



BÀI BÁO KHOA HỌC

Xây dựng bộ tiêu chí lựa chọn năng lượng tái tạo cho cảng biển Việt Nam: tiền đề cho các phương pháp MCDM

Developing criteria for renewable energy selection at Vietnamese seaports: foundation for MCDM methodology

Nguyễn Tất Quyền¹, Đinh Gia Huy^{1,*}, Phạm Thái Hoàng², Phạm Nguyên Đăng Khoa², Nguyễn Văn Tung³, Trần Thị Mỹ Trúc¹, Trần Hoàng Nam⁴

¹ Nhóm nghiên cứu AIT, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

² Nhóm nghiên cứu PATET, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

³ Ban Quản lý dự án Đầu tư xây dựng xã Long Hải, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

⁴ Trung tâm Giáo dục nghề nghiệp Miền Nam, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 13/03/2026

Ngày nhận bản sửa: 29/06/2026

Ngày chấp nhận đăng: 18/08/2026

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/09/2026

TỪ KHÓA

Năng lượng tái tạo
Cảng biển
Lựa chọn đa tiêu chí
Tiêu chí đánh giá
Chuyển đổi xanh

KEYWORDS

Renewable energy
Seaport
Multi-Criteria Decision Making
Evaluation criteria
Green transition

TÓM TẮT

Chuyển đổi sang năng lượng tái tạo (NLTT) là yêu cầu cấp thiết đối với các cảng biển Việt Nam trong bối cảnh chiến lược giảm phát thải khí nhà kính của IMO 2023 và cam kết Net-Zero vào năm 2050. Tuy nhiên, việc lựa chọn loại NLTT phù hợp là bài toán đa tiêu chí phức tạp, đòi hỏi xem xét đồng thời các yếu tố kỹ thuật, kinh tế, môi trường và xã hội (TEMS). Nghiên cứu này trình bày quy trình xây dựng bảng tiêu chí đánh giá NLTT cho cảng biển Việt Nam theo hai giai đoạn: tổng hợp hệ thống 47 bài báo khoa học quốc tế và trong nước; tham vấn 20 chuyên gia trong lĩnh vực cảng biển và năng lượng tái tạo để điều chỉnh bộ tiêu chí phù hợp với điều kiện Việt Nam. Kết quả cuối cùng đề xuất 18 tiêu chí được nhóm thành 4 nhóm chính: kỹ thuật (7 tiêu chí), kinh tế (4 tiêu chí), môi trường (4 tiêu chí) và xã hội (3 tiêu chí), với các điều chỉnh quan trọng từ chuyên gia như bổ sung tiêu chí an toàn vận hành, chi phí thay thế thiết bị và tác động đến hệ sinh thái đặc trưng biển Việt Nam. Nghiên cứu đóng góp khung tiêu chí đánh giá toàn diện hỗ trợ các nhà hoạch định chính sách và quản lý cảng biển Việt Nam trong việc ra quyết định lựa chọn NLTT.

ABSTRACT

The transition to renewable energy (RE) is an urgent requirement for Vietnamese seaports in the context of IMO 2023's GHG reduction strategy and the Net-Zero 2050 commitment. However, selecting the most suitable RE type is a complex multi-criteria problem requiring simultaneous consideration of technical, economic, environmental, and social (TEMS) factors. This study presents a two-phase approach to building RE evaluation criteria for Vietnamese seaports: systematic synthesis of 47 international and domestic scientific papers; and consultation with 20 experts in port management and renewable energy to refine the criteria for Vietnamese conditions. The final result proposes 18 criteria in 4 categories: technical (7 criteria), economic (4 criteria), environmental (4 criteria), and social (3 criteria), with key expert adjustments including new criteria for operational safety, equipment replacement costs, and impact on Vietnam's specific coastal ecosystems. The study contributes a comprehensive evaluation framework supporting Vietnamese policymakers and port managers in RE selection decision-making.

1. Giới thiệu

Ngành hàng hải đóng vai trò quan trọng trong nền kinh tế toàn cầu, vận chuyển hơn 80% thương mại quốc tế [1]. Tuy nhiên, đây cũng là một trong những lĩnh vực phát thải khí nhà kính (GHG) lớn nhất, chiếm khoảng 3% tổng lượng CO₂ toàn cầu vào năm 2023 [2]. Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) đã ban hành Chiến lược giảm phát thải GHG 2023, với mục tiêu đạt mức phát thải bằng 0 vào khoảng năm 2050 [3].

Các cảng biển, với tư cách là mắt xích then chốt trong chuỗi logistics hàng hải, đang chịu áp lực ngày càng tăng trong việc

chuyển đổi sang mô hình “cảng xanh” (green port). Năng lượng tái tạo (NLTT) được xem là giải pháp then chốt để giảm phát thải carbon từ hoạt động cảng [4], [5]. Nghiên cứu của Buonomano và cộng sự [5] cho thấy hệ thống NLTT tích hợp có thể đáp ứng đến 60% tổng nhu cầu điện của cảng, với thời gian hoàn vốn dưới 6 năm đối với hệ thống quy mô lớn. Tại Việt Nam, nghiên cứu Đinh và cộng sự [2] về Cảng Thị Nại (Bình Định) đã xác nhận tính khả thi kỹ thuật-kinh tế của hệ thống điện mặt trời + biogas + pin lưu trữ, với LCOE đạt 0,394 USD/kWh và thời gian hoàn vốn 8–10 năm.

* Tác giả liên hệ: Đinh Gia Huy. Email: huy.dinh@ut.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.55228/j.uth.150505>

Việt Nam có tiềm năng NLTT lớn: cường độ bức xạ mặt trời trung bình 4–5 kWh/m²/ngày tại miền Nam, tốc độ gió ngoài khơi 7–9 m/s, và đường bờ biển dài hơn 3.260 km [6]. Tuy nhiên, việc lựa chọn loại NLTT phù hợp cho từng cảng biển là bài toán đa tiêu chí phức tạp, đòi hỏi xem xét đồng thời nhiều yếu tố từ kỹ thuật, kinh tế, môi trường đến xã hội-chính sách [7].

Phương pháp phân tích thứ bậc (Analytic Hierarchy Process – AHP) được Saaty đề xuất và đã được ứng dụng rộng rãi trong các bài toán ra quyết định đa tiêu chí về năng lượng [7], [8]. AHP cho phép tích hợp đánh giá định tính của chuyên gia và dữ liệu định lượng, đồng thời kiểm tra tính nhất quán của đánh giá [9], [10]. Đây là phương pháp phù hợp để xây dựng và xác định trọng số các tiêu chí lựa chọn NLTT cho cảng biển.

Mục tiêu của nghiên cứu này là: (1) Tổng hợp hệ thống các tiêu chí đánh giá NLTT từ 47 bài báo khoa học trong cơ sở dữ liệu; (2) Xây dựng bảng tiêu chí đánh giá NLTT theo khung TEMS (Technical-Economic-Environmental-Social).

2. Tổng quan tài liệu

2.1. Năng lượng tái tạo tại cảng biển

Cảng biển là cơ sở hạ tầng tiêu thụ năng lượng lớn, phục vụ các hoạt động bốc xếp hàng hóa, chiếu sáng, vận hành thiết bị và cung cấp điện cho tàu neo đậu (cold ironing). Nghiên cứu của Zhao và cộng sự [6] về hệ thống năng lượng gió tự cung tự cấp cho cảng đề xuất phương pháp đánh giá toàn diện tích hợp phân tích tài nguyên, kỹ thuật, kinh tế và môi trường. Parhamfar và Sadeghkhan [4] đã tổng quan các công nghệ NLTT ứng dụng cho cảng xanh từ góc độ kỹ thuật và kinh tế, bao gồm điện mặt trời, điện gió, thủy triều và biogas.

Hoang và cộng sự [11] phân tích các chiến lược giảm phát thải CO₂ trên tuyến cảng-tàu (port-to-ship pathway), nhấn mạnh vai trò của chuyển đổi nhiên liệu sạch và điện hóa cảng biển. Zhang và cộng sự [12] nghiên cứu vấn đề triển khai hydro tại cảng xanh, cho thấy tính khả thi của công nghệ pin nhiên liệu hydro trong việc giảm phát thải từ tàu neo đậu tại cảng.

2.2. Phương pháp MCDM trong lựa chọn năng lượng tái tạo

Ilbahar và cộng sự [7] đã tổng quan toàn diện các phương pháp MCDM trong lựa chọn năng lượng tái tạo, kết luận rằng AHP, TOPSIS và các biến thể mờ của chúng là các phương pháp phổ biến nhất. Wang và cộng sự [13] áp dụng khung MCDM kết hợp SF-AHP và WASPAS để lựa chọn vị trí xây dựng trang trại gió ngoài khơi tại Việt Nam, với bộ tiêu chí gồm 6 nhóm chính và 15 tiêu chí con.

Shao và cộng sự [14] đề xuất khung quyết định ba giai đoạn kết hợp GIS và MCDM để chọn địa điểm nhà máy điện thủy triều tại Trung Quốc, sử dụng hệ thống tiêu chí gồm cả tiêu chí loại trừ và tiêu chí đánh giá. Moshiri và cộng sự [1] phát triển khung lựa chọn nhiên liệu thay thế cho tàu vận tải biển đường dài, xác định 15 tiêu chí ưu tiên qua phân tích nhân tố và TOPSIS, trong đó tiêu chí kinh tế được xếp hạng cao nhất.

Mandić và cộng sự [9] ứng dụng AHP-SAW để lựa chọn nhiên liệu hàng hải thay thế cho giao thông ven biển Croatia, với hệ thống tiêu chí được phân loại theo 3 mục tiêu: môi

trường (tác động biến đổi khí hậu, axit hóa, phát thải), kỹ thuật (cơ sở hạ tầng hiện có, độ tin cậy nguồn cung, thích ứng động cơ, an toàn nhiên liệu) và kinh tế (đầu tư, chi phí vận hành, giá nhiên liệu). Nghiên cứu cho thấy các bên liên quan khác nhau (chủ tàu, cơ quan quản lý, học giới) có thứ tự ưu tiên tiêu chí khác nhau.

2.3. Khoảng trống nghiên cứu

Qua tổng quan, nhóm tác giả nhận thấy: (i) phần lớn nghiên cứu tập trung vào lựa chọn nhiên liệu thay thế hoặc vị trí công trình NLTT, chưa có nghiên cứu toàn diện về bảng tiêu chí lựa chọn loại NLTT cụ thể cho cảng biển Việt Nam; (ii) các tiêu chí xã hội (tạo việc làm, chấp nhận cộng đồng, khung pháp lý) thường bị đánh giá thấp so với tiêu chí kỹ thuật-kinh tế; (iii) điều kiện đặc thù của cảng biển Việt Nam (khí hậu nhiệt đới, địa hình ven biển, năng lực tài chính) chưa được phản ánh đầy đủ trong các nghiên cứu hiện có.

3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này áp dụng quy trình tổng hợp tài liệu có hệ thống gồm ba giai đoạn:

Giai đoạn 1 – Thu thập tài liệu: Tổng hợp 47 bài báo khoa học từ các cơ sở dữ liệu ScienceDirect, IEEE Xplore, MDPI, Springer, Nature và tạp chí trong nước có liên quan đến: (a) lựa chọn NLTT tại cảng biển/hàng hải, (b) phương pháp AHP/MCDM trong lựa chọn năng lượng, và (c) phát triển cảng xanh. Phạm vi thời gian: 2013–2025.

Giai đoạn 2 – Xây dựng cơ sở dữ liệu tiêu chí: Toàn văn của từng bài báo được trích xuất và phân tích để xác định: tên tiêu chí, mô tả, phân loại và phương pháp sử dụng. Chỉ các tiêu chí xuất hiện trong ít nhất 2 bài báo trong cơ sở dữ liệu mới được đưa vào bảng tiêu chí đề xuất.

Giai đoạn 3 – Xây dựng bảng tiêu chí TEMS bằng phương pháp Delphi hai vòng: Bộ tiêu chí sơ bộ được phân loại theo khung TEMS (Technical, Economic, Environmental, Social) [7], [15] và đưa ra tham vấn chuyên gia theo kỹ thuật Delphi nhằm đạt đồng thuận về tính phù hợp của từng tiêu chí với bối cảnh cảng biển Việt Nam. Cần nhấn mạnh rằng nghiên cứu này chỉ thực hiện bước xây dựng và tinh chỉnh bộ tiêu chí (criteria identification), đóng vai trò tiền đề (đầu vào) cho các phương pháp MCDM như AHP/TOPSIS ở giai đoạn nghiên cứu tiếp theo; do đó việc xác định trọng số và xếp hạng phương án không thuộc phạm vi bài báo này.

4. Bảng tiêu chí đánh giá NLTT cho cảng biển Việt Nam

Dựa trên tổng hợp hệ thống 47 bài báo, **Bảng 1** trình bày 18 tiêu chí đề xuất, được nhóm thành 4 nhóm chính theo khung TEMS. Chỉ các tiêu chí xuất hiện trong ít nhất 2 bài báo trong cơ sở dữ liệu được đưa vào **Bảng 1**:

Nhóm tiêu chí kinh tế (C2): Chi phí đầu tư ban đầu (C2.1) và chi phí vận hành-bảo trì (C2.2) xuất hiện trong hầu hết các nghiên cứu được tổng hợp. Moshiri và cộng sự [1] kết luận rằng nhóm tiêu chí kinh tế được các chủ tàu và nhà quản lý hàng hải xếp hạng cao nhất (thực hành điểm 104/267 = 39%). LCOE (C2.3) ngày càng được sử dụng như tiêu chí đánh giá kinh tế tổng hợp, phản ánh toàn bộ chi phí vòng đời của hệ thống NLTT [2], [17].

Bảng 1. Bảng tiêu chí lựa chọn năng lượng tái tạo từ các nghiên cứu quốc tế

Mã	Tiêu chí đánh giá	Mô tả	Nguồn tham khảo
NHÓM KỸ THUẬT			
C1.1	Tiềm năng tài nguyên năng lượng	Cường độ bức xạ mặt trời, tốc độ gió, mật độ năng lượng thủy triều/sóng tại khu vực cảng	[2], [5], [6], [13], [14]
C1.2	Hệ số công suất và hiệu suất chuyển đổi	Tỷ lệ năng lượng thực tế tạo ra so với công suất lý thuyết tối đa của hệ thống	[2], [4], [16]
C1.3	Độ tin cậy và tuổi thọ công nghệ	Khả năng hoạt động ổn định, thời gian sử dụng và độ bền của thiết bị	[1], [9], [16]
C1.4	Khả năng lắp đặt và tích hợp lưới điện	Điều kiện địa lý, cơ sở hạ tầng kết nối lưới điện và khả năng mở rộng quy mô	[5], [9], [13], [16]
C1.5	Mức độ trưởng thành và sẵn có của công nghệ	TRL (Technology Readiness Level), mức độ phổ biến thương mại và khả năng cung ứng thiết bị	[1], [4], [16]
NHÓM KINH TẾ			
C2.1	Chi phí đầu tư ban đầu	Tổng chi phí mua sắm, lắp đặt và vận hành thử hệ thống năng lượng tái tạo	[2], [5], [9], [13], [14]
C2.2	Chi phí vận hành và bảo trì (O&M)	Chi phí vận hành hàng năm, bảo trì định kỳ và sửa chữa thiết bị trong suốt vòng đời	[2], [5], [9], [13], [14]
C2.3	Chi phí điện năng quy dẫn (LCOE)	Levelized Cost of Energy – chi phí phát điện trên mỗi đơn vị điện năng trong toàn bộ vòng đời dự án	[2], [5], [17]
C2.4	Thời gian hoàn vốn đầu tư	Thời gian cần thiết để thu hồi vốn đầu tư ban đầu từ lợi nhuận khai thác	[2], [5]
C2.5	Hỗ trợ tài chính và chính sách ưu đãi	Trợ cấp chính phủ, tín dụng xanh, miễn/giảm thuế và các chính sách hỗ trợ đầu tư	[1], [3], [13]
NHÓM MÔI TRƯỜNG			
C3.1	Phát thải khí nhà kính (GHG)	Lượng khí CO ₂ và các khí nhà kính phát thải trong vòng đời của hệ thống năng lượng	[1], [2], [3], [5], [9], [16]
C3.2	Tác động đến hệ sinh thái biển	Ảnh hưởng đến đa dạng sinh học biển, hệ sinh thái ven bờ và hoạt động thủy hải sản	[13], [14]
C3.3	Tiếng ồn và tác động thị giác	Mức độ ô nhiễm tiếng ồn và ảnh hưởng thẩm mỹ cảnh quan từ công trình NLTT	[9], [13], [16]
C3.4	Sử dụng không gian mặt biển/mặt bằng	Diện tích mặt biển hoặc đất cảng chiếm dụng, xung đột với các hoạt động hàng hải khác	[6], [13], [14]
NHÓM XÃ HỘI			
C4.1	Tạo việc làm địa phương	Số lượng việc làm trực tiếp và gián tiếp tạo ra trong giai đoạn xây dựng và vận hành	[1], [13], [18]
C4.2	Khung chính sách và quy định pháp lý	Mức độ phù hợp với chính sách năng lượng quốc gia, IMO 2023 GHG Strategy và quy hoạch cảng biển	[1], [3], [9], [13]
C4.3	Chấp nhận của cộng đồng và các bên liên quan	Mức độ ủng hộ của cộng đồng địa phương, chủ hàng, hãng tàu và các bên liên quan	[1], [9], [16]
C4.4	An toàn và sức khỏe cộng đồng	Rủi ro an toàn cháy nổ, tác động sức khỏe từ ô nhiễm không khí và các hiểm họa vận hành	[1], [9]

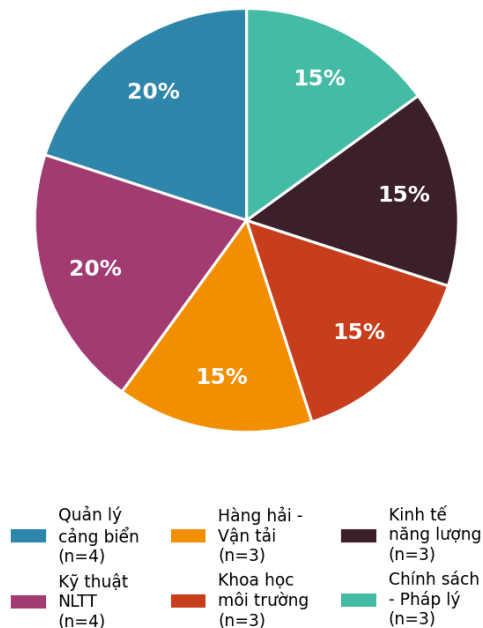
Nhóm tiêu chí môi trường (C3): Phát thải GHG (C3.1) là tiêu chí môi trường được trích dẫn nhiều nhất, phản ánh mục tiêu giảm phát thải của IMO 2023 [3]. Mandić và cộng sự [9] ghi nhận rằng từ góc độ học thuật, “tác động biến đổi khí hậu” được xếp hạng là tiêu chí quan trọng nhất trong toàn bộ hệ thống tiêu chí. Tác động đến hệ sinh thái biển (C3.2) đặc biệt quan trọng với các dạng NLTT ngoài khơi như điện gió, thủy triều và sóng biển [13], [14].

Nhóm tiêu chí xã hội (C4): Khung chính sách và quy định pháp lý (C4.2) là tiêu chí xã hội có tần suất xuất hiện cao nhất trong cơ sở dữ liệu tổng hợp. Tại Việt Nam, việc tuân thủ Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia (Quy hoạch điện VIII) và chiến lược cảng biển xanh là điều kiện tiên quyết [3], [6]. Chấp nhận của cộng đồng (C4.3) cũng được Xu và cộng sự [16] nhận định là yếu tố then chốt, đặc biệt trong các dự án NLTT có tác động thị giác và tiếng ồn.

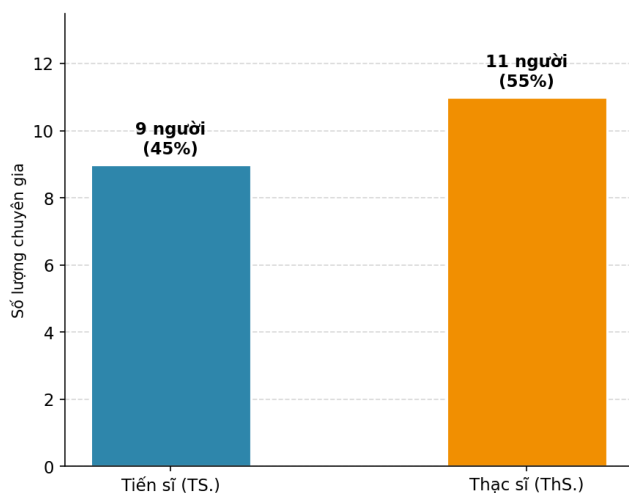
5. Đánh giá và điều chỉnh bộ tiêu chí thông qua tham vấn chuyên gia

5.1. Quy trình tham vấn chuyên gia

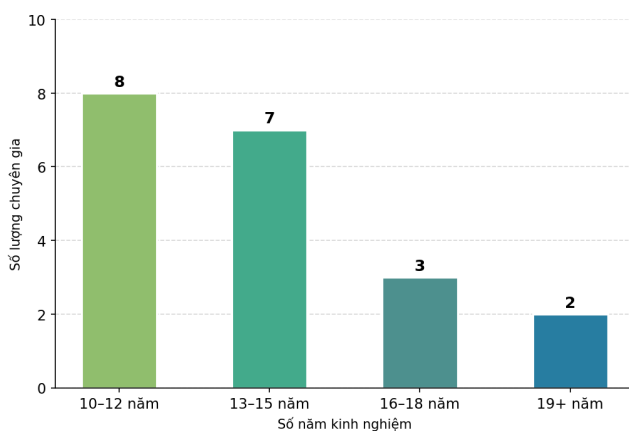
Sau khi xây dựng bộ 18 tiêu chí từ tổng quan hệ thống 47 bài báo, nhóm nghiên cứu tiến hành tham vấn chuyên gia theo phương pháp Delphi nhằm điều chỉnh bộ tiêu chí cho phù hợp với điều kiện thực tiễn cảng biển Việt Nam. Phương pháp Delphi được lựa chọn vì đây là kỹ thuật phổ biến và được đánh giá cao trong mục tiêu thiết lập, sàng lọc và đạt đồng thuận về một bộ tiêu chí, dựa trên hai nguyên tắc cốt lõi: chuyên gia đánh giá độc lập và ẩn danh để tránh ảnh hưởng tâm lý đám đông; phản hồi được tổng hợp có kiểm soát và lặp lại qua nhiều vòng cho đến khi đạt mức đồng thuận ổn định. Quy trình được thực hiện qua hai vòng:



Hình 1. Phân bổ chuyên gia theo lĩnh vực chuyên môn (n=20)



Hình 2. Phân bổ chuyên gia theo trình độ học vấn



Hình 3. Phân bổ chuyên gia theo số năm kinh nghiệm

Vòng 1 – Đánh giá độc lập: Bộ 18 tiêu chí được trình bày chi tiết (tên, mô tả, nguồn gốc) và gửi đến từng chuyên gia để đánh giá độc lập, ấn danh mức độ phù hợp của mỗi tiêu chí theo thang Likert 5 mức, kèm đề xuất bổ sung hoặc loại bỏ tiêu chí. Nhóm chuyên gia gồm 20 thành viên được lựa chọn có chủ đích dựa trên các tiêu chí đồng thời: có trình độ học vị từ thạc sĩ trở lên và có kinh nghiệm thực tiễn trên 10 năm trong lĩnh vực liên quan; đã hoặc đang trực tiếp tham gia vào quá trình ra quyết định, tư vấn, thẩm định hoặc nghiên cứu chuyên sâu về đầu tư và lựa chọn năng lượng tái tạo hoặc phát triển cảng xanh (không tính các vị trí thuần túy nhân viên, chuyên viên tác nghiệp); 14 chuyên gia có công bố khoa học hoặc sản phẩm chuyên môn uy tín trong lĩnh vực nhằm bảo đảm “tư duy chuyên gia”. Các lĩnh vực chuyên môn được lựa chọn – quản lý khai thác cảng biển, kỹ thuật năng lượng tái tạo, hàng hải và vận tải biển, khoa học môi trường biển, kinh tế năng lượng và chính sách-pháp lý năng lượng – tương ứng trực tiếp với bốn nhóm tiêu chí TEMS, nhằm bảo đảm mỗi khía cạnh kỹ thuật, kinh tế, môi trường và xã hội đều được đánh giá bởi chuyên gia có chuyên môn phù hợp. Cơ cấu nhóm chuyên gia được phân bổ theo 6 lĩnh vực với tỷ lệ cân đối: quản lý khai thác cảng biển (4 chuyên gia), kỹ thuật NLTT (4 chuyên gia), hàng hải-vận tải biển (3 chuyên gia), khoa học môi trường (3 chuyên gia), kinh tế năng lượng (3 chuyên gia) và chính sách-pháp lý (3 chuyên gia).

Vòng 2 – Phản hồi có kiểm soát và đồng thuận: Kết quả thống kê của Vòng 1 (điểm trung bình và độ phân tán của từng tiêu chí) được tổng hợp ấn danh và gửi lại để mỗi chuyên gia xem xét, đối chiếu với ý kiến chung của nhóm và hiệu chỉnh đánh giá của mình nếu cần. Việc tiến hành vòng thứ hai nhằm cho phép các chuyên gia điều chỉnh quan điểm sau khi tiếp cận phản hồi tổng hợp, qua đó hội tụ về đồng thuận và nâng cao độ tin cậy của kết quả so với chỉ một vòng đánh giá đơn lẻ. Ở đây, “điểm đồng thuận” được hiểu là điểm trung bình của nhóm chuyên gia: các tiêu chí có điểm đồng thuận trung bình dưới 3,5/5 được xem xét điều chỉnh hoặc loại bỏ; các tiêu chí mới được bổ sung khi có đề xuất từ ít nhất 3 chuyên gia và đạt đồng thuận ở Vòng 2.

5.2. Kết quả điều chỉnh và bộ tiêu chí chuyên gia

Sau quá trình tham vấn, bộ tiêu chí được điều chỉnh thành 18 tiêu chí với sự phân bổ mới giữa các nhóm: kỹ thuật (7 tiêu chí), kinh tế (4 tiêu chí), môi trường (4 tiêu chí) và xã hội (3 tiêu chí). Bảng 2 trình bày bộ tiêu chí sau khi điều chỉnh chuyên gia.

5.3. So sánh bộ tiêu chí từ tổng quan tài liệu và bộ tiêu chí chuyên gia

Bảng 3 trình bày chi tiết sự tương đồng và khác biệt giữa bộ tiêu chí từ tổng quan 47 bài báo và bộ tiêu chí sau khi chuyên gia điều chỉnh:

Kết quả so sánh cho thấy ba xu hướng điều chỉnh chính từ nhóm chuyên gia:

Bảng 2. Bộ tiêu chí lựa chọn NLTT cho cảng biển Việt Nam sau tham vấn chuyên gia

Tiêu chí đánh giá	Mô tả
NHÓM KỸ THUẬT	
Mức độ sẵn có của đầu vào	Mức độ sẵn có của nguồn tài nguyên (đất, sông, mặt trời, gió, sinh khối...)
Hiệu quả sản xuất năng lượng	Hiệu quả chuyển đổi năng lượng hệ thống
Khả năng vận hành ổn định và liên tục	Khả năng hoạt động ổn định và liên tục của hệ thống
Kết nối năng lượng	Khả năng kết nối với lưới điện quốc gia
Năng lực hạ tầng để triển khai công nghệ	Hạ tầng hiện có và yêu cầu đầu tư mới
Mức độ trưởng thành của công nghệ	Mức độ phát triển và sẵn có thương mại của công nghệ
An toàn trong vận hành	Phòng cháy chữa cháy và đảm bảo an toàn trong quá trình truyền tải năng lượng
NHÓM KINH TẾ	
Chi phí đầu tư hệ thống	Chi phí ban đầu để triển khai công nghệ năng lượng tái tạo
Chi phí vận hành	Chi phí duy trì và vận hành hệ thống năng lượng
Chi phí thay thế thiết bị	Chi phí thay thế các bộ phận và thiết bị trong vòng đời hệ thống
Khả năng tạo ra lợi nhuận	Khả năng tạo ra lợi nhuận cho hoạt động cảng
NHÓM MÔI TRƯỜNG	
Giảm phát thải	Khả năng giảm thiểu CO ₂ và khí thải khác
Tác động đến môi trường	Ảnh hưởng đến hệ sinh thái biển và môi trường (đất, nước, không khí, tiếng ồn, tác động thị giác)
Ảnh hưởng đến hệ sinh thái động thực vật quanh khu vực	Tác động đến hệ động thực vật quanh khu vực cảng (bãi triều, đầm phá, rừng ngập mặn, san hô)
Yêu cầu đất đai	Diện tích đất cần thiết để triển khai hệ thống
NHÓM XÃ HỘI	
Tạo việc làm	Đóng góp cho phát triển xã hội bền vững (tạo ra các công việc gián tiếp hoặc trực tiếp)
Chính sách của chính phủ	Mức độ hỗ trợ từ các chính sách liên quan đến công nghệ năng lượng tái tạo
Sức khỏe cộng đồng	Tác động đến sức khỏe người dân, sức khỏe người lao động

(Kết quả tham vấn 20 chuyên gia trong lĩnh vực cảng biển và năng lượng tái tạo)

Mở rộng nhóm kỹ thuật (5 → 7 tiêu chí): Chuyên gia nhận định rằng bộ tiêu chí kỹ thuật từ tổng quan quốc tế chưa phản ánh đầy đủ các yêu cầu thực tiễn của cảng biển Việt Nam. Tiêu chí C1.4 (khả năng lắp đặt và tích hợp lưới điện) được tách thành hai tiêu chí độc lập: “Kết nối năng lượng” (kết nối lưới quốc gia) và “Năng lực hạ tầng để triển khai công nghệ” (điều kiện hạ tầng tại chỗ), vì hai khía cạnh này có tính đặc thù khác nhau và cần được đánh giá riêng biệt. Đặc biệt, tiêu chí “An toàn trong vận hành” được bổ sung mới, phản ánh yêu cầu về phòng cháy chữa cháy và an toàn điện là bắt buộc tại cảng biển Việt Nam theo quy định hiện hành.

Thứ hai, đơn giản hóa nhóm kinh tế (5 → 4 tiêu chí) với

định hướng thực tiễn hơn: Ba tiêu chí bị loại bỏ hoặc chuyển nhóm gồm LCOE (C2.3), thời gian hoàn vốn (C2.4) và hỗ trợ tài chính (C2.5). Chuyên gia cho rằng LCOE là chỉ số học thuật phức tạp, ít được sử dụng trực tiếp trong các quyết định đầu tư tại doanh nghiệp cảng biển Việt Nam. Thay vào đó, hai tiêu chí mới được bổ sung: “Chi phí thay thế thiết bị” (phản ánh thực tế chi phí vòng đời tại VN) và “Khả năng tạo ra lợi nhuận” (yếu tố then chốt thu hút đầu tư tư nhân vào NLTT tại cảng). Tiêu chí hỗ trợ tài chính và chính sách ưu đãi được tích hợp vào nhóm Xã hội (Chính sách của chính phủ).

Thứ ba, cụ thể hóa nhóm môi trường cho bối cảnh Việt Nam: Trong khi số lượng tiêu chí môi trường không thay đổi (4 tiêu chí), nội dung được điều chỉnh đáng kể. Tiêu chí “Ảnh hưởng đến hệ sinh thái động thực vật quanh khu vực” được bổ sung với mô tả cụ thể về các hệ sinh thái đặc trưng của bờ biển Việt Nam: bãi triều, đầm phá, rừng ngập mặn và san hô – những hệ sinh thái nhạy cảm có mặt tại nhiều khu vực cảng biển Việt Nam và cần được bảo vệ theo Luật Đa dạng sinh học. Tiêu chí về tiếng ồn và tác động thị giác (C3.3) được tích hợp vào tiêu chí “Tác động đến môi trường” để đơn giản hóa bộ tiêu chí.

Đối với nhóm xã hội, việc loại bỏ tiêu chí “Chấp nhận của cộng đồng và các bên liên quan” (C4.3) phản ánh đặc điểm ra quyết định tại Việt Nam, nơi các dự án cảng biển thường được triển khai theo quyết định từ trên xuống (top-down), trong khi sự đồng thuận của cộng đồng không phải là điều kiện pháp lý bắt buộc như tại nhiều quốc gia phương Tây. Đồng thời, tiêu chí “An toàn và sức khỏe cộng đồng” (C4.4) được tái cấu trúc: khía cạnh an toàn vận hành được chuyển sang nhóm Kỹ thuật, còn khía cạnh sức khỏe được giữ lại trong nhóm Xã hội dưới tên “Sức khỏe cộng đồng”.

Tổng thể, bộ tiêu chí sau tham vấn chuyên gia duy trì tổng số 18 tiêu chí nhưng có sự phân bổ cân bằng hơn và phù hợp hơn với thực tiễn Việt Nam: nhóm kỹ thuật được mở rộng (5→7), nhóm kinh tế và xã hội được tinh gọn (5→4 và 4→3), nhóm môi trường được giữ nguyên số lượng nhưng nội dung được đặc thù hóa cao hơn.

5.4. Hạn chế của nghiên cứu

Bên cạnh những đóng góp nêu trên, nghiên cứu còn một số hạn chế cần lưu ý khi diễn giải và áp dụng kết quả: Cỡ mẫu chuyên gia còn khiêm tốn (n=20); tuy phù hợp với quy mô thông lệ của một panel Delphi, số lượng này có thể chưa bao quát hết tính đa dạng quan điểm trong ngành. Các chuyên gia chủ yếu công tác tại Việt Nam, nên bộ tiêu chí phản ánh đặc thù về thể chế, chính sách và điều kiện tự nhiên trong nước và cần thận trọng khi suy rộng ra bối cảnh quốc tế. Bộ tiêu chí mới dừng ở mức xây dựng và đồng thuận về mặt khái niệm, chưa được kiểm định thực nghiệm (empirical validation) tại một cảng biển cụ thể với dữ liệu vận hành thực tế. Bộ tiêu chí được đề xuất ở mức khái quát cho cảng biển nói chung; khả năng khái quát hóa sang từng loại hình cảng có đặc thù khác nhau – cảng container, cảng tổng hợp, cảng dầu khí – cần được kiểm chứng và hiệu chỉnh thêm, do mỗi loại cảng có cơ cấu phụ tải năng lượng, mức độ rủi ro an toàn và ràng buộc môi trường riêng. Những hạn chế này đồng thời gợi mở các hướng nghiên cứu tiếp theo.

Bảng 3. So sánh bộ tiêu chí từ tổng quan tài liệu và bộ tiêu chí chuyên gia

Tiêu chí từ tổng quan 47 bài báo	Tiêu chí sau điều chỉnh chuyên gia	Trạng thái	Nhận xét
NHÓM KỸ THUẬT			
C1.1 – Tiềm năng tài nguyên năng lượng	Mức độ sẵn có của đầu vào	Điều chỉnh tên	Mở rộng phạm vi đầu vào (gió, mặt trời, sóng, sinh khối)
C1.2 – Hệ số công suất và hiệu suất chuyển đổi	Hiệu quả sản xuất năng lượng	Điều chỉnh tên	Diễn đạt thực tiễn hơn
C1.3 – Độ tin cậy và tuổi thọ công nghệ	Khả năng vận hành ổn định và liên tục	Điều chỉnh tên	Nhấn mạnh yếu tố vận hành liên tục
C1.4 – Khả năng lắp đặt và tích hợp lưới điện	Kết nối năng lượng + Năng lực hạ tầng	Tách thành 2 TC	Chuyên gia tách thành 2 tiêu chí độc lập để đánh giá riêng biệt
C1.5 – Mức độ trưởng thành và sẵn có của công nghệ	Mức độ trưởng thành của công nghệ	Điều chỉnh tên	Giữ nguyên nội dung cốt lõi
—	An toàn trong vận hành	Thêm mới	Chuyên gia bổ sung: PCCC và an toàn điện là yêu cầu bắt buộc tại cảng VN
NHÓM KINH TẾ			
C2.1 – Chi phí đầu tư ban đầu	Chi phí đầu tư hệ thống	Điều chỉnh tên	Giữ nguyên nội dung
C2.2 – Chi phí vận hành và bảo trì (O&M)	Chi phí vận hành	Điều chỉnh tên	Đơn giản hóa tên gọi
C2.3 – Chi phí điện năng quy dẫn (LCOE)	—	Loại bỏ	Chuyên gia nhận định LCOE quá học thuật, khó áp dụng thực tế tại VN
C2.4 – Thời gian hoàn vốn đầu tư	—	Loại bỏ	Đã phản ánh qua tổ hợp chi phí đầu tư và lợi nhuận
C2.5 – Hỗ trợ tài chính và chính sách ưu đãi	—	Loại bỏ/Chuyển nhóm	Chuyển sang nhóm Xã hội (Chính sách của chính phủ)
—	Chi phí thay thế thiết bị	Thêm mới	Quan trọng trong bối cảnh VN: chi phí thay thế pin, inverter
—	Khả năng tạo ra lợi nhuận	Thêm mới	Chuyên gia nhấn mạnh khả năng sinh lời là yếu tố thu hút đầu tư tư nhân
NHÓM MÔI TRƯỜNG			
C3.1 – Phát thải khí nhà kính (GHG)	Giảm phát thải	Điều chỉnh tên	Đổi sang góc độ tích cực (giảm thay vì phát thải)
C3.2 – Tác động đến hệ sinh thái biển	Tác động đến môi trường	Mở rộng phạm vi	Chuyên gia mở rộng: bao gồm cả tiếng ồn và tác động thị giác
C3.3 – Tiếng ồn và tác động thị giác	(tích hợp vào TC trên)	Tích hợp	Gộp vào Tác động đến môi trường để đơn giản hóa
—	Ảnh hưởng đến hệ sinh thái động thực vật	Thêm mới (tách ra)	Đặc thù VN: rừng ngập mặn, san hô, đầm phá cần được đánh giá riêng
C3.4 – Sử dụng không gian mặt biển/mặt bằng	Yêu cầu đất đai	Điều chỉnh tên	Thu hẹp về đất liền phù hợp với cảng biển VN
NHÓM XÃ HỘI			
C4.1 – Tạo việc làm địa phương	Tạo việc làm	Điều chỉnh tên	Giữ nguyên nội dung
C4.2 – Khung chính sách và quy định pháp lý	Chính sách của chính phủ	Điều chỉnh tên	Tập trung vào chính sách hỗ trợ (cả C2.5 được tích hợp vào đây)
C4.3 – Chấp nhận của cộng đồng và các bên liên quan	—	Loại bỏ	Chuyên gia đánh giá VN có đặc điểm quyết định từ trên xuống, ít phụ thuộc vào sự chấp nhận cộng đồng
C4.4 – An toàn và sức khỏe cộng đồng	Sức khỏe cộng đồng	Điều chỉnh tên	Giữ riêng sức khỏe; an toàn vận hành chuyển sang nhóm Kỹ thuật

6. Kết luận

Nghiên cứu này đã xây dựng bảng tiêu chí đánh giá và lựa chọn NLTT cho cảng biển Việt Nam theo quy trình hai giai đoạn: tổng hợp hệ thống 47 bài báo khoa học và tham vấn 20 chuyên gia. Từ tổng quan 47 bài báo, đề xuất bộ 18 tiêu chí ban đầu nhóm thành 4 nhóm chính (TEMS): 5 tiêu chí kỹ thuật, 5 tiêu chí kinh tế, 4 tiêu chí môi trường và 4 tiêu chí xã

hội. Tất cả tiêu chí được xác minh từ ít nhất 2 bài báo. Sau tham vấn 20 chuyên gia, bộ tiêu chí được điều chỉnh với 18 tiêu chí được phân bổ lại: kỹ thuật (7), kinh tế (4), môi trường (4) và xã hội (3). Các thay đổi quan trọng bao gồm: bổ sung “An toàn trong vận hành” và tách tiêu chí hạ tầng trong nhóm kỹ thuật; thay thế LCOE và hoàn vốn bằng chi phí thay thế thiết bị và khả năng tạo lợi nhuận trong nhóm kinh tế; cụ thể hóa tác động sinh thái biển Việt Nam (rừng ngập mặn, san hô)

trong nhóm môi trường. Hướng nghiên cứu tiếp theo bao gồm: xác định trọng số AHP cho bộ 18 tiêu chí đã được chuyên gia xác nhận, áp dụng khung tiêu chí tại cảng biển cụ thể (Hải Phòng, Đà Nẵng, TP.HCM), và tích hợp logic mờ (fuzzy) để xử lý tính không chắc chắn trong đánh giá chuyên gia.

Đóng góp của tác giả

Đinh Gia Huy: Phương pháp, Quản lý dữ liệu, Phân tích chính thức, Điều tra, Xác thực, Trực quan hóa, Tiếp nhận tài trợ, Phản hồi ý kiến phản biện, Viết – bản thảo gốc. Nguyễn Tất Quyền, Phạm Thái Hoàng, Phạm Nguyễn Đăng Khoa: Biên soạn dữ liệu, Phân tích dữ liệu, Điều tra, Xác thực, Viết – bản thảo gốc. Nguyễn Văn Tung, Trần Thị Mỹ Trúc, Trần Hoàng Nam: Biên soạn dữ liệu, Điều tra.

Xung đột lợi ích

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.

Chia sẻ dữ liệu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

Author information

Nguyen Tat Quyen, AIT Research Group, Ho Chi Minh City University of Transport, Vietnam

Đinh Gia Huy*, AIT Research Group, Ho Chi Minh City University of Transport, Vietnam

Phạm Thái Hoàng, PATET Research Group, Ho Chi Minh City University of Transport, Vietnam

Phạm Nguyễn Đăng Khoa, PATET Research Group, Ho Chi Minh City University of Transport, Vietnam

Nguyễn Văn Tung, Long Hai Commune Construction Investment Project Management Board, Ho Chi Minh City, Vietnam

Trần Thị Mỹ Trúc, AIT Research Group, Ho Chi Minh City University of Transport, Vietnam

Trần Hoàng Nam, Southern Vocational Education Center, Vietnam

*Corresponding author: huy.dinh@ut.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] A. M. Moshiul, R. Mohammad, and F. A. Hira, "Alternative fuel selection framework toward decarbonizing maritime deep-sea shipping," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, p. 5571, 2023, doi: [10.3390/su15065571](#).
- [2] G. H. Dinh et al., "Hybrid renewable energy system design for a green port using HOMER Pro: A techno-economic assessment," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 14, no. 4, pp. 767–780, 2025, doi: [10.61435/ijred.2025.61344](#).
- [3] P. V. Hùng, P. T. Tiệp, and N. N. Tại, "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," *Tạp chí Khoa học Công nghệ GTVT*, tập 13, số 2, 2024.
- [4] M. Parhamfar and I. Sadeghkhani, "Towards the application of renewable energy technologies in green ports: Technical and economic perspectives," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 17, pp. 3479–3497, 2023, doi: [10.1049/rpg2.12811](#).
- [5] A. Buonomano, G. F. Giuzio, R. Maka, A. Palombo, and G. Russo, "Empowering sea ports with renewable energy under the enabling framework of the energy communities," *Energy Convers. Manag.*, vol. 314, p. 118693, 2024, doi: [10.1016/j.enconman.2024.118693](#).
- [6] H. Zhao, M. Zhong, L. Li, and M. Safdar, "A comprehensive evaluation method for planning and design of self-sufficient wind power energy systems at ports," *Sustainability*, vol. 15, no. 23, p. 16189, 2023, doi: [10.3390/su152316189](#).
- [7] E. Ilbahar, S. Cebi, and C. Kahraman, "A state-of-the-art review on multi-attribute renewable energy decision making," *Energy Strategy Rev.*, vol. 25, pp. 18–33, 2019, doi: [10.1016/j.esr.2019.04.014](#).
- [8] S. Wang, Q. Liu, S. Yuksel, and H. Dincer, "Hesitant linguistic term sets-based hybrid analysis for renewable energy investments," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 115784–115797, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2935427](#).
- [9] N. Mandić, H. Ukić Boljat, T. Kekez, and L. Runko Luttenberger, "Multicriteria analysis of alternative marine fuels in sustainable coastal marine traffic," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 6, p. 2600, 2021, doi: [10.3390/app11062600](#).
- [10] A. Yazdani-Chamzini, M. M. Fouladgar, E. K. Zavadskas, and S. H. Haji Moini, "Selecting the optimal renewable energy using multi criteria decision making," *J. Bus. Econ. Manag.*, vol. 14, no. 5, pp. 957–978, 2013, doi: [10.3846/16111699.2013.766257](#).
- [11] A. T. Hoang et al., "Energy-related approach for reduction of CO2 emissions: A critical strategy on the port-to-ship pathway," *J. Clean. Prod.*, vol. 355, p. 131772, 2022, doi: [10.1016/j.jclepro.2022.131772](#).
- [12] Q. Zhang, Z. Tan, S. Wang, and L. Zhen, "Shore hydrogen deployment problem in green ports," *Comput. Oper. Res.*, vol. 165, p. 106585, 2024, doi: [10.1016/j.cor.2024.106585](#).
- [13] C.-N. Wang, N.-A.-T. Nguyen, and T.-T. Dang, "Offshore wind power station (OWPS) site selection using a two-stage MCDM-based spherical fuzzy set approach," *Sci. Rep.*, vol. 12, p. 7260, 2022, doi: [10.1038/s41598-022-08257-2](#).
- [14] M. Shao, Y. Zhao, J. Sun, Z. Han, and Z. Shao, "A decision framework for tidal current power plant site selection based on GIS-MCDM: A case study in China," *Energy*, vol. 262, p. 125476, 2023, doi: [10.1016/j.energy.2022.125476](#).
- [15] C. Bhowmik, S. Bhowmik, and A. Ray, "Selection of optimum green energy sources by considering environmental constructs and their technical criteria: a case study," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 24, pp. 3569–3604, 2022, doi: [10.1007/s10668-021-01244-z](#).
- [16] K. Xu, M. P. Brito, and P. Beullens, "Multi-criteria feature selection on maritime emission abatement alternatives," *Res. Transp. Bus. Manag.*, vol. 59, p. 101288, 2025, doi: [10.1016/j.rtbm.2025.101288](#).
- [17] O. Oner and K. Khalilpour, "Evaluation of green hydrogen carriers: A multi-criteria decision analysis tool," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 168, p. 112764, 2022, doi: [10.1016/j.rser.2022.112764](#).
- [18] N. N. Hoai, P. V. Minh, Q. L. Le, D. P. Van, H. P. Thi, and A. N. Hong, "Assessment of hydrogen production technologies from agricultural residues in Vietnam," *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 27, p. 101919, 2024, doi: [10.1016/j.biteb.2024.101919](#).
- [19] M. Bayraktar, M. Pamik, M. Sokukcu, and O. Yuksel, "A SWOT-AHP analysis on biodiesel as an alternative future marine fuel," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 25, pp. 2233–2248, 2023, doi: [10.1007/s10098-023-02501-7](#).
- [20] A. P. M. Tarigan, M. M. Hasan, M. K. A. Wahab, E. Dogheche, and A. Djamaludin, "Renewable energy source selection for a green port with AHP," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 753, p. 012001, 2021, doi: [10.1088/1755-1315/753/1/012001](#).
- [21] N. H. Razak, H. Hashim, N. A. Yunus, and J. J. Klemeš, "Integrated linear programming and analytical hierarchy process method for diesel/biodiesel/butanol in reducing diesel emissions," *J. Clean. Prod.*, vol. 337, p. 130297, 2022, doi: [10.1016/j.jclepro.2021.130297](#).
- [22] M. Anwar, "Biodiesel feedstocks selection strategies based on economic, technical, and sustainable aspects," *Fuel*, vol. 283, p. 119204, 2021, doi: [10.1016/j.fuel.2020.119204](#).
- [23] D. Majji, I. Abrar, and A. Dutta, "Multi-criteria decision-making framework for selection of surfactant-free microemulsion fuels as

- a sustainable diesel alternative,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 177, p. 108366, 2023, doi: [10.1016/j.compchemeng.2023.108366](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108366).
- [24] H. Chen and H. Wang, “Research on green supplier selection method based on improved AHP-FMEA,” *Sustainability*, vol. 17, no. 7, p. 3018, 2025, doi: [10.3390/su17073018](https://doi.org/10.3390/su17073018).
- [25] K. S. Mehra, V. Goel, and R. Kumar, “An integrated multi-attribute decision framework for sustainability assessment of renewable diesel fuel production pathways,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 309, p. 118461, 2024, doi: [10.1016/j.enconman.2024.118461](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118461).
- [26] N. Van Thanh, “Sustainable energy source selection for industrial complex in Vietnam: A fuzzy MCDM approach,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 50094–50106, 2022, doi: [10.1109/ACCESS.2022.3173609](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3173609).
- [27] F. Zhou and T.-Y. Chen, “A hybrid group decision-making approach involving Pythagorean fuzzy uncertainty for green supplier selection,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 261, p. 108875, 2023, doi: [10.1016/j.ijpe.2023.108875](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108875).
- [28] M. Bayraktar and O. Yuksel, “Analysis of the nuclear energy systems as an alternative propulsion system option on commercial marine vessels by utilizing the SWOT-AHP method,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 407, p. 112265, 2023, doi: [10.1016/j.nucengdes.2023.112265](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112265).
- [29] T. A. L. Marcu, C. Gasparotti, and E. Rusu, “Green fuels — A new challenge for marine industry,” *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 127–132, 2021, doi: [10.1016/j.egy.2021.06.020](https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.020).
- [30] C.-N. Wang, J.-C. Kao, Y.-H. Wang, V. T. Nguyen, V. T. Nguyen, and S. T. Husain, “A multicriteria decision-making model for the selection of suitable renewable energy sources,” *Mathematics*, vol. 9, no. 12, p. 1318, 2021, doi: [10.3390/math9121318](https://doi.org/10.3390/math9121318).
- [31] A. Abdulvahitoglu and M. Kilic, “A new approach for selecting the most suitable oilseed for biodiesel production; the integrated AHP-TOPSIS method,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 1, p. 101604, 2022, doi: [10.1016/j.asej.2021.10.002](https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.002).
- [32] I. Tronnebati, M. El Yadari, and F. Jawab, “A review of green supplier evaluation and selection issues using MCDM, MP and AI models,” *Sustainability*, vol. 14, no. 24, p. 16714, 2022, doi: [10.3390/su142416714](https://doi.org/10.3390/su142416714).
- [33] A.-R. Kim, D.-W. Kwak, and Y.-J. Seo, “Evaluation of liquefied natural gas bunkering port selection,” *Int. J. Logist. Res. Appl.*, vol. 22, no. 6, pp. 583–600, 2019, doi: [10.1080/13675567.2019.1642311](https://doi.org/10.1080/13675567.2019.1642311).
- [34] F. K. Gündoğdu and C. Kahraman, “A novel spherical fuzzy analytic hierarchy process and its renewable energy application,” *Soft Comput.*, vol. 24, pp. 4063–4082, 2020, doi: [10.1007/s00500-019-04222-w](https://doi.org/10.1007/s00500-019-04222-w).
- [35] A. Çalık, “A novel Pythagorean fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodology for green supplier selection in the Industry 4.0 era,” *Soft Comput.*, vol. 25, pp. 3083–3104, 2021, doi: [10.1007/s00500-020-05294-9](https://doi.org/10.1007/s00500-020-05294-9).
- [36] V. Srivastava, S. Bhardwaj, and G. Chaudhary, “An intelligent multi-criteria decision-based approach for sustainable growth of the energy sector: the case study of India and Vietnam,” *J. Intell. Syst. Internet Things*, vol. 6, no. 1, pp. 59–74, 2022, doi: [10.54216/JISIoT.060105](https://doi.org/10.54216/JISIoT.060105).
- [37] T. E. Saputro, T. Y. Rosiani, A. Mubin, S. K. Dewi, and T. Baroto, “Green supplier selection under supply risks using novel integrated fuzzy multi-criteria decision making techniques,” *J. Clean. Prod.*, vol. 449, p. 141788, 2024, doi: [10.1016/j.jclepro.2024.141788](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141788).
- [38] İ. Kaya, M. Çolak, and F. Terzi, “A comprehensive review of fuzzy multi criteria decision making methodologies for energy policy making,” *Energy Strategy Rev.*, vol. 24, pp. 207–228, 2019, doi: [10.1016/j.esr.2019.03.003](https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.03.003).
- [39] M. Sadiq et al., “Future greener seaports: A review of new infrastructure, challenges, and energy efficiency measures,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 76140–76153, 2021, doi: [10.1109/ACCESS.2021.3081430](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3081430).
- [40] A. Narad and M. Joshi, “Selection of optimum fuel blend using AHP and EDAS analysis,” *Int. J. Adv. Res. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 9, pp. 591–601, 2020, doi: [10.34218/IJARET.11.9.2020.060](https://doi.org/10.34218/IJARET.11.9.2020.060).
- [41] R. Ulewicz et al., “Multi-criteria analysis of the renewable energy sources usage in Poland and Germany,” *Energies*, vol. 14, no. 9, p. 2386, 2021, doi: [10.3390/en14092386](https://doi.org/10.3390/en14092386).
- [42] F. Zhou and T.-Y. Chen, “An integrated multicriteria group decision-making approach for green supplier selection under Pythagorean fuzzy scenarios,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 163713–163727, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.3022377](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3022377).
- [43] R. Atassi and K. Yang, “An integrated neutrosophic AHP and TOPSIS methods for assessment renewable energy barriers for sustainable development,” *Int. J. Neutrosophic Sci.*, vol. 18, no. 2, pp. 158–173, 2022, doi: [10.54216/IJNS.180201](https://doi.org/10.54216/IJNS.180201).
- [44] N. Chattham, N. V. Thanh, and C. Jeenanunta, “Renewable energy from solid waste: A spherical fuzzy multi-criteria decision-making model addressing solid waste and energy challenges,” *Energies*, vol. 18, no. 3, p. 589, 2025, doi: [10.3390/en18030589](https://doi.org/10.3390/en18030589).
- [45] A. J. Percy and M. Edwin, “Feasibility assessment and prioritization of renewable energy resources: towards a energy transition for the society and the environment — a case study approach,” *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 26, pp. 3741–3766, 2024, doi: [10.1007/s10668-023-03799-5](https://doi.org/10.1007/s10668-023-03799-5).
- [46] H. Huang, W. Wang, and G. Cai, “Balancing energy security and carbon emissions in China: The roles of renewable energy and environmental regulation,” *Energy Rep.*, p. 109007, 2024, doi: [10.1016/j.egy.2024.109007](https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.109007).
- [47] N. Shatnawi, H. Abu-Qdais, and F. Abu Qdais, “Using multi-criteria analysis to select the optimal renewable energy source for a developing country,” *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.*, vol. 28, no. 5, pp. 427–440, 2021, doi: [10.1080/15487733.2021.1930715](https://doi.org/10.1080/15487733.2021.1930715).