

NGHIÊN CỨU KHUNG ĐÁNH GIÁ AN TOÀN VÀ HƯỚNG DẪN
VẬN HÀNH NHIÊN LIỆU METHANOL CHO TÀU VEN BIỂN
RESEARCH ON A FRAMEWORK FOR SAFETY ASSESSMENT
AND OPERATING GUIDELINES FOR METHANOL FUEL IN COASTAL
VESSELS

NGUYỄN XUÂN LONG*, NGUYỄN PHƯƠNG ANH, NGUYỄN TRỊNH HỒNG
NHUNG, NGUYỄN THÀNH TRUNG

Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: nguyensexuanlong@yimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1033>

Tóm tắt

Ngành hàng hải đang đối mặt với áp lực chưa từng có trong việc giảm phát thải khí nhà kính và các chất ô nhiễm không khí, thúc đẩy việc tìm kiếm nhiên liệu thay thế bền vững. Methanol đã nổi lên như một trong những nhiên liệu thay thế hứa hẹn nhất cho vận tải biển, đặc biệt trong lĩnh vực vận tải ven biển. Tuy nhiên, việc áp dụng methanol đòi hỏi phải xem xét cẩn thận các thách thức an toàn bao gồm tính độc hại, tính dễ cháy và các yêu cầu xử lý khác biệt so với nhiên liệu thông thường. Nghiên cứu này trình bày một khung đánh giá an toàn toàn diện và hướng dẫn vận hành cho việc sử dụng methanol làm nhiên liệu hàng hải trong hoạt động vận tải ven biển. Khung nghiên cứu tích hợp các phương pháp nhận diện nguy cơ, cách tiếp cận đánh giá rủi ro có hệ thống và các yêu cầu tuân thủ quy định dựa trên Bộ quy tắc IGF của IMO và Hướng dẫn tạm thời về an toàn tàu sử dụng Methyl/Ethyl Alcohol làm nhiên liệu. Bài báo cung cấp các hướng dẫn vận hành thực tiễn cho việc xử lý, lưu trữ, tiếp nhiên liệu và ứng phó khẩn cấp methanol một cách an toàn, dựa trên nghiên cứu hiện tại, thực tiễn tốt nhất của ngành. Kết quả nghiên cứu cho thấy methanol có thể được sử dụng an toàn trong vận tải ven biển thông qua việc triển khai các biện pháp kiểm soát kỹ thuật phù hợp, quy trình vận hành nghiêm ngặt và chương trình đào tạo toàn diện cho thuyền viên. Nghiên cứu này thiết lập nền tảng cho hoạt động methanol an toàn trong vận tải ven biển, giải quyết các thách thức kỹ thuật đồng thời đảm bảo tuân thủ các quy định an toàn hàng hải đang phát triển.

Từ khóa: Methanol, nhiên liệu hàng hải thay thế, đánh giá an toàn, tàu ven biển, HAZOP.

Abstract

The maritime industry is facing unprecedented pressure to reduce greenhouse gas emissions and air pollutants, driving the search for sustainable alternative fuels. Methanol has emerged as one of the most promising alternative fuels for maritime transport, particularly in coastal shipping. However, the application of methanol requires careful consideration of safety challenges including toxicity, flammability, and handling requirements different from conventional fuels. This study presents a comprehensive safety assessment framework and operational guidance for the use of methanol as a marine fuel in coastal shipping operations. The framework integrates hazard identification methods, a systematic risk assessment approach, and regulatory compliance requirements based on the IMO IGF Code and the Interim Guidance on the Safety of Ships Using Methyl/Ethyl Alcohol as Fuel. This paper provides practical operating guidelines for the safe handling, storage, refueling, and emergency response of methanol, based on current research and industry best practices. The research results indicate that methanol can be safely used in coastal shipping through the implementation of appropriate technical controls, rigorous operating procedures, and comprehensive crew training programs. This study establishes a foundation for safe methanol handling in coastal shipping, addressing technical challenges while ensuring compliance with evolving maritime safety regulations.

Keywords: Methanol, alternative marine fuel, safety assessment, coastal vessel, HAZOP.

1. Mở đầu

Ngành hàng hải toàn cầu đang đối mặt với áp lực chưa từng có trong việc giảm phát thải khí nhà kính và các chất ô nhiễm không khí, được thúc đẩy bởi chiến lược của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) nhằm giảm ít nhất 50% lượng phát thải hàng năm vào năm 2050 so với mức năm 2008. Trong bối cảnh này, methanol (CH_3OH) đã nổi lên như một trong những nhiên liệu thay thế hứa hẹn nhất để đạt được các mục tiêu đầy tham vọng này, đặc biệt đối với các hoạt động vận tải ven biển, nơi cơ sở hạ tầng tiếp nhiên liệu có thể được thiết lập dễ dàng hơn [1-5].

Methanol mang lại một số lợi thế môi trường so với nhiên liệu hàng hải thông thường [6-11]. Do cấu trúc không chứa lưu huỳnh, methanol loại bỏ hoàn toàn phát thải oxit lưu huỳnh (SOx), đồng thời giảm đáng kể phát thải oxit nitơ (NOx) và vật chất hạt (PM) [1], [12- 20]. Nghiên cứu của Ammar (2023) cho thấy việc sử dụng động cơ song nhiên liệu methanol-diesel trên tàu chở dầu có thể giảm 90% SOx , 76,80% NOx , 83,49% PM , 6,43% CO_2 và 55,63% CO so với động cơ diesel thông thường [20]. Hơn nữa, khi được sản xuất từ các nguồn tái tạo, methanol có tiềm năng trung hòa carbon hoặc thậm chí âm carbon, góp phần vào mục tiêu giảm phát thải dài hạn của ngành hàng hải [7, 8].

Trạng thái lỏng của methanol ở nhiệt độ và áp suất môi trường đơn giản hóa việc lưu trữ và xử lý so với các lựa chọn thay thế dạng khí như khí thiên nhiên hóa lỏng (LNG) hoặc hydro [5]. Đặc tính này làm cho methanol trở nên đặc biệt phù hợp cho vận tải ven biển, nơi không gian hạn chế và yêu cầu tiếp nhiên liệu thường xuyên là những cân nhắc quan trọng. Nghiên cứu của Lundgren và cộng sự (2014) nhấn mạnh tiềm năng cạnh tranh của methanol như nhiên liệu hàng hải, đặc biệt trong bối cảnh các quy định môi trường ngày càng nghiêm ngặt [5].

Tuy nhiên, việc áp dụng methanol làm nhiên liệu hàng hải đưa ra những thách thức an toàn độc đáo đòi hỏi đánh giá và quản lý toàn diện. Không giống như dầu diesel hàng hải thông thường, methanol có điểm chớp cháy thấp (12°C), độc hại với con người và cháy với ngọn lửa gần như vô hình [5], [10]. Các đặc tính này đòi hỏi phát triển các giao thức an toàn đặc thù cho nhiên liệu, thiết bị chuyên dụng và năng lực nâng cao của thuyền viên [4], [10]. Ismail và cộng sự (2025) đã xác định các nguy cơ vật lý, đặc biệt là tính dễ cháy và khả năng nổ, là phần lớn các rủi ro liên quan đến methanol, với vụ nổ bồn chứa là nguy cơ phụ nổi bật liên quan đến số ca tử vong cao nhất [4].

Khung quy định cho methanol như nhiên liệu hàng

hải vẫn đang phát triển. IMO đã ban hành Hướng dẫn Tạm thời về An toàn Tàu sử dụng Methyl/Ethyl Alcohol làm Nhiên liệu (MSC.1/Circ.1621) vào năm 2020, cung cấp các quy định bắt buộc cho việc bố trí, lắp đặt, kiểm soát và giám sát các hệ thống để giảm thiểu rủi ro [1], [10]. Tuy nhiên, như Roiaz và cộng sự (2025) lưu ý, vẫn còn những khoảng trống đáng kể trong các công cụ và quy trình đánh giá hiệu suất an toàn, đặc biệt liên quan đến thiết kế dựa trên mục tiêu [10].

Vận tải ven biển đặt ra những cân nhắc đặc biệt cho việc áp dụng methanol. Các tuyến đường ngắn hơn và tiếp cận cảng thường xuyên hơn tạo điều kiện thuận lợi cho việc phát triển cơ sở hạ tầng tiếp nhiên liệu và cho phép ứng phó khẩn cấp nhanh hơn trong trường hợp xảy ra sự cố [22]. Tuy nhiên, hoạt động gần bờ cũng làm tăng rủi ro tiềm ẩn đối với quần thể ven biển và hệ sinh thái trong trường hợp rò rỉ hoặc tràn methanol [3], [13].

Mục tiêu của nghiên cứu này là phát triển một khung đánh giá an toàn toàn diện và hướng dẫn vận hành cho việc sử dụng methanol trong vận tải ven biển. Nghiên cứu tích hợp các phương pháp nhận diện nguy cơ, cách tiếp cận đánh giá rủi ro có hệ thống và yêu cầu tuân thủ quy định để cung cấp hướng dẫn thực tiễn cho các nhà khai thác tàu, nhà quản lý cảng và cơ quan quản lý. Bằng cách tổng hợp nghiên cứu hiện tại, thực tiễn tốt nhất của ngành và bài học kinh nghiệm từ những người áp dụng sớm, nghiên cứu này nhằm mục đích thiết lập nền tảng cho hoạt động methanol an toàn trong vận tải ven biển.

2. Tổng quan tài liệu

2.1. Methanol như nhiên liệu hàng hải thay thế

Methanol đang thu hút sự chú ý lớn trong quá trình chuyển đổi năng lượng hàng hải và được dự đoán sẽ chiếm khoảng 70% thị trường nhiên liệu carbon thấp toàn cầu vào năm 2050. Về mặt môi trường, do không chứa lưu huỳnh, methanol loại bỏ hoàn toàn phát thải SOx và giảm đáng kể lượng NOx cũng như bụi mịn (PM) so với nhiên liệu hóa thạch thông thường. Về mặt kỹ thuật, đặc tính tồn tại ở trạng thái lỏng ở nhiệt độ và áp suất môi trường giúp đơn giản hóa đáng kể các yêu cầu lưu trữ và xử lý so với khí thiên nhiên hóa lỏng (LNG) hay hydro. Đánh giá vòng đời cũng cho thấy methanol là một trong những lựa chọn thay thế phù hợp nhất nhờ khả năng giảm 22,4% phát thải khí nhà kính và 23,3% chi phí so với tàu chạy diesel. Tuy nhiên, mật độ năng lượng thấp hơn của methanol đòi hỏi dung tích bồn chứa nhiên liệu lớn gấp đôi, gây ảnh hưởng đến không gian hàng hóa và thiết kế tàu. Hơn nữa, chi phí

cao và sản lượng methanol xanh toàn cầu còn hạn chế có thể làm chi phí vận hành tăng hơn 250%.

2.2. Các phương pháp đánh giá rủi ro trong hàng hải

Đánh giá rủi ro có hệ thống là yêu cầu bắt buộc để sử dụng an toàn methanol. Phân tích HAZOP là một công cụ chính thức được sử dụng rộng rãi nhằm nhận diện các nguy cơ tiềm ẩn bằng cách chia hệ thống thành các "nút" và phân tích sai lệch thông qua các từ khóa, giúp bảo vệ thuyền viên, tài sản và môi trường. Phương pháp này đã được ứng dụng cho hệ thống nhiên liệu của động cơ chính tàu container và ngày càng tối ưu hơn với các cách tiếp cận bán tự động. Bên cạnh đó, phân tích Bow-Tie được ứng dụng để mô hình hóa trực quan con đường từ nguyên nhân đến hậu quả, đặc biệt hiệu quả trong việc đánh giá rủi ro rò rỉ khi tiếp nhiên liệu để từ đó thiết lập các hướng dẫn an toàn. Các phương pháp khác như lý thuyết mô hình đám mây hay phân tích Mạng Bayesian cũng được sử dụng để định lượng rủi ro và lựa chọn biện pháp kiểm soát phù hợp.

2.3. Khung quy định quốc tế

Khung pháp lý quốc tế cho methanol đang dần hoàn thiện để đối phó với các thách thức an toàn độc đáo. Bộ luật IGF của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) đóng vai trò là xương sống, cung cấp các yêu cầu bắt buộc cho tàu sử dụng nhiên liệu có điểm chớp cháy thấp. Vào năm 2020, IMO cũng ban hành Hướng dẫn Tam thời (MSC.1/Circ.1621), quy định chi tiết về việc bố trí, lắp đặt, kiểm soát và giám sát các hệ thống methanol. Tuy nhiên, vẫn còn tồn tại những khoảng trống trong quy định đối với các thiết kế dựa trên mục tiêu, đòi hỏi phải có các giải pháp thiết kế chuyên biệt và đánh giá vùng nổ chi tiết để quản lý tính độc hại, dễ cháy và ăn mòn của nhiên liệu này.

2.4. Nghiên cứu về an toàn và vận hành methanol

Nghiên cứu hiện tại tập trung mạnh mẽ vào việc giảm thiểu các nguy cơ vật lý của methanol. Tính dễ cháy và khả năng nổ được coi là rủi ro lớn nhất, trong đó sự cố nổ bồn chứa có liên quan đến tỷ lệ từ vong cao nhất. Methanol sở hữu điểm chớp cháy thấp (12°C) và cháy với ngọn lửa gần như vô hình, tạo ra thách thức lớn trong việc phát hiện hỏa hoạn, nhưng bù lại, nhiệt độ tự bốc cháy cao (470°C) giúp nó ít có nguy cơ bốc cháy khi tràn lên bề mặt nóng. Để vận hành an toàn, tàu thuyền bắt buộc phải trang bị hệ thống thông gió mạnh mẽ, đường ống thành đôi tích hợp phát hiện rò rỉ và van ngắt tự động. Hoạt động

tiếp nhiên liệu được nhận định là khâu có rủi ro cao nhất, đòi hỏi các quy trình xử lý vô cùng nghiêm ngặt. Việc áp dụng methanol cũng yêu cầu phải xây dựng giao thức an toàn đặc thù và tổ chức đào tạo chuyên sâu, bắt buộc cho mọi thuyền viên.

3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này kết hợp đánh giá tài liệu có hệ thống, phân tích chuyên gia và phát triển mô hình nhằm thiết lập một khung đánh giá an toàn toàn diện cùng hướng dẫn vận hành cho việc sử dụng methanol trong vận tải ven biển. Thiết kế nghiên cứu được cấu trúc chặt chẽ thành bốn giai đoạn cốt lõi: (1) thu thập và tổng hợp tài liệu, (2) nhận diện và đặc tính hóa nguy cơ, (3) phát triển khung đánh giá rủi ro, và (4) xây dựng hướng dẫn vận hành. Mục tiêu của quy trình này là nhằm giải quyết triệt để các câu hỏi về nguy cơ cốt lõi của methanol, chọn lọc phương pháp đánh giá phù hợp nhất, cách thức tích hợp quy định hiện hành vào thực tiễn, và thiết lập các biện pháp kiểm soát an toàn.

Trong giai đoạn thu thập và phân tích dữ liệu, tác giả đã tiến hành tìm kiếm học thuật toàn diện trên các cơ sở dữ liệu bao gồm Sci và Google Scholar. Việc tìm kiếm tập trung vào các công bố từ năm 2012 đến 2025 để đảm bảo cập nhật các tiến bộ kỹ thuật và quy định hàng hải mới nhất. Qua quá trình sàng lọc nghiêm ngặt và đối chiếu với các tiêu chí khắt khe (tập trung vào methanol hàng hải, vấn đề an toàn/ đánh giá rủi ro, có dữ liệu thực nghiệm và ngôn ngữ tiếng Anh), 30 bài báo có độ liên quan cao nhất trong số 166 bài đã được chọn ra để phân tích chuyên sâu. Kho dữ liệu này được xử lý bằng phương pháp tổng hợp chủ đề, thông qua việc hệ thống thành 3 danh mục: Phương pháp nghiên cứu, kết quả/ phát hiện chính, và các thách thức kỹ thuật cùng khuyến nghị vận hành.

Cuối cùng, quá trình phát triển khung đánh giá an toàn được thực hiện lặp đi lặp lại và cấu trúc xoay quanh bốn trụ cột chính: Nhận diện nguy cơ, đánh giá và định lượng rủi ro, tuân thủ quy định/tiêu chuẩn, và biện pháp kiểm soát/giảm thiểu rủi ro. Để nhận diện nguy cơ, khung đã kết hợp các công cụ chuyên sâu được áp dụng rộng rãi như phân tích HAZOP, nghiên cứu HAZID và phân tích Bow-Tie.

Trong nghiên cứu này, các công cụ đánh giá rủi ro được định nghĩa cụ thể nhằm đảm bảo tính thống nhất:

HAZOP (Hazard and Operability Study): Là phương pháp kiểm tra an toàn hệ thống một cách có hệ thống bằng cách sử dụng các 'từ gợi ý' (guidewords) để xác định các sai lệch so với thiết kế ban đầu.

LEL (Lower Explosive Limit): Giới hạn nổ dưới

là nồng độ thấp nhất của hơi methanol trong không khí có khả năng bốc cháy; các cảm biến trên tàu được thiết lập báo động ở các mức 10%, 20% và ngắt khẩn cấp ở 40% LEL.

Phân tích Bow-Tie: Một mô hình trực quan hóa rủi ro bằng cách kết hợp cây lỗi (Fault Tree) ở bên trái để chỉ ra nguyên nhân và cây sự kiện (Event Tree) ở bên phải để chỉ ra hậu quả, với các rào cản an toàn nằm ở giữa.

Ở bước đánh giá rủi ro, nghiên cứu áp dụng cách tiếp cận đa chiều, kết hợp cả phân tích định tính và định lượng về khả năng cũng như hậu quả của các sự cố. Khung này cũng lồng ghép trực tiếp các yêu cầu bắt buộc từ Bộ luật IGF của IMO và các hướng dẫn tạm thời (MSC.1/Circ.1621) để đảm bảo tính tuân thủ. Từ nền tảng phân tích kỹ lưỡng này, nghiên cứu đã xây dựng các hướng dẫn vận hành chi tiết bao trùm mọi khía cạnh từ lưu trữ, xử lý, tiếp nhiên liệu đến phòng cháy và ứng phó khẩn cấp dựa trên thực tiễn tốt nhất.

Nếu một bảng quá dài không vừa một cột (1 trang), số của bảng và các đề mục nên được viết lặp lại trên các trang tiếp theo trước khi bảng được tiếp tục. Ngoài ra, nếu bảng quá rộng có thể sử dụng trong cả hai cột.

4. Kết quả

4.1. Nhận diện nguy cơ theo đặc tính

Methanol mang các đặc tính vật lý và hóa học tạo ra cả cơ hội lẫn thách thức lớn. Nhiên liệu này có điểm chớp cháy rất thấp (12°C), được xếp vào nhóm nhiên liệu có điểm chớp cháy thấp đòi hỏi biện pháp an toàn đặc biệt. Tuy nhiên, nhiệt độ tự bốc cháy cao (470°C) giúp giảm thiểu nguy cơ cháy khi nhiên liệu tràn trên bề mặt nóng. Hơi methanol nặng hơn không khí (tỷ trọng 1,11) nên dễ tích tụ ở các khu vực thấp, tạo nguy cơ nổ tiềm ẩn. Về mặt thiết kế, mật độ năng lượng của methanol chỉ bằng khoảng một nửa so với diesel, dẫn đến yêu cầu dung tích bồn chứa phải lớn gấp đôi. Về độc tính, methanol gây kích ứng ở nồng độ trên 200 ppm và có thể gây tổn thương thần kinh nếu tiếp xúc kéo dài, dù nó không được phân loại là chất gây ung thư. Đáng chú ý, methanol cháy với ngọn lửa gần như vô hình trong ánh sáng ban ngày, tạo ra thách thức cực lớn cho việc phát hiện hỏa hoạn. Bên cạnh đó, tính ăn mòn và hút ẩm của nó cũng đòi hỏi hệ thống lưu trữ kín với vật liệu chuyên dụng.

Khác với dầu diesel thông thường vốn là hỗn hợp hydrocarbon trung tính, methanol là một dung môi cực mạnh có tính ăn mòn và hút ẩm cao. Về mặt vật liệu, methanol gây ăn mòn đáng kể đối với các kim loại màu như nhôm, đồng, kẽm và các hợp kim của chúng, vốn thường thấy trong các chi tiết của hệ thống

nhiên liệu diesel truyền thống. Ngoài ra, đặc tính hút ẩm mạnh khiến methanol dễ dàng hấp thụ hơi nước từ không khí, tạo thành hỗn hợp có độ pH thấp, tăng cường khả năng ăn mòn điện hóa bên trong bồn chứa. Do đó, hệ thống lưu trữ phải chuyển đổi từ thép carbon thông thường sang thép không gỉ hoặc bồn thép được phủ các hợp chất phenolic epoxy chịu hóa chất, đồng thời các vòng đệm phải làm từ vật liệu Teflon hoặc Viton thay vì cao su tự nhiên để tránh bị biến chất.

4.2. Khung đánh giá rủi ro

Khung đánh giá an toàn của nghiên cứu kết hợp nhiều phương pháp có hệ thống. Phân tích HAZOP được dùng để xác định các sai lệch trong hoạt động (như tắc nghẽn, mất áp suất), với các hướng tiếp cận bán tự động giúp nhận diện nguyên nhân và hậu quả hiệu quả hơn. Nghiên cứu HAZID giúp đánh giá toàn diện nguy cơ ngay ở giai đoạn thiết kế ban đầu. Đặc biệt đối với quá trình tiếp nhiên liệu - khâu có rủi ro cao nhất, phân tích Bow-Tie giúp lập bản đồ trực quan các nguyên nhân rò rỉ (lỗi thiết bị, con người) và các hậu quả (cháy, nổ, rò rỉ độc hại). Hỗ trợ cho các phương pháp này, lý thuyết mô hình đám mây được sử dụng để giải quyết yếu tố không chắc chắn, trong khi cách tiếp cận thiết kế dựa trên mục tiêu hỗ trợ đánh giá vùng nổ xung quanh các lỗ thông hơi,.

4.3. Yêu cầu tuân thủ quy định

Hệ thống quy định quốc tế cho methanol chủ yếu xoay quanh Bộ quy tắc IGF của IMO và Hướng dẫn Tạm thời (MSC.1/Circ.1621), đặt ra các yêu cầu bắt buộc về tính toàn vẹn của hệ thống, thông gió, và phòng chống cháy nổ. Bên cạnh đó, các quy tắc của các Hội phân loại như DNV và ABS cung cấp hướng dẫn bổ sung cho việc bố trí bồn chứa và đường ống. Đối với hoạt động vận tải, việc tuân thủ các quy định đa dạng của Nhà nước Cảng và Quốc gia Cờ cũng là yêu cầu bắt buộc, đặc biệt trong các dự án vận tải nội địa.

Mặc dù Bộ luật IGF của IMO cung cấp các nguyên tắc an toàn bắt buộc, khung đánh giá trong nghiên cứu này tạo ra sự khác biệt thông qua việc cụ thể hóa các mục tiêu. Trong khi IMO đưa ra các yêu cầu mang tính định tính, khung của chúng tôi tích hợp các công cụ định lượng như lý thuyết mô hình đám mây để giải quyết sự không chắc chắn và phân tích HAZOP bán tự động để tối ưu hóa quy trình kiểm tra cho các cấu trúc tàu ven biển đặc thù, nơi không gian lắp đặt bị hạn chế hơn so với tàu viễn dương.

4.4. Hướng dẫn vận hành và thực tiễn tốt nhất

- Lưu trữ và phân phối Bồn chứa phải làm bằng thép không gỉ hoặc có lớp phủ chống ăn mòn, cách ly với

khu vực sinh hoạt, và sử dụng đường ống thành đôi có tích hợp cảm biến phát hiện rò rỉ ở không gian vòng.

- Thông gió và phát hiện khí: Hệ thống thông gió cưỡng bức là bắt buộc. Hệ thống giám sát phải đặt mức báo động cảnh báo ở 10% LEL, báo động nguy hiểm ở 20% LEL và ngắt tự động toàn bộ ở 40% LEL.

- Chữa cháy và PPE: Do ngọn lửa vô hình, hệ thống chữa cháy bắt buộc phải trang bị cảm biến phát hiện tia UV/IR và sử dụng bọt chống cháy. Thuyền viên phải được trang bị đầy đủ thiết bị bảo vệ cá nhân (PPE) như thiết bị thở SCBA và quần áo chống hóa chất độc.

- Tiếp nhiên liệu: Đòi hỏi quy trình kiểm tra cực kỳ nghiêm ngặt trước, trong và sau quá trình bơm, kết hợp liên động an toàn.

4.5. Các biện pháp rào cản an toàn và kiểm soát rủi ro

Các biện pháp được chia làm nhiều lớp. Kiểm soát kỹ thuật là tuyến phòng thủ đầu tiên, bao gồm hệ thống đường ống thành kép, thông gió, van ngắt tự động và thiết kế dự phòng năng lượng. Hỗ trợ cho kỹ thuật là kiểm soát hành chính thông qua các quy trình vận hành chuẩn, hệ thống giấy phép làm việc, và quan trọng nhất là đào tạo bắt buộc chuyên sâu cho mọi thuyền viên.

Quy trình ứng phó khẩn cấp toàn diện là điều cần thiết để giảm thiểu hậu quả của sự cố methanol. Các yếu tố chính bao gồm: ứng phó rò rỉ (phát hiện và cô lập rò rỉ, thông gió khu vực bị ảnh hưởng, ngăn ngừa nguồn đánh lửa, làm sạch và xử lý), ứng phó cháy (kích hoạt báo động cháy, sơ tán nhân viên không thiết yếu, triển khai hệ thống dập cháy, sử dụng thiết bị cứu hỏa cầm tay), ứng phó tiếp xúc (di chuyển người bị ảnh hưởng ra khỏi khu vực tiếp xúc, cung cấp sơ cứu, tìm kiếm chăm sóc y tế, tài liệu sự cố), ứng phó tràn (ngăn chặn và thu hồi tràn, thông báo cho cơ quan có thẩm quyền, làm sạch và khắc phục môi trường), và giao tiếp (thông báo nội bộ, thông báo bên ngoài, báo cáo quy định) [3], [4], [13].

Lee và cộng sự (2023) nhấn mạnh tầm quan trọng của việc thiết lập hướng dẫn an toàn và quy trình xử lý và tiếp nhiên liệu methanol an toàn để giảm thiểu rủi ro [3]. Quy trình ứng phó khẩn cấp nên được phát triển dựa trên đánh giá rủi ro có hệ thống và thực hành thường xuyên thông qua diễn tập và mô phỏng [3].

Đào tạo và năng lực thuyền viên là rất quan trọng để đảm bảo hoạt động methanol an toàn. Các yêu cầu đào tạo nên bao gồm: Đào tạo cơ bản (tính chất methanol và nguy cơ, yêu cầu quy định, quy trình vận hành an toàn), đào tạo chuyên môn (hoạt động tiếp

nhiên liệu, bảo trì hệ thống, ứng phó khẩn cấp), đào tạo làm mới (cập nhật thường xuyên về quy định và thực tiễn tốt nhất, đào tạo lại định kỳ), và đánh giá năng lực (đánh giá kiến thức và kỹ năng, chứng nhận, lưu giữ hồ sơ) [1], [4], [5]. Wermuth và cộng sự (2021) lưu ý rằng hệ thống bồn chứa kết hợp cho methanol và CO₂ là khả thi nhưng đòi hỏi thuyền viên có kỹ năng cao hơn và chi phí vận hành tăng [1]. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của đào tạo toàn diện và phát triển năng lực cho thuyền viên làm việc với hệ thống methanol [1]. Ismail và cộng sự (2025) khuyến nghị đào tạo bắt buộc cho thuyền viên như một trong những biện pháp chính để giải quyết các nguy cơ độc đáo của methanol và đảm bảo tích hợp an toàn vào ngành hàng hải [4].

Để hiện thực hóa tính bắt buộc trong đào tạo thuyền viên tàu ven biển, nghiên cứu đề xuất khung chương trình đào tạo tối thiểu gồm 03 giai đoạn:

(1) Huấn luyện làm quen: Tập trung vào nhận diện nguy cơ đặc thù như ngọn lửa vô hình, độc tính qua da và đường hô hấp, sử dụng các thiết bị bảo hộ cá nhân chuyên dụng như bộ lọc khí và quần áo chống hóa chất.

(2) Kỹ năng vận hành: Hướng dẫn quy trình tiếp nhiên liệu an toàn, vận hành hệ thống đường ống thành đôi và cách thức giám sát các ngưỡng báo động nồng độ khí (10%-20%-40% LEL).

(3) Diễn tập ứng phó sự cố: Thực hành chữa cháy bằng bọt kháng cồn, sơ cứu ngộ độc methanol và quy trình cô lập vùng nguy hiểm trong không gian hạn chế của tàu ven biển.

4.6. Cân nhắc đặc thù cho vận tải ven biển

Vận tải ven biển mang lại nhiều lợi thế như tuyến đường ngắn và tần suất cập cảng cao, giúp giảm áp lực về dung tích lưu trữ methanol trên tàu và tạo điều kiện xây dựng trạm tiếp nhiên liệu dọc bờ. Việc ở gần bờ cũng giúp ứng phó khẩn cấp y tế nhanh chóng hơn. Tuy nhiên, hoạt động gần bờ cũng đồng nghĩa với việc rủi ro tác động môi trường, ảnh hưởng sức khỏe người dân và hệ sinh thái ven biển sẽ tăng cao nếu xảy ra sự cố tràn đổ, đồng thời tàu phải tuân thủ mạng lưới quy định phức tạp từ nhiều khu vực pháp lý.

Tại Việt Nam, việc triển khai methanol cho vận tải ven biển có tính khả thi cao dựa trên hai yếu tố chính: Dòng tàu mục tiêu: Các tàu container nội địa, tàu rời và tàu khách cao tốc hoạt động trên tuyến Bắc-Nam (Hải Phòng - TP. Hồ Chí Minh) là đối tượng ưu tiên. Đặc điểm chạy tuyến cố định giúp giảm áp lực về dung tích bồn chứa do có thể tiếp nhiên liệu thường xuyên tại các cảng đầu mối. Hạ tầng kho bãi: Tận dụng

hệ thống kho cảng xăng dầu hiện hữu tại các khu vực như Đình Vũ (Hải Phòng) hay Nhà Bè (TP.HCM). Do methanol tồn tại ở trạng thái lỏng ở nhiệt độ thường, việc cải tạo bồn chứa sẵn có sang bồn chứa methanol đòi hỏi chi phí thấp hơn nhiều so với việc xây dựng kho cảng LNG hay hydro áp suất cao.

5. Thảo luận

5.1. Các phát hiện chính

Nghiên cứu khẳng định methanol mang lại lợi ích môi trường vượt trội nhưng đi kèm với những thách thức an toàn đặc thù như tính độc hại, ngọn lửa vô hình, hơi nặng hơn không khí và tính ăn mòn. Trong đó, tính dễ cháy và khả năng nổ là rủi ro vật lý lớn nhất, với sự cố nổ bồn chứa có liên quan đến tỷ lệ từ vong cao nhất, đòi hỏi các biện pháp phòng ngừa nghiêm ngặt. Việc áp dụng các phương pháp phân tích như HAZOP, HAZID và Bow-Tie được đánh giá là công cụ hữu hiệu để nhận diện và đánh giá các rủi ro này một cách có hệ thống. Về mặt pháp lý, mặc dù Bộ luật IGF và Hướng dẫn tạm thời của IMO đã cung cấp bộ khung toàn diện, vẫn tồn tại những khoảng trống đối với các thiết kế dựa trên mục tiêu, tiêu biểu như thiết kế cho hệ thống thông gió.

5.2. So sánh với nhiên liệu thay thế khác

Methanol sở hữu ưu điểm vượt trội khi tồn tại ở dạng lỏng ở nhiệt độ và áp suất môi trường, giúp đơn giản hóa việc lưu trữ so với LNG hay hydro (vốn đòi hỏi lưu trữ áp suất cao và nhiệt độ cực thấp). Đánh giá vòng đời chỉ ra đây là lựa chọn thay thế phù hợp nhất nhờ giảm thiểu cả phát thải khí nhà kính lẫn chi phí so với diesel. Dù vậy, điểm yếu của methanol là mật độ năng lượng thấp (đòi hỏi bồn chứa lớn gấp đôi) cùng với độc tính và nguy cơ cháy cao, yêu cầu thiết lập các biện pháp an toàn khắt khe hơn hẳn nhiên liệu truyền thống.

Rào cản lớn nhất hiện nay là tính khả thi kinh tế do methanol xanh có chi phí cao, có thể làm tăng chi phí vận hành (OpEx) hơn 250%. Bên cạnh đó, sự thiếu hụt cơ sở hạ tầng tiếp nhiên liệu khiến việc áp dụng ban đầu chủ yếu chỉ phù hợp cho các tuyến tàu chạy quay vòng về cảng nhà. Ngành hàng hải cũng cần giải quyết những hạn chế trong quy định hiện hành và bắt buộc phải tổ chức đào tạo nâng cao năng lực cho thuyền viên do hệ thống lưu trữ nhiên liệu này đòi hỏi kỹ năng vận hành phức tạp hơn.

Do chủ yếu dựa trên các tài liệu đã xuất bản, nghiên cứu có thể chưa nắm bắt trọn vẹn các kinh nghiệm thực tiễn mới nhất từ những người áp dụng sớm. Khung an toàn được đề xuất vẫn cần phải điều

chỉnh linh hoạt theo đặc điểm từng tàu hoặc tuyến đường. Đáng chú ý, nghiên cứu mới chỉ tập trung vào kỹ thuật và pháp lý, chưa đi sâu vào yếu tố tổ chức, con người và văn hóa an toàn. Ngoài ra, quá trình triển khai thực tế đòi hỏi các phân tích cụ thể hơn cho từng tuyến vận tải ven biển và cần được cập nhật liên tục để bắt kịp với sự thay đổi của pháp luật.

6. Kết luận và kiến nghị

Nghiên cứu này đã thiết lập một khung đánh giá an toàn toàn diện và các hướng dẫn vận hành chi tiết cho việc sử dụng nhiên liệu methanol trong lĩnh vực vận tải ven biển, dựa trên việc tổng hợp có hệ thống 30 nghiên cứu học thuật uy tín nhất. Các kết quả chỉ ra rằng methanol là một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn nhờ mang lại những lợi ích môi trường vượt trội, điển hình như khả năng loại bỏ hoàn toàn phát thải SOx, giảm thiểu đáng kể lượng NOx và vật chất hạt (PM), cũng như sở hữu tiềm năng trung hòa hoặc âm carbon khi được sản xuất từ các nguồn tái tạo. Tuy nhiên, để sử dụng an toàn loại nhiên liệu này, ngành hàng hải cần phải giải quyết triệt để các thách thức đặc thù liên quan đến tính độc hại, tính dễ cháy và các yêu cầu xử lý khẩn cấp. Khung đánh giá an toàn được đề xuất tích hợp hiệu quả các công cụ như phân tích HAZOP, nghiên cứu HAZID và phân tích Bow-Tie nhằm nhận diện và kiểm soát rủi ro có hệ thống. Đồng thời, khung này đảm bảo tính tuân thủ pháp lý thông qua việc bám sát Bộ quy tắc IGF và Hướng dẫn Tạm thời của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO).

Đối với cơ quan quản lý cần thực hiện các bước sau:

Thứ nhất: Cục Đăng kiểm Việt Nam cần sớm nội địa hóa Hướng dẫn MSC.1/Circ.1621 thành các quy chuẩn kỹ thuật quốc gia (QCVN), tạo hành lang pháp lý cho việc thẩm định các thiết kế tàu methanol.

Thứ hai: Chấp nhận kết quả từ các công cụ đánh giá rủi ro tiên tiến (HAZOP, CFD) làm cơ sở để phê duyệt các thiết kế không theo quy chuẩn truyền thống, đặc biệt là việc bố trí các lỗ thông hơi và vùng nguy hiểm trên các tàu ven biển có cấu trúc cabin phức tạp.

Thứ ba: Xây dựng lộ trình cấp chứng chỉ chuyên môn cho thuyền viên làm việc trên tàu nhiên liệu điểm chớp cháy thấp, phù hợp với tiêu chuẩn STCW nhưng có điều chỉnh sát với thực tế vận tải ven bờ.

Đối với các nhà khai thác tàu: Cần bắt buộc tiến hành đánh giá rủi ro toàn diện bằng HAZOP, HAZID và Bow-Tie trước khi triển khai hệ thống nhiên liệu methanol. Thiết kế tàu phải tích hợp các biện pháp kiểm soát kỹ thuật mạnh mẽ như đường ống thành đôi có phát hiện rò rỉ, hệ thống thông gió cưỡng bức, giám sát khí

liên tục và van ngắt khẩn cấp. Bên cạnh đó, các công ty cần xây dựng quy trình vận hành và ứng phó sự cố chi tiết, đặc biệt là đối với khâu tiếp nhiên liệu có rủi ro cao. Việc thiết lập các chương trình đào tạo chuyên sâu về đặc tính methanol, sử dụng PPE là bắt buộc đối với toàn bộ thuyền viên để đảm bảo tuân thủ nghiêm ngặt các quy định của IMO và các bên liên quan.

Đối với các nhà quản lý cảng và bến bãi: Cần ưu tiên phát triển cơ sở hạ tầng tiếp nhiên liệu chuyên dụng với đầy đủ hệ thống thông gió, phát hiện rò rỉ và phòng cháy chữa cháy. Cảng cũng cần thiết lập quy trình bơm nhiên liệu với danh sách kiểm tra nghiêm ngặt, cung cấp khóa đào tạo xử lý an toàn cho nhân viên, và xây dựng kế hoạch ứng phó khẩn cấp phối hợp chặt chẽ với tàu cùng chính quyền địa phương.

Bên cạnh đó, cần mở rộng nghiên cứu sâu hơn về các yếu tố con người và tổ chức tác động đến an toàn vận hành methanol. Các nhà khoa học nên tập trung phát triển các công cụ đánh giá rủi ro tiên tiến, nghiên cứu công nghệ mới để phát hiện, giám sát và dập tắt cháy nhiên liệu. Hơn nữa, việc đánh giá tác động môi trường của sự cố tràn đổ và thực hiện các nghiên cứu tình huống thực tế trong vận tải ven biển sẽ cung cấp bài học kinh nghiệm quý giá cho ngành.

Nghiên cứu nhấn mạnh rằng công nghệ và quy định chỉ là điều kiện cần; yếu tố con người là rào cản cuối cùng trong công tác an toàn. Thuyền viên tàu ven biển tại Việt Nam thường quen với các quy trình nhiên liệu diesel đơn giản, do đó, sự chuyển dịch sang methanol đòi hỏi một sự thay đổi về văn hóa an toàn. Rủi ro từ sai lỗi con người trong quá trình tiếp nhiên liệu - khâu có tỷ lệ sự cố cao nhất - cần được kiểm soát thông qua các danh mục kiểm tra nghiêm ngặt và đào tạo tâm lý ứng phó trong điều kiện ngọn lửa vô hình.

Tóm lại, methanol là một nhiên liệu thay thế hứa hẹn, hoàn toàn có thể được vận hành an toàn trong vận tải ven biển nếu được kết hợp đúng đắn với các biện pháp kỹ thuật, quy trình vận hành nghiêm ngặt và đào tạo chuyên sâu. Quá trình chuyển đổi bền vững này đòi hỏi sự chung tay nỗ lực từ tất cả các bên liên quan trong hệ sinh thái hàng hải.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. W. Ermuth et al. (2021), *Application of HyMethShip Propulsion using On-board Pre-combustion Carbon Capture for Waterborne Transport*, Heliyon International Journal.
Doi: 10.28991/HIJ-2021-02-02-01.
- [2] M. Chaal et al. (2022), *Towards system-theoretic risk assessment for future ships: A framework for*

selecting Risk Control Options, Ocean Engineering, Vol.259.

Doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111797.

- [3] J. Lee et al. (2023), *Risk Assessment of Bunkering for Methanol-Fueled Ship Using Bow-Tie Method*, Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, Vol.35, No.6, pp.1117-1128.
Doi: 10.13000/jfmse.2023.12.35.6.1117.

- [4] A. Ismail et al. (2025), *Towards Safe Maritime Decarbonization: Safety Barriers of Methanol Fuel*, Sustainability, Vol.17, No.11, p. 4896.
Doi: 10.3390/su17114896.

- [5] M. Lundgren et al. (2014), *The potential of methanol as a competitive marine fuel*, Environmental Science, Chemistry. Printed by Chalmers Gothenburg, Sweden.

- [6] A. Fernandes (2020), *Green Maritime Methanol 2.0*, TNO Public TNO 2022 R11000.

- [7] Y. Wu et al. (2025), *Feasibility and cost-benefit analysis of methanol as a sustainable alternative fuel for ships*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.13, No.5, p. 973.
Doi: 10.3390/jmse13050973.

- [8] M. Panchuk et al. (2024), *Methanol Potential as an Environmentally Friendly Fuel for Ships*, Naše More (Dubrovnik), Vol.71, No.2.
Doi: 10.17818/nm/2024/2.5.

- [9] J. Schmid et al. (2025), *Towards Goal-Based Design of Tank Ventilation Outlets for Methanol Powered Ships*.
Doi: 10.1115/omae2025-156723.

- [10] M. Roiaz et al. (2025), *Methanol on Board: Technical Challenges and Regulatory Compliance*, Progress in Marine Science and Technology.
Doi: 10.3233/pmst250102.

- [11] A. Sallam et al. (2023), *Methanol as an Eco-Environmental Alternative Fuel for Ships: A Case Study*, Journal of Marine Science and Technology-Taiwan.
Doi:10.51400/2709-6998.2698.

- [12] P. Adami et al. (2023), *Feasibility Analysis of a Methanol Fuelled Bulk Carrier*.
Doi: 10.59490/moses.2023.654.

- [13] J. Weng (2025), *Risk Analysis of Ship Methanol Bunkering Operation Based on Cloud Model*, Advances in Transdisciplinary Engineering,
Doi: 10.3233/atde250465.

- [14] A. Royer (2015), *HAZOP: une méthode d'analyse des risques: Principe*.
Doi: 10.51257/A-V1-SE4031.
- [15] A. Sahu (2025), *Retrofitting Marine Internal Combustion (IC) Engines for Methanol Fuel Integration*, International Journal for Science Technology And Engineering.
Doi: 10.22214/ijraset.2025.69401.
- [16] Z. Zhan et al. (2012), *HAZOP Analysis-Based Method on the Risk Assessment of the Main Engine of the 10000TEU Container Ship*.
Doi: 10.1007/978-3-642-25349-2_34.
- [17] M. Perčić et al. (2023), *Alternative Fuels for the Marine Sector and Their Applicability for Purse Seiners in a Life-Cycle Framework*, Applied Sciences, Vol.13, No.24, p. 13068.
Doi: 10.3390/app132413068.
- [18] B. Zincir et al. (2021), *Methanol as a Fuel for Marine Diesel Engines*.
Doi: 10.1007/978-981-16-0931-2_4.
- [19] O. Olorunfemi et al. (2023), *Assessing methanol potential as a cleaner marine fuel: An analysis of its implications on emissions and regulation compliance*, Cleaner Engineering and Technology, Vol.15, p. 100639.
Doi:10.1016/j.clet.2023.100639.
- [20] N. Ammar (2023), *Methanol as a Marine Fuel for Greener Shipping: Case Study Tanker Vessel*, Journal of Ship Production and Design.
Doi: 10.5957/jspd.03220012.
- [21] B. Jeong et al. (2025), *Comparative risk assessment of gaseous and liquid hydrogen fuel gas supply systems for hydrogen fueled vessels*, Journal of Ocean Engineering and Science.
Doi: 10.1016/j.joes.2025.08.004.

Ngày nhận bài:	28/02/2026
Ngày nhận bản sửa:	13/03/2026
Ngày duyệt đăng:	24/03/2026