế độ sử dụng diesel nguyên chất, NOx tăng từ 520 ppm tại 1.000 vòng/phút lên 1.115 ppm tại 2.200 vòng/phút. Khi bổ sung hydro, phát thải NOx tiếp tục tăng và mức tăng rõ rệt hơn khi tỷ lệ năng lượng hydro tăng từ 3% lên 12%.

Tại tốc độ định mức 2.200 vòng/phút, phát thải NOx của các trường hợp D100, HES3, HES6, HES9 và HES12 lần lượt đạt 1.115 ppm, 1.195 ppm, 1.295 ppm, 1.430 ppm và 1.585 ppm. So với diesel nguyên chất, NOx tăng khoảng 7,2% đối với HES3, 16,1% đối với HES6, 28,3% đối với HES9 và 42,2% đối với HES12. Xu hướng này cho thấy việc tăng tỷ lệ năng lượng hydro có ảnh hưởng đáng kể đến quá trình hình thành NOx trong buồng cháy.

Nguyên nhân chính của sự gia tăng NOx là do hydro có tốc độ lan truyền ngọn lửa cao, giới hạn cháy rộng và khả năng cải thiện tốc độ cháy của hỗn hợp nhiên liệu. Khi hydro được cấp vào đường nạp, hỗn hợp hydro-không khí được hình thành trước khi đi vào xy-lanh [6]. Trong quá trình cháy, nhiên liệu diesel phun trực tiếp đóng vai trò nguồn mồi, sau đó kích hoạt quá trình cháy của hỗn hợp hydro-không khí. Sự có mặt của hydro làm tăng tốc độ giải phóng nhiệt, rút ngắn thời gian cháy và làm tăng nhiệt độ cục bộ trong buồng cháy. Đây là điều kiện thuận lợi cho cơ chế hình thành NOx nhiệt, đặc biệt tại các vùng có nhiệt độ cao và dư oxy.



Hình 2. Ảnh hưởng của tỷ lệ năng lượng hydro đến phát thải NOx

Mặc dù bổ sung hydro có thể mang lại lợi ích trong việc giảm các phát thải chứa cacbon như CO, HC, CO_2 và soot, kết quả NOx cho thấy tỷ lệ hydro không nên tăng quá cao nếu không có giải pháp kiểm soát NOx đi kèm. Trong phạm vi nghiên cứu này, HES3 và HES6 là các mức bổ sung có xu hướng phù hợp hơn nếu xét riêng tiêu chí hạn chế gia tăng NOx. Trong khi đó, HES9 và HES12 có thể cần kết hợp với các giải pháp như hồi lưu khí thải, điều chỉnh thời điểm phun hoặc tối ưu hóa lượng phun diesel để kiểm soát NOx hiệu quả hơn [7].

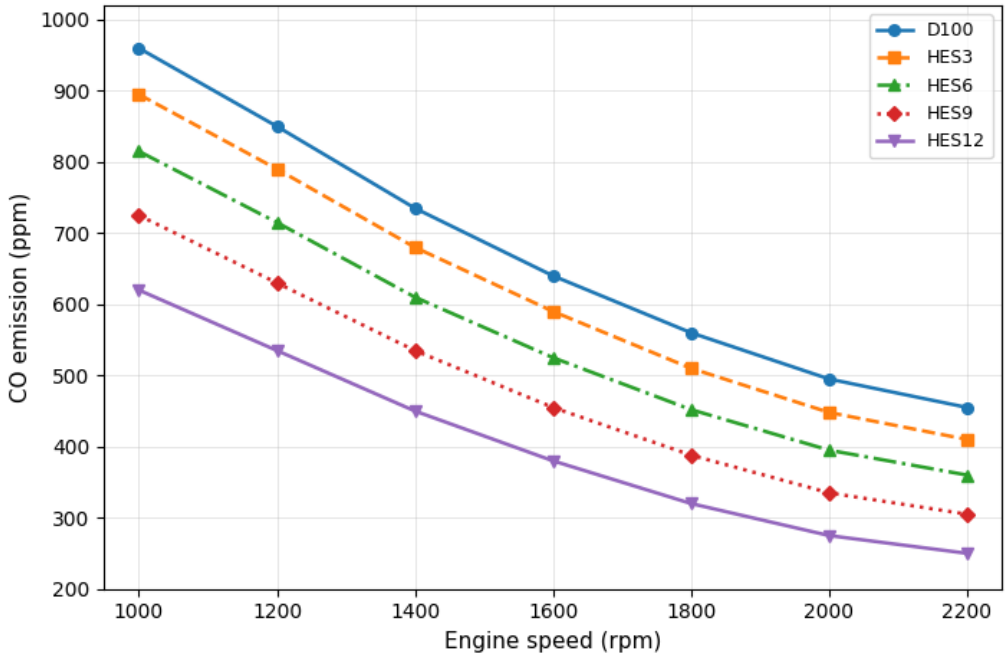
Như vậy, phát thải NOx là chỉ tiêu cần được đặc biệt quan tâm khi ứng dụng hydro trên động cơ diesel D243. Kết quả mô phỏng cho thấy hydro làm tăng NOx theo cả tỷ lệ năng lượng hydro và tốc độ động cơ, phản ánh sự đánh đổi giữa mục tiêu giảm phát thải chứa cacbon và nguy cơ gia tăng phát thải NOx.

3.2. Phát thải CO

Hình 3 trình bày sự thay đổi phát thải CO của động cơ diesel D243 khi bổ sung hydro theo các tỷ lệ năng lượng khác nhau trong dải tốc độ từ 1.000 đến 2.200 vòng/phút ở chế độ toàn tải. Kết quả cho thấy phát thải CO có xu hướng giảm khi tốc độ động cơ tăng đối với tất cả các trường hợp nhiên liệu. Với diesel nguyên chất, CO giảm từ 960 ppm tại 1.000 vòng/phút xuống còn 455 ppm tại 2.200 vòng/phút. Khi hydro được bổ sung vào đường nạp, phát thải CO tiếp tục giảm rõ rệt và mức giảm tăng dần theo tỷ lệ năng lượng hydro.

Tại tốc độ định mức 2.200 vòng/phút, phát thải CO của các trường hợp D100, HES3, HES6, HES9 và HES12 lần lượt đạt 455 ppm, 410 ppm, 360 ppm, 305 ppm và 250 ppm. So với diesel nguyên chất, CO giảm khoảng 9,9% đối với HES3, 20,9% đối với HES6, 33,0% đối với HES9 và 45,1% đối với HES12. Điều này cho thấy bổ sung hydro có tác động tích cực đến việc hạn chế hình thành CO trong quá trình cháy của động cơ diesel D243.

Sự suy giảm CO khi tăng tỷ lệ năng lượng hydro có thể được giải thích bởi hai nguyên nhân chính. Thứ nhất, hydro là nhiên liệu không chứa cacbon, do đó khi một phần năng lượng diesel được thay thế bằng hydro, lượng cacbon đưa vào buồng cháy giảm. Điều này làm giảm trực tiếp nguồn hình thành các sản phẩm cháy chứa cacbon, trong đó có CO. Thứ hai, hydro có tốc độ lan truyền ngọn lửa cao và khả năng khuếch tán lớn, giúp cải thiện quá trình hòa trộn và oxy hóa trong buồng cháy. Nhờ đó, quá trình chuyển hóa CO thành CO_2 diễn ra thuận lợi hơn, làm giảm lượng CO còn lại trong khí thải [8].



Hình 3. Ảnh hưởng của tỷ lệ năng lượng hydro đến phát thải CO

Kết quả cũng cho thấy hiệu quả giảm CO rõ rệt hơn ở các mức HES cao. Tuy nhiên, việc tăng tỷ lệ hydro cần được xem xét đồng thời với phát thải NOx, vì hydro có thể làm tăng nhiệt độ cháy cục bộ và dẫn đến tăng NOx. Do đó, xét riêng về CO, HES12 cho hiệu

quả giảm phát thải lớn nhất, nhưng xét tổng thể các thành phần phát thải, mức HES phù hợp cần được lựa chọn dựa trên sự cân bằng giữa giảm CO và kiểm soát NOx.

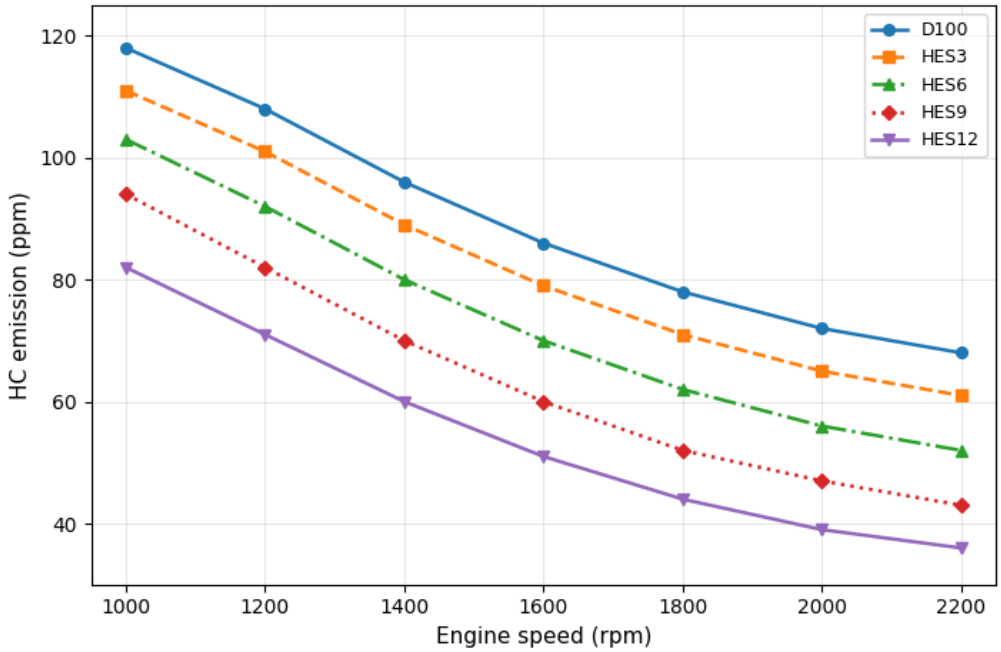
Như vậy, bổ sung hydro theo tỷ lệ năng lượng là giải pháp hiệu quả để giảm phát thải CO của động cơ diesel D243. Xu hướng giảm CO theo cả tốc độ động cơ và tỷ lệ hydro phản ánh vai trò tích cực của hydro trong việc cải thiện quá trình cháy và giảm các sản phẩm cháy không hoàn toàn.

3.3. Phát thải HC

Hình 4 trình bày sự thay đổi phát thải HC của động cơ diesel D243 khi bổ sung hydro theo các tỷ lệ năng lượng khác nhau trong dải tốc độ từ 1.000 đến 2.200 vòng/phút ở chế độ toàn tải. Kết quả cho thấy phát thải HC giảm khi tốc độ động cơ tăng và tiếp tục giảm khi tỷ lệ năng lượng hydro tăng. Đối với diesel nguyên chất, HC giảm từ 118 ppm tại 1.000 vòng/phút xuống còn 68 ppm tại 2.200 vòng/phút. Khi bổ sung hydro, mức phát thải HC giảm rõ rệt hơn, đặc biệt ở các trường hợp HES9 và HES12.

Tại tốc độ định mức 2.200 vòng/phút, phát thải HC của các trường hợp D100, HES3, HES6, HES9 và HES12 lần lượt đạt 68 ppm, 61 ppm, 52 ppm, 43 ppm và 36 ppm. So với diesel nguyên chất, HC giảm khoảng 10,3% đối với HES3, 23,5% đối với HES6, 36,8% đối với HES9 và 47,1% đối với HES12. Kết quả này cho thấy việc bổ sung hydro có hiệu quả rõ rệt trong việc hạn chế phát thải hydrocarbon chưa cháy của động cơ D243.

Nguyên nhân chính là do hydro không chứa cacbon, vì vậy khi một phần năng lượng diesel được thay thế bằng hydro, lượng nhiên liệu diesel phun vào xy-lanh giảm, làm giảm nguồn hình thành HC. Ngoài ra, hydro có tốc độ khuếch tán và tốc độ lan truyền ngọn lửa cao, giúp tăng khả năng lan truyền vùng cháy và cải thiện quá trình oxy hóa các phần nhiên liệu chưa cháy hết trong buồng cháy. Nhờ đó, lượng hydrocarbon chưa cháy thoát ra theo khí thải giảm [10].



Hình 4. Ảnh hưởng của tỷ lệ năng lượng hydro đến phát thải HC

Xét riêng về phát thải HC, HES12 cho hiệu quả giảm lớn nhất trong toàn bộ dải tốc độ khảo sát. Tuy nhiên, tương tự như trường hợp CO, việc lựa chọn tỷ lệ hydro tối ưu không nên chỉ dựa trên HC mà cần xem xét đồng thời với NOx. Mức HES cao giúp giảm HC mạnh nhưng có thể làm tăng nhiệt độ cháy và phát thải NOx. Do đó, HES6 hoặc

HES9 có thể được xem là các vùng bổ sung hydro có tiềm năng cân bằng hơn giữa giảm phát thải chứa cacbon và hạn chế gia tăng NOx.

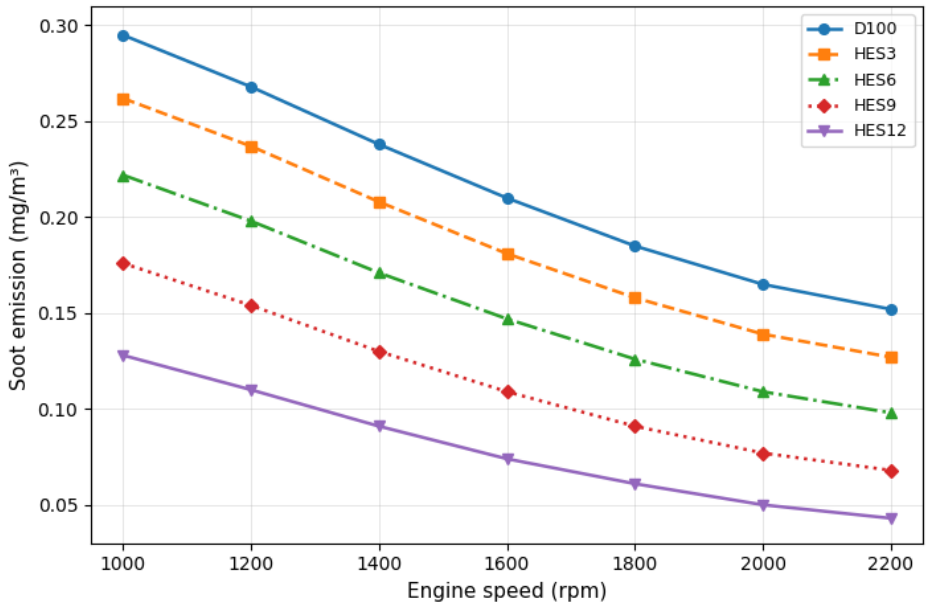
Như vậy, kết quả mô phỏng cho thấy bổ sung hydro theo tỷ lệ năng lượng là giải pháp hiệu quả để giảm phát thải HC của động cơ diesel D243. Xu hướng giảm HC phản ánh vai trò tích cực của hydro trong việc cải thiện quá trình cháy và giảm lượng nhiên liệu diesel chưa cháy hoàn toàn.

3.4. Phát thải soot

Hình 5 trình bày sự thay đổi phát thải soot của động cơ diesel D243 khi bổ sung hydro theo các tỷ lệ năng lượng khác nhau trong dải tốc độ từ 1.000 đến 2.200 vòng/phút ở chế độ toàn tải. Kết quả cho thấy soot giảm khi tốc độ động cơ tăng và giảm mạnh hơn khi tỷ lệ năng lượng hydro tăng. Đối với diesel nguyên chất, soot giảm từ 0,295 mg/m³ tại 1.000 vòng/phút xuống còn 0,152 mg/m³ tại 2.200 vòng/phút. Khi bổ sung hydro, mức phát thải soot giảm rõ rệt ở toàn bộ dải tốc độ khảo sát.

Tại tốc độ định mức 2.200 vòng/phút, soot của các trường hợp D100, HES3, HES6, HES9 và HES12 lần lượt đạt 0,152 mg/m³, 0,127 mg/m³, 0,098 mg/m³, 0,068 mg/m³ và 0,043 mg/m³. So với diesel nguyên chất, soot giảm khoảng 16,4% đối với HES3, 35,5% đối với HES6, 55,3% đối với HES9 và 71,7% đối với HES12. Đây là mức giảm lớn hơn so với CO và HC, cho thấy soot là thành phần phát thải chịu ảnh hưởng rất mạnh bởi sự thay thế một phần năng lượng diesel bằng hydro.

Sự suy giảm soot khi tăng tỷ lệ hydro có thể được giải thích bởi 3 nguyên nhân chính. Thứ nhất, hydro là nhiên liệu không chứa cacbon nên không trực tiếp tham gia vào quá trình hình thành hạt muội. Khi tỷ lệ năng lượng hydro tăng, lượng diesel phun vào buồng cháy giảm, làm giảm nguồn cacbon tham gia vào quá trình hình thành nhân soot [6, 8]. Thứ hai, hydro có khả năng khuếch tán nhanh và tốc độ cháy cao, giúp cải thiện quá trình lan truyền cháy và tăng khả năng oxy hóa soot trong giai đoạn cháy khuếch tán. Thứ ba, việc giảm lượng diesel làm giảm các vùng hỗn hợp giàu nhiên liệu cục bộ, vốn là điều kiện thuận lợi cho sự hình thành soot trong động cơ diesel phun trực tiếp.



Hình 5. Ảnh hưởng của tỷ lệ năng lượng hydro đến phát thải soot

Xét riêng về khả năng giảm soot, HES12 cho hiệu quả cao nhất trong các trường hợp khảo sát. Tuy nhiên, kết quả cần được đánh giá đồng thời với phát thải NOx, vì mức bổ sung hydro cao có thể làm tăng nhiệt độ cháy cục bộ và thúc đẩy hình thành NOx. Do

đó, mặc dù HES12 có lợi thế lớn về giảm soot, mức HES6 hoặc HES9 có thể phù hợp hơn khi cần cân bằng giữa giảm phát thải hạt muội và hạn chế sự gia tăng NOx.

Như vậy, bổ sung hydro theo tỷ lệ năng lượng là giải pháp có hiệu quả rõ rệt trong giảm phát thải soot của động cơ diesel D243. Kết quả này khẳng định vai trò của hydro trong việc giảm các phát thải có nguồn gốc cacbon, đặc biệt là phát thải dạng hạt, vốn là một trong những vấn đề đặc trưng của động cơ diesel.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã sử dụng phần mềm AVL BOOST để mô phỏng ảnh hưởng của tỷ lệ năng lượng hydro (3%, 6%, 9% và 12%) đến đặc tính phát thải của động cơ diesel D243 trong dải tốc độ 1.000 - 2.200 vòng/phút ở chế độ toàn tải. Kết quả cho thấy phát thải NOx tăng theo tỷ lệ năng lượng hydro và tốc độ động cơ do nhiệt độ cháy và tốc độ giải phóng nhiệt tăng. Ngược lại, phát thải CO, HC và soot đều giảm đáng kể nhờ lượng nhiên liệu diesel tiêu thụ giảm và quá trình cháy được cải thiện. Tại tốc độ định mức 2.200 vòng/phút, trường hợp HES12 làm giảm 45,1% CO, 47,1% HC và 71,7% soot so với diesel nguyên chất, trong khi NOx tăng 42,2%. Kết quả nghiên cứu cho thấy bổ sung hydro theo tỷ lệ năng lượng là giải pháp hiệu quả để giảm các phát thải chứa cacbon của động cơ diesel D243. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần kết hợp hydro với các giải pháp kiểm soát NOx như hồi lưu khí thải hoặc tối ưu thời điểm phun, đồng thời mở rộng đánh giá ở nhiều chế độ tải và kiểm chứng bằng thực nghiệm nhằm nâng cao độ tin cậy và khả năng ứng dụng của mô hình.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Heywood, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals, 2nd ed. McGraw-Hill Education, New York, 2018.

[2] Karim, G. A. Hydrogen as a Spark Ignition Engine Fuel. Academic Press, 2015.

[3] Wei, L., Yao, C., Wang, Q., Pan, W., Han, G. Combustion and emission characteristics of a turbocharged diesel engine using high premixed ratio of methanol and diesel fuel. Fuel, 140, 156-163, 2015.

[4] Wei, L., Yao, C., Han, G., Pan, W. Effects of methanol to diesel ratio and diesel injection timing on combustion, performance and emissions of a methanol port premixed diesel engine. Energy, 95, 223-232, 2016.

[5] Verhelst, S., Wallner, T.Hydrogen-fueled internal combustion engines. Progress in Energy and Combustion Science, 35, 490-527, 2009.

[6] Dimitriou, P., Tsujimura, T. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. International Journal of Hydrogen Energy, 42, 24470-24486, 2017.

[7] Saravanan, N., Nagarajan, G. An experimental investigation on hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system. International Journal of Hydrogen Energy, 33, 1769-1775, 2008.

[8] Bora, B. J., Saha, U. K. Experimental evaluation of a diesel engine with hydrogen enrichment. Renewable Energy, 74, 614-624, 2015.

[9] AVL List GmbH. AVL BOOST Theory Manual. AVL List GmbH, Graz, Austria, 2015.

[10] Wang, Y., Li, Z., Zhen, X., Wang, C. Performance and emission characteristics of a marine diesel engine fueled with hydrogen-diesel dual fuel: A numerical investigation. Fuel, 2024.