

Nghiên cứu ảnh hưởng của dung dịch sodium silicat và silicafume đến khả năng làm việc của cốt liệu tái chế trong bê tông

Nguyễn Ninh Thụy¹, Lê Anh Tuấn^{2*}

¹ Đại Học Quốc Gia TP. HCM

² Trường Đại Học Bách Khoa, Đại Học Quốc Gia TP. HCM

TỪ KHÓA

Cốt liệu tái chế
Độ sụt
Sodium silicat
Silicafume
Cường độ

TÓM TẮT

Sử dụng cốt liệu tái chế từ phế thải xây dựng là giải pháp giúp giảm chi phí xử lý chất thải rắn và bảo vệ môi trường bền vững trong xây dựng. Nghiên cứu này sử dụng cốt liệu tái chế từ phế thải bê tông trong các công trình. Cốt liệu tái chế cho thấy độ hút nước cao và hàm lượng vữa bám trên bề mặt lớn. Sử dụng cốt liệu tái chế với hàm lượng lần lượt là 25, 50 và 100 % thay thế cho đá trong thành phần cấp phối bê tông. Dung dịch sodium silicat 5 % theo khối lượng được sử dụng để làm dung dịch xử lý bề mặt cốt liệu. Thành phần silicafume sử dụng thay thế với hàm lượng 25, 50, 75 và 100 % theo khối lượng cho sodium silicat trong dung dịch. Kết quả thực nghiệm cho thấy độ sụt của hỗn hợp bê tông có xu hướng giảm khi tăng dần hàm lượng thay thế của cốt liệu tái chế. Độ sụt của hỗn hợp bê tông giảm đến 50 % và cường độ bê tông tái chế giảm đến 30 % khi sử dụng cốt liệu phế thải chưa được xử lý bề mặt. Nghiên cứu sử dụng dung dịch sodium silicat 5 % có khả năng cải thiện bề mặt, giảm độ hút nước của cốt liệu tái chế. Độ sụt của hỗn hợp bê tông được cải thiện. Cường độ bê tông sử dụng cốt liệu tái chế đã xử lý có khả năng cải thiện đến 20 %. Thời gian cần thiết để xử lý cốt liệu trong dung dịch sodium silicat là 3-4 giờ. Dung dịch sodium silicat 5 % kết hợp với silicafume tỷ lệ 1-1 và thời gian xử lý trong 4 giờ cho thấy khả năng cải thiện bề mặt cốt liệu tái chế tốt nhất. Độ sụt của hỗn hợp bê tông có khả năng cải thiện đến 70 %. Cường độ bê tông có khả năng tăng cường đến 28 %.

KEYWORDS

Recycled coarse
Aggregate
Slump
Sodium Silicate
Strength

ABSTRACT

Recycled coarse aggregate is known as suitable solution for reduce waste disposal cost in construction and enviromental sustainability. In this research, recycled coarse aggregate from concrete waste is used. Recycled coarse aggregate exhibits high absorption and mortar coating in surface. The replacement of recycle coarse aggregate in range of 25 to 100% by weight in concrete mix proportion is considered. Sodium silicate solution 5% by weight is used for treatment recycled coarse aggregate. Then, silicafume is mixed in range from 25 to 100% by weight sodium silicate in treatment solution. In the results, slump of concrete is tend to reduce with higher content of recycled coarse aggregate. It can be decreased in 50% in slump and 30% in compressive strength of concrete, respectively, with 100% untreatment recycled coarse aggregate in mix. Recycled coarse aggregate can be improved absorption and reaction of surface by treatment in sodium silicate 5% solution. Hence, concrete can be improve in slump and 20% in strength with treatment aggregate. The suitable time for treatment is 3-4 hours in sodium silicate solution. Moreover, The replacement of silicafume in solution with 1 -1 of ratio can be improved in surface of recycled coarse aggregate during 4 hours. Then, concrete can be increase in 70% slump and 28% in compressive strength, respectively, with treatment aggregate in sodium silicate – silicafume solution.

1. Giới thiệu

Quá trình đô thị hóa đang diễn ra ngày càng nhanh tại Việt Nam, đặc biệt tại các thành phố lớn. Thực trạng quản lý và xử lý chất thải nói chung và chất thải rắn xây dựng nói riêng hiện đang là vấn đề lớn trong công tác bảo vệ môi trường ở nhiều địa phương trên cả nước. Hiện nay,

giải pháp thường sử dụng là chôn lấp chất thải rắn trong xây dựng tuy nhiên giải pháp này tiềm ẩn nhiều nguy cơ ô nhiễm môi trường. [1]

Việc xử lý chất thải rắn xây dựng nhằm mục đích tái sử dụng trong sản xuất vật liệu đã được nhiều nước trên thế giới nghiên cứu và áp dụng. Quá trình nghiên cứu cho thấy chất thải rắn trong xây dựng chủ yếu là bê tông, vữa, gạch xây, gạch ngói có thể được gia công và

*Liên hệ tác giả: latuan@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 31/05/2022, sửa xong ngày 27/06/2022, chấp nhận đăng 06/08/2022

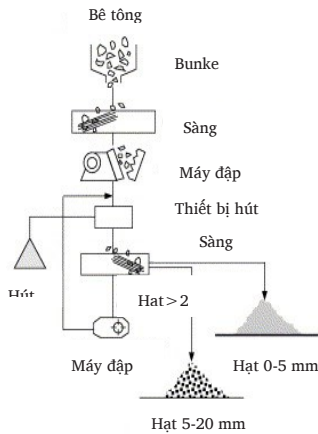
Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2022.386>

phân loại làm cốt liệu thay thế một phần hoặc toàn bộ cho cấp phối vật liệu dùng trong xây dựng [2, 3].

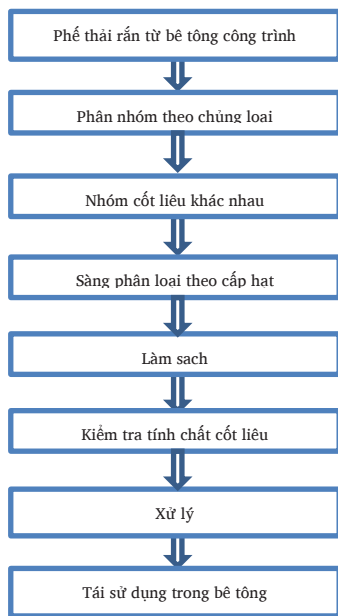
Bên cạnh đó, cốt liệu tái chế từ chất thải rắn xây dựng có đặc điểm lẫn nhiều thành phần khác nhau và không đồng nhất, độ hút nước cao, bề mặt cốt liệu có độ rỗng cao. Các nghiên cứu đã sử dụng giải pháp xử lý bề mặt cốt liệu tái chế bằng phương pháp cơ học và hóa học [4, 5, 6].

Quá trình xử lý bề mặt của cốt liệu tái chế có thể sử dụng phương pháp hóa học bằng cách dùng các chất có tính axit để loại bỏ tạp chất bám trên bề mặt cốt liệu hoặc sử dụng phụ gia hóa học, polyme để tăng khả năng làm việc bề mặt của cốt liệu. [7,8]

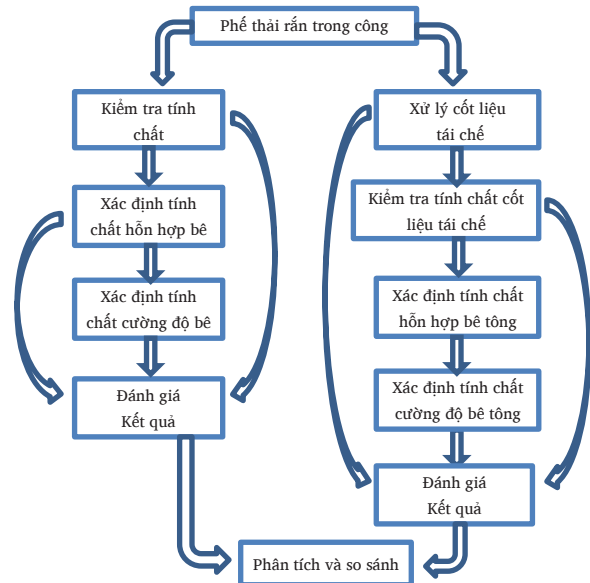
Nghiên cứu này sử dụng phương pháp hóa học bằng cách dùng dung dịch sodium silicat kết hợp với siliacufume để xử lý bề mặt của cốt liệu tái chế. Quá trình xử lý này nhằm tăng cường khả năng bám dính và khả năng làm việc của cốt liệu tái chế trong bê tông.



Hình 1. Quy trình gia công cốt liệu tái chế từ bê tông phế thải [2].



Hình 2. Quy trình xử lý cốt liệu tái chế từ phế thải bê tông từ các công trình xây dựng [4].



Hình 3. Giải pháp đánh giá cốt liệu tái chế [5].

2. Nguyên vật liệu và phương pháp thí nghiệm

2.1. Nguyên vật liệu

2.1.1. Xi măng

Xi măng PCB40 Hà Tiên được sử dụng trong nghiên cứu có các tính chất cơ lý được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Tính chất cơ lý của xi măng

Chỉ tiêu cơ lý	Đơn vị	Giá trị
Cường độ nén	N/mm ²	
3 ngày		26
7 ngày		34
28 ngày		44
Khối lượng riêng	g/cm ³	3,1
Khối lượng thể tích	g/cm ³	1,55
Độ mịn Blaine	cm ² /g	3760
Lượng nước yêu cầu	%	27,5
Thời gian ninh kết	Phút	
Bắt đầu		130
Kết thúc		165
Độ giãn nở thể tích	mm	< 1

2.1.2. Cát

Cát sông Đồng Nai được sử dụng trong nghiên cứu có khối lượng riêng 2,62 g/cm³; khối lượng thể tích 1,52 g/m³ và mô đun độ lớn 1,78.

2.1.3. Đá

Đá được sử dụng từ mỏ Tân Cang – Đồng Nai có Dmax 20mm, khối lượng riêng 2,73 g/cm³.

2.1.4. Cốt liệu tái chế

Các phế thải công trình xây dựng bao gồm nhiều chủng loại khác nhau. Trong nghiên cứu này phế thải xây dựng từ nguồn bê tông của công trình được thu gom, đánh giá thành phần chủ yếu là đá lẫn vữa xi măng. Phế thải bê tông được cho vào máy đập nghiền có kích thước nhỏ hơn 20 mm, sau đó tiến hành sàng phân loại để loại bỏ kích thước hạt nhỏ hơn 5 mm. Cốt liệu tái chế được cân định lượng và cho vào máy nghiền Los Angeles với tốc độ quay 33-35 vòng/phút trong 15 phút, sau đó cho qua sàng 5 mm để xác định lượng vữa bám dính trên bề mặt cốt liệu. Độ hút nước của cốt liệu tái chế được xác định theo TCVN 7572-2006. Tính chất cơ lý của cốt liệu tái chế từ bê tông được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Thành phần của cốt liệu tái chế.

Tính chất	Đơn vị	Giá trị
Thành phần hạt	mm	5-20
Độ hút nước	%	6,2
Hàm lượng vữa bám dính	%	32,5
Khối lượng thể tích	Kg/m ³	1320
Khối lượng riêng	g/m ³	2,67

Bảng 3. Thành phần bê tông sử dụng cốt liệu tái chế.

Cấp phối	XM	C	Đ	TC	N	Sụt	Nén
	kg	Kg	Kg	Kg	Lít	cm	N/mm ²
A0	375	580	1180	0	225	11	31,2
A1	375	580	885	295	225	8	28,6
A2	375	580	590	590	225	7	24,5
A3	375	580	0	1180	225	5	22,3

XM: xi măng; C: cát; Đ: Đá; TC: Cốt liệu tái chế; N: nước

Thành phần cốt liệu tái chế sau đó được xử lý bằng cách ngâm hoàn toàn trong dung dịch sodium silicat với thời gian ngâm lần lượt là 1, 2, 3, 4 và 5 giờ liên tục. Sau đó cốt liệu được lau khô bề mặt và để khô trong điều kiện nhiệt độ phòng trong 7 ngày.

Cốt liệu sau khi xử lý được dùng thay thế cho đá trong thành phần cấp phối bê tông với tỷ lệ lần lượt là 25, 50 và 100 % theo khối lượng. Độ sụt của hỗn hợp bê tông được xác định theo TCVN 3106-1993. Cường độ bê tông sử dụng cốt liệu tái chế được xác định theo TCVN 5574-2018.

3. Kết quả thí nghiệm

3.1. Ảnh hưởng của cốt liệu tái chế đến khả năng làm việc của hỗn hợp bê tông

Thành phần cốt liệu tái chế chưa xử lý được sử dụng thay thế cho đá trong thành phần cấp phối bê tông, kết quả thực nghiệm trình bày trong Hình 4.

2.1.5. Silicafume

Nguyên liệu silicafume có khối lượng riêng là 2,2 g/cm³, hàm lượng 91,2 % SiO₂, độ mịn 15,2 m²/g.

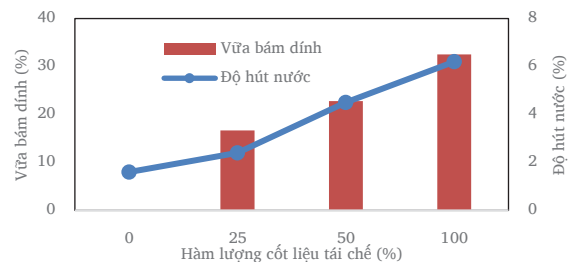
2.1.6. Dung dịch sodium silicat

Dung dịch sodium silicat có mô đun silic SiO₂/Na₂O = 2 sẽ được pha trộn vào nước với tỷ lệ 5 % theo khối lượng để chế tạo dung dịch dùng xử lý cốt liệu tái chế. Thành phần silicafume sẽ được dùng để thay thế cho dung dịch sodium silicat trong dung dịch xử lý với tỷ lệ lần lượt là 25, 50, 75 và 100 % theo khối lượng. Quá trình chuẩn bị dung dịch sẽ được định lượng dung dịch sodium silicate trước và khuấy đều trong nước, sau đó tiếp tục cho silicafume vào và khuấy đều trong dung dịch xử lý.

2.2. Thành phần cấp phối và phương pháp thực nghiệm

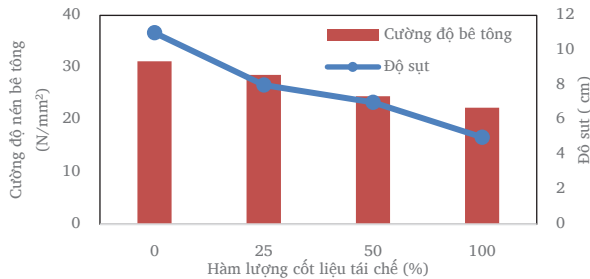
Bê tông được thiết kế với cấp độ bền B25 theo TCVN 5574-2018. Thành phần cốt liệu tái chế chưa xử lý được thay thế cho đá trong cấp phối bê tông với tỷ lệ lần lượt là 25, 50 và 100 % theo khối lượng. Thành phần cấp phối bê tông sử dụng cốt liệu tái chế được trình bày trong Bảng 3.

Thực nghiệm cho thấy cốt liệu tái chế có lượng vữa xi măng bám dính trên bề mặt chiếm đến 32,5 % theo khối lượng và độ hút nước đạt đến 6,2 %. Hình 4 cho thấy khi sử dụng cốt liệu tái chế thay thế từ 25 đến 100 % trong thành phần cấp phối bê tông làm thay đổi tính chất của hỗn hợp cốt liệu về độ hút nước và hàm lượng vữa bám dính trong cốt liệu. Điều này sẽ tác động đến khả năng làm việc của hệ cốt liệu trong hỗn hợp bê tông.



Hình 4. Mối quan hệ giữa hàm lượng cốt liệu tái chế và tính chất của cốt liệu.

Khi thay thế cốt liệu tái chế chưa xử lý trong thành phần cấp phối bê tông, thực nghiệm cho thấy độ sụt của hỗn hợp bê tông có xu hướng giảm dần. Hình 5 trình bày giá trị độ sụt bê tông giảm đến 50 % khi hàm lượng cốt liệu tái chế sử dụng tăng dần từ 25 đến 100 %. Điều này cho thấy độ hút nước và khả năng tương tác bề mặt của cốt liệu tái chế tác động rõ rệt đến độ linh động của hỗn hợp bê tông.

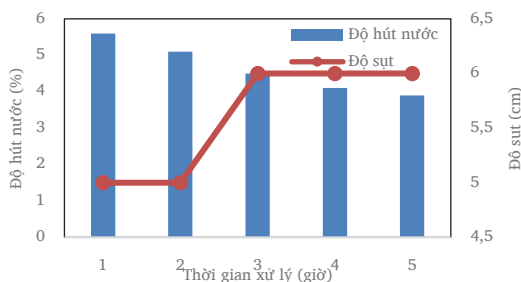


Hình 5. Mối quan hệ giữa hàm lượng cốt liệu tái chế và tính chất bê tông.

Giá trị cường độ chịu nén của bê tông có xu hướng giảm dần theo hàm lượng cốt liệu tái chế sử dụng. Cường độ bê tông giảm đến 30 % khi thay thế hoàn toàn cốt liệu tái chế trong thành phần cấp phối. Ta nhận thấy, cốt liệu tái chế có bề mặt cốt liệu bao bọc bằng lớp vữa xi măng bám dính tác động đến khả năng bám dính và làm việc của cốt liệu trong bê tông nền, làm giảm độ lưu động và cường độ của bê tông. Do đó, giải pháp nghiên cứu nhằm nâng cao khả năng thay thế của cốt liệu tái chế là xử lý bề mặt của cốt liệu tái chế.

3.2. Ảnh hưởng của dung dịch sodium silicat đến tính chất cốt liệu tái chế và hỗn hợp bê tông

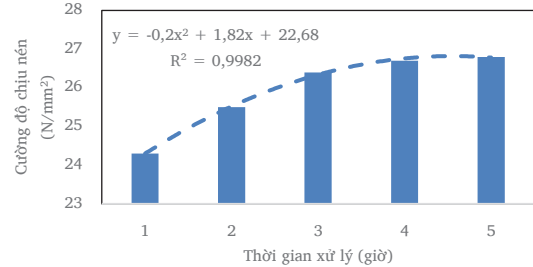
Thành phần dung dịch sodium silicat được kết hợp với silicafume dùng xử lý bề mặt của cốt liệu tái chế trong thời gian 1 giờ đến 5 giờ liên tục, sau đó cốt liệu tái chế được sử dụng trong bê tông. Kết quả thực nghiệm trình bày trong Hình 6-7.



Hình 6. Mối quan hệ giữa thời gian xử lý và tính chất của hỗn hợp bê tông.

Dung dịch sodium silicat dùng để xử lý bề mặt của cốt liệu trong thời gian 1 giờ có tác dụng làm giảm độ hút nước của cốt liệu tái chế còn 5,7 %. Hình 6 cho thấy khi tăng thời gian xử lý cốt liệu trong sodium silicat độ hút nước của cốt liệu có xu hướng giảm dần. Khi thời gian xử lý kéo dài đến 5 giờ thì độ hút nước giảm còn 3,9 %.

Độ sụt của hỗn hợp bê tông khi sử dụng cốt liệu tái chế đã xử lý cho thấy có xu hướng thay đổi. Độ sụt không thay đổi sau khi cốt liệu được xử lý 1 và 2 giờ. Giá trị độ sụt đạt 6 cm khi cốt liệu có thời gian xử lý từ 3 -5 giờ liên tục trong dung dịch sodium silicat. Điều này cho thấy dung dịch sodium silicat có tác dụng làm kín bề mặt của cốt liệu và giảm độ hút nước của lớp vữa bám dính bề mặt cốt liệu tái chế. Thời gian xử lý trong dung dịch 3 giờ cho thấy cốt liệu tuy có giảm độ hút nước nhưng độ sụt không thay đổi. Ta nhận thấy, dung dịch sodium silicat có tăng thời gian xử lý nhưng không tác động nhiều đến khả năng làm việc của cốt liệu tái chế, do đó tác động chính của cốt liệu tái chế là lượng vữa bám trên bề mặt cốt liệu.



Hình 7. Mối quan hệ thời gian xử lý và cường độ bê tông dùng cốt liệu tái chế.

Giá trị cường độ chịu nén của bê tông sử dụng cốt liệu tái chế đã xử lý cho thấy cường độ có xu hướng cải thiện đến 20% khi thời gian xử lý cốt liệu kéo dài đến 3-4 giờ như trên Hình 7. Khi tăng thêm thời gian xử lý cốt liệu trong dung dịch sodium silicat thì cường độ thay đổi không đáng kể. ta nhận thấy, dung dịch sodium silicat có khả năng làm giảm độ hút nước của cốt liệu và tăng khả năng linh động trong hỗn hợp bê tông với thời gian xử lý 3-4 giờ.

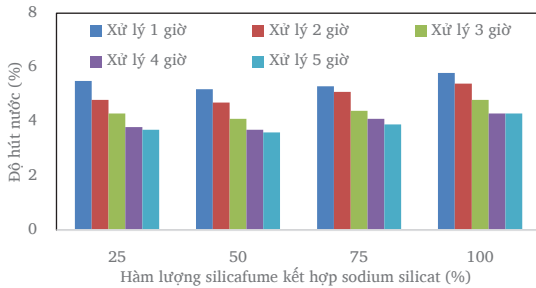
3.3. Ảnh hưởng của dung dịch sodium silicat kết hợp silicafume đến tính chất cốt liệu tái chế và hỗn hợp bê tông

Quá trình xử lý bề mặt cốt liệu tái chế trong dung dịch silicat được tăng lên nhằm đánh giá ảnh hưởng đến khả năng làm việc của cốt liệu tái chế trong bê tông. Kết quả thực nghiệm trình bày trong Hình 8-10.

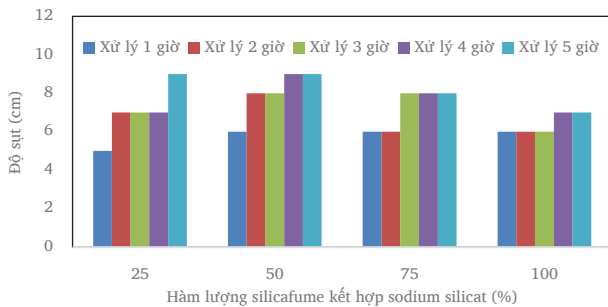
Dung dịch sodium silicat sử dụng thay thế bằng 25 % silicafume cho thấy độ hút nước của cốt liệu có xu hướng giảm dần theo thời gian xử lý. Hình 8 cho thấy độ hút nước giảm còn 3,7 % khi thời gian xử lý kéo dài đến 5 giờ. Độ hút nước có xu hướng giảm nhiều khi dung dịch sử dụng đến 50 % silicafume thay thế sodium silicat trong dung dịch. Khi tăng hàm lượng silicafume đến 100 % thì độ hút nước của cốt liệu tái chế lại có xu hướng giảm dần ảnh hưởng, có xu hướng tăng độ hút nước. Dung dịch sử dụng hoàn toàn silicafume cho thấy độ hút nước giảm dần từ 5,8 % xuống còn 4,3 % khi thời gian xử lý tăng từ 1 giờ đến 4 giờ liên tục. Khi tiếp tục tăng thời gian xử lý thì độ hút nước có xu hướng không thay đổi.

Điều này cho thấy thành phần silicafume với khả năng hoạt tính và linh động trong môi trường dung dịch sodium silicat có khả năng bám dính trên bề mặt của cốt liệu tái chế, giảm độ hút nước của cốt

liệu. Tuy nhiên, khi dùng hoàn toàn silicafume thì tác động của việc bám dính này giảm đi, do đó cần có sự kết hợp sodium silicat và silicafume để tăng cường sự cải thiện bề mặt của cốt liệu tái chế.



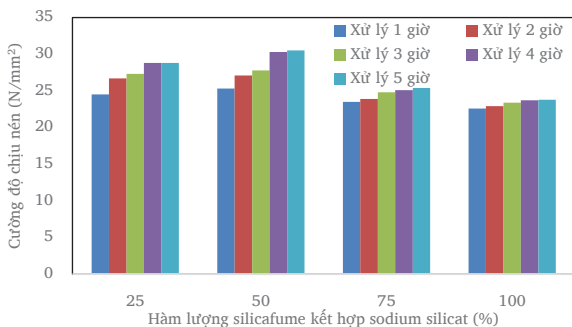
Hình 8. Mối quan hệ thành phần dung dịch xử lý và độ hút nước của cốt liệu tái chế.



Hình 9. Mối quan hệ thành phần dung dịch xử lý và độ sụt của hỗn hợp bê tông.

Hình 9 trình bày ảnh hưởng của silicafume trong dung dịch sodium silicat làm cải thiện khả năng làm việc của cốt liệu tái chế trong hỗn hợp bê tông. Khi dung dịch xử lý dùng 25 % silicafume thì độ sụt có xu hướng tăng dần từ 5 đến 9 cm khi thời gian xử lý tăng từ 1 đến 5 giờ liên tục. Giá trị độ sụt có xu hướng cải thiện tốt nhất khi dùng 50 % silicafume thay thế cho sodium silicat trong dung dịch xử lý. Khi dung dịch dùng hoàn toàn silicafume thì hỗn hợp bê tông có xu hướng giảm độ linh động.

Ta nhận thấy, thành phần silicafume được sử dụng trong dung dịch sodium silicat có tác dụng làm tăng khả năng linh động của cốt liệu tái chế trong hỗn hợp bê tông với hàm lượng sử dụng với tỷ lệ 1-1 theo khối lượng là phù hợp.



Hình 10. Mối quan hệ thành phần dung dịch xử lý và cường độ của bê tông.

Cường độ bê tông sử dụng cốt liệu tái chế được xử lý cho thấy cường độ được cải thiện đến 15 % khi cốt liệu tái chế được xử lý trong dung dịch dùng 25 % silicafume trong 1 giờ. Khi tăng thời gian xử lý đến 5 giờ thì cường độ được cải thiện đến 25 %. Cường độ bê tông đạt đến 30 N/mm² sau khi cốt liệu tái chế được xử lý 4-5 giờ trong dung dịch dùng 50 % silicafume. Khi hàm lượng silicafume tăng thêm trong dung dịch sodium silicat thì cường độ của bê tông sử dụng cốt liệu tái chế có xu hướng giảm xuống. Điều này cho thấy việc kết hợp silicafume trong dung dịch sodium silicat có tác dụng cải thiện bề mặt của cốt liệu tái chế, giảm độ hút nước cốt liệu và tăng khả năng làm việc của cốt liệu trong bê tông nền. Thời gian xử lý cốt liệu trong dung dịch hỗn hợp cần thiết là 3-4 giờ để đảm bảo khả năng xử lý bề mặt cốt liệu.

4. Kết luận

Nghiên cứu ảnh hưởng của silicafume và sodium silicat để xử lý cốt liệu tái chế dùng trong bê tông đạt được các kết quả sau:

- Cốt liệu tái chế từ phế thải bê tông có độ hút nước và hàm lượng vữa bám dính trên bề mặt lớn. Khi sử dụng thay thế cốt liệu tái chế từ 25 đến 100 % theo khối lượng trong thành phần cấp phối bê tông thì độ sụt của hỗn hợp bê tông có xu hướng giảm đến 50 %. Cường độ bê tông tái chế giảm đến 30 %.

- Sử dụng dung dịch sodium silicat 5 % có khả năng cải thiện bề mặt, giảm độ hút nước của cốt liệu tái chế. Độ sụt của hỗn hợp bê tông được cải thiện. Cường độ bê tông sử dụng cốt liệu tái chế đã xử lý có khả năng cải thiện đến 20 %. Thời gian cần thiết để xử lý cốt liệu trong dung dịch sodium silicat là 3-4 giờ.

- Sử dụng silicafume kết hợp sodium silicat trong dung dịch xử lý có khả năng tăng cường bề mặt và giảm độ hút nước của cốt liệu tái chế. Dung dịch sodium silicat 5 % kết hợp với silicafume tỷ lệ 1-1 và thời gian xử lý trong 4 giờ cho thấy khả năng cải thiện bề mặt cốt liệu tái chế tốt nhất. Độ sụt của hỗn hợp bê tông có khả năng cải thiện đến 70 %. Cường độ bê tông có khả năng tăng cường đến 28 %.

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 C2021-76-02.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Tuấn, N., Sơn, T., Phương, L., Hiền, N., Kiên, N., Huy, V., & Cường, T., "Nghiên cứu hiện trạng quản lý phế thải xây dựng và phá dỡ ở Việt Nam", Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng, 12(7), 2018, 107-116.
- [2]. Kiyoshi Eguichi, et al., "Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction", Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 7, 2007, Pages 1542-1551.
- [3]. Behera, M.; Bhattacharyya, S.K.; Minocha, A.K.; Deoliya, R.; Maiti, S., "Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review", Construction and Building Materials, Vol. 68, 2014, pp. 501-516.

- [4]. Jeonghyun Kim, "Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview", *Construction and Building Materials*, Volume 328, 18 April, 2022, pp.127071.
- [5]. Abbijit Mistri, et. al., "A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials", *Construction and Building Materials*, Volume 233, 2020, pp.117894.
- [6]. Reddy, N.S., Lahoti, M. A succinct review on the durability of treated recycled concrete aggregates". *Environ Sci Pollut Res* (2022), <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18168-w>.
- [7]. QusaiAl-Waked, et. al., "Enhancing the aggregate impact value and water absorption of demolition waste coarse aggregates with various treatment methods", *Case Studies in Construction Materials*, Volume 17, 2022, e01267.
- [8]. Ashraf A.Bahraq, et. al. "A review on treatment techniques to improve the durability of recycled aggregate concrete: Enhancement mechanisms, performance and cost analysis", *Journal of Building Engineering*, Volume 55, 2022, pp. 104713.