



TÁI CHẾ PHỤ PHẨM CÔNG NGHIỆP CỦA PERLITE TRONG VỮA XI MĂNG

TS. Nguyễn Đăng Hanh*

Tóm tắt: Đá perlite là loại đá trơ chứa thành phần Silic cao, được hình thành ở nhiệt độ cao trong dòng dung nham núi lửa. Do có cấu trúc rỗng và nhẹ nên perlite hay được sử dụng để làm màng lọc chiết tách trong công nghiệp và trở thành perlite phụ phẩm sau đó. Trong bài báo này, perlite phụ phẩm có nguồn gốc từ nhà máy chuyên chiết tách chất carageean từ tảo đỏ. Vữa có chứa perlite luôn thể hiện một cường độ cơ học thấp hơn nhiều so với vữa tiêu chuẩn, dao động từ 7,0 MPa đến 29,9MPa. Vữa có chứa perlite cũng là vữa nhẹ và thể hiện khả năng biến dạng lớn.

Từ khoá: Phụ phẩm perlite, vữa xi măng, cường độ cơ học, tiền xử lý

Abstract: Perlite is a rock pediment with high silicon content, formed at high temperatures in volcanic lava flows. Because of its hollow and light structure, perlite is often used as an industrial extraction filter and becomes perlite later. In this article, the by-product perlite is derived from a plant that specializes in extracting carageeans from red algae. Mortars containing perlite consistently exhibit a much lower mechanical strength than standard mortars, ranging from 7.0 MPa to 29.9 MPa. Mortars containing perlite are also lightweight mortars and exhibit great deformation potential.

Keywords: Perlite by-products, cement mortar, mechanical strength, pretreatment.

Nhận ngày 12/5/2022, chỉnh sửa ngày 28/5/2022, chấp nhận đăng ngày 10/6/2022

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tại các nước phát triển và đang phát triển, cùng với quá trình đô thị hoá nhanh chóng thì bê tông được sử

dụng rộng rãi do tính chất cơ học tốt, giá rẻ và sẵn có. Theo thống kê năm 2018 thì tại Mỹ đã sản xuất 2,4 tỷ tấn cốt liệu và con số đó trên toàn thế giới là 50 tỷ tấn, tương đương với mỗi người dân trên trái đất tiêu thụ khoảng 6,5 tấn mỗi năm. Theo ước lượng, khi dân số đạt 8,5 tỷ người vào năm 2030 thì sản xuất cốt liệu toàn cầu sẽ đạt khoảng 60 tỷ tấn [1]. Việc tiêu thụ khổng lồ và không ngừng tăng lên dẫn đến phải đặt ra câu hỏi bảo vệ và sử dụng tiết kiệm nguồn cốt liệu tự nhiên [2]. Nhiều giải pháp đã được đề ra, ví dụ như tái chế các loại bê tông cũ hoặc sử dụng các loại cốt liệu trung gian để thay thế một phần các loại cốt liệu tự nhiên, ví dụ như sử dụng vỏ sò nghiền, sử dụng trầm tích biển [2-4]. Một yêu cầu cần được xử lý trong thời gian gần đây là tìm giải pháp để tái chế perlite phụ phẩm thu được từ các nhà máy công nghiệp thực phẩm.

Đá Perlite hay còn gọi là đá trân châu, là loại đá trơ chứa thành phần Silic cao (chủ yếu là $\text{SiO}_2 > 70\%$) được hình thành ở nhiệt độ cao trong dòng dung nham núi lửa. Đá perlite trương nở dưới tác dụng của nhiệt sẽ có dạng thể hang (dạng xốp) nên tuy có thể tích lớn nhưng cực kỳ nhẹ. Đá perlite có thể thích ứng với nhiều ứng dụng trong xây dựng, nông nghiệp, công nghiệp, trong đó có công nghiệp thực phẩm với vai trò là một màng lọc chiết tách. Sau quá trình chiết tách công nghiệp, đá perlite trở thành phụ phẩm công nghiệp có chứa lẫn các tạp chất hữu cơ (gọi tắt là perlite phụ phẩm). Trong bài báo này, perlite phụ phẩm có nguồn gốc từ nhà máy chuyên chiết tách carageean từ tảo đỏ (red algae), tại miền Tây nước Pháp. Perlite phụ phẩm sẽ thay thế một phần cát để chế tạo vữa xi măng.

*Khoa Công trình, ĐH Giao thông vận tải

2. CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu

2.1.1. Vật liệu phổ thông

Xi măng sử dụng trong nghiên cứu này là Xi măng Portland CEM 52,5N. Cát vàng cỡ hạt 0/4 mm được sử dụng. Cát này có khối lượng riêng là 2680 kg/m³ và có hệ số hấp thụ là 0,5% và có môđul cỡ hạt là 2,81 và có độ lèn chặt là 0,61.

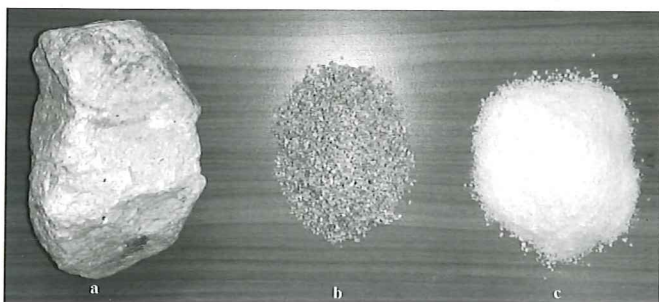
2.1.2. Perlite nguyên chất và perlite phụ phẩm

a) Perlite nguyên chất

Sau quá trình trường nở vì nhiệt, đá perlite tự nhiên trở thành sản phẩm có tính ứng dụng cao gọi là perlite nguyên chất (Hình 1). Perlite nguyên chất có đường kính hạt dao động từ 12 đến 131μm. Perlite nguyên chất có dạng bột màu trắng với khối lượng riêng là 0,255g/cm³. Khối lượng riêng tuyệt đối của perlite nguyên chất là 1,83g/cm³. Thành phần hoá học của perlite nguyên chất được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1: Thành phần hoá học perlite nguyên chất

Thành phần	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	CaO
Hàm lượng	75,41%	12,85%	0,64%	0,36%	3,70%	4,55%	0,82%



Hình 1: Perlite: (a) đá, (b) sau khi nghiền và (c) trương nở [5]

b) Perlite phụ phẩm

Perlite phụ phẩm được thu gom từ nhà máy công nghiệp thực phẩm sau quá trình chiết tách mà perlite nguyên chất đã được sử dụng với vai trò là màng lọc (Hình 2). Độ hút nước của perlite phụ phẩm rất lớn, là 117,5%. Đặc tính hút nước lớn này sẽ dẫn đến yêu cầu phải cung cấp một lượng nước lớn khi nhào trộn vữa hay bê tông để đảm bảo tính đồng nhất của vật liệu. Lượng nước dư thừa lớn này sẽ ảnh hưởng lớn đến tính chất cơ học của vật liệu vữa xi măng. Các tính chất khác của perlite phụ phẩm được nêu ra ở Bảng 2.

Bảng 2: Tính chất hoá học và lý học của perlite phụ phẩm

Tính chất	Giá trị
Thành phần hữu cơ (%)	4,89
pH	7,3 – 6,7
Đường kính trung bình (μm)	41,06 (12,18 – 131,02μm)
Khối lượng riêng tuyệt đối (g/cm ³)	2,05
Độ hút nước (%)	117,5
Độ lèn chặt khi tính với khối lượng riêng tuyệt đối	0,205
Diện tích bề mặt riêng (m ² /g)	1739



Hình 2: Perlite phụ phẩm thu gom được từ nhà máy

2.2. Tiền xử lý perlite phụ phẩm

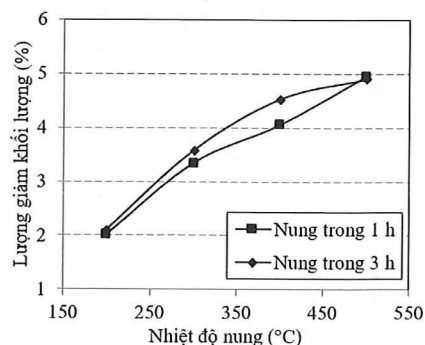
Để hạn chế những ảnh hưởng có hại của tạp chất hữu cơ và tính hút nước của perlite phụ phẩm lên vữa xi măng thì nhóm nghiên cứu đề xuất thực hiện việc tiền xử lý perlite phụ phẩm với triển vọng cải thiện những đặc tính của nó, làm cho phụ phẩm này có khả năng tái sử dụng tốt hơn.

2.2.1. Tiền xử lý bằng xi măng

Việc tiền xử lý bằng xi măng được thực hiện với mong muốn bịt bết các lỗ rỗng trong lòng hạt perlite, như vậy sẽ cho phép giảm lượng nước cần thiết để trộn vữa và cho phép tăng cường độ cơ học của vữa. Để làm như vậy, một lượng nước tương đương với 117,5% khối lượng khô của perlite phụ phẩm được cho vào perlite phụ phẩm đã sấy khô để nước sẽ lấp đầy các lỗ rỗng bên trong. Hỗn hợp ở trạng thái ẩm được để 24 giờ trong phòng kín để đạt đến trạng thái đồng nhất về độ ẩm. Sau đó, xi măng trộn đều với hỗn hợp ẩm này với tỉ lệ xi măng bằng 12% khối lượng perlite phụ phẩm khô. Hỗn hợp sẽ được để 24 giờ trong phòng kín để xảy ra hiện tượng thủy hóa xi măng và cuối cùng sẽ được sấy trong 2 ngày ở nhiệt độ 50°C để có hỗn hợp khô.

2.2.2. Tiền xử lý bằng nhiệt

Để đánh giá lượng tạp chất hữu cơ có lẫn ở trong perlite phụ phẩm, một số quy trình xử lý nhiệt đã được thực hiện bằng việc nung perlite phụ phẩm trong lò ở nhiệt độ 500°C trong 1 đến 3 giờ. Dựa trên kết quả thu được, chúng ta có thể thấy rằng thời gian xử lý nhiệt phù hợp là 1 giờ ở nhiệt độ 500°C, vừa đủ loại bỏ tạp chất hữu cơ, vừa tiết kiệm năng lượng (Hình 3).



Hình 3: Biến thiên khối lượng khi nung perlite phụ phẩm

2.3. Thành phần bê tông và thí nghiệm thực hiện

2.3.1. Chuỗi thí nghiệm 1: Đánh giá tác động của các yếu tố đến tính chất vữa xi măng

Chuỗi thí nghiệm đầu tiên sẽ sử dụng phương pháp phân tích phương sai (Anova) để đánh giá tác động của các thông số đầu vào lên các tính chất của vữa xi măng (các thông số đầu ra). Ma trận thực nghiệm với 8 thí nghiệm được xây dựng dựa trên việc thay đổi 4 thông số đầu vào sau đây:

- Loại vật liệu dùng để thay thế cát: perlite nguyên chất (cấp độ -1) và perlite phụ phẩm (cấp độ +1).
- Tỷ lệ (%) khối lượng) thay thế cát tự nhiên bằng perlite nguyên chất hoặc perlite phụ phẩm: 10% (-1) et 20% (+1).
- Tỷ lệ nước trên xi măng (N/X): 1,2 (-1) và 1,6 (+1).
- Thời gian đầm nén: 10 giây (-1) et 20 giây (+1).

Tất cả 8 công thức vữa xi măng được chuẩn bị bằng cách hoán đổi các thông số đầu vào bên trên (Bảng 3).

Bảng 3: Thành phần vữa xi măng được sử dụng trong phương pháp quy hoạch thực nghiệm

Công thức vữa	Tỷ lệ N/X	Tỷ lệ thay thế cát bằng perlite (%)	Bản chất vật liệu thay thế	Thời gian đầm nén (s)	Tỷ lệ (cát + perlite) / xi măng
M1	1,6	20	Perlite nguyên chất	10	3
M2	1,2	20	Perlite nguyên chất	20	3
M3	1,2	10	Perlite nguyên chất	20	3
M4	1,6	10	Perlite phụ phẩm	20	3
M5	1,2	20	Perlite phụ phẩm	10	3
M6	1,6	10	Perlite nguyên chất	10	3
M7	1,6	20	Perlite phụ phẩm	20	3
M8	1,2	10	Perlite phụ phẩm	10	3

2.3.2. Chuỗi thí nghiệm 2: Nghiên cứu ảnh hưởng của việc tiền xử lý perlite phụ phẩm

Ba mẫu vữa chứa perlite phụ phẩm với tỉ số N/X = 1,0 được chuẩn bị: Vữa có perlite phụ phẩm chưa xử lý (MWas), có perlite phụ phẩm đã xử lý nhiệt (MCal) và có perlite phụ phẩm đã xử lý bằng xi măng (MCem). Tỷ số N/X = 1,0 được chọn vì đó là tỷ lệ cho có thể trộn vữa dễ dàng, đảm bảo một hỗn hợp đồng nhất và có thể cho cường độ cơ học tốt nhất. Ngoài ra, một mẫu vữa tiêu chuẩn (không chứa perlite phụ phẩm – kí hiệu là MNor) cũng được chuẩn bị để so sánh các tính chất với vữa chế tạo từ perlite (Bảng 4). Các mẫu vữa này được đầm nén với thời gian cố định 20 giây.

Bảng 4: Công thức vữa xi măng thuộc chuỗi thí nghiệm thứ 2

Thông số	MNor	MWas	MCem	MCal
Tỉ số N/X	1,0	1,0	1,0	1,0
Xi măng (kg/cm³)	398,9	398,9	398,9	398,9
Nước (L)	258,0	398,9	398,9	398,9
Cát (kg/m³)	1548,1	957,4	957,4	957,4
Perlite phụ phẩm (tiền xử lý hoặc không) (kg/cm³)	0	239,6	239,6	239,6
Tỷ lệ thay thế cát bằng perlite phụ phẩm (%)	0	20,2	0	20

2.3.3. Chuẩn bị mẫu vật vữa thí nghiệm

Vữa xi măng được trộn bằng máy trộn IGM 20 lít. Vữa tươi được cho vào các khuôn để đúc mẫu hình lăng trụ

4x4x16cm. Sau khi đúc xong thì các mẫu được lưu giữ trong phòng kín ở 20°C ± 2°C và độ ẩm tương đối 95% ± 5%. Sau 24 giờ thì tất cả các mẫu được tháo khuôn và giữ trong phòng kín đó đến thời điểm thí nghiệm 28 ngày tuổi.

2.3.4. Thí nghiệm thực hiện

Trọng lượng riêng thể tích của vữa xi măng được đo dựa theo quy trình NF P18-459. Cường độ cơ học khi kéo và khi nén của vữa xi măng được đánh giá trên mẫu hình lăng trụ dựa theo tiêu chuẩn NF EN 197-1.

Thời gian đông kết của vữa xi măng được xác định bằng phương pháp miêu tả trong tiêu chuẩn NF EN 196-9. Thời gian thực hiện thí nghiệm là trong vòng 24 giờ kể từ thời điểm cho tiếp xúc giữa nước và xi măng.

Các mẫu vữa cũng được đánh giá khả năng chống lại tác động của dung dịch sulfat bởi trong môi trường sử dụng vật liệu có tính sulfat thì có khả năng sẽ bị nứt hoặc vỡ bê tông. Dung dịch NaSO₄ 5% đã được chuẩn bị và mẫu vật bê tông được nhúng chìm trong dung dịch. Cứ mỗi 7 ngày thì dung dịch sẽ được làm mới và trọng lượng cũng như chiều dài của mẫu vật được ghi lại.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến tính chất của vữa xi măng

Bảng 5 trình bày khối lượng riêng thể tích và cường độ chịu nén của vữa có chứa perlite. Khối lượng riêng dao động từ 1,67 đến 1,85g/cm³, nhỏ hơn so với khối lượng riêng của một vữa thông thường tiêu chuẩn (khoảng 2,2g/cm³). Điều này có thể giải thích do bản thân perlite có cấu trúc xốp, do sự nhiễu loạn cấu trúc các cốt liệu khi chèn perlite vào vữa và do trọng lượng riêng thể tích của perlite cũng nhỏ hơn so với cát tự nhiên. Tuy nhiên, giá trị khối lượng riêng thể tích này cũng phù hợp với phạm vi điển hình của khối lượng riêng được đề xuất trong các nghiên cứu trước đó [6,7]. Với phạm vi giá trị như vậy thì vữa có chứa perlite có thể được coi là một vữa nhẹ. Với giá trị N/X dao động từ 1,2 đến 1,6 thì cường độ chịu nén của bê tông luôn nhỏ hơn 16,0 MPa.

Bảng 5: Khối lượng riêng và cường độ chịu nén của vữa xi măng

Mẫu vữa	Khối lượng riêng (g/cm³)	Cường độ chịu nén (MPa)
M1	1,67	10,71
M2	1,78	14,56
M3	1,80	13,41
M4	1,67	7,74
M5	1,85	15,28
M6	1,69	6,97
M7	1,64	10,06
M8	1,77	10,77

Phần mềm Stat-Ease Design Expert V13 cho phép đánh giá định lượng ảnh hưởng của các thông số thí nghiệm đầu vào với biến phản hồi là cường độ chịu nén của vữa xi măng ở 28 ngày tuổi. Các giá trị tuyệt đối của các hệ số chỉ ra mức độ ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến tính chất của bê tông (Bảng 6).

Bảng 6: Hệ số ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến cường độ cơ học của vữa

Thông số đầu vào	Hệ số ảnh hưởng
Tỉ số N/X	-2,32
Tỉ lệ thay thế	1,46
Bản chất của vật liệu thay thế	-0,22
Thời gian đầm nén	0,26

Kết quả đã chứng minh rằng cường độ cơ học của vữa chịu ảnh hưởng lớn nhất bởi tỉ số N/X. Tỉ số này càng lớn thì cường độ vữa càng giảm xuống. Tỉ lệ thay thế cát cũng có ảnh hưởng tích cực đến cường độ cơ học của vữa xi măng. Trong khi đó, bản chất của vật liệu thay thế cũng nhưng thời gian đầm nén không có nhiều ảnh hưởng đến cường độ cơ học của vật liệu.

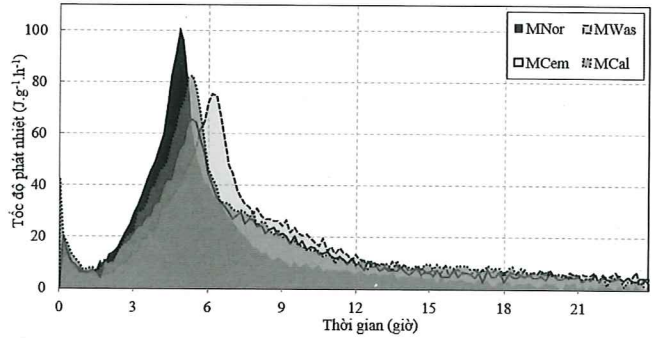
3.2. Ảnh hưởng của tiền xử lý perlit

3.2.1. Thời gian ninh kết và lượng nhiệt thủy hoá

Bảng 7 tổng hợp thời gian ninh kết và lượng nhiệt toả ra khi thủy hoá của các loại vữa xi măng có công thức đã được nêu ra trong Bảng 4. Đồ thị biến thiên nhiệt lượng được thể hiện ở Hình 4. Vữa xi măng tiêu chuẩn (MNor) có thời gian ninh kết ngắn nhất do không có chứa perlit phụ phẩm. Trong số các vữa xi măng có chứa perlit phụ phẩm thì vữa xi măng chứa perlit phụ phẩm không trải qua bước tiền xử lý có thời gian ninh kết lâu nhất. Với perlit phụ phẩm đã xử lý nhiệt thì vữa xi măng có thời gian ninh kết ngắn hơn. Như vậy, tạp chất hữu cơ đã có ảnh hưởng rõ rệt đến quá trình ninh kết và làm chậm quá trình thủy hoá của xi măng.

Bảng 1. Thời gian bắt đầu đông kết và nhiệt độ đỉnh của khối

Loại vữa	MNor	MWas	MCem	MCal
Thời gian đông kết Vicat	4h10	4h55	4h50	4h30
Nhiệt đạt đỉnh với thiết bị đo	5,03h	6,42h	5,58h	5,72h
Nhiệt lượng: Thời gian đông kết / Tốc độ phát nhiệt	100,70 (J/g.h)	74,40 (J/g.h)	65,64 (J/g.h)	82,58 (J/g.h)

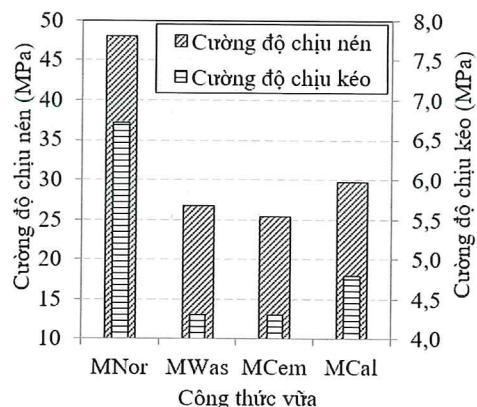


Hình 4: Gia nhiệt của vữa xi măng trong quá trình đông kết

3.2.2. Cường độ cơ học

Cường độ cơ học của các mẫu vữa xi măng được đúc từ các loại perlit khác nhau được thể hiện trên Hình 5. Trong số các mẫu vữa với perlit thì cường độ cơ học của mẫu vữa có chứa perlit phụ phẩm đã xử lý nhiệt (MCal) có giá trị cao nhất, tuy nhiên cũng không thể hiện nhiều chênh lệch. Điều đó khẳng định rằng sự tồn tại của tạp chất hữu cơ có ảnh hưởng nhưng không phải là nhân tố tiên quyết đến cường độ cơ học. Với vữa có chứa perlit phụ phẩm đã xử lý bằng xi măng (MCem) thì cường độ thấp hơn nhưng sự biến thiên cũng không lớn. Như vậy có thể khẳng định rằng hai biện pháp tiền xử lý (nhiệt và xi măng) đã không đem đến một tác động lớn lên cường độ cơ học. Với kết quả cường độ cơ học này, chúng ta có thể khẳng định rằng lượng nước lớn đã làm mờ ảnh hưởng của các nhân tố khác lên cường độ cơ học cũng như khối lượng riêng.

Trong nghiên cứu này thì vữa xi măng được trộn bằng máy trộn thông thường, tuy nhiên, nếu việc sử dụng máy trộn có hiệu suất tốt hơn thì hoàn toàn có thể giảm tỉ số N/X và từ đó tăng cường độ của vữa lên.



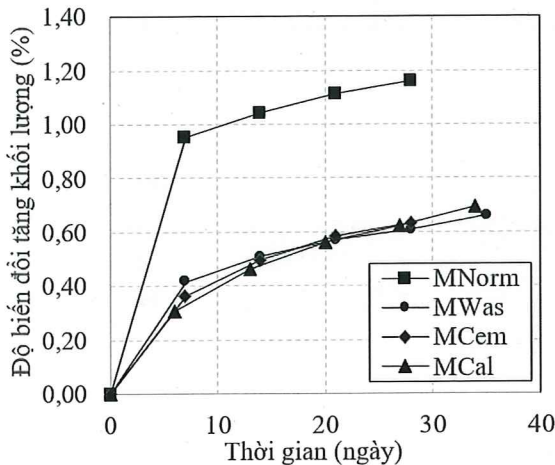
Hình 5: Cường độ cơ học vữa xi măng

3.2.3. Độ bền trong môi trường sulfat

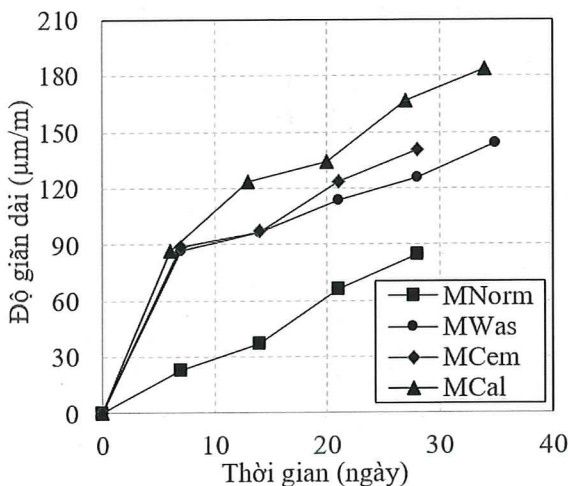
Vữa xi măng tiêu chuẩn thể hiện sự biến đổi tăng về khối lượng lớn nhất nhưng lại thể hiện một độ giãn dài khiêm tốn nhất trong môi trường sulfat (Hình 6,7).

Việc khối lượng mẫu vật tăng lên liên quan đến sự hình thành ettringite khi mà sulfat tác dụng với portlandite (một sản phẩm thủy hoá xi măng).

Khi so sánh các vữa có chứa perlite phụ phẩm thì chúng ta thấy rằng sự biến đổi theo thời gian trong môi trường sulfat không có nhiều sự khác biệt. Mặc dù sự tăng khối lượng nhỏ hơn so với vữa tiêu chuẩn nhưng do độ cứng của vật liệu kém hơn, dẫn đến việc dễ bị biến dạng hơn và kết quả là độ giãn dài lớn hơn.



Hình 6: Biến đổi tăng khối lượng theo thời gian



Hình 7: Giãn dài theo thời gian

4. KẾT LUẬN

Trong xu thế phát triển bền vững, việc tái sử dụng các phụ phẩm, phế phẩm và rác thải khác như là một thành phần trong vật liệu xây dựng đã trở thành một yêu cầu cấp thiết hiện nay. Trong bài báo này, việc nghiên cứu tái sử dụng perlite phụ phẩm có nguồn gốc từ ngành công nghiệp thực phẩm đã được giới thiệu. Những kết quả thí nghiệm thu được đã thể hiện tính khả thi của việc tái chế loại phụ phẩm này trong thành phần của vữa xi măng. Những kết quả chính của nghiên cứu này là:

- Vữa xi măng có chứa perlite phụ phẩm thể hiện một cường độ cơ học nhỏ hơn so với vữa tiêu chuẩn. Kết quả này xuất phát từ việc xuất hiện một hệ thống rỗng trong cấu trúc của vữa. Cường độ cơ học dao động từ 7,0 MPa đến 29,9 MPa. Việc chế tạo ra một hỗn hợp vữa có cường độ trên 25MPa là khả thi với tỉ số N/X lân cận bằng 1,0.

- Việc tiền xử lý perlite phụ phẩm bằng nhiệt và xi măng không đem lại một hiệu quả đáng kể. Rõ ràng, tỉ số N/X cao đã chi phối những tính chất cơ học và tính chất vật lí khác của vữa xi măng.

- Việc tiền xử lý có ý nghĩa quan trọng đến thời gian đông kết của vữa. Khi hàm lượng hữu cơ đã được giảm bằng xử lý nhiệt thì thời gian đông kết đã rút ngắn đáng kể.

- Những nghiên cứu tiếp theo cần thực hiện trên bê tông và sử dụng công nghệ trộn hiệu suất hơn để chế tạo ra các sản phẩm bê tông có tỉ số N/X đã được triết giảm, qua đó có thể tăng được cường độ của bê tông.

Tài liệu tham khảo:

- [1] Tạp chí Aggregates Research thuộc nhà xuất bản Route One Publishing - <https://www.aggregateresearch.com/>, tra cứu ngày 30 tháng 10 năm 2019.
- [2] Nguyen, D.H., Boutouil, M., Sebaibi, N., Leleyter, L. & Baraud, F., 2013, Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers, Construction and Building Materials, vol. 49, pp. 151-60.
- [3] Le, N.H., Razakamanantsoa, A., Nguyen, M. L., Dao, P. L., Nguyen, D. H., 2018, Evaluation of physicochemical and hydromechanical properties of MSWI bottom ash for road construction, Waste Management, Vol. 80, p. 168-174, ISSN: 0956-053X.
- [4] Giergiczny, A.; Garbacik, A.; Ostrowski, M. Pozzolanic and hydraulic activity of calcareous fly ash. Roads Bridges Rogi I Mosty 2013, 12, 5-15.
- [5] Didit, A. D., Agus, W., Hasudungan, E. M., Ijang, S., Characterization of perlite and expanded perlite from West Sumatera, Indonesia, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 882, International Seminar on Mineral and Coal Technology 23-24 June 2021, Bandung, Indonesia
- [6] Łukowski P. Polymer-Cement Composites Containing Waste Perlite Powder. Materials. 2016; 9(10):839. <https://doi.org/10.3390/ma9100839>
- [7] Demirboğa, R., Örüng, I.; Gül, R. Effects of expanded perlite and mineral admixtures on the compressive strength of low density concretes. Cement Concrete Research, 2001, 31, 1627-1632.