

PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH KỸ THUẬT, PHÁT THẢI VÀ NHỮNG THÁCH THỨC TRONG PHÁT TRIỂN ĐỘNG CƠ NHIÊN LIỆU KÉP LPG/DIESEL

ANALYSIS OF TECHNICAL CHARACTERISTICS, EMISSIONS, AND CHALLENGES IN THE DEVELOPMENT OF DUAL-FUEL LPG/DIESEL ENGINES

Nguyễn Văn Hạnh, Nguyễn Tường Vi*

Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp (Hà Nội)

*Email: ntv@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh yêu cầu giảm phát thải và nâng cao hiệu quả sử dụng nhiên liệu của động cơ đốt trong, động cơ diesel sử dụng nhiên liệu kép LPG/Diesel đang nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu như một giải pháp chuyển tiếp khả thi. Bài báo này trình bày tổng quan về các nghiên cứu trong và ngoài nước về xu hướng phát triển động cơ diesel nhiên liệu kép LPG/Diesel, tập trung phân tích nguyên lý làm việc, tính năng kỹ thuật và phát thải, mức độ ứng dụng thực tiễn cũng như những khó khăn, khoảng trống nghiên cứu còn tồn tại. Các kết quả tổng hợp cho thấy, khi áp dụng nhiên liệu kép LPG/Diesel, công suất và hiệu suất nhiệt của động cơ có thể được duy trì hoặc cải thiện nhẹ ở tải trung bình và cao, trong khi suất tiêu hao diesel và phát thải khói, muội than giảm đáng kể. Tuy nhiên, phát thải CO, HC và NOx có xu hướng biến thiên phức tạp, phụ thuộc mạnh vào tỷ lệ LPG và chiến lược phun diesel mỗi. Trên cơ sở phân tích các kết quả định lượng, bài báo chỉ ra những khoảng trống nghiên cứu liên quan đến điều khiển quá trình cháy, chế độ vận hành quá độ và độ bền của động cơ, đồng thời đề xuất định hướng nghiên cứu nhằm nâng cao khả năng ứng dụng của công nghệ nhiên liệu kép LPG/Diesel trong thực tế.

Từ khóa: Động cơ diesel; Nhiên liệu kép; LPG/Diesel; Tính năng; Phát thải.

ABSTRACT

In the context of the need to reduce emissions and improve fuel efficiency in internal combustion engines, dual-fuel LPG/Diesel diesel engines are receiving significant research attention as a viable transitional solution. This paper presents an overview of domestic and international research on the development trends of dual-fuel LPG/Diesel diesel engines, focusing on analyzing the working principle, technical features and emissions, practical application level, as well as existing research difficulties and gaps. The combined results show that when applying dual-fuel LPG/Diesel, the engine's power and thermal efficiency can be maintained or slightly improved at medium and high loads, while diesel consumption and smoke and soot emissions are significantly reduced. However, CO, HC, and NOx emissions tend to vary complexly, strongly dependent on the LPG ratio and the diesel priming injection strategy. Based on the analysis of quantitative results, the paper identifies research gaps related to combustion control, transient operating modes, and engine durability, and proposes research directions to improve the practical application of LPG/Diesel dual-fuel technology.

Keywords: Diesel engine; Dual fuel; LPG/Diesel; Features; Emissions.

1. GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh yêu cầu giảm phát thải ô nhiễm và chi phí nhiên liệu ngày càng khắt khe, việc nghiên cứu các giải pháp sử dụng nhiên liệu thay thế cho động cơ diesel truyền thống đang nhận được sự quan tâm lớn. Bên cạnh các hướng tiếp cận như diesel-CNG, diesel-ethanol hay hybrid hóa, động cơ diesel sử dụng nhiên liệu kép LPG/Diesel nổi lên như một giải pháp chuyển tiếp khả thi do khả năng tận dụng động cơ hiện hữu với mức cải tiến kết cấu không lớn [1], [2].

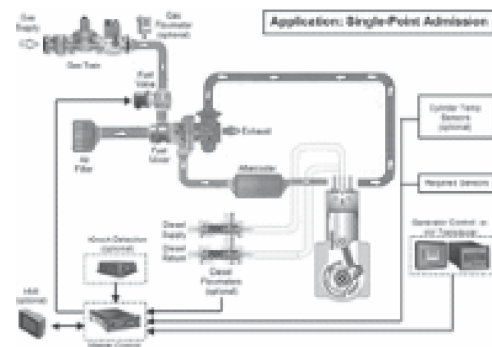
LPG (Liquefied Petroleum Gas) có trị số octan cao, khả năng hòa trộn tốt với không khí và hàm lượng carbon thấp hơn diesel, cho phép giảm phát thải muội than và khói đen khi phối hợp với diesel trong chế độ phun môi [3]. Vì vậy, xu hướng nghiên cứu động cơ diesel nhiên liệu kép LPG/Diesel đã phát triển mạnh trong khoảng hai thập kỷ gần đây, hướng tới mục tiêu nâng cao hiệu quả năng lượng và giảm tác động môi trường.

Bài báo này đi sâu phân tích đặc tính kỹ thuật, phát thải và những thách thức trong phát triển động cơ nhiên liệu kép LPG/Diesel rất có ý nghĩa khoa học.

2. NGUYÊN LÝ LÀM VIỆC VÀ QUÁ TRÌNH CHÁY VÀ HÌNH THÀNH PHÁT THẢI CỦA ĐỘNG CƠ DIESEL NHIÊN LIỆU KÉP LPG/DIESEL

Trong động cơ nhiên liệu kép LPG/Diesel, diesel vẫn đóng vai trò nhiên liệu môi, được phun trực tiếp vào buồng cháy để kích hoạt quá trình tự cháy, trong khi LPG được cấp vào đường nạp dưới dạng khí và hòa trộn với không khí trước khi nạp vào xi lanh [4], [5] (Hình 1).

Trong quá trình cháy (Hình 2), nhiên liệu diesel liên tục khuếch tán vào vùng đang cháy và hỗn hợp LPG-không khí ở bên ngoài cũng liên tục bị cuốn và bổ sung vào vùng cháy do chuyển động rối và khuếch tán của môi chất. Hướng thứ hai là theo sự lan tràn màng lửa trong vùng hỗn hợp đồng nhất của LPG và không khí nếu thành phần hỗn hợp của vùng này nằm trong giới hạn cháy. Quá trình cháy này diễn ra theo hướng từ vùng tự cháy ra phía thành buồng cháy với tốc độ lan tràn màng lửa phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ, áp suất và tỷ lệ thành phần LPG/không khí trong xilanh. Như vậy, quá trình cháy diễn ra thực sự rất phức tạp, có thể tồn tại đồng thời các quá trình khác nhau như cháy khuếch tán của nhiên liệu diesel với hỗn hợp LPG-không khí, sự lan tràn màng lửa trong vùng hỗn hợp đồng nhất LPG-không khí, sự chuyển động rối và khuếch tán của không khí và LPG vào vùng cháy...



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý làm việc của động cơ nhiên liệu kép LPG/Diesel



Hình 2. Sơ đồ phân vùng xilanh ứng với 1 tia phun trong quá trình cháy.

Phương pháp điều khiển quá trình hình thành hỗn hợp và cháy này cho phép động cơ:

- Hoạt động linh hoạt ở cả chế độ diesel thuần khi không cấp LPG;
- Thay thế một phần diesel bằng LPG, thường trong khoảng 20-40% theo năng lượng cung cấp [6].

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Kết quả nghiên cứu tổng hợp về tính năng và phát thải

3.1.1. Đặc tính công suất và tiêu hao nhiên liệu

Các nghiên cứu thực nghiệm trên động cơ diesel đơn xi lanh và nhiều xi lanh cho thấy, khi chuyển sang chế độ nhiên liệu kép LPG/Diesel, công suất động cơ nhìn chung không suy giảm đáng kể nếu tỷ lệ LPG được kiểm soát hợp lý.

Ở tải trung bình đến tải cao ($\geq 50\%$ tải): Công suất hiệu dụng giảm không quá 0-3%, thậm chí trong một số trường hợp có thể tăng nhẹ 1-2% do quá trình cháy hỗn hợp trở nên đồng đều hơn [7], [8].

Hiệu suất nhiệt (BTE) tăng khoảng 1-4%, chủ yếu nhờ LPG có khả năng hòa trộn tốt với không khí và làm giảm tổn thất cháy cục bộ [6], [9].

Ở tải thấp ($< 30\%$ tải): BTE giảm trong khoảng 2-6% so với diesel thuần.

Nguyên nhân chính là LPG khó tự cháy, quá trình cháy phụ thuộc hoàn toàn vào diesel môi, dẫn đến cháy không hoàn toàn [7], [10].

Nhìn chung, các kết quả cho thấy vùng

làm việc tối ưu của động cơ LPG/Diesel là tải trung bình – cao, phù hợp với máy công nghiệp và máy phát điện.

3.1.2. Suất tiêu hao nhiên liệu và tỷ lệ thay thế diesel

Xét theo suất tiêu hao nhiên liệu:

Suất tiêu hao diesel giảm đáng kể khi động cơ làm việc ở chế độ nhiên liệu kép. Tỷ lệ năng lượng LPG thay thế diesel đạt:

- 20-30% ở tải trung bình;
- 30-45% ở tải cao, tùy cấu hình cấp LPG và chiến lược phun diesel môi [6], [8].

Nếu xét theo tổng suất tiêu hao năng lượng quy đổi, mức thay đổi chỉ trong khoảng $\pm 3\%$, cho thấy lợi ích chủ yếu nằm ở giảm tiêu thụ diesel và chi phí nhiên liệu, hơn là cải thiện mạnh hiệu suất tổng thể.

3.1.3. Phát thải khí ô nhiễm

Các kết quả thực nghiệm thống nhất rằng:

- Khói và muội than giảm rõ rệt so với diesel thuần, do LPG không chứa hợp chất thơm nặng [9];
- Phát thải CO và HC có xu hướng tăng, đặc biệt khi tỷ lệ LPG cao và quá trình cháy không hoàn toàn [10];
- Phát thải NO_x biến thiên phức tạp, phụ thuộc mạnh vào thời điểm phun diesel môi và tỷ lệ LPG [11].

3.1.4. Tổng hợp định lượng kết quả nghiên cứu

Bảng 1. Tổng hợp ảnh hưởng của nhiên liệu kép LPG/Diesel đến tính năng và phát thải

Chỉ tiêu đánh giá	Xu hướng thay đổi so với diesel thuần	Mức thay đổi điển hình	Ghi chú điều kiện làm việc
Công suất hiệu dụng	Gần như không đổi	-3% → +2%	Tải trung bình – cao
Hiệu suất nhiệt (BTE)	Tăng	+1% → +4%	Tải ≥ 50%
Tỷ lệ thay thế diesel	Tăng đáng kể	20% → 45%	Phụ thuộc tỷ lệ LPG
Độ khói / muội than	Giảm mạnh	-30% → -70%	Rõ nhất ở tải cao
CO	Tăng	+10% → +40%	Đặc biệt ở tải thấp
HC	Tăng	+20% → +60%	Cháy không hoàn toàn
NOx	Tăng hoặc giảm	-15% → +20%	Phụ thuộc chiến lược phun

3.2. Mức độ ứng dụng thực tiễn của các nghiên cứu

Các nghiên cứu về động cơ LPG/Diesel hiện nay không chỉ dừng lại ở phòng thí nghiệm mà đã được triển khai thử nghiệm và ứng dụng hạn chế trong thực tế, chủ yếu ở các loại động cơ sau:

- Máy phát điện diesel công suất vừa và nhỏ;
- Động cơ công nghiệp làm việc ở chế độ tải ổn định;
- Một số đội xe thương mại chạy tuyến cố định [12], [13].

Việc ứng dụng trên các động cơ này cho thấy hiệu quả kinh tế rõ rệt nhờ giảm tiêu thụ diesel và chi phí nhiên liệu tổng thể.

3.3. Khoảng trống trong các nghiên cứu

Mặc dù động cơ diesel sử dụng nhiên liệu kép LPG/Diesel đã được nghiên cứu tương đối rộng rãi, các công bố hiện nay cho thấy vẫn tồn tại những khoảng trống nghiên cứu, đặc biệt liên quan đến khả năng ứng dụng thực tiễn và

kiểm soát phát thải [3], [6]. Phần lớn các nghiên cứu tập trung vào điều kiện làm việc ổn định, chủ yếu đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ LPG thay thế diesel đến tính năng và phát thải của động cơ, trong khi các chế độ quá độ và tải biến thiên chưa được quan tâm đầy đủ [6-10], [12], [13].

Bên cạnh đó, chiến lược điều khiển nhiên liệu trong động cơ LPG/Diesel chưa được nghiên cứu một cách hệ thống. Hầu hết các công trình sử dụng phương án cấp LPG qua đường nạp với điều khiển đơn giản, trong khi sự phối hợp tối ưu giữa lượng LPG và các thông số phun diesel mỗi vẫn chưa được làm rõ, dẫn đến sự khác biệt đáng kể về phát thải CO, HC và NOx giữa các nghiên cứu [7], [10], [11].

Ngoài ra, cơ chế tương tác giữa quá trình cháy của hỗn hợp LPG-không khí và sự hình thành phát thải chưa được phân tích sâu; nhiều nghiên cứu mới dừng lại ở đánh giá các thông số đầu ra, thiếu các phân tích về giải phóng nhiệt và nhiệt độ đỉnh trong xi lanh [9], [11], [15]. Đồng thời, ảnh hưởng lâu dài của nhiên liệu kép LPG/Diesel đến độ bền và độ ổn định của động cơ vẫn còn hạn chế do đa số các nghiên cứu chỉ tập trung vào thử nghiệm ngắn hạn [12-14].



Từ đó cho thấy, cần có các nghiên cứu mang tính hệ thống, gắn kết giữa điều khiển nhiên liệu, cơ chế cháy, phát thải và điều kiện vận hành thực tế nhằm nâng cao khả năng ứng dụng của động cơ diesel sử dụng nhiên liệu kép LPG/Diesel trong giai đoạn chuyển tiếp hiện nay [3], [15].

3.4. Thách thức, hạn chế và xu hướng phát triển

Mặc dù có tiềm năng ứng dụng, động cơ diesel sử dụng nhiên liệu kép LPG/Diesel vẫn tồn tại một số thách thức đáng chú ý, bao gồm khó kiểm soát quá trình cháy ở tải thấp, yêu cầu hệ thống điều khiển nhiên liệu có độ chính xác cao, phát thải CO, HC còn ở mức cao nếu không có các giải pháp xử lý bổ sung phù hợp [14]. Bên cạnh đó, hạ tầng cung cấp LPG và chi phí đầu tư ban đầu cũng là những rào cản đối với việc triển khai rộng rãi trong thực tế.

Trong thời gian tới, các nghiên cứu tập trung vào tối ưu hóa chiến lược phun diesel môi, phát triển hệ thống điều khiển điện tử cho quá trình cấp LPG, đồng thời kết hợp mô phỏng CFD và thực nghiệm nhằm cải thiện quá trình cháy và giảm phát thải. Động cơ LPG/Diesel được xem như một giải pháp chuyển tiếp, góp phần giảm phát thải trước khi tiến tới các công nghệ điện hóa và sử dụng nhiên liệu không carbon [15].

4. KẾT LUẬN

Các nghiên cứu về động cơ diesel sử dụng nhiên liệu kép LPG/Diesel đã đạt được nhiều kết quả có giá trị khoa học và thực tiễn. Công nghệ này cho phép giảm tiêu thụ diesel và phát thải khói muội, đồng thời tận dụng được nền tảng động cơ hiện hữu. Tuy nhiên, do các hạn chế về điều khiển cháy và phát thải, LPG/Diesel hiện được xem là giải pháp ứng dụng có chọn lọc và mang tính chuyển tiếp trong lộ trình phát triển động cơ đốt trong. ❖

Ngày nhận bài: 09/12/2025

Ngày phản biện: 23/12/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Heywood, J.B. (1988), "*Internal Combustion Engine Fundamentals*". McGraw-Hill, New York.
- [2]. Stone, R. (2012), "*Introduction to Internal Combustion Engines*". 4th Edition, SAE International, Warrendale.
- [3]. Karim, G.A. (2003), "*Dual-fuel diesel engines*". Energy Conversion and Management, Vol. 44, pp. 1-14.
- [4]. Liu, Z., Karim, G.A. (1997), "*Combustion characteristics of LPG-diesel dual fuel engines*". Applied Energy, Vol. 58, pp. 21-33.
- [5]. Papagiannakis, R.G., Hountalas, D.T. (2004), "*Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine*". Energy, Vol. 29, pp. 353-366.
- [6]. Bora, B.J., Saha, U.K., Chatterjee, S. (2014), "*Experimental investigation on LPG-diesel dual fuel engine*". Fuel, Vol. 117, pp. 361-369.
- [7]. Selim, M.Y.E. (2001), "*Effect of diesel fuel injection timing on the performance and emission characteristics of dual fuel engines*". Renewable Energy, Vol. 22, pp. 299-310.
- [8]. Lata, D.B., Misra, A. (2010), "*Effect of LPG addition on performance and emissions of a diesel engine*". Applied Thermal Engineering, Vol. 30, pp. 174-182.
- [9]. Qi, D.H., Chen, H., Matthews, R.D., Bian, Y.Z. (2011), "*Combustion and emission characteristics of LPG-diesel dual fuel engine*". Energy, Vol. 36, pp. 112-121.
- [10]. Rakopoulos, C.D., Giakoumis, E.G. (2009), "*Diesel engine transient operation with dual fuel strategies*". SAE Technical Paper 2009-01-1843.
- [11]. Hountalas, D.T., Papagiannakis, R.G. (2000), "*NOx and particulate emissions of a dual fuel diesel engine*". Applied Energy, Vol. 66, pp. 1-12.
- [12]. Banapurmath, N.R., Tewari, P.G., Hosmath, R.S. (2008), "*Performance and emission characteristics of a LPG-diesel dual fuel engine*". International Journal of Automotive Technology, Vol. 9, No. 3, pp. 267-273.
- [13]. Ryu, K. (2013), "*Effects of pilot injection timing on performance and emissions in LPG-diesel dual fuel engines*". Energy, Vol. 50, pp. 200-209.
- [14]. Korakianitis, T., Namasivayam, A.M., Crookes, R.J. (2011), "*Natural-gas fueled internal combustion engines*". Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 37, pp. 89-112.
- [15]. Verma, S., Das, L.M., Kaushik, S.C. (2019), "*Performance, combustion and emission characteristics of dual fuel diesel engines*". Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 102, pp. 29-50.