

ẢNH HƯỞNG CỦA NHIÊN LIỆU HYDRO TỚI QUÁ TRÌNH CHÁY VÀ HÌNH THÀNH PHÁT THẢI CỦA ĐỘNG CƠ DIESEL

Trịnh Xuân Phong^{1,2}, Hoàng Đình Long¹, Nguyễn Đức Khánh¹

Tóm tắt: Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu mô phỏng đánh giá ảnh hưởng của nhiên liệu hydro đến áp suất cực đại trong buồng đốt và sự hình thành phát thải của động cơ diesel sử dụng phần mềm AVL Boost. Đối tượng nghiên cứu là động cơ diesel máy nông nghiệp R180. Quá trình mô phỏng được thực hiện bằng cách thay thế diesel bằng hydro với tỉ lệ tăng dần từ 5%, 10%, 20% và 30% tổng năng lượng cung cấp. Kết quả cho thấy rằng khi bổ sung hydro trên đường ống nạp với tỉ lệ nhỏ hơn 20%, áp suất quá trình cháy tăng lên, phát thải Soot giảm mạnh nhưng phát thải NO_x tăng. Tuy nhiên, nếu bổ sung hydro lớn hơn 30%, áp suất quá trình cháy giảm, tốc độ hình thành NO_x giảm, phát thải Soot tăng.

Từ khóa: Động cơ lưỡng nhiên liệu, bổ sung hydro, giảm phát thải, phát thải NO_x, phát thải Soot, đặc tính cháy và phát thải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, động cơ diesel là loại động cơ không thể thay thế trên các phương tiện giao thông vận tải đặc chủng, máy phát điện... do tính tiết kiệm nhiên liệu, độ tin cậy và độ bền bỉ, tuy nhiên động cơ diesel lại phát thải nhiều các chất độc hại như NO_x và khói bụi (PM) (Agrawal, June 2004). Theo một thống kê thì lượng khí thải độc hại của động cơ diesel chiếm tỉ trọng lớn của phát thải trên thế giới, cụ thể là NO_x 60%, PM 10% và CO 30% (OECD (2016)). Với sự gia tăng ngày càng lớn của động cơ diesel, đây là sự đe dọa với môi trường bởi vì sự phát thải độc hại của nó và nguy cơ cạn kiệt nguồn nhiên liệu hóa thạch toàn cầu. Điều này dẫn đến thúc đẩy việc phải tìm ra các nguồn nhiên liệu thay thế để đảm bảo phát triển bền vững. Các nhà khoa học đã và đang nghiên cứu rộng rãi về các lĩnh vực như: khí tự nhiên, hydro, nhiên liệu sinh học, điện, thu hồi nhiệt khí thải... để hạn chế phát thải. Việc ứng dụng hydro cho động cơ diesel được nghiên cứu nhiều trong những năm gần đây. Hydro được xem như là một nguồn nhiên liệu thay thế

đầy tiềm năng vì phát thải không ô nhiễm, vô hạn trong tự nhiên. Tuy nhiên việc sử dụng nhiên liệu hydro như một loại nhiên liệu chính còn nhiều bất cập vì thế việc sử dụng nhiên liệu hydro như là một loại nhiên liệu bổ sung hỗ trợ cho nhiên liệu chính là một cách tiếp cận thực tế nhất đối với nhiều nhà khoa học (Sharma & Dhar, 2018). Đặc tính của 2 loại nhiên liệu này bổ sung cho nhau khắc phục nhược điểm của nhau. Hydro được phun vào đường ống nạp và hòa trộn với không khí sạch làm cho hỗn hợp không khí đồng nhất nhờ sự khuếch tán của nó, diesel phun vào buồng đốt sẽ tự cháy và trở thành nguồn lửa để đốt cháy hỗn hợp hòa khí diesel-hydro giúp quá trình cháy của nhiên liệu diesel triệt để hơn.

Cung cấp hydro trên đường ống nạp cho động cơ diesel sẽ ảnh hưởng đến công suất động cơ. Dễ dàng nhận thấy rằng thể tích khí nạp sẽ bị giảm do hydro chiếm chỗ của không khí nạp. Sharma (Sharma & Dhar, 2018) và Edwin (Edwin Geo, Nagarajan, & Nagalingam, 2008) cho thấy có sự sụt giảm 6% lượng không khí nạp ở trường hợp 13,4% nhiên liệu hydro thay thế. Nhiều nhà nghiên cứu khác cũng khẳng định sự giảm không khí nạp khi thay thế hydro cho diesel (Haragopala

¹ Viện Cơ khí Động lực, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

² Khoa Cơ khí, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định

Rao, Shrivastava, & Bhakta, 1983; Liew et al., 2012; Masood, Mehdi, & Ram Reddy, 2007). Tỷ lệ phần trăm sụt giảm phụ thuộc vào loại động cơ và các thông số làm việc. Tuy nhiên đối với hiệu quả nhiệt, có sự không đồng nhất trong các kết quả nghiên cứu. Lata cho biết hiệu suất giảm 2,2% với sự thay thế hydro 9% ở tải thấp của động cơ diesel 62,5 HP ở 1500 v/p (Lata & Misra, 2010). Sharma cũng nhận thấy sự giảm hiệu suất ở tất cả các công trình nghiên cứu của mình (Sharma & Dhar, 2018). Trong khi đó Edwin cho biết hiệu suất có ích tăng khi ở 75% và 100% tải (Edwin Geo et al., 2008) khi sử dụng hydro thay thế diesel. Hiệu suất nhiệt tăng 2% với 10% hydro thay thế.

Trong nghiên cứu này, trình bày ảnh hưởng của việc thay thế một phần nhiên liệu diesel bằng nhiên liệu hydro được bổ sung trên đường ống nạp bằng phương pháp mô hình mô phỏng trên quan điểm tổng năng lượng cung cấp không đổi. Một số ký hiệu trên bài báo có nghĩa như sau: HES (hydrogen energy share) là tỷ lệ hydro thay thế diesel; H10 có nghĩa là tỷ lệ hydro thay thế là 10% tổng năng lượng cung cấp, E0H0 là động cơ thuần nhiên liệu diesel.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Trình tự nghiên cứu

1. Tiến hành thực nghiệm xây dựng đặc tính của động cơ (đặc tính ngoài và đặc tính bộ phận tại 1500 v/p)
2. Xây dựng mô hình mô phỏng trên AVL Boost
3. Đánh giá độ tin cậy của mô hình
4. Mô phỏng động cơ sử dụng lưỡng nhiên liệu diesel-hydro
5. Đánh giá kết quả và mô phỏng các tỉ lệ hydro thay thế lớn hơn, để đánh giá sự ảnh hưởng của tỉ lệ hydro thay thế đến diễn biến áp suất và hình thành phát thải trong buồng đốt.

Quá trình nghiên cứu thực nghiệm được diễn ra tại Trung tâm nghiên cứu động cơ, nhiên liệu và khí thải, Viện Cơ khí Động lực, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

2.2. Trang thiết bị thử nghiệm

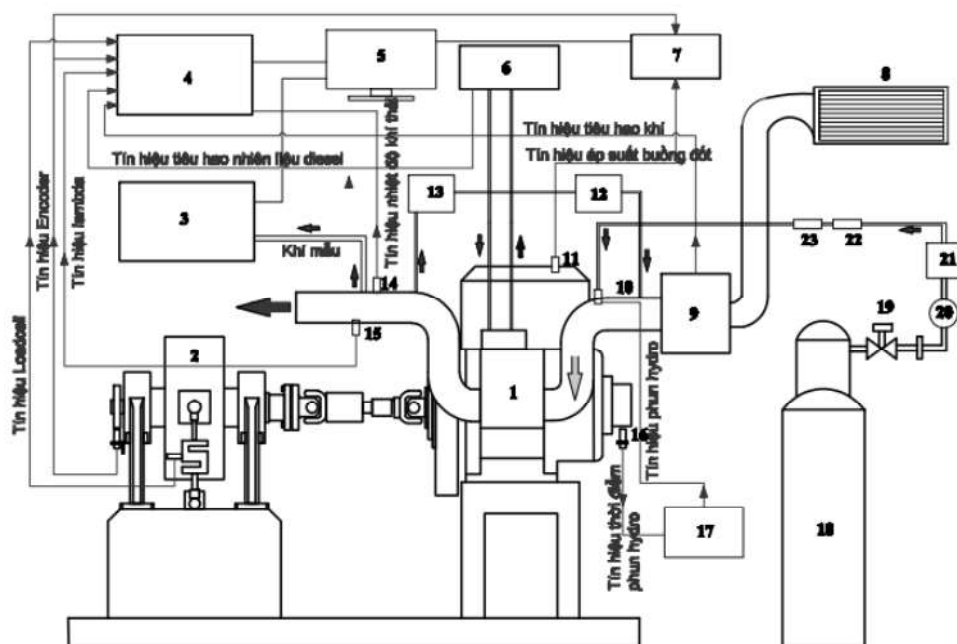
Sơ đồ bố trí nghiên cứu thử nghiệm được trình bày ở hình 1. Thông số kỹ thuật cơ bản của động cơ sử dụng trong nghiên cứu này được trình bày ở bảng 1.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật động cơ nghiên cứu

Thông số kỹ thuật	Giá trị	Đơn vị
Hành trình pít-tông	80	mm
Đường kính xi-lanh	80	mm
Dung tích công tác	0,402	Lít
Công suất cực đại	5,17 tại 2600 v/p	kW
Tỷ số nén	21	
Suất tiêu hao nhiên liệu g _c	278	g/kW.h

Trong thí nghiệm này các trang thiết bị thí nghiệm bao gồm: phanh điện động cơ DW-16, thiết bị đo áp suất buồng đốt AVL 620 Indiset, thiết bị đo tiêu hao không khí Hot-Film-Air-Mass meter (HFM5), thiết bị đo tiêu hao nhiên liệu AVL Fuel Balance 733S; thiết bị đo tiêu hao nhiên liệu hydro GFC mass flow, thiết bị đo lambda, tủ phân tích khí

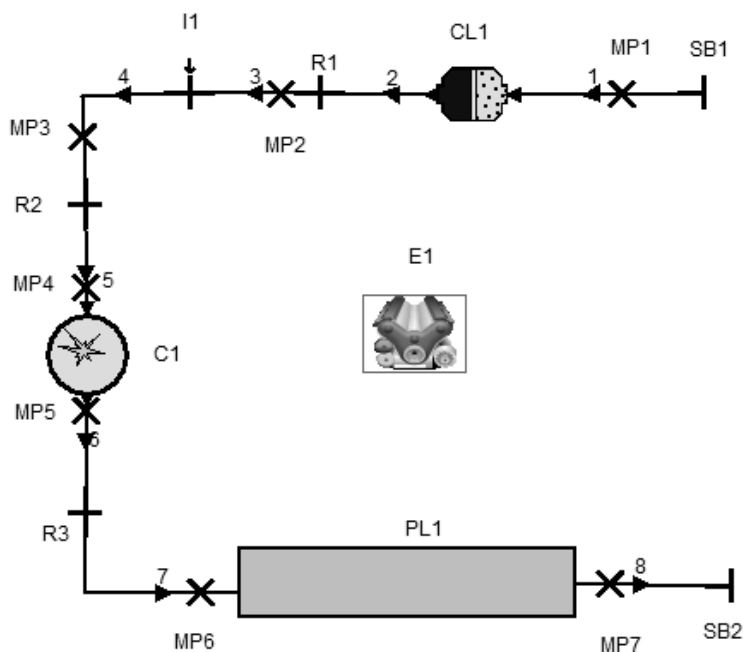
thải CEB-II, thiết bị đo độ khói AVL dismoke 4000. AVL Digas 4000 để đo lượng phát thải CO và THC bằng phương pháp hồng ngoại trong khi phát thải NO_x đạt được bằng phương pháp điện hóa. Mặt khác, các giá trị phát thải CO thu được là trên cơ sở % khối lượng trong khi các giá trị phát thải NO_x và THC thu được được tính theo ppm,



Hình 1. Sơ đồ bảng thử phục vụ thử nghiệm

1. Động cơ thử nghiệm; 2. Bộ thử công suất; 3. Thiết bị phân tích khí thải; 4. Bộ thu thập dữ liệu. 5. Màn hình hiển thị; 6. Cảm biến đo tiêu hao nhiên liệu diesel; 7. Thiết bị đo áp suất buồng đốt; 8. Lọc khí; 9. Cảm biến lưu lượng khí nạp; 10. Vòi phun hydro; 11. Cảm biến đo áp suất buồng đốt; 12. Van EGR; 13. Bộ làm mát khí luân hồi; 14. Cảm biến nhiệt độ khí thải; 15. Cảm biến lambda; 16. Cảm biến thời điểm phun hydro; 17. ECU điều khiển vòi phun hydro; 18. Bình hydro; 19. Van khóa cơ khí. 20. Bộ giảm áp; 21. Cảm biến lưu lượng hydro; 22. Van 1 chiều; 23. Van chống cháy ngược

2.3. Xây dựng mô hình mô phỏng



Hình 2. Mô hình mô phỏng động cơ lưỡng nhiên liệu trên AVL Boost

SB1,2 là điều kiện biên; CL là bầu lọc, I1 là vòi phun hydro;
C1 là xi-lanh; PL1 là bình ổn áp; E1 là động cơ; R1 phần tử cản ; MP là các điểm đo

Động cơ R180 được mô hình hóa trên phần mềm AVL Boost dựa trên các thông số kết cấu cơ bản của động cơ như được thể hiện trên hình 2. Mô hình cho quá trình cháy của động cơ lưỡng nhiên liệu là mô hình cháy AVL MCC. Mô hình này có thể sử dụng cho nhiên liệu diesel hoặc đa nhiên liệu giữa diesel và một loại nhiên liệu khác. Mô hình có khả năng dự đoán tốc độ giải phóng nhiệt trong động cơ hình thành hỗn hợp không đồng nhất, sự ảnh hưởng quá trình luân hồi và dự đoán được sự hình thành NO_x, CO và soot (Boost, 2011).

Hệ số dư lượng không khí lambda trong trường hợp sử dụng lưỡng nhiên liệu được xác định như sau:

$$\lambda = \frac{m_i}{m_D \left(\frac{A}{F}\right)_D + m_H \left(\frac{A}{F}\right)_H} \quad (1)$$

Trong đó: m_i , m_D và m_H lần lượt là lượng không khí nạp, lượng nhiên liệu diesel và lượng nhiên liệu khí hydro cung cấp; $(A/F)_D$ và $(A/F)_H$ là tỷ lệ không khí/nhiên liệu lý thuyết của diesel và hydro, $(A/F)_D = 14,5$ (kgkk/kgnl) và $(A/F)_H \approx 34,5$ (kgkk/kgnl)

$$\text{Tỉ lệ hydro thay thế} = \frac{m_{Dtt}}{m_{Dbd}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Lượng hydro thay thế} = m_{Dtt} \times \frac{LHV_D}{LHV_H} = m_{Dtt} \times \frac{42,8}{119,7} \quad (3)$$

Trong đó m_{Dtt} là lượng diesel bị thay thế, m_{Dbd} là lượng diesel ban đầu, LHV_D và LHV_H là nhiệt trị

thấp của diesel và hydro (MJ/kg). $LHV_D = 42,8$ (MJ/kg) và $LHV_H = 119,7$ (MJ/kg);

Trong trường hợp sử dụng lưỡng nhiên liệu, tính năng kinh tế của động cơ được đánh giá bằng suất tiêu hao năng lượng có ích BSEC (Brake Specific Energy Consumption) xác định theo công thức

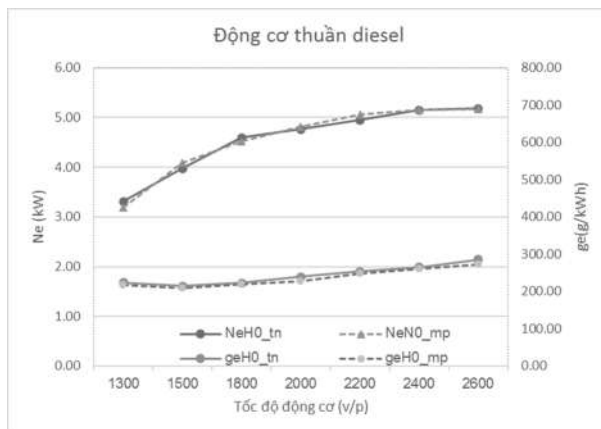
$$BSEC = \frac{m_D LHV_D + m_H LHV_H}{BP} \quad (4)$$

Trong đó BP (Brake Power) là công suất có ích của động cơ

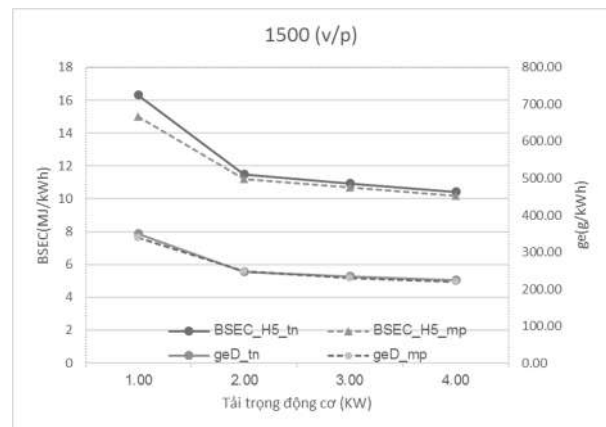
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đánh giá độ tin cậy của mô hình

Độ tin cậy của mô hình được đánh giá bằng cách so sánh kết quả thực nghiệm và mô phỏng ở một số chế độ làm việc điển hình của động cơ. Hình 3 trình bày diễn biến công suất và suất tiêu hao nhiên liệu tại đặc tính ngoài của động cơ thuần diesel khi thực nghiệm và mô phỏng. Hình 4 trình bày suất tiêu hao nhiên liệu của động cơ thuần diesel và tiêu hao năng lượng của động cơ lưỡng nhiên liệu (thay thế 5% tổng năng lượng cung cấp) tại tốc độ 1500 v/p. Kết quả cho thấy sai số giữa thực nghiệm và mô phỏng nhỏ hơn 5%. Vì vậy, kết quả mô phỏng từ mô hình này có thể được sử dụng làm số liệu tham chiếu khi nghiên cứu ảnh hưởng của các tỉ lệ hydro thay thế khác nhau.



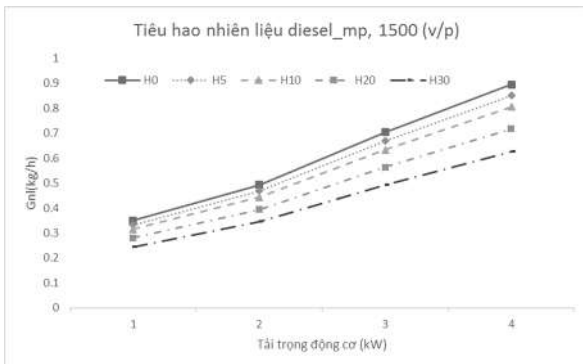
Hình 3. Đồ thị đánh giá độ tin cậy của mô hình thuần diesel ở toàn tải



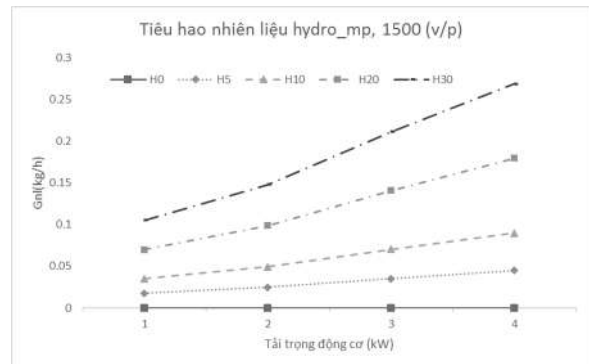
Hình 4. Đồ thị đánh giá độ tin cậy của mô hình khi HES 5% ở tốc độ 1500 v/p

3.2. Lượng nhiên liệu cung cấp với các tỉ lệ thay thế khác nhau khi mô phỏng

Hình 5 và hình 6 trình bày về lượng tiêu hao nhiên liệu diesel và lượng tiêu hao hydro



Hình 5. Đồ thị tiêu hao nhiên liệu diesel khi mô phỏng

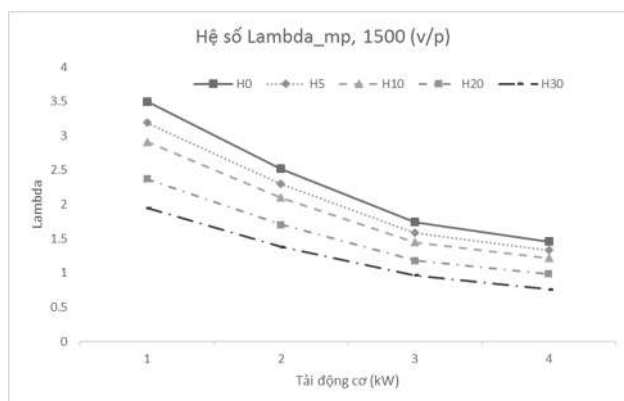


Hình 6. Đồ thị tiêu hao nhiên liệu hydro khi mô phỏng

Ảnh hưởng của hydro đến tính năng làm việc và phát thải của động cơ được đánh giá qua diễn biến áp suất xi-lanh, hệ số lambda, tốc độ hình thành phát thải Soot và NO_x .

3.3. Ảnh hưởng của HES tới hệ số lambda

Hình 7 trình bày ảnh hưởng của HES tới lambda của động cơ diesel. Có thể thấy rằng tại tốc độ 1500 v/p khi tải trọng tăng thì lambda giảm. Nếu thay thế hydro bằng diesel, lượng hydro chiếm chỗ không khí nạp dẫn tới lambda tiếp tục giảm. Lambda giảm mạnh khi lượng hydro thay thế càng nhiều. Việc chỉ nạp được ít ô-xy vào trong buồng đốt dẫn tới không đủ không khí để đốt diesel và hydro, do đó ảnh hưởng tới đặc tính cháy và phát thải của động cơ diesel.



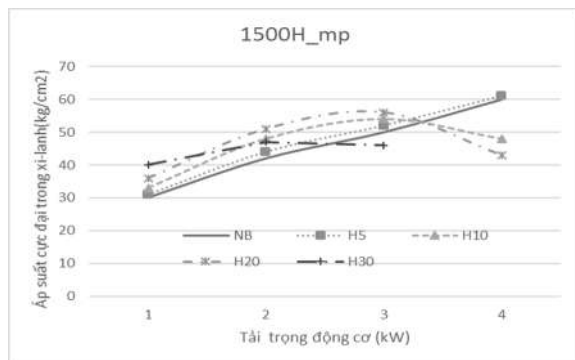
Hình 7. Ảnh hưởng của HES tới hệ số lambda

nhập vào mô hình AVL Boost ở tốc độ 1500 v/p với các tải trọng khác nhau. Các thông số nhập vào đảm bảo không đổi về tổng năng lượng cung cấp.

3.4. Ảnh hưởng của HES tới áp suất trong xi-lanh

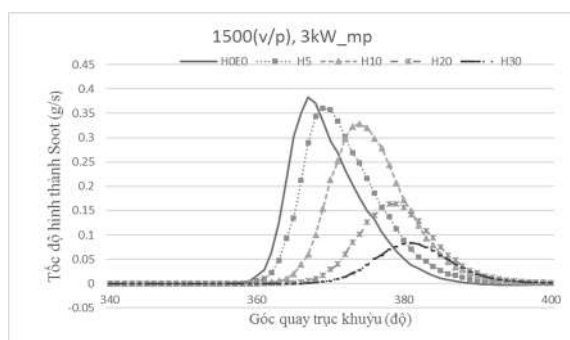
Hình 8 trình bày diễn biến áp suất trong xi-lanh khi bổ sung hydro cho động cơ diesel ở tốc độ 1500 v/p với tải trọng thay đổi. Có thể thấy rằng ở 1kW áp suất buồng đốt gia tăng tỉ lệ với việc gia tăng HES. Nhưng đối với tải trọng 2kW và 3kW thì áp suất buồng đốt chỉ tăng khi HES nhỏ hơn 20%, tại H30 thì áp suất buồng có xu hướng giảm. Tại tải 4kW thì áp suất buồng đốt chỉ tăng với HES nhỏ hơn 5%, còn nếu thay thế lớn hơn 5% thì áp suất giảm mạnh.

Điều này có thể giải thích là do nhiệt trị và tốc độ cháy của hydro lớn hơn nhiều so với diesel nên năng lượng cung cấp sẽ lớn hơn, ngoài ra việc có hydro sẽ làm cho hòa khí trong nhiên liệu đồng đều hơn dẫn tới quá trình cháy triệt để hơn. Nhưng nếu bổ sung hydro quá nhiều thì lượng diesel sẽ giảm đi, lượng ô-xy nạp vào buồng đốt giảm do hydro chiếm chỗ. Điều này dẫn tới sự cháy không hoàn hảo hoặc không tạo ra được môi lửa để đốt cháy nhiên liệu. Nếu diesel không thể cháy hoặc cháy sai thời điểm, cháy không hoàn toàn sẽ ảnh hưởng tới áp suất trong buồng đốt của động cơ.



Hình 8. Ảnh hưởng của HES tới áp suất cực đại trong xi-lanh

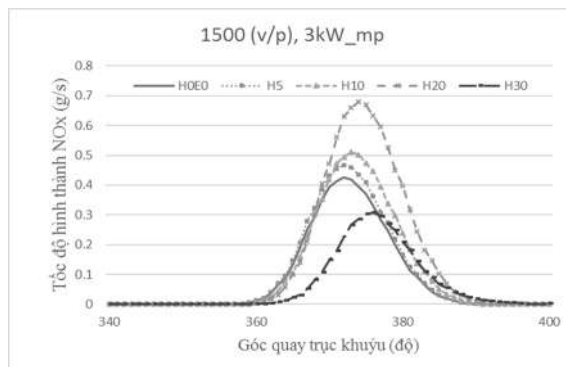
3.5. Ảnh hưởng của HES tới tốc độ hình thành phát thải Soot và Nox



Hình 9. Ảnh hưởng của HES tới tốc độ hình thành soot

Hình 9 trình bày ảnh hưởng của HES tới sự hình thành soot tại tốc độ 1500 v/p và tải trọng 3kW. Nhiệt độ cao và thiếu hụt ô-xy là hai yếu tố chính dẫn đến sự hình thành Soot của động cơ thuần diesel nhưng khi bổ sung hydro thì soot lại giảm. Điều này có thể giải thích bởi các lý do sau đây. Thứ nhất, phát thải Soot chủ yếu đến từ sự đốt cháy không hoàn toàn của nhiên liệu diesel, việc thay thế nhiên liệu diesel bằng hydro sẽ dẫn làm giảm hàm lượng các-bon trong tổng khối lượng nhiên liệu tham gia vào quá trình cháy. Thứ hai, việc bổ sung hydro đã cải thiện quá trình đốt cháy khuếch tán của nhiên liệu diesel. Khi hydro thêm vào xi-lanh, nó làm thời điểm bốc cháy muộn hơn và tạo thành hỗn hợp không khí diesel đồng nhất hơn ở một mức độ nhất định. Vì vậy, khi quá trình cháy bắt đầu, hydro lan truyền nhanh chóng và thúc đẩy quá trình đốt cháy khuếch tán của động cơ diesel để giảm phát thải soot. Thứ ba, sự lan truyền nhanh chóng của ngọn lửa hydro đã

đẩy nhanh quá trình ô-xy hóa soot. Tất cả các yếu tố trên đã cải thiện quá trình cháy của động cơ, nhờ đó phát thải soot giảm đáng kể.



Hình 10. Ảnh hưởng của HES tới tốc độ hình thành Nox

Hydro có tác dụng giảm soot mạnh khi tham gia vào quá trình cháy của động cơ diesel nhưng nó lại làm tăng hàm lượng NO_x . Hình 10 cho thấy sự thay đổi của NO_x theo tỉ lệ hydro bổ sung. Tốc độ hình thành NO_x tăng lên cùng với sự gia tăng HES đạt giá trị lớn nhất với HES là 20%. Với HES30, tốc độ hình thành phát thải NO_x giảm mạnh. Những thay đổi của NO_x khi có HES có thể giải thích từ các điều kiện hình thành NO_x . Khi hàm lượng HES hợp lý thì nhờ đặc tính cháy nhanh của hydro làm thời gian cháy ngắn lại, áp suất và nhiệt độ tăng cao dẫn tới gia tăng sự hình thành NO_x . Nhưng với HES quá lớn (30%), lượng diesel được cung cấp vào xi-lanh sẽ giảm đáng kể sẽ ảnh hưởng tới quá trình cháy: thời điểm cháy muộn đi, nhiệt độ giảm xuống, áp suất giảm xuống. Mặc dù nồng độ ô-xy tăng, khí thải NO_x vẫn giảm. Ở tỉ lệ này áp suất buồng đốt giảm và phát thải Soot tăng do nhiên liệu diesel không cháy hết.

4. KẾT LUẬN

Ảnh hưởng của việc thay thế nhiên liệu diesel bằng hydro tới đặc tính cháy và phát thải của động cơ diesel đã được nghiên cứu. Các thông số nghiên cứu là tỉ lệ hydro bổ sung, áp suất cực đại trong buồng cháy, tốc độ hình thành phát thải NO_x và Soot ở tốc độ 1500 v/p, tải trọng 3kW.

Việc bổ sung hydro vào động cơ diesel có ảnh hưởng đến sự hình thành hỗn hợp, đặc tính cháy và phát thải của động cơ diesel. Áp suất buồng đốt

tăng và tốc độ hình thành Soot giảm mạnh mặc dù tốc độ hình thành NO_x tăng khi bổ sung hydro với tỉ lệ nhỏ hơn 20%. Soot là một loại phát thải độc hại vô cùng khó xử lý và tốn kém. Vì thế việc bổ sung hydro trên đường ống nạp cho động cơ diesel

là xu hướng đầy tiềm năng trong việc giảm phát thải loại chất thải độc hại này cho động cơ đốt trong. Việc phát thải NO_x gia tăng khi bổ sung hydro có thể dùng biện pháp luân hồi khí thải để xử lý.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Agrawal, A. K. (June 2004). *Effect of EGR on the exhaust gas temperature and opacity in compression ignition engines*. Indian Institute of Technology, 29, 275-284, part 273.
- Boost, A. (2011). *AVL Boost Combustion Model*. Austria.
- Edwin Geo, V., Nagarajan, G., & Nagalingam, B. (2008). *Studies on dual fuel operation of rubber seed oil and its bio-diesel with hydrogen as the inducted fuel*. International Journal of Hydrogen Energy, 33(21), 6357-6367. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.021>
- Haragopala Rao, B., Shrivastava, K. N., & Bhakta, H. N. (1983). *Hydrogen for dual fuel engine operation*. International Journal of Hydrogen Energy, 8(5), 381-384. doi: [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(83\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0360-3199(83)90054-X)
- Lata, D., & Misra, A. (2010). *Theoretical and experimental investigations on the performance of dual fuel diesel engine with hydrogen and LPG as secondary fuels*. International Journal of Hydrogen Energy, 35(21), 11918-11931.
- Liew, C., Li, H., Gatts, T., Liu, S., Xu, S., Rapp, B., . . . Huang, Y. (2012). *An experimental investigation of exhaust emissions of a 1999 Cummins ISM370 diesel engine supplemented with H₂*. International Journal of Engine Research, 13(2), 116-129. doi: 10.1177/1468087411435049
- Masood, M., Mehdi, S., & Ram Reddy, P. (2007). *Experimental investigations on a hydrogen-diesel dual fuel engine at different compression ratios*.
- OECD, I. (2016). *Energy and Air Pollution: World Energy Outlook Special Report 2016*.
- Sharma, P., & Dhar, A. (2018). *Effect of hydrogen supplementation on engine performance and emissions*. International Journal of Hydrogen Energy, 43(15), 7570-7580. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.181

Abstract:

INFLUENCE OF HYDROGEN ON COMBUSTION AND EMISSION FORMATION CHARACTERISTIC OF DIESEL ENGINE

This paper presents the simulation results on the effects of hydrogen on combustion characteristics and emission formation of a diesel engine using AVL Boost software. The research was conducted on an agriculture diesel engine R180. Hydrogen was supplied into the intake manifold of the engine by the percentage of 5%, 10%, 20% and 30%. The results show that when adding hydrogen into the intake manifold at a reasonable rate, the combustion process improved as in cylinder pressure increased. The Soot emissions reduced sharply but NO_x emissions increased. However, if hydrogen was supplied too much, the in cylinder pressure decreased, and as a result, NO_x formation rate decreased when Soot emissions increased due to imperfect combustion process.

Keywords: Dual fuel engine, hydrogen addition, reduce emissions, NO_x emission, Soot emission, combustion and emission characteristic

Ngày nhận bài: 03/2/2021

Ngày chấp nhận đăng: 31/3/2021