



## Phân tích CFD về ứng dụng LNG trên động cơ Diesel tàu thủy tại Việt Nam CFD analysis on applying LNG to marine Diesel engines in Vietnam

Phạm Văn Chiến<sup>1,2\*</sup>, Nguyễn Duy Tân<sup>1</sup>, Ngô Duy Nam<sup>1,2</sup>, Nguyễn Đức Chuẩn<sup>1</sup>, Trần Duy Trí<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Viện Hàng hải, Trường Đại học Giao thông vận tải TP.Hồ Chí Minh

<sup>2</sup> Nhóm Nghiên cứu AIT, Trường Đại học Giao thông vận tải TP.Hồ Chí Minh

<sup>3</sup> Trường Cao Đẳng kỹ Thuật Hải Quân

Từ khóa:

TÓM TẮT

LNG  
Động cơ Diesel  
Quá trình cháy  
Khí thải  
Phân tích CFD

Trong bối cảnh các quy định về phát thải khí thải từ động cơ diesel đang ngày càng nghiêm ngặt hơn, đặc biệt là khí nhà kính (GHG), nhằm ứng phó với hiện tượng nóng lên toàn cầu và biến đổi khí hậu thì việc tìm kiếm các loại nhiên liệu sạch hơn để thay thế cho dầu diesel truyền thống là một nhiệm vụ cấp thiết. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm tìm ra giải pháp sử dụng khí thiên nhiên hóa lỏng (LNG) trên các động cơ diesel hiện có nhằm cắt giảm GHG để đáp ứng với các quy định về khí thải. Phương pháp CFD đã được sử dụng để mô phỏng quá trình cháy và hình thành phát thải bên trong buồng đốt của động cơ diesel khi làm việc với LNG. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả cắt giảm GHG CO<sub>2</sub>, khí CO, NO<sub>x</sub> và muội than khi sử dụng LNG để thay thế cho dầu diesel truyền thống. Nghiên cứu này có ý nghĩa thực tiễn trong việc góp phần giúp đạt được các mục tiêu Net-Zero mà Chính phủ đã cam kết tại Hội nghị giữa các bên liên quan đến Công ước khung về biến đổi khí hậu (COP26) vào năm 2021.

Keywords:

ABSTRACT

LNG  
Diesel engine  
Combustion  
Emission  
CFD analysis

With increasingly stringent regulations on diesel engine emissions, particularly greenhouse gases (GHGs), identifying cleaner alternatives to conventional diesel has become an urgent priority in efforts to mitigate global warming and climate change. This study investigates the feasibility of using liquefied natural gas (LNG) in existing diesel engines as a means to reduce GHG emissions and comply with emission standards. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were conducted to analyze the combustion process and emission formation in a diesel engine operating with LNG. The results demonstrate significant reductions in CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, and soot emissions when LNG replaces conventional diesel. These findings provide a practical pathway toward meeting the Net-Zero targets pledged by the Government of Vietnam at the 2021 United Nations Climate Change Conference (COP26).

\* Phạm Văn Chiến. Viện Hàng hải, Trường Đại học Giao thông Vận tải TP. Hồ Chí Minh  
Email: [chien.pham@ut.edu.vn](mailto:chien.pham@ut.edu.vn)

<https://www.doi.org/10.55228/JTST140602>

Ngày nhận bài: 19/08/2025; Ngày nộp bài sửa: 06/10/2025; Ngày chấp nhận đăng: 27/10/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/11/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

## 1. Giới thiệu

Trong những thập kỷ qua, nhu cầu năng lượng trên thế giới đã tăng 2,4% mỗi năm do sự phát triển của nền kinh tế toàn cầu và tăng trưởng dân số [1]. Bên cạnh đó, hiện tượng nóng lên toàn cầu và biến đổi khí hậu cũng đang đặt ra những thách thức rất lớn cho nhân loại ngày nay [2]. Trong bối cảnh này, Tổ chức Hàng hải Quốc tế (International Maritime Organization – IMO) đã ban hành các quy định chặt hơn về giới hạn mức phát thải từ động cơ tàu biển trong Phụ lục VI của Công ước MARPOL (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, Annex VI) [3]. Hội nghị lần thứ 26 của Các bên liên quan đến Công ước khung về biến đổi khí hậu (the 26<sup>th</sup> Conference of the Parties - COP26) của Liên hợp quốc về biến đổi khí hậu (United Nations Climate Change) năm 2021 đã thông qua các quy định về việc cắt giảm khí nhà kính (greenhouse gas – GHG) với mục tiêu đạt được sự cân bằng phát thải carbon bằng 0 (Net-Zero carbon) vào năm 2050 [4]. Việt Nam cũng nằm trong số các quốc gia ký cam kết Net-Zero tại COP26. Trong tình hình này, việc sử dụng nhiên liệu sạch hơn cũng như sử dụng năng lượng hiệu quả hơn để giảm tác động tiêu cực đến môi trường Trái đất đang nhận được rất nhiều sự quan tâm của cộng đồng khoa học [5].

Bên cạnh các quy định bắt buộc cắt giảm phát thải khí nhà kính đối với các đội tàu quốc tế đã được thông qua trước đây như: Chỉ số thiết kế hiệu quả năng lượng (EEDI – Energy Efficiency Design Index); Kế hoạch quản lý hiệu quả năng lượng tàu (SEEMP – Ship Energy Efficiency Management Plan), gần đây quy định về Chỉ số hiệu quả năng lượng đối với tàu hiện có (EEXI – Energy Efficiency Existing Ship Index) và Chỉ thị cường độ các bon (CII – Carbon Intensity Indicator) của tàu theo sửa đổi và bổ sung tại Phụ lục VI của Công ước Quốc tế về ngăn ngừa ô nhiễm do tàu gây ra (MARPOL), đã được Ủy ban Bảo vệ môi trường (MEPC) của Tổ chức Hàng hải quốc tế (IMO) thông qua tại khóa họp thứ 76 (tháng 6 năm 2021) bởi Nghị quyết MEPC.328(76) đã có hiệu lực từ ngày 01 tháng 11 năm 2022. Các sửa đổi bổ sung này tạo ra nhiều thách thức cho các đội tàu biển trên thế giới nói chung và cho các đội tàu biển Việt Nam nói riêng trong việc đạt được chứng chỉ carbon (carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) certificate) để được hành trình trên các vùng biển Quốc tế [6].

Khí tự nhiên hóa lỏng (liquefied natural gas - LNG) có thành phần chủ yếu là mê-tan (CH<sub>4</sub>) đang phát triển nhanh chóng để trở thành một trong những nguồn năng lượng sơ cấp hàng đầu và sẽ là nguồn năng lượng sơ cấp đứng thứ hai vào năm 2030 [7], [8]. CH<sub>4</sub> là hydrocarbon đơn giản nhất và được biết đến rộng rãi như một trong những nguồn mang năng lượng sạch nhất. Nó đã được sử dụng rộng rãi để thay thế dầu nhiên liệu hóa thạch thông thường trong các ngành công nghiệp khác nhau. Nó có nhiều ưu điểm so với nhiều loại nhiên liệu hóa thạch khác do khả năng vận chuyển tốt hơn, lưu trữ dễ dàng hơn, hiệu suất đốt cháy cao hơn và lượng phát thải GHG thấp hơn [9], [10]. CH<sub>4</sub> tạo ra lượng khí thải gốc carbon (CO, CO<sub>2</sub>) thấp nhất trong số các loại nhiên liệu hydrocarbon do nó chứa số lượng nguyên tử carbon (C) thấp nhất. Nó tạo ra hàm lượng oxit nitơ (NO<sub>x</sub>) rất thấp do nhiệt độ đốt cháy thấp và hầu như không tạo ra oxit lưu huỳnh (SO<sub>x</sub>) do không chứa lưu huỳnh [11]. Tuy vậy, do vẫn là một nhiên liệu hóa thạch, LNG không thể giúp ngành công nghiệp nói chung và ngành Hàng hải nói riêng đạt được mức phát thải ròng bằng không nếu không đi kèm với các công nghệ thu giữ carbon (carbon capture and storage - CCS) [12], hoặc được sản xuất, tổng hợp từ các nguồn sinh khối bền vững (bio-LNG/e-LNG) [13], [14], vốn còn rất đắt đỏ và chưa sẵn có ở quy mô lớn. Bên cạnh đó, trượt mê-tan (methane slip) cũng là một vấn đề cần được hết sức lưu ý và có giải pháp xử lý khi áp dụng LNG trên động cơ đốt trong, đặc biệt là các động cơ 4 kỳ phun nhiên liệu tại cổng nạp [15].

Ngoài LNG, còn một số loại nhiên liệu thay thế khác cũng cho hiệu quả cắt giảm GHG cao. Nhưng ưu điểm của mỗi loại nhiên liệu luôn đi kèm với một vài nhược điểm khó giải quyết hoặc chỉ có thể được giải quyết với chi phí cao. Một trong các ứng viên là methanol (CH<sub>3</sub>OH). Tương tự như CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>OH, loại rượu đơn giản nhất, cũng chỉ chứa một nguyên tử carbon trong phân tử nên khi cháy sẽ tạo ra lượng phát thải thấp nhất trong số các loại rượu. Đặc biệt CH<sub>3</sub>OH khi sử dụng làm nhiên liệu gần như không có trượt mê-tan. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của loại nhiên liệu này là hiệu suất nhiệt thấp hơn nhiều so với LNG và Diesel. Đặc biệt, CH<sub>3</sub>OH cần hệ thống cấp nhiên liệu an toàn vì độc tính [16]. Ammonia (NH<sub>3</sub>) cũng là một ứng viên tiềm năng. Nhiên liệu NH<sub>3</sub> không chứa carbon (carbon-free) nên khi cháy không

tạo ra CO<sub>2</sub> [17]. Nhưng ngoài hiệu suất nhiệt và mật độ năng lượng thấp ra thì NH<sub>3</sub> có một nhược điểm đặc biệt lớn là nó tạo ra phát thải N<sub>2</sub>O (nitrous oxide), một GHG mạnh gấp ~265 lần CO<sub>2</sub> [18]. Một nhiên liệu không chứa carbon khác cũng rất tiềm năng là hydro (H<sub>2</sub>). Nhiên liệu H<sub>2</sub> khi cháy chỉ tạo ra hơi nước. Nhưng nhược điểm của H<sub>2</sub> là nhiệt độ và tốc độ lan truyền ngọn lửa quá cao. Nhiệt độ cháy cao làm gia tăng phát thải NO<sub>x</sub>, dù không phải là GHG nhưng cũng là một loại phát thải độc hại, tác nhân gây mưa axit, và cũng phải tuân thủ các quy định của IMO và các tổ chức bảo vệ môi trường. Tốc độ lan truyền ngọn lửa cao kết hợp với nhiệt trị thấp (lower calorific value – LCV) cao làm áp suất trong xilanh động cơ tăng quá nhanh và không ổn định khi nhiên liệu cháy, gây ra hiện tượng “gõ” (knocking) động cơ, ảnh hưởng đến tuổi thọ của động cơ khi làm việc với tải cao [19].

So với các loại nhiên liệu thay thế vừa nêu, LNG cho khả năng áp dụng khả thi nhất vì nó có thể được áp dụng trên các động cơ Diesel hiện có với một chi phí hoán cải động cơ chấp nhận được cho các đội tàu Việt Nam. Cũng vì lý do này mà LNG được xem là loại nhiên liệu chuyển tiếp (transitional fuel) hay là cầu nối (bridge fuel) quan trọng từ nhiên liệu hóa thạch, chứa carbon sang các loại nhiên liệu tái tạo, bền vững, không chứa carbon [20].

Năm 2023, Việt Nam chính thức gia nhập thị trường LNG với Cảng LNG Thị Vải đang hoạt động với công suất 1 triệu tấn/năm. Đến năm 2024, kế hoạch xây dựng Cảng Cái Mép với công suất 3 triệu tấn/năm dự kiến sẽ nâng cao năng lực nhập khẩu LNG cho Việt Nam. Cảng này dự kiến sẽ đi vào hoạt động vào cuối năm 2030. Bên cạnh đó, Chính phủ Việt Nam cũng đang nỗ lực mở rộng cơ sở hạ tầng LNG để đáp ứng nhu cầu năng lượng đang tăng nhanh [21]. Thị trường LNG tại Việt Nam đang nhận được sự quan tâm và đầu tư đáng kể từ Chính phủ và các nhà đầu tư trong và ngoài nước bởi Việt Nam sở hữu nhiều lợi thế thúc đẩy sự phát triển trong tương lai. Việt Nam nằm ở trung tâm Đông Nam Á. Điều này định vị Việt Nam là một trung tâm LNG tiềm năng của khu vực. Ngoài ra, Chính phủ Việt Nam đã ký cam kết không phát thải ròng tại COP26. Do đó, các nhiên liệu thay thế sạch như LNG dự kiến sẽ nhận được sự đầu tư và hỗ trợ đáng kể từ Chính phủ trong những năm tới để thúc đẩy thị trường LNG [22], [23].

Nhận thấy vấn đề khử cacbon tại Việt Nam đang trở nên cấp thiết và sẽ có tác động lớn đến nền kinh tế quốc gia trong tương lai gần, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đề xuất một giải pháp hiệu quả. Công trình này nghiên cứu tính hiệu quả của việc thay thế dầu diesel, loại nhiên liệu hydrocarbon giàu cacbon chủ yếu được sử dụng trên các đội tàu Việt Nam, bằng NG, loại nhiên liệu hydrocarbon chứa hàm lượng cacbon thấp nhất. Tác động của LNG đến quá trình cháy và hình thành khí thải bên trong buồng đốt của động cơ được nghiên cứu bằng phương pháp phân tích động lực học chất lưu tính toán (CFD) với sự hỗ trợ của phần mềm mô phỏng AVL Fire. Các mô hình CFD sử dụng trong nghiên cứu này đã được xác thực bằng các dữ liệu thực nghiệm thu thập được trong quá trình chạy thử nghiệm động cơ trong xưởng của nhà sản xuất. Nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của LNG trong việc giảm phát thải từ động cơ diesel, đặc biệt là phát thải carbon. Việc chuyển đổi động cơ diesel hiện có sang động cơ DF chạy bằng LNG là hoàn toàn khả thi về mặt kỹ thuật, công nghệ và chi phí. Việt Nam có các cơ sở có khả năng cung cấp LNG cho ngành Hàng hải, ở cả miền Bắc và miền Nam. Quan trọng hơn, Chính phủ cũng đã có chính sách thúc đẩy năng lực cung cấp LNG cho thị trường. Tóm lại, việc chuyển đổi động cơ diesel hiện có sang động cơ DF Diesel-NG để giảm phát thải, đặc biệt là phát thải CO<sub>2</sub>, nhằm đáp ứng cam kết Phát thải ròng bằng 0 của Chính phủ là hoàn toàn khả thi, có giá trị và được khuyến nghị mạnh mẽ.

## 2. Mô phỏng động cơ

Công trình này mô phỏng quá trình cháy và hình thành khí thải bên trong buồng đốt động cơ từ thời điểm supap nạp đóng đến thời điểm supap xả mở bằng phần mềm thương mại AVL Fire [24].

### 2.1. Động cơ mô phỏng

Đối tượng nghiên cứu của công trình này là động cơ Diesel lai máy phát điện HiMSEN 6H25/33 của HYUNDAI. Đây là dòng động cơ có thiết kế đơn giản và thông minh, phù hợp để cải tiến thành động cơ chạy bằng nhiên liệu kép LNG-diesel với độ tin cậy và hiệu suất cao. Hình ảnh động cơ được trình bày trên Hình 1. Thông số cơ bản của động cơ được trình bày trên Bảng 1. Trong khi đó, thông số khai thác cơ bản của động cơ được trình bày trên Bảng 2.



**Hình 1.** Động cơ lai máy phát điện HYUNDAI-HiMSEN H25/33.

**Bảng 1.** Thông số cơ bản của động cơ.

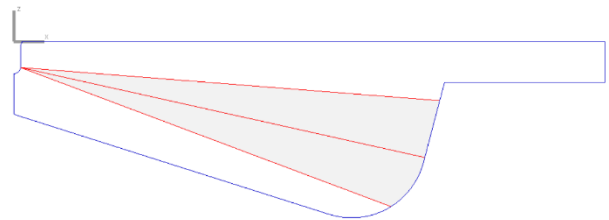
STT	Thông số	Giá trị	Đơn vị
1	Hãng sản xuất	HYUNDAI	
2	Tên động cơ	HiMSEN 6H25/33	
3	Loại động cơ	4 kỳ, tăng áp, làm mát bằng dung dịch	
4	Đường kính xilanh x Hành trình piston	250 x 330	mm
5	Tỷ số nén	18:1	
6	SFOC	180	g/kWh
7	Specific Lubricating Oil Consumption	0.6	g/kWh

**Bảng 2.** Thông số cơ bản của động cơ.

STT	Thông số	Giá trị	Đơn vị
1	Công suất xilanh	240	kW
2	Vòng quay định mức	720	vòng/phút
3	Suất tiêu hao nhiên liệu	180	g/kWh
4	Nhiệt độ khí nạp	37	°C
5	Áp suất khí nạp	2.5	bar
6	Lưu lượng nước làm mát nhiệt độ thấp	60	m <sup>3</sup> /h
7	Nhiệt độ nước làm mát vào/ra sinh hàn	36/42	°C
8	Nhiệt độ khí xả	335	°C
9	Lưu lượng khí xả	9090	kg/h
10	Áp suất gió khởi động	30	bar

## 2.2. Miền tính toán (computational domain)

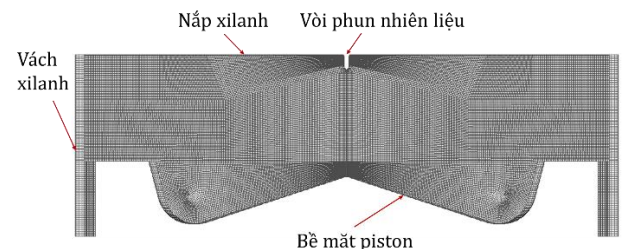
Miền tính toán của mô phỏng trong nghiên cứu này là buồng đốt của động cơ, được cấu thành từ mặt dưới của nắp xilanh, vách xilanh và bề mặt piston. Miền tính toán được xây dựng bằng nền tảng "Sketcher" của phần mềm AVL Fire [24]. Vì buồng đốt của động cơ có dạng đối xứng trục, động cơ sử dụng một vòi phun lắp đặt tại tâm của nắp xilanh, vòi phun có các lỗ phun đối xứng qua trục vòi phun nên chỉ 1/2 hình học 2D của buồng đốt được xây dựng nhằm tiết kiệm thời gian tính toán và dung lượng lưu trữ file kết quả trên máy tính. Miền tính toán của buồng đốt động cơ được trình bày trên Hình 2.



**Hình 2.** Hình học buồng đốt của động cơ cho mô phỏng.

## 2.3. Lưới tính toán (computational mesh)

Lưới toán sau được xây dựng bằng cách chia nhỏ miền tính toán thành một số lượng hữu hạn các phần tử (element) mà kết nối với nhau thông qua các nút (node). Lưới tính toán 3D trong nghiên cứu này được trình bày trên Hình 3. Các loại điều kiện biên gán trên lưới bao gồm tường cố định (stationary wall) cho nắp xilanh, tường phân lớp (layering wall) cho vách xilanh và tường di động (moving wall) cho bề mặt piston. Giá trị điều kiện biên (boundary condition) và điều kiện ban đầu (initial condition) được xác định từ báo cáo thử nghiệm tại xưởng (shop test report) của động cơ.



**Hình 3.** Lưới tính toán 3D buồng đốt động cơ.

#### 2.4. Mô hình tính toán (computational models)

Nhiều loạn của dòng khí bên trong xi lanh động cơ được mô hình "k-zeta-f". Để mô phỏng quá trình cháy xảy ra bên trong xi lanh động cơ, mô hình ngọn lửa liên kết mở rộng (Extended Coherent Flame Model - ECFM) đã được sử dụng. Trong số các mô hình đốt cháy do AVL FIRE cung cấp thì mô hình ECFM chứa tất cả các tính năng và cải tiến của các mô hình trước đó và đã được chứng minh là phù hợp để mô phỏng quá trình đốt cháy bên trong động cơ xăng, động cơ diesel và động cơ nhiên liệu kép (dual-fuel - DF) với độ chính xác cao. Quá trình phun trực tiếp nhiên liệu được mô phỏng bằng mô hình "diesel nozzle flow". Hiện tượng phân rã và bay hơi của các giọt nhiên liệu lỏng được lần lượt mô phỏng bằng mô hình WAVE phát triển bởi Kelvin-Helmholtz và mô hình Dukowicz. Mô hình tự đánh lửa "auto-ignition" được sử dụng để mô phỏng hiện tượng tự bốc cháy của nhiên liệu diesel trong buồng đốt động cơ dưới điều kiện nhiệt độ và áp suất cao [24].

Đối với sự hình thành khí thải, cơ chế Zeldovich mở rộng (extended Zeldovich model) được sử dụng để mô phỏng quá trình hình thành NO nhiệt bên trong xi lanh động cơ. Trong khi đó, quá trình hình thành muội than do quá trình cháy không hết nhiên liệu bên trong buồng đốt động cơ được mô tả bằng cơ chế muội than động học (kinetic soot model). Mô hình Walljet1 phát triển từ mô hình va chạm do Naber và Reitz xây dựng được sử dụng để mô phỏng tương tác giữa các giọt nhiên liệu và vách buồng đốt [24]. Các mô hình tính toán sử dụng trong nghiên cứu được trình bày trong Bảng 3.

**Bảng 3.** Mô hình CFD.

Mô hình	Mô tả
Dòng chảy	k-zeta-f
Cháy	Extended Coherent Flame Model - ECFM
Khí thải	No Zeldovich mở rộng
	Soot Kinetic soot model
Đánh lửa	Auto-Ignition
	Phân rã WAVE
Phun nhiên liệu	Bay hơi Dukowicz
	Tương tác giọt/vách Walljet1

#### 2.5. Điều kiện biên và điều kiện ban đầu (boundary and initial conditions)

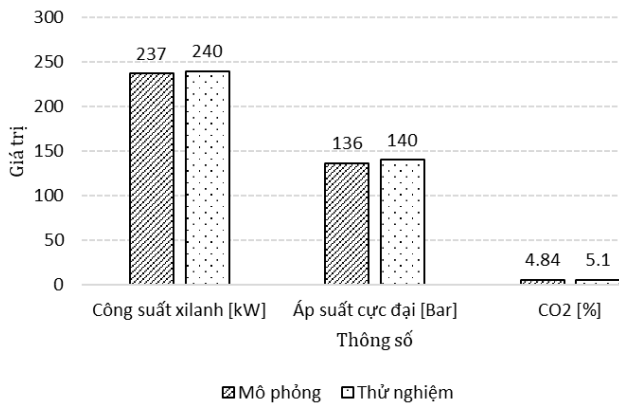
Trong nghiên cứu này, quá trình hoạt động của động cơ khi làm việc với dầu diesel và nhiên liệu LNG được mô phỏng nhằm đánh giá hiệu quả cắt giảm phát thải của nhiên liệu LNG khi áp dụng trên động cơ diesel. Trong cả hai chế độ làm việc, công suất của động cơ được giữ cho không đổi, chỉ điều chỉnh lượng nhiên liệu cung cấp cho động cơ. Quá trình mô phỏng được thực hiện từ thời điểm supap nạp đóng (IVC - intake valve closing) cho đến thời điểm supap xả mở ra (EVO - exhaust valve opening), bao trùm quá trình nén, cháy và giãn nở sinh công của động cơ. Các thời gian đóng mở supap, thời gian phun nhiên liệu, góc phun nhiên liệu... và các thông số khai thác động cơ được lấy từ báo cáo thử nghiệm động cơ tại xưởng (shop test report). Các điều kiện biên và điều kiện ban đầu sử dụng cho mô phỏng trong nghiên cứu này được trình bày trong Bảng 4.

**Bảng 4.** Điều kiện biên và điều kiện ban đầu.

Thông số	Giá trị
IVC	35 độ gqtk sau ĐCD
EVO	62 độ gqtk trước ĐCD
Góc phun sớm nhiên liệu	12 độ gqtk trước ĐCT
Nhiệt độ/áp suất khí nạp	37 °C/3.5 bar
Nhiệt độ bề mặt piston và bề mặt nắp xilanh	300 °C
Nhiệt độ bề mặt vách xilanh	200 °C

#### 2.6. Xác thực mô hình CFD

Các mô hình CFD được xác thực bằng cách so sánh kết quả mô phỏng với dữ liệu thử nghiệm động cơ tại xưởng (shop test data) của nhà sản xuất. Các thông số dùng để so sánh bao gồm công suất xilanh động cơ, áp suất cực đại xilanh và phát thải CO<sub>2</sub>. Kết quả so sánh cho thấy mức độ phù hợp tốt giữa kết quả mô phỏng và thử nghiệm. Độ chênh lệch lớn nhất giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm chỉ là 5,1% trong trường hợp phát thải CO<sub>2</sub>. Độ chênh lệch này là chấp nhận được trong mô phỏng CFD.



Hình 4. Xác thực mô hình CFD.

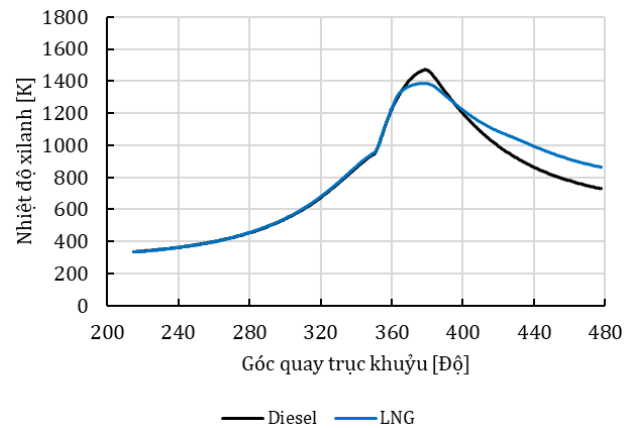
### 3. Kết quả mô phỏng

#### 3.1. Nhiệt độ và phân bố nhiệt độ trong xilanh

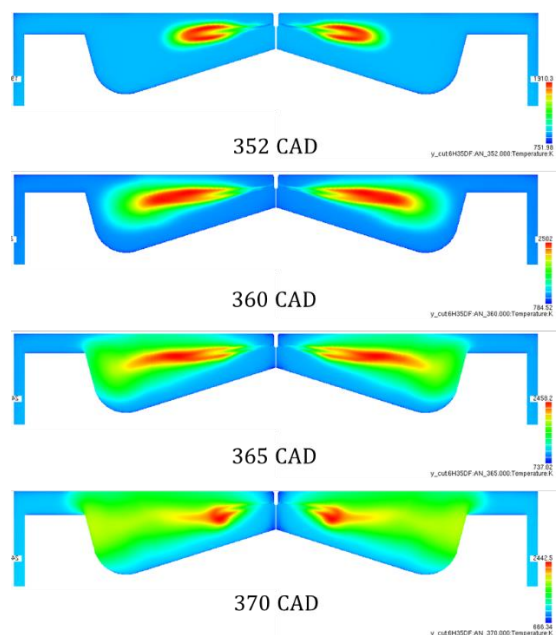
Nhiệt độ trung bình bên trong xilanh động cơ khi làm việc với dầu diesel và LNG được trình bày trên Hình 5. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng khi sử dụng nhiên liệu LNG thì nhiệt độ đỉnh trong xilanh động cơ thấp hơn so với trường hợp sử dụng dầu diesel. Tuy nhiên, nhiệt độ khí xả của động cơ trong trường hợp chạy bằng LNG lại cao hơn trong trường hợp động cơ chạy bằng dầu diesel. Lí do của hiện tượng giảm nhiệt độ buồng đốt là vì đặc điểm của quá trình cháy dầu diesel và khí LNG. Trong trường hợp động cơ chạy bằng dầu diesel thì nhiên liệu chỉ được phun vào trong buồng đốt động cơ tại cuối kỳ nén, trước ĐCT 12 độ góc quay trục khuỷu. Trong khi đó, khi làm việc với LNG, nhiên liệu được phun vào buồng đốt qua cổng nạp trong hành trình hút của động cơ. Như vậy, trong suốt quá trình nén, nhiên liệu LNG và không khí có nhiều thời gian để hòa trộn với nhau để tạo thành một hỗn hợp nhiên liệu-không khí có độ đồng nhất cao. Mặc dù nhiên liệu được cấp vào buồng đốt từ trước khi quá trình nén được tiến hành, nhưng vì LNG có nhiệt độ tự bốc cháy cao nên không thể tự bốc cháy chỉ bởi quá trình nén như dầu diesel. Đến cuối quá trình nén, khi áp suất và nhiệt độ bên trong buồng đốt động cơ tăng cao, một lượng nhỏ dầu diesel (khoảng 2-5% theo khối lượng) được phun vào buồng đốt để tạo nguồn đánh lửa. Dầu diesel lúc này đóng vai trò là nhiên liệu đốt mồi (pilot fuel) để kích nổ hỗn hợp LNG-không khí đã được trộn sẵn trong buồng đốt. Do đã được trộn sẵn thành một hỗn hợp đồng nhất từ trước nên nhiên liệu được phân bố đồng đều trong toàn bộ không gian buồng đốt. Hệ quả là khi được kích nổ, quá trình cháy của nhiên liệu diễn ra gần như hầu khắp buồng đốt động cơ. Quá trình

cháy diễn ra trong toàn bộ thể tích buồng đốt giúp phân bố đều nhiệt trong buồng đốt, làm giảm nhiệt độ cháy cực đại của xilanh như thể hiện trên 5. Nhiệt độ cháy cực đại trong xilanh giảm xuống tiềm ẩn khả năng giảm phát NO nhiệt. Đây chính là một trong những đặc trưng và lợi thế của nhiên liệu LNG so với dầu diesel ngoài khả năng cắt giảm phát thải carbon do chứa số nguyên tử carbon trong công thức ít hơn.

Phân bố nhiệt độ bên trong xilanh động cơ tại một số góc quay trục khuỷu (crank angle degree – CAD) được thể hiện trên Hình 6. Hình ảnh mô phỏng cho thấy rõ quá trình hình thành và phát triển ngọn lửa của nhiên liệu từ các lỗ phun ra khắp toàn bộ thể tích buồng đốt. Trong đó, khu vực có nhiệt độ cao nhất nằm ở lõi của tia phun với nhiệt độ cao nhất đạt hơn 2500 K. Đây chính là điều kiện cho sự hình thành phát thải NO nhiệt bên trong buồng đốt động cơ.



Hình 5. Nhiệt độ trung bình trong xilanh động cơ.

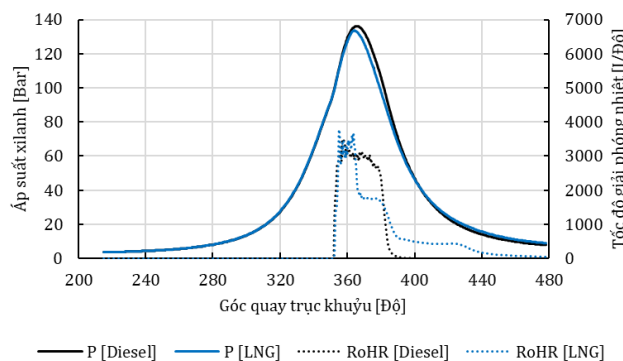


Hình 6. Phân bố nhiệt độ bên trong xilanh động cơ.

### 3.2. Áp suất và tốc độ giải phóng nhiệt bên trong xilanh

Áp suất (P - pressure) và tốc độ giải phóng nhiệt (RoHR - rate of heat release) trung bình trong xilanh động cơ trong cả hai trường hợp làm việc với dầu diesel và LNG được trình bày trên Hình 7. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng áp suất cực đại trong xilanh động cơ khi làm việc với dầu diesel cao hơn so với khi làm việc với LNG. Nguyên nhân gây ra hiện tượng này là do đặc tính cháy của động cơ khi làm việc với dầu diesel khác với khi làm việc với LNG. Khi làm việc với dầu diesel, nhiên liệu chỉ được phun vào buồng đốt ở giai đoạn cuối của quá trình nén. Sau khi được phun vào buồng đốt thì dầu diesel không thể bốc cháy ngay mà cần một khoảng thời gian để nhận nhiệt và bay hơi cho đến khi hơi dầu có thể tự bốc cháy để tự kích nổ. Khoảng thời gian này gọi là thời gian trì hoãn sự cháy. Trong khoảng thời gian trì hoãn sự cháy này nhiên liệu liên tục được vòi phun phun vào buồng đốt và tích tụ lại trong buồng đốt. Khi nhiên liệu bắt đầu bốc cháy thì lượng nhiên liệu tích tụ sẵn trong buồng đốt sẽ bốc cháy mãnh liệt làm tăng nhanh áp suất bên trong xilanh, đây là giai đoạn tăng áp suất của quá trình cháy.

Trong khi đó, khi làm việc với LNG thì nhiên liệu chính được phun sẵn vào trong buồng đốt động cơ trong suốt hành trình nạp của động cơ. Đến cuối kỳ nén thì một lượng nhỏ dầu diesel (khoảng 2 - 5% theo khối lượng) được phun vào buồng đốt để kích nổ hỗn hợp LNG-không khí trộn trước. Do lượng dầu diesel sử dụng ít hơn rất nhiều so với trường hợp động cơ có làm việc với dầu diesel nên khi cháy không làm áp suất trong xilanh động cơ tăng quá cao.



**Hình 7.** Áp suất và tốc độ giải phóng nhiệt bên trong xilanh.

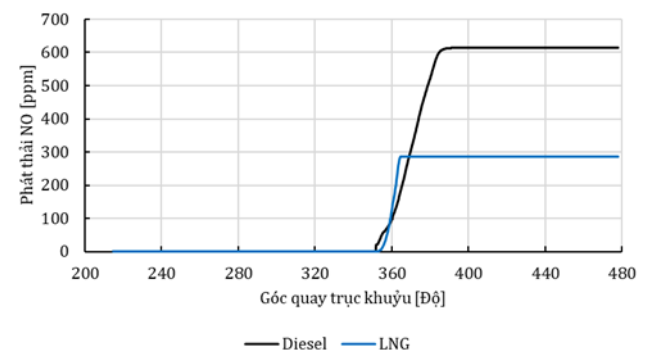
Tốc độ giải phóng nhiệt trong xilanh động cơ trong cả hai trường hợp cũng được mô tả đúng với lý thuyết động cơ đốt trong. Thật vậy, ngay khi dầu diesel bốc

cháy (trong cả hai trường hợp) thì tốc độ giải phóng nhiệt trong xilanh tăng cực nhanh từ 0 lên giá trị cực đại do lượng nhiên liệu tích tụ sẵn trong xilanh bốc cháy mạnh sau khoảng thời gian trì hoãn sự cháy. Ngay sau đó, đối với trường hợp dầu diesel, tốc độ giải phóng nhiệt được giữ gần như không đổi trước khi giảm nhanh về 0 khi nhiên liệu đã cháy hết. Trong khi đó, đối với trường hợp LNG, tốc độ giải phóng nhiệt trong xilanh bao gồm hai giai đoạn, giai đoạn có tốc độ giải phóng nhiệt cao ngay sau khi dầu diesel đốt mồi bốc cháy và giai đoạn giải phóng nhiệt thấp hơn nhưng kéo dài hơn trong quá trình giãn nở của xilanh. Đây chính là giai đoạn giải phóng nhiệt trong xilanh động cơ của nhiên liệu LNG.

### 3.3. Phát thải NO

Phát thải NO của động cơ trong cả hai chế độ làm việc được trình bày trên Hình 8. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng, phát thải NO trong trường hợp động cơ làm việc với LNG giảm xuống hơn một nửa (xuống dưới 300 ppm so với trên 600 ppm) so với trường hợp động cơ làm việc với dầu diesel. Đây là hệ quả tất yếu khi nhiệt độ cực đại trong xilanh giảm xuống khi động cơ làm việc với LNG thay cho diesel.

Như đã biết, phát thải NO bao gồm NO nhiệt (thermal NO), NO tức thời (prompt NO) và NO nhiên liệu (fuel NO). Trong đó, NO nhiệt hình thành trong các khu vực của buồng đốt động cơ có nhiệt độ cao hơn 1800 K. Trong điều kiện này, N<sub>2</sub> trong không khí nạp sẽ phản ứng với O<sub>2</sub> để hình thành NO. Yếu tố chính ảnh hưởng đến phát thải NO nhiệt là nhiệt độ. Theo đó, nhiệt độ càng cao thì sự hình thành NO nhiệt càng tăng và ngược lại.



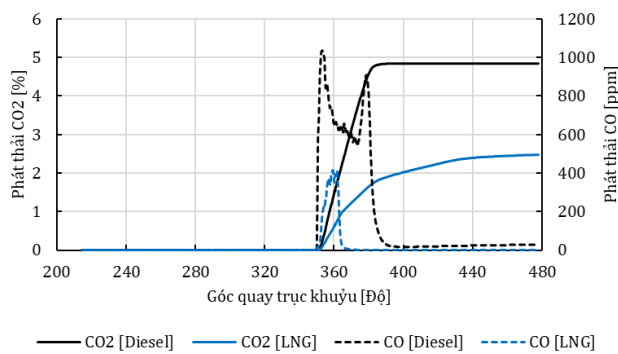
**Hình 8.** Phát thải NO trong buồng đốt động cơ.

Như đã trình bày trong tiểu mục 3.1, nhiệt độ cực đại trong xilanh động cơ khi làm việc với LNG thấp hơn đáng kể khi so sánh với trường hợp động cơ làm việc với dầu diesel. Hệ quả là phát thải NO nhiệt trong

xilanh khi động cơ làm việc với LNG thấp hơn rất nhiều so với khi động cơ làm việc với dầu diesel, như thể hiện trên Hình 8.

### 3.4. Phát thải carbon (CO và CO<sub>2</sub>)

Phát thải carbon (CO và CO<sub>2</sub>) của động cơ trong cả hai trường hợp khi làm việc với dầu diesel và LNG được trình bày trên Hình 9. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng, phát thải carbon thải ra từ động cơ khi làm việc với LNG chỉ là 2.48% so với 4.84% khi làm việc với dầu diesel. Nghĩa là phát thải CO<sub>2</sub> của động cơ khi làm việc với LNG thấp hơn 48.67% so với khi làm việc với dầu diesel. Đây là hệ quả tất yếu của việc thay thế đa phần dầu diesel chứa nhiều carbon hơn (C<sub>13</sub>H<sub>23</sub>) bằng nhiên liệu chứa ít carbon hơn (CH<sub>4</sub>). CH<sub>4</sub>, thành phần chủ yếu của LNG, được biết đến là nhiên liệu đơn giản nhất và sạch nhất trong số nhiên liệu hydrocarbon do chỉ chứa duy nhất một nguyên tử carbon. Vì CO và CO<sub>2</sub> là sản phẩm cháy của carbon nên nhiên liệu chứa ít carbon hơn đương nhiên sinh ra ít phát thải carbon hơn. Lượng cắt giảm 48.67% đảm bảo giúp động cơ đáp ứng được với yêu cầu cắt giảm tối thiểu 40% phát thải CO<sub>2</sub> của cam kết Net-Zero giai đoạn đến 2030 của Chính phủ tại hội nghị COP 26, diễn ra ở Glasgow, Vương Quốc Anh, năm 2021.



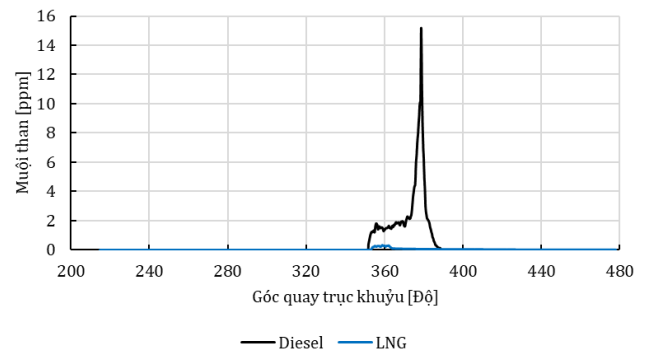
**Hình 9.** Phát thải carbon bên trong xilanh động cơ.

Xét về mặt hóa học, CO là sản phẩm của quá trình cháy không hoàn toàn hydrocarbon, trong khi CO<sub>2</sub> là sản phẩm cháy hoàn toàn của hydrocarbon. Ban đầu, khi nhiên liệu hydrocarbon cháy, thành phần carbon trong nhiên liệu sẽ bị oxi hóa bởi O<sub>2</sub> để hình thành CO. CO sau đó mới tiếp tục được O<sub>2</sub> oxi hóa để tạo thành CO<sub>2</sub>, là thành phần bền vững hơn của khí xả động cơ. Đây là lí do giải thích cho hai xu hướng hình thành trái ngược nhau. Trong đó, CO được hình thành sớm hơn, nhưng sau đó giảm đi nhanh chóng, thậm chí giảm về 0 nếu quá trình cháy xảy ra hoàn toàn. Trong khi đó, phát thải CO<sub>2</sub> hình thành muộn hơn nhưng sau đó

tăng lên đến giá trị cực đại rồi duy trì giá trị đó cho đến khi được xả ra khỏi xilanh động cơ [25]. Các xu hướng này được mô tả một cách chính xác trong mô phỏng như trình bày trên Hình 9.

### 3.5. Phát thải muội than (soot)

Phát thải muội than hình thành bên trong buồng đốt khi động cơ làm việc với dầu diesel và LNG được trình bày trên Hình 10. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả giảm phát thải muội than rất hiệu quả của nhiên liệu LNG. Khi động cơ làm việc với nhiên liệu LNG, hầu như không có muội than hình thành trong buồng đốt động cơ. Có hai lí do giải thích cho hiện tượng này. Thứ nhất là vì LNG (chủ yếu chứa CH<sub>4</sub>) được xem là nhiên liệu hóa thạch sạch và đơn giản nhất. Vì có cấu trúc rất đơn giản, chỉ có 1 nguyên tử carbon liên kết với 4 nguyên tử hydro nên quá trình oxi hóa nhiên liệu diễn ra dễ dàng hơn, hệ quả là tạo ra ít muội than hơn. Lí do thứ hai là do tỷ lệ đương lượng nhiên liệu-không khí thấp trong buồng đốt khi động cơ làm việc với nhiên liệu LNG. Như đã đề cập, khi làm việc với LNG thì nhiên liệu được nạp vào xilanh động cơ trong quá trình nạp, quá trình nén sẽ nén hỗn hợp nhiên liệu-không khí trộn sẵn. Thời gian hoard trộn dài trong suốt quá trình nén của động cơ khiến chất lượng hòa trộn giữa nhiên liệu và không khí trong buồng đốt động cơ diễn ra tốt hơn. Hệ quả là tỷ lệ đương lượng nhiên liệu-không khí (fuel-air equivalent ratio) được giảm xuống. Tỷ lệ đương lượng nhiên liệu-không khí giảm xuống làm giảm sự hình thành muội than trong buồng đốt động cơ.



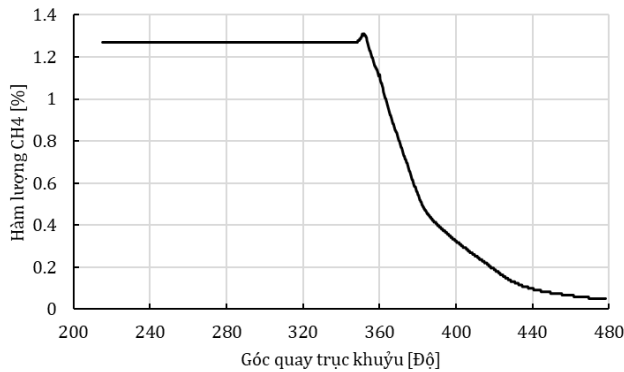
**Hình 10.** Phát thải muội than bên trong xilanh động cơ.

Kết quả mô phỏng cũng mô tả đúng đặc tính muội than của động cơ đốt trong. Thực vậy, quan sát đồ thị trên Hình 10 ta thấy, trong suốt quá trình nén, sự hình thành muội than là bằng 0. Nhưng khi quá trình cháy bắt đầu thì hàm lượng muội than trong buồng đốt động cơ tăng lên. Đây là hệ quả của hiện tượng cháy

không hoàn toàn của nhiên liệu. Tuy nhiên, sau khi lượng muội than sinh ra đạt cực đại thì muội than sẽ bị oxy hóa bởi dư lượng O<sub>2</sub> trong khí cháy của động cơ trong điều kiện nhiệt độ rất cao của buồng đốt. Thường thì lượng muội than hình thành trong quá trình cháy sẽ bị oxy hóa (đốt cháy) hoàn toàn trong các quá trình sau đó (giai đoạn cháy rớt) của động cơ như thể hiện trên Hình 10.

### 3.6. Trượt mê-tan (Methane slip)

Hàm lượng CH<sub>4</sub> còn sót lại trong khí xả động cơ (methane slip) sau mỗi chu kỳ cháy của động cơ được trình bày trên Hình 11. Theo đó, sau mỗi chu kỳ cháy của động cơ, hàm lượng CH<sub>4</sub> còn sót lại trong xilanh động cơ và bị xả ra ngoài môi trường là 0,05% (0,0005 kg CH<sub>4</sub>/1 kg khí xả), bằng 3.85% tổng lượng CH<sub>4</sub> cung cấp cho động cơ.



**Hình 11.** Hàm lượng NH<sub>3</sub> trong xilanh động cơ.

Theo Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi Khí hậu (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), CH<sub>4</sub> được ước tính có chỉ số Tiềm năng nóng lên toàn cầu (Global Warming Potential - GWP) từ 27 - 30 trong 100 năm. Khí CH<sub>4</sub> phát thải hiện nay tồn tại trung bình khoảng một thập kỷ, ngắn hơn nhiều so với CO<sub>2</sub>. Tuy nhiên, CH<sub>4</sub> cũng hấp thụ nhiều năng lượng hơn CO<sub>2</sub>. Hiệu ứng rỗng của thời gian sống ngắn hơn và khả năng hấp thụ năng lượng cao hơn được phản ánh trong GWP. Nếu tính trong vòng 20 năm chỉ số GWP của CH<sub>4</sub> khoảng 81 - 83 [26].

Như vậy, tính trong dài hạn (100 năm), lượng phát thải CO<sub>2</sub> tương đương CO<sub>2e</sub> (CO<sub>2</sub>-equivalent) của động cơ quy ra từ phát thải CH<sub>4</sub> tính cho 1kg khí thải khi làm việc trong chế độ DF là:

$$CO_2e(CH_4) = 0,0005 \times 28,5 = 0,01425(\text{kg } CO_2e) \quad (1)$$

Như vậy, tổng lượng phát thải CO<sub>2</sub> tương đương tính cho 1kg khí xả khi động cơ làm việc ở chế độ DF là:

$$CO_2e = CO_2 + CO_2e(CH_4) = 0,0248 + 0,01425 = 0,03905 (\text{kg } CO_2e) \quad (2)$$

Khi so sánh với lượng phát thải CO<sub>2</sub> của động cơ khi làm việc với chế độ Diesel thì lượng cắt giảm CO<sub>2</sub> tương đương đạt được là:

$$\begin{aligned} \Delta CO_2(\%) &= \frac{(CO_2(DF) - CO_2(Diesel)) \times 100}{CO_2(Diesel)} \\ &= \frac{(0,03905 - 0,0484) \times 100}{0,0484} = -19,3\% \end{aligned} \quad (3)$$

Nếu tính trong ngắn hạn (20 năm), lượng phát thải CO<sub>2</sub> tương đương CO<sub>2e</sub> (CO<sub>2</sub>-equivalent) của động cơ quy ra từ phát thải CH<sub>4</sub> tính cho 1kg khí thải khi làm việc trong chế độ DF là:

$$CO_2e(CH_4) = 0,0005 \times 82 = 0,041 (\text{kg } CO_2e) \quad (4)$$

Như vậy, tổng lượng phát thải CO<sub>2</sub> tương đương tính cho 1kg khí xả khi động cơ làm việc ở chế độ DF là:

$$CO_2e = CO_2 + CO_2e(CH_4) = 0,0248 + 0,041 = 0,0658 (\text{kg } CO_2e) \quad (5)$$

Trong trường hợp này, so với lượng phát thải CO<sub>2</sub> của động cơ trong chế độ Diesel thì chế độ DF làm tăng lượng CO<sub>2</sub> tương đương là:

$$\begin{aligned} \Delta CO_2(\%) &= \frac{(CO_2(DF) - CO_2(Diesel)) \times 100}{CO_2(Diesel)} \\ &= \frac{(0,0658 - 0,0484) \times 100}{0,0484} = 36\% \end{aligned} \quad (6)$$

Kết quả tính toán cho thấy rằng nếu mục tiêu là cắt giảm tích lũy CO<sub>2</sub> lâu dài, với GWP<sub>100</sub> là khung phổ biến, thì hoán cải động cơ Diesel thành động cơ DF để sử dụng LNG đem lại hiệu quả, nhưng nếu mục tiêu là giảm ấm lên toàn cầu trong thời hạn ngắn (GWP<sub>20</sub>) thì việc sử dụng LNG không những không có hiệu quả mà còn làm cho tình trạng càng trở nên trầm trọng hơn do do tác động tiêu cực của trượt mê-tan.

Kết quả này chỉ ra một điều hết sức quan trọng đáng lưu tâm là để giải quyết một vấn đề khí thải đôi khi chỉ áp dụng duy nhất một giải pháp kỹ thuật không phải lúc nào cũng đem lại hiệu quả. Nghiên cứu này chỉ tập trung vào giải pháp sử dụng loại nhiên liệu chứa ít carbon hơn (CH<sub>4</sub>) để thay thế cho loại nhiên

liệu chứa nhiều carbon (Diesel –  $C_{13}H_{23}$ ) nhằm cắt giảm lượng phát thải  $CO_2$  mà chưa quan tâm đến mặt trái của vấn đề là động cơ DF 4 kỳ phun nhiên liệu tại cổng nạp tạo ra lượng phát thải  $CH_4$  cao (trong nghiên cứu này là 3.85% lượng  $CH_4$  phun vào xilanh động cơ bị xả ra ngoài). Để LNG có thể phát huy được hiệu quả của nó trong việc cắt giảm phát thải  $CO_2$  tương đương cả trong ngắn hạn và dài hạn thì cần áp dụng thêm các giải pháp kỹ thuật khác. Các giải pháp này sẽ được trình bày trong tiểu mục 4.2.3 - Kiến nghị.

## 4. Kết luận và Kiến nghị

### 4.1. Kết luận

Nghiên cứu đã thực hiện thành công việc mô phỏng quá trình cháy và hình thành khí thải bên trong xilanh động cơ diesel nhằm chứng minh hiệu quả của nhiên liệu LNG trong việc cắt giảm phát thải từ động cơ diesel. Các kết quả đạt được của nghiên cứu bao gồm:

- Mô phỏng được quá trình cháy để từ đó tính toán được nhiệt độ trung bình và phân bố nhiệt độ bên trong xilanh động cơ. Trong đó, kết quả mô phỏng chỉ ra rằng: nhiên liệu LNG giúp giảm bớt nhiệt độ khí cháy trong buồng đốt, yếu tố giúp cắt giảm  $NO$  nhiệt; phương pháp phun LNG tại cổng nạp trong quá trình nạp khí giúp giảm tỷ lệ đương lượng nhiên liệu-không khí, qua đó giúp cắt giảm phát thải muội than hình thành trong buồng đốt động cơ;

- Mô phỏng và tính toán được tốc độ giải phóng nhiệt và áp suất trung bình trong xilanh động cơ. Nghiên cứu cho thấy hiệu quả giảm áp suất cháy cực đại của nhiên liệu LNG mà không gây sụt giảm công suất động cơ. Điều này đồng thời giúp giảm ứng suất cơ lên buồng đốt trong quá trình nổ nhưng không làm sụt giảm công suất động cơ;

- Phát thải  $NO$  được cắt giảm đáng kể do nhiệt độ cháy trong buồng đốt động cơ được giảm xuống khi sử dụng nhiên liệu LNG;

- Phát thải muội than được cắt giảm vì chất lượng hòa trộn nhiên liệu-không khí được nâng cao do áp dụng phương pháp phun nhiên liệu tại cổng nạp trong quá trình nạp của động cơ khiến nhiên liệu có nhiều thời gian hơn để hòa trộn với không khí nạp trước khi quá trình cháy diễn ra;

- Phát thải  $CO$  được giảm xuống, đặc biệt, phát thải  $CO_2$  được cắt giảm 48.67% khi sử dụng nhiên liệu LNG thay cho dầu diesel giúp động cơ đáp ứng được với cam kết Net-Zero giai đoạn đến 2023 của Chính phủ tại COP 26. Đây chính là mục tiêu chính của nghiên cứu;

- Bên cạnh đó, mặt trái của nhiên liệu LNG là ô nhiễm khí  $CH_4$  do hiện tượng trượt mê-tan. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, sử dụng LNG để thay thế cho dầu Diesel có hiệu quả cắt giảm GHG trong dài hạn (GWP-100). Cụ thể, tổng lượng  $CO_2$  tương đương do động cơ thải ra khi sử dụng LNG được cắt giảm 19.3% so với khi sử dụng Diesel. Tuy nhiên, xét trong ngắn hạn (GWP-20) thì nhiên liệu LNG làm tăng lượng phát thải  $CO_2$  tương đương khoảng 36% so với dầu Diesel. Điều này đòi hỏi áp dụng thêm các giải pháp kỹ thuật khác để việc sử dụng LNG trở nên hiệu quả trong ngắn hạn.

### 4.2. Kiến nghị

#### 4.2.1. Thách thức

Để sử dụng LNG rộng rãi và hiệu quả, nhiều thách thức về kỹ thuật và kinh tế cần được giải quyết. LNG không thể được sử dụng trực tiếp trong động cơ diesel thông thường nếu không có sự hoán cải. Những thách thức về mặt kỹ thuật và kinh tế chính cần được giải quyết bao gồm [27]

##### 4.2.1.1. Thách thức kỹ thuật

- Cải tiến công nghệ hoặc nâng cấp động cơ: Động cơ diesel cần được cải tiến để hoạt động ở chế độ nhiên liệu kép (dual-fuel - DF) [28], [29]. Trong đó LNG đóng vai trò là nhiên liệu chính, trong khi diesel đóng vai trò là nhiên liệu mồi. Trong trường hợp sử dụng hoàn toàn LNG, động cơ diesel cần được thay thế bằng động cơ khí (gas engine) chuyên dụng. Những thách thức cần khắc phục là kiểm soát quá trình cháy, chống kích nổ (do trị số octan cao hơn), thiết kế lại kim phun để phun diesel mồi chính xác và hiệu chuẩn hệ thống điều khiển;

- Lưu trữ và xử lý nhiên liệu: LNG yêu cầu lưu trữ ở nhiệt độ cực thấp ( $-162\text{ }^\circ\text{C}$ ). Do đó, những thách thức cần khắc phục là giới hạn về không gian và trọng lượng của các bình chứa, quản lý khí bay hơi (boil-off gas - BOG) và các rủi ro an toàn liên quan đến khả năng cháy và áp suất [30];

- Hệ thống phun và pha trộn nhiên liệu: LNG phải được hóa hơi và trộn với không khí trước khi vào buồng đốt. Do đó, để quá trình đốt cháy diễn ra đúng cách, cần có hệ thống hóa hơi và pha trộn phù hợp. Kim phun nhiên liệu cần được sửa đổi (đối với hệ thống DF) hoặc thay thế (đối với hệ thống phun khí trực tiếp), và cần có bộ điều khiển tỷ lệ đương lượng nhiên liệu-không khí phù hợp [31]. Ngoài ra, nên điều chỉnh tăng áp để tránh kích nổ hoặc đánh lửa nhầm.

- Hiệu suất khởi động lạnh (cold-start system): Hệ thống LNG có thể gặp khó khăn trong điều kiện khí hậu cực lạnh do ảnh hưởng của nhiệt độ cực thấp lên đường ống nhiên liệu và bộ phận tái hóa hơi. Vì vậy, phương pháp khởi động lạnh động cơ cần được tính đến;

- Khả năng tương thích của hệ thống hậu xử lý khí thải (after-treatment system): Những thay đổi về khí thải ảnh hưởng đến bộ lọc hạt diesel (DPF) và hệ thống khử xúc tác chọn lọc (SCR) [32]. Do đó, cần phải tối ưu hóa lại các hệ thống hậu xử lý khí thải.

#### 4.2.1.2. Thách thức kinh tế

- Đầu tư ban đầu cao: Chi phí hoán cải hoặc thay thế động cơ cao. Thiết bị trong hệ thống cung cấp LNG (bồn chứa, bộ phận tái hóa hơi) đắt tiền [33];

- Cơ sở hạ tầng nhiên liệu: Các trạm tiếp nhiên liệu hiện nay còn hạn chế. Chi phí thiết lập các trạm tiếp nhiên liệu cực thấp rất cao (hơn 1 triệu đô la Mỹ cho mỗi trạm đối với LNG);

- Biến động giá nhiên liệu và tình trạng sẵn có: Giá LNG thay đổi theo khu vực và bị ảnh hưởng bởi thị trường dầu khí. Vì vậy, lợi tức đầu tư (ROI) dài hạn cần có các ưu đãi hoặc trợ cấp nhiên liệu [34];

- Bảo dưỡng và Đào tạo: Kỹ thuật viên cần được đào tạo đặc biệt để làm việc và bảo trì an toàn với các hệ thống khí lạnh. Phụ tùng thay thế cho hệ thống DF có thể khan hiếm. Rủi ro thời gian chết tăng do tính phức tạp về mặt kỹ thuật;

- Rào cản về quy định và đăng kiểm: Động cơ phải đáp ứng các quy định về khí thải và an toàn trong nước và quốc tế. Quy trình phê duyệt cho các động cơ đã được hoán cải có thể kéo dài và tốn kém.

#### 4.2.2. Tình trạng cung cấp LNG tại Việt Nam

Hiện nay, Việt Nam có hai cảng LNG là cảng Thị Vải và cảng Cái Mép, với công suất 4 triệu tấn/năm

(MTPA). Cảng Thị Vải đã được vận hành từ tháng 10 năm 2023, với công suất nhập khẩu ban đầu là 1 MTPA, có bồn chứa 180.000 m<sup>3</sup> và khả năng tái hóa khí 171 tấn/giờ ( $\approx 1,4$  tỷ m<sup>3</sup>/năm) [34]. Công suất xuất hàng đang được tối ưu hóa từ 5,7 triệu m<sup>3</sup>/ngày lên 7,7 triệu m<sup>3</sup>/ngày, đảm bảo nguồn cung đáng tin cậy, đặc biệt là trong mùa khô [35]. Kế hoạch mở rộng đang được tiến hành để tăng công suất lên 3 MTPA vào năm 2029, chờ ký hợp đồng thiết kế, mua sắm và xây dựng (EPC) vào cuối năm 2025 [36]. Cái Mép, cảng 3 MTPA, hiện đang trong giai đoạn đưa vào vận hành vào tháng 5 năm 2024 và dự kiến sẽ sớm bắt đầu hoạt động thương mại [37]. Nó đã được trang bị ba bồn chứa trên bờ với tổng dung tích lưu trữ là 220.000 m<sup>3</sup> và có thể phân phối LNG qua đường ống, xe tải, tàu nhỏ hơn và cho các khách hàng công nghiệp gần đó [38]. Về đơn vị lưu trữ và tái khí hóa nổi (FSRU), PV GAS (chủ đầu tư của kho cảng Thị Vải) đang có kế hoạch triển khai một FSRU với dung tích lưu trữ và tái khí hóa là 135.000–174.000 m<sup>3</sup> lên đến 14 triệu m<sup>3</sup>/ngày, dự kiến trong giai đoạn 2026–2029. Điều này sẽ thúc đẩy tổng dung tích tái khí hóa của khu vực phía Nam lên khoảng 22 triệu m<sup>3</sup>/ngày [39]. Tổng công suất nhập khẩu từ Thị Vải (1 MTPA) và Cái Mép (3 MTPA) sẽ đạt 4 MTPA. Trong khi hai kho cảng hiện tại đã có thể nhập khẩu tới 4 MTPA, thì mức sử dụng thực tế vẫn thấp hơn — PV GAS chỉ nhận được khoảng 4 chuyến hàng ( $\sim 300.000$  tấn) từ Thị Vải [40]. PV GAS đã nhập khẩu khoảng 400 triệu m<sup>3</sup> LNG vào năm 2024 ( $\sim 300.000$  tấn), chủ yếu để cung cấp cho các nhà máy điện trong mùa cao điểm [41], [42].

#### 4.2.3. Kiến nghị

Như vậy, về chiến lược dài hạn, dựa trên các kết quả đạt được của nghiên cứu, để áp dụng LNG trên các đội tàu Việt Nam, nhóm tác giả kiến nghị các nhà máy đóng tàu trang bị động cơ tiên tiến sử dụng nhiên liệu kép (DF engine) chạy bằng nhiên liệu LNG cho các tàu đóng mới nhằm cắt giảm phát thải tại gốc thay vì sử dụng động cơ diesel truyền thống.

Đối với các tàu hiện có đang sử dụng động cơ diesel thì chủ tàu có thể thảo luận với các đơn vị sửa chữa và Đăng kiểm để hoán cải các tàu sử dụng động cơ diesel thành tàu sử dụng động cơ DF. Về mặt kỹ thuật, một động cơ diesel hoàn toàn có thể được hoán cải thành một động cơ DF chạy bằng nhiên liệu chính là LNG và được đánh lửa bằng nhiên liệu mồi là dầu

diesel bằng cách hoán cải hệ thống cung cấp nhiên liệu với chi phí hợp lý.

Tuy nhiên, đối với chiến lược ngắn hạn, để việc sử dụng LNG trở nên có hiệu quả trên động cơ 4 kỳ cấp nhiên liệu tại cổng nạp thì vấn đề trượt mê-tan cần được giải quyết. Đối với loại động cơ này thì cách hiệu quả nhất thường là kết hợp tối ưu hóa quá trình cháy bên trong xilanh động cơ (engine-side) với vận hành (operation) hợp lý và hệ thống xử lý sau (methane oxidation catalyst — MOC) [43]. Sau đây là các giải pháp kỹ thuật hiệu quả hiện sẵn sàng để áp dụng:

#### 4.2.3.1. Về các giải pháp tối ưu hóa quá trình cháy bên trong xilanh động cơ (engine-side):

- Tối ưu lượng và thời điểm phun nhiên liệu mồi (diesel pilot): Tăng nhẹ lượng nhiên liệu mồi hoặc điều chỉnh tối ưu thời điểm phun để đảm bảo vùng hỗn hợp nhiên liệu-không khí xung quanh ngọn lửa mồi được kích hoạt cháy tốt hơn, giúp làm giảm khả năng cháy không hoàn toàn và “mắc kẹt”  $\text{CH}_4$  trong khe hở giữa đầu piston và vách xilanh (crevice volume). Nhiều nghiên cứu cho thấy việc điều chỉnh tối ưu lượng và thời điểm phun nhiên liệu mồi có thể giảm trượt mê-tan đáng kể, trong khi không làm tăng quá nhiều  $\text{NO}_x$  [44];

- Điều chỉnh thời điểm cấp khí (gas admission timing): Điều chỉnh thời điểm cấp khí vào xilanh muộn hơn (late admission) để giảm thời gian tồn lưu trong khe hở giữa đầu piston và vách xilanh sẽ làm giảm khả năng thoát khí  $\text{CH}_4$  chưa cháy vào ống xả khi quá trình giãn nở kết thúc [45];

- Tối ưu hóa chất lượng hòa trộn nhiên liệu-không khí (fuel-air mixing) trong cửa nạp: Thiết kế lại họng nạp theo hướng tăng xoáy lốc (swirl/tumble), thay đổi vị trí lắp đặt vòi phun khí để tăng độ đồng nhất hỗn hợp nhiên liệu-không khí trước khi nén giúp hỗn hợp trở nên đồng đều hơn dẫn tới cháy hoàn thiện hơn sẽ giảm được trượt mê-tan [45];

- Giảm khe hở cơ học (crevice volumes): Thiết kế lại đầu piston, rãnh sec-măng, bố trí lại các suppap hút và nạp sao cho khe hở cơ học giữa đầu piston và vách xilanh nhỏ nhất có thể để tránh  $\text{CH}_4$  mắc kẹt trong không gian khe hở này. Biện pháp này được biết đến như là then chốt trong việc thiết kế buồng đốt động cơ để giảm trượt mê-tan [46];

- Chuyển đổi sang phun trực tiếp khí nhiên liệu áp suất cao (Direct/High-Pressure gas injection): Công nghệ phun nhiên liệu trực tiếp (DI - direct injection) hoặc phun trực tiếp áp suất cao (HPDI - high-pressure direct injection) giảm trượt mê-tan nhiều hơn so với phun tại cổng do loại bỏ được nguy cơ  $\text{CH}_4$  tích tụ trong khe hở giữa piston và vách xilanh trong suốt quá trình nạp và nén của động cơ. Tuy nhiên, đây là giải pháp tốn kém (quá trình hoán cải động cơ rất phức tạp) nhưng rất hiệu quả cho mục tiêu giảm trượt mê-tan [47].

#### 4.2.3.2. Về vận hành (operation):

- Tránh vận hành kéo dài ở tải thấp: Trượt mê-tan thường tăng ở tải thấp do hỗn hợp nhiên liệu-khí loãng khiến cháy không hoàn toàn nhiên liệu. Trong chế độ vận hành thấp tải, nên kết hợp việc tạm dừng một số xi-lanh, hoặc chạy động cơ ở chế độ thuần Diesel [48];

- Giám sát liên tục & điều khiển động cơ theo thời gian thực: Sử dụng các cảm biến áp suất xilanh (P-cylinder), hệ số lambda, hàm lượng  $\text{CH}_4$  trong khí xả để điều chỉnh theo thời gian thực thời điểm và lượng nhiên liệu mồi, thời điểm và lưu lượng cấp khí... nhằm giữ trượt mê-tan ở mức thấp nhất có thể [43].

#### c. Xử lý sau khí thải (ftertreatment) – Xúc tác oxy hóa mê-tan (Methane Oxidation Catalyst - MOC):

- Lắp xúc tác oxy hóa mê-tan (Methane Oxidation Catalyst - MOC) trên đường xả: MOC có thể oxy hóa  $\text{CH}_4$  thành  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ . Thực nghiệm gần đây báo cáo hiệu suất chuyển đổi >95% ở nhiệt độ xả  $\geq \sim 370^\circ\text{C}$  (tùy thuộc chất xúc tác & tải động cơ). Đặt hệ thống xúc tác gần động cơ (close-coupled) để tận dụng nhiệt độ cao của khí xả giúp quá trình oxy hóa  $\text{CH}_4$  hiệu quả hơn [49];

- Một số giải pháp khác: Plasma, nhiệt hóa xúc tác đặc chủng, hay công nghệ GREEN RAY được thử nghiệm bởi nhiều hãng sản xuất động cơ (Yanmar, MHI, v.v.) báo cáo mức giảm trượt mê-tan lớn [50];

Một rào cản nữa của việc sử dụng nhiên liệu LNG hiện nay là cơ sở hạ tầng và hệ thống logistics cho việc tiếp nhiên liệu LNG tại tất cả các cảng cho tàu. Việc hoán cải động cơ diesel thành động cơ DF chạy bằng LNG cần đi đôi với việc trang bị hệ thống cung cấp nhiên liệu cho tàu và hệ thống logistics phụ vụ.

## Đóng góp của các tác giả trong bài báo

**Phạm Văn Chiến:** Phương pháp, Giám sát, Tiếp nhận tài trợ, Phản hồi ý kiến phản biện, Chính sửa bản thảo. **Nguyễn Duy Tân:** Phương pháp, Quản lý dữ liệu, Phân tích chính thức, Điều tra, Xác thực, Trực quan hóa, Phản hồi ý kiến phản biện, Viết – bản thảo gốc. **Ngô Duy Nam:** Biên soạn dữ liệu, Phân tích dữ liệu, Điều tra, Xác thực, Viết – bản thảo gốc. **Nguyễn Đức Chuẩn:** Biên soạn dữ liệu, Phân tích dữ liệu, Điều tra, Xác thực, Viết – bản thảo gốc. **Trần Duy Trí:** Biên soạn dữ liệu, Phân tích dữ liệu, Điều tra, Viết – bản thảo gốc.

## Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Các tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

## Thông tin tài trợ

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh (UTH), Việt Nam, theo mã số đề tài KHTĐ2316.

## Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

---

1<sup>st</sup> Pham Van Chien\*. *Maritime Academy, University of Transport Ho Chi Minh City*

2<sup>nd</sup> Nguyen Duy Tan. *Maritime Academy, University of Transport Ho Chi Minh City*

3<sup>rd</sup> Ngo Duy Nam. *Maritime Academy, University of Transport Ho Chi Minh City*

4<sup>th</sup> Nguyen Duc Chuan. *Maritime Academy, University of Transport Ho Chi Minh City*

5<sup>th</sup> Tran Duy Tri. *Naval Technical College*

\*Corresponding author: chien.pham@ut.edu.vn

---

## Tài liệu tham khảo

- [1] B. Petroleum, "BP energy outlook 2035," *BP stats*, Jan, 2014.
- [2] A. Kumar, S. Nagar, and S. Anand, "Climate change and existential threats," in *Global climate change*: Elsevier, 2021, pp. 1-31.
- [3] "IMO MARPOL Annex VI." [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) (accessed June 5th, 2024).
- [4] U. Nations. "COP28 Agreement Signals "Beginning of the End" of the Fossil Fuel." <https://unfccc.int/news/cop28-agreement-signals-beginning-of-the-end-of-the-fossil-fuel-era> (accessed June 5th, 2024).
- [5] J. Zhou *et al.*, "A novel modified biogas-driven electricity/cooling cogeneration system using open-and-closed Brayton cycle concepts: Environmental Analysis and Optimization," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 12, p. 102230, 2023.
- [6] N. P. H. Phạm Văn Chiến, Nguyễn Tuấn Anh, Trần Hồng Thanh, Lê Văn Đồng, "Chứng chỉ EEXI: Thách thức và Giải pháp," in *Hội nghị Khoa học và công nghệ giao thông vận tải Số 2 năm 2023*, Thành phố Hồ Chí Minh, 2023, pp. Trang 117-126.
- [7] N. N. Abdullah and G. Anwar, "An empirical analysis of natural gas as an alternative fuel for internal transportation," *International Journal of English Literature and Social Sciences*, vol. 6, no. 1, 2021.
- [8] C. Li, J. Liu, S. Zheng, X. Chen, J. Li, and Z. Zeng, "Performance analysis of an improved power generation system utilizing the cold energy of LNG and solar energy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 159, p. 113937, 2019.
- [9] V. Smil, *Natural gas: fuel for the 21st century*. John Wiley & Sons, 2015.
- [10] G. Bassioni and H. Klein, "Liquefaction of natural gas and simulated process optimization—A review," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 2, p. 102431, 2024.
- [11] W. Lin, N. Zhang, and A. Gu, "LNG (liquefied natural gas): a necessary part in China's future energy infrastructure," *Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 4383-4391, 2010.
- [12] A. Raza, R. Gholami, R. Rezaee, V. Rasouli, and M. Rabiei, "Significant aspects of carbon capture and storage—A review," *Petroleum*, vol. 5, no. 4, pp. 335-340, 2019.
- [13] J. S. L. Lam, B. Piga, and X. Zengqi, "Role of bio-LNG in shipping industry decarbonisation," *Maritime Energy and Sustainable Development Centre of Excellence (MESD CoE) and Nanyang Technological University, Singapore*, vol. 53, 2022.
- [14] E. Lindstad, B. Lagemann, A. Riialand, G. M. Gamlem, and A. Valland, "Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 101, p. 103075, 2021.
- [15] S. Ushakov, D. Stenersen, and P. M. Einang, "Methane slip from gas fuelled ships: a comprehensive summary based on measurement data," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 1308-1325, 2019.

- [16] N. Wissner, S. Healy, M. Cames, and J. Sutter, "Methanol as a marine fuel," *Naturschutzbund Deutschland: Stuttgart, Germany*, 2023.
- [17] D. Erdemir and I. Dincer, "A perspective on the use of ammonia as a clean fuel: Challenges and solutions," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 4, 2021.
- [18] K. Smith, *Nitrous oxide and climate change*. Routledge, 2010.
- [19] L. Van Hoecke, L. Laffineur, R. Campe, P. Perreault, S. W. Verbruggen, and S. Lenaerts, "Challenges in the use of hydrogen for maritime applications," *Energy & Environmental Science*, vol. 14, no. 2, pp. 815-843, 2021.
- [20] G. S. Usiagu, O. O. Adekoya, C. E. Okoli, C. D. Dauda, I. O. Ekemezie, and O. B. Ayorinde, "LNG as a bridge fuel in the transition to renewable energy: A global perspective," *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 21, no. 02, pp. 742-749, 2024.
- [21] G. Nikolaou, B. Herzer, M. Arahata, and R. Basaglia, "LPG for Marine Engines the Marine Alternative Fuel Commercial, Passenger, Offshore Boats," *Ships, Recreational Crafts and Other Boats*, 2017.
- [22] V. Briefing. "Vietnam's National Electricity Development Plan." <https://www.vietnam-briefing.com/news/vietnams-national-electricity-development-plan-2021-2030-roadmap-approved.html/> (accessed June 8th, 2025).
- [23] L. Industry. "Room for LNG Growth in Asia." <https://www.lngindustry.com/special-reports/09052024/room-for-growth-in-southeast-asia/> (accessed June 8th, 2025).
- [24] A. FIRE. Hans-List-Platz 1, 8020 Graz, Austria: AVL List GmbH.
- [25] H. N. Gupta, *Fundamentals of internal combustion engines*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.
- [26] U. S. E. P. Agency. "Understanding Global Warming Potentials." <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials> (accessed September, 19th, 2025).
- [27] P. Rounce, A. Tsolakis, and A. P. E. York, "Speciation of particulate matter and hydrocarbon emissions from biodiesel combustion and its reduction by aftertreatment," *Fuel*, vol. 96, pp. 90-99, 2012.
- [28] M. A. Arefin, M. N. Nabi, M. W. Akram, M. T. Islam, and M. W. Chowdhury, "A review on liquefied natural gas as fuels for dual fuel engines: Opportunities, challenges and responses," *Energies*, vol. 13, no. 22, p. 6127, 2020.
- [29] E. A. Ngang and C. V. N. Abbe, "Experimental and numerical analysis of the performance of a diesel engine retrofitted to use LPG as secondary fuel," *Applied Thermal Engineering*, vol. 136, pp. 462-474, 2018.
- [30] J. K. Kim, W.-J. Lee, E. Ahn, and J.-H. Choi, "Experimental and numerical studies on performance investigation of a diesel engine converted to run on LPG," *Energy Conversion and Management*, vol. 321, p. 119091, 2024.
- [31] O. Aneziris, I. Koromila, and Z. Nivolianitou, "A systematic literature review on LNG safety at ports," *Safety science*, vol. 124, p. 104595, 2020.
- [32] K. Kim, J. Kim, S. Oh, C. Kim, and Y. Lee, "Evaluation of injection and ignition schemes for the ultra-lean combustion direct-injection LPG engine to control particulate emissions," *Applied Energy*, vol. 194, pp. 123-135, 2017.
- [33] A. Thiruvengadam, M. C. Besch, D. K. Carder, A. Oshinuga, and M. Gautam, "Influence of real-world engine load conditions on nanoparticle emissions from a DPF and SCR equipped heavy-duty diesel engine," *Environmental science & technology*, vol. 46, no. 3, pp. 1907-1913, 2012.
- [34] V. Havrysh, V. Nitsenko, I. Perevozova, T. Kulyk, and O. Vasylyk, "Alternative Vehicle Fuels Management: Energy, Environmental and Economic Aspects," in *Advanced Energy Technologies and Systems I*: Springer, 2021, pp. 91-115.
- [35] ELGas. "LPG Measurement Unit Conversions." <https://www.elgas.com.au/elgas-knowledge-hub/residential-lpg/lpg-gas-unit-conversions/> (accessed June 8th, 2025).
- [36] P. Gas. "LNG - The Future of Vietnam's Energy Sector." <https://www.pvgas.com.vn/news/lng-the-future-of-vietnams-energy-sector> (accessed June 8th, 2025).
- [37] P. Times. "Chairman of Petrovietnam's BOM, Le Manh Hung urges PV GAS to increase Thi Vai LNG Terminal's capacity to 3 MTPA." <https://petrovietnam.petrotimes.vn/chairman-of-petrovietnams-bom-le-manh-hung-urges-pv-gas-to-increase-thi-vai-lng-terminals-capacity-to-3-mtpa-724153.html> (accessed June 8th, 2025).
- [38] T. Investors. "Petrovietnam asks PV Gas to triple LNG Thi Vai terminal to 3 mln tons." <https://theinvestor.vn/petrovietnam-asks-pv-gas-to-triple-lng-thi-vai-terminal-to-3-mln-tons-d14411.html> (accessed June 8th, 2025).
- [39] Reuters. "Vietnam's second LNG terminal starts commissioning phase, operator says." <https://www.reuters.com/markets/commodities/vietnams-second-lng-terminal-starts-commissioning-phase-operator-says-2024-05-08> (accessed June 8th, 2025).

- [40] LNGPrime. "Nebula's AG&P LNG buys stake in Vietnam's Cai Mep terminal." <https://lngprime.com/asia/nebulas-agp-lng-buys-stake-in-vietnams-cai-mep-terminal/106843> (accessed June 8th, 2025).
- [41] O. Energy. "Vietnam's energy security getting a boost with FSRU addition." <https://www.offshore-energy.biz/vietnams-energy-security-getting-a-boost-with-fsru-addition/> (accessed June 8th, 2025).
- [42] S. P. Global. "Vietnam faces domestic natural gas shortfall for power generation in 2025." <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/lng/092424-vietnam-faces-domestic-natural-gas-shortfall-for-power-generation-in-2025> (accessed June 8th, 2025).
- [43] M. E. Solution. "Managing methane slip on ME-GI installations." <https://www.man-es.com> (accessed September, 21st, 2025).
- [44] I. May *et al.*, "Reduction of methane slip using premixed micro pilot combustion in a heavy-duty natural gas-diesel engine," SAE Technical Paper, 0148-7191, 2015.
- [45] N. Kuittinen, M. Heikkilä, J.-P. Jalkanen, P. Aakko-Saksa, and K. Lehtoranta, "Methane slip emissions from LNG vessels," in *30th CIMAC Congress 2023*, 2023, p. 629.
- [46] E. Buksak. "Methane Slip – Shipping's Growing Decarbonisation Threat." <https://vpsveritas.com/knowledgecentre/articles/methane-slip-shippings-growing-decarbonisation-threat?> (accessed September, 21st, 2025).
- [47] J. Rochussen, N. S. Jaeger, H. Penner, A. Khan, and P. Kirchen, "Development and demonstration of strategies for GHG and methane slip reduction from dual-fuel natural gas coastal vessels," *Fuel*, vol. 349, p. 128433, 2023.
- [48] B. Comer, "Methane slip: LNG's Achilles heel," presented at the Conference of Parties 27 (COP 27), 2022. [Online]. Available: [https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/11/ICCT\\_Comer\\_COP27\\_methane\\_slip](https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/11/ICCT_Comer_COP27_methane_slip).
- [49] K. Lehtoranta, H. Vesala, N. Flygare, N. Kuittinen, and A.-R. Apilainen, "Measuring Methane Slip from LNG Engines with Different Devices," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 13, no. 5, p. 890, 2025.
- [50] YANMAR. "Achieved a 93.8% Methane Slip Reduction Rate in Onshore Tests and Received the Statement of Fact for the First Time in the World." <https://www.yanmar.com/global/marinecommercial/news/2024/04/11/136202.html> (accessed September, 21st, 2025).