

NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ ỨNG DỤNG LPG CHO ĐỘNG CƠ DIESEL

OVERVIEW RESEARCH ON LPG APPLICATION FOR DIESEL ENGINES

Huỳnh Chí Tuyệt

Khoa Cơ khí, Trường Cao đẳng Kỹ thuật Công nghệ Nha Trang

Email: chituyet3000@gmail.com

TÓM TẮT

Khí dầu mỏ hóa lỏng (LPG) ngày càng được quan tâm như một giải pháp thay thế một phần nhiên liệu diesel truyền thống trong động cơ đốt trong, đặc biệt ở phương pháp sử dụng hệ thống nhiên liệu kép (lường nhiên liệu). LPG có các ưu điểm như đặc tính cháy sạch, sẵn có và giá thành cạnh tranh, giúp giảm đáng kể phát thải trong khi vẫn duy trì hoặc thậm chí cải thiện hiệu suất động cơ. Nội dung bài báo đi sâu phân tích nguyên lý hệ thống, kết quả thực nghiệm của các nghiên cứu tiêu biểu về LPG cho động cơ diesel trên thế giới và cập nhật các xu hướng công nghệ mới và triển vọng tương lai của LPG trong lĩnh vực động cơ diesel. Các kết quả nghiên cứu cho thấy, khi sử dụng LPG cho động cơ diesel, giúp giảm đáng kể phát thải PM, CO và HC, trong khi vẫn duy trì hoặc cải thiện hiệu suất động cơ. Tuy nhiên, khó khăn lớn là việc kiểm soát phát thải NO_x, cần phải thiết kế hệ thống phun phù hợp và xây dựng cơ sở hạ tầng.

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

ABSTRACT

Liquefied petroleum gas (LPG) is increasingly being considered as a partial alternative to traditional diesel fuel in internal combustion engines, especially in the dual fuel system. LPG has advantages such as clean combustion, availability and competitive price, helping to significantly reduce emissions while maintaining or even improving engine performance. The article analyzes in depth the system principles, experimental results of typical studies on LPG for diesel engines in the world and updates new technology trends and future prospects of LPG in the field of diesel engines. The research results show that when using LPG for diesel engines, it helps to significantly reduce PM, CO and HC emissions, while maintaining or improving engine performance. However, the major difficulty is the control of NO_x emissions, which requires the design of appropriate injection systems and the construction of infrastructure.

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

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Việc sử dụng nhiên liệu sạch được coi là một trong những giải pháp để giải quyết vấn đề ô nhiễm môi trường và góp phần giảm sự phụ thuộc vào nguồn nhiên liệu truyền thống như xăng và dầu diesel đang cạn kiệt và ngày càng đắt đỏ [1, 10].

Động cơ diesel được sử dụng nhiều trên các phương tiện vận tải với hiệu suất nhiệt cao và khả năng chịu tải tốt, nhưng phát thải PM, NO_x và CO₂ cao gây ô nhiễm lớn về môi trường làm ảnh hưởng đến sức khỏe con người.

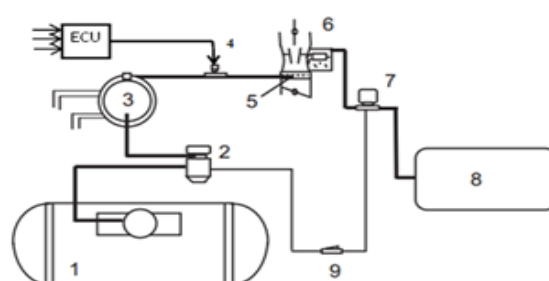
Trong khi các quy định về khí thải ngày càng nghiêm ngặt thúc đẩy các giải pháp giảm phát thải mà vẫn đảm bảo hiệu suất. Trong số các nhiên liệu thay thế, LPG nổi bật nhờ trữ lượng dồi dào, cơ sở hạ tầng sẵn có, khả năng hóa hơi tốt và giá thành rẻ hơn diesel tại nhiều quốc gia [1, 10].

Vì vậy, nghiên cứu về LPG như một giải pháp nhiên liệu thay thế tiềm năng, vừa đáp ứng được yêu cầu về hiệu suất của động cơ diesel vừa giúp giảm phát thải, mở ra hướng nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong bối cảnh các quy định khí thải ngày càng nghiêm ngặt nhằm cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho các nghiên cứu về LPG cho động cơ diesel.

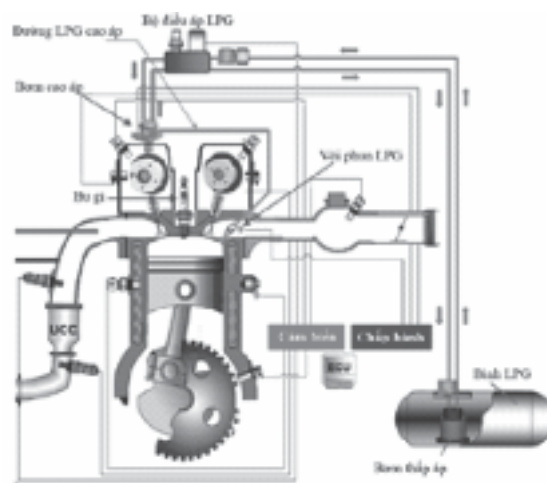
2. NGUYÊN LÝ VÀ SƠ ĐỒ HỆ THỐNG LPG-DIESEL

Có hai phương pháp chính: hệ thống hòa trộn hoặc phun LPG vào đường nạp và hệ thống phun LPG trực tiếp áp suất cao. Ở hệ thống hòa trộn hoặc phun LPG vào đường nạp, LPG hóa hơi được trộn với không khí nạp trước khi vào buồng đốt (Hình 1). Diesel được phun trực tiếp như bình thường để môi cháy.

Phương pháp này có ưu điểm là đơn giản, chi phí thấp nhưng khó kiểm soát chính xác tỷ lệ LPG, nguy cơ cháy kích nổ. Ở hệ thống phun LPG trực tiếp (Hình 2), LPG được nén ở áp suất cao và phun vào buồng cháy đồng bộ với phun diesel. Phương pháp này có ưu điểm là kiểm soát chính xác tỷ lệ LPG/diesel, hiệu suất cao hơn, phát thải thấp hơn. Nhưng chi phí cao, yêu cầu kim phun chuyên dụng với hệ thống điều khiển điện tử phức tạp [1, 2, 12].



Hình 1. Sơ đồ cung cấp LPG trên động cơ dùng bộ trộn và điều khiển điện tử [12]



Hình 2. Sơ đồ hệ thống phun trực tiếp LPG vào trong xi-lanh động cơ [12]

3. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU VÀ HIỆU QUẢ ỨNG DỤNG

Các nghiên cứu quốc tế cho thấy tiềm năng rất lớn của LPG, nghiên cứu của tác giả

Ashok chỉ ra rằng khi sử dụng LPG cho động cơ diesel thì PM khoảng 40% và tăng NO_x khoảng 8% khi tỷ lệ LPG là 30% [1]. Tác giả Saleh và cộng sự nghiên cứu với thành phần LPG giàu propane giúp giảm CO khoảng 25% và PM khoảng 30% nhưng NO_x có thể tăng khoảng 10% ở tải cao [2]. Tác giả Lee và cộng sự thử nghiệm bổ sung propane, PM giảm khoảng 35%, khói giảm khoảng 50% [3]. Tác giả Aydin nghiên cứu trên máy phát điện đơn xy-lanh giảm tiêu hao diesel khoảng 20% và PM khoảng 45% [4]. Toledo-Guerrero và cộng sự thực nghiệm phát thải hạt siêu mịn, giảm số lượng hạt khoảng 60% khi LPG thay thế 40% năng lượng [5]. Nhìn chung, hiệu suất nhiệt duy trì hoặc tăng 2-5%, tiêu hao diesel giảm 20-40%, PM và khói muội giảm 15-50%, CO và HC giảm 10-30%, NO_x có xu hướng tăng nhẹ nếu tỷ lệ LPG cao [1-5].

Nguyên nhân PM và khói muội giảm 15-50% là do PM (nhân hạt muội bồ hóng) hình thành chủ yếu từ các vùng quá giàu nhiên liệu khi diesel phun trực tiếp. Khi dùng LPG (cháy dạng hỗn hợp khí-không khí), vùng quá giàu giảm đi, do đó ít hạt muội hình thành hơn.

Ngoài ra, LPG hầu như không chứa lưu huỳnh và các hợp chất nặng, nên không tạo nhân muội bồ hóng. Vì vậy, PM giảm đáng kể, đồng thời khói đen cũng giảm rõ rệt.

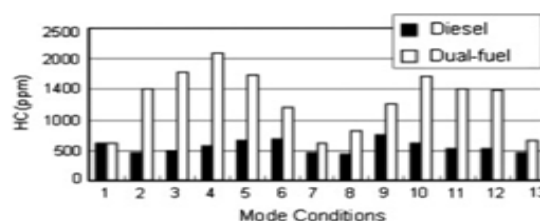
Nguyên nhân CO và HC giảm 10-30% tùy điều kiện là do CO (Carbon monoxide) và HC (hydrocarbon chưa cháy) hình thành do cháy không hoàn toàn. LPG giúp hỗn hợp cháy đồng đều hơn, thời gian cháy đủ lâu hơn, nên quá trình oxy hóa CO và HC hiệu quả hơn nên giảm CO và HC. Tuy nhiên, nếu ở tải thấp hoặc tỷ lệ LPG quá cao, đôi khi CO/HC có thể tăng vì LPG có thể không cháy hoàn toàn khi nhiệt độ cháy thấp (Hình 3, 4, 6, 7).

Nguyên nhân hiệu suất nhiệt duy trì hoặc tăng 2-5% là do LPG có chỉ số octan cao và khả năng bay hơi tốt, khi được trộn với diesel sẽ giúp cháy đồng đều hơn trong buồng đốt, giảm các vùng nhiên liệu-không khí quá giàu hoặc quá nghèo. Quá trình cháy hoàn thiện hơn dẫn tới áp suất cháy tối đa gần điểm tối ưu hơn, cải thiện hiệu suất nhiệt. Ở tải cao, nếu tỷ lệ LPG hợp lý, hiện tượng cháy mát hơn và tốc độ lan truyền ngọn lửa ổn định hơn, cũng giúp hiệu suất tăng. Tuy nhiên, nếu tỷ lệ LPG quá cao, nguy cơ cháy chậm hơn hoặc hiện.

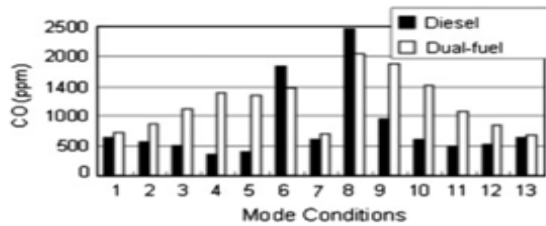
Nguyên nhân tiêu hao diesel giảm 20-40% là do trong chế độ lượng nhiên liệu, một phần năng lượng cung cấp từ LPG thay thế cho diesel, diesel vẫn cần phun để làm môi cháy, nhưng lượng diesel giảm đáng kể nhờ năng lượng từ LPG (vì LPG cháy trong hỗn hợp khí-không khí) nên kết quả giảm tiêu hao diesel, đặc biệt có lợi về chi phí nhiên liệu.

Tuy nhiên, thành phần NO_x có xu hướng tăng nhẹ nếu tỷ lệ LPG cao là do NO_x hình thành mạnh ở nhiệt độ cháy cao và dư oxy, LPG có tốc độ cháy nhanh, và hỗn hợp thường nghèo hơn so với diesel thuần, làm nhiệt độ cháy cục bộ tăng lên, do đó NO_x tăng nhẹ. Khi tỷ lệ LPG vừa phải, NO_x có thể giữ ổn định hoặc tăng rất ít; khi tỷ lệ quá cao và nhiệt độ cháy cao, NO_x tăng đáng kể (Hình 5, 8).

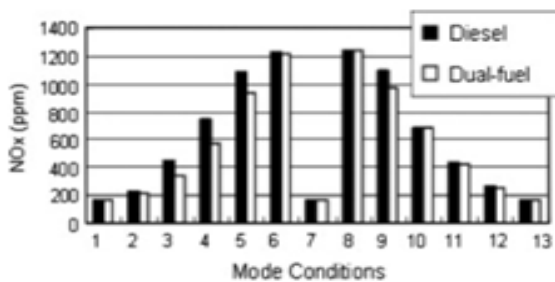
Một số nghiên cứu dùng EGR (hồi lưu khí thải) hoặc điều khiển phun để khắc phục hiện tượng này [1, 11, 12].



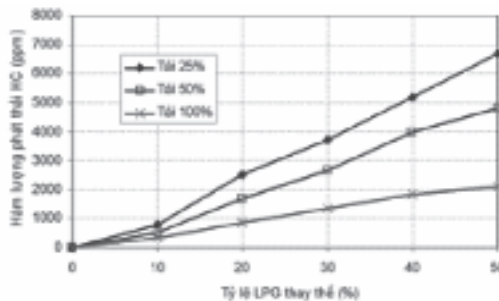
Hình 3. Ảnh hưởng của tải trọng đến phát thải HC [1]



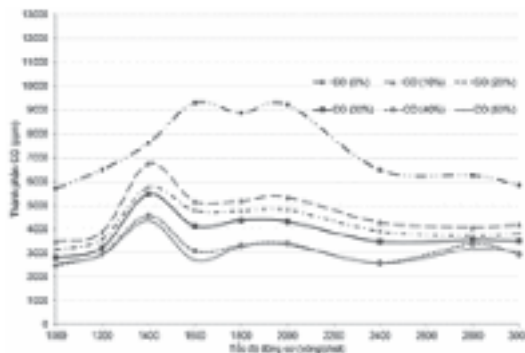
Hình 4. Ảnh hưởng của tải trọng đến phát thải CO [1]



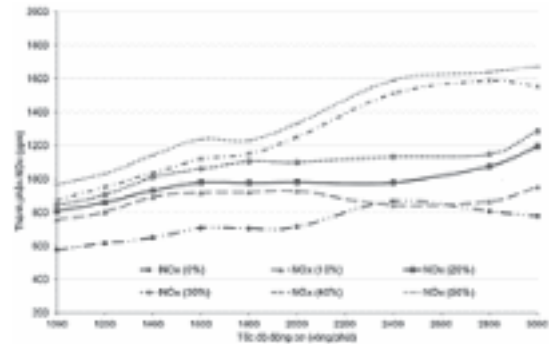
Hình 5. Ảnh hưởng của tải trọng đến phát thải NO_x [1]



Hình 6. Ảnh hưởng của tỷ lệ LPG thay thế đến phát thải H_c [12]



Hình 7. Ảnh hưởng của tỷ lệ LPG thay thế đến phát thải CO [12]



Hình 8. Ảnh hưởng của tỷ lệ LPG thay thế đến NO_x [12]

4. XU HƯỚNG VÀ CÔNG NGHỆ SỬ DỤNG LPG

Đến nay, nhiều xu hướng mới đã xuất hiện như công nghệ phun LPG trực tiếp áp suất cao; ứng dụng trí tuệ nhân tạo và IoT; kết hợp diesel-LPG; xu hướng dùng bio-LPG giúp giảm CO₂.

+ Phun LPG trực tiếp (DI-LPG) ở pha lỏng, áp lực cao:

Dịch chuyển từ hòa trộn đường nạp sang phun trực tiếp để kiểm soát chính xác tỉ lệ thay thế, thời điểm và lượng phun, hạn chế kích nổ và cải thiện độ đồng đều nhiên liệu theo xy-lanh. Đồng thời tăng cường làm mát khi LPG hóa hơi trong buồng cháy giúp tăng mật độ nạp, cải thiện suất điện đầy và giảm xu hướng tạo muội.

Sử dụng kim phun chuyên dụng (chống sôi bọt, chịu áp lực, vật liệu tương thích LPG) và chiến lược phun môi giúp mở rộng vùng vận hành ổn định ở tỉ lệ LPG cao [6], [8].

+ Điều khiển thông minh dựa trên cảm biến và mô hình (AI, IoT, MPC):

ECU thế hệ mới dùng tín hiệu phản hồi 🖱️

áp suất xy-lanh/lambda và điều khiển dự đoán (MPC) để tối ưu đồng thời NO_x – PM – hiệu suất theo tải/tốc độ nhằm tự động thích nghi thành phần LPG và điều kiện môi trường; sử dụng các thuật toán để bảo vệ động cơ. Ngoài ra, có thể cho phép hiệu chỉnh từ xa, cập nhật hiệu chuẩn theo chu kỳ vận hành thực tế (RDE) [8, 9].

+ Quản lý NO_x :

EGR làm mát phối hợp với hệ thống SCR kiểm soát NO_x khi dùng tỉ lệ LPG cao; cân bằng giữa nhiệt độ đỉnh cháy và độ đồng nhất hỗn hợp. Đồng thời, tối ưu thời điểm phun dầu môi, áp suất phun diesel, và phối hợp tăng áp, EGR để duy trì hiệu suất mà không làm NO_x vượt ngưỡng cho phép [6, 7, 8].

+ Chẩn đoán OBD và tiêu chuẩn hóa lượng nhiên liệu:

Tích hợp OBD lượng nhiên liệu để giám sát hiệu suất bộ xử lý khí thải, rò rỉ LPG, và sai lệch tỉ lệ thay thế theo thời gian.

Quy trình thử chuẩn hóa cho chế độ lượng nhiên liệu (chọn chu trình tải, tỉ lệ thay thế, nhiên liệu LPG đại diện) giúp kết quả giữa phòng thí nghiệm và phát thải trong điều kiện lái xe thực tế tương thích hơn [6-9].

+ Đối tượng ứng dụng và triển khai:

Tập trung nghiên cứu cho xe tải hạng nặng, xe buýt, máy nông – công trình, máy phát – nơi tải vận hành tương đối ổn định, có lợi cho tỉ lệ LPG cao và chi phí thấp.

Thiết kế và chế tạo Bộ kit chuyển đổi cho đội xe chạy cố định lộ trình (đô thị/liên tỉnh) mang lại thời gian hoàn vốn ngắn hơn nhờ tiết kiệm diesel và giảm chi phí khí thải [6-9].

5. KẾT LUẬN

Các nghiên cứu cho thấy LPG là nhiên liệu thay thế tiềm năng cho động cơ diesel, giúp giảm PM và khói muội 15-50%, CO và HC 10-30%, đồng thời tiết kiệm 20-40% lượng diesel và duy trì hoặc tăng nhẹ hiệu suất. NO_x có thể tăng, nhưng có thể kiểm soát nhờ điều khiển điện tử và xử lý khí thải.

Xu hướng phát triển sử dụng LPG trên động cơ tập trung vào phun LPG trực tiếp, điều khiển thông minh, lượng nhiên liệu và bio-LPG, cùng các giải pháp an toàn và tiêu chuẩn hoá phát thải trong điều kiện lái xe thực tế. Với công nghệ và chính sách hỗ trợ, LPG hứa hẹn là giải pháp bền vững cho động cơ diesel. ♦

Ngày nhận bài: **15/8/2025**

Ngày phản biện: **25/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ashok, B.; Ashok, S.D.; Ramesh Kumar, C. (2015), “Review on LPG-diesel dual fuel engines”.
- [2]. Saleh, H.E. (2008), “Effect of LPG composition on diesel engine performance and emissions”.
- [3]. Lee, J.; Choi, S.; Kim, H. (2013), “Propane addition effects on diesel emissions”.
- [4]. Aydin, M.; Irgin, A.; Çelik, M.B. (2018), “Conversion of generator to LPG/diesel”.
- [5]. Toledo-Guerrero, V. et al. (2022), “Particle emissions of diesel-LPG engines”.
- [6]. Polk, A.C. et al. (2014, ASME), “Low-temperature combustion diesel-propane”.
- [7]. Polk, A.C. et al. (2014, Fuel), “Knock and pressure oscillations in diesel-propane”.
- [8]. Krishnan, S.R. et al. (2016), “Effects of injection and boost on lượng nhiên liệu engines”.
- [9]. Mohsen, M.J.; Al-Dawody, M.F. (2023), “Simulation and experimental optimization”.
- [10]. Alam, M.; Goto, S.; et al. (2001), “Early studies on diesel-LPG with cetane improvers”.
- [11]. Phạm Minh Tuấn (2008), “Khí thải động cơ và ô nhiễm môi trường”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [12]. Nguyễn Tường Vi (2014), “Nghiên cứu sử dụng LPG làm nhiên liệu thay thế trên các động cơ diesel hiện hành”. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Bách Khoa Hà Nội.