

## Ứng dụng xi măng vi sinh trong gia cố nền đất cát

Hoàng Phương Tùng <sup>1</sup>, Đỗ Thanh Huyền <sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Khoa Xây dựng Cầu đường, trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng

<sup>2</sup> Khoa Quản lý Dự án, trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng

### TỪ KHÓA

Vi sinh vật  
Xi măng vi sinh  
Kết tủa CaCO<sub>3</sub>  
Cường độ nén một trục  
Gia cố nền đất cát

### TÓM TẮT

Bài báo này tập trung vào việc ứng dụng kỹ thuật sinh học trong việc sản xuất xi măng vi sinh nhằm hóa cứng đất cát rời. Vi sinh vật được nuôi cấy trong môi trường vô trùng tại phòng thí nghiệm đã đạt được độ hoạt động thích hợp cho các phản ứng hóa sinh nhằm tạo ra kết tủa CaCO<sub>3</sub>. Nghiên cứu đã sử dụng kỹ thuật bơm tuần hoàn với tốc độ thấp để đưa vi sinh vật và hóa chất vào hóa cứng mẫu cát. Cường độ nén của mẫu cát sau khi xử lý bằng vi sinh vật lên đến gần 5 MPa. Các phân tích vi cấu trúc đã chỉ ra rằng hàm lượng, vị trí phân bố của kết tủa CaCO<sub>3</sub> đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường độ nén của mẫu. Kết quả của nghiên cứu này có năng phát triển để ứng dụng xi măng vi sinh vào các công trình gia cố nền đất cát trong tương lai.

### KEYWORDS

Microorganism  
Biocement  
CaCO<sub>3</sub> precipitation  
Unconfined compressive strength  
Ground improvement

### ABSTRACT

This paper investigated an application of biological techniques to produce biocement for solydiyng loose sandy soil. Microorganisms have been grown in a sterile condition pf laboratory environment could achieve the appropriate urease activity for biochemical reactions, in order to produce CaCO<sub>3</sub> precipitation. The study employed a low-speed circulating pump technique to introduce solutions of microorganisms and chemicals into the sand columns. The compressive strength of biocement treated sand samples was up to 5 MPa. The microstructural analysis has shown that the calcium carbonate contents, distribution location of CaCO<sub>3</sub> precipitation were very important factors for enhancing the compressive strength of samples. The results of this study have the potential to develop the application of biocement in ground improvement of loose sandy soil in the future.

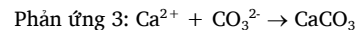
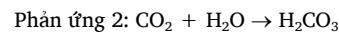
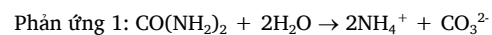
### 1. Giới thiệu

Kỹ thuật gia cố nền đất yếu được phát triển nhanh chóng trong địa kỹ thuật xây dựng những năm gần đây. Gia cố nền bao gồm hơn 30 kỹ thuật được phân loại bao gồm các nhóm như thay thế đất yếu, lèn chất đất sử dụng động lượng, cố kết đất sét yếu bằng cách hút nước, dùng hóa chất, sử dụng xi măng, vôi hoặc tro bay, và ổn định nền đất bằng nhiệt... ([1-2]).

Tuy nhiên, trong thời gian gần đây phương pháp địa kỹ thuật sinh học dựa trên công nghệ vi sinh đã được nghiên cứu như một biện pháp cải tạo đất mới. Phương pháp này có thể làm giảm tính thấm và tăng cường độ của đất rời tự nhiên dựa vào hai quá trình: (a) lấp đầy lỗ rỗng; và (b) tăng độ ma sát và dính kết giữa các hạt cát [3]. Phương pháp địa kỹ thuật sinh học này dựa trên nguyên lý phản ứng sinh hóa từ vi sinh vật để tăng độ pH sau đó tạo ra kết tủa calcium carbonat (CaCO<sub>3</sub>). Choi và cộng sự 2019 [4] đã xác định sử dụng kỹ thuật này để tạo ra kết tủa CaCO<sub>3</sub> thông qua các quá trình phản ứng của vi sinh vật gọi là phương pháp Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP). Phương pháp MICP sử dụng các vi sinh vật sống để thực hiện quá trình phân giải urea.

Sự kết tủa calcite tạo ra do vi sinh vật hứa hẹn có thể thay thế xi măng Portland thông thường trong kỹ thuật gia cố nền đất. Ngoài

ra, phương pháp này khá thân thiện với môi trường vì nó có thể giảm lượng khí thải CO<sub>2</sub> ra môi trường do quá trình này có thể xảy ra trong môi trường nhiệt độ tự nhiên, không giống như sản xuất xi măng Portland cần phải đốt một lượng nhiệt rất lớn (~ 1500 °C). MICP sử dụng vi sinh vật có khả năng phân giải urea dựa trên việc sử dụng enzyme urease của bản thân vi sinh vật và các hóa chất thêm vào (urea và calcium clorua). Các phản ứng sau (1-3) sẽ minh họa quá trình này [4]:



Phương pháp MICP đã cho thấy nhiều lợi ích về nâng cao tính ổn định của đất cát (tăng cường độ và độ cứng, khả năng chống hóa lỏng, và giảm tính thấm). Những kết quả này đã đạt được thông qua các thí nghiệm khác nhau, từ các thí nghiệm cột đất trong phòng [5-7] đến một số thí nghiệm kích thước lớn hơn [8-9], và các thí nghiệm tại hiện trường [10-11]. Tuy nhiên mối tương quan giữa hàm lượng CaCO<sub>3</sub> được sinh ra và sự tăng cường độ của mẫu cát gia cố vẫn chưa được hiểu biết rõ ràng, đặc biệt sự thiếu nghiên cứu xét trên cả hai khía cạnh số liệu đo đạc thực nghiệm và các kết quả phân tích vi cấu trúc.

\*Liên hệ tác giả: huyendt@dut.udn.vn

Nhận ngày 15/01/2022, sửa xong ngày 12/03/2021, chấp nhận đăng 08/09/2022

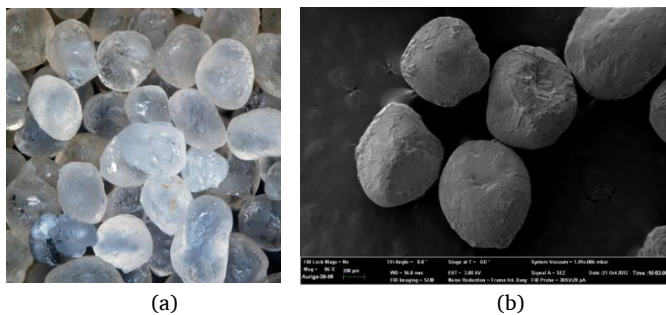
Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2022.403>

Bài báo này tập trung vào việc phân tích mối tương quan giữa kết tủa  $\text{CaCO}_3$  được sinh ra từ phương pháp MICP và sự tăng cường độ của đất cát rời thông qua các kết quả thí nghiệm nén một trục nở hông, cũng như các phân tích vi cấu trúc. Ngoài ra nghiên cứu cũng trình bày kỹ thuật nuôi cấy vi sinh có khả năng sản sinh enzyme urease, phương pháp đo độ hoạt động của vi sinh, các thí nghiệm xác định tính chất cơ học về cường độ vật liệu, xác định hàm lượng kết tủa  $\text{CaCO}_3$ , phân tích vi cấu trúc (Scanning Electron Microscope – SEM và Energy Dispersive X-ray Spectrometry – EDS).

## 2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm

### 2.1. Vật liệu cát

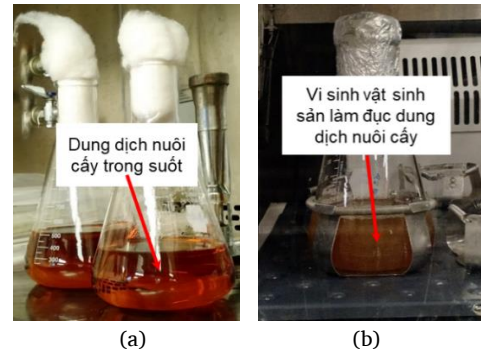
Cát sạch tiêu chuẩn được sử dụng cho việc tạo mẫu thử nghiệm có tính chất như sau: trọng lượng riêng là 2,65. Kích thước hạt của vật liệu cát nằm trong khoảng từ 0,6 mm (cỡ sàng # 30) đến 0,85 mm (cỡ sàng # 20), kích thước hạt trung bình là 0,73 mm,  $D_{10} = 0,58$  mm,  $D_{50} = 0,72$  mm, hàm lượng  $\text{CaCO}_3 = 0$  %. Hình ảnh hạt cát sạch được thể hiện trong Hình 1.



**Hình 1.** Cát sạch sử dụng cho thí nghiệm: (a) Hình ảnh hạt cát chụp gần [12], (b) Hình ảnh SEM của hạt cát [13].

### 2.2. Vi sinh và quá trình nuôi cấy

Vi sinh vật được dùng là *S. pasteurii* (American Type Culture Collection, ATCC 11859). Vi sinh vật giống được chuyển vào môi trường nuôi cấy bằng kỹ thuật vô trùng sử dụng tủ cấy vi sinh cấp độ 2 để giảm nguy cơ nhiễm bẩn môi trường nuôi cấy. Môi trường nuôi cấy đã được khử trùng trước gồm dung dịch nước đậu nành amonitrypticase (NH<sub>4</sub>-TSB) được điều chỉnh ở độ pH ~ 9. Sau đó, dung dịch nuôi cấy đã có vi sinh vật giống được cấy bằng một miếng bọt biển đã được khử trùng nhằm cung cấp oxy cho quá trình nuôi cấy, và được lắc đều trong tủ lắc có kiểm soát nhiệt độ trong 48 giờ với tốc độ lắc liên tục 160 vòng/phút ở 30 °C. Sau 48 giờ, mẻ vi sinh vật được thu hoạch và được bảo quản ở 4 °C cho các lần sử dụng khi sử dụng tiếp theo. Hình 2 cho thấy vi sinh vật đã sinh sản trong môi trường nuôi cấy. Hình 2(a) là dung dịch nuôi cấy trong suốt đã được khử trùng, trong khi đó Hình 2(b) cho thấy dung dịch trở nên đục do vi sinh vật đã sinh sản.

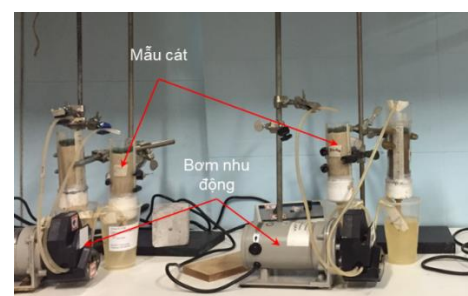


**Hình 2.** Nuôi cấy vi sinh vật: (a) Dung dịch nuôi cấy trong suốt đã được khử trùng, (b) Vi sinh vật sinh sản làm đục dung dịch nuôi cấy.

### 2.3. Phương pháp chế bị mẫu cát

Mẫu cát thí nghiệm được chế bị bằng phương pháp đầm ướt được giới thiệu bởi [14]. Cát khô được trộn với nước sạch để đạt được độ ẩm 5% trước khi vào các ống nhựa PVC. Sau đó, đất cát ẩm được đưa trong các cột PVC có kích thước đường kính 50 mm và chiều cao 100 mm. Để đạt được độ chặt đồng đều như nhau trong mỗi lớp, lượng cát đã xác định trước được thêm vào thành 10 lớp liên tiếp có độ dày bằng nhau (~ 10 mm/lớp) trong mỗi ống mẫu. Mỗi lớp cát được đầm nhẹ để đạt được hệ số rỗng như nhau trong ( $e \sim 0.58 - 0.6$ ). Cả hai đầu trên và dưới của mỗi mẫu đều được gắn một lớp lọc 3-M Scotch Brite để điều chỉnh dòng chảy, tránh tắc nghẽn. Đầu dưới của mỗi cột cũng được gắn thêm một nắp nhựa và đã được lắp đầy sỏi sạch để ngăn chặn sự rửa trôi các hạt cát.

Sau khi mẫu cát được đưa vào ống, quá trình MICP được tiến hành bằng cách bơm dung dịch vi sinh, urea và  $\text{CaCl}_2$  theo các trình tự. Đầu tiên, 30 mL dung dịch vi sinh (hoạt tính urease ~ 5-6 mM urea/phút) đã được bơm từ trên của mẫu thấm xuyên qua mẫu bằng bơm nhu động (tốc độ ~5 mL/phút) liên tục trong 4 tiếng, và sau đó dung dịch được xả hết từ phía dưới mẫu. Bước thứ hai, 500 mL của các dung dịch urea và  $\text{CaCl}_2$  1,0-M được đưa vào bằng máy bơm trong 20 giờ. Sau khi hoàn thành quá trình xử lý 24 giờ này, các mẫu cát sau đó được xả hết dung dịch và lặp lại cho đến khi hoàn thành tổng cộng 05 chu kỳ như vậy để đạt được hàm lượng kết tủa  $\text{CaCO}_3$  nhất định. Tổng cộng có 8 mẫu cát được xử lý bằng phương pháp MICP. Sơ đồ thiết lập các cột cát thí nghiệm được thể hiện trong Hình 3.



**Hình 3.** Quá trình xi măng vi sinh hóa (MICP) các cột cát.

2.4. Các phương pháp thí nghiệm

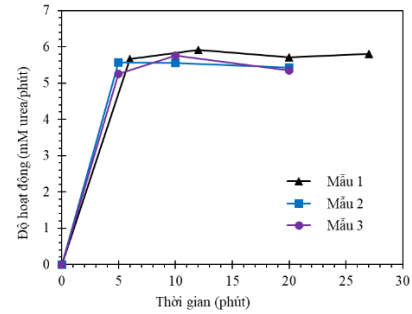
Để đánh giá khả năng hoạt động của vi sinh vật, nghiên cứu đã sử dụng phương pháp đo độ dẫn điện (Electrical Conductivity-EC) của dung dịch vi sinh vật khi phân hủy urea. Ngoài ra mật độ vi sinh vật cũng được xác định bằng kỹ thuật optical density (OD<sub>600</sub>).

Các cột cát xi măng sinh học đã được thử nghiệm để đánh giá các đặc tính kỹ thuật, bao gồm cường độ nén mô trực nở hông, phân tích vi cấu trúc (SEM, EDS), và hàm lượng CaCO<sub>3</sub>. Quá trình thí nghiệm xác định cường độ nén nở hông của mẫu được tiến hành theo các bước sau. Sau khi lấy mẫu ra khỏi khuôn nhựa PVC, mẫu được đặt trong tủ sấy ở nhiệt độ 50 °C trong 48 giờ để đạt trạng thái khô hoàn toàn. Đo đường kính, từ trên xuống, giữa và dưới, lấy giá trị trung bình của các phép đo và ghi lại giá trị trung bình dưới dạng đường kính trên bảng dữ liệu. Quy trình tương tự với chiều cao và cân nặng trước khi thử mẫu. Đặt mẫu thử vào thiết bị nén và đặt vào giữa tấm đáy. Điều chỉnh thiết bị sao cho tấm trên vừa tiếp xúc với mẫu và đặt các vòng quay tải trọng và biến dạng bằng không. Đặt tải để thiết bị tạo ra biến dạng dọc trục với tốc độ 1 mm/phút. Tiếp tục gia tải cho đến khi mẫu bị phá hoại. Mẫu phá hoại được lấy ra khỏi thiết bị nén và lấy khoảng 5 – 40 g trong số các mẫu cát gia cố sinh học từ trung tâm của cột cát để sử dụng cho thí nghiệm xác định hàm lượng CaCO<sub>3</sub> bằng phương pháp hòa tan kết tủa sử dụng dung dịch HCL 2M. Đồng thời các thí nghiệm về vi cấu trúc như SEM và EDS cũng được tiến hành nhằm xác định hình thái và hàm lượng khoáng chất calite sinh ra do các phản ứng sinh hóa.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Mật độ và độ hoạt động của vi sinh vật

Sau 48 giờ, các mẻ vi sinh vật được thu hoạch để kiểm tra sự sinh sản của vi sinh vật trong dung dịch nuôi cấy. Quan sát bằng mắt cho thấy dung dịch nuôi cấy chuyển từ trong sang đục do số lượng vi sinh vật sinh sản ra (Hình 2). Sau khi chắc chắn vi sinh vật được sinh sản trong dung dịch nuôi cấy, mẫu vi sinh được lấy ra để kiểm tra mật độ bằng phương pháp OD<sub>600</sub>. Kết quả đo đạc cho thấy OD<sub>600</sub> ~1.6-1.8, tương ứng với 10<sup>9</sup>/ml vi sinh vật. Để chắc chắn các vi sinh vật được nuôi cấy có khả năng thủy phân urea, nghiên cứu đã tiến hành đo độ hoạt động của vi sinh vật theo phương pháp đo sự thay đổi độ dẫn điện được đề xuất bởi Whiffin 2004 [15]. Kết quả về độ hoạt động được trình bày trong Hình 4 cho thấy rằng độ hoạt động của dung dịch vi sinh nằm trong khoảng 5-6 mM urea/phút. Điều này cho thấy dung dịch vi sinh nuôi cấy có khả năng sử dụng cho phương pháp MICP. Các nghiên cứu trước cũng đã sử dụng dung dịch vi sinh với độ hoạt động tương tự [3], [4], [16]. Vì vậy dung dịch vi sinh này thích hợp cho việc tạo mẫu cát MICP ở những bước tiếp theo.



Hình 4. Độ hoạt động của vi sinh vật

3.2. Hàm lượng kết tủa CaCO<sub>3</sub>

Kết tủa CaCO<sub>3</sub> sinh ra trong mẫu cát được xác định bằng phương pháp hòa tan kết tủa sử dụng dung dịch HCL 2M. Kết quả được trình bày trong Bảng 1 cho thấy rằng hàm lượng CaCO<sub>3</sub> nằm trong khoảng 1,5 đến 4,0 %.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm xác định hàm lượng kết tủa CaCO<sub>3</sub>.

Ký hiệu mẫu	Trước thí nghiệm (g)	Sau thí nghiệm (g)	Chênh lệch khối lượng (g)	Hàm lượng CaCO <sub>3</sub> (%)
1	6,16	5,58	0,58	3,766
2	18,21	16,38	1,83	4,020
3	41,49	38,8	2,69	2,593
4	7,98	7,68	0,30	1,504
5	8,22	7,60	0,62	3,017
6	10,99	10,27	0,72	2,621
7	9,87	9,47	0,40	1,621
8	8,12	7,74	0,38	1,872

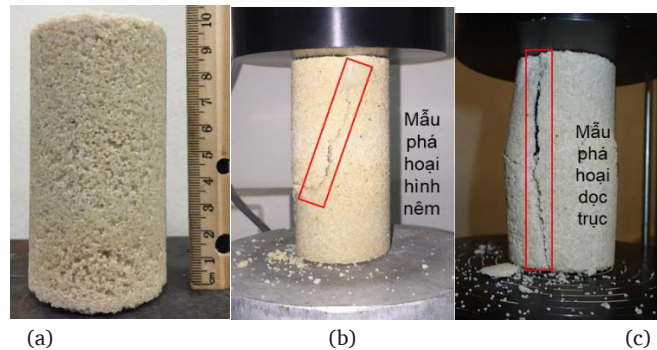
3.3. Cường độ nén nở hông và mối quan hệ với hàm lượng CaCO<sub>3</sub>

Mẫu cát sau quá trình xử lý xi măng sinh học MICP được tháo ra khỏi ống nhựa PVC có thể tự đứng được nhờ các liên kết của kết tủa CaCO<sub>3</sub> trong mẫu cát (Hình 5(a)). Điều này cũng có thể được quan sát ở các nghiên cứu trước như của [14]. Hình 5(b)&(c) cho thấy mẫu cát bị phá hoại dưới tác dụng của lực nén, đường phá hoại chạy theo chiều dài mẫu tạo nên mặt phá hoại hình nêm và dọc trục thường thấy đối với các mẫu cát gia cố xi măng Portland.

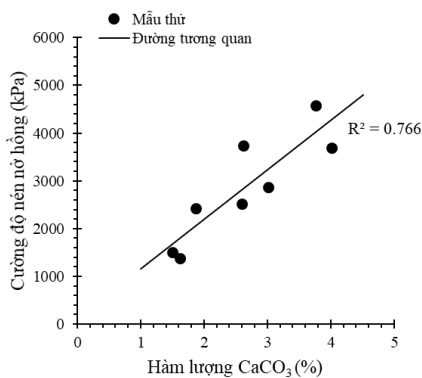
Kết quả cường độ nén và mối quan hệ với hàm lượng kết tủa CaCO<sub>3</sub> được biểu diễn trên Hình 6. Từ Hình 6 có thể thấy rằng mối tương quan giữa hàm lượng kết tủa CaCO<sub>3</sub> và cường độ nén là tương đối lớn với hệ số R<sup>2</sup>=0,766. Điều này chứng tỏ hàm lượng kết tủa CaCO<sub>3</sub> đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường độ của mẫu cát được xi măng hoá bằng phương pháp MICP. Hàm lượng CaCO<sub>3</sub> càng tăng thì cường độ nén càng tăng, khi hàm lượng kết tủa CaCO<sub>3</sub> đạt khoảng 2 % thì tương ứng với cường độ nén khoảng 2500 kPa. Tuy nhiên khi hàm lượng CaCO<sub>3</sub> tăng lên 4 % thì cường độ nén tăng đến

gần 5000 kPa. Điều này cho thấy rằng khi hàm lượng  $\text{CaCO}_3$  tăng gấp đôi thì dẫn đến cường độ của mẫu cũng tăng gấp đôi. Khi lượng kết tủa  $\text{CaCO}_3$  thấp thì chúng chủ yếu xuất hiện trên bề mặt hạt cát và tại các điểm tiếp xúc giữa các hạt cát, khi hàm lượng cao thì các kết tủa này lấp đầy các lỗ rỗng giữa các hạt cát tạo nên một khối đặc kín hơn, từ đó dẫn đến cường độ của mẫu cao hơn nhiều so với các mẫu có

hàm lượng kết tủa thấp. Điều này sẽ được bàn luận chi tiết hơn ở phần phân tích vi cấu trúc. Mặc dù hàm lượng  $\text{CaCO}_3$  là một tác nhân quan trọng trong việc tăng cường độ nén của mẫu, các yếu tố ảnh hưởng khác còn phải kể đến như vị trí kết tủa  $\text{CaCO}_3$  phân bố trong mẫu cát. Trong trường hợp  $\text{CaCO}_3$  kết tủa nhiều tại vị trí tiếp xúc giữa các hạt cát thì cường độ của mẫu sẽ tăng lên đáng kể [5], [17].



**Hình 5.** Mẫu cát đã được cứng hóa dùng phương pháp MICP: (a) Mẫu nguyên vẹn sau khi tháo ra từ ống nhựa PVC, (b) Mẫu phá hoại theo dạng hình nêm, (c) Mẫu phá hoại dọc theo trục.



**Hình 6.** Mối tương quan giữa cường độ nén nở hông và hàm lượng  $\text{CaCO}_3$ .

Quan sát số liệu tại Hình 6 cho thấy các mẫu có hàm lượng kết tủa  $\text{CaCO}_3$  lớn hơn thì cường độ chịu nén đạt giá trị cao hơn. Các mẫu cát được xử lý bằng MICP có tính chất giòn và bị phá hoại khi biến dạng đạt khoảng 3 – 4 % thường thấy trong các thí nghiệm nén mẫu nghiên cứu trước đây [18], [19]. Sự thiếu đồng nhất trong cát được xử lý bằng MICP dẫn đến độ bền của cường độ thấp hơn. Quan sát sự phá hoại của các mẫu này cho thấy một số mẫu phá hoại theo dạng hình nêm chứng tỏ các mẫu này không đồng nhất về sự phân bố kết tủa  $\text{CaCO}_3$  (Hình 5(b)), trong khi đó các mẫu bị phá hoại dọc trục thì chứng tỏ có sự phân bố đều về  $\text{CaCO}_3$  trong mẫu nên tạo ra sự đồng đều về cường độ (Hình 5(c)). Kết quả tương tự đã được báo cáo bởi [5], [20].

### 3.4. Phân tích vi cấu trúc của mẫu cát đã được xử lý bằng phương pháp MICP

Hình 7 cho thấy hình ảnh phân tích SEM của tinh thể kết tủa calcite trong mẫu cát xi măng sinh học. Hình ảnh thu được từ SEM ban đầu cho thấy kết tủa  $\text{CaCO}_3$  sử dụng phương pháp MICP đã kết tụ

lại với nhau tạo thành các cụm tinh thể lớn với độ dày đáng kể từ 70 đến 200  $\mu\text{m}$ . Đáng chú ý rằng các cụm kết tủa  $\text{CaCO}_3$  lớn tập trung tại các điểm tiếp xúc giữa các hạt cát, đồng thời chúng tích tụ bên trong và dần lấp đầy các khoảng trống giữa các hạt cát liền kề. Chính điều này đã làm tăng đáng kể cường độ của mẫu như đã phân tích bên trên. Hình ảnh phân tích SEM cho thấy rằng hàm lượng, vị trí phân bố của kết tủa  $\text{CaCO}_3$  đóng vai trò quan trọng trong việc liên kết các hạt cát, thay đổi bề mặt hạt cát trở nên sần sùi hơn khi so sánh với bề mặt trơn nhẵn của hạt cát trước khi xử lý (Hình 1), cũng như lấp đầy lỗ rỗng giữa các hạt, từ đó tăng cường độ của mẫu cát rời. Các cụm tinh thể được quan sát ở đây gần giống với các nghiên cứu được nêu ra trước đó từ [3], [5], [17]. Vì vậy phương pháp MICP sử dụng trong thí nghiệm này đã thành công trong việc tạo ra kết tủa  $\text{CaCO}_3$ . Sự phân bố kết tủa  $\text{CaCO}_3$  phụ thuộc vào nhiều yếu tố như nồng độ chất nền, thời gian lưu và tốc độ dòng chảy bổ sung hóa chất [21], [22], mức độ bão hòa khác nhau, mức độ hoạt động của enzyme urease, nhiệt độ, và các yếu tố môi trường khác [5], [23].

Tuy nhiên để chắc chắn các tinh thể kết tủa là  $\text{CaCO}_3$ , nghiên cứu đã sử dụng kỹ thuật phân tích EDS để kiểm tra và cho kết quả trên Hình 8. Hình 8(a) là mẫu SEM được dùng để phân tích, tương tự như Hình 7(b) dễ dàng thấy rằng kết tủa  $\text{CaCO}_3$  bao bọc quanh hạt cát, kết tủa tại vị trí tiếp xúc cũng như lấp đầy lỗ rỗng. Hình 8(b) thể hiện khoáng chất silica (màu trắng sáng) chính tại các vị trí hạt cát không bị che phủ bởi kết tủa  $\text{CaCO}_3$ . Trong khi đó, Hình 8(c) cho thấy rằng khoáng chất calcite (màu sáng trắng) ứng với vị trí kết tủa  $\text{CaCO}_3$  bao phủ trên Hình 8(a). Điều này chứng tỏ rằng các tinh thể  $\text{CaCO}_3$  đã phân bố tại các vị trí đã thảo luận tại phần phân tích SEM bên trên. Hình 8(d) cho thấy phổ EDS đã chỉ ra các đỉnh phổ của calcite và silica rất rõ ràng, chứng tỏ rằng tinh thể kết tủa sinh ra từ phương pháp MICP là calcite.



**Hình 7.** Hình ảnh SEM của mẫu cát cứng hóa bởi phương pháp MICP: (a) Hình ảnh ở độ phóng đại 20x, (b) Hình ảnh ở độ phóng đại 50x.

Phân tích vi cấu trúc của mẫu cát được xi măng hóa bằng phương pháp MICP đã chứng tỏ rằng kết tủa sinh ra là  $\text{CaCO}_3$ . Đồng thời phân tích này chỉ ra rằng sự phân bố của kết tủa đã đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường độ của mẫu cát rời.

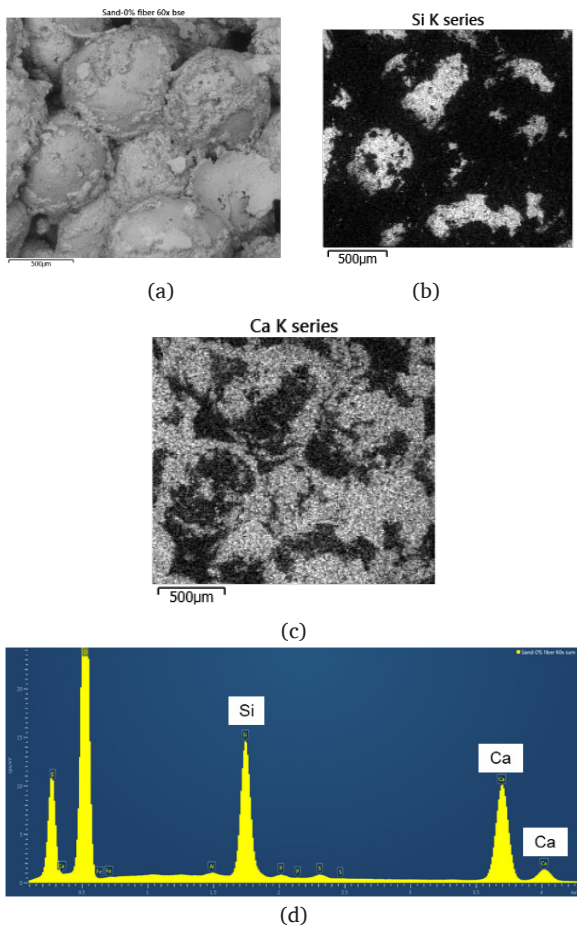
**4. Kết luận và kiến nghị**

Bài báo đề xuất việc ứng dụng công nghệ vi sinh để sản xuất xi măng vi sinh nhằm mục đích hóa cứng các vật liệu cát rời, phương pháp này được gọi là MICP. Nghiên cứu tập trung vào hai yếu tố chính: (1) nuôi cấy thành công vi sinh vật có khả năng tạo ra enzyme urease và (2) đánh giá các đặc tính kỹ thuật như cơ học và vi cấu trúc của mẫu cát xi măng vi sinh. Các điểm sau đây nêu sẽ nêu bật các kết luận chính và kiến nghị của nghiên cứu này:

- Kỹ thuật nuôi cấy đã sản xuất được dung dịch vi sinh vật với độ hoạt động 5-6 mM urea/phút là thích hợp cho quá trình MICP.
- Phương pháp bơm tuần hoàn tạo thẩm thấu đứng thích hợp cho quá trình xử lý các mẫu cát. Vì vậy khả năng áp dụng kỹ thuật này trong các thí nghiệm mẫu lớn hoặc trên thực địa là khả thi.
- Kết tủa từ quá trình MICP là  $\text{CaCO}_3$  được xác định thông qua các phân tích vi cấu trúc.
- Hàm lượng kết tủa đóng một vai trò quan trọng trong việc tăng cường độ của mẫu cát. Mối tương quan giữa hàm lượng kết tủa và cường độ nén nở hông là khá cao, được đánh giá thông qua hệ số  $R^2$ .
- Vị trí phân bố kết tủa  $\text{CaCO}_3$  cũng góp phần vào việc tăng cường độ của mẫu cát.
- Để đưa việc ứng dụng xi măng vi sinh trong các công trình thực tế thì cần phải tiếp tục tập trung nghiên cứu vào các kỹ thuật sản xuất nuôi cấy vi sinh vật với khối lượng lớn, kỹ thuật bảo quản, các ứng xử của vi sinh vật đối với các loại đất khác nhau trong tự nhiên, các tính chất kỹ thuật khác cũng cần được tìm hiểu thêm như tính thấm, cường độ chống cắt, lực dính, góc nội ma sát, ...

**Tài liệu tham khảo**

[1]. M. Terashi and I. Juran, "Ground Improvement – State of the Art," *ISRM Int. Symp.*, 2000.  
 [2]. J. Chu, S. Varaksin, U. Klotz, and P. Menge, "Construction processes," in *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*, 2009, vol. 4, pp. 3006–3135.  
 [3]. T. Hoang, J. Alleman, B. Cetin, and S.-G. Choi, "Engineering Properties of Biocementation Coarse- and Fine-Grained Sand Catalyzed By Bacterial Cells



**Hình 8.** Kết quả phân tích EDS của mẫu của mẫu cát cứng hóa bởi phương pháp MICP: (a) Hình ảnh SEM dùng để phân tích EDS, (b) Khoáng chất Silica đại diện cho hạt cát, (c) Khoáng chất Calcite đại diện cho kết tủa, (d) Phổ EDS spectrum.

- and Bacterial Enzyme,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 32, no. 4, pp. 1–15, 2020.
- [4]. S. Choi, T. Hoang, and S. Park, “Undrained Behavior of Microbially Induced Calcite Precipitated Sand with Polyvinyl Alcohol Fiber,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 1214, pp. 1–11, 2019.
- [5]. L. Cheng, R. Cord-Ruwisch, and M. A. Shahin, “Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation,” *Can. Geotech. J.*, vol. 50, no. 1, pp. 81–90, 2013.
- [6]. J. T. DeJong, M. B. Fritzges, and K. Nüsslein, “Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 132, no. 11, pp. 1381–1392, 2006.
- [7]. V. S. Whiffin, L. A. van Paassen, and M. P. Harkes, “Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique,” *Geomicrobiol. J.*, vol. 24, no. February, pp. 417–423, 2007.
- [8]. L. A. van Paassen, M. P. Harkes, G. A. Van Zwieten, W. H. Van Der Zon, W. R. L. Van Der Star, and M. C. M. Van Loosdrecht, “Scale up of BioGrout: A biological ground reinforcement method,” *Proc. 17th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. Acad. Pract. Geotech. Eng.*, vol. 3, pp. 2328–2333, 2009.
- [9]. W. R. L. van der Star, W. K. van Wijngaarden-van Rossum, L. A. van Paassen, and L. R. van Baalen, “Stabilization of gravel deposits using microorganisms,” in *Proceedings of the 15th European conference on Soil mechanics and Geotechnical engineering*, 2011, pp. 85–90.
- [10]. M. B. Burbank, T. J. Weaver, T. L. Green, B. C. Williams, and R. L. Crawford, “Precipitation of calcite by indigenous microorganisms to strengthen liquefiable soils,” *Geomicrobiol. J.*, vol. 28, no. February, pp. 301–312, 2011.
- [11]. M. G. Gomez *et al.*, “Field-scale bio-cementation tests to improve sands,” *Proc. Inst. Civ. Eng. - Gr. Improv.*, vol. 168, no. 3, pp. 206–216, 2015.
- [12]. US Silica, “ASTM SANDS C-109, standard 20/30.” [Online]. Available: <https://www.ussilica.com/products/astm-sands>. [Accessed: 16-May-2022].
- [13]. K. Alshibi, “SEM images of ASTM 20/30 Sand,” 2013. [Online]. Available: [https://alshibli.utk.edu/research/MGM/archive-page.php?d=archives/astm2030&t=SEM images of ASTM 20-30 Ottawa Sand](https://alshibli.utk.edu/research/MGM/archive-page.php?d=archives/astm2030&t=SEM%20images%20of%20ASTM%2020-30%20Ottawa%20Sand)). [Accessed: 16-May-2022].
- [14]. T. Hoang, J. Alleman, B. Cetin, K. Ikuma, and S. G. Choi, “Sand and silty-sand soil stabilization using bacterial enzyme induced calcite precipitation (BEICP),” *Can. Geotech. J.*, vol. 56, no. 6, pp. 808–822, 2018.
- [15]. V. S. Whiffin, “Microbial CaCO<sub>3</sub> precipitation for the production of biocement,” Murdoch University, Australia, 2004.
- [16]. S. Choi, T. Hoang, E. J. Alleman, and J. Chu, “Splitting Tensile Strength of Fiber-Reinforced and Biocemented Sand,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 9, pp. 1–5, 2019.
- [17]. M. J. Cui, J. J. Zheng, R. J. Zhang, H. J. Lai, and J. Zhang, “Influence of cementation level on the strength behaviour of bio-cemented sand,” *Acta Geotech.*, vol. 12, no. 5, pp. 971–986, 2017.
- [18]. D. Bernardi, J. T. Dejong, B. M. Montoya, and B. C. Martinez, “Bio-bricks: Biologically cemented sandstone bricks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 55, pp. 462–469, 2014.
- [19]. S.-G. Choi, K. Wang, and J. Chu, “Properties of biocemented, fiber reinforced sand,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 120, pp. 623–629, 2016.
- [20]. L. A. van Paassen, M. C. M. Van Loosdrecht, M. Pieron, A. Mulder, D. J. M. Ngan-Tillard, and T. J. M. Van Der Linden, “Strength and deformation of biologically cemented sandstone,” in *Proc., Rock Engineering in Difficult Ground Conditions - Soft Rocks and Karst*, 2010, pp. 405–410.
- [21]. A. Al Qabany, K. Soga, and C. Santamarina, “Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 138, no. 8, pp. 992–1001, 2012.
- [22]. A. Al Qabany and K. Soga, “Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils,” *Geotechnique*, vol. 63, no. 4, pp. 331–339, 2013.
- [23]. L. Cheng, M. A. Shahin, and D. Mujah, “Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 143, no. 1, p. 04016083, 2017.