

TỔNG QUAN VỀ ĐỘNG CƠ ĐỐT TRONG SỬ DỤNG NHIÊN LIỆU HYDRO: NHỮNG TIẾN BỘ GẦN ĐÂY VÀ TRIỂN VỌNG TƯƠNG LAI

AN OVERVIEW OF HYDROGEN-FUELED INTERNAL COMBUSTION ENGINES: RECENT PROGRESS AND FUTURE PROSPECTS

Ngô Văn Thanh

Khoa Cơ khí – Ô tô và Xây dựng, Trường Đại học Điện lực

Email: thanhnv@epu.edu.vn

TÓM TẮT

Nhu cầu tiêu thụ nhiên liệu ngày càng tăng cao cùng với các quy định về phát thải ở động cơ đốt trong ngày càng nghiêm ngặt, nhiên liệu hydro nổi lên như là một giải pháp thay thế nhiên liệu hóa thạch không phát thải carbon. Bài báo này đánh giá tổng quan về những nghiên cứu ứng dụng nhiên liệu hydro cho động cơ đốt trong những năm gần đây. Chỉ ra các đặc tính hóa học và vật lý của nhiên liệu hydro đến thiết kế động cơ đốt trong. Ảnh hưởng của phương pháp cung cấp nhiên liệu hydro đến hoạt động của động cơ hydro. Hơn nữa, bài báo cũng đánh giá về tiềm năng hiệu suất nhiệt cao và phát thải carbon gần như bằng không và giải quyết những thách thức cho sự phát thải của NO_x .

Từ khóa: Nhiên liệu hydro; Đặc tính cháy; Hiệu suất nhiệt; Phát thải.

ABSTRACT

With increasing fuel consumption and increasingly stringent regulations on emissions from internal combustion engines, hydrogen fuel has emerged as a carbon-neutral alternative to fossil fuels. This paper provides an overview of recent research on the application of hydrogen fuel in internal combustion engines. It identifies the chemical and physical properties of hydrogen fuel in relation to internal combustion engine design, and examines the impact of hydrogen fuel delivery methods on hydrogen engine performance. Furthermore, the paper evaluates the potential for high thermal efficiency and zero carbon emissions, and addresses the challenges of NO_x emissions.

Keywords: Hydrogen fuel; Combustion characteristics; Thermal efficiency; Emissions.



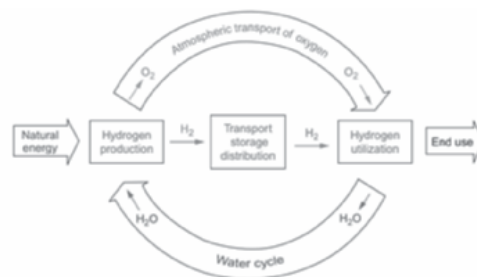
1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, nhu cầu sử dụng năng lượng ngày càng tăng cao do quá trình phát triển mạnh của công nghiệp cũng như tăng trưởng của dân số toàn cầu. Nguồn nhiên liệu chính vẫn là nhiên liệu hóa thạch từ dầu mỏ. Các phương tiện giao thông sử dụng động cơ đốt trong sử dụng nhiên liệu hóa thạch như xăng và diesel vẫn chiếm tỷ lệ lớn và là nguyên nhân gây ra phát thải độc hại với môi trường [1, 2]. Để giải quyết vấn đề này, các thỏa thuận quốc tế như Hiệp định Paris (COP21) đã thiết lập các mục tiêu nhằm hạn chế sự gia tăng nhiệt độ toàn cầu bằng cách thúc đẩy các giải pháp năng lượng trung hòa carbon. Trong bối cảnh này, hydro được coi là một trong những nguồn năng lượng thay thế đầy hứa hẹn sử dụng cho động cơ đốt trong trên các phương tiện giao thông vận tải [3]. Không giống với nhiên liệu hydrocarbon thông thường, sản phẩm chính của quá trình đốt cháy hydro là hơi nước, giúp loại bỏ các phát thải độc hại của động cơ đốt trong truyền thống như HC, CO cũng như không phát thải CO_2 , một chất khí gây hiệu ứng nhà kính [4, 5].

So với việc sử dụng pin nhiên liệu hydro, động cơ đốt trong sử dụng hydro (H2ICE – Hydrogen internal combustion engine) mang lại nhiều lợi thế hơn trong quá trình chuyển đổi năng lượng hiện nay. Công nghệ H2ICE có thể tận dụng cơ sở hạ tầng sản xuất động cơ đã phát triển và có khả năng đáp ứng được tốt hơn các tạp chất trong nhiên liệu hydro, do đó trở thành giải pháp tiết kiệm chi phí và nhanh chóng hơn cho vận tải hạng nặng và thương mại. Hơn nữa, H2ICE tránh được chi phí cao và sự phụ thuộc vào các vật liệu quý hiếm, chẳng hạn như bạch kim, liên quan đến sản xuất pin nhiên liệu [6].

Hydro có ưu điểm độc đáo là nhiên liệu có nguồn tài nguyên cơ bản có thể tái chế trong chu kỳ thời gian ngắn, như thể hiện trong Hình

1 [3]. Phân tử nước có thể được phân tách bằng cách sử dụng nhiên liệu hóa thạch hoặc nhiều nguồn phi hóa thạch như năng lượng mặt trời, gió, hạt nhân, chất thải hữu cơ và các nguồn khác. Khi đốt cháy hydro, hơi nước thoát ra từ ống xả của động cơ và nước này quay trở lại sinh quyền nơi nó xuất phát.



Hình 1. Chu trình của nhiên liệu hydro [3]

Mặc dù có những lợi ích này, các đặc tính lý hóa của hydro, chẳng hạn như năng lượng đánh lửa thấp và tốc độ lan truyền ngọn lửa cao, đòi hỏi phải có những sửa đổi cụ thể trên động cơ để ngăn ngừa quá trình cháy bất thường và kiểm soát phát thải oxit nitơ (NO_x) [7]. Bài báo này tổng hợp những tiến bộ gần đây trong công nghệ H2ICE, tập trung vào việc nâng cao hiệu suất, các giải pháp kỹ thuật cho sự ổn định quá trình đốt cháy và triển vọng tương lai của hydro sử dụng trên động cơ đốt trong.

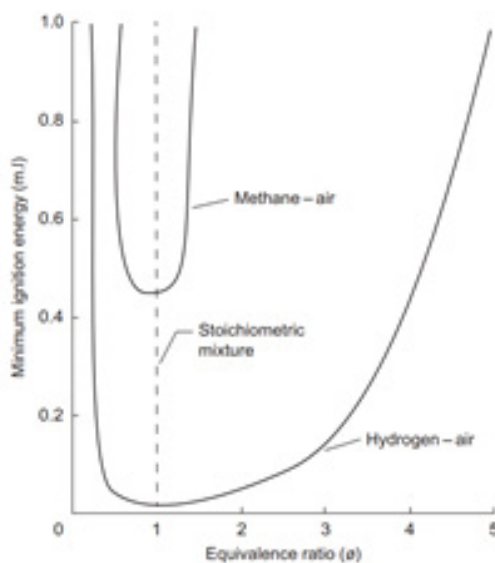
2. TÍNH CHẤT HÓA-LÝ CỦA NHIÊN LIỆU HYDRO VÀ TÁC ĐỘNG ĐẾN ĐỘNG CƠ

Nhiên liệu hydro có một số tính chất lý - hóa đặc trưng khác với nhiên liệu truyền thống xăng và diesel ở một số điểm sau:

Giới hạn khả năng cháy rộng [1, 8]: Phạm vi khả năng cháy của hydro (4% đến 75% theo thể tích trong không khí) rộng hơn đáng kể so với xăng (1,2% đến 6%). Điều này cho phép động cơ hoạt động ở chế độ siêu tiết kiệm nhiên

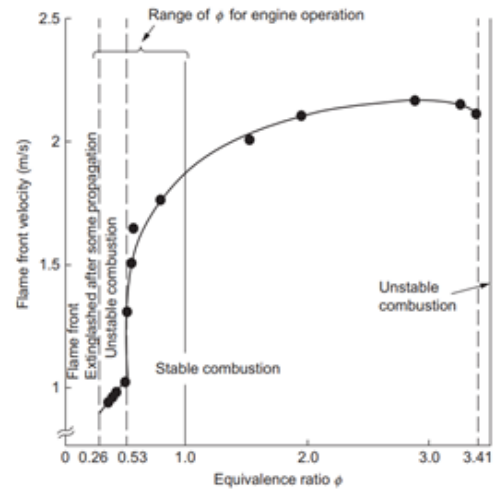
liệu, cải thiện hiệu quả sử dụng nhiên liệu và giảm nhiệt độ đốt cháy cực đại để giảm thiểu sự hình thành NO_x .

Năng lượng đánh lửa thấp [3, 9]: Với năng lượng đánh lửa tối thiểu chỉ 0,02 mJ chỉ ra trên Hình 2 (so với 0,24 mJ của xăng), hydro rất dễ bị cháy bởi các điểm nóng trong buồng đốt, chẳng hạn như điện cực bugi nóng hoặc các chi tiết nóng trong buồng cháy.



Hình 2. Năng lượng đánh lửa của nhiên liệu Hydro [3]

Tốc độ lan truyền ngọn lửa cao [5]: Tốc độ cháy tăng của hydro nhanh hơn khoảng sáu lần so với các nhiên liệu thông thường (2,65-3,25 m/s so với ~0,4 m/s đối với xăng). Điều này hỗ trợ hoạt động của động cơ ở tốc độ cao và cho phép các chu kỳ đốt cháy diễn ra gần hơn với quá trình thể tích không đổi lý tưởng về mặt nhiệt động lực học. Hình 3 là đồ thị thể hiện mối quan hệ giữa tỷ lệ hòa khí và tốc độ cháy của nhiên liệu hydro cũng như phạm vi cháy ổn định [3]. Có thể thấy, phạm vi cháy ổn định của nhiên liệu hydro lớn hơn ở động cơ xăng rất nhiều với mức tỷ lệ hòa khí rất đậm ($\lambda = 0,53$) đến rất nhạt ($\lambda = 3,41$).



Hình 3. Tốc độ cháy tương ứng với tỷ lệ hòa khí của nhiên liệu hydro [3]

Khoảng cách dập tắt ngắn: Hydro có khoảng cách dập tắt rất nhỏ, chỉ 0,6 mm, xấp xỉ một phần ba so với xăng. Mặc dù điều này thúc đẩy việc sử dụng nhiên liệu hoàn toàn hơn, nhưng nó cũng làm tăng nguy cơ cháy ngược do ngọn lửa có thể đi qua các van nạp gần như đóng kín [1, 2].

Mật độ năng lượng thể tích thấp: Ở trạng thái khí, hydro chiếm thể tích lớn hơn trên mỗi đơn vị năng lượng so với nhiên liệu lỏng. Điều này có thể dẫn đến hiệu suất thể tích thấp và tổn thất công suất lên tới 15-20% khi hydro được đưa vào thông qua phun cửa nạp [1, 3]. Đây cũng là những hạn chế lớn khi sử dụng nhiên liệu hydro cho động cơ đốt trong.

Một số tính chất của nhiên liệu hydro so với nhiên liệu xăng, diesel được chỉ ra trong bảng 1.



Hình 4. Phun hydro gián tiếp [9]

Bảng 1. So sánh nhiên liệu hydro, xăng và diesel [1-3]

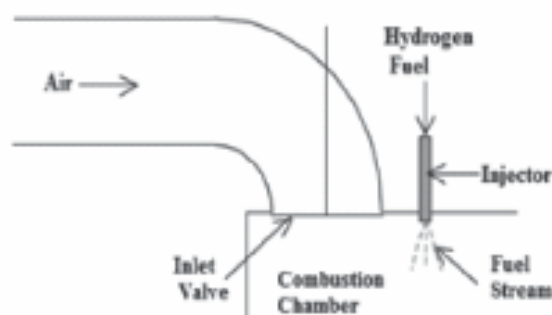
Tính chất	Hydro	Xăng	Diesel
Nhiệt độ tự cháy (K)	858	501-744	530
Nhiệt trị thấp (MJ/kg)	119,9	44,5	42,6
Tỷ lệ nhiên liệu/không khí lý tưởng	34,3	14,6	17
Giới hạn cháy trong không khí (% thể tích)	4-75	1,2-6,0	0,7-5
Năng lượng tối thiểu bắt lửa trong không khí (mJ)	0,02	0,25	-

3. PHƯƠNG PHÁP PHUN NHIÊN LIỆU VÀ TẠO HÒA KHÍ ĐỐI VỚI NHIÊN LIỆU HYDRO

Sự phát triển của công nghệ H2ICE gắn liền với những tiến bộ trong hệ thống nạp nhiên liệu được thiết kế để tối đa hóa công suất và loại bỏ hiện tượng cháy bất thường.

Hệ thống phun nhiên liệu trên đường ống nạp (PFI - Port Fuel Injection) thường được sử dụng vì tính đơn giản và chi phí thấp hơn, do có thể được điều chỉnh từ các động cơ xăng hiện có với những thay đổi thiết kế tối thiểu được chỉ ra như Hình 4 [1, 2]. Tuy nhiên, vì hydro được phun vào cửa nạp, nó sẽ thay thế không khí, dẫn đến giảm hiệu suất thể tích và công suất đầu của động cơ. Hệ thống PFI cũng rất dễ bị hiện tượng cháy ngược, trong đó ngọn lửa lan ngược trở lại vào ống dẫn khí nạp [9].

Phun nhiên liệu trực tiếp (DI - Direct Injection) được công nhận là phương pháp ưu việt cho động cơ đốt trong sử dụng hydro hiệu suất cao [1, 2]. Bằng cách phun hydro trực tiếp vào buồng đốt sau khi van nạp đóng lại như Hình 5, phun trực tiếp loại bỏ nguy cơ cháy ngược và cho phép đạt mật độ công suất cao hơn. Hệ thống phun trực tiếp có thể bù đắp tổn thất công suất và đạt hiệu suất nhiệt lên đến 45-52% bằng cách tối ưu hóa thời điểm phun và tạo ra hỗn hợp không khí-nhiên liệu phân lớp [9].



Hình 5. Phun hydro trực tiếp [9]

Để đảm bảo hoạt động ổn định của động cơ sử dụng nhiên liệu hydro, các nhà nghiên cứu đã thực hiện một số thay đổi:

- Bugi Iridium: Thay thế bugi bạch kim bằng bugi iridium, loại bugi yêu cầu điện áp thấp hơn và có khe hở nhỏ hơn, giúp giảm sự hình thành điểm nóng và nguy cơ cháy sớm [1].
- Phun nhiên liệu theo thời điểm (TMI –Timed manifold injection): Chiến lược này trì hoãn việc cung cấp nhiên liệu cho đến khi không khí nạp làm mát các điểm nóng tiềm ẩn, giúp ngăn chặn hiệu quả hiện tượng cháy ngược trên đường ống nạp [3].
- Tăng áp và siêu tăng áp: Được sử dụng để bù lại công suất bị mất do hiệu suất thể tích thấp và hỗ trợ hoạt động siêu tiết kiệm nhiên liệu vận hành ổn định [1].

4. HIỆU SUẤT VÀ PHÁT THẢI Ở ĐỘNG CƠ SỬ DỤNG NHIÊN LIỆU HYDRO

4.1. Hiệu suất nhiệt

Quá trình đốt cháy hydro thường mang lại hiệu suất nhiệt cao hơn so với xăng do tốc độ cháy nhanh hơn và quá trình đốt cháy hoàn toàn. Sự cải thiện hiệu suất nhiệt đặc biệt đáng chú ý ở điều kiện đốt cháy hỗn hợp nghèo, với một số động cơ thử nghiệm đạt được hiệu suất nhiệt chỉ thị vượt quá 50% [1, 5]. Có thể thấy, hiệu suất nhiệt của động cơ đốt trong sử dụng nhiên liệu hydro cao hơn khá nhiều so với sử dụng nhiên liệu xăng.

4.2. Phát thải

H2ICE hầu như không tạo ra CO, CO₂ hoặc các phát thải dạng hạt, ngoại trừ một lượng nhỏ từ dầu bôi trơn. Chất gây ô nhiễm chính cần quan tâm là ôxit nitơ (NO_x), hình thành ở nhiệt độ cao đạt được trong quá trình đốt cháy. Các chiến lược nhằm giảm phát thải NO_x ở động cơ đốt trong sử dụng nhiên liệu hydro là:

- Cháy hỗn hợp siêu nghèo: Vận hành ở tỷ lệ dư lượng không khí cao (ví dụ: $\lambda > 2.0$) giữ nhiệt độ dưới ngưỡng hình thành NO_x [1, 4, 6].

- Hệ thống tuần hoàn khí thải (EGR): Pha loãng hỗn hợp khí thải giúp giảm nhiệt độ cực đại và có thể đạt được mức NO_x gần bằng không [1, 4].

- Hệ thống khử xúc tác chọn lọc (SCR): Các hệ thống SCR tiên tiến có thể sử dụng hydro trên xe làm chất khử để loại bỏ NO_x ở ống xả [6].

5. KẾT LUẬN

Động cơ đốt trong hydro (H2ICE) trong

tương lai sẽ đóng vai trò quan trọng bên cạnh công nghệ pin và pin nhiên liệu. Mặc dù xe điện chạy đang là giải pháp thay thế ô tô truyền thống trong những năm gần đây, động cơ hydro cũng là một trong những tiềm năng trên phương tiện giao thông hạng nặng nhờ độ bền, mật độ công suất cao và tổng chi phí thấp hơn.

Tiến bộ trong tương lai phụ thuộc vào việc phát triển các thiết kế động cơ chuyên dụng “dành riêng cho hydro” hơn là chỉ đơn giản là nâng cấp. Nghiên cứu đang diễn ra về các giải pháp lưu trữ tiên tiến – chẳng hạn như bình khí áp suất cao (35-70 MPa), lưu trữ chất lỏng ở nhiệt độ đông lạnh (-252°C) và lưu trữ hóa học trong hydrua kim loại – là rất quan trọng để mở rộng phạm vi hoạt động của xe. ❖

Ngày nhận bài: 25/02/2026

Ngày phản biện: 05/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Teoh, Y. H., How, H. G., Le, T. D., Nguyen, H. T., Loo, D. L., Rashid, T., & Sher, F. (2023), “A review on production and implementation of hydrogen as a green fuel in internal combustion engines”. *Fuel*, 333, 126525.
- [2]. Akal, D., Öztuna, S., & Büyükkakın, M. K. (2020), “A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline-Lpg-diesel) from combustion performance aspect”. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60), 35257-35268.
- [3]. Das, L. M. (2016), “Hydrogen-fueled internal combustion engines”. In *Compendium of Hydrogen Energy* (pp. 177-217), Woodhead Publishing.
- [4]. Gao, W., Fu, Z., Li, Y., Li, Y., & Zou, J. (2022), “Progress of performance, emission, and technical measures of hydrogen fuel internal-combustion engines”. *Energies*, 15(19), 7401.
- [5]. Wróbel, K., Wróbel, J., Tokarz, W., Lach, J., Podsadni, K., & Czerwiński, A. (2022), “Hydrogen internal combustion engine vehicles: a review”. *Energies*, 15(23), 8937.
- [6]. Onorati, A., Payri, R., Vaglieco, B. M., Agarwal, A. K., Bae, C., Bruneaux, G., ... & Zhao, H. (2022), “The role of hydrogen for future internal combustion engines”. *International Journal of Engine Research*, 23(4), 529-540.
- [7]. Boretto, A. (2020), “Hydrogen internal combustion engines to 2030”. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 23692-23703.
- [8]. Aggarwal, A., Yadav, S., Singh, K., Verma, A. S., & Chhabra, S. (2022), “Study of utilization of hydrogen as fuel in internal combustion engine”. *Materials Today: Proceedings*, 64, 1211-1216.
- [9]. Ciniviz, M., & Köse, H. (2012), “Hydrogen use in internal combustion engine: a review”. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 1(1), 1-15.