

RẠN SAN HỒ NHÂN TẠO BẰNG BÊ TÔNG IN 3D TRONG PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG HỆ SINH THÁI BIỂN

Nguyễn Trọng Việt¹, Phạm Thị Loan¹, Vũ Phạm Phương Chi²

¹Trường Đại học Hải Phòng

²Trường Đại học Thủy Lợi

Email: trongviet99.utc@gmail.com

Ngày nhận bài: 01/9/2024

Ngày PB đánh giá: 17/9/2024

Ngày duyệt đăng: 24/9/2024

Tóm tắt: Rạn san hô nhân tạo là những công trình do con người tạo ra, được cố ý đặt dưới đáy biển hoặc chìm trong các vùng nước để cải thiện môi trường sống và hệ sinh thái biển. Có nhiều loại và thiết kế rạn nhân tạo, mỗi loại phục vụ các mục đích khác nhau và mang lại lợi ích riêng cho hệ sinh thái biển. Chế tạo san hô nhân tạo bằng công nghệ in 3D không chỉ là một phương pháp sáng tạo nhằm khôi phục hệ sinh thái mà còn mở ra nhiều cơ hội nghiên cứu và phát triển về bảo tồn sinh vật biển. Việc kết hợp công nghệ và môi trường như vậy có thể mang lại những giải pháp bền vững cho các vấn đề môi trường hiện nay.

Key words: Rạn san hô nhân tạo, Công nghệ in bê tông 3D, Phát triển bền vững, Hệ sinh thái biển.

ARTIFICIAL CORAL REEFS USING 3D CONCRETE PRINTING FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF MARINE ECOSYSTEM

Abstract: Artificial coral reefs are constructions created by humans, intentionally placed on the seabed or submerged in water to improve the living environments and marine ecosystems. There are various types and designs of artificial coral reefs and each serving different purposes and providing unique benefits to marine ecosystems. The fabricating of artificial coral using 3D printing technology is not only an innovative method for ecosystem restoration but also opens up numerous researches and creates more opportunities for marine conservation. The combining technology and the environment can provide sustainable solutions to current environmental challenges.

Keywords: Artificial Coral Reef, 3D Printing Technology, Sustainable development, marine ecosystem.

1. GIỚI THIỆU

San hô là các động vật biển thuộc lớp San hô (Anthozoa) tồn tại dưới dạng các thể polip nhỏ giống hải quỳ, thường sống thành các quần thể gồm nhiều cá thể giống hệt nhau. Các cá thể này tiết ra cacbonat calci để tạo bộ xương cứng, xây nên các rạn san hô tại các

vùng biển nhiệt đới. Mỗi đầu san hô phát triển nhờ sự sinh sản vô tính của các polip. San hô còn sinh sản hữu tính bằng các giao tử, được giải phóng đồng thời trong một thời kì từ một đến vài đêm liên tiếp trong kì trăng tròn. Hầu hết san hô phụ thuộc vào ánh sáng mặt trời và phát triển ở các vùng nước trong và nông, thường ở độ sâu không tới 60 m.

Rạn san hô hay ám tiêu san hô là cấu trúc aragonit được tạo bởi các cơ thể sống. Aragonit là một dạng khoáng vật nhóm cacbonat. Nó và khoáng vật calcit là hai dạng phổ biến nhất, có nguồn gốc tự nhiên của CaCO_3 . Mạng tinh thể của aragonit khác với mạng tinh thể của calcit, kết quả là hình dạng tinh thể khác hẳn, đó là một hệ thống hình thoi trực tâm với các tinh thể hình kim. Các rạn san hô thường được thấy ở các vùng biển nhiệt đới nông mà trong nước có ít hoặc không có dinh dưỡng. Mức dinh dưỡng cao chẳng hạn như nước thải từ các vùng nông nghiệp có thể làm hại rạn san hô do sự phát triển nhanh của tảo. Tại hầu hết các rạn san hô, sinh vật thống trị là các loài san hô đá, các quần thể thích nghi tạo ra bộ xương ngoài bằng đá vôi. Sự tích lũy các chất tạo xương, bị phá vỡ và dồn đóng bởi sóng biển và sự xâm thực sinh học, tạo nên cấu trúc đá vôi lớn nâng đỡ san hô đang sống và làm chỗ trú ẩn cho rất nhiều loài động thực vật khác. Các rạn san hô chỉ hình thành ở khu vực hai bên đường xích đạo trải từ vĩ độ 30° Bắc đến 30° Nam; mặc dù các loại san hô tạo rạn không sống tại các độ sâu quá 30 m nhiệt độ có ảnh hưởng ít hơn đến phân bố của san hô, nhưng người ta thường cho rằng không có san hô sống trong những vùng nước có nhiệt độ dưới 18°C .

Rạn san hô nhân tạo là những cấu trúc nhân tạo được đặt trong đại dương để mô phỏng chức năng của rạn tự nhiên. Thực hành đặt các rạn san hô nhân tạo bằng bê tông này với mục đích tạo ra tảo có từ thế kỷ 17, khi Nhật Bản bắt đầu sử dụng đá vụn và đá để tạo ra tảo bẹ. Ngày nay, chức năng của các rạn san hô nhân tạo không chỉ dừng lại ở việc tạo ra tảo, vì chúng thực hiện hầu hết các vai trò mà các rạn san hô tự nhiên đảm nhiệm. Các rạn san hô, như Rạn san hô Great Barrier ở Úc, là hệ sinh thái quan trọng hỗ trợ nhiều loại sinh vật biển. Tuy nhiên, chúng đang phải đối mặt với những mối đe dọa nghiêm

trọng: hành tinh đã mất năm mươi phần trăm các rạn san hô kể từ năm 1950 và dự kiến sẽ còn suy giảm mạnh hơn nữa trong tương lai. Để hỗ trợ các rạn san hô tự nhiên, các cấu trúc nhân tạo tương đương của chúng được thiết kế để cung cấp môi trường sống và nơi trú ẩn cho các sinh vật biển, giống như các rạn san hô tự nhiên. Theo cách này, các cấu trúc nhân tạo này tạo ra các hệ sinh thái mới, nơi sinh vật biển có thể phát triển mạnh. Chúng thường được đặt ở những khu vực có đáy biển không có đặc điểm gì nổi bật, nghĩa là đáy biển trống rỗng, vì những khu vực này cần cải thiện đa dạng sinh học nhất.

Việc sử dụng Công nghệ in bê tông 3D để chế tạo rạn san hô này là một cách tiếp cận mới đầy hứa hẹn để phục hồi các hệ sinh thái san hô bị hư hại, vì nó cho phép in các cấu trúc được thiết kế riêng cho một số rạn san hô bị hư hại. Với công nghệ bê tông in 3D hoàn toàn có thiết kế và tạo ra các cấu trúc mô phỏng hình dạng của san hô tự nhiên. Những thiết kế rạn san hô bê tông này sau đó có thể được đặt trên các phần của rạn san hô nơi san hô tự nhiên đã bị hư hại hoặc bị phá hủy. Các cấu trúc bê tông được đặt tạo thành một nền tảng ổn định để san hô mới bám vào và phát triển, do đó theo thời gian, các rạn san hô bị hư hại sẽ phát triển trở lại như mới. Ngoài ra in bê tông 3D cũng bền vững hơn, vì chúng ta có thể sử dụng vật liệu tái chế trong khi giảm thiểu chất thải của chính ngành xây dựng. Hơn nữa, khi sử dụng máy in rạn san hô 3D làm phương pháp sản xuất cho các rạn nhân tạo có hình dạng khác nhau, mỗi rạn san hô nhân tạo có thể có các đặc điểm khác nhau mà không cần khuôn mẫu khác nhau. Nhờ quy trình hiệu quả này sử dụng vật liệu bền vững, các cấu trúc rạn san hô in 3D được sản xuất với chi phí tương đối thấp và độ bền cao. Điều này làm cho in bê tông 3D trở thành cách bền vững nhất để tạo ra các rạn san hô mới và sửa chữa các rạn san hô hiện có.

2. LỢI ÍCH VÀ HÌNH THÁI RẠN SAN HỒ NHÂN TẠO

Rạn nhân tạo mang lại nhiều lợi ích cho hệ sinh thái biển, cộng đồng ven biển và môi trường. Triển khai các rạn nhân tạo ở những khu vực mà rạn tự nhiên đã bị hư hại do các yếu tố như san hô bị tẩy trắng, hoạt động đánh bắt hủy diệt hoặc tàu mắc cạn. Những cấu trúc này tạo ra môi trường sống mới cho các sinh vật biển và góp phần phục hồi hệ sinh thái. Các rạn san hô nhân tạo sẽ thu hút nhiều loài sinh vật biển khác nhau, chẳng hạn như cá, giáp xác, động vật thân mềm và tảo. Ở những khu vực có môi trường sống rạn san hô tự nhiên hạn chế, các rạn san hô nhân tạo có thể làm tăng đáng kể đa dạng sinh học và hỗ trợ nhiều dạng sống biển khác nhau. Sử dụng các cấu trúc nhân tạo làm chất nền để gắn các mảnh san hô trong các dự án phục hồi san hô. Điều này khuyến khích sự phát triển của san hô và hỗ trợ bảo tồn các loài san hô bị đe dọa. Các rạn san hô nhân tạo thúc đẩy sự phát triển của sinh vật biển, góp phần vào chu trình dinh dưỡng, có thể giúp duy trì chất lượng nước lành mạnh ở các vùng ven biển và hỗ trợ các hệ sinh thái biển khác.

Bên cạnh đó, việc lắp đặt các rạn nhân tạo ở những khu vực dễ bị xói mòn có thể đóng vai trò như đê chắn sóng ngầm, giảm năng lượng sóng và bảo vệ bờ biển khỏi tác động của bão và xói mòn. Tạo rạn nhân tạo bằng vật liệu tái chế như bê tông, tàu cũ hoặc thiết bị quân sự đã ngừng hoạt động, còn giúp chuyển hướng chất thải khỏi bãi chôn lấp và góp phần vào hoạt động có trách nhiệm với môi trường. Đánh chìm một con tàu đã ngừng hoạt động để tạo ra một rạn san hô nhân tạo, trở thành điểm đến lặn phổ biến, thu hút khách du lịch và thợ lặn giải trí. Điều này

thúc đẩy nền kinh tế địa phương và khuyến khích các nỗ lực bảo tồn. Sử dụng rạn nhân tạo làm địa điểm nghiên cứu để nghiên cứu quá trình xâm chiếm và phát triển của sinh vật biển, quan sát sự tương tác giữa các loài và theo dõi sức khỏe của hệ sinh thái rạn san hô. Thông tin này đóng góp cho khoa học biển và giáo dục.

Nhìn chung, các rạn nhân tạo có thể mang lại nhiều kết quả tích cực, bao gồm phục hồi sinh thái, lợi ích kinh tế, tăng cường cơ hội đánh bắt cá và nâng cao kiến thức về hệ sinh thái biển. Tuy nhiên, điều cần thiết là phải tiếp cận việc xây dựng rạn nhân tạo với kế hoạch cẩn thận và cân nhắc đến môi trường để đảm bảo hiệu quả của chúng và giảm thiểu mọi tác động tiêu cực đến môi trường biển.

Có nhiều loại và thiết kế rạn nhân tạo, mỗi loại phục vụ các mục đích khác nhau và mang lại lợi ích riêng cho hệ sinh thái biển. Cấu trúc chìm là loại phổ biến nhất, có thể được hình thành từ các khối bê tông hoặc cấu trúc được thiết kế để cung cấp bề mặt cho sinh vật biển bám vào và tạo ra môi trường sống, hoặc các công trình nhân tạo có không gian mở để làm nơi trú ẩn cho cá và các sinh vật biển khác, hoặc ống/ cống lớn được đặt trên đáy biển để tạo nơi ẩn náu cho các sinh vật biển. Các cấu trúc chìm này có thể có hình kim tự tháp hoặc hình khối được triển khai để tạo ra môi trường sống ổn định cho các sinh vật biển. Các phương tiện đã ngừng hoạt động như ô tô hoặc xe buýt, lốp xe... được làm sạch và chuẩn bị trước khi đánh chìm cũng có thể sử dụng để tạo thành các cấu trúc rạn san hô. Tuy nhiên, rạn lốp xe thường không được khuyến khích vì lo ngại về môi trường và thiệt hại tiềm ẩn mà chúng có thể gây ra. Các cấu trúc chìm phổ biến như giới thiệu trong Hình 1 [1].



a) Nguyên liệu phế thải

b) Cấu trúc chìm bằng khối bê tông đúc



c) Cấu trúc chìm bằng khối bê tông in 3D

Hình 1. Một số loại cấu trúc chìm rạn san hô nhân tạo.

Điều quan trọng cần đề cập là không phải tất cả các phương pháp tạo rạn nhân tạo đều được coi là thân thiện với môi trường. Một số hoạt động, như sử dụng lốp xe cũ hoặc các vật liệu không phân hủy sinh học khác, có thể gây ra tác động tiêu cực đến hệ sinh thái biển. Việc lập kế hoạch có trách nhiệm, lựa chọn vật liệu và đánh giá môi trường phù hợp là rất quan trọng để đảm bảo sự thành công và tính bền vững của các dự án rạn nhân tạo.

3. THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO RẠN SAN HÔ NHÂN TẠO BẰNG CÔNG NGHỆ IN BÊ TÔNG

Việc tạo ra các rạn san hô nhân tạo liên quan đến một quá trình chu đáo, xem xét các mục tiêu cụ thể, vị trí, vật liệu và các yếu tố môi trường, về cơ bản cần đáp ứng các nguyên tắc cơ bản gồm [2]:

(1) Thiết kế của rạn san hô nhân tạo phụ thuộc vào mục đích và nguồn tài nguyên sẵn có. Cấu trúc rạn san hô có thể

từ các mô-đun đơn giản như khối bê tông hoặc vật liệu bỏ đi đến các cấu trúc phức tạp hơn như tàu chìm hoặc quả cầu rạn san hô được thiết kế đặc biệt. Số lượng và kích thước của các khoang, cũng như hình dạng của các mô-đun (chiều cao, hình dạng, mối quan hệ bề mặt/thể tích, v.v.) có tác động lớn đến sự đa dạng và phong phú của các sinh vật sẽ bị thu hút đến rạn san hô. Nhìn chung, cấu trúc càng phức tạp thì sự đa dạng của các loài sẽ sử dụng rạn san hô làm nền tảng định cư, nơi trú ẩn, khu vực kiếm ăn hoặc khu vực sinh sản càng cao. Kích thước tổng thể của rạn san hô cũng là một vấn đề quan trọng và thể tích tối thiểu của vật liệu và diện tích đáy biển được bao phủ cần phải nằm trong phạm vi để các hệ sinh thái tự duy trì được tạo ra. Các đặc điểm của các đơn vị (khối hoặc mô-đun), kích thước, trọng lượng, tính không đồng nhất về không gian, nhóm đơn vị cơ bản, cách sắp xếp và khoảng cách giữa các khối là các yếu tố thiết kế cần được xem xét trong

từng trường hợp, dựa trên mục tiêu và loài mục tiêu. Khi mục đích là tạo ra một hệ sinh thái có nhiều loài sinh vật đa dạng, các cấu trúc phải phức tạp nhất có thể, vì có mối quan hệ trực tiếp giữa tính phức tạp và tính đa dạng. Tùy thuộc vào hình dạng, kích thước và chiều của nó, một rạn san hô nhân tạo có thể hấp dẫn về mặt thị giác và đóng vai trò là điểm tham chiếu không gian cho các loài đã xác định. Các rạn san hô nhân tạo được thiết kế phù hợp được sử dụng cho mục đích tăng cường nghề cá có thể rất hiệu quả trong việc tăng khả năng sống sót của các loài, bằng cách cải thiện tốc độ tăng trưởng và sinh sản của chúng. Điều này có tác động trực tiếp đến sinh khối và đa dạng sinh học của hệ sinh thái và nguồn lợi đánh bắt. Hình dạng của rạn san hô cũng ảnh hưởng đến các loài và sinh khối. Đối với một rạn san hô có mục đích là cung cấp môi trường sống cho các loài sống dưới đáy biển, hình dạng phải thấp. Tuy nhiên, khi mục đích là tạo ra môi trường sống cho nhiều loài khác nhau, cần phải kết hợp các rạn san hô cao và thấp. Sự đa dạng và sinh khối của các cộng đồng trên rạn san hô nhân tạo sẽ phụ thuộc vào sự phân bố và số lượng các mô-đun. Một rạn san hô được chia thành các phần khác nhau (thay vì tập trung tất cả các mô-đun lại với nhau) có thể thu hút nhiều loài và cá thể hơn, ngoài ra còn cung cấp các khu vực khác nhau để sử dụng đồng thời, chẳng hạn như lặn biển và câu cá

(2) Có thể sử dụng nhiều loại vật liệu khác nhau để tạo ra rạn san hô nhân tạo, chẳng hạn như bê tông, thép, đá, tàu cũ, toa tàu và các vật liệu thân thiện với môi trường khác. Việc lựa chọn vật liệu phụ thuộc vào độ bền, khả năng bám của sinh vật biển và

tác động đến môi trường. Mục đích chính khi lựa chọn vật liệu là đảm bảo rằng rạn có thể hoàn thành mục đích của nó đồng thời tuân thủ các tiêu chí về an toàn và môi trường. Nhìn chung:

- Rạn nhân tạo nên được xây dựng từ vật liệu tự nhiên;

- Vật liệu được sử dụng phải trơ và phải chống lại sự phân hủy trong nước biển. Đối với mục đích của các hướng dẫn này, vật liệu trơ là vật liệu không gây ô nhiễm thông qua quá trình thẩm thấu, phong hóa vật lý hoặc hóa học và/hoặc hoạt động sinh học;

- Có thể sử dụng các vật liệu tương thích với các điều khoản của các quốc gia. Việc chúng có được chấp nhận hay không nên được xác định dựa trên đánh giá cẩn thận về các đặc điểm vật lý và hóa học của chúng theo các hướng dẫn có liên quan. Một số loại vật liệu nạo vét, chẳng hạn như đá, tảng đá lớn, v.v., có thể được coi là vật liệu xây dựng cho rạn nhân tạo với điều kiện chúng đáp ứng các tiêu chí nêu trên;

- Các vật liệu được sử dụng có thể ảnh hưởng đến bản chất của các loài sẽ xâm chiếm rạn san hô và do đó, việc lựa chọn chúng cũng sẽ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố sinh học như loại thức ăn của các loài mục tiêu;

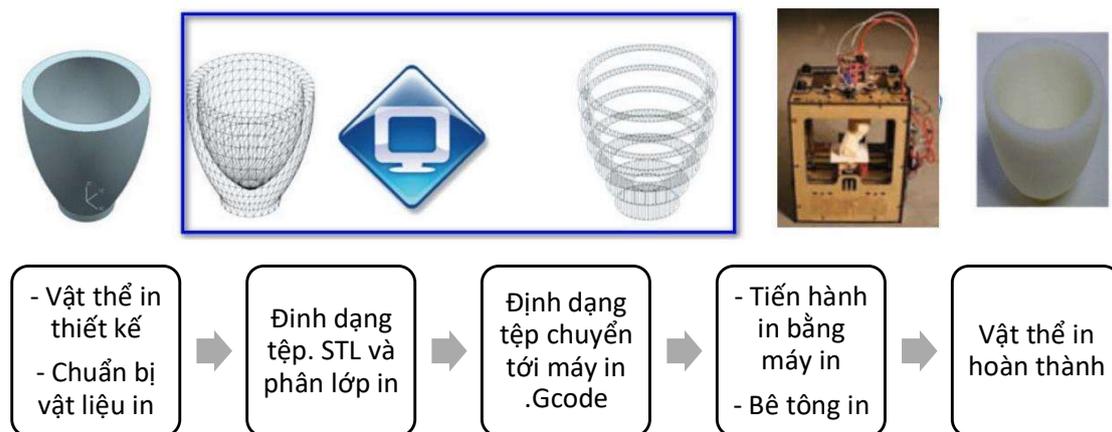
Những cân nhắc chính về mặt vật liệu là độ nhám và thành phần hóa học của chúng. Ví dụ, bề mặt rất phẳng, nhẵn sẽ cản trở sự định cư của các sinh vật trên rạn san hô, vì chúng thích xâm chiếm các bề mặt gồ ghề hoặc các khu vực có lỗ hổng và hốc tương tự như đá tự nhiên

Ngoài ra, các nguyên tắc liên quan quá trình lựa chọn địa điểm thích hợp cho rạn nhân tạo cũng rất quan trọng. Các yếu tố cần xem xét bao gồm độ sâu của nước, dòng chảy, loại đáy

biển, khoảng cách gần với rạn tự nhiên hoặc môi trường sống nhạy cảm và mục đích sử dụng rạn (ví dụ, phục hồi môi trường sống biển, tăng cường nghề cá hoặc bảo vệ bờ biển). Trước khi tiến hành xây dựng rạn san hô, cần có giấy phép và phê duyệt từ các cơ quan có thẩm quyền và cơ quan môi trường có liên quan. Điều này đảm bảo rằng dự án tuân thủ các quy định về môi trường và bảo vệ chống lại các tác động tiêu cực tiềm ẩn đến hệ sinh thái biển. Sau khi triển khai, việc giám sát và đánh giá liên tục là điều cần thiết để đánh giá hiệu quả của rạn san hô và tác động của nó đối với hệ sinh thái biển. Các nhà khoa học và nhà bảo tồn nghiên cứu cách sinh vật biển xâm chiếm rạn san hô, sự phát triển của san hô và các sinh vật khác và thành công chung của dự án trong việc đạt được các mục tiêu của nó. Rạn nhân

tạo có thể cần bảo trì định kỳ để đảm bảo tính ổn định và hiệu quả của chúng. Kiểm tra thường xuyên xuyên được tiến hành để xác định bất kỳ sự xuống cấp hoặc nguy cơ tiềm ẩn nào cần được giải quyết. Đồng thời, sự tham gia của cộng đồng địa phương, các nhà khoa học và chuyên gia môi trường trong quá trình lập kế hoạch và triển khai các dự án rạn san hô nhân tạo. Việc hợp tác với các bên liên quan giúp đảm bảo rằng việc xây dựng rạn san hô phù hợp với nhu cầu của khu vực, thúc đẩy tính bền vững và thúc đẩy các kết quả tích cực cho bảo tồn biển và sức khỏe hệ sinh thái.

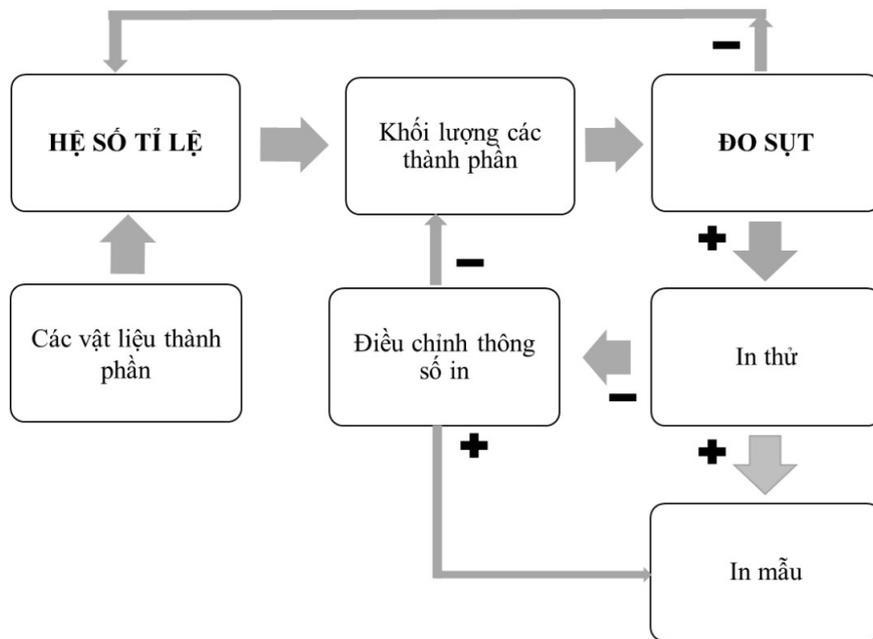
Sau khi xem xét và tuân thủ các nguyên tắc cơ bản, thực hiện chế tạo một thiết kế đã được chọn bằng công nghệ in được tiến hành theo qui trình như Hình 2:



Hình 2. Qui trình in vật thể bằng máy in

Việc thiết kế vật thể in có thể được thực hiện bởi các công cụ hỗ trợ như CAD, Sketchup, Solidword,...Sau đó, các tệp được định dạng đuôi « STL » để mở bằng phần mềm Simplify3D [3]. Thao tác trong tệp mở bằng phần mềm Simplify3D sẽ định nghĩa một số các thông số in, quan trọng nhất là chiều cao mỗi lớp in và đường kính đầu in. Sau khi hoàn tất các lựa chọn thông số, xuất tệp định dạng « .Gcode » để thực hiện công

tác in với sự điều khiển máy in bằng phần mềm Mach 3 [4]. Bê tông in được thiết kế theo qui trình như trên Hình 3 [5] với các vật liệu theo xu hướng 3Rs [6]. Cụ thể, tro bay là phế thải của nhà máy nhiệt điện được thay thế một phần xi măng, cát nghiền được sử dụng thay thế một phần cát tự nhiên. Vật liệu in được sử dụng nhiều trong các nghiên cứu trước đó của nhóm tác giả được thể hiện trong Hình 4

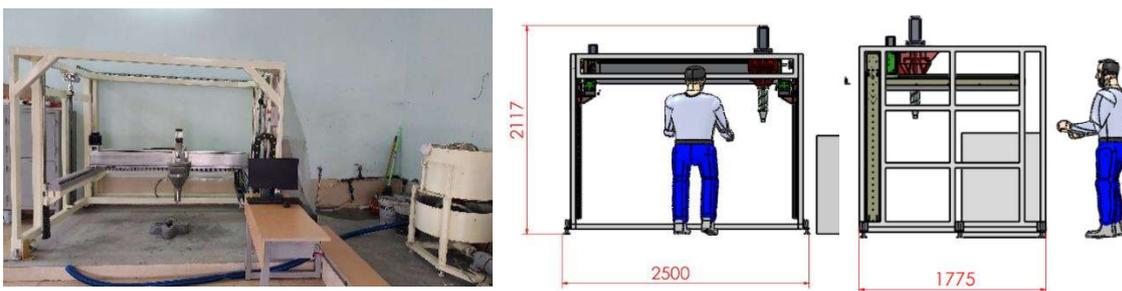


Hình 3. Quy trình thiết kế cấp phối



Hình 4. Vật liệu trong thiết kế cấp phối bê tông

Sau khi các công tác chuẩn bị in được hoàn tất, công tác in được tiến hành. Thiết bị in của nhóm nghiên cứu được giới thiệu trong Hình 5.



Hình 5. Máy in bê tông

Cấu trúc thiết kế rạn san hô nhân tạo bằng máy in bê tông đã trở thành nguồn cảm hứng của nhiều nhà nghiên cứu trên

khắp thế giới. Một số cấu trúc thiết kế đã được chế tạo thành công được giới thiệu trong Hình 6 [7].



Hình 6. Một số dạng cấu trúc rạn san hô in bê tông

Cấu trúc của rạn san hô - hình dạng, kích thước và cấu hình của các mô-đun - là chìa khóa để xác định sinh khối và sự đa dạng của các loài mà nó sẽ thu hút. Nhiều nghiên cứu khác nhau đã chỉ ra rằng các loài cụ thể có sở thích rõ rệt đối với các loại thiết kế cụ thể. Do đó, các đặc điểm của các khối hoặc mô-đun (kích thước, kích thước, trọng lượng, tính không đồng nhất về không gian, nhóm đơn vị cơ bản, cách sắp xếp và khoảng cách giữa các khối) là các yếu tố thiết kế cần được xem xét trong từng trường hợp, dựa trên sở thích của các loài mục tiêu. Tuy nhiên, có thể đưa ra một số điểm chung như sau:

- Có mối quan hệ trực tiếp giữa độ phức tạp của rạn san hô và sự đa dạng của các loài mà nó sẽ thu hút;

- Hình dạng và kích thước của rạn san hô không chỉ ảnh hưởng đến sinh khối mà còn ảnh hưởng đến tổng số loài và cá thể;

- Tùy thuộc vào kích thước và kích thước của nó, một rạn san hô nhân tạo có thể hấp dẫn về mặt thị giác và đóng vai trò là điểm tham chiếu không gian cho các loài đã xác định;

- Hình dạng của rạn san hô cũng ảnh hưởng đến các loài và sinh khối. Do đó, đối với các loài sống ở tầng đáy, hình dạng của rạn san hô phải thấp. Tuy nhiên, khi mục đích là tạo ra một môi trường sống với nhiều loài

khác nhau, cần phải kết hợp các rạn san hô cao và thấp;

- Sự đa dạng và sinh khối của các cộng đồng trên một rạn san hô nhân tạo cũng bị ảnh hưởng bởi sự phân bố và số lượng các mô-đun. Một rạn san hô được chia thành các mô-đun khác nhau (thay vì tập trung lại với nhau) có thể thu hút nhiều loài và cá thể hơn, ngoài việc cung cấp các khu vực khác nhau để sử dụng đồng thời, chẳng hạn như lặn biển và câu cá;

- Số lượng và bản chất của các khoảng không gian xen kẽ cũng sẽ quyết định bản chất và sự đa dạng của các loài sinh vật định cư trên rạn san hô và nên được thiết kế có tính đến các loài mục tiêu. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng cá thích các lỗ hổng tương ứng với kích thước của chúng, vì vậy cần có các lỗ hổng nhỏ để đảm bảo sự sống còn của cá con;

- Nói chung, cá thích các hốc có nhiều lỗ hổng để chúng có thể trốn thoát khỏi kẻ săn mồi. Điều này cũng có thể được đáp ứng bằng cách cung cấp các hốc nhỏ hơn cho cá con và các loài nhỏ hơn. Chúng cũng thích các hốc có ánh sáng;

- Kích thước, số lượng và hướng của các hốc cũng phải tính đến hành vi tán tỉnh và sinh sản của các loài mục tiêu, cũng như chúng có tính lãnh thổ hay tính bầy đàn (các hốc nhỏ hơn có số lượng lớn hơn đối với các loài lãnh thổ và ngược lại đối với các loài bầy đàn);

- Nước tù đọng có thể làm giảm năng suất. Thiết kế và bố trí tổng thể của các cấu trúc rạn san hô - và các hốc liên quan - đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo lưu thông nước đầy đủ;

- Tổng diện tích bề mặt có sẵn quan trọng hơn kích thước tổng thể của nó trong việc xác định sinh khối rạn san hô. Do đó, diện tích bề mặt có sẵn cho tảo và động vật không xương sống định cư càng cao thì nguồn thức ăn cho các cấp độ khác của cộng đồng rạn san hô càng lớn và do đó, khả năng sản xuất càng lớn. Tuy nhiên, thiết kế rạn nhân tạo phải hướng đến mục tiêu đạt được mục tiêu của nó, đồng thời chiếm diện tích nhỏ nhất có thể của đáy biển và ít can thiệp nhất vào hệ sinh thái biển tự nhiên.

Như vậy, các rạn san hô nhân tạo được sử dụng cho nhiều mục đích khác nhau trong môi trường ven biển và đã phát triển trong vài trăm năm qua từ những thứ về cơ bản là đồng đồ nát thành các cấu trúc cực kỳ tinh vi với các thiết kế cụ thể tùy thuộc vào mục đích. Đối với các rạn được xây dựng bằng công nghệ in bê tông 3D [6-10], quy trình thiết kế bao gồm việc lựa chọn vật liệu và thiết kế cấu trúc, có tính đến mục đích của rạn, các loài mục tiêu khi thích hợp và các điều kiện môi trường cụ thể tại địa điểm được đề xuất - cũng như các cân nhắc về kinh tế, tính khả dụng của vật liệu, v.v. Điều này nhằm đảm bảo rằng cả rạn đạt được mục tiêu và phù hợp theo quan điểm kỹ thuật, kinh tế và môi trường.

4. KẾT LUẬN

Chế tạo các rạn san hô nhân tạo bằng công nghệ in bê tông là một hướng nghiên cứu và ứng dụng đã và đang được quan tâm trên phạm vi toàn cầu. Tuy nhiên, việc nghiên cứu và ứng dụng vào thực tiễn chưa được phổ biến. Thông qua nghiên cứu vấn đề rạn san hô nhân tạo bằng công nghệ in bê tông trong phát triển bền vững hệ sinh thái

biển, một số kết luận có thể được rút ra :

- Ứng dụng công nghệ in 3D vào thiết kế, chế tạo các rạn san hô nhân tạo là một hướng nghiên cứu khả thi và tiềm năng.

- Các rạn san hô nhân tạo thúc đẩy sự phát triển của sinh vật biển, góp phần vào chu trình dinh dưỡng, có thể giúp duy trì chất lượng nước lành mạnh các vùng ven biển và hỗ trợ các hệ sinh thái biển khác

- Cấu trúc chìm là loại phổ biến nhất, được thiết kế để cung cấp bề mặt cho sinh vật biển bám vào và tạo ra môi trường sống có không gian mở để làm nơi trú ẩn cho cá và các sinh vật biển khác. Cấu trúc càng phức tạp thì sự đa dạng của các loài sẽ sử dụng rạn san hô làm nền tảng định cư, nơi trú ẩn, khu vực kiếm ăn hoặc khu vực sinh sản càng cao. Độ nhám và các bề mặt gồ ghề hoặc các khu vực có lỗ hổng và hốc tương tự như đá tự nhiên sẽ hấp dẫn sự định cư của các sinh vật trên rạn san hô.

- Công nghệ in bê tông tạo bề mặt các rạn san hô có độ nhám và cấu trúc phức tạp tùy ý, là giải pháp hữu hiệu trong việc sản xuất ra các rạn san hô gắn với cấu trúc rạn san hô tự nhiên.

- Quy trình thiết kế cấp phối với các vật liệu bền vững, quy trình in được đề xuất trong nghiên cứu ứng dụng vào in các rạn san hô nhân tạo có tính khả thi cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. I. V. Matus, J. L. Alves, J. Góis, P. Vaz-Pires, and A. Barata da Rocha, "Artificial reefs through additive manufacturing: a review of their design, purposes and fabrication process for marine restoration and management," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 30, no. 11, pp. 87-122, 2024, doi: 10.1108/RPJ-07-2023-0222.

2. B. Xu and A. Zhuge, "Review of Research on Physical Properties of Coral Sands," no. Iceep, pp. 895-898, 2016, doi: 10.2991/iceep-16.2016.156.

3. “Simplify3D Desktop Software.” [Online]. Available: <https://www.simplify3d.com/>
4. G. University, “Mach3 CNC Control Software.” [Online]. Available: <https://www.goodwin.edu/glossary/mach-3-cnc-control-software>
5. L. T. Pham *et al.*, “Development of 3D printers for concrete structures: mix proportion design approach and laboratory testing,” *Smart Sustain. Built Environ.*, Aug. 2022, doi: 10.1108/SASBE-07-2022-0137.
6. N. T. Thang, “State of 3Rs in Asia and the Pacific - The Socialist Republic of Viet Nam,” in *United Nations Centre for Regional Development (UNCRD)*, no. November, 2017. [Online]. Available: [http://www.uncrd.or.jp/content/documents/5686\[Nov 2017\] Cambodia.pdf](http://www.uncrd.or.jp/content/documents/5686[Nov 2017] Cambodia.pdf)
7. A. I. Yoris-Nobile *et al.*, “Artificial reefs built by 3D printing: Systematisation in the design, material selection and fabrication,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 362, no. August 2022, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129766.
8. “Singapore’s largest artificial reef project: Its design, construction and technology.” [Online]. Available: <https://www.jtc.gov.sg/about-jtc/news-and-stories/feature-stories/singapore-largest-artificial-reef-project-its-design-construction-and-technology>
9. “Rethinking Artificial Reef Structures through 3D Clay Printing.” [Online]. Available: <https://www.archdaily.com/947495/rethinking-artificial-reef-structures-through-3d-clay-printing>
10. A. S., “Preserving Our Oceans With 3D Printing: An Overview of Current Projects.” [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/how-are-3d-printed-coral-reef-projects-revitalizing-marine-biodiversity-10-08234/>
11. “‘Real estate’ for corals: Swiss organisation builds artificial reefs with art, tech.” [Online]. Available: <https://www.france24.com/en/environment/20231201-real-estate-for-corals-swiss-organisation-builds-artificial-reefs-with-art-tech>