

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO HẠT NHẹ TỪ PHÉ THẢI PHÁ DỠ CÔNG TRÌNH XÂY DỰNG Ở VIỆT NAM

Nguyễn Hùng Phong^{a,*}, Nguyễn Công Thắng^b, Nguyễn Văn Tuấn^b, Barbara Leydolph^c

^aKhoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^cViện Nghiên cứu Ứng dụng Công nghệ Xây dựng IAB Weimar gGmbH,
Über der Nonnenwiese 1, TP. Weimar, Cộng hòa liên bang Đức

Nhận ngày 29/01/2019, Sửa xong 12/03/2019, Chấp nhận đăng 27/03/2019

Tóm tắt

Tái sử dụng và tái chế phế thải phá dỡ các công trình xây dựng (PTXD) là một hướng phát triển bền vững trong ngành xây dựng giúp giải quyết được vấn đề ô nhiễm môi trường, đồng thời tạo ra các sản phẩm hiệu quả, trong đó việc chế tạo hạt cốt liệu nhẹ dùng cho bê tông là một hướng phát triển mới đầy triển vọng. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu về việc sử dụng hỗn hợp PTXD là gạch đất sét nung và vữa trát của khối xây để chế tạo ra hạt cốt liệu nhẹ cho bê tông. Kết quả nghiên cứu cho thấy vữa và gạch xây sau khi được lựa chọn và nghiền đến kích thước nhỏ hơn 100 μm , trộn với phụ gia phồng nở và tạo hình các hạt ban đầu với kích thước < 10 mm, sau đó sấy khô và nung đến nhiệt độ 1250°C sẽ tạo ra sản phẩm hạt cốt liệu nhẹ có khối lượng thể tích nhỏ hơn 800 kg/m³. Các hạt cốt liệu này sẽ được sử dụng để chế tạo ra các sản phẩm bê tông nhẹ cốt liệu rỗng sử dụng trong ngành xây dựng.

Từ khoá: phế thải phá dỡ xây dựng; vữa xây trát; gạch xây; cốt liệu nhẹ; nung.

PRODUCTION OF LIGHTWEIGHT AGGREGATES FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTES IN VIETNAM

Abstract

The reuse and recycle of construction and demolition waste (CDW) in construction industry is a sustainable trend in development, which helps to solve the environmental pollution issues and produces effective building materials, among which the production of lightweight aggregates (LWA) for concrete is a new and promising direction. This paper presents a research on using CDW of a combination of clay-fired brick and mortar from masonry to make LWA for concrete. Experimental results have shown that ground brick and mortar with a size of less than 100 μm , mixing with expanding agent, pelletized to size less than 10 mm, then dried and burned to temperature up to 1250°C can make the product of LWA with density less than 800 kg/m³, which can later be used as aggregates for making lightweight aggregate concrete.

Keywords: construction and demolition wastes; mortar; brick; lightweight aggregate; burning.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(1V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(1V)-01) © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Ở Việt Nam trong những năm qua, cùng với quá trình công nghiệp hóa, hiện đại hóa đất nước nền kinh tế có những bước phát triển lớn, cùng với đó các công trình xây dựng được thực hiện trên khắp

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: hungphongxd@gmail.com (Phong, N. H.)

cả nước đặc biệt tại là các thành phố lớn như Hà Nội, Hải Phòng, Hồ Chí Minh. Các hoạt động xây dựng diễn ra sẽ thải ra một lượng lớn phế thải xây dựng (PTXD). Theo Báo cáo Môi trường Quốc gia năm 2011 về quản lý chất thải rắn do Bộ Tài nguyên và Môi trường ban hành, tổng lượng PTXD trung bình khoảng 180 nghìn tấn/tháng [1, 2]. Trong khi đó PTXD ở nước ta hiện nay gần như chưa được tái chế và sử dụng, chủ yếu đổ ra các bãi chứa rác thải rắn ở ven sông, bãi đất trống trong thành phố hoặc được chôn lấp, chỉ có một lượng rất ít PTXD được tái sử dụng dùng để san lấp mặt bằng. Việc đổ lẫn PTXD trong các bãi chứa rác thải sinh hoạt và san lấp ao hồ, sẽ ảnh hưởng đến chất lượng thổ nhưỡng, gây ô nhiễm môi trường nước, làm xấu cảnh quan và tàn phá môi trường đô thị [3].

Do vậy, việc tái chế các phế thải xây dựng để tạo nên loại cốt liệu nhẹ chất lượng cao ứng dụng làm bê tông nhẹ, vật liệu cách âm/cách nhiệt dùng trong xây dựng vừa giải quyết được vấn đề ô nhiễm môi trường của các bãi phế thải xây dựng, đồng thời hạn chế được việc khai thác cạn kiệt các nguồn tài nguyên góp phần quan trọng vào sự phát triển bền vững của ngành Xây dựng nói riêng và của cả nước nói chung, phù hợp định hướng chiến lược phát triển bền vững của Chính phủ.

Các hạt cốt liệu nhẹ có thể sử dụng trong chế tạo bê tông nhẹ, loại bê tông này có khối lượng thể tích rất thấp và khả năng cách âm, cách nhiệt cao, nhưng vẫn có khả năng chịu lực tốt, khắc phục được những nhược điểm chính của vật liệu gạch và bê tông truyền thống, giúp tiết kiệm năng lượng trong quá trình sử dụng [4–6]. Hơn nữa, việc tận dụng các phế thải làm cốt liệu cho phép giảm giá thành sản phẩm, tăng tính cạnh tranh trên thị trường đồng thời vừa giải quyết được bài toán môi trường vừa sản xuất ra được loại vật liệu xanh, thân thiện môi trường và bảo tồn được các nguồn tài nguyên thiên nhiên [7]. Có thể nói, loại bê tông nhẹ này là một loại vật liệu bền vững, thân thiện với môi trường.

Bài báo này tập trung nghiên cứu khả năng sử dụng PTXD, có thể kết hợp với các loại phụ gia khác, nhằm thay thế đất sét để chế tạo hạt cốt liệu nhẹ để sử dụng trong bê tông, gạch nhẹ... Do có khối lượng thể tích khá nhỏ nên các loại hạt nhẹ này rất thích hợp cho việc sử dụng làm đất trồng trong nhà, nhất là làm vườn trên mái mà không làm ảnh hưởng đến kết cấu công trình, tạo ra môi trường xanh và nâng cao môi trường sống nói chung cho người sử dụng. Bài báo cũng nghiên cứu việc chế tạo hạt cốt liệu nhẹ có khối lượng thể tích nhỏ hơn 800 kg/m^3 từ PTXD là hỗn hợp gạch đất sét nung và vữa xây, trát của khối tường xây hướng tới chế tạo bê tông nhẹ cốt liệu rỗng.

2. Nguyên vật liệu và phương pháp sử dụng trong nghiên cứu

2.1. Vật liệu sử dụng

Mẫu khối xây được lấy tại công trường phá dỡ xây dựng tại Việt Nam sau đó được phân tách thành gạch đất sét nung, còn lại là vữa xây và trát, sau đó tiến hành nghiền mịn. Độ mịn của hỗn hợp phối liệu yêu cầu nhỏ hơn $100 \mu\text{m}$ là phù hợp cho sản xuất hạt cốt liệu nhẹ [8], hình ảnh mẫu vật liệu được chuẩn bị và quá trình gia công nguyên liệu được thể hiện ở Hình 1 và 2. Bên cạnh đó, để tạo phòng nỏ cho các hạt cốt liệu nhẹ, để tài sử dụng phụ gia tạo nỏ SiC với hàm lượng sử dụng 3% theo khối lượng vật liệu sử dụng.

Thành phần hạt của vật liệu sau khi nghiền được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ laze thể hiện ở Hình 3. Thành phần hóa của vật liệu sử dụng trong nghiên cứu được thể hiện ở Bảng 1.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Quá trình chế tạo hạt cốt liệu ban đầu trước khi nung từ PTXD khối tường xây được thể hiện ở Hình 4, hạt cốt liệu với kích thước khác nhau sau khi chế tạo được thể hiện ở Hình 5.

Quá trình xác định nhiệt độ nung của hạt cốt liệu thông qua lò nung gradien với các dải nhiệt độ nung khác nhau (Hình 6 và 7). Khi sử dụng lò nung gradien, với mỗi lần nung ta có thể đánh giá với



(a) Mẫu vật liệu trước khi được phân loại



(b) Mẫu vật liệu sau khi được phân loại

Hình 1. Mẫu vật liệu được chuẩn bị trước khi nghiền



(a)



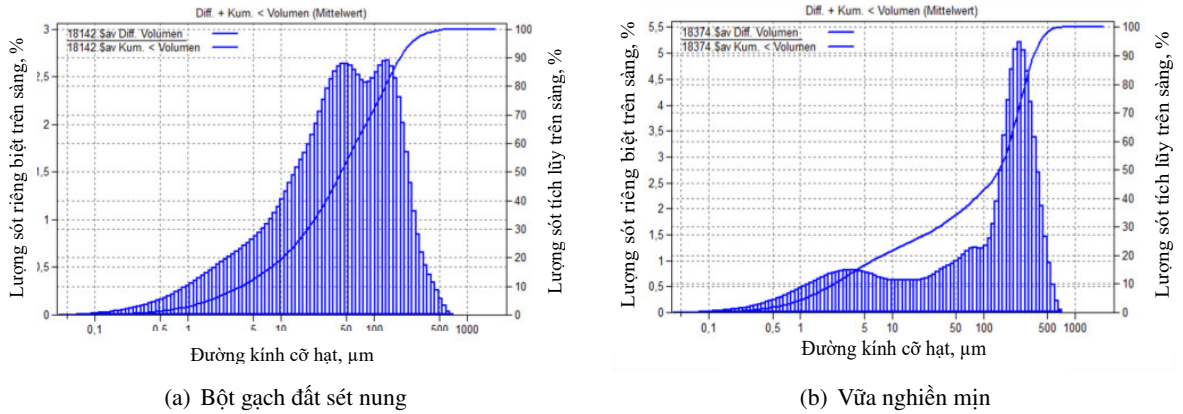
(b)

Hình 2. Máy nghiền được sử dụng trong nghiên cứu

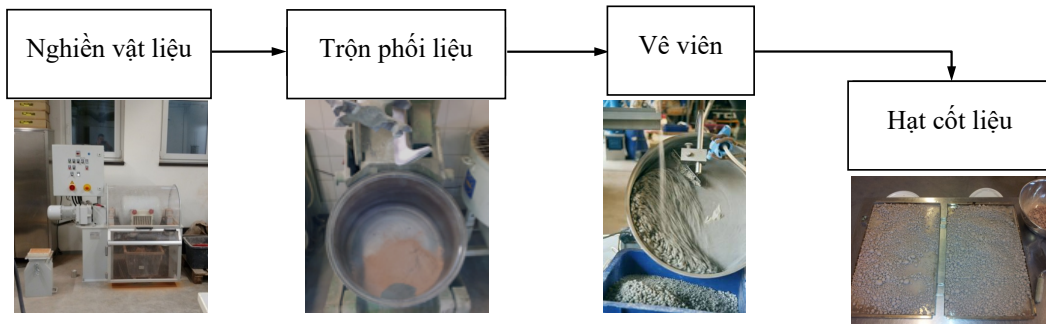
Bảng 1. Thành phần hóa của các vật liệu nghiền cứu

Vật liệu	Hàm lượng các oxyt, % theo khối lượng										
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MnO
Gạch	1,55	20,28	65,22	0,19	0,05	2,82	1,30	1,01	6,72	-	0,09
Vữa	0,24	6,84	71,55	-	0,57	2,10	10,23	0,24	1,84	-	0,03

các khoảng nhiệt độ khác nhau trên cùng một cấp phối nghiền cứu. Sau khi xác định được nhiệt độ nung hợp lý trong lò nung gradien, mẫu sẽ được nung trong lò nung Muffle với thời gian nung khác nhau, từ đó sẽ xác định được thời gian nung hợp lý với mỗi cấp phối nghiền cứu. Nhiệt độ nung trong nghiền cứu được xác định tại thời điểm đạt nhiệt độ theo yêu cầu và tiến hành cho mẫu vào lò nung,



Hình 3. Thành phần hạt của vật liệu sau khi nghiền sử dụng trong nghiên cứu



Hình 4. Quá trình chế tạo hạt cốt liệu trước khi nung



Hình 5. Hạt cốt liệu với kích thước khác nhau sau khi chế tạo

trong suốt quá trình nung không có sự thay đổi nhiệt độ. Thời gian nung mẫu được xác định từ thời điểm cho mẫu vào lò nung đến khi mẫu được đưa ra khỏi lò nung.

Mẫu hạt cốt liệu nhẹ sau khi nung được kiểm tra và đánh giá để xác định điều kiện thí nghiệm hợp lý (Hình 8). Với chỉ tiêu khối lượng thể tích của hạt cốt liệu được xác định theo TCVN 7572-4:2006.



Hình 6. Lò nung gradient xác định nhiệt độ nung của hạt cốt liệu



Hình 7. Lò nung Muffle



Hình 8. Hạt cốt liệu sau khi nung

3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

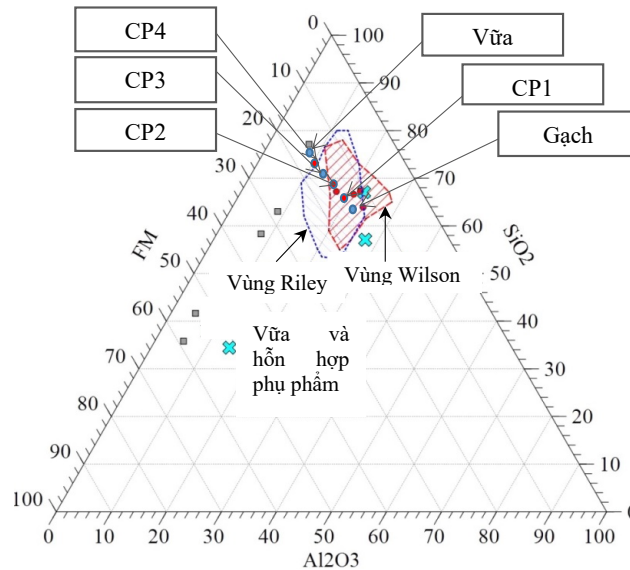
3.1. Tính toán thành phần phối liệu trên cơ sở biểu đồ 3 cấu tử

Thành phần hóa học của vật liệu đóng vai trò rất quan trọng trong việc lựa chọn tỷ lệ thành phần vật liệu khi chế tạo hạt CLN. Năm 1950, Riley [9] và Wilson [10] đã xây dựng biểu đồ 3 cấu tử và đề xuất vùng nguyên liệu để chế tạo hạt cốt liệu nhẹ. Vùng nguyên liệu này dùng để đánh giá sự phù hợp của đất sét liên quan đến khả năng chảy trong quá trình nung ở nhiệt độ cao, các thông số về thành phần hóa học sẽ được đánh giá bằng thực nghiệm. Để đánh giá, hàm lượng SiO_2 , hàm lượng Al_2O_3 và tỷ lệ của tất cả các oxyt khác bao gồm (Na_2O , MgO , K_2O , CaO , Fe_2O_3), sau đó được quy đổi thành tổng 100% theo khối lượng. Tuy nhiên thực tế cũng có thể chế tạo cốt liệu nhẹ sử dụng nguyên liệu có thành phần hóa học nằm ngoài phạm vi này và phải sử dụng thực nghiệm để đánh giá.

Thành phần hóa học của nguyên liệu sử dụng trong nghiên cứu được xác định trong biểu đồ 3 cấu tử $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) (= \text{FM})$. Bảng 2 và Hình 9 thể hiện hàm lượng các oxyt trong biểu đồ 3 cấu tử được phân tích từ mẫu phế thải gạch đất sét nung và vữa.

Bảng 2. Hàm lượng các oxyt của các vật liệu nghiên cứu theo biểu đồ 3 cấu tử

Vật liệu	Hàm lượng các oxyt quy đổi trong hệ 3 cấu tử, % theo khối lượng			
	FM	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Tổng
Gạch	12,7	66,6	20,7	100
Vữa	15,5	77,1	7,4	100

Hình 9. Biểu đồ 3 cấu tử Al₂O₃ – SiO₂ – FM của vật liệu đầu vào và cấp phối vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

Trên cơ sở thành phần hóa của nguyên liệu đầu vào, nghiên cứu đã tính toán lựa chọn các tỷ lệ giữa vật liệu gạch đất sét nung (G) và vữa (V) được phối hợp theo tỷ lệ nhất định để nằm trong vùng nghiên cứu của Wilson và Riley. Tỷ lệ thành phần phối liệu được lựa chọn để sản xuất hạt cốt liệu nhẹ sử dụng trong nghiên cứu được thể hiện ở Bảng 3.

Bảng 3. Tỷ lệ thành phần cấp phối sử dụng trong nghiên cứu

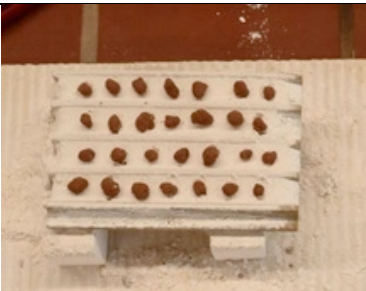
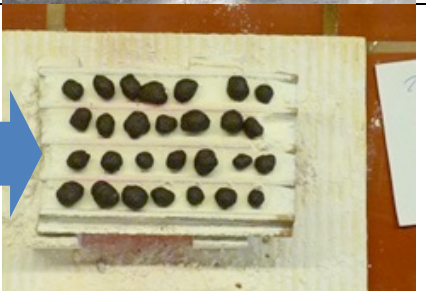
Cấp phối	Tỷ lệ vật liệu, % theo khối lượng		Hàm lượng các oxyt quy đổi trong hệ 3 cấu tử, % theo khối lượng			
	G	V	FM	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Tổng
CP1: 80G/20V	80	20	13,2	68,7	18,0	100
CP2: 60G/40V	60	40	13,8	70,8	15,4	100
CP3: 40G/60V	40	60	14,4	72,9	12,7	100
CP4: 20G/80V	20	80	15,0	75,0	10,0	100

Sau khi lựa chọn tỷ lệ thành phần vật liệu, hạt cốt liệu nhẹ được tạo hình theo quy trình như mục 2.2 và Hình 4; sau khi hạt được sấy khô đến khối lượng không đổi được tiến hành nung để đánh giá

ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian nung đến tính chất của hạt cốt liệu.

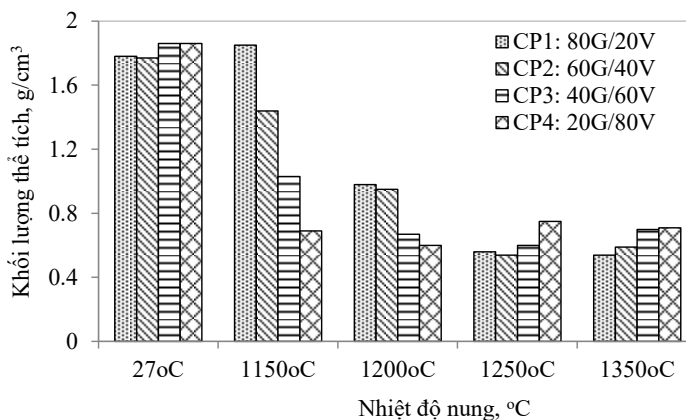
3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ nung đến khối lượng thể tích của hạt cốt liệu

Hạt cốt liệu sau khi được sấy khô sẽ được nung trong lò nung gradien để xác định nhiệt độ nung của hạt cốt liệu. Nhiệt độ nung được đánh giá ở 4 khoảng nhiệt độ: 1180°C, 1200°C, 1250°C và 1350°C, thời gian nung được thực hiện trong là 6 phút. Hình ảnh về ảnh hưởng của nhiệt độ nung đến tính chất của hạt CLN được thể hiện ở Hình 10.

Nhiệt độ và thời gian nung	Hạt trước khi nung	Hạt sau khi nung
1150°C/ 6 phút		
1200°C/ 6 phút		
1250°C/ 6 phút		
1350°C/ 6 phút		

Hình 10. Hạt cốt liệu trước và sau khi nung ở các nhiệt độ nung khác nhau

Ảnh hưởng của nhiệt độ nung đến khối lượng thể tích của các hạt cốt liệu nhẹ thể hiện ở Hình 11.



Hình 11. Ảnh hưởng của nhiệt độ nung đến KLTT của các hạt cốt liệu nhẹ

Qua quá trình nung thí nghiệm và đánh giá cho thấy:

- Tại nhiệt độ nung là 1150°C: hạt cốt liệu có mức độ phồng nở rất kém, trong hạt có những vị trí chưa có sự xuất hiện pha lỏng do vậy quá trình thoát khí không thể tạo ra cấu trúc rỗng cho hạt cốt liệu, khối lượng thể tích của hạt cốt liệu vẫn cao với hàm lượng gạch lớn hơn 40% thì khối lượng thể tích của hạt trên 1,0 g/cm³, khi hàm lượng gạch giảm thì khối lượng thể tích của cốt liệu giảm;

- Tại nhiệt độ nung là 1200°C: hạt cốt liệu có độ phồng nở tốt hơn, hạt tròn đều và không có dấu hiệu bị xẹp, điều này chứng tỏ pha lỏng và quá trình tạo khí bắt đầu hình thành đồng thời. Khi hàm lượng gạch giảm thì khối lượng thể tích của cốt liệu giảm;

- Tại nhiệt độ nung 1250°C: hạt cốt liệu có độ phồng nở tốt hơn, bề mặt hạt thiêu kết đều, hạt có dấu hiệu bị xẹp xuống do pha lỏng hình thành nhiều hơn dẫn đến pha khí bắt đầu có hiện tượng thoát ra ngoài. Điều này thể hiện khi hàm lượng gạch giảm thì khối lượng thể tích của cốt liệu có xu hướng tăng nhẹ;

- Tại nhiệt độ nung là 1350°C: hạt cốt liệu bị dính vào nhau điều này cho thấy pha lỏng hình thành rất lớn, pha khí thoát ra ngoài gây hiện tượng xẹp các hạt cốt liệu, các hạt cốt liệu tiếp xúc và dính kết vào nhau khi hạt nguội. Tại nhiệt độ này khi hàm lượng gạch giảm thì khối lượng thể tích của cốt liệu tăng.

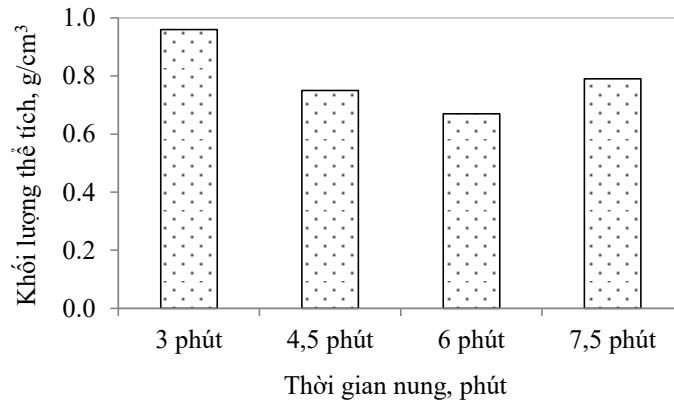
- Như vậy, nhiệt độ nung phù hợp với cấp phối sử dụng 20% gạch và 80% vữa là ở nhiệt độ từ 1150°C đến 1200°C; khi hàm lượng gạch tăng lên trên 40% thì nhiệt độ nung phù hợp từ 1200°C đến 1250°C.

3.3. Ảnh hưởng của thời gian nung đến KLTT của hạt cốt liệu nhẹ

Để đánh giá ảnh hưởng của thời gian nung đến KLTT của các hạt cốt liệu, cấp phối sử dụng trong nghiên cứu có tỷ lệ gạch/vữa là 40/60 theo % khối lượng, hàm lượng phụ gia tạo khí sử dụng là 3% theo khối lượng vật liệu. Thời gian nung nghiên cứu lần lượt là 3 phút, 4,5 phút, 6 phút và 7,5 phút, trong đó nhiệt độ nung cố định ở 1200°C. Kết quả ảnh hưởng của thời gian nung đến KLTT của các hạt cốt liệu nhẹ thể hiện ở Hình 12 và hình ảnh của sản phẩm hạt cốt liệu nhẹ sau khi nung thể hiện ở Hình 13.

Kết quả nghiên cứu về KLTT và quan sát hình dạng, bề mặt hạt cốt liệu cho thấy, với cùng nhiệt độ nung khi thời gian nung thay đổi thì KLTT của các hạt cốt liệu cũng có sự khác biệt.

- Với thời gian nung là 3 phút, hạt cốt liệu chưa có sự thiêu kết đều trên bề mặt hạt, sự hình thành pha lỏng và sự thoát khí mới bắt đầu, khả năng phồng nở của hạt nhỏ do vậy KLTT của hạt là lớn.



Hình 12. Ảnh hưởng của thời gian nung đến KLTT của các hạt cốt liệu



(a) 1200°C/3 phút



(b) 1200°C/4,5 phút



(c) 1200°C/6 phút



(d) 1200°C/7,5 phút

Hình 13. Hình ảnh mẫu nung với thời gian khác nhau

- Khi thời gian nung tiếp tục tăng đến 4,5 phút và 6 phút, KLTT của hạt cốt liệu giảm, bề mặt hạt cốt liệu có sự thiêu kết đồng đều, hạt nở đều và nhẹ, bề mặt không có các lỗ rỗng do khí thoát ra ngoài.

- Khi thời gian nung tiếp tục tăng đến 7,5 phút pha lỏng hình thành nhiều hơn, các hạt có xu hướng dính kết lại với nhau và trên bề mặt hạt có sự hình thành các lỗ rỗng hở do sự thoát khí từ bên trong các hạt, tại thời gian nung này thì KLTT của hạt cốt liệu bắt đầu tăng.

Như vậy, tùy theo yêu cầu kỹ thuật của hạt cốt liệu mà nhiệt độ nung lựa chọn ở khoảng hợp lý khác nhau. Xét đến yêu cầu đặt ra về KLTT sản phẩm hạt cốt liệu nhẹ cũng như sự hợp lý về công suất, tiêu thụ năng lượng, thời gian nung hợp lý tại nhiệt độ 1200°C từ 4,5 phút đến 6,0 phút.

4. Kết luận

Dựa trên các kết quả thực nghiệm đã tiến hành, một số kết luận nghiên cứu được rút ra như sau:

Trong điều kiện trang thiết bị thí nghiệm của Việt Nam, hoàn toàn có thể chế tạo được hạt cốt liệu nhẹ với đường kính hạt nhỏ hơn 10 mm và khối lượng thể tích của hạt nhỏ hơn 800 kg/m³ từ phế thải gạch đất sét nung và vữa của khối tường xây khi phá dỡ công trình xây dựng.

Hàm lượng gạch sử dụng để chế tạo hạt cốt liệu nhẹ đạt yêu cầu về KLTT đặt ra có thể nằm trong khoảng từ 20% đến 100% theo khối lượng hỗn hợp phối liệu. Tỷ lệ phối liệu này thỏa mãn nằm trong vùng yêu cầu của Wilson và Riley về thành phần hoá đối với nguyên liệu sử dụng để chế tạo hạt nhẹ.

Hàm lượng gạch sử dụng trên 40% theo khối lượng hỗn hợp phối liệu thì nhiệt độ nung hợp lý từ 1200°C đến 1250°C. Tại cùng một nhiệt độ nung thì khi hàm lượng gạch tăng thì khối lượng thể tích của hạt tăng.

Với cùng nhiệt độ nung, khi thời gian nung thay đổi thì khối lượng thể tích của hạt cốt liệu cũng thay đổi, thời gian nung hợp lý chế tạo hạt cốt liệu theo yêu cầu là trong khoảng từ 4,5 phút đến 6 phút.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn Bộ Khoa học và Công nghệ đã tạo điều kiện cho nhóm thực hiện đề tài nghiên cứu trong khuôn khổ Nhiệm vụ Nghị định thư NĐT.21.GER/16 với Cộng hòa Liên bang Đức, và Viện Nghiên cứu Ứng dụng Công nghệ Xây dựng IAB Weimar đã hợp tác và hỗ trợ cho nhóm tác giả trong quá trình thực hiện đề tài.

Tài liệu tham khảo

- [1] Bộ Tài nguyên và Môi trường (2011). *Báo cáo môi trường quốc gia 2011 - Chất thải rắn*.
- [2] Kiên, T. T. (2016). *Nghiên cứu sử dụng phế thải xây dựng trong chế tạo bê tông*. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Xây dựng.
- [3] Hùng, L. V. (2007). *Nghiên cứu sử dụng phế thải phá dỡ công trình làm bê tông và vữa xây dựng*. Viện Vật liệu Xây dựng.
- [4] Đình, N. V. (2001). *Nghiên cứu chế tạo bê tông nhẹ cốt liệu rỗng*, Khoa Vật liệu Xây dựng. Trường Đại học Xây dựng.
- [5] Đức, V. M. (1999). *Công nghệ gốm xây dựng*. Nhà Xuất Bản Xây Dựng.
- [6] Chandra, S., Bernsson, L. (2003). *Lightweight aggregate concrete - science, technology and applications*. William Andrew Publishing, Norwich, New York, USA.
- [7] Mueller, A., Sokolova, S. N., Vereshagin, V. I. (2008). [Characteristics of lightweight aggregates from primary and recycled raw materials](#). *Construction and Building Materials*, 22(4):703–712.
- [8] Mueller, A., Schnell, A., Rübner, K. (2015). [The manufacture of lightweight aggregates from recycled masonry rubble](#). *Construction and Building Materials*, 98:376–387.
- [9] Riley, C. M. (1951). [Relation of chemical properties to the bloating of clays](#). *Journal of the American Ceramic Society*, 34(4):121–128.
- [10] Wilson, H. (1953). *Lightweight aggregates for the construction industry*. *Journal of the Canadian Ceramic Society*, 22:44–50.