



BÀI TỔNG QUAN

Tổng quan về tích hợp năng lượng tái tạo cho cảng biển và hạ tầng giao thông ven biển: Kinh nghiệm quốc tế và định hướng nghiên cứu cho Việt Nam

Renewable energy integration for seaports and coastal transport infrastructure: International experience and research directions for Vietnam

Nguyễn Mạnh Hùng^{1,*}, Nguyễn Văn Thắng¹

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

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 14/07/2026
Ngày nhận bản sửa: 26/07/2026
Ngày chấp nhận đăng: 12/08/2026
Ngày xuất bản trực tuyến: 15/09/2026

TỪ KHÓA

Cảng xanh
Năng lượng tái tạo
Khử carbon hàng hải
Năng lượng biển
Giao thông vận tải ven biển

KEYWORDS

Green port
Renewable energy
Maritime decarbonization
Ocean energy
Coastal transport

TÓM TẮT

Trước yêu cầu giảm phát thải ngày càng nghiêm ngặt của Tổ chức Hàng hải quốc tế và cam kết trung hòa carbon của Việt Nam, cảng biển và vận tải ven biển buộc phải chuyển dịch cơ cấu năng lượng. Bài viết tổng hợp 51 công trình công bố trong giai đoạn 2010–2026 theo ba nhóm giải pháp: điện bờ và lưới điện nhỏ tại cảng; hệ đẩy hỗ trợ bằng gió cùng tối ưu tuyến theo thời tiết cho tàu; năng lượng dòng triều và sóng cho hạ tầng hàng hải. Tổng hợp cho thấy nhiều công nghệ đã đủ hoàn thiện để triển khai, song hiệu quả thực tế phụ thuộc chặt vào nguồn năng lượng tại chỗ, cơ cấu điện lưới và cách vận hành của từng cảng, nên không thể áp dụng rập khuôn. Bài viết đề xuất bốn hướng nghiên cứu ưu tiên cho Việt Nam: xây dựng dữ liệu năng lượng ở quy mô công trình; phát triển thiết bị phù hợp chế độ gió và dòng chảy từng khu vực; tối ưu vận hành đội tàu ven biển; và tích hợp hệ thống có xét biến động theo gió mùa.

ABSTRACT

The global maritime sector is entering a period of deep energy transition driven by the 2023 Greenhouse Gas Strategy of the International Maritime Organization and national climate commitments. This paper reviews technologies and integration pathways for renewable energy in seaports and coastal transport infrastructure, drawing on 51 publications from 2010 to 2026. Three groups of solutions are examined: shore power and port microgrids on the port side; wind-assisted propulsion and weather routing on the ship side; and tidal and wave energy for maritime infrastructure. International experience shows that the effectiveness of each solution depends strongly on local resource characteristics, grid carbon intensity, and port operating models, so no model can be transplanted as-is. Benchmarking against Vietnam's policy framework and domestic research landscape, the paper proposes four priority research directions: infrastructure-scale resource data; energy converters tailored to local wind and current regimes; operational optimization of coastal shipping; and system integration under monsoon-driven seasonality.

1. Đặt vấn đề

1.1. Áp lực khử carbon của ngành hàng hải toàn cầu

Tháng 7 năm 2023, Tổ chức Hàng hải quốc tế thông qua Chiến lược khí nhà kính sửa đổi, đặt mục tiêu giảm ít nhất 40% nồng độ carbon của vận tải biển quốc tế vào năm 2030 so với mức năm 2008 và đưa phát thải ròng của toàn ngành về không vào khoảng năm 2050 [1]. Với một ngành đang đóng góp xấp xỉ 3% lượng khí nhà kính toàn cầu và gần như phụ thuộc hoàn toàn vào nhiên liệu hóa thạch, đây là mốc chuyển có tính bước ngoặt: giảm phát thải không còn là lựa chọn tự nguyện mà trở thành điều kiện tham gia thị trường vận tải quốc tế.

Về mặt kỹ thuật, kho giải pháp không hề thiếu. Tổng quan

của Bouman và cộng sự đã kiểm kê hàng chục biện pháp từ thiết kế thân vỏ, động cơ, nhiên liệu cho tới vận hành, và ước tính rằng nếu kết hợp đồng bộ, phát thải trên mỗi đơn vị hàng hóa vận chuyển có thể giảm hơn 75% [2]. Các khảo sát ý kiến chuyên gia gần đây cũng thống nhất rằng những lộ trình khả thi cho giai đoạn 2030–2050 đều đòi hỏi hành động sớm và đồng thời ở cả khâu đội tàu lẫn khâu cảng [3]. Câu hỏi vì thế đã dịch chuyển: không phải có giải pháp hay không, mà là lựa chọn, phối hợp và khu vực hóa giải pháp nào cho từng điều kiện cụ thể.

Trong chuỗi vận tải biển, cảng là mắt xích cố định duy nhất, nơi hội tụ phụ tải điện lớn, quỹ hạ tầng sẵn có và thẩm quyền

* Tác giả liên hệ: Nguyễn Mạnh Hùng. Email: hung.nguyenmanh@ut.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.55228/j.uth.150504>

quản lý tập trung. Tổng quan của Alamoush và cộng sự cho thấy các biện pháp kỹ thuật và vận hành tại cảng trải rộng từ điện khí hóa thiết bị bốc xếp, cải tạo chiếu sáng, đến phát triển nguồn tái tạo tại chỗ và cung cấp điện bờ cho tàu [4]. Nói cách khác, cảng vừa là đối tượng phải giảm phát thải, vừa là bàn đạp để giảm phát thải cho cả đội tàu ghé qua nó.

1.2. Bối cảnh Việt Nam

Ở trong nước, Quy hoạch điện VIII đặt mục tiêu 21 GW điện gió trên bờ và 6 GW điện gió ngoài khơi vào năm 2030, gắn với cam kết đạt trung hòa carbon vào năm 2050 [5]. Hệ thống cảng biển Việt Nam hiện có trên năm mươi cảng đang hoạt động với sản lượng thông qua khoảng bảy trăm triệu tấn hàng mỗi năm [6], trải dài trên hơn ba nghìn kilômét bờ biển – một mạng lưới hạ tầng nằm ngay sát các vùng tài nguyên gió và năng lượng biển mà Ngân hàng Thế giới đánh giá thuộc nhóm giàu tiềm năng nhất khu vực Đông Nam Á [7].

Giai đoạn 2019–2021, cơ chế giá mua điện cố định đã tạo ra bước nhảy vọt về công suất điện mặt trời và điện gió, đưa Việt Nam trở thành hiện tượng của ASEAN về tốc độ phát triển năng lượng tái tạo [8]. Nghịch lý nằm ở chỗ: trong khi nguồn cung tái tạo tăng nhanh ở quy mô hệ thống điện quốc gia, mảng ứng dụng cho chính hạ tầng giao thông vận tải – khu vực tiêu thụ năng lượng lớn, tập trung và có yêu cầu độ tin cậy cao – lại chưa hình thành được một dòng nghiên cứu rõ nét. Cảng nào nên lắp nguồn gì, quy mô bao nhiêu, vận hành ra sao dưới chế độ gió mùa, cho đến nay vẫn thiếu cơ sở khoa học được công bố có hệ thống.

1.3. Mục tiêu và phạm vi của bài viết

Trên thế giới, các tổng quan về giảm phát thải cảng biển đã được hệ thống hóa khá đầy đủ [4], [9], song hầu hết viết cho bối cảnh các nước phát triển, nơi cơ cấu điện lưới, giá năng lượng và năng lực tài chính khác xa điều kiện Việt Nam. Bài viết này vì vậy đặt ra ba câu hỏi: thứ nhất, những nhóm công nghệ tích hợp năng lượng tái tạo nào cho cảng biển và vận tải ven biển đã được nghiên cứu, triển khai và cho bài học gì; thứ hai, khung chính sách cùng hiện trạng nghiên cứu trong nước đang ở đâu so với bức tranh đó; và thứ ba, cộng đồng nghiên cứu giao thông vận tải Việt Nam nên ưu tiên những hướng nào trong giai đoạn tới. Phần còn lại của bài được tổ chức như sau: mục 2 trình bày phương pháp tổng quan; mục 3 và 4 lần lượt điểm các giải pháp phía cảng và phía tàu; mục 5 bàn về năng lượng biển cho hạ tầng hàng hải; mục 6 đối chiếu với bối cảnh Việt Nam; mục 7 đề xuất định hướng nghiên cứu và mục 8 kết luận.

2. Phương pháp tổng quan

Bài viết áp dụng cách tiếp cận tổng quan tường thuật có cấu trúc (structured narrative review). Cần nói rõ ngay từ đầu: đây không phải một tổng quan hệ thống thực hiện đầy đủ quy trình PRISMA 2020 [10]; chuẩn này chỉ được tham chiếu ở tinh thần minh bạch hóa nguồn, từ khóa và tiêu chí lựa chọn. Do đó, bài viết không thống kê số bản ghi thu được và bị loại ở từng bước sàng lọc và không xây dựng sơ đồ lựa chọn tài liệu; hệ quả của lựa chọn phương pháp này được thảo luận ở cuối mục. Nguồn tài liệu chính là hai cơ sở dữ liệu Scopus và Web of Science, bổ sung bằng báo cáo có thẩm định của Ngân hàng

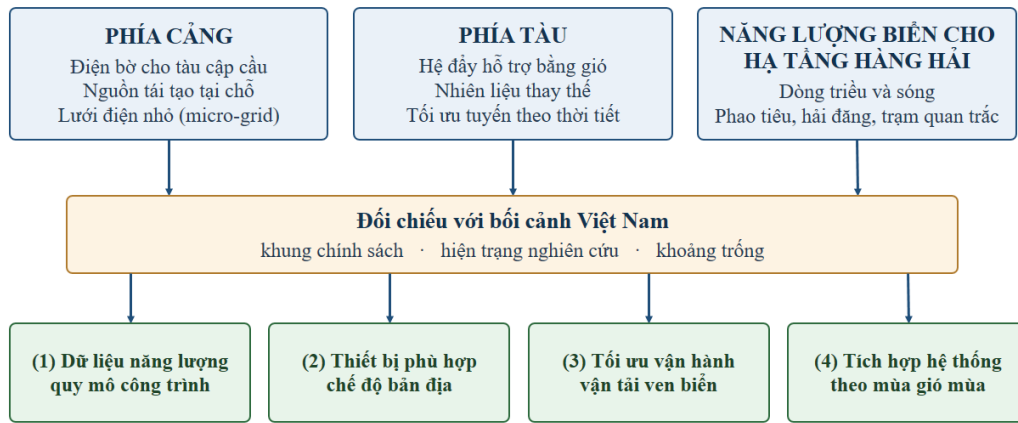
Thế giới, Chương trình Phát triển Liên hợp quốc và Tổ chức Hàng hải quốc tế; các tìm kiếm được thực hiện trong tháng 6 và tháng 7 năm 2026. Bốn cụm từ khóa được sử dụng, kết hợp bằng toán tử AND/OR, cụ thể như sau: (i) (“green port” OR “port decarbonization” OR “sustainable port” OR seaport) AND (“renewable energy” OR “shore power” OR “cold ironing” OR microgrid OR “energy efficiency”); (ii) (ship OR maritime OR shipping) AND (“wind-assisted propulsion” OR “weather routing” OR “alternative fuel” OR hydrogen OR ammonia); (iii) (“tidal energy” OR “wave energy” OR “ocean energy”) AND (port OR harbour OR “maritime infrastructure” OR “navigation aid”); (iv) (Vietnam OR “Southeast Asia”) AND (“offshore wind” OR “green port” OR “maritime decarbonization” OR “energy policy”). Cùng một bộ cụm từ được áp dụng thống nhất cho cả hai cơ sở dữ liệu. Khung thời gian khảo sát là 2010–2026, ưu tiên các công bố trong khoảng mười năm gần nhất để phản ánh đúng tốc độ tiến hóa công nghệ. Tiêu chí lựa chọn gồm: bài báo có bình duyệt hoặc báo cáo tổ chức uy tín; nội dung gắn trực tiếp với cảng biển, đội tàu hoặc hạ tầng giao thông ven biển; và có giá trị tham chiếu cho điều kiện các nước đang phát triển. Quy trình sàng lọc do một tác giả thực hiện qua hai bước, lần lượt trên tiêu đề – tóm tắt rồi trên toàn văn; tiêu chí loại gồm: không có bình duyệt hoặc không thuộc nhóm báo cáo tổ chức có thẩm định, không gắn trực tiếp với cảng biển, đội tàu hay hạ tầng ven biển, và trùng lặp nội dung với tài liệu đã chọn. Kết quả, đúng 51 tài liệu được đưa vào tổng hợp và toàn bộ đều xuất hiện trong danh mục tài liệu tham khảo. Khung phân tích tổng thể của bài viết được khái quát tại Hình 1.

Cách tiếp cận trên có ba hạn chế cần nêu tường minh. Thứ nhất, việc sàng lọc do một tác giả duy nhất thực hiện, không có kiểm tra chéo giữa nhiều người đánh giá, nên nguy cơ thiên lệch lựa chọn không thể loại trừ hoàn toàn. Thứ hai, hai cơ sở dữ liệu được sử dụng bao phủ rất hạn chế các tạp chí trong nước và ngôn ngữ tìm kiếm chủ yếu là tiếng Anh, dẫn tới thiên lệch ngôn ngữ; vì vậy, mọi nhận định dạng “chưa ghi nhận công bố” trong bài chỉ có giá trị trong phạm vi nguồn và từ khóa nêu trên, không phải khẳng định tuyệt đối về sự vắng mặt của nghiên cứu, nhất là với văn liệu tiếng Việt. Thứ ba, do tính chất tường thuật, phần tổng hợp ở các mục 3–5 chủ yếu mang tính định tính; để giảm bớt hạn chế này, Bảng 1 ở cuối mục 5 hệ thống hóa các nhóm giải pháp theo mức trưởng thành công nghệ, hiệu quả ghi nhận trong văn liệu và điều kiện áp dụng then chốt.

3. Công nghệ khử carbon phía cảng

3.1. Điện bờ cho tàu cập cảng

Điện bờ (shore power, còn gọi là cold ironing) cho phép tàu tắt máy phát phụ trong thời gian cập cầu và nhận điện trực tiếp từ lưới trên bờ, nhờ đó loại bỏ gần như toàn bộ phát thải khí và tiếng ồn tại khu vực cầu tàu – nơi tập trung dân cư và người lao động chịu ảnh hưởng trực tiếp nhất. Tổng quan của Abu Bakar và cộng sự đã hệ thống hóa các cấu hình kỹ thuật, chuẩn kết nối và những rào cản triển khai của công nghệ này [11]. Ở góc độ chính sách, nghiên cứu của Zis và cộng sự chỉ ra rằng hiệu quả của điện bờ cần được đánh giá song song với các biện pháp vận hành như giảm tốc độ khi tiếp cận cảng, bởi hai nhóm giải pháp bổ trợ nhau về phạm vi tác động [12].



Hình 1. Khung phân tích ba nhóm giải pháp và bốn định hướng nghiên cứu (nguồn: tác giả)

Thách thức của điện bờ không nằm ở nguyên lý mà ở bài toán kinh tế và phối hợp. Qì và cộng sự nhận định rằng mức độ sử dụng điện bờ phụ thuộc vào tương quan giá điện với giá nhiên liệu, chi phí hoán cải tàu và tính đồng bộ của mạng lưới cảng trang bị [13]; còn mô hình lựa chọn của Tan và cộng sự cho mạng vận tải container đường thủy nội địa cho thấy nếu chỉ một vài cảng đơn lẻ đầu tư, chủ tàu sẽ thiếu động lực hoán cải và hạ tầng dễ rơi vào cảnh xây xong bỏ không [14]. Một điểm nữa thường bị bỏ qua: điện bờ chỉ thực sự sạch khi lưới điện phía sau nó sạch. Phân tích cho trường hợp Trung Quốc cho thấy mức giảm phát thải ròng của điện bờ biến động mạnh theo cơ cấu nguồn điện từng vùng [15]. Với Việt Nam, điều này có nghĩa là lợi ích khí hậu của điện bờ sẽ tăng dần theo đúng lộ trình xanh hóa nguồn điện của Quy hoạch điện VIII, và các dự án điện bờ nên được thẩm định trong mối liên kết đó thay vì tách rời.

3.2. Nguồn tái tạo tại chỗ và lưới điện nhỏ trong cảng

Khuôn viên cảng có những lợi thế tự nhiên cho phát điện phân tán: diện tích mái kho bãi lớn phù hợp điện mặt trời, vị trí ven biển đón gió, và phụ tải tiêu thụ ngay tại chỗ giúp giảm tổn thất truyền tải. Bài toán trung tâm là ghép các nguồn biến động này với phụ tải cảng vốn có tính chu kỳ theo lịch tàu; Hình 2 minh họa cấu trúc nguyên lý của một hệ thống như vậy. Nghiên cứu tối ưu vận hành hệ lại ghép gồm điện mặt trời, pin lưu trữ, máy phát diesel và điện bờ đã cho thấy việc điều phối hợp lý giữa các thành phần có thể vừa giảm chi phí vừa giảm phát thải so với vận hành riêng lẻ [16]. Các đánh giá khả thi cho từng cảng cụ thể [17] cùng những tổng quan kỹ thuật – kinh tế gần đây [18], [19] thống nhất ở một điểm: không có cấu hình chuẩn cho mọi cảng; lời giải tối ưu phụ thuộc vào tài nguyên tại chỗ, biểu giá điện và đặc điểm phụ tải của từng nơi.

Ở tầng vận hành, xu hướng đáng chú ý là gắn nguồn tái tạo với tự động hóa và thị trường điện. Kinh nghiệm tại các cảng hàng rời châu Âu cho thấy tự động hóa khâu bốc xếp kết hợp nguồn tái tạo tại chỗ giúp giảm đồng thời chi phí năng lượng và phát thải trên mỗi tấn hàng [20], trong khi các nghiên cứu về vận hành lưới điện cảng với thiết bị điện tử công suất đa cổng trong thị trường điện trong tương lai gần sẽ mở ra khả năng cảng tham gia thị trường như một hộ tiêu thụ – phát điện linh hoạt [21]. Với các cảng Việt Nam, nơi biểu giá điện công nghiệp còn tương đối thấp, giá trị của nguồn tái tạo tại chỗ

trước mắt có lẽ nằm ở các phụ tải xa lưới và các khu vực đang chạy máy phát diesel, hơn là ở cạnh tranh trực tiếp với điện lưới.

3.3. Bài học từ kinh nghiệm quốc tế

Nhìn rộng ra các tổng quan về hiệu quả năng lượng cảng biển [22] và vai trò của tính bền vững trong hệ thống cảng toàn cầu [23], có thể rút ra ba bài học. Thứ nhất, đo lường đi trước đầu tư: các cảng chuyển đổi thành công đều bắt đầu bằng kiểm kê năng lượng và phát thải đủ tin cậy, từ đó mới xác định được giải pháp nào đáng tiền. Thứ hai, điều kiện tại chỗ quyết định cấu hình: trường hợp cảng Singapore – nơi quỹ đất ven cảng rất hạn chế – cho thấy phương án khả thi phải được thiết kế theo điều kiện không gian riêng của từng cảng [24] – một lời nhắc rằng mô hình của cảng này không thể bê nguyên sang cảng khác. Thứ ba, chuyển đổi xanh là bài toán quản trị chứ không thuần túy kỹ thuật: các phân tích về yếu tố thúc đẩy chuyển đổi [25] và về hướng nghiên cứu khử carbon cảng [26] đều nhấn mạnh vai trò của thể chế, cơ chế tài chính và năng lực nhân sự ngang hàng với công nghệ.

4. Công nghệ phía tàu và tối ưu vận hành

4.1. Hệ đẩy hỗ trợ bằng gió

Sau gần một thế kỷ vắng bóng, năng lượng gió đang quay lại đội tàu thương mại dưới các hình thái mới: rotor Flettner, buồm cứng, buồm cánh và điều kéo. Các tổng quan gần đây ghi nhận số lượng tàu lắp đặt tăng nhanh và mức tiết kiệm nhiên liệu dao động từ vài phần trăm tới trên hai mươi phần trăm trong điều kiện tuyến gió thuận lợi [27], [28]. Mô phỏng đối chứng ba công nghệ trên cùng một tàu của Lu và Ringsberg cho thấy hiệu quả phụ thuộc mạnh vào tuyến khai thác và chiến lược vận hành, chứ không chỉ vào bản thân thiết bị [29]; nghiên cứu trường hợp gần đây cũng lưu ý tương tác giữa lực đẩy bổ sung và hiệu suất chân vịt – một chi tiết thủy động lực dễ bị bỏ sót khi chỉ tính toán sơ bộ [30].

Đối với đội tàu ven biển Việt Nam, hai đặc điểm đáng để nghiên cứu nghiêm túc: chế độ gió mùa có tính ổn định và lặp lại cao theo mùa, và cự ly tuyến ngắn cho phép lịch trình linh hoạt hơn tàu viễn dương. Tuy nhiên, trong phạm vi các cơ sở dữ liệu và từ khóa khảo sát ở mục 2 – vốn còn bao phủ hạn chế các tạp chí trong nước – nhóm tác giả chưa ghi nhận đánh giá công bố nào về tính khả thi của hệ đẩy hỗ trợ bằng sức gió

cho các tuyến nội địa hoặc ven biển của Việt Nam; đây là một khoảng trống mà bài viết sẽ trở lại ở mục 7.

4.2. Nhiên liệu thay thế: vị trí trong lộ trình dài hạn

Hydro, amoniac và methanol được nhìn nhận là những ứng viên chủ lực cho giai đoạn khử carbon sâu của đội tàu sau năm 2035. Các tổng quan mới nhất về hydro xanh [31] và về cặp hydro – amoniac [32] cho thấy rào cản lớn nhất hiện không nằm ở động cơ mà ở chuỗi cung ứng: sản xuất nhiên liệu sạch với chi phí chấp nhận được, tồn trữ an toàn và hạ tầng tiếp nhiên liệu tại cảng. Điểm liên quan trực tiếp tới quy hoạch cảng Việt Nam là yếu tố sau cùng: các bến tiếp nhiên liệu thế hệ mới đòi hỏi quỹ đất, khoảng cách an toàn và hệ thống kỹ thuật riêng, nên ngay cả khi chưa đầu tư, các quy hoạch chi tiết cảng biển giai đoạn tới cũng cần chứa sẵn dự địa cho hạng mục này.

4.3. Tối ưu tuyến và tốc độ theo thời tiết

Khác với hai nhóm trên, tối ưu tuyến theo thời tiết (weather routing) gần như không đòi hỏi đầu tư phần cứng: lợi ích đến từ thuật toán và dữ liệu. Nguyên lý chung là tìm tổ hợp tuyến đường và chế độ tốc độ cực tiểu hóa nhiên liệu hoặc phát thải, trong đó lực cản của tàu thay đổi theo trường sóng, gió và dòng chảy dọc hành trình. Về mặt phương pháp, các nghiên cứu tiêu biểu đã kết hợp thuật toán di truyền với quy hoạch động cho bài toán tối ưu hải trình [33], xây dựng mô hình hai mục tiêu tốc độ – tuyến cho vận tải ven biển trong vùng kiểm soát phát thải [34], và phát triển thuật toán di truyền tìm tuyến thực tế có xét dữ liệu thời tiết [35]. Đáng chú ý, hướng nghiên cứu mới nhất đã tích hợp bài toán định tuyến với hệ đẩy hỗ trợ bằng sức gió, cho phép con tàu chủ động tìm kiếm hướng gió thay vì chỉ tìm cách tránh tác động của sóng [36].

Với vùng biển Việt Nam, nơi trường gió đảo chiều theo hai mùa và dòng chảy ven bờ chịu chi phối của thủy triều, tiềm năng tiết kiệm của định tuyến thông minh nhiều khả năng không nhỏ, song, trong phạm vi khảo sát của tổng quan này, chưa ghi nhận công trình nào lượng hóa tiềm năng đó cho các tuyến nội địa của Việt Nam. Đây là hướng nghiên cứu có chi phí thấp, dữ liệu đầu vào phần lớn công khai, và kết quả có thể chuyển giao trực tiếp cho các hãng tàu ven biển.

5. Năng lượng biển cho hạ tầng hàng hải

5.1. Bức tranh công nghệ năng lượng dòng triều và sóng

Trong các dạng năng lượng biển, điện dòng triều là công nghệ tiến gần thương mại hóa nhất: các trang trại quy mô nhỏ đã vận hành nhiều năm tại những eo biển có dòng chảy mạnh, chủ yếu ở châu Âu. Tổng quan tài nguyên toàn cầu mới nhất của Coles và cộng sự cho thấy nguồn khai thác được tập trung ở một số ít khu vực có vận tốc dòng lớn [37], và những đánh giá chi tiết cho vùng biển Anh – nơi ngành này phát triển nhất – minh họa rõ mức độ phụ thuộc của sản lượng vào đặc điểm dòng chảy từng điểm [38]. Nói cách khác, thiết bị thế hệ hiện tại được thiết kế quanh một dải vận tốc làm việc khá cao, và điều đó định hình luôn bản đồ những nơi công nghệ này khả thi. Ở nhánh năng lượng sóng, các tổng quan công nghệ nền tảng cho thấy bức tranh tương tự nhưng ở mức trưởng thành thấp hơn: hàng loạt dòng thiết bị đã được đề xuất và trình diễn – nổi bật là nhóm cột nước dao động (oscillating water

column) – song chưa thiết kế nào đạt tới thương mại hóa rộng rãi [39], [40].

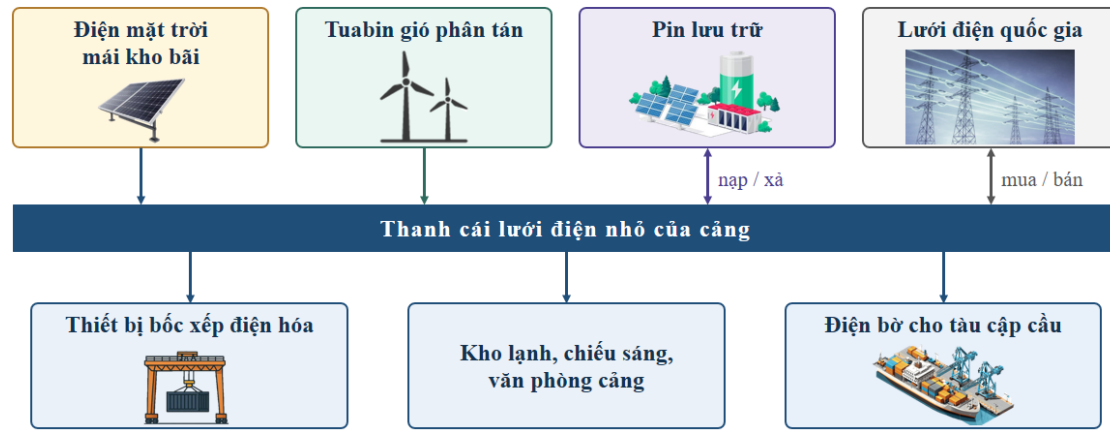
Về phía tài nguyên khu vực, các đánh giá dài hạn cho Biển Đông và vùng biển lân cận Trung Quốc cho thấy cả nguồn gió biển lẫn nguồn sóng đều phân hóa mạnh theo mùa gió mùa và theo không gian [41]–[43]. Đặc điểm mùa vụ này vừa là thách thức cho bài toán cân bằng cung – cầu, vừa là dữ kiện thiết kế quan trọng cho bất kỳ dự án năng lượng biển nào trong khu vực.

5.2. Ứng dụng cấp điện cho hạ tầng hàng hải

Ý tưởng dùng năng lượng biển phục vụ chính hạ tầng hàng hải không mới nhưng ít được khai thác. Tiền lệ trực tiếp nhất là nghiên cứu của Ramos và cộng sự về khả năng đưa một cảng tại Tây Ban Nha tiến tới tự chủ năng lượng bằng điện dòng triều khai thác ngay tại luồng vào cảng [44] – một minh chứng rằng ở nơi có dòng chảy phù hợp, cảng có thể trở thành hộ sản xuất điện thay vì chỉ tiêu thụ. Ở quy mô nhỏ hơn, các thiết bị dòng triều và sóng cỡ vài kilowatt phù hợp với nhóm phụ tải phân tán đặc thù của ngành hàng hải: phao tiêu, đăng tiêu, hải đăng, trạm quan trắc và các công trình báo hiệu xa lưới điện. Với nhóm này, giá trị của năng lượng biển không nằm ở giá thành cạnh tranh với điện lưới, mà ở việc thay thế máy phát diesel và các chuyển tiếp nhiên liệu tốn kém, đồng thời nâng độ tin cậy cấp điện cho các thiết bị bảo đảm an toàn hàng hải. Đáng chú ý với ngành hàng hải, ứng dụng thương mại đầu tiên của năng lượng sóng chính là cấp nguồn cho phao tiêu, được triển khai tại Nhật Bản từ thập niên 1960 [39]; ở quy mô công trình, hướng tích hợp thiết bị cột nước dao động vào đề chắn sóng mở ra khả năng để chính kết cấu bảo vệ cảng kiêm vai trò phát điện [40].

5.3. Thách thức đặc thù của vùng biển nhiệt đới

Chuyển các công nghệ nói trên về vùng biển nhiệt đới gió mùa như Việt Nam gặp một trở ngại có tính cấu trúc: phần lớn thiết bị thương mại hiện nay được phát triển cho các eo biển ôn đới có dòng chảy mạnh, nơi tập trung gần như toàn bộ nguồn tài nguyên khai thác được theo đánh giá toàn cầu [37]. Trong khi đó, nhiều vùng ven biển nhiệt đới có vận tốc dòng trung bình thấp hơn đáng kể so với dải làm việc này; ở những nơi mang chế độ nhật triều, số chu kỳ dòng chảy mạnh trong ngày về nguyên tắc cũng chỉ bằng một nửa so với chế độ bán nhật triều. Hệ quả là bài toán không thể giải bằng cách nhập khẩu thiết bị nguyên trạng; nó đòi hỏi hoặc tìm ra những vị trí cục bộ có dòng chảy được khuếch đại bởi địa hình, hoặc phát triển các thiết kế chuyển đổi năng lượng làm việc hiệu quả ở dải vận tốc thấp. Cả hai hướng đều đang là khoảng trống nghiên cứu, không riêng cho Việt Nam mà cho cả các quốc gia nhiệt đới có điều kiện tương đồng. Khép lại phần tổng hợp, Bảng 1 hệ thống hóa các nhóm giải pháp đã điểm trong các mục 3–5, làm cơ sở cho phân đối chiếu với bối cảnh Việt Nam ở mục tiếp theo.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý hệ thống năng lượng tích hợp của một cảng xanh (nguồn: tác giả, xây dựng trên cơ sở các cấu hình được thảo luận trong [11], [16]–[18], [21])

Bảng 1. Tổng hợp so sánh các nhóm giải pháp tích hợp năng lượng tái tạo cho cảng biển và vận tải ven biển (nguồn: tác giả tổng hợp từ các tài liệu được trích dẫn)

Nhóm giải pháp	Mức trưởng thành	Hiệu quả ghi nhận trong văn liệu	Điều kiện áp dụng then chốt	Nguồn
Điện bờ cho tàu cập cầu	Thương mại; triển khai rộng tại châu Âu, Trung Quốc	Loại bỏ phần lớn phát thải tại cầu tàu; mức giảm ròng phụ thuộc cơ cấu nguồn điện	Đồng bộ mạng lưới cảng trang bị; tương quan giá điện – nhiên liệu; mức độ sạch của lưới	[11]–[15]
Nguồn tái tạo tại chỗ và micro-grid cảng	Thương mại (điện mặt trời); trình diễn – thương mại (hệ lai ghép)	Giảm đồng thời chi phí và phát thải khi điều phối hợp lý các thành phần	Tài nguyên tại chỗ; biểu giá điện; đặc điểm phụ tải; phương án lưu trữ	[16]–[21]
Hệ đẩy hỗ trợ bằng sức gió	Thương mại giai đoạn đầu; số tàu lắp đặt tăng nhanh	Tiết kiệm nhiên liệu từ vài phần trăm tới trên 20% tùy tuyến và công nghệ	Tuyến gió ổn định; tương tác với chân vịt; chiến lược vận hành	[27]–[30]
Nhiên liệu thay thế (hydro, amoniac, methanol)	Trình diễn – tiền thương mại	Khử carbon sâu cho đội tàu, chủ yếu sau năm 2035	Chuỗi cung ứng nhiên liệu sạch; bến tiếp nhiên liệu chuyên dụng và quỹ đất cảng	[31], [32]
Tối ưu tuyến và tốc độ theo thời tiết	Thương mại (giải pháp phần mềm), không đòi hỏi phần cứng	Giảm nhiên liệu và phát thải; mức độ phụ thuộc tuyến và điều kiện thời tiết	Dữ liệu khí tượng – hải văn tin cậy; mô hình lực cản tàu phù hợp	[33]–[36]
Năng lượng dòng triều và sóng cho hạ tầng	Dòng triều: trang trại quy mô nhỏ; sóng: trình diễn	Thay thế diesel cho phụ tải phân tán; cảng tự chủ năng lượng nơi dòng chảy phù hợp	Vận tốc dòng đạt dải làm việc; chế độ triều; khả năng tích hợp vào kết cấu	[37]–[40], [44]

6. Bối cảnh chính sách và hiện trạng nghiên cứu tại Việt Nam

6.1. Khung chính sách

Khung chính sách năng lượng của Việt Nam đang chuyển động nhanh và nhìn chung thuận chiều cho các ứng dụng gắn với hàng hải. Quy hoạch điện VIII xác lập vai trò của điện gió ngoài khơi trong cơ cấu nguồn dài hạn [5]; lộ trình do Ngân hàng Thế giới xây dựng phác thảo các kịch bản phát triển ngành cùng yêu cầu về hạ tầng cảng phục vụ thi công và vận hành [7]; và đánh giá tiềm năng kỹ thuật do Chương trình Phát triển Liên hợp quốc chủ trì cung cấp bức tranh không gian ban đầu cho quy hoạch [45]. Ở tầng phân tích chính sách, nghiên cứu của Do và cộng sự chỉ ra những lựa chọn còn bỏ ngỏ về khung pháp lý không gian biển, cơ chế giá và phát triển chuỗi cung ứng nội địa [46].

Điểm chung của các tài liệu này là đều nhìn năng lượng biển ở quy mô ngành điện; phần giao thoa với quy hoạch cảng biển và vận tải thủy – từ cảng căn cứ, luồng thi công đến cơ hội cấp điện tại chỗ – mới chỉ được chạm tới ở mức nguyên

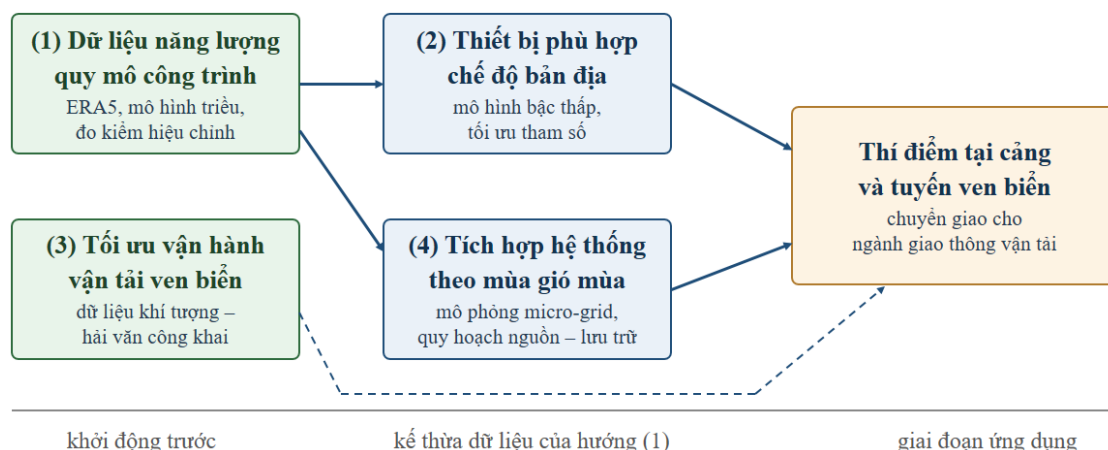
tắc

6.2. Hiện trạng nghiên cứu trong nước

Dòng nghiên cứu về cảng xanh (green port) của Việt Nam đang ở giai đoạn định hình khung khái niệm và đánh giá hiện trạng, với các phân tích về điều kiện phát triển cảng xanh trong bối cảnh một nền kinh tế mới nổi [47]. Gần đây bắt đầu xuất hiện những nghiên cứu định lượng hơn, tiêu biểu là kiểm kê và đề xuất kiểm soát phát thải tàu biển cho khu vực cảng Hải Phòng [48] đúng loại nền tảng đo lường mà kinh nghiệm quốc tế ở mục 3.3 cho thấy phải đi trước đầu tư. Ở phía nguồn năng lượng, bài học thành công về cơ chế giá cố định giai đoạn trước [8] chứng minh năng lực hấp thụ chính sách của thị trường trong nước, song các công bố gần nguồn tái tạo với phụ tải giao thông vận tải cụ thể vẫn còn rất thưa thớt.

Bảng 2. Ma trận định hướng nghiên cứu đề xuất

Hướng nghiên cứu	Câu hỏi trọng tâm	Dữ liệu và công cụ khả thi	Đối tượng hưởng lợi chính
(1) Dữ liệu năng lượng ở quy mô công trình	Nguồn gió và dòng chảy tại từng cụm cảng, tuyến luồng cụ thể phân bố ra sao theo mùa gió mùa?	Dữ liệu tái phân tích toàn cầu (ERA5), mô hình thủy triều toàn cầu, bản đồ gió độ phân giải cao, kết hợp đo kiểm tại điểm để hiệu chỉnh	Cơ quan quy hoạch cảng biển, nhà đầu tư hạ tầng, cảng vụ địa phương
(2) Thiết bị chuyển đổi phù hợp chế độ địa phương	Cấu hình tuabin nào vận hành hiệu quả ở dải vận tốc thấp và chế độ nhật triều đặc trưng của vùng biển nhiệt đới?	Mô hình khí động – thủy động bậc thấp, thuật toán tối ưu tham số, kiểm chứng với dữ liệu thực nghiệm đã công bố quốc tế	Nhóm nghiên cứu thiết bị năng lượng, doanh nghiệp cơ khí hàng hải
(3) Tối ưu vận hành vận tải ven biển	Tuyến đường và chế độ tốc độ nào giúp đội tàu ven biển tiết kiệm nhiên liệu nhất dưới tác động của gió mùa và dòng triều?	Thuật toán tìm đường và tối ưu đa mục tiêu, dữ liệu khí tượng – hải văn công khai, mô hình lực cản tàu bán thực nghiệm	Hãng tàu ven biển, cơ quan quản lý luồng hàng hải
(4) Tích hợp hệ thống theo mùa	Cơ cấu nguồn – lưu trữ nào cân bằng được chênh lệch cung – cầu điện giữa hai mùa gió tại cảng?	Mô phỏng lưới điện nhỏ, tối ưu quy hoạch nguồn và lưu trữ, số liệu phụ tải thực tế của cảng	Đơn vị khai thác cảng, điện lực địa phương, nhà hoạch định chính sách

**Hình 3.** Trình tự triển khai bốn định hướng nghiên cứu đề xuất (nguồn: tác giả)

6.3. Nhận diện khoảng trống

Đối chiếu bức tranh quốc tế ở các mục 3–5 với hiện trạng trong nước, có thể nhận diện bốn khoảng trống. Một là dữ liệu năng lượng ở quy mô công trình: các đánh giá tài nguyên hiện có chủ yếu phục vụ quy hoạch cấp vùng, trong khi quyết định đầu tư tại một cảng hay một tuyến luồng đòi hỏi thông tin ở độ phân giải cao hơn nhiều; các bộ dữ liệu tái phân tích toàn cầu như ERA5 [49], vốn đã được kiểm chứng về độ tin cậy cho đánh giá gió tại nhiều khu vực, kể cả Biển Đông [50], [51], là điểm khởi đầu khả thi và ít tốn kém cho hướng này. Hai là thiết bị chuyển đổi năng lượng phù hợp chế độ bản địa, như đã phân tích ở mục 5.3. Ba là tối ưu vận hành vận tải ven biển dưới điều kiện gió mùa và dòng triều, như đặt ra ở mục 4.3. Bốn là tích hợp hệ thống: ghép nguồn biến động theo mùa với phụ tải cảng và phương án lưu trữ trong một bài toán quy hoạch thống nhất – mảnh ghép mà thiếu yếu tố này, ba khoảng trống trên dù được lấp cũng khó chuyển thành dự án đầu tư.

7. Định hướng nghiên cứu cho Việt Nam

Từ bốn khoảng trống trên, **Bảng 2** cụ thể hóa chương trình nghiên cứu đề xuất theo ba chiều: câu hỏi trọng tâm, dữ liệu cùng công cụ khả thi trong điều kiện nguồn lực trong nước, và đối tượng hưởng lợi chính trong ngành giao thông vận tải.

Bốn hướng trên không đòi hỏi hạ tầng thí nghiệm lớn: dữ liệu nền phần nhiều đã công khai, công cụ tính toán ở mức máy tính cá nhân và mã nguồn mở, phù hợp với năng lực phổ

biến của các nhóm nghiên cứu đại học trong nước. Tính khả thi đó cũng hàm ý một trật tự triển khai hợp lý: hướng (1) nên đi trước vì nó cung cấp đầu vào cho cả ba hướng còn lại; hướng (3) có thể triển khai song song nhờ dữ liệu độc lập; hướng (2) và (4) kế thừa kết quả của hướng (1) để tránh trùng lặp công sức; trình tự này được khái quát tại **Hình 3**. Về phía quản lý, việc lồng các nội dung này vào nhiệm vụ khoa học công nghệ của ngành và của các trường khối giao thông vận tải sẽ giúp hình thành chuỗi kết quả liên thông, thay vì các đề tài rời rạc.

8. Kết luận

Bài viết đã tổng hợp ba nhóm giải pháp tích hợp năng lượng tái tạo cho cảng biển và vận tải ven biển từ 51 công trình trong giai đoạn 2010–2026. Ba nhận định chính có thể rút ra:

Thứ nhất là về công nghệ, nhiều giải pháp đã vượt qua ngưỡng trình diễn – điện bờ, điện mặt trời tại cảng, hệ đẩy hỗ trợ gió, định tuyến theo thời tiết – nhưng hiệu quả thực tế của từng giải pháp gắn chặt với điều kiện tài nguyên, cơ cấu điện lưới và mô hình vận hành tại chỗ, nên khâu quyết định là phải địa phương hóa cho từng đối tượng cảng cụ thể chứ không phải nhập khẩu mô hình và áp dụng y hệt cho các cảng biển tại Việt Nam.

Thứ hai, Việt Nam có khung chính sách năng lượng thuận lợi và hệ thống cảng biển quy mô lớn nằm sát các vùng tài nguyên giàu tiềm năng, song nghiên cứu ứng dụng cho chính hạ tầng giao thông vận tải còn mỏng và phân tán.

Thứ ba, bốn hướng nghiên cứu ưu tiên được đề xuất – dữ liệu năng lượng quy mô công trình, thiết bị phù hợp chế độ bản địa, tối ưu vận hành ven biển và tích hợp hệ thống theo mùa – đều khả thi với nguồn lực trong nước và có đối tượng thụ hưởng rõ ràng. Triển khai được chuỗi nghiên cứu này, ngành giao thông vận tải không chỉ đáp ứng yêu cầu giảm phát thải mà còn chủ động biến vị trí ven biển của hạ tầng thành một lợi thế năng lượng.

Đóng góp của tác giả

Nguyễn Mạnh Hùng: Phương pháp, Quản lý dữ liệu, Phân tích chính thức, chỉnh sửa bản thảo. Nguyễn Văn Thắng: Biên soạn dữ liệu, Phân tích dữ liệu, viết – bản thảo gốc, phản hồi phản biện.

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 tổng hợp trong bài viết sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

Author information

Nguyen Manh Hung*, Ho Chi Minh City University of Transport, Vietnam

Nguyen Van Thang, Ho Chi Minh City University of Transport, Vietnam

*Corresponding author: hung.nguyenmanh@ut.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] International Maritime Organization, 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, IMO, London, 2023.
- [2] E. A. Bouman, E. Lindstad, A. I. Riialand, A. H. Strømman, “State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 52, pp. 408–421, 2017. DOI: [10.1016/j.trd.2017.03.022](#).
- [3] I. I. Laskar, H. Dowlatabadi, A. Giang, “Expert assessments of maritime shipping decarbonization pathways by 2030 and 2050,” *Earth’s Future*, vol. 13, e2024EF005255, 2025. DOI: [10.1029/2024EF005255](#).
- [4] A. S. Alamoush, F. Ballini, A. I. Ölçer, “Ports’ technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 160, 111508, 2020. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2020.111508](#).
- [5] Thủ tướng Chính phủ, Quyết định số 500/QĐ-TTg phê duyệt Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021–2030, tầm nhìn đến năm 2050 (Quy hoạch điện VIII), Hà Nội, 2023.
- [6] Tổng cục Thống kê, Niên giám thống kê Việt Nam 2022, Nhà xuất bản Thống kê, Hà Nội, 2023.
- [7] World Bank, Offshore Wind Roadmap for Vietnam, World Bank, Washington DC, 2021.
- [8] T. N. Do, P. Burke, H. N. Nguyen, I. Overland, B. Suryadi, A. Swandaru, Z. Yurnaidi, “Vietnam’s solar and wind power success: Policy implications for the other ASEAN countries,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 65, pp. 1–11, 2021. DOI: [10.1016/j.esd.2021.09.002](#).
- [9] L. Zhang, Q. Zeng, L. Wang, “How to achieve comprehensive carbon emission reduction in ports? A systematic review,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 5, 715, 2024. DOI: [10.3390/jmse12050715](#).
- [10] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt et al., “The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews,” *BMJ*, vol. 372, n71, 2021. DOI: [10.1136/bmj.n71](#).
- [11] N. N. Abu Bakar, N. Bazmohammadi, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, “Electrification of onshore power systems in maritime transportation towards decarbonization of ports: A review of the cold ironing technology,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 178, 113243, 2023. DOI: [10.1016/j.rser.2023.113243](#).
- [12] T. Zis, R. J. North, P. Angeloudis, W. Y. Ochieng, M. G. H. Bell, “Evaluation of cold ironing and speed reduction policies to reduce ship emissions near and at ports,” *Maritime Economics & Logistics*, vol. 16, pp. 371–398, 2014. DOI: [10.1057/mel.2014.6](#).
- [13] J. Qi, S. Wang, C. Peng, “Shore power management for maritime transportation: Status and perspectives,” *Maritime Transport Research*, vol. 1, 100004, 2020. DOI: [10.1016/j.martra.2020.100004](#).
- [14] Z. Tan, Q. Liu, J. Song, H. Wang, Q. Meng, “Ship choice and shore-power service assessment for inland river container shipping networks,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 94, 102805, 2021. DOI: [10.1016/j.trd.2021.102805](#).
- [15] L. Sun, P. Ding, Y. Xiong, W. Liu, Z. Hu, “Carbon emission reduction of shore power from power energy structure in China,” *Frontiers in Marine Science*, vol. 9, 1077289, 2022. DOI: [10.3389/fmars.2022.1077289](#).
- [16] R. Tang, Z. Wu, X. Li, “Optimal operation of photovoltaic/battery/diesel/cold-ironing hybrid energy system for maritime application,” *Energy*, vol. 162, pp. 697–714, 2018. DOI: [10.1016/j.energy.2018.08.048](#).
- [17] I. Sadek, M. Elgohary, “Assessment of renewable energy supply for green ports with a case study,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, pp. 5547–5558, 2020. DOI: [10.1007/s11356-019-07150-2](#).
- [18] M. Parhamfar, I. Sadeghkhan, A. M. Adeli, “Towards the application of renewable energy technologies in green ports: Technical and economic perspectives,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, pp. 3120–3132, 2023. DOI: [10.1049/rpg2.12811](#).
- [19] A. Moros-Daza, A. Moros-Marcillo, C. A. Pacheco-Bustos, “Greening seaports: Evaluating impacts and policies for renewable energy systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 213, 115475, 2025. DOI: [10.1016/j.rser.2025.115475](#).
- [20] R. Philipp, G. Prause, E. O. Olaniyi, F. Lemke, “Towards green and smart seaports: Renewable energy and automation technologies for bulk cargo loading operations,” *Environmental and Climate Technologies*, vol. 25, pp. 650–665, 2021. DOI: [10.2478/rtuct-2021-0049](#).
- [21] C. Qing, N. Tai, F. Fan et al., “Optimal operation of the green port system considering the multiport power electronic transformer in day-ahead markets,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, 2023. DOI: [10.3389/fenrg.2023.1120636](#).
- [22] Ç. Iris, J. S. L. Lam, “A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 170–182, 2019. DOI: [10.1016/j.rser.2019.04.069](#).
- [23] T. Hossain, M. Adams, T. R. Walker, “Role of sustainability in global seaports,” *Ocean & Coastal Management*, vol. 202, 105435, 2021. DOI: [10.1016/j.ocecoaman.2020.105435](#).
- [24] W. Y. Yap, T. Notteboom, “Renewable energy options for seaport cargo terminals with application to mega port Singapore,” *Maritime Business Review*, vol. 9, no. 4, pp. 294–310, 2024. DOI: [10.1108/MABR-12-2023-0083](#).
- [25] V. Paulauskas, D. Paulauskas, A. Markauskas, “Port green transformation factors assessment,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 13, no. 5, 929, 2025. DOI: [10.3390/jmse13050929](#).

- [26] A. Alzahrani, I. Petri, Y. Rezgui, A. Ghoroghi, “Decarbonisation of seaports: A review and directions for future research,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 38, 100727, 2021. DOI: [10.1016/j.esr.2021.100727](https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100727).
- [27] M. Kolodziejski, M. Sosnowski, “Review of wind-assisted propulsion systems in maritime transport,” *Energies*, vol. 18, no. 4, 897, 2025. DOI: [10.3390/en18040897](https://doi.org/10.3390/en18040897).
- [28] T. Chou, V. Kosmas, M. Acciaro, K. Renken, “A comeback of wind power in shipping: An economic and operational review on the wind-assisted ship propulsion technology,” *Sustainability*, vol. 13, no. 4, 1880, 2021. DOI: [10.3390/su13041880](https://doi.org/10.3390/su13041880).
- [29] R. Lu, J. W. Ringsberg, “Ship energy performance study of three wind-assisted ship propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology,” *Ships and Offshore Structures*, vol. 15, no. 3, pp. 249–258, 2019. DOI: [10.1080/17445302.2019.1612544](https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1612544).
- [30] A. Čalić, Z. Jurić, M. Katalinić, “Impact of wind-assisted propulsion on fuel savings and propeller efficiency: A case study,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 11, 2100, 2024. DOI: [10.3390/jmse12112100](https://doi.org/10.3390/jmse12112100).
- [31] C. Li, W. Guo, J. Wang, “Green hydrogen for maritime decarbonization,” *Carbon Neutralization*, vol. 5, e70128, 2026. DOI: [10.1002/cnl2.70128](https://doi.org/10.1002/cnl2.70128).
- [32] C. K. Jin, J. H. Choi, C. H. Lee, M. H. Kim, “Sustainable maritime decarbonization: A review of hydrogen and ammonia as future clean marine energies,” *Sustainability*, vol. 17, no. 24, 11364, 2025. DOI: [10.3390/su172411364](https://doi.org/10.3390/su172411364).
- [33] H. Wang, X. Lang, W. Mao, “Voyage optimization combining genetic algorithm and dynamic programming for fuel/emissions reduction,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 90, 102670, 2021. DOI: [10.1016/j.trd.2020.102670](https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102670).
- [34] Y. Zhao, Y. Fan, J. Zhou, H. Kuang, “Bi-objective optimization of vessel speed and route for sustainable coastal shipping under the regulations of emission control areas,” *Sustainability*, vol. 11, no. 22, 6281, 2019. DOI: [10.3390/su11226281](https://doi.org/10.3390/su11226281).
- [35] S. Kuhlemann, K. Tierney, “A genetic algorithm for finding realistic sea routes considering the weather,” *Journal of Heuristics*, vol. 26, pp. 801–825, 2020. DOI: [10.1007/s10732-020-09449-7](https://doi.org/10.1007/s10732-020-09449-7).
- [36] A. Kytariolou, N. Themelis, “Weather routing optimisation for ships with wind-assisted propulsion,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 14, no. 2, 148, 2026. DOI: [10.3390/jmse14020148](https://doi.org/10.3390/jmse14020148).
- [37] D. S. Coles, T. A. A. Adcock, A. Cornett, C. H. Jo, H. Liu, J. Miles, P. G. Novo, J. Thiébot, “A review of global tidal stream energy resources,” *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 481, no. 2328, 20240841, 2025. DOI: [10.1098/rspa.2024.0841](https://doi.org/10.1098/rspa.2024.0841).
- [38] D. Coles, A. Angeloudis, D. Greaves et al., “A review of the UK and British Channel Islands practical tidal stream energy resource,” *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 477, 20210469, 2021. DOI: [10.1098/rspa.2021.0469](https://doi.org/10.1098/rspa.2021.0469).
- [39] A. F. O. Falcão, “Wave energy utilization: A review of the technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 899–918, 2010. DOI: [10.1016/j.rser.2009.11.003](https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003).
- [40] A. F. O. Falcão, J. C. C. Henriques, “Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review,” *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1391–1424, 2016. DOI: [10.1016/j.renene.2015.07.086](https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.086).
- [41] C. W. Zheng, C. Y. Li, J. Pan, M. Y. Liu, L. L. Xia, “An overview of global ocean wind energy resource evaluations,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 1240–1251, 2016. DOI: [10.1016/j.rser.2015.09.063](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.063).
- [42] C. W. Zheng, C. Y. Li, “Variation of the wave energy and significant wave height in the China Sea and adjacent waters,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 381–387, 2015. DOI: [10.1016/j.rser.2014.11.001](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.001).
- [43] C. W. Zheng, J. Pan, J. X. Li, “Assessing the China Sea wind energy and wave energy resources from 1988 to 2009,” *Ocean Engineering*, vol. 65, pp. 39–48, 2013. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2013.03.006](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.03.006).
- [44] V. Ramos, R. Carballo, M. Álvarez, M. Sánchez, G. Iglesias, “A port towards energy self-sufficiency using tidal stream power,” *Energy*, vol. 71, pp. 432–444, 2014. DOI: [10.1016/j.energy.2014.04.098](https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.098).
- [45] V. K. Mai, B. T. Nguyen, V. L. Tran et al., *Assessment of the Technical Potential of Offshore Wind Energy in Viet Nam*, UNDP Vietnam, Hanoi, 2023.
- [46] T. N. Do, P. J. Burke, L. Hughes, T. D. Thi, “Policy options for offshore wind power in Vietnam,” *Marine Policy*, vol. 141, 105080, 2022. DOI: [10.1016/j.marpol.2022.105080](https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105080).
- [47] S. T. Le, T. H. Nguyen, “The development of green ports in emerging nations: A case study of Vietnam,” *Sustainability*, vol. 15, no. 18, 13502, 2023. DOI: [10.3390/su151813502](https://doi.org/10.3390/su151813502).
- [48] T. Y. Pham, P. N. Nguyen, “Estimating and controlling ship emissions for green port development: The case of Hai Phong Port, Vietnam,” *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 20, no. 7, pp. 689–700, 2026. DOI: [10.1080/15568318.2026.2613293](https://doi.org/10.1080/15568318.2026.2613293).
- [49] H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford et al., “The ERA5 global reanalysis,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, pp. 1999–2049, 2020. DOI: [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).
- [50] G. Gualtieri, “Reliability of ERA5 reanalysis data for wind resource assessment: A comparison against tall towers,” *Energies*, vol. 14, no. 14, 4169, 2021. DOI: [10.3390/en14144169](https://doi.org/10.3390/en14144169).
- [51] R. Zhai, C. Huang, W. Yang, L. Tang, W. Zhang, “Applicability evaluation of ERA5 wind and wave reanalysis data in the South China Sea,” *Journal of Oceanology and Limnology*, vol. 41, pp. 495–517, 2023. DOI: [10.1007/s00343-022-2047-8](https://doi.org/10.1007/s00343-022-2047-8).