

ĐẶC ĐIỂM THÀNH PHẦN KHOÁNG VẬT CỦA CẤU TRÚC ĐÁ BASALT KHU VỰC TÂY NGUYÊN VÀ TIỀM NĂNG ỨNG DỤNG TRONG ỨNG PHÓ BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU

Nguyễn Minh Tiến, Huỳnh Lê Anh Thư, Hoàng Thị Thanh Thủy,
Lê Thị Thùy Dương, Cấn Thu Văn, Nguyễn Đức Bình
Trường Đại học Tài Nguyên và Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh

Ngày nhận bài: 20/7/2025; ngày gửi phản biện: 21/7/2025; ngày chấp nhận đăng: 20/8/2025

Tóm tắt: Biến đổi khí hậu do phát thải khí nhà kính, đặc biệt là CO_2 , đang là một trong những thách thức môi trường lớn nhất toàn cầu. Bên cạnh các giải pháp giảm phát thải, các chiến lược loại bỏ CO_2 đang được nghiên cứu và triển khai nhằm giảm nồng độ CO_2 trong khí quyển. Giải pháp tăng cường phong hóa đá sử dụng basalt hiện đang được quan tâm. Basalt - một loại đá giàu khoáng vật Mg và Ca - khi được bổ sung dưới dạng bột mịn thì các khoáng vật này sẽ phân giải thông qua các phản ứng hóa học, giải phóng các ion vào đất và tham gia vào quá trình cô lập CO_2 . Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thành phần khoáng vật của đá basalt làm cơ sở đánh giá tiềm năng triển khai giải pháp này tại khu vực Tây Nguyên. Đồng thời, cũng nêu bật các lợi ích kép về hiệu quả cố định CO_2 và cải thiện chất lượng đất trong điều kiện đặc thù của Việt Nam.

Từ khóa: Biến đổi khí hậu, loại bỏ CO_2 , phong hóa tăng cường, cải tạo đất, basalt, Tây Nguyên.

1. Mở đầu

Nguyên nhân chính của biến đổi khí hậu (BĐKH) ngày nay là do hoạt động của con người, chủ yếu thông qua việc đốt cháy nhiên liệu hóa thạch và thay đổi sử dụng đất, làm tăng mạnh nồng độ carbon dioxide (CO_2) trong khí quyển. CO_2 là khí nhà kính chính, đóng góp lớn nhất vào hiện tượng ấm lên toàn cầu. BĐKH ảnh hưởng tiêu cực đến nông nghiệp, tài nguyên nước, sức khỏe và các hệ sinh thái - những trụ cột của phát triển bền vững. Để đạt mục tiêu hạn chế nhiệt độ toàn cầu tăng không quá $1,5^\circ\text{C}$ hoặc 2°C , cần kết hợp giảm thiểu phát thải và loại bỏ CO_2 với quy mô lớn [1].

Giải pháp tăng cường phong hóa đá (Enhanced Rock Weathering - ERW) là một trong những chiến lược loại bỏ CO_2 (Carbon Dioxide Removal - CDR) được chú trọng nghiên cứu [2]. Giải pháp này bao gồm việc bổ sung các loại đá giàu silicate như basalt đã được nghiền nhỏ vào

đất nông nghiệp nhằm đẩy nhanh quá trình hấp thụ CO_2 [3]. ERW không chỉ góp phần cô lập carbon mà còn có khả năng cải thiện năng suất cây trồng, tăng cường khả năng kháng sâu bệnh, đồng thời hỗ trợ tái tạo các loại đất bị chua, bị phèn và nghèo dinh dưỡng [2], [4]. Basalt được coi là vật liệu silicate lý tưởng cho giải pháp ERW nhờ chứa ít nhất sáu nguyên tố dinh dưỡng thiết yếu cho cây trồng - gồm P, K, Ca, Mg, Mn và Fe - đồng thời có hàm lượng rất thấp các kim loại Cr và Ni gây hại khi so sánh với đá siêu mafic [2], [4]. Các khoáng vật silicate được thêm vào sẽ phản ứng với CO_2 hòa tan trong nước, tạo ra các cation kiềm như Mg^{2+} và Ca^{2+} , đồng thời làm tăng độ kiềm của môi trường đất. Tùy theo đặc điểm hóa học của đất, quá trình này có thể dẫn đến sự hình thành các khoáng carbonate hoặc chuyển CO_2 hòa tan ra đại dương qua dòng chảy bề mặt - cả hai con đường đều giúp cô lập CO_2 lâu dài trong ước tính hàng chục nghìn năm [2]. Để hạn chế các tác động tiêu cực của ERW - ví dụ như ảnh hưởng từ khai thác khoáng sản - cần ưu tiên tận dụng các nguồn chất thải đá silicate sẵn có, bao gồm đá phế liệu từ mỏ và các bãi thải

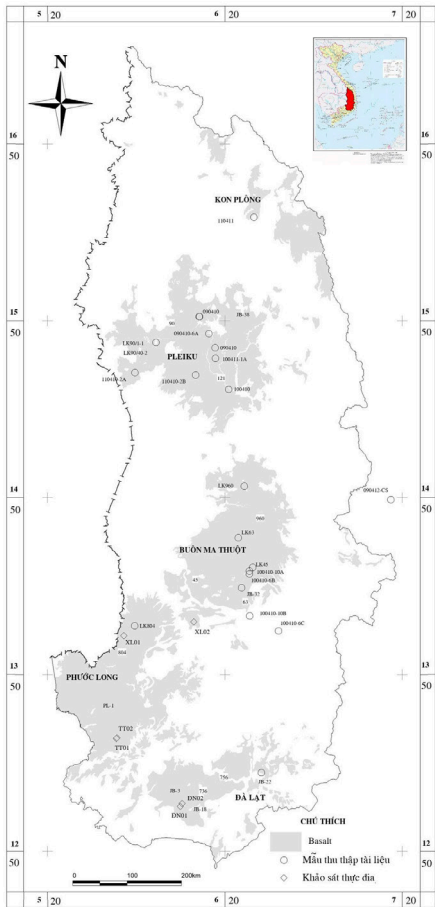
Liên hệ tác giả: Nguyễn Minh Tiến
Email: 1150100003@sv.hcmunre.edu.vn

cũ [4]. Khi được triển khai ở quy mô lớn, ERW được xem là một chiến lược CDR tiềm năng có thể đồng thời góp phần đảm bảo an ninh lương thực và đất đai, giảm phát thải CO₂ và làm chậm quá trình acid hóa của đại dương [2].

Ở Tây Nguyên rất phổ biến đá basalt (Hình 1). Hoạt động phun trào núi lửa trong Neogen - Đệ Tứ đã tạo nên những lớp phủ basalt có quy mô lớn với bề dày dày từ vài mét cho đến gần 400 m (Pleiku) [5]. Basalt khu vực Tây Nguyên chủ yếu phân bố ở các cao nguyên lớn nhất là Phước Long (khoảng 6.000 km²) nằm giữa biên giới Việt Nam - Campuchia và Bolovens (Lào), Lâm Đồng

(bao gồm 3 trung tâm riêng biệt là Di Linh, Bảo Lộc và Đức Trọng khoảng 2.500 km²), Pleiku (khoảng 4.000 km²), Buôn Ma Thuột (khoảng 3.800 km²) và Kon Plông (Kon Tum) (khoảng 1.800 km²) [6]. Các thành tạo basalt chính được quan sát thấy ở Tây Nguyên bao gồm hệ tầng Đại Nga βN_2 đn), hệ tầng Túc Trưng (βN_2 -Q₁tt) và hệ tầng Xuân Lộc (βQ_2 xl).

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thành phần khoáng vật của đá basalt và đánh giá tiềm năng ứng dụng thực tiễn của giải pháp này trong cải tạo đất ở khu vực Tây Nguyên.



Hình 1. Sơ đồ phân bố basalt ở khu vực Tây Nguyên (I: Cao nguyên Pleiku, II: Cao nguyên Buôn Ma Thuột, III: Cao nguyên Phước Long, IV: Cao nguyên Đà Lạt)

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1 Thu thập dữ liệu

Các bài báo đã công bố trong và ngoài nước được thu thập và tổng hợp dựa trên

công cụ tìm kiếm Google Scholar bằng các từ khóa: Enhanced rock weathering, carbon dioxide removal, basalt weathering, basalt soil amendment, inorganic carbon storage in soils, v.v... Các tài liệu về địa chất khu vực được thu

thập và tổng hợp trong bài báo gồm: Bản đồ Địa chất và Khoáng sản tỷ lệ 1:200.000 các nhóm từ Bản Đôn, Bu Prang, Buôn Ma Thuột, An Khê, B’Lao, Đà Lạt, Cam Ranh, Bến Khế, Kon Tum, Pleiku, Măng Đen, Bồng Sơn, Đắk Tô và Quảng Ngãi.

Dữ liệu phân tích thành phần hóa học của basalt được thu thập qua kết quả của 49 lỗ khoan với 92 mẫu và tính toán tham số thống kê theo khu vực (Cao nguyên Pleiku, Cao nguyên Buôn Ma Thuột, Cao nguyên Phước Long, Cao nguyên Đà Lạt) từ các nghiên cứu trước đây [6-11].

2.2 Khảo sát thực địa

Dựa trên các tài liệu địa chất khu vực, sáu điểm lộ địa chất có cấu trúc basalt đặc trưng cho Cao nguyên Pleiku, Buôn Ma Thuột, Lâm Đồng và Đắk Nông đã được lựa chọn (Bảng 1).

2.3. Phương pháp phân tích thành phần khoáng vật

Các mẫu đá được mô tả bằng mắt thường ngoài thực địa. Phương pháp xác định thành phần khoáng vật được thực hiện theo quy định. Mẫu tươi được cắt thành lát mỏng có chiều dày bằng 0,03mm, gắn cố định lên lam kính bằng nhựa Canada. Khi quan sát dưới kính dựa vào các tính chất quang học: hình dạng, màu và tính đa sắc, tính cát khai, chiết suất, lưỡng chiết suất, góc tắt, dấu kéo dài, biến đổi thứ sinh,... để kết luận tên khoáng vật. Các mẫu được phân tích dưới kính hiển vi phân cực (Meji-Nhật Bản), thực hiện tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - Đại học Quốc gia TP.HCM và Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP.HCM. Kết quả đã xác định thành phần khoáng vật (ban tinh và nền), kiến trúc, cấu tạo và mức độ biến đổi của đá.

Bảng 1. Đặc điểm basalt khu vực Tây Nguyên

Hệ tầng/ Số hiệu mẫu	Tọa độ	Vị trí/ Phường, Xã	Phân loại đá basalt	Mô tả mẫu	Thành phần khoáng vật
Hệ tầng Xuân Lộc (βQ ₂ xl) XL01	12°24'21.30"N 107°34'48.17"E	Thuận An	basalt olivine	màu đen, cấu tạo khối, kiến trúc vi tinh	Olivine (ol) > Pyroxen (py) > Plagioclase (pl) > Thủy tinh núi lửa (g) > Khoáng vật thứ sinh (sm)
Hệ tầng Xuân Lộc (βQ ₂ xl) XL0 ₂	12°28'29.66"N 107°56'39.66"E	Nam Đà	basalt olivine	màu đen, cấu tạo khối, kiến trúc vi tinh	ol > py > pl > g > sm
Hệ tầng Túc Trưng (βN ₂ - Q ₁ tt) TT01	11°52'45.96"N 107°32'26.94"E	Kiến Đức	basalt tholeit	màu xám đen, cấu tạo khối, kiến trúc vi tinh	pl > py > ol > g > sm
Hệ tầng Túc Trưng (βN ₂ - Q ₁ tt) TT02	11°52'56.58"N 107°32'36.00"E	Kiến Đức	plagio- basalt	màu xám đen, cấu tạo khối, kiến trúc vi tinh	pl > py > ol > g > sm
Hệ tầng Đại Nga (βN ₂ đn) ĐN01	11°32'51.20"N 107°52'47.25"E	Phường 1 Bảo Lộc	basalt pyroxen	màu xám đen, cấu tạo khối, kiến trúc vi tinh	py > pl > ol > g > sm
Hệ tầng Đại Nga (βN ₂ đn) ĐN02	11°31'53.34"N 107°52'12.33"E	B’Lao	basalt tholeit	màu xám đen, cấu tạo lỗ rỗng, kiến trúc vi tinh	pl > py > ol > g > sm

Khoáng vật thứ sinh (sm): iddingsite, chlorite, paragonite.

2.4. Phương pháp tính CDR lý thuyết

Phương pháp tính toán CDR lý thuyết áp dụng theo Lewis et al. (2021). CDR lý thuyết được biểu diễn bằng chỉ số RCO₂ là tỷ lệ giữa

số tấn CO₂ được lưu trữ trên mỗi tấn đá bị phong hóa. RCO₂ được tính toán dựa trên hàm lượng các cation có khả năng tạo độ kiềm [12]:

$$R_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{100} \times \left(\frac{\%CaO}{M_{CaO}} + \frac{\%MgO}{M_{MgO}} \right) \times \omega + \left(\frac{\%Na_2O}{M_{Na_2O}} + \frac{\%K_2O}{M_{K_2O}} \right) \times 0,5 \times \omega \quad (1)$$

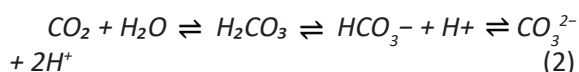
Trong đó:

$M_{CO_2} = 44$ g/mol; % oxide là phần trăm khối lượng của nguyên tố biểu diễn dưới dạng oxide (CaO, MgO, Na₂O, K₂O); M_{oxide} là khối lượng mol của oxide; ω biểu thị lượng CO₂ được loại bỏ khỏi khí quyển do dòng chảy vào đại dương (1,72).

3. Kết quả và thảo luận

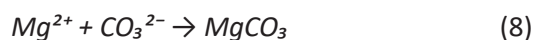
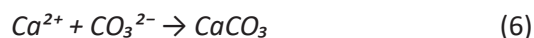
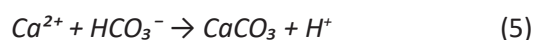
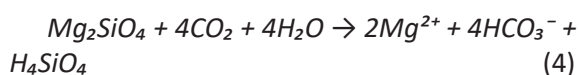
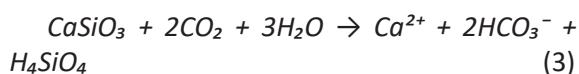
3.1. Cơ chế ERW

Khi bổ sung bột đá basalt vào đất sẽ làm gia tăng vận tốc quá trình phong hóa hóa học và kết quả là cô lập một lượng lớn CO₂ từ khí quyển [2], [12-14]. Trước hết, CO₂ trong khí quyển hòa tan vào nước mưa hoặc nước lỗ rỗng trong đất, tạo thành acid carbonic (H₂CO₃), từ đó thiết lập chuỗi phản ứng cân bằng sau [13]:



Phản ứng trên là một chuỗi cân bằng hóa học phụ thuộc vào giá trị pH của môi trường. Trong điều kiện đất nông nghiệp sau khi được bổ sung bột basalt - thường có pH trung tính đến hơi kiềm (6,5-8,5) - dạng chiếm ưu thế của carbon vô cơ hòa tan là ion bicarbonate (HCO₃⁻). Ở pH thấp hơn (xấp xỉ 5,5-6,0), H₂CO₃ có thể tồn tại ngắn trước khi phân ly, trong khi ở pH rất cao (>10), dạng CO₃²⁻ trở nên chiếm ưu thế, nhưng điều kiện này hiếm khi xảy ra trong đất nông nghiệp thông thường [12-13].

Do đó, dung dịch acid carbonic sẽ phản ứng với khoáng vật silicate giàu Ca²⁺ và Mg²⁺ trong bột đá basalt, ví dụ như wollastonite (CaSiO₃) hay olivine (Mg₂SiO₄), hình thành bicarbonate hoặc carbonate ổn định trong đất [2], [12-14]:



Các ion HCO₃⁻ có thể được vận chuyển ra đại dương theo nước lỗ rỗng hoặc nước dưới đất và nước mặt. Trong trường hợp này, bicarbonate đóng vai trò là dạng lưu trữ CO₂ hòa tan ổn định trong đại dương [12], [14]. Như vậy, quá trình ERW góp phần lưu trữ CO₂ dưới hai dạng: (i) Khoáng vật carbonate ổn định trong đất và/hoặc (ii) [2], [4], [12-15].

3.2. Đặc điểm thành phần khoáng vật basalt khu vực Tây Nguyên

Việt Nam là lãnh thổ có diện tích các cao nguyên basalt Kainozoi lớn nhất trong khu vực Đông Dương. Trong đó, phun trào basalt Kainozoi (Neogen - Đệ Tứ) xảy ra phổ biến nhất ở Tây Nguyên và kéo dài đến Đông Nam Bộ với diện tích lên đến 23.000 km². Dữ liệu đồng vị tuổi K-Ar và Ar-Ar cho thấy các trung tâm basalt ở Việt Nam hoạt động trong các khoảng thời gian sau: Đà Lạt (17,6-7,9 triệu năm trước), Phước Long (<8-3,4 triệu năm trước), Buôn Ma Thuột (5,8-1,67 triệu năm trước), Pleiku (4,3-0,8 triệu năm trước) và Xuân Lộc (0,83-0,44 triệu năm trước) [6]. Do đó, Hoàng và Flower (1998) đã phân chia thành hai loạt phun trào chính: Loạt sớm (early eruptive series) có tuổi Miocen và loạt muộn (late eruptive series) hình thành từ Pliocen đến hiện tại [6]. Loạt sớm đại diện bởi hệ tầng Đại Nga (βN₂đn), phân bố rộng ở Đà Lạt và Phước Long với thể tích dung nham ước tính đạt 1.500-2.200 km³. Ngược lại, loạt muộn được đặc trưng bởi hệ tầng Xuân Lộc (βQ₂xl) phân bố ở Xuân Lộc và Pleiku với thể tích dung nham ước tính 500-2.000 km³. Khu vực Buôn Ma Thuột với thể tích dung nham ước tính 1.500 km³ có thành phần chuyển tiếp giữa hai loạt magma nói trên đặc trưng bởi sự phân bố rộng rãi hệ tầng Túc Trưng (βN₂-Q₁tt).

Dựa vào các kết quả phân tích thành phần

khoáng vật và các kết quả nghiên cứu đã công bố của Nguyen et al. 1996 [9] có thể xếp các mẫu đá basalt theo hai loạt phun trào như sau:

- Loạt muộn:

Mẫu TT02 đá có màu xám đen đến đen, kiến trúc vi tinh hoặc ẩn tinh, cấu tạo đặc sít hoặc lỗ rỗng. Thành phần khoáng vật gồm:

Ban tinh: chiếm khoảng 15-20%, phân bố rải rác, gồm olivine (10-15%) thường có dạng tha hình, hoặc hình thoi và plagioclase (5-10%) dạng lăng trụ.

Nền: chiếm khoảng 80-85% gồm chủ yếu là plagioclase (40-45%), pyroxene (35-40%), olivine (10-15%).

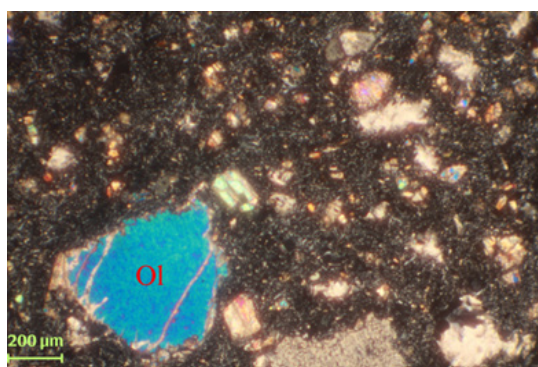
Hai mẫu XL01 và XL02 có màu xám đen đến đen, kiến trúc porphyr. Bằng mắt thường có thể quan sát khoáng vật olivine, cấu tạo đặc sít đôi chỗ có cấu tạo lỗ rỗng. Thành phần khoáng vật đặc trưng như sau:

Ban tinh: Chiếm khoảng 10-15%, phân bố rải

rác, đôi khi tập trung thành cụm gồm chủ yếu là olivine dạng tha hình, olivine bị gặm mòn mạnh, bị iddingsit hóa dọc ven rìa hoặc vào các đường nứt (Hình 2a, 2b).

Nền: chiếm khoảng 85-90%, gồm chủ yếu là plagioclase (45-50%), pyroxene (15-20%), olivine (5-10%) (Hình 2a, 2b).

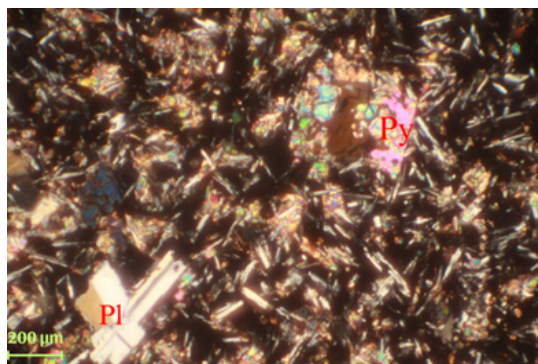
Do đó, hai mẫu này có thể xếp vào basalt olivine là nhóm đá giàu ban tinh olivine, không bão hòa silic (45% trọng lượng). Kết quả này cũng tương đồng với nghiên cứu của Hoang và Flower (1998) đã cho thấy olivine tholeiite, alkali basalt, basanite và hiếm hơn là nephelinite. So với loạt sớm, olivine trong loạt muộn có hàm lượng cao hơn (Fo89-70), chiếm khoảng 7-15% phenocryst. Clinopyroxene vẫn phổ biến nhưng có xu hướng nghèo enstatite hơn (giàu Fe). Plagioclase ít gặp hơn và đôi khi bị thay thế bởi anorthoclase (feldspar giàu natri). Orthopyroxene trong loạt muộn hiếm gặp.



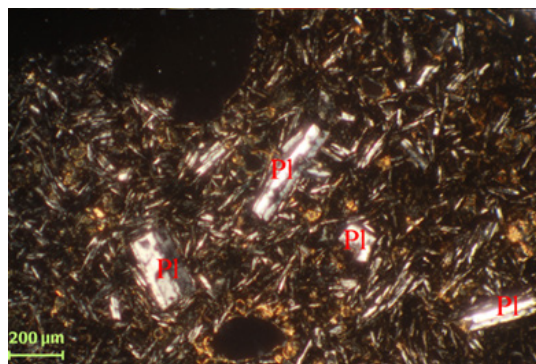
a) Mẫu XL01. Ban tinh Olivine (Ol) đặc trưng cho loạt phun trào muộn.



b) Mẫu XL02. Ban tinh Olivine (Ol) tập trung thành cụm đặc trưng cho loạt phun trào muộn



c) Mẫu TT01. Ban tinh Pyroxene (Py) và song tinh Plagioclase (Pl). Kiến trúc dolerite, đặc trưng cho loạt phun trào sớm



d) Mẫu ĐN02. Basalt lỗ rỗng có ban tinh Plagioclase (Pl) dạng lăng trụ ngắn, đặc trưng cho loạt phun trào sớm

Hình 2. Lát mỏng thạch học dưới kính hiển vi phân cực (dưới 2 nicol, độ phóng đại 4X)

- Loạt sớm:

Mẫu ĐN01 đá có màu xám đen đến đen, kiến trúc vi tinh hoặc ẩn tinh, cấu tạo đặc sít hoặc lỗ rỗng. Thành phần khoáng vật gồm:

Ban tinh: Chiếm khoảng 10-15%, phân bố rải rác, gồm chủ yếu pyroxene thường nửa tự hình.

Nền: Chiếm khoảng 85-90% gồm chủ yếu là plagioclase (30-35%), pyroxene (20-25%), olivine (15-20%).

Hai mẫu đặc trưng của loạt này là TT01 và ĐN02. Đá có màu xám đen đến đen, kiến trúc vi tinh, cấu tạo đặc sít đôi chỗ có cấu tạo lỗ rỗng, với thành phần khoáng vật đặc trưng của mẫu như sau:

Ban tinh: Chiếm khoảng 10-20%, phân bố rải rác. Thành phần khoáng vật có sự khác biệt khá rõ nét với loạt sớm bao gồm chủ yếu là plagioclase (50-55%) thường có dạng lăng trụ ngắn và pyroxene (45-50%) dạng nửa tự hình (Hình 2c, 2d).

Nền: Chiếm khoảng 80-90%, gồm chủ yếu là plagioclase (60-70%) dạng lăng trụ ngắn hoặc dạng que không có định hướng, pyroxene (20-25%), xen vào giữa các lăng trụ plagioclase là các hạt khoáng vật màu, olivine (5-10%) (Hình 2c, 2d).

Hai mẫu này có thể xếp vào basalt tholeiite, phân biệt với basalt olivine bởi hàm lượng silica (SiO_2) tăng cao (đến 50% trọng lượng). Đặc trưng của basalt tholeiite là có mặt thạch anh và feldspar kiềm trong nền cơ sở. Đồng thời basalt tholeiite thường chứa ban tinh olivine ít hơn so với basalt olivine [16].

3.3. Đánh giá tiềm năng ứng dụng giải pháp ERW đối với basalt Tây Nguyên

3.3.1. Đặc điểm thành phần khoáng vật

Kết quả nghiên cứu hoàn toàn phù hợp với các số liệu đã công bố cho thấy các đá basalt khu vực Tây Nguyên được xếp vào quartz tholeiite, olivine tholeiite, alkali basalt và basanite. Các nhóm đá nói trên đều có thành phần khoáng vật chủ yếu khoáng vật giàu Ca^{2+} và Mg^{2+} như plagioclase, pyroxene và olivine. Các đặc trưng cho nhóm đá quartz tholeiite là plagioclase (An83-72), olivine (Fo78-74) và augite (Wo47-49En40-36Fs13-14) [8]. Đối với nhóm đá olivine tholeiite có thành phần ban tinh chủ yếu là olivine (Fo82-78) và

augite (Wo44-43En42-40Fs16-19) cùng với một lượng nhỏ plagioclase (An85-68) [8]. Tương tự, Alkali basalt và basanite chủ yếu có thành phần là olivine (Fo89-70) và một ít augite [6]. Các khoáng vật này đều thuộc nhóm phong hóa nhanh nên có thể được xem là loại vật liệu thích hợp cho ERW [4], [12], [14]. Cụ thể, thời gian tồn tại trung bình của khoáng vật plagioclase giàu Ca và olivine với kích thước hạt 1 mm ở điều kiện pH 5 và nhiệt độ 25°C chỉ trong khoảng 100-10.000 năm, thấp hơn rõ rệt so với các khoáng vật bền hơn như feldspar giàu K (100.000-1.000.000 năm) và thạch anh (>10.000.000 năm) [17]. Do đó, bột đá basalt Tây Nguyên là nguyên liệu phù hợp để triển khai ERW.

3.3.2. Điều kiện khí hậu và thổ nhưỡng

Nhiệt độ và độ ẩm là hai yếu tố môi trường quan trọng ảnh hưởng đến tốc độ phản ứng phong hóa. Khi đất có độ ẩm cao, tốc độ phong hóa đá sẽ tăng cao [15]. Ở khí hậu nhiệt đới như Tây Nguyên - nơi có nhiệt độ cao và độ ẩm lớn quanh năm - tốc độ hòa tan khoáng vật diễn ra nhanh hơn so với các vùng ôn đới [2, 4, 14, 15]. Các quốc gia nhiệt đới như Indonesia, Brazil và Việt Nam có tiềm năng rất lớn cho ERW nhờ điều kiện sinh học - khí hậu thuận lợi và diện tích đất canh tác rộng [14].

Các yếu tố thổ nhưỡng mang đến nhiều thuận lợi cho hiệu quả phong hóa của bột basalt. Thứ nhất, Tây Nguyên có khoảng 5 triệu ha đất nông nghiệp, trong đó, đất đỏ basalt chiếm diện tích lớn (1,3 triệu ha) với độ xốp cao (khoảng 65%) và khả năng giữ ẩm tốt, ngay cả trong mùa khô vẫn duy trì độ ẩm ở khoảng 40% [18]. Điều này giúp tăng tiếp xúc giữa các hạt basalt và môi trường phản ứng (CO_2 , nước, vi sinh vật), từ đó thúc đẩy phản ứng hòa tan khoáng vật diễn ra hiệu quả. Thứ hai, đất nông nghiệp Tây Nguyên có độ pH ở mức thấp, phổ biến dưới 5,0, thường trong khoảng 4,0-5,0, tạo điều kiện thuận lợi cho phản ứng phong hóa silicate diễn ra [19-20]. Thứ ba, đất ở khu vực này có hàm lượng N từ khá đến giàu, nhưng lại nghèo P và K - hai nguyên tố thường có mặt trong thành phần khoáng vật của basalt [18]. Các khoáng P và K từ bột basalt được hòa tan và hấp thu bởi cây trồng, bổ sung dinh dưỡng và cải thiện độ phì nhiêu đất.

Sự kết hợp của khí hậu nóng ẩm, đất đỏ basalt tơi xốp, độ ẩm cao, pH phù hợp và tình trạng nghèo P và K tạo môi trường lý tưởng cho phản ứng phong hóa bột basalt, giúp tăng cường hấp thụ CO₂ và cải tạo đất, cho thấy sự phù hợp để triển khai giải pháp ERW cho đất nông nghiệp tại Tây Nguyên.

3.3.3. Các yếu tố khác

Hiệu quả CDR phụ thuộc vào diện tích bề mặt riêng - diện tích tiếp xúc giữa bột đá và đất càng lớn thì phản ứng càng nhanh. Diện tích bề mặt riêng bị chi phối bởi kích thước, độ nhám của hạt và thành phần khoáng vật.

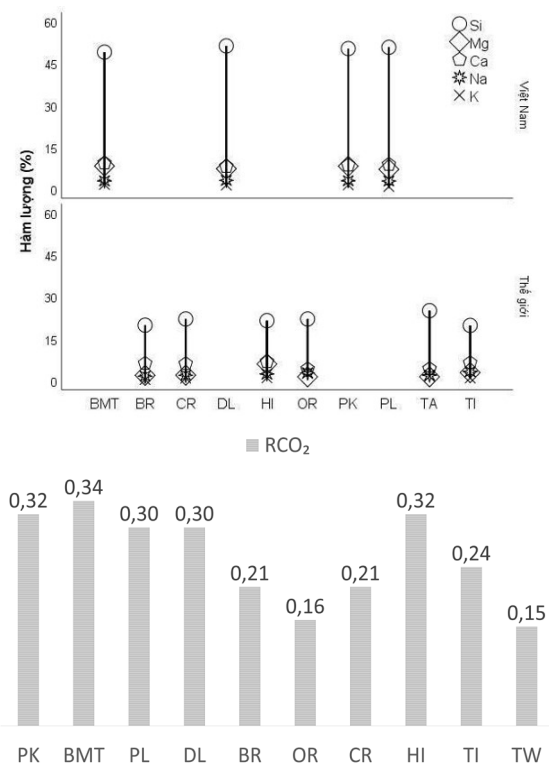
Diện tích bề mặt riêng là yếu tố then chốt kiểm soát tốc độ hòa tan của khoáng vật và tiềm năng lưu trữ CO₂ [12]. Tuy nhiên việc nghiền đá quá mịn có thể không tỉ lệ thuận với hiệu quả do đòi hỏi nhiều năng lượng hơn dẫn đến lượng khí thải CO₂ cao hơn [12], [14].

Kích thước hạt lý tưởng được Lewis et al. (2021) đề xuất là ≤75 μm [12]. Thực tế hiện nay

ở nước ta, đá sản phẩm với kích thước nhỏ nhất là đá mi bụi có kích thước <5 mm. Do đó, yếu tố kỹ thuật như năng lượng tiêu hao trong quá trình nghiền đá sẽ là một thách thức khi áp dụng ERW ở khu vực Tây Nguyên.

3.3.4. Kết quả tính toán CDR lý thuyết

Dựa trên các nghiên cứu trước đây cho thấy thành phần hóa học của basalt Tây Nguyên có hàm lượng Ca và Mg ở mức cao so với các khu vực nghiên cứu khác trên thế giới (Hoa Kỳ, Vương quốc Anh, Úc và Malaysia) (Hình 3). Hàm lượng Mg trung bình trong basalt Tây Nguyên cao gấp 3-6 lần so với basalt ở các địa phương nước ngoài (đa số <3%). Hàm lượng Ca trung bình trong basalt Tây Nguyên cũng cao vượt trội trong khi hầu hết các mẫu từ nước ngoài chỉ khoảng 4-7%. Mẫu từ Buôn Ma Thuột có thể đạt tới 11,31% CaO. Đặc biệt basalt tholeiite ở loạt sớm thường có hàm lượng Si trung bình và kiềm thấp, làm tăng tốc độ phong hóa so với basalt kiềm ở loạt muộn.



Hình 3. So sánh basalt khu vực Tây Nguyên và thế giới: (a) hàm lượng Si, Ca, Mg, Na và K của basalt khu vực Tây Nguyên; (b) RCO₂ (đơn vị: tấn CO₂ được lưu trữ trên mỗi tấn đá bị phong hóa) [6-12]. PK: Pleiku, BMT: Buôn Ma Thuột, PL: Phước Long, DL: Đà Lạt; Blue Ridge (Hoa Kỳ), Oregon (Hoa Kỳ), Cragmill (Vương quốc Anh), Hillhouse (Vương quốc Anh), Tichum (Úc), Tawau (Malaysia)

Kết quả tính toán RCO₂ đã cho thấy mỗi tấn đá basalt Tây Nguyên, Việt Nam có thể lưu trữ tối đa 0,3 tấn CO₂. Tiềm năng này ở mức cao so với một số khu vực khác trên thế giới.

Tuy nhiên, hiệu quả ERW chỉ đạt tối ưu khi hàm lượng các nguyên tố vết có hại như Cr, Ni, v.v không vượt ngưỡng cho phép, đảm bảo an toàn môi trường [4], [12], [14]. Do đó, nếu áp dụng ERW cần lựa chọn khu vực basalt đáp ứng ngưỡng cho phép sử dụng trong nông nghiệp theo Phụ lục IV - Yêu cầu về yếu tố hạn chế (yếu tố gây hại) và mức quy định trong phân bón trong Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng phân bón (QCVN 01-189:2019/BNNPTNT) [21]. Trong quá trình triển khai cũng cần thực hiện giám sát thường xuyên hàm lượng hai nguyên tố nói trên trong đất.

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy ở khu vực Tây Nguyên, basalt có thành phần khoáng vật đặc trưng cho basalt kiềm và á kiềm. Khoáng vật

ban tinh phổ biến là các khoáng vật giàu Ca và Mg như olivine, pyroxene và plagioclase. Đặc biệt, basalt Tây Nguyên có hàm lượng Ca và Mg cao nên tiềm năng hấp thụ CO₂ có thể lên tới khoảng 0,3 tấn CO₂ trên mỗi tấn đá basalt bị phong hóa. Giá trị này ở mức cao hơn so với các khu vực tham chiếu trên thế giới. Với đặc điểm thành phần hóa học thuận lợi, điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm và thổ nhưỡng phù hợp, Tây Nguyên là khu vực có tiềm năng lớn để thử nghiệm và triển khai giải pháp ERW tại Việt Nam. Tuy nhiên, để tiến tới ứng dụng thực tiễn, cần có các nghiên cứu bổ sung về phát thải CO₂ từ quá trình nghiền và vận chuyển đá, các tiêu chuẩn kỹ thuật và quy định môi trường liên quan đến sử dụng vật liệu basalt tự nhiên. Các kết quả bước đầu đã mở ra hướng tiếp cận đầy hứa hẹn trong việc kết hợp mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính với cải thiện chất lượng đất nông nghiệp thông qua giải pháp ERW sử dụng basalt Tây Nguyên.

Đóng góp của từng tác giả trong bài báo: Xây dựng ý tưởng: Nguyễn Minh Tiến, Huỳnh Lê Anh Thư, Hoàng Thị Thanh Thủy; Xử lý số liệu: Nguyễn Minh Tiến, Huỳnh Lê Anh Thư; Viết bản thảo: Hoàng Thị Thanh Thủy, Huỳnh Lê Anh Thư, Nguyễn Minh Tiến, Nguyễn Đức Bình. Chỉnh sửa bản thảo: Lê Thị Thùy Dương, Cấn Thu Vần.

Lời cảm ơn: Các tác giả bài báo chân thành cảm ơn sự hỗ trợ của Th.S Lê Quang Luật (HCMUNRE) và Th.S Phạm Minh (HCMUS). Các kết quả trong nghiên cứu này được tài trợ từ kinh phí của đề tài nghiên cứu khoa học cấp sinh viên năm 2025 mã số SV.2025.05 của trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP.HCM.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của mình, chưa từng công bố trước đó, không sao chép, đạo văn; các tài liệu tham khảo đã được trích dẫn đầy đủ; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [Core Writing Team, Lee, H. and Romero, J. (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
2. Hartmann, J. et al. (2013), "Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification", *Reviews of Geophysics*, vol 51, no 2, 113-149, doi: 10.1002/rog.20004.
3. Kelland, M. E. et al. (2020), "Increased yield and CO₂ sequestration potential with the C₄ cereal *Sorghum bicolor* cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil", *Global Change Biology*, vol 26, no 6, 3405-3415, doi: 10.1111/gcb.15089.
4. Beerling, D. J. et al. (2018), "Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security", *Nature Plants*, vol 4, no 3, 138-147, doi: 10.1038/s41477-018-0108-y.
5. Phạm Tích Xuân và cộng sự (2004), "Địa hoá đá basalt Kainozoi muộn Việt Nam và ý nghĩa kiến tạo của nó", *Tạp chí Địa chất*, sê-ri A, số 285, 120-131.

6. Nguyen, H. and Flower, M. (1998), "Petrogenesis of Cenozoic basalts from Vietnam: Implication for origins of a 'diffuse igneous province'", *Journal of Petrology*, vol 39, no 3, 369-395, doi: 10.1093/petroj/39.3.369.
7. Barr, S. M. and Macdonald, A. S. (1981), "Geochemistry and geochronology of late Cenozoic basalts of Southeast Asia", *Geological Society of America Bulletin*, vol 92, no 8, 1069-1142, doi: 10.1130/GSAB-P2-92-1069.
8. Barr, S. M. and James, D. E. (1990), "Trace element characteristics of Upper Cenozoic basaltic rocks of Thailand, Kampuchea and Vietnam", *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, vol 4, no 3, 233-242, doi: 10.1016/S0743-9547(05)80016-9.
9. Nguyen, H. et al. (1996), "Major, trace element, and isotopic compositions of Vietnamese basalts: Interaction of hydrous EM1 rich asthenosphere with thinned Eurasian lithosphere", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol 60, no 22, 4329-4351, doi: 10.1016/S0016-7037(96)00247-5.
10. Nguyen, H. et al. (2013), "Collision-induced basalt eruptions at Pleiku and Buôn Mê Thuột, south-central Viet Nam", *Journal of Geodynamics*, vol 69, 65-83, doi: 10.1016/j.jog.2012.03.012.
11. An, A-R. et al. (2017), "Petrogenesis of Late Cenozoic basaltic rocks from southern Vietnam", *Lithos*, vol 272-273, 192-204, doi: 10.1016/j.lithos.2016.12.008.
12. Lewis, A. L. et al. (2021), "Effects of mineralogy, chemistry and physical properties of basalts on carbon capture potential and plant-nutrient element release via enhanced weathering", *Applied Geochemistry*, vol 132, 105023, doi: 10.1016/j.apgeochem.2021.105023.
13. Matter, J. M. and Kelemen, P. B. (2009), "Permanent storage of carbon dioxide in geological reservoirs by mineral carbonation", *Nature Geoscience*, vol 2, 837-841, doi: 10.1038/ngeo683.
14. Beerling, D. J. et al. (2020), "Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands", *Nature*, vol 583, 242-248, doi: 10.1038/s41586-020-2448-9.
15. Buss, W. et al. (2024), "Applying minerals to soil to draw down atmospheric carbon dioxide through synergistic organic and inorganic pathways", *Communications Earth & Environment*, vol 5, 602, doi: 10.1038/s43247-024-01771-3.
16. La Thị Chích (2010), *Thạch học*, Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Thành phố Hồ Chí Minh.
17. Dupla, X. et al. (2025), "Geochemical drivers of enhanced rock weathering in soils", in *Geoengineering and Climate Change: Methods, Risks, and Governance*, Beech, M. (ed.), 207-230, doi: 10.1002/9781394204847.ch13.
18. Hoàng Hiệp và cộng sự (2024), "Đánh giá thực trạng, tiềm năng tài nguyên môi trường phục vụ phát triển nông nghiệp hữu cơ khu vực Tây Nguyên", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, bản B, tập 66, số 10ĐB-HH, 25-34, doi: 10.31276/VJST.66(10DB-HH).25-34.
19. Nguyễn Thị Thủy và Lưu Thế Anh (2017), "Đánh giá chất lượng đất bazan dưới các loại hình sử dụng đất khác nhau khu vực Di Linh - Bảo Lộc, tỉnh Lâm Đồng", *Tạp chí Khoa học Đại học Quốc gia Hà Nội: Các Khoa học Trái đất và Môi trường*, tập 33, số 3, 67-78, doi: 10.25073/2588-1094/vnuees.4117.
20. Nguyễn Thành Mến và Nguyễn Mạnh Hà (2019), "Nghiên cứu, xác định và tuyển chọn nhóm thực vật, cây trồng có triển vọng trên đất bãi thải sau khai thác bauxite ở Tây Nguyên", *Tạp Chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, bản B, tập 61, số 11, 80-86.
21. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2019), *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng phân bón - QCVN 01-189:2019/BNNPTNT*, Hà Nội.

MINERALOGICAL CHARACTERISTICS OF BASALT IN THE CENTRAL HIGHLANDS OF VIET NAM AND ITS POTENTIAL FOR CLIMATE CHANGE MITIGATION APPLICATIONS

Nguyen Minh Tien, Huynh Le Anh Thu, Hoang Thi Thanh Thuy,
Le Thi Thuy Duong, Can Thu Van, Nguyen Duc Binh
Ho Chi Minh University of Natural Resources and Environment

Received: 20/7/2025; Accepted: 20/8/2025

Abstract: *Climate change, driven by greenhouse gas emissions-particularly carbon dioxide- is among the most critical global environmental challenges. In addition to emission reduction measures, Carbon Dioxide Removal strategies are being researched and implemented to lower atmospheric CO₂ concentrations. Enhanced Rock Weathering using basalt has recently gained increasing attention. Basalt-a rock rich in magnesium (Mg) and calcium (Ca) minerals-when applied in finely ground form, undergoes chemical reactions that break down these minerals, releasing ions into the soil and facilitating carbon sequestration. This paper provides an overview of the scientific basis of enhanced weathering, focusing on key factors that determine the effectiveness of stable carbonate mineral formation. This study presents the results of mineralogical analyses of basalt as a basis for evaluating the potential deployment of this approach in Viet Nam's Central Highlands. The study also highlights the co-benefits of CO₂ fixation and soil quality improvement under the specific conditions of Vietnam.*

Keywords: *Climate change, CO₂ removal, enhanced weathering, soil reclamation, basalt, Central Highlands.*