

KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ BIOROCK NHẪM PHỤC HỒI SAN HỒ TẠI VIỆT NAM APPLICATION POSSIBILITY BIOROCK TECHNOLOGY FOR CORAL RESTORATION IN VIETNAM

Nguyễn Văn Nhuận

Viện Khoa học và Công nghệ Khai thác thủy sản, Trường Đại học Nha Trang

Email: nhuannv@ntu.edu.vn

Ngày nhận bài: 23/11/2024; Ngày phản biện thông qua: 14/02/2025; Ngày duyệt đăng: 20/03/2025

TÓM TẮT

Hiện nay, nhiều biện pháp nhằm bảo vệ và phục hồi rạn san hô trước mắt và lâu dài đã và đang được triển khai ở các quốc gia trên thế giới, như: phương pháp nhân giống vô tính; phương pháp nhân giống hữu tính; tăng cường giá thể. Công nghệ Biorock đã được ứng dụng thành công vào phục hồi san hô ở nhiều nước. Đây là phương pháp độc đáo cho phép các rạn san hô và các hệ sinh thái biển khác bao gồm cỏ biển, đầm lầy mặn, rừng ngập mặn và rạn hầu tồn tại và phục hồi sau thiệt hại do biến đổi khí hậu và sự phá hủy vật lý bằng cách tăng đáng kể khả năng sinh sống, phát triển, tồn tại và chống chịu với nhiệt độ cao và ô nhiễm của tất cả các sinh vật biển. Bên cạnh đó, công nghệ Biorock được ứng dụng để xây dựng các công trình hàng hải, chống xói mòn bãi biển, phục hồi đầm lầy nước mặn và phục hồi nghề cá. Công nghệ Biorock là phương pháp bền vững duy nhất để bảo vệ rạn san hô khỏi sự tuyệt chủng hàng loạt do hiện tượng nóng lên toàn cầu.

Bài viết cung cấp những thông tin hữu ích về việc ứng dụng công nghệ Biorock trong việc phục hồi rạn san hô, bảo vệ bờ biển, phát triển đa dạng sinh học biển ở một số quốc gia trên thế giới và khả năng ứng dụng tại Việt Nam

Từ khóa: Công nghệ Biorock, rạn san hô, đa dạng sinh học

ABSTRACT

Currently, many measures to protect and restore coral reefs in the short and long term have been implemented in countries around the world, such as: asexual propagation method; sexual propagation method; substrate enhancement. Biorock technology has been successfully applied to coral restoration in many countries. This is a unique method that allows coral reefs and other marine ecosystems including seagrass, salt marshes, mangroves and oyster reefs to survive and recover from damage caused by climate change and physical destruction by significantly increasing the ability to settle, grow, survive and withstand high temperatures and pollution of all marine organisms. In addition, Biorock technology is applied to construct marine structures, prevent beach erosion, restore salt marshes and restore fisheries. Biorock technology is the only sustainable method to protect coral reefs from mass extinction due to global warming.

The article provides useful information on the application of Biorock technology in coral reef restoration, coastal protection, marine biodiversity development in some countries around the world and the possibility of application in Vietnam

Keywords: Biorock technology, coral reef, marine biodiversity

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Rạn san hô là một trong những hệ sinh thái đa dạng sinh học nhất trên trái đất, các rạn san hô tuy chỉ chiếm chưa tới 1% diện tích đại dương nhưng lại có 25% số sinh vật biển

sống ở đó, chúng thường được ví như những khu rừng nhiệt đới dưới đáy biển [20]. Chúng cũng rất quan trọng đối với nguồn cung cấp thực phẩm và nền kinh tế địa phương. Chỉ riêng du lịch liên quan đến rạn san hô đã tạo ra

khoảng 36 tỷ USD mỗi năm và giá trị kinh tế toàn cầu của các rạn san hô trên tất cả các lĩnh vực đều đạt 10 nghìn tỷ USD mỗi năm [19]. Theo báo cáo của cơ quan Quản lý Khí quyển và Đại dương Quốc gia Hoa Kỳ (NOAA), báo cáo về phân tích toàn cầu lớn nhất từng được thực hiện về sức khỏe của rạn san hô cho thấy nhiệt độ đại dương tăng cao đã dẫn đến mất 14% san hô toàn cầu [24]. Năm 2022, theo báo cáo của các nhà khoa học của Trường đại học Hawaii, khoảng 50% san hô trên thế giới phải đối mặt với sự đe dọa do biến đổi khí hậu vào năm 2035 [25].

Những nguyên nhân chủ yếu dẫn đến sự suy giảm san hô trên thế giới là: biến đổi khí hậu; Axit hoá đại dương; ô nhiễm môi trường; khai thác quá mức; tác động vật lý từ con người; ... Hậu quả của việc các rạn san hô bị suy giảm đó là: mất cân bằng sinh học; tác động xấu đến cộng đồng ven biển; gây thiệt hại về kinh tế; sự mất cân bằng của hệ sinh thái biển; Tuy nhiên, theo NOAA, năm 2020, cho thấy trên toàn thế giới cũng có dấu hiệu phục hồi của san hô ở một số địa điểm, mang lại hy vọng rằng các rạn san hô có thể phục hồi nếu các bước ngay lập tức được thực hiện để hạn chế tình trạng ấm lên của đại dương trong tương lai [24].

Trên thế giới cũng như ở Việt Nam, đã có rất nhiều giải pháp trước mắt và lâu dài được thực hiện nhằm phục hồi rạn san hô. Những phương pháp cơ bản đó là: (1) phục hồi san hô bằng cách cấy ghép các tập đoàn san hô từ một rạn san hô khỏe mạnh hoặc hoạt động trồng san hô lên một rạn san hô bị suy thoái; (2) phục hồi các rạn san hô bằng cách thực hiện các kỹ thuật cải thiện khả năng tạo ấu trùng bám vào giá thể đáy, tức là một số ấu trùng san hô lắng xuống và tự bám vào giá thể an toàn - nơi chúng có thể tiếp tục phát triển thành các polyp san hô; (3) phục hồi san hô bằng cách tạo ra các rạn san hô nhân tạo từ việc đặt các giá thể do con người tạo ra ở dưới đáy biển để thu hút sinh vật biển, bao gồm san hô và tất cả các dạng sinh vật biển khác.

Áp dụng công nghệ Biorock được cho là một trong những giải pháp bền vững để bảo vệ rạn san hô khỏi sự tuyệt chủng hàng loạt do hiện tượng nóng lên toàn cầu. Bằng phương pháp này, san hô phát triển trên rạn Biorock có tỷ lệ sống sót cao hơn từ 1600% đến 5000% sau khi bị tẩy trắng nghiêm trọng so với san hô trên các rạn gần đó [22].

II. NỘI DUNG

1. Lịch sử phương pháp phục hồi san hô bằng công nghệ Biorock.

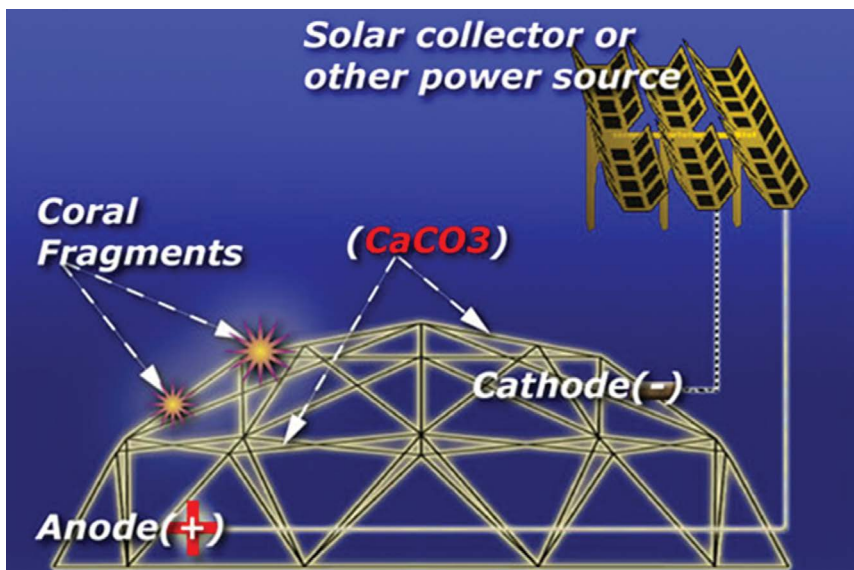
Vào những năm 1970, Giáo sư Wolf Hilbertz, một kiến trúc sư được đào tạo, đã nghiên cứu về vỏ sò và rạn san hô tại Khoa Kiến trúc của Đại học Texas. Ông đã suy nghĩ về cách con người có thể mô phỏng cách san hô phát triển. Sau khi nghiên cứu sơ bộ vào năm 1975, năm 1976, ông phát hiện ra rằng bằng cách truyền dòng điện qua nước muối, theo thời gian, một lớp dày gồm nhiều loại vật liệu khác nhau bao gồm đá vôi sẽ lắng đọng trên cực âm. Các thí nghiệm sau đó cho thấy lớp phủ có thể dày lên với tốc độ 5 cm mỗi năm miễn là dòng điện vẫn chảy. Kế hoạch ban đầu của Hilbertz là sử dụng công nghệ này để phát triển các cấu trúc chi phí thấp trong đại dương. Năm 1982, Hilbertz gặp Thomas J. Goreau cùng phối hợp nghiên cứu chuyên trọng tâm sang việc tạo ra các rạn san hô nhân tạo (hoặc rạn san hô điện). Goreau, người tiếp tục công việc phục hồi rạn san hô và đá sinh học sau khi Hilbertz qua đời vào năm 2007 [22].

Công nghệ Biorock sử dụng dòng điện một chiều điện áp thấp an toàn được áp dụng cho các khung thép để phát triển các cấu trúc đá vôi có mọi kích thước hoặc hình dạng trên biển [14] [15]. Thép được bảo vệ hoàn toàn khỏi bị gỉ và Biorock là vật liệu xây dựng biển duy nhất trở nên chắc chắn hơn theo thời gian, trong khi tất cả các vật liệu khác đều bị hư hỏng. Vật liệu Biorock có khả năng tự phục hồi: các khu vực bị hư hỏng sẽ mọc lại theo chiều hướng ưu tiên. Có thể cung cấp điện bằng các tấm pin mặt trời, cối xay gió, tua bin dòng thủy triều, máy phát sóng hoặc máy biến áp trên cạn. San hô và các

sinh vật biển khác trên Biorock thường phát triển nhanh hơn bình thường từ 2-6 lần. Do đó, công nghệ Biorock có thể được sử dụng để duy trì sự sống cho các rạn san hô khi chúng sắp chết và phục hồi các rạn san hô trong vài năm khi mà quá trình phục hồi tự nhiên diễn ra rất ít hoặc không có [10-12].

Công nghệ Biorock đã được ứng dụng thành công vào nuôi trồng thủy sản và động vật có vỏ cũng như phát triển để chắn sóng đá vôi để bảo vệ các đảo và vùng ven biển khỏi bị xói mòn và mực nước biển dâng cao. Đây là phương pháp độc đáo cho phép các rạn san hô và các hệ sinh thái biển khác bao gồm cỏ biển, đầm lầy mặn, rừng ngập mặn và rạn hầu tồn tại và phục hồi sau thiệt hại do quá nhiều chất dinh dưỡng, biến đổi khí hậu và sự phá hủy vật lý bằng cách tăng đáng kể khả năng định cư,

tăng trưởng, sinh tồn và khả năng chống chịu với các căng thẳng, bao gồm nhiệt độ cao và ô nhiễm. Công nghệ này giúp duy trì sự sống cho các hệ sinh thái khi nếu không chúng sẽ chết vì căng thẳng nghiêm trọng và phục hồi chúng với tốc độ kỷ lục ở những nơi không có sự phục hồi tự nhiên. Khoảng 500 công trình rạn san hô Biorock đã được xây dựng tại khoảng 40 quốc gia trên toàn thế giới, chủ yếu là ở các đảo nhỏ, trong đó có khoảng 400 công trình ở Indonesia. Công nghệ Biorock có thể được cung cấp năng lượng từ mặt trời, gió, sóng và dòng hải lưu, được tạo ra trực tiếp tại địa điểm thực hiện. Công nghệ Biorock mang lại nhiều lợi ích hơn, kết quả nhanh hơn và chi phí thấp hơn bất kỳ giải pháp thay thế nào khác để giải quyết nhiều vấn đề quan trọng về quản lý biển [22].



Hình 1: Mô hình công nghệ Biorock tại Thái Lan [21]

2. Một số kết quả do công nghệ Biorock mang lại:

2.1. Phục hồi rạn san hô và bảo vệ chống lại sự nóng lên toàn cầu

Rạn san hô Biorock biến những vùng đất cần cỗi chết và đang chết thành những rạn san hô nguyên sơ đầy cá trong vài năm, ngay cả khi không thể phục hồi tự nhiên. Tất cả các phương pháp phục hồi rạn san hô khác chỉ hiệu quả trong điều kiện chất lượng nước hoàn hảo

(nhưng Biorock cho san hô phát triển nhanh hơn 2-10 lần), nhưng tất cả đều thất bại khi nước quá nóng, bùn hoặc ô nhiễm. San hô Biorock vẫn phát triển khi những san hô khác chết và rạn Biorock có giá thành rẻ hơn các phương pháp khác. Công nghệ Biorock đầy nhanh đáng kể quá trình định cư, phát triển, chữa lành, sinh tồn và chống chịu với các áp lực môi trường như nhiệt độ cao, trầm tích và ô nhiễm của san hô. Tất cả các sinh vật biển khác

được kiểm tra cũng được hưởng lợi. Những kết quả tuyệt vời này xảy ra vì quy trình Biorock tạo ra các điều kiện sinh lý lý tưởng mà mọi dạng sống đều sử dụng để tạo ra năng lượng sinh hóa. Điều này cũng có ý nghĩa to lớn đối với y học và nông nghiệp [22].

Công nghệ Biorock là phương pháp bền vững duy nhất để bảo vệ rạn san hô khỏi sự tuyệt chủng hàng loạt do hiện tượng nóng lên toàn cầu. Mọi vùng rạn san hô trên thế giới đều đã phải chịu đựng tình trạng san hô chết và tẩy trắng nghiêm trọng do nhiệt độ cao, và bất kỳ sự nóng lên nào nữa cũng sẽ phá hủy số san hô ít ỏi còn lại. San hô phát triển trên rạn Biorock có tỷ lệ sống sót cao hơn từ 1600% đến 5000% sau khi bị tẩy trắng nghiêm trọng so với san hô trên các rạn gần đó. Không có phương pháp nào khác được biết đến để bảo vệ san hô khỏi sự nóng lên toàn cầu, tình trạng này đang trở nên tồi tệ hơn khi các chính phủ không thể giảm khí nhà kính trong khí quyển [22].

Năm 2009, Lucy Wells và cộng sự đã đánh giá ảnh hưởng của các cơn bão mạnh đối với các dự án phục hồi rạn san hô bằng công nghệ Biorock tại Grand Turk, quần đảo Turks và Caicos [16]. Các rạn san hô nhân tạo thường không được khuyến khích xây dựng ở vùng nước nông do lo ngại thiệt hại từ bão đối với cấu trúc và môi trường sống xung quanh. Các dự án phục hồi rạn san hô Biorock đã được triển khai tại vùng nước sâu khoảng 5m ở Grand Turk, tại khu vực Oasis (tháng 10 năm 2006) và tại bãi biển Governor's Beach (tháng 11 năm 2007). Các mô-đun thép hình bán trụ dài 6m đã được sử dụng, gồm bốn mô-đun tại Oasis và sáu mô-đun tại Governor's Beach. Mỗi dự án có hơn 1.200 san hô được cấy ghép từ các khu vực bị tổn thương do lắng đọng trầm tích cao, và được giám sát thường xuyên về sự phát triển, tỷ lệ tử vong của san hô và quần thể cá. San hô cho thấy sự phát triển ngay lập tức trên các dây thép được sử dụng để gắn chúng. Sự phát triển được đo lường từ các bức ảnh bằng phần mềm và tốc độ phát triển nhanh hơn tại Governor's Beach. Sau các cơn bão Hanna và Ike (tháng 9 năm 2008), cấu trúc tại Governor's Beach vẫn đứng

vững hoàn toàn vì sóng đi qua mà không gây thiệt hại đáng kể, trong khi cấu trúc tại Oasis, được buộc dây thay vì hàn, có một mô-đun bị sập (sau đó đã được thay thế bằng một cấu trúc mới được hàn). Bão Ike là cơn bão mạnh nhất trong lịch sử tấn công Grand Turk. Hầu hết các dây cáp đã được thay thế sau các cơn bão do thiệt hại từ mảnh vỡ và tác động của sóng lớn. Các dự án này mất khoảng một phần ba số san hô do bão. Phần lớn những san hô bị mất đã chỉ mới được buộc vài ngày trước đó và chưa kịp bám chắc. Tuy nhiên, các dự án này đã tái tạo san hô và quần thể cá tại các khu vực cát trống hoặc đá trơ, và hiện nay đã trở thành điểm thu hút đối với khách lặn ngắm. Tỷ lệ sống sót cao của san hô và thiệt hại cấu trúc thấp sau các cơn bão cho thấy rằng phục hồi rạn san hô bằng Biorock có thể hiệu quả tại các khu vực bị ảnh hưởng bởi bão

Năm 2017, công nghệ Biorock được ứng dụng trong quá trình cấy ghép san hô tại công viên du lịch sinh thái biển (Taman Wisata Alam Laut-TWAL) đảo Rubiah, Sabang, Indonesia. Nghiên cứu đã sử dụng các vật liệu sau: thanh sắt, lưới titan, nguồn điện, dây, dây buộc cáp, máy kiểm tra chất lượng nước, đồ dùng văn phòng phẩm dưới nước, thiết bị lặn và các mảnh san hô. Thí nghiệm thực địa về biorock được áp dụng ở hai độ sâu: 3 m và 8 m. Tổng cộng có 3 cấu trúc biorock và 1 đối chứng (không phải biorock) được áp dụng ở mỗi độ sâu. Mỗi lần cấy ghép chứa 10 mảnh *Acropora* và *Pocillopora*. Các thông số quan sát được bao gồm sự tăng trưởng tuyệt đối, tốc độ tăng trưởng của san hô, tỷ lệ sống sót và chất lượng nước, tất cả các thông số đó đều được quan sát hàng tháng. Kết quả cho thấy tỷ lệ tăng trưởng tuyệt đối của *Acropora* và *Pocillopora* là 4:1 (biorock : đối chứng), trong khi tốc độ tăng trưởng của cả hai loài san hô bằng biorock cao hơn so với san hô đối chứng [17].

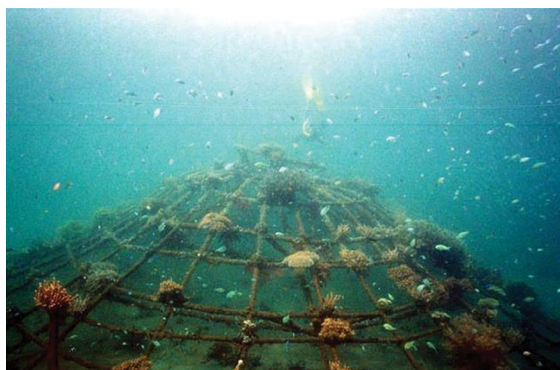
Công viên quốc gia Karimunjawa là khu bảo tồn đa dạng sinh học biển. Có nhiều kỹ thuật khác nhau được sử dụng để phục hồi rạn san hô, một trong số đó là công nghệ Biorock. S.B Siahaan và P. W Purnomo đã thực hiện

nghiên cứu này trên 2 trạm, mục đích của nghiên cứu này là biết được sự sống sót và phát triển của san hô cấy ghép trong biorock và biết được sự đa dạng của các loài cá xung quanh biorock. Phương pháp được sử dụng trong nghiên cứu này là phương pháp thực nghiệm thực địa, đo sự phát triển của san hô trong nước trong khoảng thời gian 2 tháng với khoảng thời gian 1 tháng bằng thước cặp. Để đánh giá sự khác biệt về sự phát triển và khả năng sống sót của từng loài được cấy ghép bằng kiểm định t độc lập. Loài rạn san hô có tỷ lệ sống sót cao nhất là *Acropora nasuta*. Dựa trên kết quả của kiểm định t về sự khác biệt về đời sống rạn san hô tại trạm 1 và 2 cho thấy không có sự khác biệt đáng kể giữa chúng ($\alpha > 0,05$). Các loài cá được tìm thấy tại các địa điểm nghiên cứu là *Zanclus*, *Selaroides* và *Siganus*. Ngoài ra còn tìm thấy loài nhím biển là *Diadema* [18].

Năm 2023, BS Nugroho và cộng sự đã công bố kết quả nghiên cứu sự phát triển và tốc độ tăng trưởng của san hô nhánh *Acropora* được cấy ghép bằng phương pháp Biorock tại vùng biển Karang Jeruk, huyện Tegal, Indonesia. Phương pháp được sử dụng trong nghiên cứu này là phương pháp thử nghiệm và quan sát. Sau đó, kết quả được phân tích thông qua kiểm định t-Students bằng SPSS phiên bản 16. Dựa trên kết quả nghiên cứu, sự tăng trưởng tuyệt đối của san hô *Acropora* tại trạm biorock có ý nghĩa hơn sự tăng trưởng tuyệt đối tại trạm đối chứng (không sử dụng biorock), cả về chiều cao và đường kính. Kết quả cho thấy, sự tăng

trưởng chiều cao tuyệt đối tại trạm biorock là $44,9750 \pm 15,3901$ mm, trong khi tại trạm đối chứng là $2,1675 \pm 0,6726$ mm, và sự tăng trưởng đường kính tuyệt đối tại trạm biorock là $0,8350 \pm 0,2177$ mm trong khi tại trạm đối chứng là $0,2025 \pm 0,0835$ mm. Tốc độ tăng trưởng của san hô *Acropora* tại trạm biorock nhanh hơn so với tốc độ tăng trưởng tại trạm đối chứng cả về chiều cao và đường kính [9].

Mikhael Fredrik Tefa và cộng sự đã nghiên cứu về tình trạng định cư của các nhóm san hô trên cấu trúc Biorock [23]. Nghiên cứu này được thực hiện tại khu vực trên đảo Sepa, quần đảo Seribu, Indonesia vào tháng 2 năm 2018. Mục tiêu của nghiên cứu là xác định nhóm san hô có khả năng định cư cao nhất trên cấu trúc Biorock, cùng với các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng sống sót của san hô định cư. Phương pháp được sử dụng trong nghiên cứu là khảo sát và quan sát sự định cư của san hô. Các thông số được quan sát bao gồm kích thước, số lượng và chi của san hô định cư (dữ liệu chính), trong khi số lượng và họ của cá rạn san hô cùng các sinh vật khác được sử dụng làm dữ liệu hỗ trợ. Kết quả nghiên cứu cho thấy, nhóm san hô có khả năng định cư cao nhất trên cấu trúc Biorock thuộc chi Pocillopora. Tại khu vực Biorock trên đảo Sepa, đã ghi nhận 216 cá thể san hô thuộc 13 chi, gồm: *Acropora*, *Favia*, *Favites*, *Fungia*, *Hydnophora*, *Montipora*, *Platygyra*, *Pocillopora*, *Porites*, *Psammocora*, *Scolymia*, *Symphyllia*, và *Tubastrea*.



Hình 2: Hình ảnh phục hồi san hô bằng công nghệ Biorock tại Bali, Indonesia [22]



Hình 3. Phục hồi san hô bằng công nghệ Biorock ở Koh, Thái Lan [22]

2.2. Xây dựng các công trình hàng hải

Công nghệ Biorock sử dụng các vật liệu dẫn điện như thép thông thường, vật liệu xây dựng rẻ nhất và được sử dụng rộng rãi nhất, để xây dựng các công trình có bất kỳ kích thước hình dạng nào trên biển. Với công nghệ Biorock, thép được bảo vệ hoàn toàn khỏi sự ăn mòn, thép không bị gỉ vì gỉ đỏ nhanh chóng chuyển sang màu xám và đen và được chuyển đổi trở lại thành sắt. Sau đó, cấu trúc chuyển sang màu trắng khi các khoáng chất đá vôi hòa tan tự nhiên trong nước biển phát triển trên bề mặt, tạo ra lớp phủ bằng đá cứng liên tục phát triển. Cấu trúc này phát triển chậm (dưới 1-2 cm mỗi năm), vật liệu này cứng hơn khoảng ba lần so với bê tông làm từ xi măng thông thường. Công nghệ Biorock tạo ra vật liệu xây dựng hàng hải trở nên cứng hơn và bền hơn theo thời gian. Đây cũng là vật liệu xây dựng

hàng hải duy nhất có khả năng tự phục hồi: nếu lớp khoáng chất bị vỡ, phần bị hư hỏng sẽ được bồi tự lại như trước. Tất cả các vật liệu xây dựng hàng hải khác đều bị hư hỏng theo thời gian và cuối cùng cần phải loại bỏ và thay thế. Cấu trúc Biorock tiết kiệm tiền vì không bao giờ cần thay thế và rẻ hơn nhiều lần so với cấu trúc bê tông hoặc đá có cùng kích thước. Công nghệ Biorock sửa chữa các cấu trúc bê tông cốt thép bị rỉ sét, nứt và vỡ vụn như bến tàu, cầu tàu và tường chắn biển. Quá trình rỉ sét của thanh cốt thép bên trong được ngăn chặn, các vết nứt và lỗ trên bê tông được lấp đầy bằng đá vôi cứng, từ trong ra ngoài. Công nghệ Biorock sửa chữa từ bên trong và ngăn chặn vĩnh viễn tình trạng rỉ sét của các cọc thép và vách ngăn bên dưới đường thủy triều cao mà chúng ta khó phát hiện.



Hình 4: Vật liệu phát triển trên thanh sắt sau hai năm sử dụng công nghệ Biorock [22]

2.3. Chống xói mòn bãi biển

Các rạn san hô bảo vệ bờ biển bằng công

nghệ Biorock tự nhiên, đồng thời tái tạo các bãi biển bị xói mòn nghiêm trọng nhanh hơn

và rẻ hơn bất kỳ phương pháp nào khác. Phần lớn các bãi biển trên toàn thế giới đang biến mất do mực nước biển dâng cao toàn cầu và năng lượng sóng bão tăng do hiện tượng nóng lên toàn cầu. Các rạn san hô bằng công nghệ Biorock được xem là có kết quả tốt nhất, rẻ nhất và nhanh nhất khi phục hồi các bãi biển



Hình 5: Bãi biển ở Ilhuru, Maldives, trước đây. Xói mòn nghiêm trọng, cây đổ xuống biển [22]

Các bãi biển bị xói mòn nghiêm trọng trên các đảo thấp ở Indonesia đã được phục hồi trong vài tháng (được cho là kỷ lục) bằng phương pháp bảo vệ bờ biển sáng tạo - công nghệ rạn san hô Biorock. Các rạn san hô Biorock bảo vệ bờ là các cấu trúc đá vôi phát triển mạnh mẽ hơn theo thời gian và tự phục hồi, rẻ hơn nhiều so với tường chắn bằng bê tông hoặc đá và đê chắn sóng, đồng thời hiệu quả hơn nhiều trong việc bảo vệ bờ biển và phát triển bãi biển. Các rạn san hô Biorock là các cấu trúc thẩm thấu, có lỗ rỗng, có thể phát triển và tự phục hồi với bất kỳ kích thước hay hình dạng nào, làm tiêu tán năng lượng sóng thông qua khúc xạ, nhiễu xạ và sự tiêu hao ma sát bên trong. Chúng không gây phản xạ sóng như các tường biển hoặc đê chắn sóng cứng, vốn thường gây xói mòn cát phía trước và bên dưới, dẫn đến sự sụp đổ của các cấu trúc này. Các rạn san hô Biorock thúc đẩy sự định cư, phát triển, sống sót và khả năng chống chịu với áp lực môi trường của mọi dạng sinh vật biển, phục hồi rạn san hô, cỏ biển, sản xuất cát sinh học và môi trường sống của các loài cá. Các rạn san hô Biorock có thể tái tạo bãi biển và đảo bị xói mòn nhanh hơn tốc độ mực nước biển dâng [13].

này. Ví dụ, ở Maldives, một trong những quốc gia có địa hình thấp nhất thế giới, một rạn san hô bằng công nghệ Biorock đã được xây dựng trước một bãi biển đã biến mất. Trong 2-3 năm, một bãi biển mới rộng khoảng 15 mét đã được xuất hiện phía sau rạn Biorock và vẫn ổn định trong hơn 15 năm.



Hình 6: Bãi biển mới mọc sau rạn san hô Biorock (đường màu tối ở phía trước bãi biển) tại Ilhuru, Maldives [22]

2.4. Thích ứng với mực nước biển dâng

Các công trình bảo vệ bờ biển Biorock là giải pháp tiết kiệm chi phí nhất để bảo vệ các bờ biển và đảo trũng thấp khỏi mực nước biển dâng toàn cầu, hiện là 3-4 mm/năm và dự kiến sẽ tăng mạnh trong tương lai. Chi phí bảo vệ dân số và cơ sở hạ tầng hiện có khỏi mực nước biển dâng, cùng với chi phí bỏ hoang và di dời hàng loạt khỏi các khu vực ven biển có thể sẽ là khoản chi lớn nhất trong tương lai của biến đổi khí hậu toàn cầu. Các công trình Biorock có thể phát triển lên cao với tốc độ khoảng 20 mm/năm và nhanh hơn nhiều khi tính đến sự phát triển của san hô và hào trên đó, do đó, chúng là cơ hội duy nhất để phát triển công trình bảo vệ bờ biển có thể theo kịp mực nước biển dâng. Các kè biển bằng bê tông hoặc đá thông thường có giá khoảng 15 triệu đô la cho mỗi km, các rạn san hô bảo vệ bờ biển Biorock sẽ bền hơn theo thời gian, tự phục hồi, có chi phí thấp hơn nhiều so với các công trình thông thường và mang lại nhiều lợi ích hơn [22].

2.5. Phục hồi đầm lầy nước mặn

Công nghệ Biorock thúc đẩy đáng kể sự phát triển và nảy chồi của cỏ tại đầm lầy nước mặn, cho phép cỏ sống sót trong nước sâu hơn

giới hạn bình thường của nó. Do đó, đầm lầy nước mặn bị ô nhiễm và tràn dầu có thể nhanh chóng được tái sinh. Quan trọng hơn nữa, công nghệ Biorock cho phép đầm lầy nước mặn mở rộng ra phía biển, sâu hơn mức bình thường, bổ sung thêm đất đai nơi bờ biển đang biến mất. Đầm lầy nước mặn cung cấp các dịch vụ bảo



Hình 7: Cỏ biển mọc cùng với Biorock trên đá trơ trụi ở Địa Trung Hải, nơi mà thông thường chúng không thể sống sót [22]

2.6. Phục hồi nghề cá

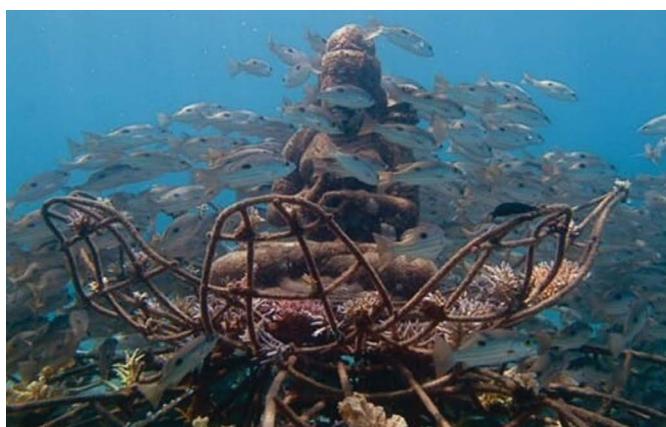
Các phương pháp Biorock tạo ra môi trường sống lý tưởng để phục hồi nguồn lợi thủy sản bị suy giảm, đặc biệt là trên cát, bùn hoặc đá trần cỗi, nơi không có rạn san hô hoặc cỏ biển để cung cấp môi trường sống cho cá con ẩn náu. Quần thể cá, hàu, trai, tôm hùm, cua, ... tăng nhanh xung quanh các khu rạn bằng công nghệ Biorock, tạo ra các đàn cá khổng lồ. Ngư dân Indonesia báo cáo về sự gia tăng số lượng,

vệ bờ biển quan trọng và môi trường sống thiết yếu cho cá con, động vật có vỏ và chim, nhưng đầm lầy nước mặn trên toàn thế giới đang biến mất nhanh chóng. Công nghệ Biorock là hy vọng duy nhất để phục hồi chúng, cùng với các rạn hàu,... lấy lại đất đai đã bị biển xâm chiếm [22].



Hình 8: Rễ cỏ mọc dày đặc [22]

kích thước và tính đa dạng của cá ở các khu vực gần các dự án Biorock. Mỗi loài cần môi trường sống có kích thước và hình dạng khác nhau để bám vào hoặc ẩn náu. Môi trường sống Biorock có thể được tạo ra theo hình dạng mà một số loài ưa thích. Các rạn san hô Biorock có thể được thả lại bằng cá con được thu thập ở vùng biển khơi, biến tỷ lệ tử vong >95% thành tỷ lệ sống sót >95% và là cách nhanh nhất có thể để phục hồi nghề cá ven biển [22].



Hình: Quần thể cá dày đặc xung quanh cấu trúc Biorock tại dự án Karang Lestari, Pemuteran, Bali, Indonesia [22].

3. Thực trạng phục hồi san hô ở Việt Nam

San hô ở Việt Nam rất đa dạng, với khoảng 400 loài san hô cứng thuộc 79 giống, được

phân bố rộng khắp ở các vùng biển từ Bắc vào Nam với diện tích khoảng hơn 1100km², diện tích san hô lớn nhất và tính đa dạng sinh

học lớn nhất được ghi nhận tại vùng biển miền Trung và miền Nam [20]. Theo kết quả khảo sát của hiện trạng san hô ở vùng ven bờ Việt Nam (với 200 điểm) trong giai đoạn 2001-2004 do Viện Hải Dương Học thực hiện, cho thấy độ phủ san hô trên các rạn không ở trạng thái tốt. Phân theo thang độ phủ của English và cs (1997), chỉ khoảng 01% số rạn san hô có độ phủ cao, trong khi số rạn san hô có độ phủ thấp chiếm tới trên 31%. Số rạn san hô có độ phủ trung bình và khá lần lượt là 41% và 26% [2].

Từ những năm 2002, đã có một số đề tài nghiên cứu về công tác đánh giá hiện trạng hệ sinh thái rạn san hô, nghiên cứu các giải pháp phục hồi san hô ở Việt Nam. Các công trình nghiên cứu có thể kể đến như: “Khảo sát bổ sung và đề xuất các giải pháp quản lý, bảo vệ nguồn lợi rạn san hô tỉnh Ninh Thuận” của Võ Sĩ Tuấn (2003) [3]; “Phục hồi và quản lý rạn san hô ở vùng biển Hòn Ngang (Nam vịnh Quy Nhơn, Bình Định)” của Võ Sĩ Tuấn (2004) [5]; “Nghiên cứu thành phần loài, cấu trúc quần xã và hiện trạng rạn san hô, nhằm đề xuất giải pháp quản lý đa dạng sinh học ở khu bảo tồn biển Hòn Mun, Vịnh Nha Trang” của Võ Sĩ Tuấn (2004) [4]; “Điều tra, đánh giá thực trạng hệ sinh thái rạn san hô vùng biển ven bờ tỉnh Phú Yên và đề xuất giải pháp bảo tồn dựa vào cộng đồng” của Võ Sĩ Tuấn (2009) [6]; “Hiện trạng, xu thế và dự báo biến động đa dạng sinh học san hô vùng ven bờ từ Đà Nẵng đến Bình Thuận” của Nguyễn Văn Long và cộng sự (2010) [1]; “Nghiên cứu ứng dụng công nghệ phục hồi san hô cứng ở một số khu bảo tồn biển trọng điểm” được Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn phê duyệt và giao cho PGS. TS Võ Sĩ Tuấn - Viện Hải dương học chủ trì thực hiện trong thời gian từ năm 2011 đến 2013 với mục tiêu là xây dựng được mô hình phục hồi rạn san hô cứng tại các khu bảo tồn biển Cù Lao Chàm và vịnh Nha Trang. Về mặt kỹ thuật, san hô cứng đã được phục hồi dựa trên những giá thể được xây dựng bao gồm các khung bê tông hoặc các khung thép dùng để buộc các tập đoàn san hô. Kết quả phục hồi san hô ở một số nơi là: 5.550

m² ở khu bảo tồn biển vịnh Nha Trang và 5.200 m² ở Cù Lao Chàm. Thử nghiệm phục hồi cho phép lựa chọn các loài thích hợp tại từng khu vực dựa trên nguồn cho và điều kiện sinh thái, tỷ lệ sống của các loài hầu hết đều trên 60%. Nguyên nhân gây chết cũng đã được xác định, chủ yếu là do địch hại và tác động cơ học do hoạt động của con người. Trong các san hô phục hồi, các loài thuộc giống *Acropora* có tốc độ tăng trưởng khá nhanh. Ở Nha Trang, tổng độ phủ của san hô sau quá trình phục hồi và quản lý tăng đáng kể đối với đông bắc Hòn Mun (đạt giá trị 37,5%, tăng 1,3 lần so với năm 2011). Đối với Cù Lao Chàm, tại Bãi Hương độ phủ san hô cứng tăng 4% và san hô mềm tăng 3%, đưa tổng độ phủ tăng từ 11 lên 18%; còn ở khu vực Bãi Bắc, độ phủ san hô san hô cứng tăng 4% và san hô mềm tăng 7%, tổng độ phủ tăng từ 8 lên 19% sau hai năm phục hồi [7]. Năm 2015 -2018, Viện Hải dương học cũng triển khai đề tài “Nghiên cứu đề xuất một số khu vực có thể phục hồi và tái tạo hệ sinh thái rạn san hô phục vụ du lịch sinh thái biển ở Khánh Hòa”, vịnh Nha Trang được chọn 02 địa điểm là Tây Nam Hòn Tre và Đông Nam Hòn Tằm. Tổng số tập đoàn được phục hồi là 4.213 tập đoàn san hô thuộc các loài *Acropora fomosa*, *Acropora hyacinthus*, *Acropora nobilis*, *Acropora florida*, *Porites sp dạng cành* và *Pachyseris speciosa dạng phiến*, *Montipora*. Các tập đoàn san hô được cố định trên 60 giá thể bồn hình trụ có bọc lưới có kích thước 60x60x40cm và 30 giá thể là khung sắt hình lục giác với đường kính đáy là 2m. Diện tích khô phục mỗi địa điểm ước khoảng 1.500m², tổng diện tích phục hồi ở cả hai khu vực là 3.000m². Tỷ lệ sống của san hô phục hồi đến 4/2018 ở khu vực Hòn Tằm là 32,27% trên khu sắt và 28,80% trên khung bê tông; khu vực Vinpearl là 19,06% trên khung sắt và 3,09% trên bồn bê tông [8].

Có thể thấy rằng phần lớn các công trình nghiên cứu phục hồi san hô ở Việt Nam chủ yếu tập trung sử dụng các phương pháp cơ bản đó là tách các tập đoàn san hô từ các rạn san hô rời ghép (treo, buộc) trên các giá thể. Các tập đoàn san hô sẽ tự phát triển.

4. Những điều kiện thuận lợi để Việt Nam ứng dụng công nghệ Biorock trong việc phục hồi san hô và đa dạng sinh học biển.

Vị trí địa lý thuận lợi: Việt Nam có bờ biển dài hơn 3.200 km với nhiều khu vực rạn san hô phong phú, đặc biệt là ở các đảo như Cù Lao Chàm, Phú Quốc, Hòn Mun, và Cát Bà. Các khu vực này rất phù hợp để ứng dụng công nghệ Biorock trong việc phục hồi và bảo vệ rạn san hô.

Sự đa dạng sinh học cao: Việt Nam có hệ sinh thái biển phong phú với nhiều loài san hô, cá và sinh vật biển khác. Công nghệ Biorock có thể giúp tái tạo các rạn san hô và hỗ trợ sự phát triển của các hệ sinh thái biển quan trọng, góp phần duy trì đa dạng sinh học.

Được sự hỗ trợ của các tổ chức quốc tế: Việt Nam đã nhận được sự hỗ trợ từ các tổ chức quốc tế trong các dự án bảo tồn biển và phục hồi san hô, giúp dễ dàng triển khai công nghệ Biorock, đặc biệt trong việc tìm kiếm nguồn tài trợ và chuyển giao công nghệ.

Nhu cầu bảo tồn biển và thích ứng với biến đổi khí hậu: Với sự gia tăng của hiện tượng biến đổi khí hậu và các cơn bão mạnh, nhu cầu bảo vệ rạn san hô và các hệ sinh thái biển càng trở nên cấp thiết. Công nghệ Biorock không chỉ giúp phục hồi san hô mà còn tăng cường khả năng chống chịu của các rạn san hô trước các tác động của biến đổi khí hậu và thiên tai.

Khả năng tự phục hồi và bền vững: Công nghệ Biorock có khả năng tự sửa chữa và phát triển theo thời gian, giúp giảm chi phí bảo trì và bảo vệ bờ biển lâu dài. Điều này rất phù hợp với các khu vực có điều kiện kinh tế còn khó khăn hoặc thiếu nguồn lực cho các dự án dài hạn.

Tính hiệu quả trong việc phục hồi san hô: Công nghệ Biorock đã chứng minh hiệu quả trong việc tăng trưởng và phục hồi san hô nhanh chóng. Điều này là một lợi thế lớn cho việc triển khai tại các vùng biển bị suy thoái và cần sự can thiệp nhanh chóng.

Khả năng thu hút du lịch sinh thái: Các rạn san hô phục hồi bằng công nghệ Biorock có thể trở thành điểm thu hút khách du lịch sinh

thái, tạo ra cơ hội sinh kế cho các cộng đồng địa phương thông qua du lịch bền vững.

5. Những khó khăn trong việc ứng dụng công nghệ Biorock tại Việt Nam

Mặc dù công nghệ Biorock có nhiều tiềm năng phát triển tại Việt Nam, nhưng cũng tồn tại một số khó khăn và thách thức cần phải giải quyết để công nghệ này được áp dụng rộng rãi và hiệu quả:

Chi phí đầu tư ban đầu cao: Việc triển khai công nghệ Biorock đòi hỏi một khoản đầu tư ban đầu khá lớn cho việc thiết lập hệ thống điện và các cấu trúc kim loại. Chi phí này có thể là một rào cản đối với các dự án quy mô lớn hoặc đối với các khu vực thiếu nguồn lực tài chính.

Hạ tầng kỹ thuật chưa đầy đủ: Công nghệ Biorock cần một hệ thống điện ổn định và hạ tầng hỗ trợ trong việc thi công và duy trì các cấu trúc. Tại nhiều khu vực ở Việt Nam, đặc biệt là những đảo xa, hạ tầng chưa đủ mạnh mẽ để triển khai công nghệ này một cách hiệu quả.

Đặc điểm địa lý và khí hậu: Một số khu vực bờ biển của Việt Nam có môi trường tự nhiên khắc nghiệt với sóng lớn, thủy triều mạnh và sự thay đổi nhiệt độ đột ngột, điều này có thể ảnh hưởng đến hiệu quả của công nghệ Biorock, đòi hỏi phải có các điều chỉnh hoặc thiết kế đặc biệt.

Thiếu kiến thức và nhận thức về công nghệ: Mặc dù công nghệ Biorock đã được chứng minh hiệu quả ở nhiều quốc gia, nhưng tại Việt Nam, nhận thức về công nghệ này còn hạn chế, đặc biệt ở các cộng đồng ven biển. Việc thiếu hiểu biết và sự ủng hộ từ cộng đồng và các cơ quan quản lý có thể làm chậm tiến độ triển khai.

Vấn đề bảo trì và duy trì: Mặc dù công nghệ Biorock có khả năng tự sửa chữa, nhưng các cấu trúc kim loại vẫn cần được bảo trì định kỳ để tránh hư hỏng do tác động của môi trường biển, chẳng hạn như ăn mòn. Việc duy trì các cấu trúc này có thể gặp khó khăn ở các khu vực thiếu nhân lực kỹ thuật chuyên môn và nguồn lực tài chính.

Cạnh tranh với các phương pháp khác: Các phương pháp phục hồi san hô khác như

phương pháp nhân giống vô tính, sử dụng giá thể nhân tạo hay bảo vệ rạn san hô tự nhiên có thể cạnh tranh với công nghệ Biorock về chi phí và hiệu quả. Điều này có thể làm giảm sự ưu tiên cho công nghệ Biorock trong các dự án bảo tồn và phục hồi.

Thiếu chính sách và hỗ trợ từ chính phủ: Mặc dù Việt Nam đã có những chính sách bảo vệ môi trường biển và phát triển bền vững, nhưng chính sách cụ thể hỗ trợ việc triển khai công nghệ Biorock tại các địa phương còn hạn chế. Việc thiếu sự hỗ trợ pháp lý và tài chính từ chính phủ có thể làm giảm động lực cho các tổ chức và cộng đồng địa phương trong việc áp dụng công nghệ này.

Ảnh hưởng của biến đổi khí hậu: Biến đổi khí hậu và các hiện tượng cực đoan như

bão, lũ, ... có thể gây thiệt hại cho các công trình phục hồi san hô, bao gồm cả các hệ thống Biorock. Điều này đòi hỏi phải có các giải pháp linh hoạt và thích ứng để đảm bảo sự bền vững của các dự án.

Từ những phân tích ở trên cho thấy, mặc dù có nhiều thách thức, việc nghiên cứu thử nghiệm, ứng dụng công nghệ Biorock nhằm phục hồi san hô ở Việt Nam là cần thiết, mở ra một hướng nghiên cứu mới, một phương pháp mới trong nghiên cứu nhằm đa dạng hoá các phương pháp phục hồi san hô ở Việt Nam. Công nghệ Biorock có thể phát triển và đóng góp tích cực vào công cuộc bảo vệ và phục hồi các hệ sinh thái biển ở Việt Nam do đang đứng trước nguy cơ bị suy thoái cao bởi các tác nhân khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

1. Nguyễn Văn Long và cs (2010), “Hiện trạng, xu thế và dự báo biến động đa dạng sinh học san hô vùng ven bờ từ Đà Nẵng đến Bình Thuận”, Hội nghị Khoa học kỷ niệm 35 năm Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam – Hà Nội 10/2010. Trang 285 – 292.
2. Võ Sĩ Tuấn, Nguyễn Huy Yết và Nguyễn Văn Long (2005), “Hệ sinh thái san hô ở Việt Nam”, Tp Hồ Chí Minh, NXB Khoa học và Kỹ thuật.
3. Võ Sĩ Tuấn và cs (2003), “Khảo sát bổ sung và đề xuất các giải pháp quản lý, bảo vệ nguồn lợi rạn san hô tỉnh Ninh Thuận”, Báo cáo tổng kết đề tài, Viện Hải Dương học.
4. Võ Sĩ Tuấn và cs (2004), “Nghiên cứu thành phần loài, cấu trúc quần xã và hiện trạng rạn san hô, nhằm đề xuất giải pháp quản lý đa dạng sinh học ở khu bảo tồn biển Hòn Mun, Vịnh Nha Trang”, Tuyển tập Báo cáo khoa học, hội nghị khoa học “Biển Đông 2002”. Nhà xuất bản Nông Nghiệp, 2004. Trang 649 – 690.
5. Võ Sĩ Tuấn và cs (2004), “Phục hồi và quản lý rạn san hô ở vùng biển Hòn Ngang (Nam vịnh Quy Nhơn, Bình Định)”, Báo cáo chuyên đề thuộc đề tài KC 09 07, Viện Hải Dương học.
6. Võ Sĩ Tuấn và cs (2009), “Điều tra, đánh giá thực trạng hệ sinh thái rạn san hô vùng biển ven bờ tỉnh Phú Yên và đề xuất giải pháp bảo tồn dựa vào cộng đồng”, Báo cáo tổng kết đề tài, Viện Hải Dương học.
7. Võ Sĩ Tuấn và cs (2013), “Nghiên cứu ứng dụng công nghệ phục hồi san hô cứng ở một số khu bảo tồn biển trọng điểm”, Báo cáo tổng kết đề tài, Viện Hải Dương học.
8. Võ Sĩ Tuấn và cs (2018), “Nghiên cứu đề xuất một số khu vực có thể phục hồi và tái tạo hệ sinh thái rạn san hô phục vụ du lịch sinh thái biển ở Khánh Hòa”, Báo cáo tổng kết đề tài. Viện Hải Dương học.

Tiếng Anh

9. BS Nugroho, N Zuhry, K Kusnandar, SW Simanjuntak, HK Alamsyah và PT Karissa (2023), “Biorock® Technology Application To The Growth And AcroporaCorals Growth Rate”, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1147 (2023) 012003.
10. Goreau T. J. & Hilbertz W. H. (2005), “Marine ecosystem restoration: costs and benefits for coral reefs, World Resource Review, 17: 375-409”.

11. Goreau T. J. & Hilbertz W. H. (2007), “Reef Restroration as Fisheries Management tool, in Fisheries and Aquaculture, Ed. Patrick Safran, in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford ,UK”.
12. Goreau T. J. & Hilbertz W. H. (2008), “Bottom-up community-based coral reef and fisheries restoration in Indonesia, Panama, and Palau, p. 143-159 in R. France (Ed.) Handbook Of Regenerative Landscape Design, CRC Press, Boca Raton”.
13. Goreau T. J. & Paulus P (2017), “Biorock Electric Reefs Grow Back Severely Eroded Beaches in Months”, *Journal of Marine Science and Engineering*. 2017,5,48, 1-21.
14. Hilbertz W. H. (1979), “Electrodeposition of Minerals in Sea Water: Experiments and Applications, IEEE Journal on Oceanic Engineering”, Vol. OE-4, No.3, 19p.
15. Hilbertz W. H. & Goreau T. J. (1998), “Third generation artificial reefs, Ocean Realm”, Summer Issue, 45-48.
16. Lucy Wells, Fernando Perez và Marlon Hibbert. et all (2010), “Effect of severe hurricanes on Biorock Coral Reef Restoration Projects in Grand Turk, Turks and Caicos Islands”, *Article in Revista de Biologia Tropical* 58, pp. 141-149.
17. Munandar, Mahendra, Muhammad Rizal, Chair Rani và Ahmad Faizal (2018), “The escalation of coral growth by biorock technology applied in Sabang marine ecotourism”, *AACL Bioflux*, 11(5), pp. 1633- 1647.
18. Sahala Bonardo Siahaan và Pudjiono Wahyu Purnomo (2018), “Biorock Application on Coral Transplant Survival and Fish Diversity in Karimunjava Island”, *Journal of Maquares*, 7(1), pp. 164-170.

Website

19. <https://mard.gov.vn/Pages/da-dang-sinh-hoc-bien-doi-khi-hau-tac-dong-lon-den-cac-ran-san-ho.aspx>, (www_Công TTĐT Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, 2021, Đa dạng sinh học, biến đổi khí hậu tác động lớn đến các rạn san hô), truy cập ngày 3/11/2024.
20. <https://vast.gov.vn/tin-chi-tiet/-/chi-tiet/mot-so-nguyen-nhan-cua-su-suy-thoai-ran-san-ho-47814-463.html>, (www_Công TTĐT Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 2022, Một số nguyên nhân của sự suy thoái rạn san hô), truy cập ngày 3/11/2024.
21. <https://biorock-thailand.com/process.html>, (www_Fourth Biorock Workshop, 2006, Biorock Technology Thailand), truy cập ngày 3/11/2024.
22. <https://www.globalcoral.org/biorock-coral-reef-marine-habitat-restoration/>, (www_Global Coral Reef Alliance Biorock™, Mineral Accretion Technology™, Seament™), truy cập ngày 6/11/2024.
23. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17682.12487>, (www_Mikhael Fredrik Tefa và Sunarto. I.R.e.a., 2019, Coral recruitment condition on biorock structure in Pulau Sepa, Kepulauan Seribu), truy cập ngày 6/11/2024.
24. <https://www.noaa.gov/news-release/analysis-shows-coral-loss-of-14-worldwide>, (www_National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021, Analysis shows coral loss of 14% worldwide), truy cập ngày 3/11/2024.
25. <https://www.hawaii.edu/news/2022/10/11/coral-reefs-climate-change-threat/>, (www_University of Hawaii ‘i New, 2022, 50% of Earth’s coral reefs face climate change threat by 2035), truy cập ngày 5/11/2024.