

# THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO SAN HỒ NHÂN TẠO BẰNG BÊ TÔNG IN 3D

Phạm Thị Loan\*, Tống Khánh Trọng, Nguyễn Văn Luận,  
Phan Đức Thịnh, Phùng Quang Viết  
Khoa Công nghệ và Kỹ thuật, Trường Đại học Hải Phòng  
Email: loanpt80@dhhp.edu.vn

Ngày nhận bài: 23/5/2025

Ngày nhận bài sửa: 11/6/2025

Ngày duyệt đăng: 04/9/2025

**Tóm tắt:** Tình trạng suy thoái rạn san hô tự nhiên do biến đổi khí hậu và hoạt động khai thác thiếu bền vững đang đe dọa nghiêm trọng hệ sinh thái biển, đặc biệt tại khu vực Cát Bà, Hải Phòng. Trước thách thức này, nghiên cứu “Thiết kế và chế tạo san hô nhân tạo bằng bê tông in 3D” được triển khai nhằm đề xuất giải pháp hiệu quả, hiện đại và thân thiện môi trường. Nghiên cứu tập trung vào việc thiết kế cấu trúc phù hợp, lựa chọn vật liệu in bê tông bền vững, chế tạo mẫu quy mô phòng thí nghiệm. Kết quả nghiên cứu không chỉ góp phần vào chiến lược bảo tồn sinh quyển và phục hồi môi trường sống cho sinh vật biển mà còn giúp sinh viên phát triển tư duy thiết kế, kỹ năng thực hành và hiểu biết chuyên sâu về công nghệ xây dựng hiện đại trong bối cảnh phát triển bền vững kinh tế biển. Ngoài ra, công trình này góp phần vào sự phát triển bền vững của kinh tế biển và cung cấp cơ sở khoa học cho các nghiên cứu trong tương lai về phục hồi hệ sinh thái biển bằng các kỹ thuật in bê tông 3D tiên tiến.

**Từ khóa:** San hô tự nhiên, san hô nhân tạo, bê tông in 3D, môi trường biển, bảo tồn.

## THE DESIGN AND FABRICATION OF 3D PRINTED CONCRETE ARTIFICIAL CORALS

**Abstract:** The degradation of natural coral reefs due to climate change and the unsustainable exploitation of people are severely threatening marine ecosystems, particularly in the Cat Ba area of Hai Phong, Vietnam. In response to this challenge, the study “The Design and Fabrication of 3D-Printed Concrete Artificial Corals” aims to provide an effective, modern, and eco-friendly solution. The research focuses on designing suitable reef structures, selecting sustainable concrete printing materials, fabricating laboratory-scale models. The outcomes not only contribute to the conservation strategies of the biosphere and the restoration of aquatic habitats, but also enhance students’ technical thinking, practical skills, and profound knowledge of

modern construction technologies. Further, this work supports the sustainable development of the marine economy and offers a scientific basis for future studies in aquatic ecosystem restoration using advanced 3D concrete printing techniques.

**Keywords:** Natural coral, artificial coral, 3D printed concrete, marine environment, conservation.

---

## 1. GIỚI THIỆU VẤN ĐỀ

Rạn san hô là một cấu trúc sinh học độc đáo được hình thành từ sự phát triển của các polyp san hô tiết ra canxi cacbonat, tạo nên những “kiến trúc sống” dưới đáy biển. Hệ sinh thái này đóng vai trò thiết yếu trong việc duy trì sự phong phú của sinh vật biển, làm nơi sinh sống, sinh sản và phát triển của hàng nghìn loài, đồng thời góp phần ngăn chặn tác động của sóng gió, giảm thiểu xói mòn bờ biển và ổn định môi trường ven bờ. Tuy nhiên, nhiều khu vực rạn san hô tự nhiên trên thế giới, đặc biệt là ở các vùng biển nhiệt đới như Việt Nam, đang đối mặt với sự suy thoái nghiêm trọng. Các nguyên nhân chủ yếu bao gồm biến đổi khí hậu toàn cầu dẫn đến hiện tượng nước biển ấm lên gây tẩy trắng san hô, ô nhiễm từ hoạt động công nghiệp và sinh hoạt, cùng với việc khai thác thủy sản thiếu bền vững. Tình trạng này không chỉ làm suy giảm đa dạng sinh học mà còn đe dọa đến an ninh sinh thái và nguồn sinh kế của cộng đồng ngư dân.

Trước bối cảnh đó, việc ứng dụng rạn san hô nhân tạo được xem là một giải pháp tiềm năng nhằm khôi phục và thay thế các rạn tự nhiên bị hư hại. Các cấu trúc nhân tạo này không chỉ cung cấp môi

trường cư trú thay thế cho sinh vật biển mà còn góp phần củng cố chức năng bảo vệ bờ biển và hỗ trợ phát triển kinh tế biển. Nhiều quốc gia đã triển khai thành công các mô hình rạn nhân tạo, trong đó Việt Nam cũng từng bước áp dụng tại các khu vực như Nha Trang, Côn Đảo và Phú Quốc, mở ra hướng đi mới trong chiến lược bảo tồn biển và khai thác tài nguyên biển bền vững.

Thiết kế rạn nhân tạo là quá trình liên ngành, kết hợp kỹ thuật xây dựng, vật liệu và sinh thái học nhằm tạo môi trường sống lý tưởng cho sinh vật biển. Một thiết kế hiệu quả cần đáp ứng bốn tiêu chí: (1) tương thích sinh học, vật liệu an toàn, có pH gần với nước biển, bề mặt nhám mô phỏng rạn tự nhiên; (2) bền vững trong môi trường biển, cấu trúc chống ăn mòn và tác động cơ học; (3) ổn định kết cấu, chống lún lệch, lật đổ, chịu được áp lực thủy động và nền đáy; (4) hình học tối ưu, mô phỏng rạn tự nhiên với nhiều hốc nhỏ, khe rạn và đường thông nước, hỗ trợ trao đổi chất và tạo vi khí hậu sinh học. Cấu trúc rạn cần tái hiện không gian ba chiều đa dạng, có các khoang rỗng và khe hở làm nơi trú ẩn cho sinh vật biển. Thiết kế phức tạp giúp điều tiết dòng chảy, ổn định trầm tích, giữ lại dưỡng chất và tạo điều kiện cho san hô

non bám dính. Hình dạng rạn nên đa lớp, khối lồi lõm, mô-đun xen kẽ, bề mặt có độ nhám vi mô và vết nứt nhỏ nhằm tăng khả năng bám của tảo và sinh vật đáy. Hệ thống lỗ thông nước được bố trí khoa học theo phân tích thủy động học để duy trì lưu thông nước, ổn định môi trường vi sinh và sinh thái. Như vậy, sự kết hợp giữa công nghệ in bê tông 3D và nguyên lý sinh thái học mở ra hướng đi hiệu quả trong bảo tồn và phát triển bền vững hệ sinh thái biển.

## **2. Tổng quan nghiên cứu, cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu**

### **2.1. Tổng quan và cơ sở lý thuyết vấn đề nghiên cứu**

Rạn san hô là một trong những hệ sinh thái biển quan trọng và đa dạng sinh học bậc nhất trên Trái đất. Tuy chỉ chiếm chưa đến 1% diện tích đáy đại dương, chúng lại là nơi cư trú của hơn 25% các loài sinh vật biển, đóng vai trò thiết yếu trong việc bảo vệ bờ biển, điều hòa sinh thái đại dương, hỗ trợ sinh kế cho cộng đồng ven biển và cung cấp tiềm năng lớn cho nghiên cứu y sinh học. Tuy nhiên, trước tác động của biến đổi khí hậu, ô nhiễm môi trường và khai thác quá mức, nhiều rạn san hô trên toàn cầu đang suy thoái nghiêm trọng - với khoảng 50% diện tích đã biến mất kể từ năm 1950. Trong bối cảnh đó, rạn san hô nhân tạo đã và đang được nhiều quốc gia quan tâm, triển khai như một giải pháp nhằm phục hồi hệ sinh thái biển, tăng cường đa dạng sinh học và giảm thiểu tác động tiêu

cực đến đường bờ. Các công trình rạn nhân tạo được nghiên cứu kỹ lưỡng về vật liệu, hình dạng và khả năng thích nghi sinh học nhằm mô phỏng môi trường sống tự nhiên của san hô. Tại Việt Nam, việc triển khai rạn san hô nhân tạo còn khá mới mẻ nhưng bước đầu ghi nhận những kết quả khả quan, đặc biệt ở các khu vực có tiềm năng du lịch và sinh thái cao như Nha Trang, Phú Quốc, Côn Đảo và Trường Sa.

Rạn san hô tự nhiên hình thành từ các polyp san hô - sinh vật thuộc ngành Cnidaria có khả năng tiết ra hợp chất đá vôi ( $\text{CaCO}_3$ ) tạo nên khung cứng bên ngoài. Cấu trúc rạn không chỉ được tạo thành từ xác sinh vật mà còn là môi trường sống năng động, hỗ trợ hàng nghìn loài sinh vật biển khác nhau. Ba dạng rạn san hô chính bao gồm: rạn viền (phát triển gần bờ), rạn chắn (song song nhưng cách xa bờ) và rạn vòng (bao quanh đầm phá giữa đại dương).

Chức năng sinh thái - kỹ thuật của rạn san hô gồm:

- \* Bảo vệ bờ biển trước sóng và xói lở.
- \* Cung cấp nơi trú ẩn và sinh sản cho sinh vật biển.
- \* Góp phần ổn định hóa học đại dương và hấp thụ  $\text{CO}_2$ .
- \* Đóng góp vào sinh kế ngư dân và phát triển du lịch biển.
- \* Cung cấp tài nguyên sinh học phục vụ nghiên cứu y học.

Rạn san hô nhân tạo là các cấu trúc do con người thiết kế, đặt dưới đáy biển nhằm tạo môi trường sống thay thế hoặc hỗ trợ san hô tự nhiên. Những cấu trúc này thường được chế tạo từ bê tông biển, đá, thép hoặc vật liệu tổng hợp thân thiện sinh học. Các dự án điển hình trên thế giới bao gồm việc sử dụng tàu chiến cũ (như tàu USS Oriskany của Hoa Kỳ), khối bê tông đúc sẵn (tại Nhật Bản, Thái Lan), hay rạn hình học đặc biệt để khuyến khích sinh vật bám trú. Tại Việt Nam, nghiên cứu rạn san hô nhân tạo mới chủ yếu ở quy mô thử nghiệm, với sự tham gia của các trường đại học, tổ chức bảo tồn và cơ quan quản lý tài nguyên biển. Một số thiết kế rạn hiện đã được lắp đặt tại các khu dự trữ sinh quyển hoặc vùng ven đảo, góp phần làm chậm quá trình xói lở bờ biển, tạo không gian sống cho san hô non và nâng cao nhận thức cộng đồng về bảo vệ tài nguyên biển. Việc lựa chọn hình học và cấu trúc trong thiết kế rạn san hô nhân tạo là một bài toán cân bằng giữa kỹ thuật xây dựng và sinh thái học. Một mô hình rạn hiệu quả phải có cấu trúc không gian ba chiều mô phỏng sát môi trường tự nhiên, tích hợp các khoang rỗng, bề mặt nhám và hệ thống lỗ thông gió hợp lý để tạo điều kiện cho dòng chảy ổn định, thúc đẩy sự sinh trưởng, sinh sản và phát triển bền vững của quần thể sinh vật 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.



a) Nguyên liệu phế thải



b) Cấu trúc chìm bằng khối bê tông đúc [1]



*c) Cấu trúc chìm bằng khối bê tông in 3D [2]*

*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 lớp 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.

Với chức năng mô phỏng cấu trúc, không gian sống và vai trò sinh thái của

rạn san hô tự nhiên, các rạn san hô nhân tạo không chỉ góp phần thúc đẩy đa dạng sinh học, ổn định lòng biển mà còn hỗ trợ bảo vệ bờ biển trước tác động của sóng gió. Quá trình thiết kế và xây dựng rạn san hô nhân tạo đòi hỏi sự cân nhắc toàn diện, từ tính tương thích sinh học, độ bền kết cấu, khả năng chịu tải trong điều kiện biển khắc nghiệt, cho đến việc tối ưu hóa hình học nhằm tạo ra môi trường sống lý tưởng cho các loài sinh vật biển. Những yếu tố này nếu được kết hợp hợp lý sẽ tạo điều kiện cho san hô, tảo và động vật biển dễ dàng sinh trưởng, bám trụ và tái thiết lập cộng đồng sinh thái. Trên thế giới cũng như tại Việt Nam, việc triển khai các dự án rạn san hô nhân tạo đang dần trở thành hướng đi thiết thực và bền vững cho công tác bảo tồn biển, giúp cân bằng lại hệ sinh thái và phát triển kinh tế ven biển, đặc biệt trong lĩnh vực du lịch sinh thái, nghề cá và bảo vệ bờ biển lâu dài.

## 2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu về rạn san hô nhân tạo trong khuôn khổ bài báo này được triển khai một cách có hệ thống với các phương pháp cụ thể như sau:

- **Tổng quan tài liệu:** Tiến hành thu thập, phân tích và tổng hợp các tài liệu khoa học trong nước và quốc tế liên quan đến thiết kế hình học, lựa chọn vật liệu, công nghệ chế tạo và đánh giá hiệu quả sinh thái của rạn san hô nhân tạo. Các tài liệu được lựa chọn từ cơ sở dữ liệu học thuật uy tín nhằm đảm bảo tính khoa học và độ tin cậy. Việc tổng quan giúp làm rõ những hướng nghiên cứu chính đã được thực hiện, từ đó xác định các khoảng trống nghiên cứu và lựa chọn định hướng phù hợp cho nghiên cứu.

- **Phân tích tiêu chí kỹ thuật:** Xác định và hệ thống hóa các tiêu chí kỹ thuật cốt lõi đối với cấu kiện rạn san hô nhân tạo, bao gồm các yêu cầu về cơ học (độ bền, độ ổn định), đặc điểm hình học (kích thước, độ rỗng, tính khả thi khi in 3D) và điều kiện môi trường biển (độ sâu, áp suất, dòng chảy, tác động sinh học). Các tiêu chí này được chuẩn hóa dựa trên các tiêu chuẩn và các hướng dẫn kỹ thuật về thiết kế kết cấu biển, đảm bảo tính khả thi và độ an toàn của sản phẩm trong điều kiện lắp đặt thực tế.

- **Thiết kế mô hình san hô:** Trên cơ sở phân tích các yếu tố kỹ thuật và sinh thái, tiến hành thiết kế mô hình rạn san hô nhân tạo với hình học tối ưu, phù hợp với công nghệ in bê tông 3D. Thiết kế cần đảm bảo các yếu tố như: khả năng in liên tục không cần ván khuôn, dễ dàng lắp đặt và vận chuyển, đồng thời tăng cường khả năng thu hút sinh vật biển sinh sống và phát triển. Các mô hình được mô phỏng và kiểm tra kỹ lưỡng thông qua phần mềm CAD và phân tích số nhằm đảm bảo tính ổn định về mặt kết cấu và hiệu quả về mặt sinh học.

- **Chế tạo mô hình thử nghiệm:** Tiến hành chế tạo nguyên mẫu rạn san hô bằng công nghệ in bê tông 3D với các thông số kỹ thuật đã được xác định từ giai đoạn thiết kế. Vật liệu in được lựa chọn là bê tông thân thiện môi trường, có khả năng chịu ăn mòn cao trong môi trường biển. Quá trình in và bảo dưỡng được kiểm soát nhằm đảm bảo chất lượng và độ chính xác của sản phẩm in. Sau đó, mô hình được kiểm tra đánh giá sơ bộ trước khi triển khai các bước thử nghiệm thực tế ngoài biển.

## 3. Thiết kế và chế tạo rạn san hô nhân tạo bằng công nghệ in bê tông

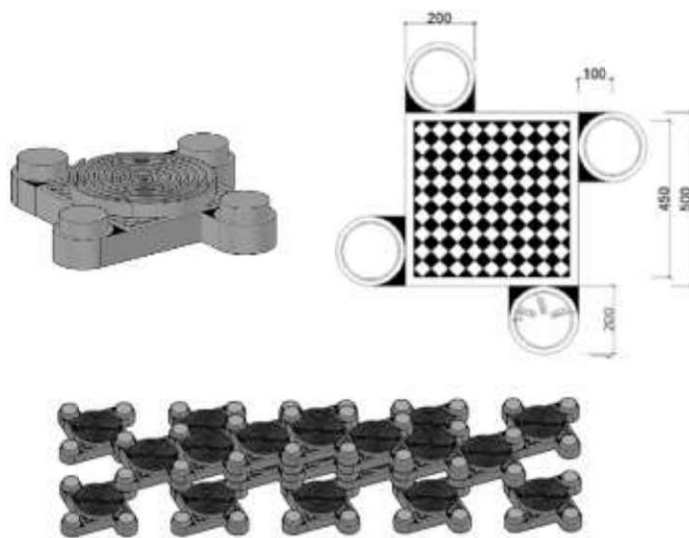
### 3.1. Đề xuất thiết kế rạn san hô nhân tạo bằng công nghệ in bê tông 3D

Dựa trên các tiêu chí sinh thái và kỹ thuật đã phân tích, nhóm nghiên cứu đề xuất thiết kế rạn san hô nhân tạo bằng công nghệ in bê tông 3D, tập trung vào ba yêu cầu cốt lõi: (1) đáp ứng chức năng sinh thái; (2) tối ưu hóa thiết kế kết cấu và khả năng thi công; (3) mô phỏng đặc điểm hình học tự nhiên.

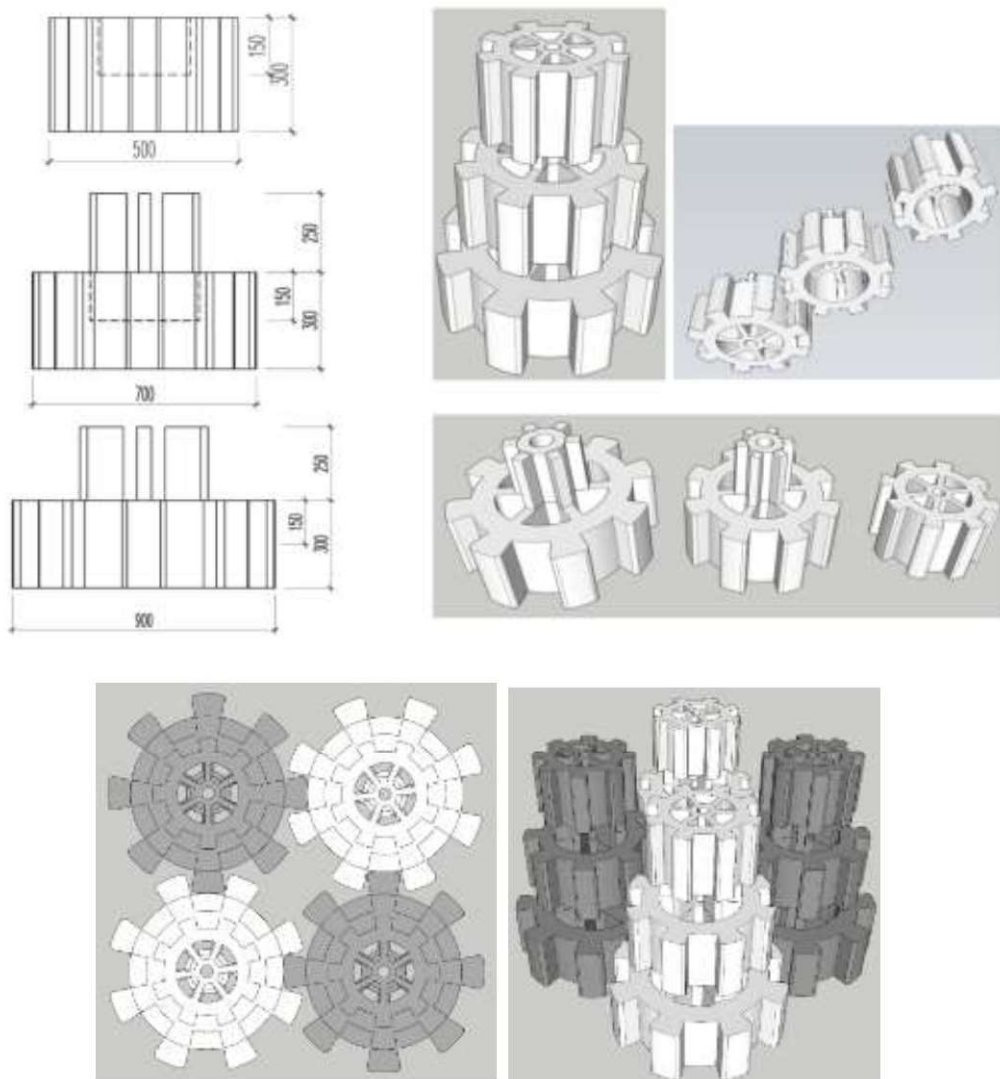
Về chức năng sinh thái, rạn cần có cấu trúc phức tạp, nhiều khoang rỗng và khe hở để tạo điều kiện cho san hô, tảo, sinh vật đáy biển bám dính và sinh sống. Thiết kế phải gần gũi tự nhiên, tăng khả năng thu hút sinh vật biển, đặc biệt là các loài san hô non. Về kết cấu, các mô hình cần đảm bảo ổn định trước tác động của dòng chảy và sóng biển, có khả năng chịu lực và chống xói mòn tốt. Vật liệu in phải tương thích với môi trường biển,

không gây độc hại và hỗ trợ sự phát triển sinh học. Thiết kế rạn san hô nhân tạo bằng công nghệ in bê tông 3D là hướng đi triển vọng, kết hợp giữa tiến bộ công nghệ và bảo tồn biển, góp phần phục hồi sinh thái và phát triển bền vững tài nguyên đại dương.

Nhóm tác giả đề xuất mô hình rạn có dạng khoang rỗng, dạng hốc và khe nhỏ, giúp mô phỏng cấu trúc rạn tự nhiên. Hình học được tối ưu về mặt kích thước, mật độ và bố trí nhằm tạo không gian sống cho sinh vật và đảm bảo tính ổn định kết cấu. Trong khuôn khổ bài báo, nhóm nghiên cứu đề xuất hai mô hình cơ bản gồm: (1) cấu trúc tấm phẳng - dễ lắp ghép (a), che phủ diện rộng; (2) cấu trúc khối không gian - phức tạp hơn, nhiều khoang hở và hỗ trợ đa dạng sinh học cao (b). Các mô-đun có thể kết hợp linh hoạt tùy theo địa hình đáy biển và mục tiêu sinh thái cụ thể.



a) Thiết kế cấu kiện san hô dạng tấm phẳng



b) Thiết kế cấu kiện san hô dạng khối  
 Hình 2. Thiết kế cấu kiện san hô đề xuất

### 3.2. So sánh hiệu quả giữa tấm phẳng và khối không gian

Theo các tiêu chí về thiết kế đã phân tích, có thể phân tích ưu và nhược điểm của 2 cấu trúc đề xuất theo các tiêu chí trong Bảng 1.

Bảng 1. So sánh cấu trúc cấu kiện san hô phẳng và không gian

Tiêu chí	Tấm phẳng	Khối không gian
Hình dạng	Dạng bản mỏng, mặt phẳng, dễ xếp lớp	Dạng khối 3D, hình học không gian phức tạp

Tiêu chí	Tấm phẳng	Khối không gian
Khả năng thi công bằng in 3D	Dễ in, ít tốn vật liệu, tiết kiệm thời gian	Khó hơn, tốn vật liệu hơn nhưng tối ưu về chức năng sinh học
Khả năng lắp ghép	Dễ dàng di chuyển, sắp xếp, thay thế từng tấm	Lắp ráp khó hơn, cần tính toán kỹ về vị trí và định hướng
Ứng dụng thực tế	Phù hợp cho sàn đáy biển bằng phẳng hoặc khu vực ít sóng	Phù hợp khu vực nước sâu, dòng chảy mạnh, đa dạng sinh học cao

Trong thiết kế rạn san hô nhân tạo, lựa chọn hình học và cấu trúc mô-đun đóng vai trò then chốt, không chỉ ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của công trình dưới tác động của sóng, dòng chảy mà còn quyết định hiệu quả sinh thái và tính ổn định lâu

dài của nền đáy biển. Để đánh giá toàn diện, việc so sánh giữa hai dạng hình học phổ biến là tấm phẳng và cấu kiện không gian sẽ giúp làm rõ những ưu điểm và hạn chế của từng phương án. Bảng 2 so sánh chi tiết hiệu quả của hai dạng thiết kế này:

Bảng 2. Bảng so sánh hai dạng cấu trúc tấm phẳng và khối không gian

Tiêu chí	Tấm phẳng	Khối không gian
Khả năng chịu lực	Tốt ở phương ngang nhưng yếu tại nút liên kết	Phân phối lực đều 3D, ổn định khi chịu sóng và dòng chảy
Khả năng phân tán năng lượng sóng	Hạn chế, năng lượng sóng dễ dội ngược trở lại	Hiệu quả cao, giảm động lực tác động lên nền đáy
Diện tích bám sinh vật	Hạn chế, tập trung ở bề mặt phẳng	Đa dạng, có nhiều khoang rỗng, khe nứt tự nhiên
Khả năng tương thích sinh học	Trung bình, phụ thuộc vào điều kiện mặt phẳng	Cao, đa dạng hóa môi trường sống, tạo hiệu ứng vi sinh học tốt
Khả năng chống xói lở nền đáy	Thấp, dễ gây xói lở cục bộ quanh chân tấm	Cao, nhờ phân tán lực tác động, giảm dòng chảy đáy

Cấu trúc khối không gian mang lại hiệu quả vượt trội so với tấm phẳng trong môi trường biển động, đặc biệt tại độ sâu 15m vùng đảo Cát Bà, nơi có dòng chảy và sóng ngăn ven bờ. Hình thái khối

không gian không chỉ tối ưu về mặt cơ học mà còn cung cấp môi trường sống phong phú cho hệ sinh thái biển. Do vậy, nghiên cứu lựa chọn in mô hình vật lý cấu trúc

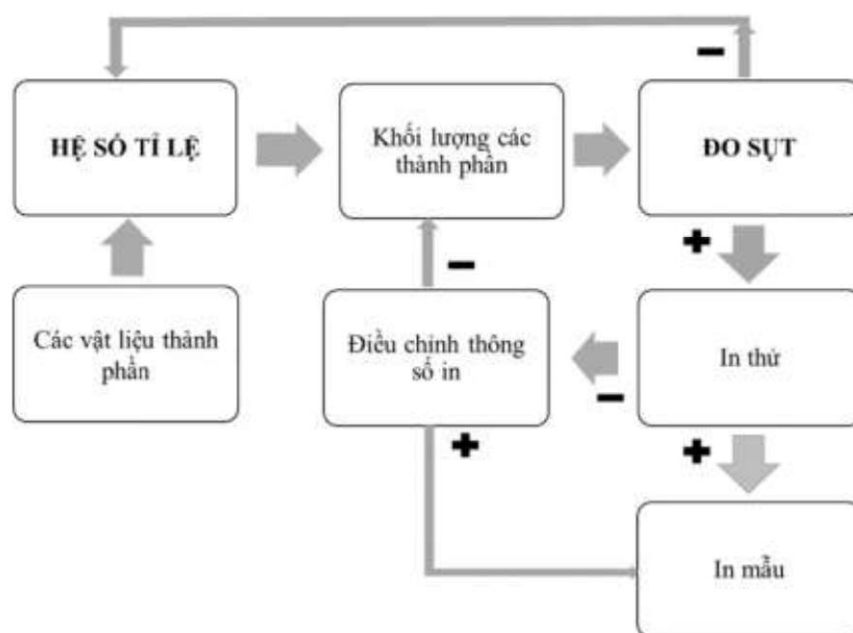
san hô nhân tạo cho khối không gian theo tỉ lệ nguyên mẫu.

### 3.3. Quy trình chế tạo rạn san hô nhân tạo bằng máy in bê tông 3D

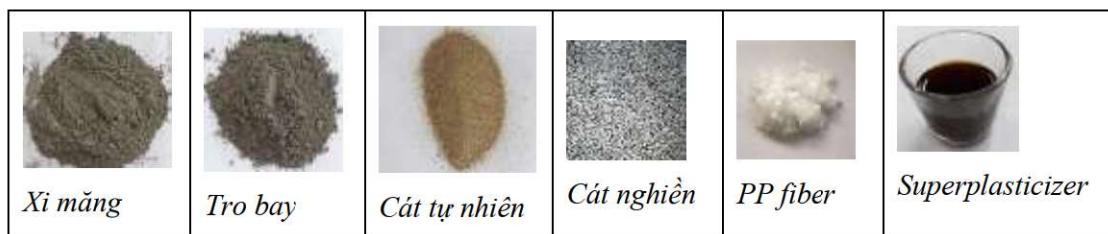
#### Bước 1: Chuẩn bị vật liệu

Lựa chọn các loại bê tông phù hợp với môi trường biển, có tính bền vững cao và khả năng chống ăn mòn. Đảm bảo rằng bê tông không chứa các thành phần gây hại cho môi trường biển và dễ dàng hòa

nhập với hệ sinh thái. Bê tông in được thiết kế theo qui trình như trên [3] với các vật liệu theo xu hướng 3Rs. 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 và cấp phối được lựa chọn thể hiện trong Bảng 3.



Hình 3. Quy trình thiết kế cấp phối



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

Bảng 3. Cấp phối bê tông in

Tên cấp phối	Xi măng	Tro bay	Nước	Cát tự nhiên	Cát nghiền	Sợi PP (%)	SP (%)
San hô	0.75	0.25	0.32	0.5	0.5	0.25	0.4

(Lưu ý: Chất kết dính = Xi măng và tro bay; các giá trị trong bảng là tỷ lệ theo khối lượng của từng thành phần so với chất kết dính)

*Bước 2: Thiết lập mô hình và thông số cho máy in bê tông 3D*

Điều chỉnh các thông số máy in bê tông 3D (như tốc độ in, độ chính xác, áp lực và loại đầu in) sao cho phù hợp với yêu cầu kỹ thuật của thiết kế. Máy in bê tông sẽ cần phải có khả năng in các cấu trúc phức tạp và đạt độ chính xác cao. Các hình ảnh minh họa cho Bước 2 được thể hiện trong các , và .

*Bước 3: Kiểm tra chất lượng và hoàn thiện sản phẩm*

Sau khi in 3D, cấu kiện rạn san hô nhân tạo được kiểm tra nhằm đảm bảo tuân thủ chính xác các thông số kỹ thuật theo bản vẽ thiết kế. Quá trình này bao

gồm đo đạc kích thước tổng thể và chi tiết bằng thiết bị chuyên dụng, đối chiếu hình học không gian 3D, kiểm tra bố trí khe hở, khoang rỗng, lỗ thông nước, cũng như đánh giá độ chính xác hình dạng và khả năng ghép nối giữa các mô-đun. Ngoài ra, cấu trúc được kiểm tra về độ đồng nhất vật liệu và độ đặc chắc bề mặt để phát hiện các sai lệch như nứt, rỗ khí hoặc biến dạng. Công tác này đảm bảo sản phẩm in đúng thiết kế, đủ điều kiện lắp đặt và đáp ứng yêu cầu về độ bền và hiệu quả sinh thái trong môi trường biển. Kết quả, cấu trúc không gian của san hô nhân tạo đề xuất được in và lắp ghép thành công như trong Hình 8.



Hình 5. Quy trình in



Hình 6. Thiết bị in



Hình 7. Thông số tốc độ đầu đùn



*Hình 8. San hô nhân tạo hoàn thiện*

#### **4. Kết luận**

Bài báo đã trình bày một cách có hệ thống quy trình thiết kế và chế tạo rạn san hô nhân tạo bằng công nghệ in bê tông 3D - một giải pháp tiên tiến kết hợp giữa kỹ thuật xây dựng hiện đại và mục tiêu bảo tồn sinh thái biển. Trên cơ sở phân tích các tiêu chí về chức năng sinh thái, hiệu quả kết cấu và tính khả thi thi công, nhóm nghiên cứu đã đề xuất hai mô hình thiết kế cơ bản là cấu kiện tám phẳng và cấu kiện khối không gian. Kết quả so sánh chỉ ra rằng mô hình khối không gian có nhiều ưu điểm vượt trội trong môi trường biển động, như khả năng phân tán năng lượng sóng,

ổn định cấu trúc, tạo môi trường sống đa dạng và chống xói lở nền đáy hiệu quả hơn.

Về vật liệu và công nghệ, nghiên cứu đã lựa chọn cấp phối bê tông phù hợp với môi trường biển, sử dụng tro bay và cát nghiền nhằm giảm thiểu tác động môi trường theo hướng phát triển bền vững. Công nghệ in bê tông 3D được áp dụng thành công để chế tạo cấu trúc rạn có hình học phức tạp với độ chính xác cao. Quy trình kiểm tra và hoàn thiện sản phẩm bảo đảm các cấu kiện in ra đạt yêu cầu kỹ thuật và sẵn sàng triển khai ngoài thực địa.

Tuy nhiên, nghiên cứu hiện mới dừng lại ở bước thiết kế và chế tạo mô

hình vật lý. Việc mô phỏng kết cấu và đánh giá khả năng làm việc của rạn trong điều kiện môi trường biển thực tế sẽ được tiếp tục triển khai trong các giai đoạn nghiên cứu tiếp theo nhằm tối ưu hóa thiết kế và đảm bảo hiệu quả lâu dài.

#### LỜI CẢM ƠN

Các tác giả xin trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ về vật liệu từ Công ty Liên doanh Bê tông Thành Hưng và sự hỗ trợ về phòng thí nghiệm tại Trường Đại học Hải Phòng, Việt Nam.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Matus, I. V., Alves, J. L., Góis, J., Vaz-Pires, P., & Barata da Rocha, A. (2024), Artificial reefs through additive manufacturing: A review of their design, purposes and fabrication process for

marine restoration and management., *Rapid Prototyping Journal*, vol. 30, no. 11, pp. 87-122, 2024, doi: 10.1108/RPJ-07-2023-0222.

2. L. T. Pham *et al.* (2022), 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.

3. Wang, Y. *et al.* (2021), Applications of additive manufacturing (AM) in sustainable energy generation and battle against COVID-19 pandemic: The knowledge evolution of 3D printing, *J. Manuf. Syst.*, vol. 60, no. August, pp. 709-733, 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2021.07.023.