

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN**

**Nguyễn Thị Quỳnh Anh**

**NGHIÊN CỨU SỰ TÍCH LŨY VÀ ĐẶC TÍNH CỦA KALI-  
PHYTOLITH TRONG MỘT SỐ LOÀI THỰC VẬT GIÀU SILIC**

Chuyên ngành: Khoa học môi trường

Mã số: 9440301.01

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC MÔI TRƯỜNG**

**Hà Nội - 2023**

Công trình được hoàn thành tại  
Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - ĐHQGHN

Người hướng dẫn khoa học:

PGS.TS. Nguyễn Ngọc Minh

TS. Nguyễn Ngọc Tùng

Phản biện: PGS.TS. Phạm Quang Hà

Phản biện: PGS.TS. Tăng Thị Hạnh

Phản biện: PGS.TS. Bùi Thị Kim Anh

Luận án đã bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ họp  
tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên vào hồi 9 giờ 00 ngày 06  
tháng 01 năm 2023

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam;
- Trung tâm Thư viện và Tri thức số, Đại học Quốc gia Hà Nội

## MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết của nghiên cứu

Kali là một trong ba nguyên tố dinh dưỡng quan trọng nhất cho sự sinh trưởng và phát triển của thực vật. Kali tham gia nhiều quá trình quan trọng như quang hợp, tổng hợp glucit, điều khiển khả năng thẩm thấu của thành tế bào và chế độ giữ nước, vận chuyển vật chất, tăng khả năng kháng bệnh, tăng sức chống chịu cơ học cho cây. Kali có sẵn trong đất ở dạng hòa tan, hấp phụ, trao đổi hoặc trong cấu trúc khoáng vật và có thể được bổ sung cho cây trồng thông qua phân bón. Việt Nam không có mỏ nên không thể tự sản xuất phân bón kali và bị phụ thuộc hoàn toàn vào nguồn nhập khẩu, khi có biến động trên thị trường kali thế giới sẽ là những bất lợi lớn cho ngành trồng trọt. Ngoài ra, việc bón phân quá mức có thể dẫn đến sự thiếu hiệu quả về dinh dưỡng và lãng phí kali. Do đó, các biện pháp can thiệp để tăng hiệu quả sử dụng phân bón và giảm đầu vào dinh dưỡng, có vai trò quan trọng trong giảm chi phí sản xuất nông nghiệp. Mặt khác, việc tìm kiếm các nguồn kali thay thế là hết sức cần thiết. Trong bối cảnh đó, nguồn kali trong sinh khối, đặc biệt là sinh khối giàu phytolith, có thể là một nguồn kali mới với nhiều triển vọng.

Phytolith là cấu trúc silic được tạo ra trong tế bào hoặc giữa các khoảng gian bào của tế bào thực vật (Piperno, 1988). Chúng xuất hiện ở hầu hết các loại mô thực vật và trên tất cả các nhóm thực vật sống dưới dạng các mảnh riêng lẻ hoặc dưới dạng các cấu trúc xấp rỗng. Phytolith có mặt ở rất nhiều loài thực vật giàu silic vì vậy phytolith góp phần đáng kể vào chu trình silic trong tự nhiên. Sự hình thành phytolith khởi nguồn từ quá trình hút thu silic từ dung dịch đất. Sau đó, silic cùng với các nguyên tố dinh dưỡng khác được vận chuyển đến các mô, tế bào trong toàn bộ cơ thể thực vật. Silic trong một số điều kiện nhất định có thể kết tủa để hình thành phytolith. Trong quá trình kết tủa, phytolith có thể hình thành các cấu trúc khoang kín, nhốt giữ một phần chất hữu cơ, kali và các nguyên tố dinh dưỡng khác (Ca,

Mg, Al, P). Khi thực vật phân hủy, phytolith và các nguyên tố bị nhốt giữ trong cấu trúc phytolith được trả lại vào đất. Trong môi trường đất và trầm tích, phytolith có thể bị hòa tan nhanh chóng hoặc tồn tại hàng trăm năm, thậm chí hàng ngàn năm (*Kögel-Knabner và nnk, 2010*). Vẫn còn nhiều tranh cãi liên quan đến số phận của phytolith, và vì vậy, số phận của các nguyên tố trong cấu trúc phytolith (trong đó có K) vẫn chưa được sáng tỏ (*Santos và nnk, 2012*). Các nghiên cứu về phytolith hiện tập trung vào chất hữu cơ trong phytolith (C-phytolith) trong khi đó các nguyên tố khác trong phytolith lại ít được quan tâm. Hiện có khá ít các nghiên cứu về quá trình hình thành, phân bố của các chất dinh dưỡng, đặc biệt là kali trong cấu trúc phytolith (K-phytolith) cũng như các cách thức và mức độ nó được giải phóng khỏi phytolith ở các loài khác nhau.

Vì vậy, “*Nghiên cứu sự tích lũy và đặc tính của K-phytolith trong một số loài thực vật giàu silic*” sẽ làm rõ quá trình hình thành phytolith, sự tích tụ K-phytolith ở một số sinh khối phụ phẩm nông nghiệp như rơm rạ, lá ngô, lá mía và ở một số loài cây như guột, lau và dương xỉ. Đồng thời, nghiên cứu cũng khảo sát cơ chế và một số các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hòa tan phytolith giải phóng các nguyên tố dinh dưỡng, đặc biệt là K-phytolith. Các phương pháp tiên tiến được sử dụng để phân tích các đặc điểm hình thái, cấu trúc phytolith gồm có chụp cắt lớp hiển vi tia X ( $\mu$ CT), chụp ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) và nhiều công cụ khác. Các thí nghiệm phân tích các cơ chế giải phóng, các yếu tố tác động kiểm soát quá trình hòa tan phytolith giải phóng kali được xây dựng dựa trên các công bố uy tín gần đây của nghiên cứu sinh về phytolith. Các kết quả nghiên cứu được mong đợi sẽ mang lại những thông tin bổ sung về đặc điểm K-phytolith để từ đó có cơ sở khoa học tận dụng nguồn kali này trong nông nghiệp.

## **2. Mục tiêu nghiên cứu**

Mục tiêu chung: Luận án nhằm đánh giá quá trình hình thành, mức độ tích lũy và đặc tính của K-phytolith.

### Các mục tiêu cụ thể:

- 1) Phát hiện và đánh giá mức độ tích lũy K-phytolith trong các loài thực vật giàu silic (và kali) phổ biến ở Việt Nam như lúa, ngô, mía, lau, guột và dương xỉ.
- 2) Mô tả đặc điểm hình thái, cấu trúc phytolith và đánh giá mối quan hệ giữa các đặc tính của phytolith và khả năng hòa tan giải phóng K-phytolith trong các mẫu tách từ một số loài thực vật giàu silic.
- 3) Đề xuất tiềm năng ứng dụng của vật liệu giàu K-phytolith trong lĩnh vực nông nghiệp và sản xuất phân bón.

### **3. Nội dung nghiên cứu**

- ❖ Đánh giá khả năng tích lũy silic, hình thành phytolith và các đặc tính hình thái, cấu trúc, thành phần hóa học cơ bản của phytolith trong các loài thực vật nghiên cứu.
- ❖ Khảo sát đặc tính hòa tan của phytolith dưới tác động của một số yếu tố môi trường (hàm lượng CO<sub>2</sub> và nhiệt độ).
- ❖ Phân tích đặc điểm hòa tan và giải phóng kali từ phytolith và đánh giá ảnh hưởng của CO<sub>2</sub> đến các quá trình này từ đó xác định vai trò kìm hãm hoặc thúc đẩy quá trình giải phóng kali từ phytolith.
- ❖ Đề xuất giải pháp ứng dụng của K-phytolith có nguồn gốc từ các thực vật giàu silic trong vai trò cung cấp chất dinh dưỡng cho đất và cây trồng.

### **4. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn của nghiên cứu**

Ý nghĩa khoa học: Luận án bổ sung cơ sở dữ liệu về cấu trúc phytolith có nguồn gốc một số thực vật giàu silic trong lúa, mía, ngô và lau, dương xỉ, guột. Luận án cung cấp những bằng chứng khoa học về tính chậm tan của phytolith, cũng như động học quá trình giải phóng của các nguyên tố dinh dưỡng (đặc biệt là K) có mặt trong cấu trúc phytolith. Mặt khác, luận án chứng minh ảnh hưởng CO<sub>2</sub> và nhiệt độ có thể thúc đẩy hoặc hạn chế tốc độ hòa tan và giải phóng các nguyên tố dinh dưỡng từ phytolith.

Ý nghĩa thực tiễn: Các kết quả khảo sát tiềm năng của vật liệu giàu kali và silic là tiền đề cho các nghiên cứu để phát triển dạng vật liệu này ứng dụng trong sản xuất phân bón và cải tạo đất.

## **5. Những đóng góp mới của luận án**

- Cơ sở dữ liệu về hình thái, cấu trúc và đặc tính phân bố phytolith trong các loài thực vật khác nhau dựa trên kỹ thuật hiện đại về phân tích hình thái (chụp cắt lớp siêu hiển vi). Đồng thời, các dữ liệu này góp phần giải thích chi tiết hơn về vai trò của phytolith đối với thực vật.

- Luận giải được cơ chế hình thành, tích lũy và chuyển hóa phytolith trong hệ đất – cây thông qua các thí nghiệm phản ánh khả năng phân hủy phytolith theo thời gian, và ảnh hưởng của các yếu tố môi trường như nhiệt độ và nồng độ CO<sub>2</sub>. Các dữ liệu này là cơ sở khoa học cho hướng nghiên cứu ứng dụng dạng vật liệu giàu phytolith trong lĩnh vực phân bón.

## **CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU**

Nội dung tổng quan đã khái quát được lịch sử nghiên cứu phytolith từ những năm 1800 đến nay và vòng tuần hoàn của phytolith trong tự nhiên. Đồng thời, tổng quan đã trình bày được một số đặc điểm của phytolith trong hệ đất – cây như các dạng silic trong đất, quá trình hút thu silic và hình thành phytolith trong thực vật, vai trò của phytolith đối với thực vật, vòng tuần hoàn của phytolith trong tự nhiên. Đặc biệt, luận án đã tổng quan được cơ chế cô lập chất hữu cơ và kali trong phytolith. Các nghiên cứu về K-phytolith hầu như không có. Hai công trình nghiên cứu gần đây nhất được tiến hành trên các đối tượng lúa và guột, các báo cáo tập trung vào đặc tính hòa tan của K-phytolith trong điều kiện phòng thí nghiệm. Trong khi đó, các yếu tố lý hóa học của môi trường chưa được quan tâm. Do đó, luận án hướng đến mục đích bổ sung những vấn đề còn trống thông qua nghiên cứu đặc điểm K-phytolith cũng như các yếu tố tác động đến chuyển hóa của K-phytolith, từ đó đánh giá tiềm năng tận dụng nguồn kali này.

## **CHƯƠNG 2: ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU**

Luận án lựa chọn đối tượng nghiên cứu là các loài thực vật giàu silic và phổ biến trong các hệ sinh thái nông nghiệp và hệ sinh thái tự nhiên ở Việt Nam như mía, ngô, lúa, lau, guột và dương xỉ. Các loài thực vật nghiên cứu được báo cáo có hàm lượng silic (đại diện cho hàm lượng phytolith) > 2% khối lượng khô. Các mẫu thực vật nghiên cứu được thu thập các bộ phận có chứa nhiều phytolith như lá (mía, ngô) hoặc toàn bộ sinh khối (lúa, lau, guột và dương xỉ). Luận án đã thu thập 24 mẫu thuộc khu vực vùng núi phía Bắc Việt Nam nơi có đa dạng thổ nhưỡng.

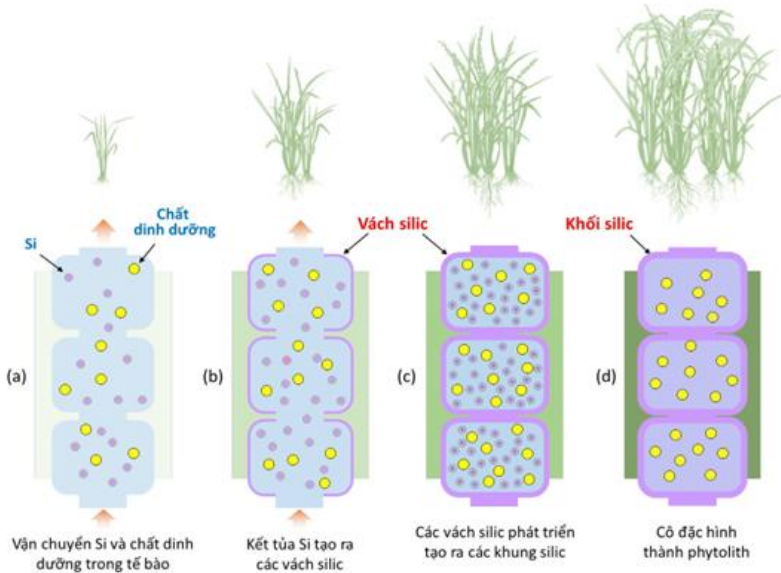
Để triển khai các nội dung nghiên cứu, luận án đã tiến hành 4 nhóm phương pháp bao gồm: (1) Nhóm các phương pháp phân tích hình thái, cấu trúc như  $\mu$ CT, SEM; (2) Nhóm các phương pháp phân tích thành phần, đặc tính hóa học của vật liệu như định lượng nguyên tố bằng phân tích ICP-MS, quang phổ hấp phụ nguyên tử AAS, quang phổ hấp phụ nguyên tử UV-VIS; Phân tích cấu trúc hóa học bề mặt phytolith bằng phổ EDS, lập bản đồ nguyên tố (element mapping), FTIR, XRD, XPS. (3) Nhóm phương pháp bố trí thí nghiệm thực nghiệm. (4) Nhóm phương pháp phân tích dữ liệu bằng thống kê như phân tích hệ số tương quan, phân tích hồi quy, hệ số xác định  $R^2$ .

## **CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN**

### **3.1. PHYTOLITH TRONG MỘT SỐ LOÀI THỰC VẬT GIÀU SILIC**

#### **3.1.1. Sự hình thành và tích lũy phytolith**

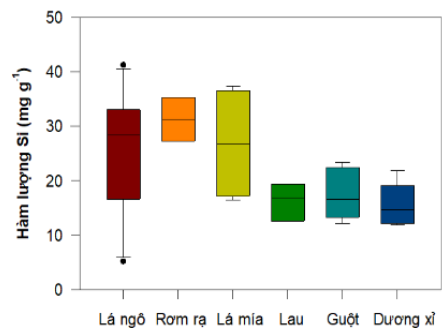
Quá trình hình thành và tích lũy phytolith trải qua 4 giai đoạn như sau: (1) vận chuyển silic và chất dinh dưỡng trong mạch tế bào; (2) silic liên kết trên thành tế bào, tiếp theo là sự polymer hóa silic để tạo các thành lớp oxit silic; (3) các lớp oxit silic phát triển để hình thành cấu trúc phytolith và tạo ra khoảng hổng cô lập một phần hoặc hoàn toàn chứa các chất dinh dưỡng; (4) quá trình mất nước và cô đặc của oxit silic.



**Hình 3.1:** Minh họa cơ chế hình thành cấu trúc phytolith trong quá trình sinh trưởng của thực vật và quá trình cô lập các chất dinh dưỡng kèm theo.

Kết quả khảo sát hàm lượng phytolith (thể hiện bằng hàm lượng silic) trong sinh khối của lá ngô, lá mía, rơm rạ, lau, guột và dương xỉ được biểu diễn trong hình 3.2. So với hàm lượng phytolith tích lũy trung bình của 735 loài thực vật đã được nghiên cứu là khoảng 0,72% sinh khối khô (Hodson, 2005), các loài mục tiêu trong nghiên cứu này (ngô, lúa, mía, lau, guột và dương xỉ) có hàm lượng phytolith trung bình cao gấp 2 đến 4 lần chiếm từ 1,6 – 3,1% sinh khối khô. Với

lượng phytolith tích lũy cao các loài trong nghiên cứu có tiềm năng tích lũy lượng lớn K-phytolith.



**Hình 3.2:** Hàm lượng phytolith tích lũy trong sinh khối lá ngô, rơm rạ, lá mía, guột, lau và dương xỉ.

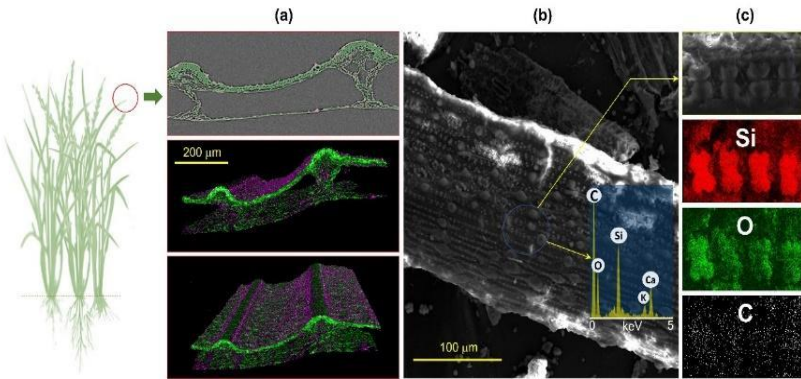


### 3.1.2. Đặc điểm hình thái và cấu trúc phytolith

Do sử dụng tế bào làm khuôn để hình thành, phytolith thường có hình dạng đặc trưng của họ hoặc loài thực vật. Phytolith có thể tập trung thành các lớp ở các mô có sự trao đổi nước mạnh hoặc nằm phân tán trong các bộ phận của cây. Cấu trúc phytolith của các loài lúa, guột và dương xỉ được tái hiện cụ thể như sau:

#### 3.1.2.1. Đặc điểm hình thái và cấu trúc của phytolith lúa

Cấu trúc phytolith trong rơm gồm 2 thành phần chính được biểu thị bằng hai phần: màu tím đại diện cho phytolith và màu xanh lá cây đại diện cho chất hữu cơ. Ảnh  $\mu$ CT cho thấy phytolith sắp xếp xen kẽ với chất hữu cơ tạo thành mạng lưới bao phủ hầu hết bề mặt lá. Tại một số vị trí các lớp phytolith đã tạo thành các khoảng trống kín, các khoảng trống này có thể giữ một lượng chất hữu cơ nhất định

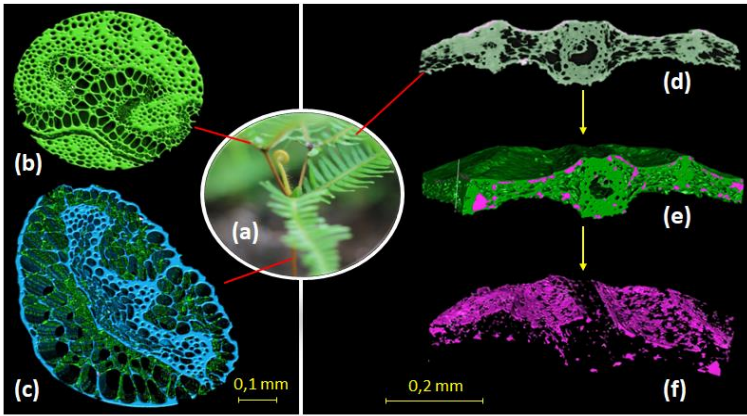


Hình 3.3: Hình thái và vi cấu trúc của phytolith trong rơm rạ.

#### 3.1.2.2. Đặc điểm hình thái và cấu trúc của phytolith guột

Phân tích  $\mu$ CT được tiến hành cho các bộ phận khác nhau của cây guột: cuống lá (Hình 3.4b), thân cây (Hình 3.4c) phiến lá (Hình 3.4d-f). Chất hữu cơ được phân tách thành hai nhóm có mật độ khác nhau: xanh da trời (mật độ cao) tập trung ở phần thân cây và xanh lá cây (mật độ thấp hơn) tập trung ở phần cuống lá và phiến lá. Phytolith được biểu diễn bằng màu tím xuất hiện không đồng đều ở các bộ phận khác nhau. Ở phần thân cây và

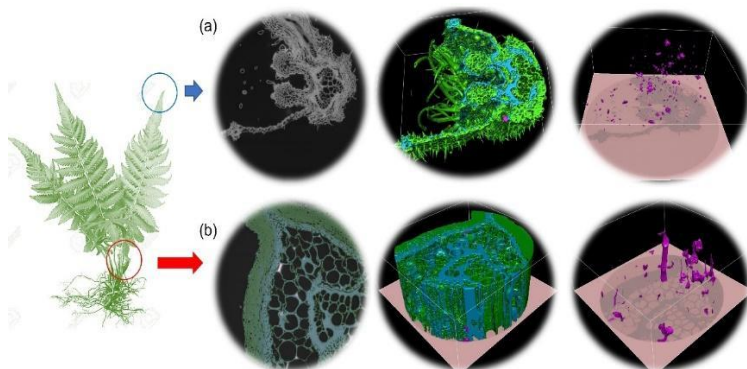
phần cuống lá phytolith xuất hiện rời rạc và với một lượng nhỏ. Ngược lại, ở phiến lá phytolith xuất hiện nhiều hơn và tạo thành một lớp màng phía dưới của mặt phiến lá. Như vậy, về cơ bản sự hình thành và phân bố phytolith trong lúa và guột tương đối giống nhau: silic hút thu qua rễ được vận chuyển từ thân lên chồi và quá trình kết tủa, phát triển cấu trúc phytolith diễn ra mạnh nhất ở lá, nơi sự cô đặc của silic được thúc đẩy nhờ quá trình thoát hơi nước. Ở thân cây và cuống lá, phytolith phân bố rải rác và có thể là kết quả của quá trình kết tủa silic trong các khoảng gian bào.



Hình 3.4: Hình thái và cấu trúc của phytolith cây guột.

### 3.1.2.3. Đặc điểm hình thái và cấu trúc của phytolith dương xỉ

Phân tích  $\mu$ CT cho phần lá (Hình 3.5a) và thân cây (Hình 3.5b) cho thấy phytolith tích lũy trong dương xỉ tương đối khác biệt so với ở lúa và guột. Ở lúa và guột, phytolith có xu hướng tích lũy nhiều hơn ở phần lá trong khi đó phytolith phát hiện ở phần thân chiếm một lượng không đáng kể. Ngược lại, ở dương xỉ phytolith xuất hiện cả ở thân và lá, thậm chí phytolith trong phần thân có xu hướng tập trung hơn và tích lũy với lượng lớn hơn. Dương xỉ là loài ưa ẩm và ưa bóng, có thể điều kiện sống không thiếu nước đã dẫn đến quá trình thoát hơi nước diễn ra hạn chế, hoặc không có tác động trực tiếp đến sự hình thành phytolith (giống như ở lúa và guột).



Hình 3.5: Hình thái và cấu trúc của phytolith cây dương xỉ.

## 3.2. THÀNH PHẦN VÀ ĐẶC TÍNH (TRO) PHYTOLITH TỪ MỘT SỐ THỰC VẬT GIÀU SILIC

### 3.2.1. Thành phần hóa học của (tro) phytolith

Kết quả thành phần hóa học của (tro) phytolith các loài thu ở 600°C thể hiện ở bảng 3.1. Các loài có mức tích lũy phytolith (thể hiện bằng hàm lượng silic) từ  $8,54 \pm 0,07\%$  (lau) đến  $17,3 \pm 2,15\%$  (rom rạ), trong khi lá ngô và lá mía có cùng mức tích lũy phytolith tương ứng là  $12,1 \pm 3,1\%$  và  $12,2 \pm 5,13\%$ . Ngoài silic, (tro) phytolith còn bao gồm chất hữu cơ (thể hiện bằng hàm lượng OC), và một số nguyên tố khác như K, Ca, Mg, Fe, P được phát hiện với hàm lượng thấp hơn kali và silic (Bảng 3.1).

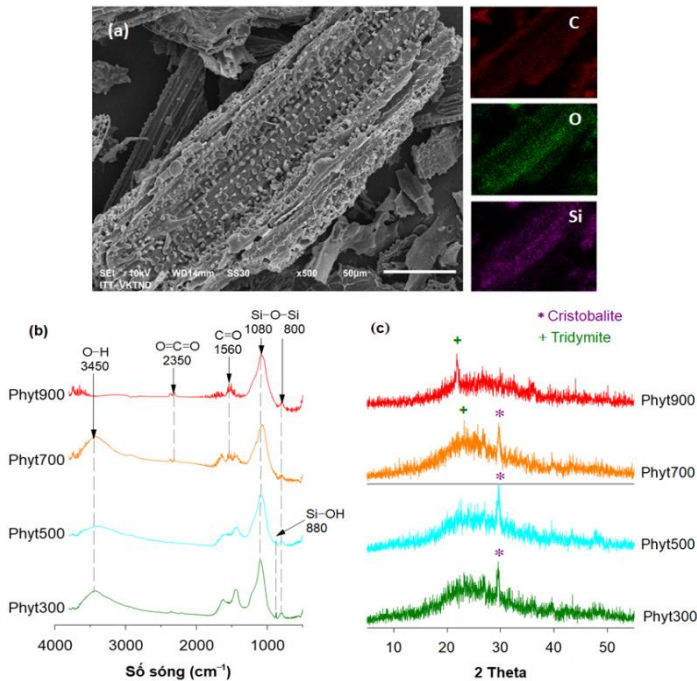
Bảng 3.1: Thành phần hóa học của (tro) phytolith guột, lau, rom rạ, lá ngô và lá mía nhiệt phân ở 600°C (n=3).

Mẫu	OC	Si	K	Ca	Mg	P
	%		mg g <sup>-1</sup>			
Phytolith lá ngô	19,2±1,0	12,1±3,1	79,5±24,8	42,7±12,2	22,7±3,8	4,8±1,1
Phytolith lá mía	14,5±2,2	12,2±5,1	43,8±24,7	59,4±20,3	12,1±3,2	6,1±3,8
Phytolith rom	14,9±1,3	17,3±2,1	127,7±18	42,4±0,5	16,3±6,6	6,3±2,2
Phytolith lau	16,9±1,2	8,5±0,07	59,1±23,0	20,6±2,3	11,1±4,7	6,7±2,6
Phytolith guột	19,2±1,1	2,2±0,82	32,4±7,0	25,7±7,0	15,6±5,0	3,5±2,0

Sự biến đổi hóa học của phytolith theo nhiệt độ phân tách được nghiên cứu chuyên sâu cho phytolith rom rã, kết quả thu được ở bảng 3.2 và hình 3.6.

Bảng 3.2: Diện tích bề mặt và thành phần hóa học của các phytolith có nguồn gốc từ rom rã nhiệt phân ở các độ nhiệt 300°C (Phyt300), 500°C (Phyt500), 700°C (Phyt700) và 900°C (Phyt900) (n=3).

Mẫu	SSA (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	OC (%)	Si	K	Ca	Mg	P
			(mg g <sup>-1</sup> )				
Phyt300	36,2	25,6	254,3±11,0	29,6±5,3	31,7±3,13	25,5±3,05	21,4±1,13
Phyt500	29,6	10,8	281,9±16,8	43,0±2,9	34,1±3,19	26,4±2,32	21,8±4,57
Phyt700	12,7	4,24	262,5±16,6	46,1±3,2	32,2±7,55	26,4±1,82	20,0±3,56
Phyt900	1,07	1,53	216,6±11,5	54,2±6,4	28,4±10,1	18,4±3,34	16,7±0,32

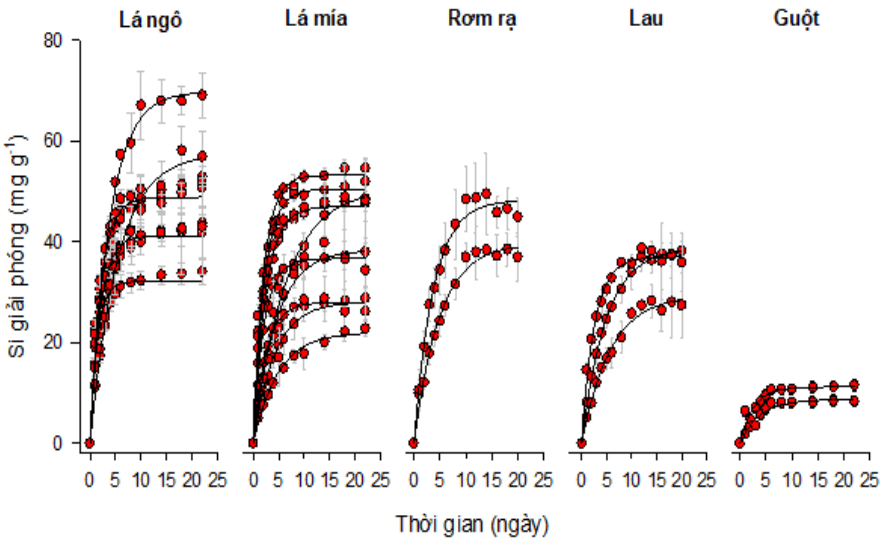


Hình 3.6: Đặc điểm bề mặt của phytolith rom rã nhiệt phân ở các độ nhiệt 300°C – 900°C.

Diện tích bề mặt riêng của phytolith tỷ lệ nghịch với sự tăng nhiệt độ nhiệt phân cao nhất ở mẫu xử lý ở 300°C (36,2 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) cao gấp ~36 lần so với mẫu thấp nhất xử lý ở 900°C (1,07 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>). Tỷ lệ của các nguyên tố thay đổi tùy thuộc vào nhiệt độ nhiệt phân. Khi tăng nhiệt độ nhiệt phân từ 300 đến 900°C, hàm lượng OC giảm từ 25,6 đến 1,53%. So với OC, những thay đổi nhỏ hơn về hàm lượng silic giữa các phytolith đã được quan sát.

### 3.2.2. Động học quá trình hòa tan của (tro) phytolith

Tốc độ phân hủy/hòa tan của phytolith đối với các mẫu guột, lau, rơm rạ, lá ngô và lá mía được biểu diễn trong hình 3.7. Sự tăng lên về nồng độ silic hòa tan trong dung dịch (phản ánh phytolith đang bị hòa tan) là xu hướng chung quan sát được cho các mẫu phytolith từ các loài khác nhau. Có thể thấy sự hòa tan phytolith diễn ra chủ yếu ở 2 tuần đầu, sau đó tốc độ hòa tan giảm mạnh hoặc dung dịch đạt đến trạng thái bão hòa, lượng silic hòa tan cao nhất ghi nhận được là 69,1 mg g<sup>-1</sup> (ở mẫu phytolith lá ngô), và lượng silic hòa tan thấp nhất là 10,7 mg g<sup>-1</sup> (ở mẫu phytolith guột)



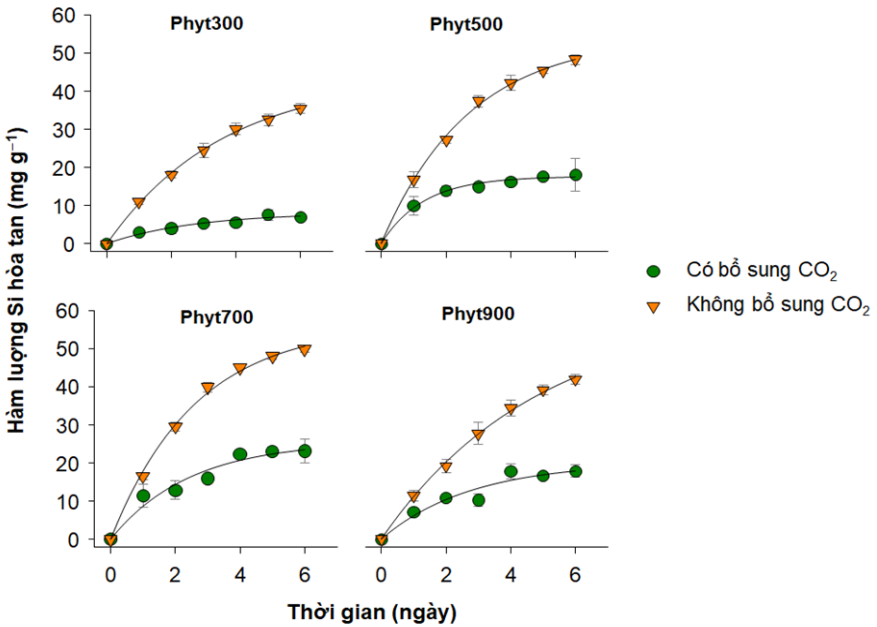
Hình 3.7: Động học hòa tan phytolith và giải phóng silic.

Có thể nhận thấy tốc độ hòa tan các mẫu phytolith ở các loài khác nhau là rất khác nhau. Ngay cả trong cùng loài, sự hòa tan phytolith cũng diễn ra rất khác biệt. Điều này chỉ ra rằng đặc tính sinh học của loài đường như không phải là yếu tố then chốt quyết định đến khả năng hòa tan phytolith.

### 3.2.3. Ảnh hưởng của CO<sub>2</sub> và nhiệt độ môi trường đến sự hòa tan (tro) phytolith

#### 3.2.3.1. Ảnh hưởng của CO<sub>2</sub>

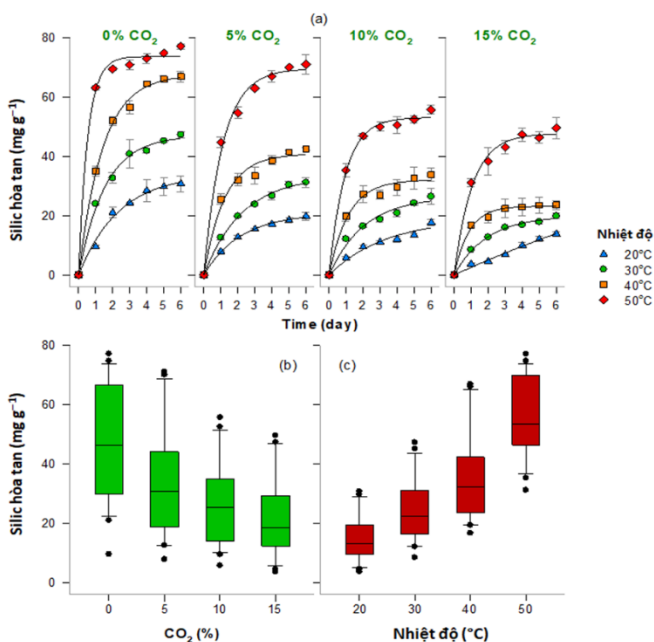
Sự tăng dần của đường cong nồng độ silic được cho thấy sự hòa tan chậm của phytolith. Trong điều kiện không bổ sung CO<sub>2</sub>, pH kiềm của huyền phù được duy trì, tạo điều kiện cho khả năng hòa tan cao của silic. Sau 6 ngày, nồng độ silic của phytolith xử lý ở 300, 500, 700 và 900°C lần lượt là 35,5, 48,3, 49,9 và 42,0 mg g<sup>-1</sup>. Mức độ hòa tan cao này cho thấy phytolith rơm có tiềm năng như một nguồn silic để dùng bổ sung cho cây trồng.



Hình 3.8: Ảnh hưởng của CO<sub>2</sub> đến sự hòa tan phytolith rơm rạ.

Xu hướng tương tự cũng được quan sát ở các mẫu thí nghiệm có bổ sung CO<sub>2</sub>, nhưng tốc độ hòa tan thấp hơn. Dòng CO<sub>2</sub> bổ sung liên tục đã duy trì các huyền phù ở khoảng pH ~ 5 là nguyên nhân chính làm giảm lượng silic giải phóng. Sự hiện diện của CO<sub>2</sub> có xu hướng axit hóa huyền phù phytolith, tăng cường proton hóa bề mặt của phytolith, làm giảm tác động của các anion và nhóm hydroxyl đến liên kết Si–O–Si, và cuối cùng bảo tồn phytolith khỏi quá trình hòa tan. Các phytolith cho thấy các đặc tính bề mặt khác nhau, do đó, chúng phản ứng với CO<sub>2</sub> ở các mức độ khác nhau và thể hiện sự khác biệt trong việc giải phóng silic. Rõ ràng CO<sub>2</sub> đã làm giảm ít nhất hai lần lượng silic giải phóng, chứng tỏ CO<sub>2</sub> là một chất ức chế hiệu quả đối với sự hòa tan phytolith.

### 3.2.3.2. Ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ và CO<sub>2</sub>



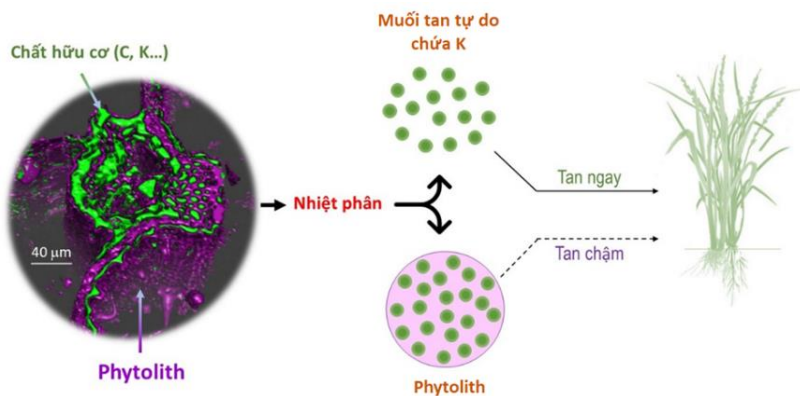
Hình 3.9: Tính chất hòa tan phytolith dưới ảnh hưởng của: a) thời gian, nồng độ CO<sub>2</sub> và nhiệt độ; b-c) biểu đồ hộp biểu diễn mối quan hệ của silic hòa tan với nồng độ CO<sub>2</sub> và nhiệt độ môi trường.

Động học giải phóng silic đại diện cho sự hòa tan phytolith dưới sự thay đổi của nồng độ  $\text{CO}_2$  và nhiệt độ cho thấy sự gia tăng liên tiếp của nồng độ silic nói chung đối với tất cả các huyền phù trong khoảng thời gian 6 ngày, trong khi  $\text{CO}_2$  và nhiệt độ cho thấy vai trò quan trọng của chúng trong việc thay đổi tốc độ giải phóng silic. Trong đó, sự hiện diện của  $\text{CO}_2$  có xu hướng chống lại sự hòa tan của phytolith do ảnh hưởng của nó đối với pH, nhiệt độ lại biểu thị một xu hướng đối nghịch.

### 3.3. K-PHYTOLITH TRONG (TRO) PHYTOLITH

#### 3.3.1. Các dạng kali trong (tro) phytolith

Khi nhiệt phân sinh khối, tro thu được sẽ bao gồm các thành phần sau: (1) muối tan tự do có chứa kali, (2) phytolith và (3) các muối tan trong phytolith (Hình 3.10). Muối tan tự do chứa các muối kali ( $\text{KCl}$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KOH}$  và  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ). Phytolith (oxit silic) là phần chủ đạo trong tro và nó cũng có thể chứa các muối tan tự do của kali và các nguyên tố khác. Trong một số trường hợp, các muối tan có thể tồn tại ở dạng ion và liên kết trực tiếp với vách phytolith ( $>\text{Si}-\text{O}-\text{K}$ ). Dạng này thường có lực liên kết yếu, dễ bị hòa tan/giải phóng khi phytolith bị trả lại môi trường. Lượng K-phytolith chiếm ít nhất  $> 45\%$  tổng lượng kali trong sinh khối và chúng được quan sát thấy sẽ giải phóng chậm theo thời gian.

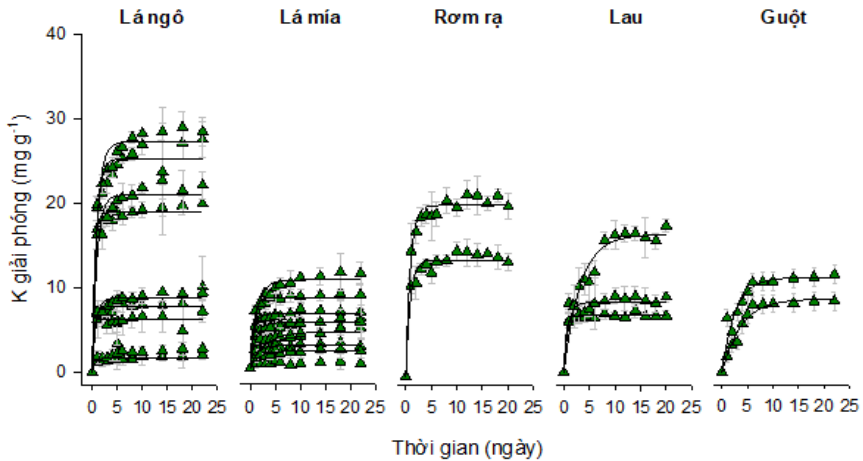


Hình 3.10: Sơ đồ mô tả chuyển hóa phytolith rom rã và K-phytolith.



### 3.3.2. Động học giải phóng K-phytolith

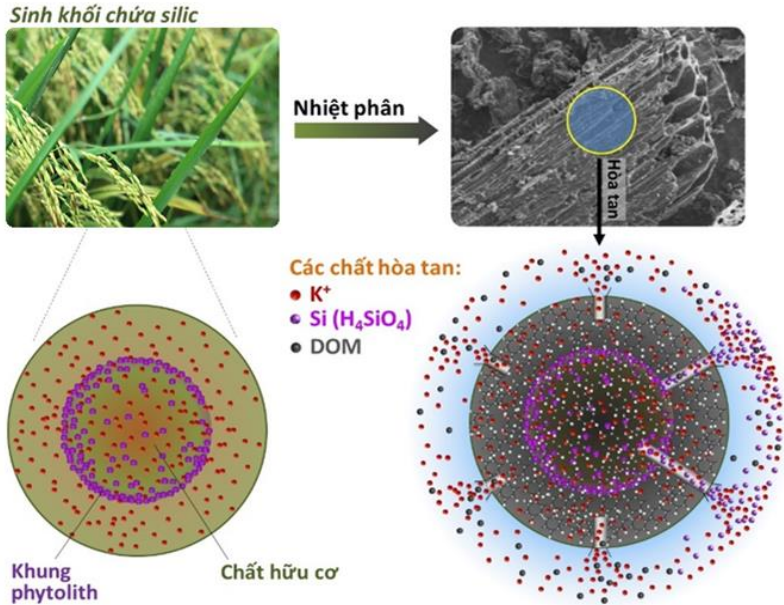
K-phytolith được cô lập/giữ trong phytolith, do đó số phận của nó phụ thuộc vào số phận của phytolith. Trong nghiên cứu này, sinh khối giàu silic từ các cây guột, lau và ba loại cây nông nghiệp phổ biến, tức là lúa, ngô và mía, được sử dụng để đánh giá các đặc tính giải phóng của K-phytolith.



Hình 3.11: Động học giải phóng K-phytolith của một số thực vật giàu silic.

Xu hướng giải phóng K-phytolith là khá tương đồng với silic, cụ thể là diễn ra chủ yếu trong tuần đầu và đạt trạng thái bão hòa sau 2 tuần. Lượng K-phytolith giải phóng cao nhất là  $28,9 \text{ mg g}^{-1}$  (ở phytolith từ lá ngô) trong khi đó lượng K-phytolith giải phóng thấp nhất là  $0,8 \text{ mg g}^{-1}$  (ở phytolith từ lá mía). Lượng K-phytolith giải phóng chiếm từ 12,7 đến 51,8% so với lượng kali tổng số có trong phytolith của các mẫu nghiên cứu. Điều này chứng tỏ rằng còn một lượng đáng kể vẫn được lưu giữ trong cấu trúc phytolith và sẽ chỉ được giải phóng khi phytolith tiếp tục bị phân hủy. Sự tương đồng về quá trình hòa tan silic và K-phytolith gợi ý rằng hai nguyên tố này có thể cùng giải phóng theo một cơ chế. Suy luận này được minh chứng bởi các tương quan thuận của silic và K-phytolith hòa tan có hệ số xác định,  $R^2$ , rất cao ( $>0,8$ ).

Như vậy, rất có thể quá trình hòa tan và giải phóng 2 nguyên tố này có điểm chung hoặc phụ thuộc vào nhau. Giả thiết về vai trò của phytolith giống như các barrier vật lý ngăn cản quá trình hòa tan và giải phóng kali là phù hợp nhất (Hình 3.12).

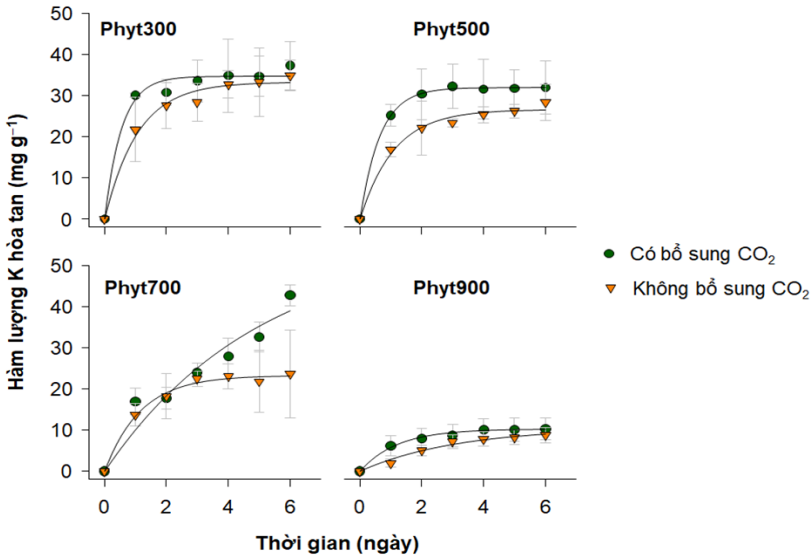


Hình 3.12: Cơ chế kiểm soát quá trình giải phóng kali từ phytolith.

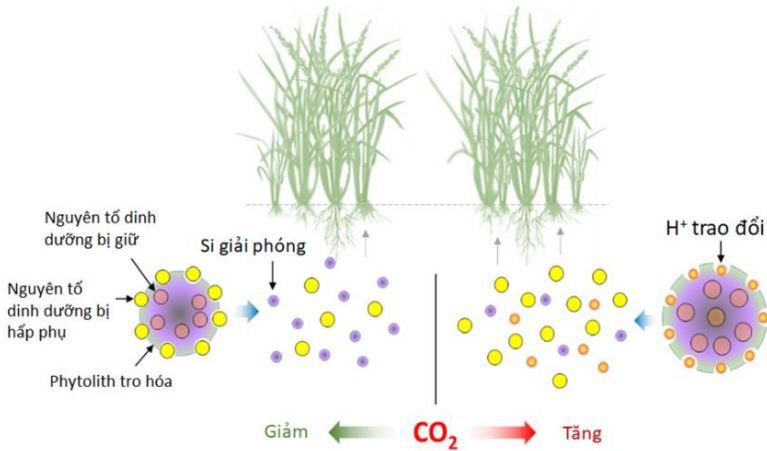
### 3.3.3. Ảnh hưởng của $CO_2$ đến quá trình hòa tan và giải phóng K-phytolith

Xu hướng chung cho thấy sự tăng dần nồng độ kali trong tất cả các dung dịch chiết trong khoảng thời gian 6 ngày (Hình 3.13). Ngược lại với xu hướng của silic (kết quả mục 3.2.3.1), lượng kali giải phóng cao hơn trong điều kiện có  $CO_2$  bổ sung, trong khi chúng thấp hơn ở các mẫu không có  $CO_2$  bổ sung. Có khả năng sự hòa tan silic dẫn đến việc loại bỏ vật lý các lớp phytolith bên ngoài và quá trình này có thể dẫn đến việc giải phóng kali bị tắc trong phytolith vào dung dịch. Sự hỗ trợ của  $CO_2$  đã làm giảm đáng kể quá trình hòa tan phytolith, do đó nó sẽ dẫn đến giảm kali được giải

phóng. Tuy nhiên, một kịch bản ngược lại là CO<sub>2</sub> làm tăng tốc độ giải phóng kali đã được quan sát thấy. Điều này cho thấy rằng việc giải phóng kali có thể liên quan đến các quá trình song song.



Hình 3.13: Ảnh hưởng của CO<sub>2</sub> đến sự giải phóng K-phytolith.



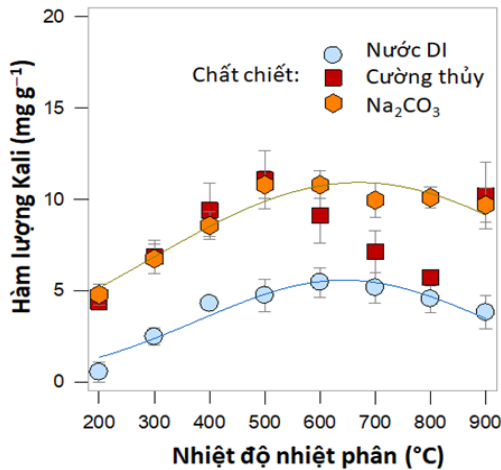
Hình 3.14: Sơ đồ mô tả số phận của phytolith và các chất dinh dưỡng đi kèm của chúng (tức là kali) ở điều kiện khí quyển có hoặc không có CO<sub>2</sub>.

Ở đây giả thuyết được đưa ra rằng: CO<sub>2</sub> một mặt ngăn cản tốc độ hòa tan của phytolith làm giảm sự giải phóng kali bị cô lập/nhốt giữ; mặt khác, nó tăng cường sự thay thế các cation được hấp thụ bởi H<sup>+</sup> và tạo điều kiện cho việc giải phóng kali. Bằng cách này, tổng lượng kali được giải phóng tăng lên dưới sự hỗ trợ của khí CO<sub>2</sub>. Cơ chế được mô tả trong hình 3.14.

### 3.4. K-PHYTOLITH TRONG SICHAR

#### 3.4.1. Các dạng kali trong Sichar

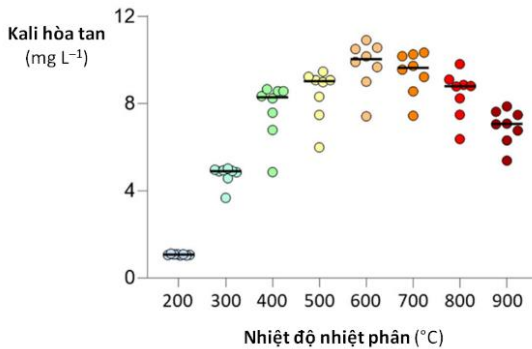
Có thể chia các dạng kali trong Sichar dựa theo phương pháp chiết: kali thu được từ phân hủy mẫu sử dụng dung dịch cường thủy (được xem là lượng kali trong chất hữu cơ của Sichar), kali thu được từ phân hủy mẫu sử dụng dung dịch Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (là lượng kali có liên quan đến phytolith), kali chiết bằng nước deion (là lượng kali có liên kết yếu với bề mặt của Sichar). Hàm lượng kali có thể chiết xuất trong các mẫu Sichar chỉ ra sự phụ thuộc của kali giải phóng vào cả nhiệt độ nhiệt phân và phương pháp chiết xuất (Hình 3.15). Độ hòa tan của kali thường giảm theo thứ tự: K<sub>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></sub> > K<sub>Cường thủy</sub> > K<sub>Nước DI</sub>.



Hình 3.15: Nồng độ kali thu được từ các chất chiết khác nhau.

### 3.4.2. Động học giải phóng K-Sichar

Sự giải phóng kali trong nước DI ( $K_{\text{Nước DI}}$ ) theo thời gian và nhiệt độ nhiệt phân được thể hiện trong hình 3.16. Nồng độ kali tăng đáng kể cho thấy tốc độ giải phóng cao được quan sát thấy trong 2 ngày đầu tiên, trong khi tốc độ giải phóng kali thấp hơn rõ ràng sau 2 ngày. Điều này cho thấy rằng tồn tại hai cơ chế giải phóng kali khác nhau. Cơ chế đầu tiên trong đó kali nhanh chóng được giải phóng ra khỏi cấu trúc của Sichar đặc biệt thu được đối với các mẫu từ quá trình nhiệt phân ở  $< 500^{\circ}\text{C}$ . Tuy nhiên, mức kali giải phóng của phần có sẵn này chỉ bằng khoảng dưới một nửa  $K_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$  được chiết bằng dung dịch  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  1%, cho thấy rằng một số lượng kali nhất định vẫn được phân chia trong Sichar. Phần kali này có thể được giải phóng theo cơ chế thứ hai, trong đó sự hòa tan các pha silic kiểm soát sự khuếch tán của kali.



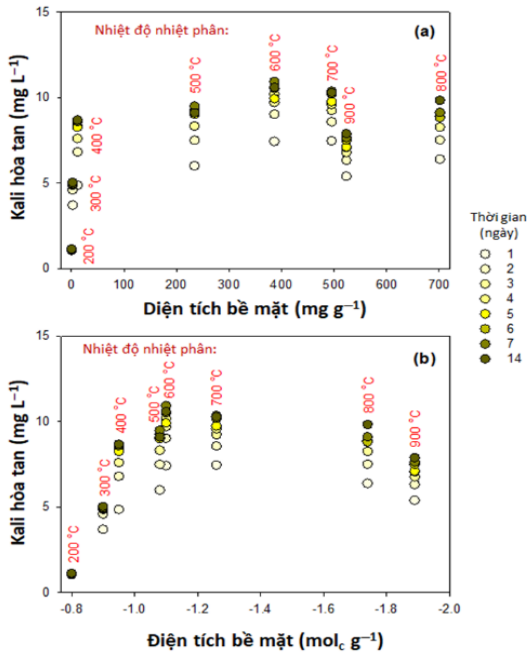
Hình 3.16: Sự giải phóng kali từ Sichar thu được từ các nhiệt độ nhiệt phân khác nhau theo thời gian (1–14 ngày) ( $n=3$ )

### 3.4.3. Vai trò của tính chất bề mặt Sichar đối với quá trình giải phóng kali

Diện tích bề mặt riêng (SSA) của Sichar nằm ở bề mặt bên ngoài và bên trong, có liên quan đến độ xốp của Sichar, kiểm soát việc giải phóng kali theo số lượng vị trí. Dưới tác dụng của nhiệt phân, SSA bị thay đổi đáng kể. Trong khoảng nhiệt độ  $200 - 400^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{SSA} \sim 10.000 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ . Giá trị SSA

thấp này có thể do sự chiếm ưu thế của pha chất hữu cơ bao phủ ảnh hưởng đến sự hấp phụ  $N_2$  và cản trở việc định lượng chính xác SSA. Ở nhiệt độ > 400°C, khi mà phần lớn chất hữu cơ đã bị loại bỏ, hình dạng đỉnh của SSA được quan sát thấy trong đó SSA tăng trong khoảng nhiệt độ từ 400 đến 600°C, và SSA giảm ở > 600°C. Việc tăng SSA thường tăng cường giải phóng kali do loại bỏ các chất hữu cơ và sự tiếp xúc trực tiếp của các thể silic với dung dịch.

Nhiệt độ nhiệt phân làm thay đổi đáng kể SC, và điều này được cho là có liên quan đến sự phân hủy hoặc tạo vòng thơm của chất hữu cơ, và sự kết tinh của silic phytolith. Cả hai pha chất hữu cơ và silic đều đóng góp vào SC, tuy nhiên, tầm quan trọng của pha hữu cơ giảm khi nhiệt độ tăng.

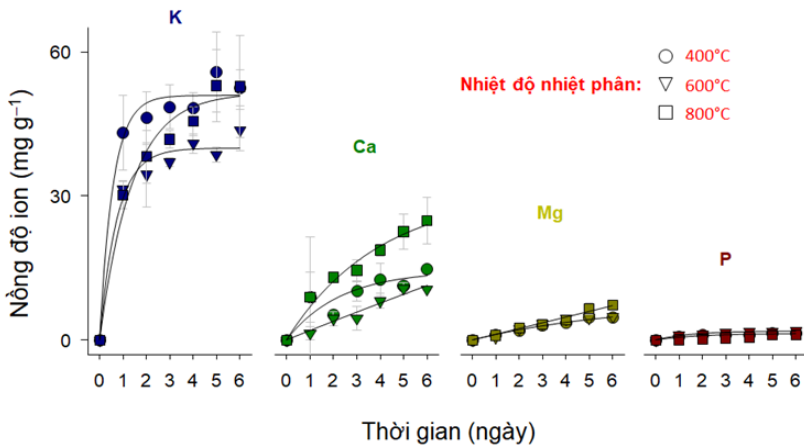


Hình 3.17: Giải phóng kali từ Schar liên quan đến (a) diện tích bề mặt (SSA) và (b) diện tích bề mặt.

### 3.5. TIỀM NĂNG ỨNG DỤNG CỦA K-PHYTOLITH TRONG NÔNG NGHIỆP

#### 3.5.1. Tiềm năng sản xuất vật liệu kali nhả chậm

Sinh khối giàu phytolith có tiềm năng ứng dụng lớn trong lĩnh vực môi trường và nông nghiệp. Cùng với kali, vật liệu phytolith nguồn gốc từ sinh khối các thực vật giàu silic cũng có thành phần một số nguyên tố khác như canxi, magiê, photpho. Nhìn chung, có sự gia tăng dần dần về nồng độ chất dinh dưỡng đối với tất cả các huyền phù trong khoảng thời gian trong 6 ngày. Kali là nguyên tố chiếm ưu thế nhất được giải phóng, canxi và magiê là nguyên tố dồi dào thứ hai và thứ ba được giải phóng, lượng photpho tương đối giống nhau ở các mẫu phytolith và tỷ lệ giải phóng của chúng thấp nhất so với các nguyên tố khác.

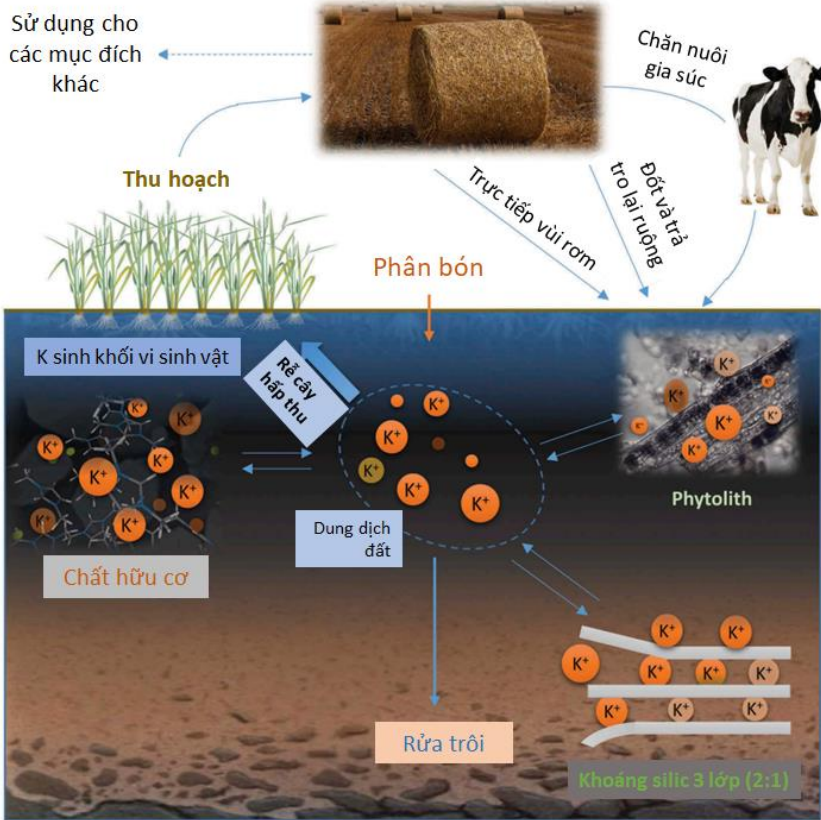


Hình 3.18: Động học giải phóng các nguyên tố K, Ca, Mg, P từ phytolith nguồn gốc rom rạ nung ở các nhiệt độ 400, 600 và 800°C.

#### 3.5.2. Tiềm năng là giải pháp quản lý kali trong đồng ruộng

Cây tích lũy silic như lúa, mía, ngô, sậy, dương xỉ, giuộc phát triển cấu trúc phytolith, đồng thời với đó là sự giữ của chất hữu cơ và các chất dinh dưỡng. Kali xuất hiện ở khắp các cơ quan của thực vật nên nó có thể bị giữ trong các khoảng hổng của cấu trúc phytolith (hình thành dạng K-

phytolith), và K-phytolith có thể chiếm tới 10% phytolith. Trong các hệ sinh thái nông nghiệp ngũ cốc, có từ 50 - 75% tổng sinh khối còn lại dưới dạng tàn dư sau khi thu hoạch, tương đương với hàng trăm triệu tấn K-phytolith tồn dư lại đồng ruộng. Lượng K-phytolith này có thể là nguồn kali thay thế phân bón cho cây trồng. Việc chôn vùi rơm rạ hoặc đốt và sau đó trả lại tro vào đất trồng lúa là những biện pháp điển hình cho phép silic ở dạng phytolith (hoặc sản phẩm đốt cháy) và các chất trong nó được tuần hoàn. Hình 3.19 minh họa vai trò của K-phytolith như một nguồn kali rắn, cùng với kali từ chất hữu cơ (OM) và khoáng sét trong chu trình kali đất.



Hình 3.19: Mô hình mô tả vai trò của K-phytolith trong đất trồng lúa.



## KẾT LUẬN

1. Các thực vật tích lũy silic như lúa, guột, dương xỉ phytolith có thể hình thành các mảng lớn trên thành tế bào, hoặc ở giữa các khoảng gian bào. Vị trí phân bố của phytolith có thể tập trung ở lá (như ở lúa, guột) hoặc ở hệ mạch (như dương xỉ). Phytolith có cấu trúc xen kẽ với chất hữu cơ, các thành phần này bị biến đổi trong quá trình tách phytolith bằng phương pháp tro hóa khô dẫn đến những thay đổi về đặc tính hóa học bề mặt như sự xuất hiện của các nhóm C=O vòng thơm, hay sự biến đổi của silic thành các dạng tinh thể bền vững (crystobalit và tridymit).
2. Đặc tính hòa tan của phytolith (thể hiện ở tốc độ và mức độ hòa tan) cho thấy xu hướng hòa tan chậm theo thời gian. Lượng silic hòa tan rất khác nhau ở mỗi loài và thậm chí khác nhau giữa các mẫu của cùng loài. Lượng silic hòa tan cao nhất phát hiện ở các mẫu phytolith lá ngô ( $69,1 \text{ mg g}^{-1}$ ) và thấp nhất là các mẫu guột ( $12 \text{ mg g}^{-1}$ ). Một số yếu tố tác động đến quá trình hòa tan phytolith bao gồm đặc tính hóa học của phytolith, hàm lượng  $\text{CO}_2$  và nhiệt độ môi trường. Trong đó,  $\text{CO}_2$  có tác động kìm hãm sự hòa tan của phytolith thông qua tác động làm giảm pH dung dịch và tăng  $\zeta$ . Nhiệt độ ngược lại có tác dụng thúc đẩy sự hòa tan phytolith tương tự như cách nó làm tăng sự hòa tan silic vô định hình khác.
3. Ở các loài thực vật trong nghiên cứu, hàm lượng K-phytolith dao động từ  $24,8 \pm 14,8$  (lá mía) đến  $98,8 \pm 17,4 \text{ mg g}^{-1}$  (rom rạ). Lượng K-phytolith chiếm  $> 45\%$  tổng lượng kali. Xu hướng giải phóng K-phytolith khá tương đồng với silic, trong đó, giải phóng cao nhất là  $28,9 \text{ mg g}^{-1}$  (ở phytolith từ lá ngô) và thấp nhất là  $0,8 \text{ mg g}^{-1}$  (ở phytolith từ lá mía), tương ứng với khoảng từ 12,7 đến 51% lượng kali tổng số trong phytolith. Nghiên cứu đã quan sát thấy tương quan thuận giữa silic và K-phytolith với giá trị ( $R^2 > 0,8$ ). Các kết quả này cho thấy vai trò của phytolith như một màng bảo vệ phần kali bên trong, và chỉ khi phytolith hòa tan mới giải phóng kali. Yếu tố môi trường như  $\text{CO}_2$  đã làm thay đổi mức độ giải phóng K-phytolith. Xu

hướng trái ngược của sự hòa tan phytolith và sự giải phóng kali trong điều kiện có CO<sub>2</sub> cho thấy có nhiều cơ chế kiểm soát sự giải phóng kali. Một mặt CO<sub>2</sub> làm giảm sự giải phóng kali bị cô lập/nhốt giữ bằng ngăn cản tốc độ hòa tan của phytolith; mặt khác, nó tạo điều kiện cho việc giải phóng các cation bằng tăng cường trao đổi ion với H<sup>+</sup>.

4. Sinh khối giàu silic và kali thông qua các điều chỉnh trong quá trình nhiệt phân (như thay đổi nhiệt độ và hàm lượng oxy trong quá trình) có thể trở thành các vật liệu (Sichar) để ứng dụng như một dạng phân kali nhả chậm, có tiềm năng thay thế cho phân kali hóa học. Bên cạnh kali, vật liệu Sichar còn có khả năng chứa đựng và giải phóng một số nguyên tố dinh dưỡng khác như Ca, Mg, P, tuy nhiên, mức độ giải phóng các nguyên tố này thấp hơn kali. Nhìn chung, vật liệu Sichar có tiềm năng rất lớn để một mặt giải quyết được vấn đề dư thừa phụ phẩm sinh khối, mặt khác tạo ra được các sản phẩm nhả chậm dinh dưỡng cung cấp cho cây trồng.

### **KIẾN NGHỊ**

Các kết quả nghiên cứu của luận án một mặt đáp ứng các mục tiêu đề ra, mặt khác gợi mở một số hướng nghiên cứu tiếp theo như sau:

- 1) Tiếp tục nghiên cứu động thái hòa tan và giải phóng các nguyên tố dinh dưỡng từ phytolith lá ngô, lá mía, lau, guột, dương xỉ và lau.
- 2) Tiếp tục nghiên cứu cơ chế giải phóng các nguyên tố dinh dưỡng khác từ phytolith như P, Ca, Mg.
- 3) Nghiên cứu tạo các sản phẩm nhả chậm dinh dưỡng (Si, K, P) từ vật liệu Sichar để ứng dụng trong thực tế sản xuất.

**DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA  
TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN**

**Công bố quốc tế**

1. Nguyen, T.H., **Nguyen, T.Q.A.**, Vu, T.T.T., Duong, T.L., Nguyen, N.M. (2022). “Potassium in silicon-rich biomass wastes: A perspective of slow-release potassium sources”. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*. 16, 1159–1164. (Q1; IF: 4,102)
2. **Nguyen, T.Q.A.**, Nguyen, M.A., Nguyen, T.M., Nguyen, T.H., Duong, T.L., Dinh, M.V., Nguyen, M.P., Dultz, S., Nguyen, N.M. (2022). “The regulatory role of CO<sub>2</sub> on nutrient releases from rice-straw phytoliths”. *Biogeochemistry*. 160, 35–47. (Q1; IF: 4,825)
3. Nguyen, N.M., **Nguyen, T.Q.A.**, Dultz, S., Tsubota, T., Duong, T.L., Nguyen, M.A., Pham, T.T.N. (2022). “Thermal induced changes of rice straw phytolith in relation to arsenic release: A perspective of rice straw under open burning”. *Journal of Environmental Management*, 304, 114294. (Q1; IF: 6,79).
4. **Nguyen, T.Q.A.**, Nguyen, M.A., Nguyen, N.L., Nguyen, X.H., Tran, M.T., Tran, D.P., Dultz, S., Nguyen, N.M. (2021). “Effect of CO<sub>2</sub> and temperature on dissolution of phytolith”. *Science of the Total Environment*, 772, 145469. (Q1; IF: 7,963).
5. **Nguyen, T.Q.A.**, Nguyen, M.A., Pham, T.T.N., Nguyen, X.H., Dang, T.Q., Tran, M.T., Nguyen, D.A., Tran, D.P., Nguyen, N.M. (2021). “CO<sub>2</sub> can decrease the dissolution rate of ashed phytoliths”. *Geoderma*, 385, 114835. (Q1; IF: 6,114)
6. Nguyen, N.M., Dam, T.N.T., **Nguyen, T.Q.A.**, Nguyen, M.A., Nguyen, N.L., Duong, T.L., Dang, T.Q., Tran, T.T. (2021). “Arsenic in rice straw phytoliths: Encapsulation and release of arsenic in rice-straw phytolith”. *Applied Geochemistry*, 127, 104907. (Q1; IF: 3,524).
7. Nguyen, M.A., Pham, T.T.N., Nguyen, N.L., **Nguyen, T.Q.A.**, Nguyen, X.H., Nguyen, D.D., Tran, M.T., Nguyen, D.A., Tran, D.P., Nguyen, N.M. (2021). “Silicic acid increases dispersibility of micro-sized biochars”. *Colloids & Surface A*, 617, 126381 (Q2; IF: 4,539).
8. **Nguyen, T.Q.A.**, Bui, A.T., Mai, T.N., Tran, T.H., Tran, V.S., Nguyen, H.N., Tsubota, T., Shinogid, Y., Dultz, S., Nguyen, N.M.

- (2020). “Release kinetics of potassium from silica-rich fern derived biochars”. *Agronomy Journal*, 112(3), 1713–1725. (Q1; IF: 2,240)
9. Mai, T.N., Nguyen, M.A., Pham, T.T.N., **Nguyen, T.Q.A.**, Nguyen, T.T., Do, L.C., Nguyen, H.N., Dultz, S., Nguyen, N.M. (2020). “Colloidal interactions of micro-sized biochar and a kaolinitic soil clay”. *Science of the Total Environment*, 738, 139844. (Q1; IF: 7,963)
10. **Nguyen, T.Q.A.**, Nguyen, N.M. (2019). “Straw phytolith for less hazardous open burning of paddy straw”, *Scientific Reports*, 9, 20043. (Q1; IF: 4,379)
11. Nguyen, X.H., Nguyen, T.V., Tran, T.C., **Nguyen, T.Q.A.**, Nguyen, T.L., Bui, T.K.A., Dultz, S., Ta Yeong, W., Nguyen, N.M. (2019). “Characterization and implication of phytolith-associated potassium in rice straw and paddy soils”. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(10), 1354–1369. (Q2; IF: 3,092)

### **Công bố trong nước**

12. **Nguyễn Thị Quỳnh Anh**, Hoàng Nguyễn Bình, Nguyễn Ngọc Minh. 2021. Nghiên cứu một số đặc điểm hình thái, cấu trúc và thành phần hóa học của phytolith trong một số loài thực vật giàu silic. *Tạp chí Môi trường*, chuyên đề Khoa Môi trường-ĐHKHTN HN, 13–17.

### **Hội thảo quốc tế**

13. Mai, T.N., Pham, T.T.N., **Nguyen, T.Q.A.**, Nguyen, T.N.A., Nguyen, M.A., Bach, T.H.N., Do, L.C., Nguyen, T.T., Nguyen, H.N., Dultz, S., Nguyen, N.M. (2020). “Colloidal dynamics of soil clay under the effect of fine-sized biochars: Implication for biochar amendment towards preventing clay loss and soil erosion”. EGU2020-6481.SSS12.7. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-6481
14. **Nguyen, T.Q.A.**, Nguyen, N.M., “Rice straw phytolithic biochar as a platform for loading and serving as nutrients for soil and crops”. VCESS 2021.

### **Sách chuyên khảo**

15. Nguyễn Ngọc Minh (CB), Nguyễn Thị Quỳnh Anh, Mai Thị Nga, Phạm Văn Quang, Đàm Thị Ngọc Thân, Nguyễn Ngọc Tú, Đinh Mai Vân. 2022. Phytolith – Sự hình thành, đặc điểm và ứng dụng trong lĩnh vực nông nghiệp. NXB Đại học Quốc gia Hà Nội.

**Tổng: 15 công trình**