

Nghiên cứu chế tạo bê tông nhẹ geopolimer trên cơ sở tro bay, xỉ nhiệt điện và chất tạo khí H₂O₂

Lê Anh Tuấn¹, Nguyễn Ninh Thụy², Nguyễn Tấn Khoa³

¹ Khoa xây dựng, Trường Đại Học Bách Khoa TP.HCM, Đại Học Quốc Gia TP.HCM, 268 Lý Thường Kiệt, Q10, TP. HCM

² Đại Học Quốc Gia TP.HCM

³ Trường đại học Duy Tân

TỪ KHOẢ

Tro bay
Xỉ than
Độ linh động
Cường độ
Hoạt hóa
Geopolymer hóa

TÓM TẮT

Nghiên cứu sử dụng chất tạo khí hydrogen peroxide (H₂O₂) kết hợp với tro bay và xỉ đáy nhằm hoạt hóa trong môi trường geopolimer. Thành phần xỉ đáy sử dụng với hàm lượng 20 % đến 100 % trong cấp phối vữa. Kết quả thực nghiệm cho thấy thành phần dung dịch hoạt hóa với tỷ lệ 0,4 đến 0,8 với tro bay có tác dụng làm tăng độ linh động đến 70 % cho vữa geopolimer và cường độ nén tăng đến 50 %. Vữa geopolimer dùng xỉ đáy thay thế hoàn toàn cát làm tăng độ linh động đến 30 % và thời gian chảy đạt khoảng 10 giây đến 11 giây. Tuy nhiên cường độ hoạt hóa có xu hướng giảm đến 40 %. Chất tạo bọt H₂O₂ sử dụng với hàm lượng 1 % đến 5 % có khả năng làm việc với môi trường dung dịch hoạt hóa làm cho vữa có khả năng phồng nở đến hơn 40 %. Quá trình hoạt hóa cho thấy cường độ của bê tông phụ thuộc vào hàm lượng chất tạo bọt và hàm lượng dung dịch hoạt hóa. Việc sử dụng kết hợp chất tạo bọt H₂O₂ và tro bay – xỉ đáy có khả năng chế tạo bê tông nhẹ theo công nghệ geopolimer.

KEYWORDS

Fly ash
Bottom ash
Hydrogen peroxide
Foam agent
Geopolymerization

ABSTRACT

In this research, geopolimer mortar is investigated by mixing fly ash and bottom ash with hydrogen peroxide (H₂O₂) to activate in geopolimerization. In the mix proportion, the amount of bottom ash in range from 20 to 100 % by weight is investigated. The results are indicated that the flow diameters are increased up to 70 % by mixing alkaline solution in range from 0.4 to 0.8 by fly ash weight. Moreover, strengths are raise up to 50 %. On the other hand, the flow diameter and flow time are tend to increase up to 30 % and obtained 10 – 11 sec, respectively, by replacement of bottom ash in rangs from 20 to 100 % by sand weight. However, strength is tend to reduce about 40 %. In the mix proportion, hydrogen peroxide (H₂O₂) is used as foam agent in range from 1 to 5 % by volume. The expansion degrees are obtained up to 40 % by foam agent. After curing condition, the strength of concrete can be obtained by amount of foam agent and alkaline solution. Then, light weight geopolimer concrete can be produced by mixing fly ash, bottom ash and H₂O₂ agent to geopolimerization.

1. Giới thiệu

Bê tông nhẹ được nghiên cứu và phát triển trên thế giới nhằm giảm tải trọng cho công trình và thay thế cho vật liệu xây dựng truyền thống. Việc chế tạo bê tông nhẹ cho thể dựa trên các công nghệ chính là sử dụng chất tạo bọt và sử dụng thiết bị chưng áp. Đối với công nghệ sử dụng thiết bị lò chưng áp cần sử dụng bột nhôm phôi trộn với thành phần nguyên liệu chứa CaO và đóng rắn trong môi trường nhiệt độ và áp suất cao. Đối với việc sử dụng công nghệ chất tạo bọt thì việc chế tạo có thể sử dụng bọt hữu cơ và bọt tổng hợp.

Chất tạo bọt có thể dùng kết hợp với các thành phần nguyên liệu khác để đảm bảo việc ổn định kích thước bọt khí và thể tích bọt trong môi trường vật liệu. [1- 5]

Chất tạo bọt hydro peroxide được dùng nhiều trong công nghiệp y tế và công nghiệp giấy. Hydro peroxide trong nước có thể bị oxy hóa- khử nhiều loại ion vô cơ tạo thành khí oxy, các bọt khí tạo ra có thể phân tán tạo thành có lỗ rỗng trong vật liệu.



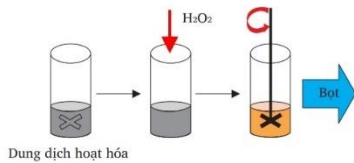
*Tác giả liên hệ: latuan@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 03/03/2021, giải trình ngày 22/05/2021, chấp nhận đăng 12/07/2021

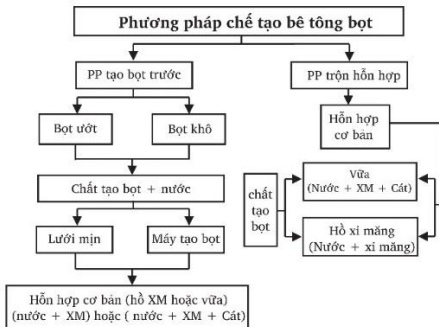
Thời gian cho quá trình phản ứng tạo bọt xảy ra nhanh và kích thước bọt đồng đều nên có thể dùng làm bọt kỹ thuật. Dung dịch hydro peroxide có thể chế tạo với nhiều nồng độ khác nhau để dùng trong các lĩnh vực.



Hình 1. Công nghệ chế tạo bê tông nhẹ [2].



Hình 2. Quá trình tạo bọt kỹ thuật từ hydro peroxide.



Hình 3. Các phương pháp tạo bọt [2].

Việc sử dụng các thành phần alumino-silicate trong tro bay, xỉ đáy dùng hoạt hóa để chế tạo vật liệu geopolymer đã được nghiên cứu để xử lý nguồn vật liệu thải từ các nhà máy nhiệt điện. Các nghiên cứu trên thế giới đã kết hợp các nguyên liệu tro bay, xỉ đáy dùng làm chất kết dính geopolymer và cốt liệu để làm vữa, bê tông và các vật liệu trong lĩnh vực xây dựng. Kết hợp các bọt khí tạo thành trong phản ứng của hydro peroxide trong môi trường geopolymer hoạt hóa các khoáng alumino – silicate có thể giúp tạo thành vật liệu nhẹ geopolymer. [6-14]

Nghiên cứu này dùng tro bay, xỉ đáy kết hợp với chất tạo bọt H₂O₂ để tạo thành bê tông nhẹ. Quá trình kết hợp giữa chất tạo bọt và dung

dịch hoạt hóa được ổn định bằng công nghệ geopolymer giữa các thành phần alumino – silicate có trong tro bay và xỉ đáy.

2. Nguyên vật liệu và phương pháp thí nghiệm

2.1. Nguyên vật liệu

2.1.1. Tro bay

Tro bay từ nhà máy nhiệt điện đốt than tầng sôi, phân loại thuộc nhóm F theo chuẩn ASTM C618. Tính chất vật lý có khối lượng riêng 2,42 g/cm³, độ mịn 94 % lượng lọt qua sàng có cỡ sàng là 0,08 mm. Thành phần hóa học của loại tro bay trình bày trong Bảng 1.

2.1.2. Xi đáy

Xi đáy được lấy từ nhà máy nhiệt điện theo công nghệ đốt than phun, thành phần hạt nhỏ hơn 5 mm, khối lượng riêng 2,3 g/cm³. Thành phần hóa học của tro bay và xỉ đáy trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1.

Thành phần hóa học chính của tro bay và xỉ đáy.

Oxit (%)	Tro bay	Xi đáy
SiO ₂	48,1	71,1
Al ₂ O ₃	15,8	11,0
CaO	17,1	1,16
Fe ₂ O ₃	12,2	10,3
MgO	2,18	0,51
P ₂ O ₅	0,01	0,05
K ₂ O	1,85	3,12
TiO ₂	0,69	0,66
C	-	-

2.1.3. Dung dịch hoạt hóa

Dung dịch hoạt hóa là sự kết hợp giữa sodium hydroxide và sodium silicat. Sodium silicat là dung dịch có tổng hàm lượng Na₂O và SiO₂ là 38 %, tỷ trọng 1,42 g/ml ± 0,01 g/ml. Dung dịch sodium hydroxide có nồng độ 10 Mol. Trong thành phần dung dịch hoạt hóa, tỷ lệ sodium silicate-sodium hydroxit là 1-1 theo khối lượng.

2.1.4. *Chất tạo bọt H₂O₂*

Thành phần chất tạo bọt Hydrogen peroxide (H₂O₂) nồng độ 27,5 %, có nhiệt độ nóng chảy: - 0,43 °C, nhiệt độ sôi: 150,2 °C, tỷ trọng 1,45 g/cm³.

2.2. *Thành phần cấp phối và phương pháp thực nghiệm*

Vữa nhẹ geopolimer sử dụng tro bay và cát được tỷ lệ 1-3 theo khối lượng. Xi đáy được sử dụng thay thế cát với tỷ lệ lần lượt là 20 %, 40 %, 60 %, 80 % và 100 % theo khối lượng. Tỷ lệ dung dịch hoạt hóa geopolimer sử dụng là dung dịch – tro bay lần lượt là 0,4 đến 0,8 theo khối lượng. Trong đó, tỷ lệ sodium silicate – sodium hydroxide được giữ cố định là 1-1 trong thành phần dung dịch.

Tro bay, cát và xi đáy được nhào trộn khô theo tỷ lệ xác định trong 1 phút để tạo hỗn hợp vữa khô. Dung dịch hoạt hóa được cho vào hỗn hợp vữa khô và nhào trộn trong 2 phút. Độ linh động của vữa geopolimer được xác định theo TCVN 3121-3-2003. Thời gian chảy của hỗn hợp vữa xác định theo ASTM C399-10 bằng phễu. Cường độ chịu nén của bê tông nhẹ được xác định theo TCVN 7959-2917.



Hình 4. Bề mặt của bê tông khi phồng nở.

Bảng 2.

Thành phần cấp phối của vữa tro bay – xi đáy.

Nhóm	C (%)	X (%)	DD/TB	Độ bọt (mm)	Thời gian chảy (giây)	Nén (N/mm ²)
A0	100	0	0,6	132	5,2	10,4
A2	80	20		137	5,8	8,9
A4	60	40		148	6,4	7,2
A6	40	60		151	7,8	6,7
A8	20	80		155	9,2	6,2
A10	0	100		162	9,8	5,8
B0	100	0	0,7	154	5,5	12,1
B2	80	20		166	6,3	10,3
B4	60	40		170	7,6	9,4

B6	40	60	0,8	185	8,6	8,3
B8	20	80		210	9,7	7,8
B10	0	100		225	10,4	6,5
C0	100	0		185	7,8	12,4
C2	80	20		193	8,2	11,3
C4	60	40		210	9,5	10,7
C6	40	60		235	10,2	9,4
C8	20	80		244	10,6	8,9
C10	0	100		265	10,9	7,7

DD/TB: Dung dịch hoạt hóa / Tro bay; C: Cát; X: Xi đáy

Hàm lượng chất tạo bọt kỹ thuật được nhào trộn chung với hỗn hợp vữa geopolimer và xác định khả năng phồng nở theo thời gian. Độ phồng nở của vữa nhẹ được xác định bằng cách đo sự thay đổi chiều cao của hỗn hợp vữa nhẹ trong ống đong tại thời điểm trước và sau khi đạt chiều cao tối đa trong ống.

Hỗn hợp vữa được cho vào khuôn theo tiêu chuẩn xác định cường độ nén. Vữa được lưu giữ trong 4 giờ trong điều kiện nhiệt độ phòng, sau đó được đem đi dưỡng hộ nhiệt ở 80 °C trong 8 giờ để hoạt hóa các thành phần alumino-silicate. Thành phần cấp phối và kết quả thí nghiệm bê tông nhẹ sử dụng tro bay, xi đáy và chất tạo bọt trình bày trong Bảng 2 và 3.

Bảng 3.

Thành phần cấp phối của vữa và chất tạo bọt.

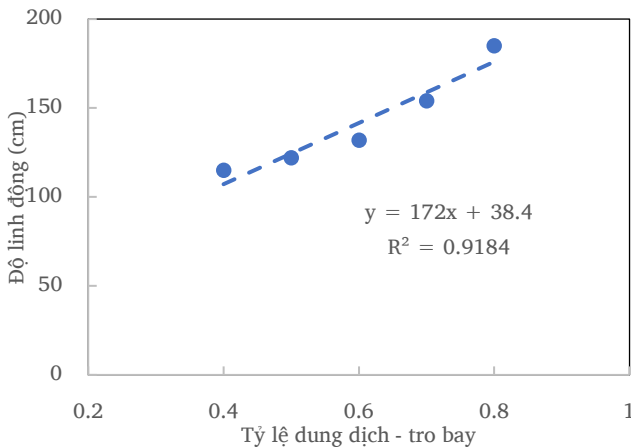
Nhóm	Bọt (%)	DD/TB	Độ phồng nở (%)	Nén (N/mm ²)
A10	0	0,6	0	5,8
A10G1	1		21	4,3
A10G2	2		31	3,6
A10G3	3		38	3,1
A10G4	4		41	2,7
A10G5	5		44	2,1
B10	0	0,7	0	6,5
B10G1	20		25	3,8
B10G2	40		35	3,1
B10G3	60		42	2,7
B10G4	80		44	2,2
B10G5	100		53	1,9
C10	0	0,8	0	7,7
C10G1	20		32	3,5
C10G2	40		38	2,6
C10G3	60		45	2,2
C10G4	80		47	1,6
C10G5	100		57	1,6

3. Kết quả thí nghiệm và đánh giá

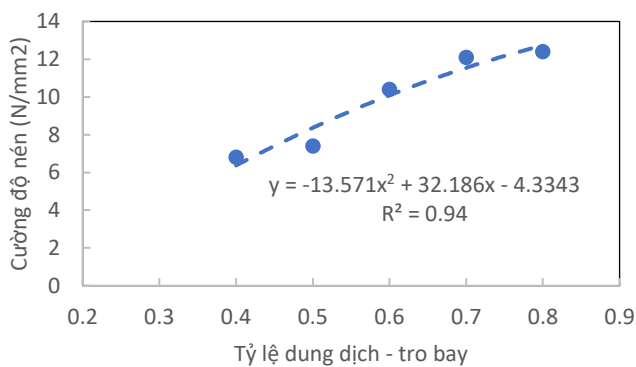
3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng dung dịch hoạt hóa đến tính chất của vữa geopolimer

Thành phần vữa geopolimer dùng tro bay với tỷ lệ dung dịch hoạt hóa khác nhau trình bày trong Hình 5 và 6.

Thực nghiệm cho thấy khi tỷ lệ dung dịch hoạt hóa – tro bay là 0,4 thì hỗn hợp vữa gần như không có sự đổi về độ linh động trong cấp phối A0. Hình 5 trình bày độ linh động của vữa có xu hướng thay đổi tăng dần, khoảng 70 %, khi tỷ lệ dung dịch – tro bay tăng dần từ 0,4 đến 0,8. Mối quan hệ giữa tỷ lệ dung dịch và độ linh động là tuyến tính. Quá trình hoạt hóa tro bay với dung dịch geopolimer cho thấy cường độ đạt khoảng gần 7 N/mm² với tỷ lệ dung dịch 0,4. Khi thành phần dung dịch này càng tăng cường thì khả năng hoạt hóa càng tốt như trên Hình 6. Cường độ nén đạt đến 12 N/mm² với cấp phối dùng tỷ lệ dung dịch – tro bay là 0,7 và 0,8. Ta nhận thấy, vai trò của dung dịch hoạt hóa vữa tạo độ linh động cho vữa vữa có khả năng tăng cường quá trình hoạt hóa tạo cường độ.



Hình 5. Mối quan hệ độ linh động và tỷ lệ dung dịch hoạt hóa – tro bay.

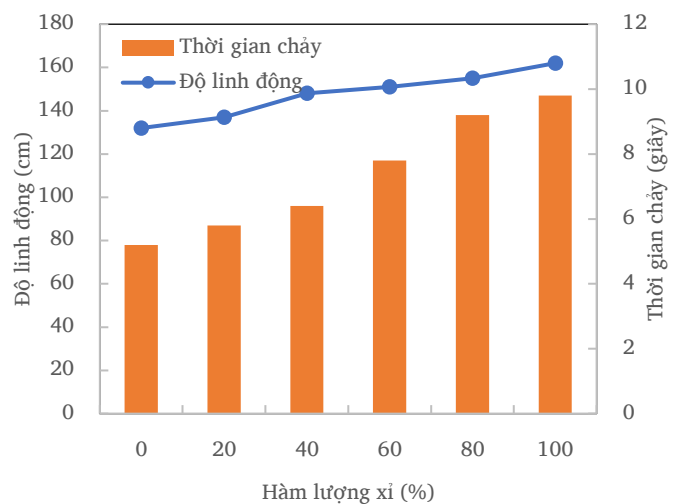


Hình 6. Mối quan hệ cường độ và tỷ lệ dung dịch hoạt hóa – tro bay.

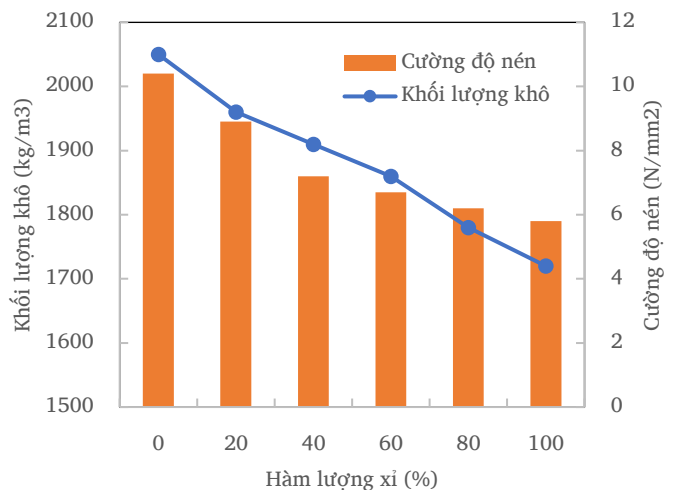
3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng xi đến tính chất của vữa geopolimer

Hàm lượng xi đáy được sử dụng thay thế cát trong thành phần cấp phối của vữa geopolimer, kết quả thực nghiệm trình bày trong Hình 7 đến Hình 10.

Khi cấp phối sử dụng thành phần xi đáy thay thế cát thì độ linh động có xu hướng thay đổi. Thực nghiệm cho thấy độ linh động thay đổi khoảng 25 % khi hàm lượng xi đáy thay đổi từ cấp phối A0 đến A10 như trên Hình 7. Bên cạnh đó, khả năng linh động của vữa được xác định bằng thời gian chảy cho thấy thời gian có xu hướng thay đổi từ 5,2 giây đến 9,8 giây. Ta nhận thấy, mối quan hệ giữa độ linh động và thời gian chảy của vữa geopolimer có xu hướng tuyến tính khi sử dụng tro bay và xi kết hợp với dung dịch hoạt hóa.



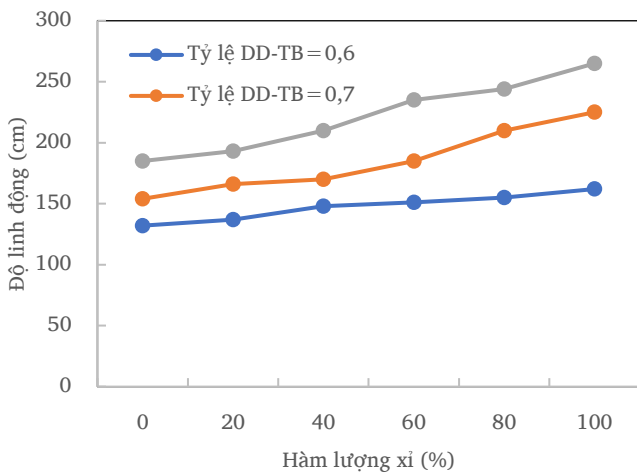
Hình 7. Mối quan hệ độ linh động, thời gian chảy và hàm lượng xi thay thế.



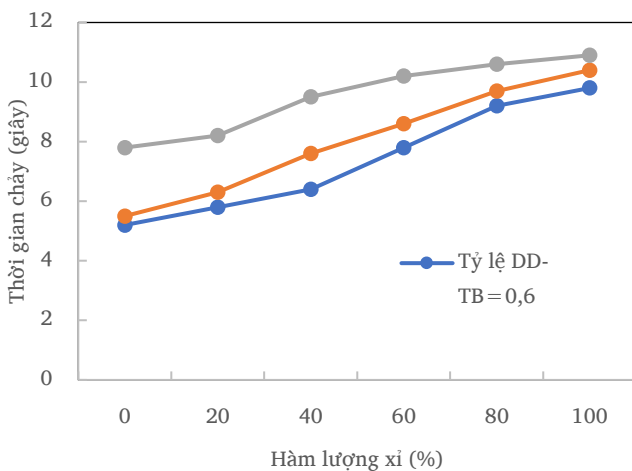
Hình 8. Mối quan hệ khối lượng thể tích, cường độ và hàm lượng xi.

Thực nghiệm giá trị khối lượng thể tích khô của vữa cho thấy giá trị này có xu hướng giảm dần khoảng 15 % khi tăng dần hàm lượng xi đáy thay thế cát. Hình 8 trình bày mối quan hệ giữa khối lượng thể tích và cường độ nén của vữa geopolimer. Cường độ có xu hướng giảm dần từ 10 N/mm² xuống đến 6 N/mm² với cấp phối A0 và A10. Điều này cho thấy xi đáy thay thế cát làm giảm khả năng chịu lực của vữa trong quá trình hoạt hóa geopolimer.

Thực nghiệm cho thấy độ linh động của vữa geopolimer có xu hướng tăng dần với hàm lượng xi đáy và dung dịch hoạt hóa dùng trong hỗn hợp vữa. Hình 9 trình bày độ linh động tăng khoảng 30 % khi tăng hàm lượng dung dịch và có xu hướng tăng thêm 50 % khi thay thế hoàn toàn cốt liệu bằng xi đáy.



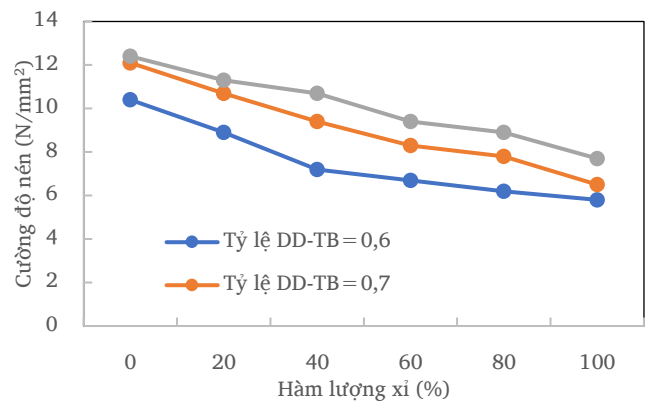
Hình 9. Mối quan hệ độ linh động và hàm lượng xi với tỷ lệ dung dịch thay đổi.



Hình 10. Mối quan hệ thời gian chảy và hàm lượng xi với tỷ lệ dung dịch thay đổi.

Hình 10 trình bày thời gian chảy của vữa tăng đến 15 % khi tăng hàm lượng dung dịch hoạt hóa và có xu hướng tăng thêm đến 30 % khi thay thế xi đáy trong cấp phối. Ta nhận thấy, thành phần xi đáy có khả năng tương tác tốt với môi trường dung dịch kiềm nên có tác dụng cải thiện tốt khả năng làm việc của vữa, tạo điều kiện cho việc sử dụng chất tạo bọt để quá trình phòng nở diễn ra tốt hơn.

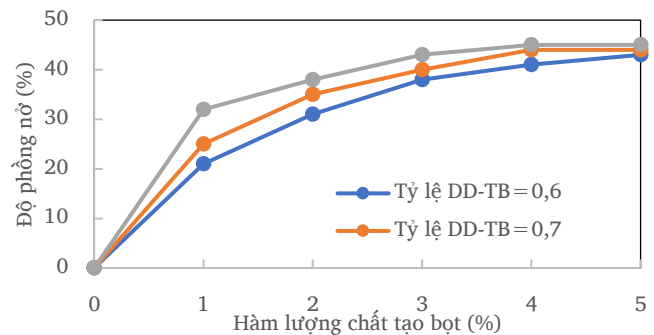
Kết quả thực nghiệm trình bày cường độ hoạt hóa của vữa geopolimer giảm nhanh khi dùng xi đáy thay thế. Cường độ có xu hướng giảm đến 50 % khi dùng hoàn toàn xi đáy. Hình 11 cho thấy thành phần dung dịch hoạt hóa giúp tăng cường khả năng hoạt hóa, làm tăng cường độ của vữa. Khi đó, thành phần dung dịch hoạt hóa cao có thể tăng cường khoảng 15 % - 20 % cường độ của vữa.



Hình 11. Mối quan hệ cường độ và hàm lượng xi với tỷ lệ dung dịch thay đổi.

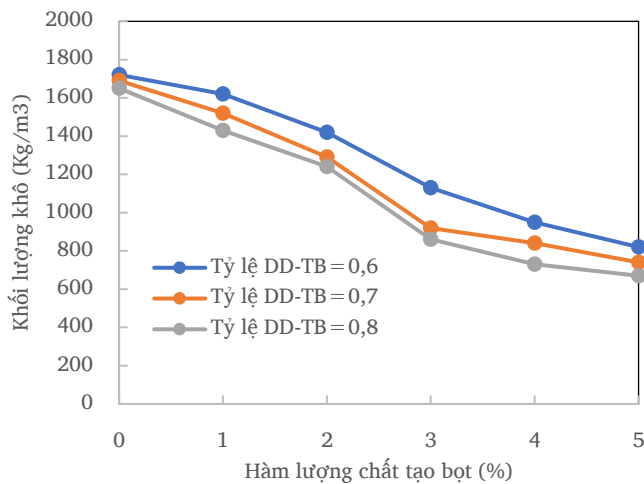
3.3. Ảnh hưởng của hàm lượng chất tạo bọt đến tính chất của vữa geopolimer

Quá trình hoạt hóa do tro bay kết hợp với dung dịch và hàm lượng bọt kỹ thuật khác nhau, kết quả thực nghiệm trình bày trong Hình 12 đến Hình 14.

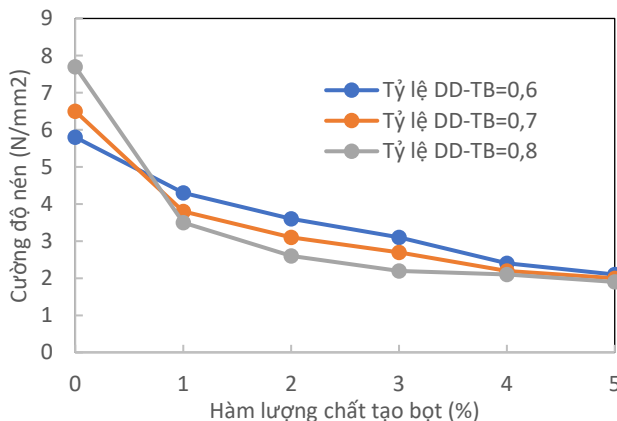


Hình 12. Ảnh hưởng của chất tạo bọt đến độ phòng nở.

Chất tạo bọt kết hợp với vữa geopolymer có độ linh động cao cho thấy khả năng thay đổi nhanh về độ phồng nở và khối lượng thể tích. Hình 12 trình bày vữa geopolymer với tỷ lệ dung dịch 0,6 có khả năng phồng nở đạt khoảng 21 % và tăng dần đến hơn 40 % khi hàm lượng bọt H₂O₂ tăng dần từ 1 % đến 5 %. Khi cấp phối dùng tỷ lệ dung dịch 0,7 và 0,8 thì độ phồng nở có xu hướng tăng thêm 15 % đến 20 %. Điều này cho thấy hàm lượng dung dịch thay đổi từ 0,6 đến 0,8 làm tăng độ linh động của hỗn hợp vữa đồng thời giúp cho hỗn hợp có khả năng tương tác với chất tạo bọt. Bên cạnh đó, khi hàm lượng bọt dùng đến 5 % cho thấy các cấp phối đạt đến độ phồng nở hơn 40 % với tỷ lệ dung dịch khác nhau.



Hình 13. Ảnh hưởng của chất tạo bọt đến khối lượng thể tích.



Hình 14. Ảnh hưởng của chất tạo bọt đến cường độ.

Kết quả trên Hình 13 trình bày các cấp phối A0 có giá trị khối lượng khô giảm dần từ 1700 kg/m³ xuống 800 kg/m³ khi tăng dần hàm lượng bọt. Các cấp phối B0 cho thấy khối lượng khô giảm đến 740 kg/m³ khi

dùng đến 5 % hàm lượng bọt. Trong khi đó, các cấp phối C0 giảm đến gần 600 kg/m³ khi dùng đến 5 % hàm lượng bọt. Hình 14 trình bày quá trình hoạt hóa geopolymer cho thấy cường độ của bê tông nhẹ giảm dần từ 6 N/mm² xuống đến 2 N/mm², giảm hơn 60 % trong cấp phối A0. Các cấp phối B0 cho thấy cường độ có xu hướng giảm nhanh từ 6,5 N/mm² xuống đến 2 N/mm², giảm đến gần 70 %. Các cấp phối C0 cho thấy cường độ giảm nhanh từ 8 N/mm² xuống đến 2 N/mm², giảm đến gần 80 %. Ta nhận thấy, cường độ hoạt hóa của bê tông nhẹ geopolymer phụ thuộc nhiều vào giá trị khối lượng khô và giảm theo độ phồng nở. Hàm lượng dung dịch cao có tác dụng làm tăng khả năng hoạt hóa nhưng không ảnh hưởng nhiều đến cường độ hoạt hóa của bê tông nhẹ geopolymer dùng chất tạo bọt H₂O₂.

4. Kết luận

Nghiên cứu ảnh hưởng của tro bay, xi than kết hợp với chất tạo bọt H₂O₂ đạt được các kết quả

Thành phần dung dịch hoạt hóa có tác dụng làm tăng độ linh động đến 70 % cho vữa geopolymer và cường độ hoạt hóa có khả năng đến 50 %.

Thành phần xi đáy được sử dụng với hàm lượng 20 % đến 100 % thay thế cho cát trong cấp phối vữa geopolymer có tác dụng làm tăng khả năng làm việc của vữa đến 30 %. Thời gian chảy đạt khoảng 10-11 giây khi dùng hoàn toàn xi đáy trong cấp phối vữa geopolymer. Tuy nhiên cường độ hoạt hóa có xu hướng giảm đến 40 % khi thay thế bằng xi đáy.

Chất tạo bọt H₂O₂ có khả năng làm việc với môi trường dung dịch hoạt hóa làm cho vữa có khả năng phồng nở đến hơn 40 %. Quá trình hoạt hóa cho thấy cường độ của bê tông nhẹ phụ thuộc vào hàm lượng chất tạo bọt và hàm lượng dung dịch hoạt hóa. Vữa geopolymer có khả năng đạt cấp độ bền B3 theo TCVN 7959 - 2017 với tỷ lệ tro bay – xi là 1-3, dung dịch hoạt hóa – tro bay là 0,7 kết hợp với 3 % chất tạo bọt.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số B2020-20-01.

Tài liệu tham khảo:

- [1]. K. C. Brady, G. R. A. Watts, and M. R. Jones. "Specification for Foamed Concrete," UK: Highway Agency, 2001.
- [2]. Z. Li. "Advanced Concrete Technology," Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, pp. 219-220, 2011
- [3]. E. K. K. Nambiar and K. Ramamurthy. "Influence of filler type on the properties of foam concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 28, ISS.5, pp. 475-480, May. 2006, DOI.10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001

- [4]. K. Ramamurthy, E. K. K. Nambiar, and G. I. S. Ranjani. "A classification of studies on properties of foam concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 6, pp. 388–396, Jul.2009. DOI.10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006.
- [5]. Y. L.Cui , F. G.Qian, S. X.Liu and H. T.Yin. "Effects of Hydrogen Peroxide on Foam Concrete Performances," *Applied Mechanics and Materials*, Vol.584–586, 1746–1749,2014
- [6]. World of Coal Ash 2013, *World of Coal Ash Conference in Kentucky*
- [7]. K. Rennings and W. Smidt . "A Lead Market Approach towards the Emergence and Diffusion of Coal-Fired Power Plant Technology," *Economia Politica* , Vol.17, ISS.2, pp.303-328, 2010.
- [8]. Y.Kim, , M.Q.Dang and T.M. Do. "Studies on compressive strength of sand stabilized by alkali-activated ground bottom ash and cured at the ambient conditions," *International Journal of Geo-Engineering* , Vol.7, pp.15, Dec.2016, DOI. 10.1186/s40703-016-0029-4
- [9]. M.I.M.Chou. "Fly Ash," *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Springer, New York, 2012
- [10]. J. Davidovits. "Properties of Geopolymer cement," *Proceeding first International conference on Alkaline cements and concretes*, pp. 131-149, 1994.
- [11]. H. Xu, J.S.J. van Deventer. "The geopolymerisation of aluminosilicate minerals," *International Journal of Mineral Processing*, vol.59,ISS.3, pp. 247-266, Jun.2000, DOI.10.1016/S0301-7516(99)00074-5.
- [12]. J. Davidovits. "Geopolymer Chemistry and Applications," Saint-Quentin, France, Geopolymer Institute, Oct.2011
- [13]. H.K.Kim. "Utilization of sieved and ground coal bottom ash powders as a coarse binder in high-strength mortar to improve workability," *Construction and Building Materials*, Vol. 91, pp. 57–64, Aug. 2015, DOI. 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.017
- [14]. D. M. S. P. Dassanayake, S. M. A. Nanayakkara, A. Nanaykkara. "Development of Geopolymer with Coal Fired Boiler Ash," *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCCon)*, Moratuwa, pp. 356-361, Jul.2018, DOI. 10.1109/MERCCon.2018.8421910