

Lựa chọn tối ưu nhiên liệu hàng hải bền vững đáp ứng mục tiêu chiến lược giảm phát thải khí nhà kính của IMO 2023

Optimal selection of sustainable maritime fuels meeting the 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships

Phan Văn Hưng*, Phạm Tất Tiệp, Ngô Như Tại

¹Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Tác giả liên hệ: phanvanhung@vimaru.edu.vn

Ngày nhận bài: 23/2/2024; Ngày chấp nhận đăng: 7/3/2024

Tóm tắt:

Ngành hàng hải vận chuyển hơn 80% hàng hoá thương mại toàn cầu, đóng vai trò quan trọng thúc đẩy tăng trưởng kinh tế thế giới [1]. Tuy nhiên, các tàu sử dụng nhiên liệu hóa thạch và gây phát thải khí nhà kính (GHG) vào môi trường. Tại MEPC80 (7/2023), Tổ chức Hàng hải quốc tế đã ban hành Chiến lược giảm phát thải GHG từ tàu biển của IMO 2023 [2], [3]. Với cam kết giảm phát thải GHG từ vận tải biển quốc tế và là vấn đề cấp bách, nhằm mục đích sớm loại bỏ, đồng thời, thúc đẩy quá trình chuyển đổi công bằng và bình đẳng. Với tham vọng đạt mức phát thải GHG bằng 0 vào khoảng thời gian trước năm 2050. Giải pháp then chốt để đạt được mục tiêu này là chuyển đổi sử dụng nhiên liệu sạch không phát thải thông qua chín tiêu chí quan trọng. Từ đó, đề xuất nhiên liệu thay thế tiềm năng cho ngành hàng hải Việt Nam. Bài báo kỳ vọng là cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo, góp phần phát triển hàng hải Việt Nam bền vững, đáp ứng nghĩa vụ của quốc gia thành viên tại Phụ lục VI, MARPOL và thực hiện cam kết của Chính phủ tại COP26.

Từ khóa: Lựa chọn tối ưu; Nhiên liệu hàng hải bền vững; Chiến lược IMO 2023 GHG.

Abstract:

The maritime industry transports about 80% of global trade goods, which plays an important role in promoting global economic growth [1]. However, ships use mainly fossil fuels and thus emit greenhouse gases (GHG) into the environment. At MEPC 80 July 2023, the International Maritime Organization adopted the 2023 IMO Strategy for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Ships [2], [3]. With vision, “IMO remains committed to reducing GHG emissions from international shipping and, as a matter of urgency, aims to phase them out as soon as possible, while promoting, in the context of this Strategy, a just and equitable transition.” And, the ambition is to achieve zero greenhouse gas emissions before 2050. The key solution to achieve this goal is to switch to clean, zero-emission fuels. Therefore, the author will analyze potential alternative fuels through nine important criteria in this study. From there, we propose potential alternative fuels for Vietnam's maritime industry. The article is expected to be the foundation for further research, contributing to the sustainable development of Vietnam's maritime industry to meet the obligations of member countries of Annex VI, MARPOL, and implement the Government's commitments at COP26.

Keywords: Optimal Selection; Sustainable maritime fuels; 2023 IMO GHG Strategy.

1. Giới thiệu tổng quan về sử dụng nhiên liệu tàu biển

Tàu biển đóng vai trò quan trọng trong nền kinh tế toàn cầu, vận chuyển hơn 80% hàng hóa thương mại trên thế giới [1]. Tuy nhiên, khí thải từ tàu chứa các chất gây ô nhiễm không khí như CO₂, NO_x, SO_x và PM, gây rủi ro cho môi trường và sức khỏe cộng đồng, góp phần làm biến đổi khí hậu. Những chất gây ô nhiễm do tàu tạo ra, phát sinh từ quá trình đốt nhiên liệu hóa thạch, có thể tác động đáng kể đến ba trụ cột là sự bền vững bảo vệ môi trường, khả năng tồn tại về mặt kinh tế và công bằng xã hội [4]-[9].

Khái niệm bền vững của Liên hợp quốc (UN) về cách tiếp cận tổng hợp đối với các vấn đề môi trường, xã hội và kinh tế, nhấn mạnh trách nhiệm của thể hệ hiện tại trong việc đáp ứng nhu cầu năng lượng, không ảnh hưởng đến khả năng sử dụng năng lượng của các thế hệ tương lai [1], [2], [3]. Khung bền vững này công nhận các tác động tích cực về kiến thức, sự giàu có hoặc sức khỏe và các tác động tiêu cực như lạm dụng tài nguyên thiên nhiên, gây hại cho sự gắn kết xã hội hoặc tiêu dùng quá mức.

Trước bối cảnh hiện tại và để tạo điều kiện thuận lợi cho ngành hàng hải chuyển đổi nhiên liệu, nghiên cứu này sử dụng phương pháp ra quyết định đa thuộc tính để đánh giá tính bền vững của bốn nhiên liệu thay thế tiềm năng: Khí tự nhiên hóa lỏng (LNG), hydrogen, ammonia và methanol. Mục tiêu nhằm xem xét kỹ lưỡng các nhiên liệu thay thế trên nhiều khía cạnh khác nhau, phù hợp với các nguyên tắc bền vững, hướng ngành hàng hải đến các hoạt động có ý thức về môi trường và có trách nhiệm với xã hội [5], [6], [7].

1.1. Nhiên liệu truyền thống (dầu HFO và DO)

Dầu HFO và DO (nhiên liệu hóa thạch) chiếm 98% lượng nhiên liệu được sử dụng trong ngành hàng hải, trong khi đó, các nhiên liệu không khí thải độc hại như hydrogen và ammonia đang được phát triển, và chưa được kinh tế hóa hoàn toàn.

Theo báo cáo của Liên chương trình Môi trường Liên hợp quốc năm 2021, dự kiến vào năm 2040 có thể sản xuất khoảng 225 EJ/năm nhiên liệu hóa thạch. Dự kiến việc sử dụng nhiên liệu hóa thạch tiếp tục tăng cho đến năm 2040. Nhằm đạt được các mục tiêu về ứng phó biến đổi khí hậu, các quốc gia cần xác lập kế hoạch rõ ràng để giảm sản xuất nhiên liệu hóa thạch theo đúng mục tiêu này. Trên thực tế, dự báo các quốc gia đang tiêu thụ nhiên liệu hóa thạch tăng đến năm 2030 để đáp ứng yêu cầu phát triển kinh tế so với những cần thiết để duy trì sự nóng lên toàn cầu dưới 1,5°C. Sự sẵn có của dầu nặng/ dầu chung cất cho ngành hàng hải sẽ không gây thiếu hụt, thay vào đó, có thể không được sử dụng nhiên liệu này nếu các quy định nghiêm ngặt hơn được áp dụng.

1.2. Liquefied natural gas (LNG)

Với việc IMO đã quy định về giới hạn nồng độ SO_x, áp dụng từ tháng 01 năm 2020, theo đó, các tàu chạy bằng LNG thay thế dầu nặng đã thu hút sự chú ý của chủ tàu. Do quá trình hoá lỏng, loại bỏ lưu huỳnh, LNG tạo nên rất ít SO_x hoặc hạt bụi (PM) khi đốt, phát ra ít NO_x và CO₂ đáng kể. Ngoài ra, trọng lượng riêng của LNG thấp hơn không khí, lan truyền dễ dàng, giảm nguy cơ gây nổ. Vì vậy, LNG có ưu điểm lớn hơn so với dầu. Nhiều tài liệu đã chứng minh khả năng cung cấp nguồn LNG ổn định trong hơn 50 năm. Theo báo cáo xem xét thống kê của British Petroleum (BP) được công bố vào năm 2021, sản xuất khí tự nhiên vào khoảng 4036 tỷ m³ cho năm 2021. Sản lượng này đủ lớn để sử dụng LNG làm nhiên liệu trên tàu biển. Cần phát triển các cơ sở cấp nhiên liệu LNG mới để sử dụng rộng rãi trên các tàu chạy bằng LNG. Cung cấp LNG đã được triển khai thực hiện tại các cảng Rotterdam, Amsterdam, Zeebrugge (Bỉ), Barcelona (Tây Ban Nha), cảng Singapore và các cảng lớn khác [10], [11], [12].

1.3. Hydrogen/ Ammonia

Hydrogen (H₂): Quá trình tạo hydrogen từ một phân tử nước (H₂O) có thể phân rã thành một phân tử hydrogen (H₂) và 0,5 phân tử oxy (O₂) với điều kiện phải cung cấp năng lượng, có thể lấy từ năng lượng bức xạ của ánh sáng Mặt Trời. Nước là tài

nguyên vô tận và sẵn có, ánh nắng Mặt Trời hàng ngày cung cấp cho Trái Đất một năng lượng khoảng 3×10^{24} J, tương đương khoảng 104 lần năng lượng toàn thế giới tiêu thụ hàng năm hiện nay. Vì vậy, hydrogen là nguồn nhiên liệu vô tận, không thể gây ra khủng hoảng năng lượng và không gây độc quyền hoặc tranh giành nguồn năng lượng. Hydrogen là một loại khí có nhiệt độ cháy cao nhất trong tất cả các loại nhiên liệu khí thiên nhiên. Đặc điểm quan trọng của hydrogen là trong phân tử không chứa carbon, nên sản phẩm cháy của chúng chỉ là nước, không tạo nên khí thải độc hại, CO₂, CO, SO_x, NO_x, bụi carbon, rất thân thiện với môi trường, không gây ô nhiễm bầu không khí và không tạo ra hiệu ứng nhà kính gây biến đổi khí hậu toàn cầu [13].

Ammonia (NH₃): Là một loại nhiên liệu khác có tiềm năng sử dụng cho ngành hàng hải. Tuy nhiên, công nghệ sử dụng trong ngành vẫn chưa hoàn thiện cho nên chưa thể sử dụng rộng rãi trong thời gian sắp tới. Giống như hydrogen, ammonia không chứa carbon và cung cấp năng lượng cho hoạt động của động cơ vì không phát thải oxit carbon. Hiện nay, ammonia phần lớn được sản xuất từ khí tự nhiên bằng các quy trình sử dụng nhiều năng lượng và phát thải. Tuy nhiên, có thể sản xuất ammonia từ các nguồn tái tạo bằng phương pháp điện phân.

Một ưu điểm của NH₃ là có thể được hóa lỏng và mật độ năng lượng cao hơn đáng kể so với hydrogen [14]. Về lâu dài, có thể sử dụng ammonia trong pin nhiên liệu và động cơ đốt trong. Các nhà sản xuất động cơ thông báo: Những động cơ đầu tiên được sản xuất để sử dụng ammonia có thể được lưu hành trên thị trường trong vòng ba năm tới. Những khó khăn cần khắc phục để ammonia được sử dụng một cách an toàn và hiệu quả là: Ammonia độc hại, nó ảnh hưởng đến đặc tính cháy và tính chất ăn mòn, cơ sở pháp lý để quản lý việc sử dụng ammonia trên tàu cần được xây dựng và ban hành.

1.4. Methanol/ Ethanol

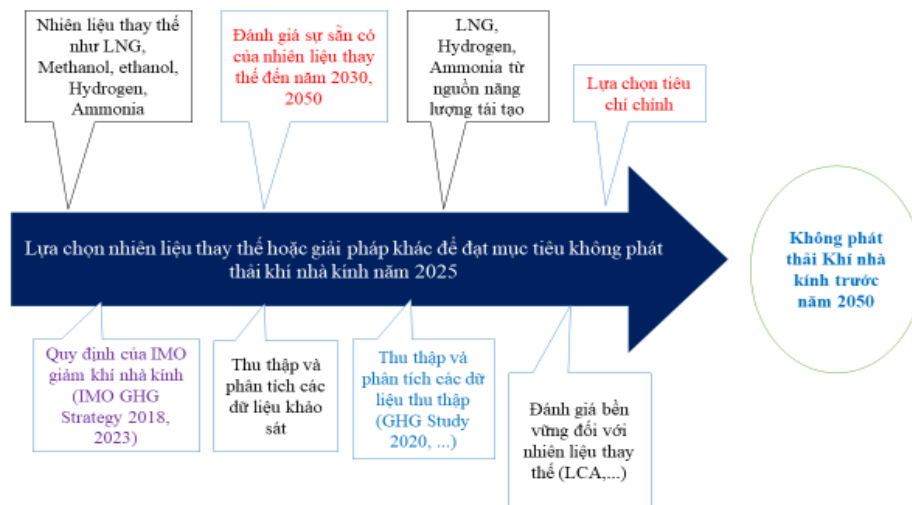
Methanol (CH₃OH) và ethanol (C₂H₆O hay C₂H₅OH) là hai loại cồn có thể được sản xuất từ

các nguồn tái tạo như gỗ, sản phẩm nông nghiệp, lượng lớn khí tự nhiên và khí đốt than đá. Các đặc điểm của những nhiên liệu này là: Độ nhớt thấp, dễ dàng phun sương và tạo hỗn hợp với không khí tốt hơn, ít khí thải do tỷ lệ nhiên liệu/không khí tương đối cao, nồng độ oxy cao, tỷ lệ hydrogen/carbon cao và cấu trúc không chứa lưu huỳnh; khả năng làm lạnh bằng phương pháp bay hơi cao, tăng hiệu suất thể tích trong quá trình nạp và nén. Tuy nhiên, cần xem xét methanol bởi có thể gây độc hại, ăn mòn và tạo ra một lượng khí nhiều gấp đôi so với dầu diesel.

Methanol đang được sử dụng trong ngành hàng hải quốc tế vì nhiên liệu này phát thải thấp hơn việc sử dụng nhiên liệu hóa thạch. Sản xuất methanol đang tăng đều qua các năm, đạt 160,46 triệu tấn vào năm 2021 so với 140 triệu tấn vào năm 2018 [10]. Sản xuất methanol từ nhiên liệu hóa thạch dẫn đến việc thải ra các khí nhà kính. Vì vậy, đã có nhiều chiến dịch thúc đẩy sản xuất từ sinh khối và nguồn năng lượng tái tạo, dẫn đến tăng chi phí. Để phân tích toàn diện về lợi ích tổng thể của các nhiên liệu, việc sử dụng đánh giá vòng đời, xem xét các tác động môi trường của một hệ thống sản xuất trong suốt vòng đời có thể được áp dụng. Theo IPCC (2013), khí methane có khả năng gây hiệu ứng nhà kính lần lượt là 86 lần và 36 lần so với khí CO₂ dựa trên vòng đời là 20 năm và 100 năm. Hiện tại, LNG được sử dụng như một nhiên liệu chuyển đổi cho đến khi các nhiên liệu thay thế khác như ammonia hoặc hydrogen có sẵn và phổ biến cho ngành hàng hải. Các yếu tố như thuận lợi trong sản xuất, hay khía cạnh kinh tế của chủ tàu, đánh giá vòng đời, khía cạnh kỹ thuật và đánh giá mức độ an toàn đều là các thành phần quan trọng trong quá trình đánh giá. Nhiều khía cạnh cần được phân tích để nhiên liệu hàng hải đạt được tính bền vững vào năm 2030, do đó, đến năm 2050, nhiên liệu sạch sẽ được sử dụng rộng rãi. Các đánh giá vòng đời, rò rỉ và khí thải có thể quan trọng khi xét đến các khía cạnh môi trường. Chi phí đầu tư để mua nhiên liệu thay thế có thể xem xét trong các khía cạnh kinh tế.

Bảng 1. Đặc điểm một số nhiên liệu [9]-[14].

Chỉ số đặc trưng	Diesel	Methanol	Ethanol	LNG	Hydrogen
Mật độ (kg/m ³)	833-881	798	794	450	0.0838
Nhiệt độ tự cháy (K ở 1 bar)	530	743	635	810	858
Giới hạn cháy (% V)	0.7-5	6-36	3-19	4-16	4-17
Tỷ lệ khí trên cơ sở khối lượng	14.5	6.5	9.1	17.2	34.3
Giá trị tỏa nhiệt ròng (MJ/kg)	42.5	20.1	27.0	46-50.2	119.9
Vận tốc ngọn lửa (cm/s)	30	50	41	380	265-325
Nhiệt độ ngọn lửa (K ở 1 bar)	2327	2163	2193	2233	2318
Số Octane	30	109	109	120	130
Số Cetane	40-55	<5	8	-10	-
Hàm lượng Carbon (% Wt)	85	38	52	75	0
Hàm lượng Hydro (% Wt)	15	12	13	25	100
Hàm lượng Oxy (% Wt)	0	50	35	0	0
Hàm lượng lưu huỳnh (% Wt)	< 350 ppm	0	0	0	0

**Hình 1.** Quá trình nghiên cứu thích ứng với mục tiêu không phát thải khí nhà kính.

Việc sử dụng máy chính cho nhiên liệu thay thế, công nghệ để thực hiện chuyển đổi khả thi từ sử dụng nhiên liệu LNG sang nhiên liệu không carbon, sản xuất ammonia xanh, thiết kế tàu có khả năng sử dụng ammonia là nhiên liệu cùng với hệ thống lưu trữ là những vấn đề có tầm ảnh hưởng đến mặt kỹ thuật. Một số nghiên cứu đã đề xuất rằng ammonia có thể được sử dụng như một nhiên liệu hàng hải trong tương lai. Sản xuất ammonia bằng nguồn năng lượng tái tạo sẽ tạo ra một nhiên liệu không carbon và bền vững.

2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu được nhóm tác giả sử dụng trong nghiên cứu này là phương pháp khảo sát theo bảng câu hỏi, phỏng vấn chuyên gia có kinh nghiệm từ nhiều bên liên quan như chủ tàu, kỹ sư thiết kế tàu, tổ chức phân cấp tàu, cơ quan quản lý nhà nước về hàng hải, thuyền viên và các nhà hoạch định chính sách, chiến lược năng lượng quốc gia. Số phiếu nhận được đánh giá là 46 phiếu/ 60 phiếu được gửi đi. Dữ liệu thu nhận được phân tích chuyên sâu. Ngoài ra, dữ liệu thu

thập từ các nguồn thông tin, tài liệu và các công bố khoa học liên quan cũng được phân tích. Quá trình thực hiện được tóm tắt như Hình 1. Phương pháp phân tích ra quyết định đa thuộc tính được sử dụng trong nghiên cứu này là Fuzzy-AHP và mô hình hóa trên phần mềm C++ để trích xuất các trọng số đối với từng tiêu chí. Điểm trọng số tổng của từng loại nhiên liệu là cơ sở đưa ra lựa chọn tối ưu cho nhiên liệu hàng hải tương lai [15]-[23].

3. Tiêu chí lựa chọn tối ưu nhiên liệu hàng hải bền vững

Các nhiên liệu thay thế bền vững được lựa chọn và so sánh là methanol, ethanol, LNG và hydrogen. Nhiên liệu hydrogen được cho là sản xuất bằng hệ thống điện phân kiềm theo yêu cầu và không được lưu trữ trên tàu. Căn cứ để nhóm tác giả xác định 09 tiêu chí đánh giá là các nghiên cứu của IMO công bố, gồm: GHG Study 2014 lần 3, GHG Study 2020 lần 4 [3]. Đặc biệt là GHG Study 2020, đã phân tích khá chi tiết các khía cạnh khác nhau của từng nhiên liệu thay thế. Hơn nữa, theo kết quả khảo sát thực tiễn từ các chuyên gia trong lĩnh vực hàng hải và năng lượng Việt Nam hiện nay, các nhiên liệu thay thế được đánh giá ở từng tiêu chí, trong đó, nên tập trung vào 09 tiêu chí quan trọng. Sau đó, bảng ma trận được tạo ra có tính đến thang đánh giá của các tiêu chí so sánh. Với năm thang đánh giá cho từng tiêu chí so sánh và ký hiệu của chúng được trình bày ở Bảng 2. Các thang khác là căn cứ vào kết quả của những công trình được công bố để nội suy về thang 5.

Bảng 2. Thang đánh giá.

Thang đánh giá	Ý nghĩa
1	Kém
2	Yếu
3	Trung bình
4	Khá
5	Tốt

Các tiêu chí so sánh được xác định thông qua xem xét đến độ an toàn của tàu, mức sử dụng toàn cầu, khả năng tiếp nhiên liệu, độ bền, tính dễ áp dụng, các quy tắc và quy định, hiệu suất và khí thải của

động cơ, ảnh hưởng đến các bộ phận của động cơ và các vấn đề thương mại.

3.1. An toàn

An toàn trên các tàu biển là một vấn đề quan trọng, và các công nghệ mới cho tàu biển được đánh giá dựa trên yếu tố này. An toàn của các nhiên liệu thay thế có thể được đánh giá thông qua mật độ, nhiệt độ tự cháy, giới hạn cháy, tỷ lệ hơi khí và nhiệt độ biểu kiến Octane và Cetane, cụ thể như sau: Nhiệt độ tự cháy của hydrogen cao nhất, LNG đứng thứ hai, methanol đứng thứ ba và ethanol là thấp nhất. Điều này có nghĩa là hydrogen cần nhiệt độ môi trường cao nhất và ethanol cần nhiệt độ thấp nhất để tự cháy. Giới hạn cháy của nhiên liệu là chỉ số của lượng nhiên liệu cần thiết trong không khí theo thể tích để đốt cháy nhiên liệu. LNG có giới hạn cháy hẹp nhất là 4 - 16%, trong khi, Ethanol có từ 3% đến 19%, methanol là 6 - 36%, và hydrogen có giới hạn rộng nhất từ 4% đến 75%. Hydrogen dễ dàng cháy với tỷ lệ hỗn hợp khí nhà kính khác nhau. Tỷ lệ hơi khí tối ưu để đốt cháy nhiên liệu hoàn toàn đối với methanol, ethanol, LNG và hydrogen lần lượt là 6,5; 9,1; 17,2 và 34,3. Methanol cần lượng không khí ít nhất để đốt cháy hoàn toàn, trong khi, hydrogen cần lượng không khí nhiều nhất. Hydrogen có số Octane cao nhất là 130 và không có số Cetane, LNG có số Octane là 120 và số Cetane là -10. Ethanol và methanol có cùng số Octane là 109, số Cetane lần lượt là 8 và thấp hơn 5 [9]-[14].

Thông tin về các biện pháp an toàn này rất cần thiết để đánh giá sự an toàn tạo ra bằng cách so sánh các thông số kỹ thuật của nhiên liệu thay thế. Theo đánh giá an toàn của các nhiên liệu thay thế, hydrogen đạt 4, LNG đạt 3, methanol và ethanol đạt 1.

3.2. Sự sẵn có toàn cầu

Sự sẵn có toàn cầu là sự phổ biến trong việc sử dụng trên toàn cầu. Methanol và ethanol đòi hỏi diện tích lưu trữ lớn hơn so với HFO hoặc MDO do khả năng nạp nhiên liệu, dẫn đến chỉ một số ít công ty tàu phà đã điều chỉnh động cơ tàu cho

nhiên liệu methanol. Hơn nữa, việc sử dụng methanol và ethanol trong động cơ diesel đại diện cho một công nghệ mới, điều này, cũng ảnh hưởng đến việc sử dụng chúng trên các tàu biển. LNG, mặc dù yêu cầu diện tích lưu trữ gấp đôi so với HFO, lại là một xu hướng hiện nay với việc mở rộng khu vực nạp nhiên liệu và sự quan tâm ngày càng lớn từ phía các nhà sản xuất động cơ liên quan đến động cơ diesel chạy bằng LNG. Một số lượng đáng kể các tàu đã hoạt động hoặc đang được phát triển để sử dụng LNG. Trong khi đó, việc sử dụng hydrogen, được tạo ra thông qua hệ thống điện phân kiềm, không cần đến diện tích lưu trữ lớn và hạ tầng cung cấp nhiên liệu phức tạp. Một số công ty đã triển khai hệ thống này cho các tàu hoạt động trên các sông nội địa tại Vương quốc Anh, chứng minh tính hiệu quả của công nghệ này. Tuy nhiên, việc ứng dụng trên tàu biển vẫn còn hạn chế. LNG được xem là một xu hướng với số lượng đáng kể các ứng dụng trên tàu, nên được đánh giá là 4 (tương đối tốt) về khả dụng toàn cầu. Hydrogen là công nghệ đã được chứng minh nhưng chỉ bắt đầu được áp dụng trên tàu biển, nhận đánh giá là 3 (trung bình). methanol và ethanol nhận xét 2,5 điểm (trung bình thấp) do là công nghệ mới nổi và có số lượng ứng dụng hiện tại hạn chế.

3.3. Khả năng cấp nhiên liệu

Khả năng cung cấp nhiên liệu liên quan đến sự sẵn có toàn cầu. Nếu nhiều tàu yêu cầu sử dụng một loại nhiên liệu cụ thể, khả năng cung cấp nhiên liệu cho loại đó sẽ cao. Việc sử dụng methanol và ethanol trên các tàu biển đang giới hạn, và điều này ảnh hưởng đến khả năng cung cấp nhiên liệu cho các tàu sử dụng loại nhiên liệu này. Trong khi đó, việc sử dụng LNG đang gia tăng nhanh, và ảnh hưởng đến việc cung cấp nhiên liệu.

Mặc dù khả năng cung cấp nhiên liệu LNG đang phát triển, nhưng vẫn chưa thể đáp ứng mạng lưới cung cấp toàn cầu. Bởi điểm yếu duy nhất của hydrogen là cần nước tinh khiết, nên được đánh giá là 4 (tương đối tốt). LNG nhận xét 3 điểm (trung bình) do có các khu vực cung

cấp nhiên liệu nhưng chưa đủ. Methanol và ethanol nhận xét 2 vì khả năng cung cấp nhiên liệu bị giới hạn.

3.4. Tính bền vững của nhiên liệu

Khái niệm “tính bền” của các nhiên liệu thay thế liên quan đến thời gian sử dụng ổn định. Tổng dự trữ nhiên liệu toàn cầu, sự sẵn có, khả năng cung cấp và xu hướng tương lai định hình đánh giá. Ethanol và methanol chủ yếu được tạo ra bởi khí tự nhiên, than đá và sinh khối. Cả hai nhiên liệu này đều phụ thuộc vào dự trữ than đá và khí tự nhiên trên toàn thế giới, cũng như tỷ lệ sản xuất từ nguồn sinh khối.

Các nhiên liệu nhận được xếp hạng theo nhiều yếu tố từ 1 đến 3, với tổng điểm độ bền là 12. Hydrogen đạt điểm cao nhất là 5, LNG đạt điểm 4, methanol và ethanol cùng đạt điểm 3. Đánh giá độ bền này cho phép các nhiên liệu thay thế đáp ứng nhu cầu năng lượng và bền vững.

3.5. Khả năng thích nghi đối với tàu hiện có

Khả năng thích nghi với các hệ thống nhiên liệu thay thế là cao hơn. Tuy nhiên, do không gian hạn chế và các sửa đổi cần thiết cho động cơ chính, việc áp dụng các hệ thống mới cho các tàu hiện tại trở nên khó khăn. Hệ thống nhiên liệu methanol và ethanol cần có bể nhiên liệu mới hoặc thay đổi kết ballast của tàu thành kết nhiên liệu. Cần đến nơi cho bơm chuyển đổi và bơm áp suất cao, để cung cấp nhiên liệu cho động cơ chính phải có hai lớp ống dẫn. Động cơ chính cần các bộ phun nhiên liệu và bơm nhiên liệu.

Việc cung cấp LNG cho máy chính và điều kiện trong két, các tàu chạy bằng LNG cần có kết thiết kế đặc biệt và không gian kết nối két. Tàu cũng cần không gian thông gió khí, ống dẫn khí hai lớp, các trạm nhận nhiên liệu đặc biệt được bảo vệ và không gian an toàn cho buồng điều khiển máy. Máy chính được thay đổi tương tự như các tàu chạy bằng methanol và ethanol.

Mặc dù hydrogen không cần nhiều điều kiện đặc biệt nhất để thích nghi hệ thống với tàu hiện

có, nhưng vẫn cần một số sắp xếp. Do đó, nó được xếp hạng 4-một xếp hạng tương đối tốt. Ethanol và methanol xếp hạng 3, bởi số lượng sửa đổi vừa phải. LNG được xếp hạng 2, do số lượng sửa đổi lớn cần thiết trên các tàu hiện có.

3.6. Hiệu suất động cơ

Nhiên liệu thay thế ảnh hưởng đến hiệu suất động cơ. Bởi vì chúng có nhiệt trị thấp hơn, methanol và ethanol làm giảm hiệu suất động cơ và làm tăng mức tiêu hao nhiên liệu cơ bản trên đơn vị công suất. Do giá trị nhiệt lượng cao hơn và đặc tính đốt cháy tốt hơn của chúng, việc sử dụng hydrogen hoặc LNG làm tăng hiệu suất máy và giảm mức tiêu hao nhiên liệu cơ bản trên đơn vị công suất. Methanol và ethanol có tác động tiêu cực đến hiệu suất động cơ, trong khi, LNG và hydrogen có tác động tích cực. Sử dụng công thức (1) để thực hiện phép tính:

$$E_k = \sum(E_i \cdot F_{ik}) \quad (1)$$

Trong đó:

E_k là lượng khí thải của nhiên liệu k được đánh giá;

E_i là lượng khí thải loại i đối với nhiên liệu k ;

F_{ik} là ảnh hưởng của nhiên liệu thay thế loại k đối với phát thải khí thải loại i . Giá trị bằng 0 khi ảnh hưởng tăng và bằng 1 khi ảnh hưởng giảm đối với mỗi loại khí thải của từng nhiên liệu thay thế.

Bảng 1. Lượng khí và kết quả đánh giá [4], [10]-[14].

Loại khí thải	Lượng (tấn)	Trọng số	Kết quả thang 5
CO ₂	949 triệu	12	5
CO	936 nghìn	2	2
NO _x	19.002 triệu	9	4
SO _x	10.240 triệu	9	4
PM	1.402 triệu	4	3
THC	Không xác định	1	1

Chưa có nghiên cứu về so sánh tác động của các nhiên liệu thay thế đối với hiệu suất của động cơ, vì vậy, không thể tìm ra trọng số. Do đó,

methanol và ethanol được xếp hạng ở mức 1 bởi tác động tiêu cực của chúng, trong khi, LNG và hydrogen được xếp hạng ở mức 5 do tác động tốt đối với hiệu suất động cơ.

3.7. Tác động đối với khí thải

Để giảm khí thải từ vận tải biển là lý do chính để sử dụng nhiên liệu thay thế trên tàu. Các loại khí thải khác nhau bị ảnh hưởng bởi các nhiên liệu thay thế. SO_x và CO₂ giảm khí thải vì nhiên liệu có hàm lượng carbon và lưu huỳnh thấp. Methanol và ethanol giảm NO_x, SO_x và PM, tăng CO₂ và CO. LNG giảm CO₂ giới hạn, giảm 95% NO_x, 100% SO_x và 99% PM, nhưng nó phát tán khí methane. Công nghệ hiện đại đã loại bỏ nó từ động cơ diesel hai thì và giảm xuống mức tối thiểu ở động cơ diesel bốn thì. Vì vậy, khi thực hiện đánh giá, không có rò rỉ khí methane. Cuối cùng, hydrogen giảm khí thải CO₂, CO, SO_x và PM, khí thải NO_x có thể tăng hoặc giảm dựa trên điều kiện hoạt động của động cơ [10], [11], [12], [13], [14]. Kết quả cho thấy LNG, hydrogen và amonia đạt mức 5 cao nhất, methanol và ethanol đạt được mức 3 trung bình.

3.8. Tác động thương mại của nhiên liệu thay thế

Tác động thương mại của nhiên liệu thay thế bao gồm việc giảm khả năng chở hàng hóa, lượng nhiên liệu cho chuyến đi và khả năng nạp nhiên liệu. Methanol và ethanol có thể được lưu trữ trong một két chứa nhiên liệu riêng biệt mới hoặc không gian két đã có trên tàu như két nước ballast. Nếu sử dụng két chứa riêng biệt, cần không gian cho két chứa bổ sung và có thể được cung cấp từ không gian chở hàng hóa. Hơn nữa, hệ thống methanol và ethanol cần không gian phòng bơm riêng biệt, có thể chiếm không gian tại khu vực hàng hóa. Nhiên liệu LNG phải được lưu trữ trong các két chuyên biệt được thiết kế riêng, và những két này chiếm không gian lớn trên boong hoặc dưới hầm tàu, chiều dài của tàu dài hơn để vận chuyển cùng số lượng container tại một tàu sử dụng nhiên liệu LNG. Dung tích hàng hóa của tàu chở container

loại feeder giảm đi 4% do két chứa LNG. Không gian thực tế của két methanol và LNG thay đổi từ tàu này sang tàu khác. Hydrogen có thể không cần đến két chứa, vì nó được sản xuất theo yêu cầu trên tàu. Chỉ cần két chứa nước tinh khiết, nếu không có máy tạo nước ngọt trên tàu. Các bộ phận thiết bị hệ thống cho hydrogen ít hơn và chiếm không nhiều không gian có thể được cung cấp tại buồng máy.

Do sự khác biệt về mật độ và giá trị nhiệt thấp hơn giữa các nhiên liệu, lượng nhiên liệu cần cho cùng một chuyến đi khác nhau. Methanol và ethanol có khoảng cùng mật độ với dầu diesel, tuy nhiên, có giá trị nhiệt thấp hơn hai lần. Cần gấp đôi lượng methanol và ethanol nhằm thay thế dầu diesel để sản xuất cùng lượng nhiệt phát ra. LNG có mức giá trị nhiệt thấp hơn giá trị trung bình, nhưng có mật độ chỉ bằng một nửa so với dầu diesel, cần khoảng gấp đôi không gian bể chứa cho cùng một chuyến đi. Khi nghiên cứu một tàu chở Ro-Ro, với việc sử dụng nhiên liệu LNG, lượng tiêu thụ hàng ngày của LNG là 19 tấn và cho một chuyến đi hai ngày là 38 tấn. Dung tích két chứa cần thiết là 84 m³ cho 38 tấn nhiên liệu LNG. Như vậy, két khoảng 38m³, nếu nhiên liệu tiêu thụ là HFO hoặc MGO.

Khả năng cung cấp nhiên liệu của tàu ảnh hưởng đến tuyến đường của một tàu. Nếu một cảng không đủ nhiên liệu, tàu phải thay đổi tuyến đường và hướng tới cảng hoặc khu vực có khả năng nạp nhiên liệu. Tình huống này làm tăng chi phí cho mỗi chuyến đi của chủ tàu. Hydrogen là nhiên liệu có khả năng cung cấp tốt nhất, LNG ở mức trung bình, methanol và ethanol có khả năng nạp nhiên liệu thấp nhất. Cho nên, chi phí mỗi chuyến đi cao nhất là khi sử dụng methanol và ethanol, mức trung bình là LNG và thấp nhất là hydrogen. Hydrogen được điểm 5, methanol, ethanol và LNG được điểm 3 vì các nhược điểm của chúng.

3.9. Chi phí

Chi phí bao gồm các chi phí vốn (CapEx) và các chi phí vận hành (OpEx) của việc áp dụng

những hệ thống nhiên liệu thay thế trên tàu. CapEx là các chi phí đầu tư bao gồm các thành phần của hệ thống, cải tiến động cơ và sự điều chỉnh buồng máy. Chi phí cải tiến động cơ phụ thuộc vào loại tàu và kích thước tàu. Chi phí CapEx của hệ thống nhiên liệu methanol bao gồm chi phí cải tiến động cơ và sự điều chỉnh an toàn của buồng máy. Phần lớn chi phí cải tiến của hệ thống LNG bao gồm các két chứa LNG và các hệ thống an toàn của hệ thống nhiên liệu. Chi phí đặc biệt của két chứa LNG được thiết kế riêng biệt khoảng hơn 3000 USD/m³. Sử dụng hydrogen bằng hệ thống điện phân kiềm có ít thành phần hệ thống như đơn vị tế bào điện phân, bơm, ống và hệ thống an toàn, không cần thiết phải sửa đổi máy chính. OpEx là các chi phí vận hành bao gồm các chi phí bảo dưỡng, chi phí tiêu hao và giá nhiên liệu. Chi phí bảo dưỡng liên quan đến các khoảng thời gian bảo dưỡng động cơ và độ phức tạp của hệ thống. Có thể kỳ vọng rằng khoảng thời gian bảo dưỡng ngắn đi khi sử dụng methanol, ethanol và hydrogen làm nhiên liệu và khoảng thời gian bảo dưỡng rộng hơn khi sử dụng LNG. Sử dụng khí tự nhiên làm nhiên liệu cho động cơ diesel làm tăng khoảng thời gian bảo dưỡng từ ba đến bốn lần so với hoạt động bằng dầu diesel [10], [13]. Độ phức tạp của hệ thống là một yếu tố khác ảnh hưởng đến chi phí bảo dưỡng.

Chi phí tiêu hao bao gồm các chi phí dầu bôi trơn, phụ tùng và các chi phí bổ sung cho việc hoạt động của hệ thống. Các loại dầu bôi trơn giá rẻ có thể được sử dụng do thiếu lượng lưu huỳnh trong LNG và hydrogen, không cần thay dầu bôi trơn trong khoảng thời gian gần hơn so với hoạt động bằng HFO. Tần suất sử dụng các phụ tùng liên quan đến hiệu ứng của các nhiên liệu thay thế đối với buồng đốt động cơ, chi phí bảo dưỡng.

Chi phí bổ sung cho methanol và ethanol là các hợp chất hòa tan. Nếu được trộn trước với nhiên liệu diesel hoặc HFO trong két chứa, cần phải thêm dung môi để ngăn sự tách biệt của methanol và ethanol khỏi thành phần nhiên liệu đã trộn. Thấy rằng, phương pháp phun sương

không cần sự trộn trước của hỗn hợp nhiên liệu. Methanol và ethanol được lưu trữ trong một két chứa riêng biệt, nên hệ thống không cần dung môi. Sử dụng hydrogen bằng hệ thống điện phân kiềm có chi phí bổ sung cho giá trị nước tinh khiết và giá trị potassium hydroxide (KOH). Trang bị máy tạo nước ngọt trên tàu không cần cung cấp nước tinh khiết, nhưng nếu không có máy tạo nước ngọt, chi phí nước tinh khiết được thêm vào OpEx. Giá trị nước tinh khiết dao động trong khoảng từ 35 đến 55 USD/tấn. Thành phần KOH được sử dụng để biến nước tinh khiết thành nước kiềm dùng đo độ dẫn điện. KOH trong dung dịch nên chiếm 25 - 30% khối lượng tổng dung dịch để đạt được độ dẫn tốt nhất. Giá trị KOH dao động từ 900 đến 1200 USD/tấn đối với các nhà sản xuất khác nhau. LNG không có bất kỳ chi phí bổ sung cho việc hoạt động của hệ thống nhiên liệu. Giá nhiên liệu là một yếu tố quan trọng trong kinh doanh thương mại. Giá LNG cao hơn so với methanol và ethanol. Việc sử dụng hydrogen bằng hệ thống điện phân kiềm là sản xuất nhiên liệu bằng cách tiêu thụ nước tinh

kiết, nên giá nhiên liệu không được xem xét cho hệ thống này. Do đó, LNG và hydrogen được đánh giá ở mức 4, methanol và ethanol được đánh giá ở mức 3.

4. Kết quả và thảo luận

Do có sẵn trên toàn cầu, nhiên liệu LNG đang trở nên phổ biến hiện nay. Ngược lại, Hydrogen được tạo ra bởi một hệ thống điện phân kiềm trên tàu và cần nước sạch để cung cấp cho các tàu không có máy tạo nước ngọt, nên khả năng cung cấp cho tàu cao hơn so với bất kỳ nhiên liệu thay thế. Các yếu tố như dự trữ nhiên liệu toàn cầu, sự có sẵn, khả năng cấp nhiên liệu và xu hướng trong tương lai đều ảnh hưởng đến việc đánh giá độ bền. Sản xuất hydrogen thông qua hệ thống điện phân kiềm sử dụng nước tinh khiết được tìm thấy dễ dàng. Hydrogen có khả năng cung cấp cao nhất, và điều này cho thấy rằng, trong tương lai, các nguồn năng lượng tái tạo như hydrogen được ưa chuộng hơn. Mặc dù, đặc điểm duy nhất của hydrogen là không sẵn có, nhưng điều này không ảnh hưởng đến kết quả đánh giá độ bền vững của hydrogen.

Bảng 4. Kết quả đánh giá nhiên liệu thay thế.

Tiêu chí	Hydrogen	LNG	Methanol	Ethanol	Trọng số
T1: An toàn	4	3	1	1	0.292
T2: Sự sẵn có toàn cầu	3	4	2.5	2.5	0.042
T3: Khả năng cấp nhiên liệu	4	3	2	2	0.045
T4: Độ bền vững của nhiên liệu	5	4	3	3	0.052
T5: Khả năng thích nghi đối với các tàu hiện có	4	2	3	3	0.061
T6: Hiệu suất máy	5	5	1	1	0.136
T7: Tác động đối với khí thải	5	5	3	3	0.174
T8: Tác động thương mại của nhiên liệu thay thế	5	5	3	3	0.089
T9: Chi phí	4	4	3	3	0.109
Tổng điểm	39	35	21.5	21.5	1.000

Các tính chất kết cấu của nhiên liệu thay thế cũng như mức độ đốt cháy của chúng đã được xem xét. Hydrogen được coi là nhiên liệu thay thế an toàn nhất cho tàu. Bảng 4 thể hiện kết quả đánh giá tổng thể và trọng số tính toán theo Fuzzy AHP cho từng tiêu chí. Bảng 5 thể hiện

trọng số cuối cùng đối với từng tiêu chí cho mỗi nhiên liệu. Theo đó, Hydrogen là nhiên liệu thay thế đứng đầu với giá trị trọng số là 4.409, xếp thứ hai là LNG với 3.940, và cuối cùng, Methanol và Ethanol cùng đạt giá trị 2.078.

Bảng 5. Trọng số đánh giá cuối cùng.

Tiêu chí	Hydrogen	LNG	Methanol	Ethanol
T1: An toàn	1.168	0.876	0.292	0.292
T2: Sự sẵn có toàn cầu	0.126	0.168	0.105	0.105
T3: Khả năng cấp nhiên liệu	0.18	0.135	0.09	0.09
T4: Độ bền vững của nhiên liệu	0.26	0.208	0.156	0.156
T5: Khả năng thích nghi đối với các tàu hiện có	0.244	0.122	0.183	0.183
T6: Hiệu suất máy	0.68	0.68	0.136	0.136
T7: Tác động đối với khí thải	0.87	0.87	0.522	0.522
T8: Tác động thương mại của nhiên liệu thay thế	0.445	0.445	0.267	0.267
T9: Chi phí	0.436	0.436	0.327	0.327
Trọng số cuối cùng	4.409	3.94	2.078	2.078

5. Kết luận và kiến nghị

Khi xem xét các tính chất kết cấu của nhiên liệu thay thế cũng như mức độ đốt cháy, hydrogen được xem là nhiên liệu thay thế an toàn nhất cho tàu. Điểm đánh giá tổng thể của nhiên liệu này là cao nhất. Do đó, nhóm nghiên cứu kiến nghị một số nội dung sau:

(i) Xây dựng lộ trình quốc gia về sử dụng nhiên liệu carbon thấp và nhiên liệu sạch đối với tàu biển, cũng như các phương tiện thủy hoạt động trong vùng biển Việt Nam;

(ii) Ban hành các chính sách hỗ trợ cho chủ tàu, người quản lý khai thác tàu thực hiện chuyển đổi nhiên liệu cho các tàu hiện có;

(iii) Khuyến khích đóng mới các tàu sử dụng nhiên liệu sạch, trong đó, hydrogen là nhiên liệu được ưu tiên;

(iv) Cập nhật các chương trình đào tạo và huấn luyện thuyền viên về quản lý và khai thác các tàu sử dụng nhiên liệu phát thải thấp và không phát thải, trong đó, ưu tiên LNG và hydrogen.

Phụ lục A. Bảng câu hỏi khảo sát đối với 1 loại nhiên liệu cụ thể

STT	Câu hỏi	Mức đánh giá				
1	Đánh giá an toàn nhiên liệu thay thế dựa trên mật độ, nhiệt độ tự cháy, giới hạn cháy, tỷ lệ hơi khí và nhiệt độ biểu kiến Octane và Cetane.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
2	Xếp hạng nhiên liệu thay thế trong ngành hàng hải theo tính sẵn có ở mọi nơi trên thế giới vào năm 2030	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
3	Khả năng cấp nhiên liệu này ở các cảng biển	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
4	Độ bền vững của nhiên liệu liên quan đến thời gian sử dụng ổn định dựa trên nguồn sản xuất bền vững (LCA)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
5	Khả năng thích nghi đối với các tàu hiện có liên quan đến việc giới hạn không gian và sửa đổi cần thiết cho động cơ	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
6	Đánh giá nhiên liệu thay thế ảnh hưởng đến hiệu suất động cơ	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
7	Đánh giá khả năng giảm lượng khí thải nhà kính đối với nhiên liệu thay thế	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
8	Đánh giá tác động thương mại của nhiên liệu thay thế bao gồm việc giảm khả năng chở hàng hóa, lượng nhiên liệu cho chuyến đi và khả năng nạp nhiên liệu	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

9	Đánh giá chi phí bao gồm các chi phí vốn (CapEx) và các chi phí vận hành (OpEx) của việc áp dụng các hệ thống nhiên liệu thay thế trên tàu	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
---	--	-----	-----	-----	-----	-----

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT23-24.05.

Tài liệu tham khảo

- [1] UNTAD, “Review of Maritime Transport 2022.” unctad.org. Accessed: Jan. 20, 2024. [Online]. Available: <https://unctad.org/rmt2022>.
- [2] IMO. (2023, Jul. 7). *MEPC.377(80), 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships*. [Online]. Available: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf>.
- [3] IMO. (2018, Apr. 13). *MEPC.304(72), Initial IMO strategy on reduction on GHG emissions from ships*. [Online]. Available: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Resolution%20MEPC.304%2872%29_E.pdf.
- [4] IMO, “Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020,” London, UK, 2020.
- [5] P. V. Hung và N. M. Cường, “Lựa chọn nhiên liệu thay thế phù hợp với giới hạn lưu huỳnh toàn cầu 2020”, *TC KHCN HH*, số 62, tr. 78-83, 4.2020.
- [6] P. V. Hung và N. M. Đức, “Tính lượng khí thải từ đội tàu vận tải biển Việt Nam,” *TC KHCN HH*, số 66, tr. 94-98, 4.2021.
- [7] N. M. Cuong and P. V. Hung, “An analysis of available solutions for commercial vessels to comply with IMO strategy on low sulfur,” *J. Int. Mar. Saf.*, *Environ. Aff. Ship.*, vol. 4, no. 2, pp. 40-47, 2020, doi: 10.1080/25725084.2020.1784080.
- [8] N. M. Đức và cộng sự, “Xây dựng giải pháp tổ chức, quản lý, khai thác vận tải biển theo hướng tiết kiệm năng lượng, giảm phát thải phù hợp với quy định của Phụ lục VI, Công ước MARPOL,” trường ĐH HH VN, HP, VN, nhiệm vụ khoa học và công nghệ cấp Bộ (Bộ GTVT), GG 191003, 2020.
- [9] N. M. Đức và cộng sự, “Khảo sát, đánh giá, xây dựng lộ trình quốc gia về giảm phát thải khí thải từ hoạt động của tàu biển,” trường ĐH HH VN, HP, VN, nhiệm vụ môi trường cấp Bộ (Bộ GTVT), MT201004, 2021.
- [10] DNV GL, “Maritime in Focus - LNG as Ship Fuel, Latest Developments and Projects in the LNG Industry,” Hamburg, Germany, 801156 2015-05, 2015, vol. 1.
- [11] M. R. Saxena, R. K. Maurya, and P. Mishra, “Assessment of performance, combustion and emissions characteristics of methanol-diesel dual-fuel compression ignition engine: A review,” *J. Traff. Transp. Eng.*, vol. 8, no. 5, pp. 638-680, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jtte.2021.02.003.
- [12] Y. Wang, L. Wright, and P. Zhang, “Economic feasibility of LNG fuel for trans ocean-going ships: A case study of container ships,” *Mar. Technol. Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 202–222. Apr./Jun. 2021, doi: 10.33175/mtr.2021.248055.
- [13] *Facing the Future of Hydrogen: An International Guide*, CMS, Nov.2021. [Online]. Available: <https://cms.law/en/media/expert-guides/files-for-expert-guides/the-promise-of-hydrogen-an-international-guide>.
- [14] *Development of draft lifecycle GHG and carbon intensity guidelines for maritime fuels (LCA guidelines)*, IMO, London, UK. ISWG-GHG 11/2/3, Jan. 2022.
- [15] International Renewable Energy Agency, “A pathway to decarbonise the shipping sector by 2050,” Abu Dhabi, UAE, 2021.
- [16] D. -Y. Chang, “Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 95, no. 3, pp. 649–55, Dec. 1996, doi: 10.1016/0377-2217(95)00300-2.

- [17] T. -Y. Chou, and G. -S. Liang, "Application of a fuzzy multi-criteria decision-making model for shipping company performance evaluation," *Mar. Pol. Manage.*, vol. 28, no. 4, pp. 375-392, 2001, doi: 10.1080/03088830110049951.
- [18] G. Büyüközkan, C. Kahraman, and D. Ruan, "A fuzzy multi-criteria decision approach for software development strategy selection," *Int. J. Gener. Syst.*, vol. 33 no. 2-3, pp. 259-280, 2004, doi: 10.1080/03081070310001633581.
- [19] C. Kahraman, U. Cebeci, and D. Ruan, "Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 87, no. 2, pp. 171-184, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0925-5273(03)00099-9.
- [20] R. W. Saaty, "The analytic hierarchy process - what it is and how it is used," *Math. Model.*, vol. 9, no. 3-5, pp. 161-176, 1987, doi: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.
- [21] T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *Int. J. Ser. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 83-98, 2008, doi: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
- [22] T. L. Saaty, and L. G. Vargas, *Models, methods, concepts, and applications of the analytic hierarchy process*, 2nd ed., NY, USA: Springer, 2012.
- [23] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Inf. Con.*, vol. 8, no. (3), pp. 338-353, Jun. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.