NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG CÁT TỪ PHẾ THẢI KHAI THÁC KAOLIN CHO BÊ TÔNG HẠT NHỎ

UTILIZATION OF KAOLIN TAILING SAND FOR FINE-GRAINED CONCRETE

HOÀNG MINH ĐỨC[a,*], **LÊ PHƯỢNG LY**[a], **LÊ THUẬN AN**[a]
[a]Viện Khoa học công nghệ xây dựng
*Tác giả đại diện: Email: *hmduc@yahoo.com*
Ngày nhận 02/9/2026, Ngày sửa 22/9/2026, Chấp nhận 29/9/2026
https://doi.org/10.59382/j-ibst.2026.vi.vol3-6

Tóm tắt: *Với nguồn khoáng sản dồi dào, khai thác chế biến kaolin là lĩnh vực có triển vọng phát triển ở nước ta. Tuy nhiên, cùng với việc đẩy mạnh khai thác, chế biến sâu, các nhà máy cần quan tâm việc xử lý phế thải, nhất là tái sử dụng làm vật liệu xây dựng. Nghiên cứu này cho thấy, cát thu hồi từ phế thải khai thác kaolin khu vực Láng Đồng (Thạch Khoán) là loại cát thô có thể sử dụng làm bê tông hạt nhỏ. Tuy nhiên, tùy vào chế độ gia công, hàm lượng mica trong cát biến động trong khoảng rộng, ảnh hưởng đến chất lượng bê tông. Cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày của bê tông sử dụng cát phế thải có hàm lượng mica 11,3 % so với 0,45 %, khi lượng dùng xi măng tăng từ 120 kg/m³ đến 180 kg/m³, có thể suy giảm từ 27,4 % đến 50 %. Phế thải với hàm lượng mica cao chỉ nên sử dụng trong gạch bê tông hạt nhỏ mác đến M7,5. Để nâng cao chất lượng và hiệu quả kinh tế kỹ thuật của bê tông cần kiểm soát hàm lượng mica. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy có thể sử dụng cát từ phế thải khai thác kaolin cho bê tông cốt liệu nhỏ trong sản xuất gạch bê tông tạo hình bằng rung ép đạt mác từ M5 đến M10 với lượng dùng xi măng từ 130 kg/m³ đến 200 kg/m³.*

Từ khóa: *bê tông hạt nhỏ, cát từ phế thải khai thác kaolin, mica, cường độ chịu nén*

Abstract: *Given the abundance of mineral deposits, kaolin extraction and processing constitute a promising industrial sector in Vietnam. However, along with expanding extraction and deep processing, significant attention must be directed toward waste management, particularly the utilization of tailings as construction materials. This study demonstrates that sand recovered from kaolin mining waste in the Lang Dong (Thach Khoan) deposit is coarse sand suitable for use in fine-grained concrete. However, depending on the processing regime, the mica content in the recovered sand varies across a wide range, significantly affecting concrete performance. Specifically, as the cement content increases from 120 kg/m³ to 180 kg/m³, the 28-day compressive strength of concrete incorporating kaolin tailing sand with an 11.3% mica content decreases by 27.4% to 50.0% compared to that containing 0.45% mica. Tailling sands with high mica content should only be used in fine-grained concrete bricks with a strength grade of up to M7.5. Controlling the mica content is essential to improving the quality and techno-economic efficiency of the concrete. The results also confirm the feasibility of utilizing kaolin tailing sand as aggregate in fine-grained concrete to produce vibration-pressed concrete bricks with strength grades ranging from M5 to M10 at cement dosages from 130 kg/m³ to 200 kg/m³.*

Keywords: *fine-grained concrete, kaolin tailing sand, mica, compressive strength*

1. Mở đầu

Kaolin là nguồn tài nguyên khoáng sản quan trọng được sử dụng trong nhiều ngành công nghiệp sản xuất vật liệu như gốm sứ, vật liệu chịu lửa, giấy, sơn, cao su, polymer, cũng như trong công nghiệp hóa học, dược phẩm, mỹ phẩm và nông nghiệp. Với tổng trữ lượng toàn cầu ước tính đạt 32 tỷ tấn, trong đó Mỹ chiếm khoảng 8,2 tỷ tấn, Brazil 7,36 tỷ tấn, Trung Quốc 3 tỷ tấn, năm 2026 giá trị thị trường kaolin ước tính đạt 7,26 tỷ USD với tốc độ tăng trưởng hàng năm khoảng 3,7 % [1].

Nước ta cũng có nguồn khoáng sản kaolin khá dồi dào với tổng trữ lượng kaolin của 67 tụ khoáng, mỏ và điểm quặng đã được tìm kiếm thăm dò ở cấp 121+122+333 vào khoảng 267,92 triệu tấn, trong đó trữ lượng cấp 121+122 vào khoảng 69,16 triệu tấn. Kaolin nước ta chủ yếu tập trung ở Đông Bắc bộ, Trung Bộ và Tây Nguyên, có nguồn gốc phong hóa, trầm tích và nhiệt dịch. Trong đó, kaolin nguồn gốc phong hóa bao gồm kaolin trong vỏ phong hóa các thân pegmatit, các đá magma xâm nhập, các đá phun trào axit và hóa các trầm tích lục nguyên [2][3]. Việc

khai thác, chế biến và sử dụng kaolin đã được triển khai từ nhiều năm nay với sản lượng tăng từ khoảng 1,2 triệu tấn (năm 2013) lên đến 2,9 triệu tấn (năm 2020) và duy trì đều trong khoảng 2,5 triệu tấn đến trên 3 triệu tấn trong thời gian gần đây.

Mặc dù sản lượng khai thác hàng năm đạt hàng triệu tấn, ở Việt Nam chủ yếu vẫn là sản phẩm khai thác thô hoặc chỉ qua sơ chế (lọc rửa thủy lực để loại bỏ cát) nhằm phục vụ các ngành yêu cầu tiêu chuẩn trung bình. Ngược lại, đối với phân khúc kaolin chất lượng cao (đã qua nung - calcined kaolin, hoặc kaolin có độ trắng tuyệt đối trên 85% với hàm lượng sắt rất thấp) dùng trong sản xuất giấy cao cấp, sơn đặc chủng hay dược mỹ phẩm, thị trường trong nước vẫn thường xuyên phải nhập khẩu. Do đó, cơ hội phát triển, khai thác, chế biến kaolin trong thời gian tới là rất khả quan.

Trong quá trình chế biến, tùy theo hàm lượng kaolinit trong quặng nguyên khai (thường là từ khoảng 15 % đến 40 %), một lượng lớn chất thải rắn được hình thành và tích tụ. Đó là đất đá bóc bỏ, các loại cát thạch anh, fenspat đi kèm và bùn thải. Các loại phế thải này cần được xử lý một cách hợp lý để đảm bảo vấn đề môi trường và góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế xã hội. Kinh nghiệm trên thế giới cho thấy, phế thải khai thác kaolin có thể được sử dụng thay thế xi măng [4], thay thế cát tự nhiên trong bê tông xi măng [5], trong sản xuất viên xây [6][7], bê tông geopolimer [8] cũng như bê tông asphalt [9], làm chất hấp thụ [10], cũng như các ứng dụng khác.

Phế thải khai thác kaolin thường chứa các hạt với kích thước thuộc dải hạt cốt liệu nhỏ, chủ yếu bao gồm các hạt quartz, feldspat và các khoáng khác nên có khả năng sử dụng làm cốt liệu cho bê tông. Nghiên cứu sử dụng phế thải khai thác kaolin của nhà máy BHK Technology Co. Ltd tại Maoming, Trung Quốc thay thế cát tự nhiên [5] cho thấy tính chất cơ, lý của cát từ phế thải tương tự như cát sông nhưng hình dạng hạt góc cạnh hơn với các khoáng chủ yếu gồm quartz, gismondine và potasium calcium sulfate. Khi thay thế cát sông trong bê tông, cát từ phế thải khai thác cao lanh làm giảm tính công tác của vữa và bê tông nhưng lại cải thiện được cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi bửa. Tỷ lệ thay thế hợp lý nhất được xác định là ở mức 60 % và được giải thích là nhờ vào việc cải thiện vùng tiếp giáp giữa cốt liệu và đá xi măng.

Nghiên cứu tại Brasil với cốt liệu thu hồi từ phế thải khai thác kaolin tại Mineradora Brazil Mineiro [6] cho thấy các khoáng chủ yếu trong cốt liệu bao gồm quartz, muscovite và kaolinite. Nghiên cứu này đã sử dụng cốt liệu nhỏ từ phế thải kaolin thay thế một phần cát sông và cốt liệu từ phế thải xây dựng thay thế một phần cốt liệu lớn trong sản xuất gạch bê tông theo công nghệ rung ép. Kết quả cho thấy với tỷ lệ thay thế tổng ở mức 15 % cường độ sản phẩm đạt mức cao nhất ở mức 6,2 MPa, khi tăng tỷ lệ thay thế lên 35 %, cường độ sản phẩm có suy giảm nhưng vẫn đạt trên 4,0 MPa, đáp ứng yêu cầu đặt ra. Việc suy giảm cường độ ở đây được liên hệ với sự có mặt của các hạt muscovite với cường độ thấp.

Các nghiên cứu trên cho thấy thành phần của cốt liệu từ phế thải kaolin phụ thuộc nhiều vào đặc điểm quặng nguyên khai và công nghệ chế biến có thể biến động trong khoảng rộng, chứa các khoáng với độ cứng khác nhau. Hiệu quả và lượng dùng tối ưu của loại cốt liệu này phải được xác định thông qua kết quả nghiên cứu thử nghiệm thực tế.

Cho đến nay, mặc dù kaolin đã được khai thác nhiều năm ở nước ta nhưng phế thải khai thác thường được xử lý chôn lấp tại chỗ, chưa phát huy được hết tiềm năng của loại vật liệu này. Trong khi đó, các nguồn cát sông đang ngày càng cạn kiệt và bị hạn chế khai thác. Do đó, nghiên cứu này được Viện Chuyên ngành Bê tông thực hiện với mục tiêu sử dụng phế thải khai thác kaolin làm cốt liệu cho bê tông, bao gồm bê tông hạt nhỏ cho gạch bê tông rung ép, là hướng nghiên cứu giúp giải quyết đồng thời các vấn đề trên.

2. Vật liệu và phương pháp

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu bao gồm phế thải khai thác cao lanh tại khu mỏ Láng Đồng (Thạch Khoán), xã Thanh Sơn, tỉnh Phú Thọ. Theo các khảo sát trước đây, các thân kaolin khu vực này thường có dạng thấu kính, thấu kính phân nhánh kéo dài theo đường phương, có chiều sâu phong hóa từ vài mét đến khoảng 50 m, dày từ vài mét đến vài chục mét. Tại Thạch Khoán, thân kaolin trong vỏ phong hóa pegmatit có dạng mạch, thấu kính phình ra tóp vào, dạng phân nhánh phức tạp và có ranh giới rõ ràng với đá vây quanh. Chiều dài thay đổi từ vài chục mét đến hơn 1 km, rộng vài chục mét đến hơn 60 m, dày từ 10 m đến 50 m [2]. Đá vây quanh các thân pegmatit là các trầm tích biến chất bao gồm chủ yếu là đá phiến thạch anh 2 mica, đá phiến mica, thạch

anh có storolit, disten, silimanit và granat xen kẹp một lượng nhỏ các thấu kính quarzit mica, quarzit manhetit và các đá amphibolit, granitogonei. Thân pegmatit có chứa kaolinite, thạch anh, hydromica, feldspat, muscovite,... Kaolin phong hóa từ pegmatit có màu trắng, trắng xám phớt vàng, vàng có thành phần Al_2O_3 từ 21,3 % đến 36,0 %, SiO_2 từ 46,7 % đến 59,7 % và Fe_2O_3 từ 0,3 % đến 1,3 %. Độ thu hồi qua sàng 0,21 mm từ 20,9% đến 44,5%, trung bình 31,8%. Mẫu công nghệ tuyển cho độ thu hồi qua sàng 0,063 mm đạt trên 25,4%. Kaolin thu hồi sau tuyển có chất lượng tốt, đáp ứng được yêu cầu cao lanh cho sản xuất men sứ. Felspat trong pegmatit Láng Đồng có chất lượng khá tốt, tỷ lệ thu hồi từ 34,9% đến 39,7%, trung bình 37,4%. Hàm lượng các oxít đáp ứng yêu cầu làm nguyên liệu cho sản xuất xương gốm sứ, nếu được tuyển kỹ có thể làm nguyên liệu sản xuất men. Thành phần hạt của nguyên liệu chủ yếu nhỏ hơn 5 mm với tỷ lệ mica biến động. Với tỷ lệ thu hồi kaolin khoảng 30 %, lượng phế thải khai thác kaolin ở đây tích lũy qua nhiều năm là khá lớn.

Để thực hiện nghiên cứu đã lấy mẫu phế thải tại hai điểm mỏ ký hiệu M1 và M2 và chuyển về Phòng thí nghiệm LAS-XD 03. Tính chất của cát từ phế thải kaolin được trình bày chi tiết ở mục 3.

Trong nghiên cứu đã sử dụng hai loại xi măng bao gồm xi măng PCB30 của nhà máy xi măng Quan Sơn và xi măng PCB40 của nhà máy xi măng Bút Sơn. Tính chất của xi măng đáp ứng yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 6260:2020 "Xi măng pooc lăng hỗn hợp - Yêu cầu kỹ thuật" và được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. *Tính chất của xi măng sử dụng trong nghiên cứu*

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị ứng với	
			PCB30	PCB40
1	Khối lượng riêng	g/cm³	3,10	3,05
2	Bề mặt riêng	g/cm²	3620	3550
3	Sót trên sàng 0,045 mm	%	3,1	1,3
4	Độ dẻo tiêu chuẩn	%	28	29,5
5	Thời gian đông kết - bắt đầu - kết thúc	min	 135 195	 160 235
6	Cường độ chịu uốn ở tuổi - 3 ngày - 28 ngày	MPa	 4,2 7,5	 7,3 10,1
7	Cường độ chịu nén ở tuổi - 03 ngày - 28 ngày	MPa	 17,6 33,7	 31,5 51,4

Trong nghiên cứu, cốt liệu thu hồi từ phế thải khai thác kaolin được đánh giá theo TCVN 7570:2006 "Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật", TCVN 9205:2012 "Cát nghiền cho bê tông và vữa" dựa trên các kết quả thử nghiệm theo bộ tiêu chuẩn phương pháp thử hiện hành TCVN 7572:2006 "Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử".

Các mẫu bê tông hạt nhỏ được trộn trong máy trộn dung tích 50 L và được tạo hình theo hai chế độ bao gồm đầm rung và rung ép. Mẫu thí nghiệm các tính chất cơ lý có kích thước 40x40x160 mm. Khi tạo hình bằng đầm rung, hỗn hợp được điền đầy vào khuôn với độ dư nhất định. Dùng tấm thép chèn trên bề mặt và đặt lên bàn rung. Rung tới khi bề mặt nổi hồ. Sau khi rung xong, gạt bỏ phần hỗn hợp thừa và làm mặt mẫu.

Khi tạo hình bằng rung ép, trước tiên lắp bộ gá vào khuôn để tạo thành vách. Điền đầy khuôn và 1/2 chiều cao bộ gá. Đặt vật nặng lên trên bề mặt hỗn hợp trong khuôn để tạo lực ép. Sau đó, đặt cả bộ khuôn, gá đỡ đã điền đầy hỗn hợp và chèn vật nặng lên bàn rung. Rung trên bàn rung cho tới khi khe giữa bộ gá và quả nặng xuất hiện hồ. Sau khi rung, gỡ vật nặng và bộ gá, gạt bỏ phần hỗn hợp thừa và làm mặt mẫu.

Sau từ một đến hai ngày giữ mẫu trong khuôn, tiến hành dỡ khuôn. Mẫu được bảo quản trong điều kiện phòng đến thời điểm thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ lý. Tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông hạt nhỏ được xác định theo bộ tiêu chuẩn TCVN 3121:2022 "Vữa xây dựng - Phương pháp thử".

3. Đặc tính của cát từ phế thải khai thác kaolin

Sau khi khai thác, quặng nguyên liệu được tuyển để lấy kaolin theo sơ đồ công nghệ với các công đoạn chính như sau:

- Chuẩn bị nguyên liệu với độ ẩm quặng nguyên khai không lớn hơn 15 %, quặng được đập đến cỡ hạt nhỏ hơn 5 mm;

- Đánh tơi, chà sát nguyên liệu đã qua sàng để giải phóng kaolin ra khỏi các liên kết khoáng vật quặng;

- Phân cấp tách sạn sỏi và cát thô lớn hơn 0,15 mm;

- Phân cấp xyclon thủy lực hai giai đoạn để tách cát mịn từ 0,15 mm đến 0,045 mm;

- Tuyển từ ướt có gradien từ cao để tách sắt;

- Cô đặc và lọc ép lấy sản phẩm kaolin có độ ẩm từ 25 % đến 28 %;

- Tạo khuôn và sấy khô sản phẩm kaolin tinh đến độ ẩm 10 %;

Các mẫu cốt liệu thu được từ phế thải khai thác kaolin có kích thước chủ yếu nhỏ hơn 5 mm thuộc nhóm cốt liệu nhỏ (cát) chứa các hạt thạch anh, feldspat, mica,... Thí nghiệm tại phòng được thực hiện trên các mẫu cốt liệu sau:

- C1.1: mẫu quặng kaolin đợt 1 khai thác tại điểm mỏ M1 chưa qua xử lý. Mẫu này sau đó được gia công lọc tách kaolin tại phòng thí nghiệm thu được mẫu C1.1a;

- C1.2: mẫu quặng kaolin đợt 2 khai thác tại điểm mỏ M1 chưa qua xử lý. Mẫu này sau đó được gia công lọc tách kaolin tại phòng thí nghiệm thu được mẫu C1.2a;

- C1.3: mẫu phế thải khai thác kaolin lấy tại điểm mỏ M1;

- C1.4: mẫu phế thải khai thác kaolin đã qua lọc tách kaolin tại điểm mỏ M1;

- C2.1: mẫu phế thải khai thác kaolin đã qua lọc tách kaolin tại điểm mỏ M2.

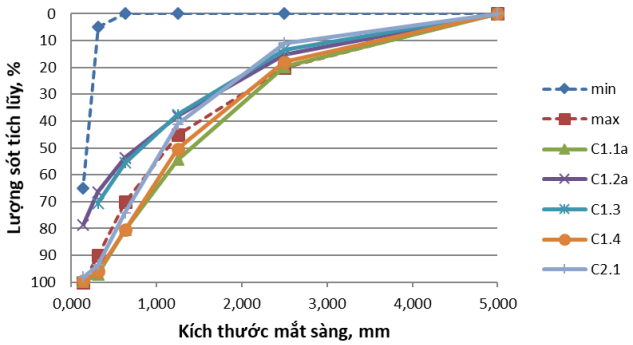
Phân tích thành phần hạt của các mẫu cát trình bày ở Bảng 2 và được biểu diễn trên biểu đồ tại Hình 1, các tính chất vật lý và hàm lượng tạp chất được trình bày tại Bảng 3.

Bảng 2. *Thành phần hạt của cát từ phế thải khai thác kaolin*

Sàng với kích thước lỗ sàng, mm	Lượng sót sàng, % với mẫu									
	C1.1a		C1.2a		C1.3		C1.4		C2.1	
	sót riêng	tích lũy	sót riêng	tích lũy	sót riêng	tích lũy	sót riêng	tích lũy	sót riêng	tích lũy
5	10,5	-	15,1	-	5,3	-	11,1	-	7,3	_
2,5	19,7	19,7	15,2	15,2	0,0	0,0	18,0	18,0	11,0	11,0
1,25	34,7	54,4	22,9	38,1	13,3	13,3	32,4	50,4	30,2	41,2
0,63	26,2	80,6	15,6	53,7	24,3	37,6	30,1	80,5	33,0	74,2
0,315	16,5	97,1	12,7	66,4	18,0	55,6	15,5	96,0	19,4	93,6
0,14	2,7	99,8	12,2	78,6	14,9	70,5	3,5	99,5	4,5	98,1
đáy sàng	0,2	100	21,4	100	29,5	100	0,5	100	1,9	100

Kết quả phân tích thành phần hạt cho thấy, các mẫu cát có thành phần hạt biến động trong khoảng rộng, phụ thuộc vào quá trình xử lý lọc tách kaolin và sàng rửa. Tỷ lệ hạt lớn hơn 5 mm trong các mẫu có giá trị từ 7,3 % đến 15,1 %. Với tỷ lệ này, để làm vữa xây dựng, cần tiến hành sàng loại bỏ bớt các hạt lớn hơn 5 mm. Tuy nhiên, để làm bê tông hạt nhỏ, tỷ lệ này có thể chấp nhận nếu thí nghiệm cho kết quả đạt yêu cầu.

Quy trình lọc tách kaolin ảnh hưởng lớn đến tỷ lệ hạt nhỏ hơn 0,14 mm. Với mẫu C1.3 chưa qua lọc tách hàm lượng hạt nhỏ hơn 0,14 mm lên đến 29,5 %. Sau khi lọc tách trong phòng thí nghiệm, mẫu lấy đợt 2 C1.2a cho tỷ lệ hạt nhỏ hơn 0,14 mm là 21,4 %. Tuy nhiên với mẫu lấy đợt 1 sau khi gia công lọc tách, hàm lượng hạt nhỏ hơn 0,14 mm trong mẫu C1.1a chỉ còn 0,2 %. Điều đáng chú ý là các mẫu đã qua dây chuyền lọc tách tại khu vực khai thác, tỷ lệ hạt nhỏ hơn 0,14 mm chỉ còn khoảng từ 0,5 % đến 1,9 %. Điều này cho thấy, quy trình áp dụng hiện nay cho phép thu được cát có hàm lượng hạt nhỏ hơn 0,14 mm đáp ứng yêu cầu tiêu chuẩn.



Hình 1. *Biểu đồ thành phần hạt*

Các loại cát trong nghiên cứu có mô đun độ lớn từ 1,8 đến 3,5. Mẫu C1.3 có mô đun độ lớn ở mức 1,8 thuộc loại cát mịn do chưa qua tuyển rửa nên chứa hàm lượng hạt nhỏ hơn 0,14 mm cao. Các mẫu còn lại đều có mô đun độ lớn trên 2,0 và được phân loại là cát thô. Các mẫu cát C1.2a, C1.3 có thành phần hạt theo các sàng đáp ứng hoàn toàn yêu cầu quy định trong TCVN 7572:2006, cũng như trong TCVN 9205:2012. Mẫu C1.1a, C1.4 và C2.1 về cơ bản đáp ứng được yêu cầu, lượng sót riêng trên mỗi sàng có giá trị lớn nhất là 32,7 % vẫn nhỏ hơn giá trị giới hạn quy định trong TCVN 9205:2012 là 45 %, nhưng thành phần hạt tích lũy trên sàng 1,25 mm, 0,63 mm và 0,315 mm lớn hơn so với yêu cầu với mức chênh lệch khoảng từ 3,6 % đến 9,4 %. Mức chênh lệch này có thể hạn chế được bằng cách sàng tách hoặc phối hợp các nguồn khác nhau. Cũng cần lưu ý rằng các quy định trong TCVN 7570:2006 và TCVN 9205:2012 áp dụng cát cho bê tông đặc chắc thông thường. Với bê tông hạt nhỏ, các loại cát này có thể sử dụng trực tiếp nếu các kết quả thử nghiệm cho thấy bê tông đạt yêu cầu.

Bảng 3. *Tính chất của cát từ phế thải khai thác kaolin*

Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị với mẫu				
		C1.1a	C1.2a	C1.3	C1.4	C2.1
Khối lượng riêng	g/cm³	2,63	2,63	2,61	2,63	2,65
Khối lượng thể tích bão hòa	g/cm³	2,58	2,61	2,59	2,61	2,53
Khối lượng thể tích khô	g/cm³	2,56	2,59	2,57	2,59	2,46
Độ hút nước	%	1,0	0,6	0,5	0,8	2,9
Khối lượng thể tích xốp	kg/m³	1330	1320	1220	1360	1340
Độ hổng	%	48	49	53	48	46
Lượng hạt lớn hơn 5mm	%	10,5	15,1	5,3	11,1	7,3
Môđun độ lớn	-	3,5	2,5	1,8	3,4	3,2
Hàm lượng bùn, bụi, sét	%	2,9	3,5	13,5	3,2	3,6
Hàm lượng sét cục	%	0	0	0	0	0
Hàm lượng mica	%	11,3	10,9	1,3	2,4	0,45

Khối lượng riêng của cát phế thải ở điểm mỏ M1 nằm trong khoảng từ 2,61 g/cm³ đến 2,63 g/cm³, khối lượng thể tích khô nằm trong khoảng 2,56 g/cm³ đến 2,59 g/cm³. Độ hút nước từ 0,5% đến 1,0%. Mẫu cát ở điểm mỏ M2 có khối lượng riêng 2,65 g/cm³, khối lượng thể tích khô 2,46 g/cm³, độ hút nước 2,9%. Sự khác biệt có thể do thành phần khoáng vật của cát phế thải ở hai điểm mỏ có sự khác biệt. Khối lượng thể tích xốp của cát phế thải nằm trong khoảng từ 1220 kg/m³ đến 1340 kg/m³, độ hổng của cát từ 46% đến 53%.

Cát từ phế thải đã qua quá trình chà sát, lọc nên không chứa sét cục, tuy nhiên hàm lượng bùn, bụi, sét của mẫu C1.3 lên đến 13,5 %. Sau khi qua sàng rửa, hàm lượng bùn, bụi, sét giảm từ 2,9 % đến 3,6 %. Giá trị này vẫn vượt so với quy định đối với bê tông thông thường. Với bê tông hạt nhỏ, hàm lượng hạt mịn này có thể được coi như phụ gia trơ bổ sung vào thành phần chất kết dính nhằm nâng cao tỷ lệ hồ xi măng trong bê tông.

Một trong những đặc điểm của cát từ phế thải khai thác kaolin là hàm lượng mica khá lớn, có giá trị từ 0,45 % với mẫu C2.1 lên đến 11,3 % ở mẫu C1.1a. Mica là một trong các khoáng hình thành đồng thời trong quá trình biến chất của khối đất đá ban đầu. Trong các mẫu cát, mica có dạng các phiến mỏng kích thước tới 2,5 mm. Các phiến mica này kém bám dính với đá xi măng, do đó, sự hiện diện của mica trong bê tông có thể làm giảm sự liên tục, đồng đều của cấu trúc. Tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 không giới hạn hàm lượng mica, tuy nhiên tiêu chuẩn trước đây TCVN 1770:1986 "Cát xây dựng - Yêu cầu kĩ

thuật" có quy định hàm lượng mica theo khối lượng trong cát không được lớn hơn 1,5 % khi dùng cho bê tông mác nhỏ hơn M100, và không được lớn hơn 1 % khi dùng cho bê tông mác trên M150.

Các nghiên cứu về ảnh hưởng của hàm lượng mica trên thế giới đã được thực hiện từ khá sớm và cho các kết quả khá phân tán. Một mặt, theo Dewar J.D. [11] cường độ bê tông có thể giảm tới 5 % khi hàm lượng mica tăng 1 %, hay theo nghiên cứu của Xing J. Q. với cát nghiền [12] khi tăng hàm lượng mica, cường độ bê tông giảm đáng kể ở tuổi 28 ngày và 60 ngày. Nghiên cứu gần đây [13] cũng cho thấy khi hàm lượng mica trong cát vượt quá 6 %, cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày của vữa và bê tông có thể suy giảm tới 22,3 % và 33,5 %. Khi sử dụng chất liên kết silane (dạng Y-R-Si(OR)$_3$, trong đó Y là nhóm chức hữu cơ và SiOR là nhóm silanoxy) với lượng dùng khoảng 50 % khối lượng mica thì cường độ chịu nén của vữa ở tuổi 28 ngày tăng khoảng 10,9 %.

Tuy nhiên, ở góc độ ngược lại, theo Ken W. Day [14], ngoại trừ với bê tông cường độ cao, lượng mica tới 5 % không trực tiếp làm suy giảm đáng kể cường độ vữa. Vấn đề chính yếu ở đây là mica làm tăng lượng nước yêu cầu của hỗn hợp bê tông. Trong nghiên cứu của Muller O.H., ảnh hưởng của mica trong cát đến tính chất của bê tông được cho là phụ thuộc vào bản chất của mica hơn là hàm lượng của chúng. Mica dạng biotite (mica đen) với hàm lượng đến 10 % hay thậm chí 15 % chủ yếu ảnh hưởng đến lượng cần nước mà ít ảnh hưởng đến cường độ chịu nén, nhưng mica dạng muscovite (mica trắng) chỉ với hàm lượng 3 % có ảnh hưởng tiêu cực rõ ràng đến cả tính công tác và cường độ chịu nén [15]. Nghiên cứu tiếp theo của Danielsen S.W. [16] cho thấy mica kích thước nhỏ và chưa phong hóa có ảnh hưởng tiêu cực hơn đến tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông so với mica đã qua quá trình phong hóa.

Phân tích các tài liệu nêu trên cho thấy ảnh hưởng của mica phụ thuộc vào nhiều yếu tố bao gồm nguồn gốc, mức độ phong hóa, kích thước và các yếu tố khác. Khả năng sử dụng cốt liệu có hàm lượng mica cao cần được đánh giá thông qua các thí nghiệm thực tế. Nghiên cứu tiếp theo này tập trung vào việc đánh giá tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông sử dụng cát phế thải từ khai thác kaolin với lượng mica khác nhau để đưa ra các khuyến cáo khi áp dụng.

4. Bê tông hạt nhỏ sử dụng cốt liệu từ phế thải khai thác kaolin

Nghiên cứu ảnh hưởng của cát từ phế thải khai thác kaolin tới tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông hạt nhỏ được thực hiện với cát C1.1a và C2.1 với hàm lượng mica tương ứng 11,3 % và 0,45 %, môđun độ lớn 3,5 và 3,2. Thành phần bê tông trong nghiên cứu được lựa chọn với các tỷ lệ C/X và N/X khác nhau để thu được hỗn hợp bê tông phù hợp cho sản xuất gạch bê tông theo công nghệ đầm rung và rung ép. Trong thí nghiệm, để hướng tới mục tiêu chế tạo gạch bê tông mác M5 đến M10 đã chủ động lựa chọn xi măng phù hợp. Với cát C2.1 đã sử dụng xi măng PCB30 có cường độ thực tế 33,7 MPa còn với cát C1.1a đã sử dụng xi măng PCB40 có cường độ thực tế 51,4 MPa. Thành phần và tính chất bê tông được trình bày tại Bảng 4. Trong đó, các thành phần từ B1 đến B4 được thiết kế để đạt độ lưu động theo phương pháp bàn dằn trong khoảng từ 110 mm đến 140 mm phù hợp với phương pháp tạo hình bằng đầm rung. Hỗn hợp bê tông theo các thành phần còn lại được lựa chọn để có độ cứng khoảng từ 10 s đến 30 s phù hợp với phương pháp tạo hình rung ép. Cấp phối B17 và B18 có sử dụng phụ gia điều chỉnh độ nhớt gốc cellulo với lượng dùng 0,1 % khối lượng xi măng.

Bảng 4. *Thành phần và tính chất bê tông*

Cấp phối	Loại vật liệu		Lượng dùng, kg/m³			Khối lượng thể tích, kg/m³	Cường độ, MPa ở tuổi		Độ hút nước, %
	Xi măng	Cát	Xi măng	Cát	Nước		7 ngày	28 ngày	
B1	X1	C2.1	191	1403	255	1850	2,6	4,0	7,8
B2	X1	C2.1	200	1469	200	1870	4,7	7,5	9,1
B3	X1	C2.1	228	1427	205	1860	5,2	8,1	8,3
B4	X1	C2.1	253	1434	203	1890	6,6	10,2	8,8
B5	X1	C2.1	106	1638	106	1850	2,8	4,3	10,4
B6	X1	C2.1	133	1614	133	1880	3,5	5,3	8,4
B7	X1	C2.1	163	1594	163	1920	6,1	9,8	8,3
B8	X1	C2.1	194	1549	167	1910	7,6	13,8	8,2
B9	X1	C2.1	154	1529	137	1820	6,2	9,4	9,6
B10	X1	C2.1	168	1550	132	1850	6,7	10,3	9,2
B11	X2	C1.1a	86	1608	86	1780	3,8	4,3	9,2
B12	X2	C1.1a	111	1630	89	1830	4,0	4,5	10,3

Cấp phối	Loại vật liệu		Lượng dùng, kg/m³			Khối lượng thể tích, kg/m³	Cường độ, MPa ở tuổi		Độ hút nước, %
	Xi măng	Cát	Xi măng	Cát	Nước		7 ngày	28 ngày	
B13	X2	C1.1a	131	1616	93	1840	4,1	6,0	10,1
B14	X2	C1.1a	153	1525	132	1810	5,9	7,8	9,8
B15	X2	C1.1a	165	1522	143	1830	6,5	8,7	9,5
B16	X2	C1.1a	184	1500	146	1830	6,8	9,4	9,3
B17	X2	C1.1a	108	1537	245	1890	5,4	6,2	7,5
B18	X2	C1.1a	178	1493	239	1910	7,7	10,6	7,1

Các kết quả tại Bảng 4 cho thấy lượng nước trộn có ảnh hưởng trực tiếp đến tính công tác của hỗn hợp bê tông. Để hỗn hợp bê tông đạt độ dẻo cần thiết, cần sử dụng lượng nước trên 200 kg/m³. Hỗn hợp bê tông có độ cứng được chế tạo với lượng nước sử dụng từ khoảng 90 kg/m³ đến 150 kg/m³.

Tính công tác của hỗn hợp bê tông không những phụ thuộc vào lượng nước trộn mà còn phụ thuộc vào lượng và tính chất của hồ xi măng. Với các hỗn hợp có độ dẻo, thể tích hồ xi măng nằm trong khoảng từ 265 l/m³ đến 317 l/m³, còn các hỗn hợp có độ cứng, do lượng nước trộn giảm mạnh nên thể tích hồ có thể chỉ còn khoảng 120 l/m³. Điều này ảnh hưởng lớn đến cấu trúc của bê tông. Rõ ràng rằng, khi đó thể tích hồ xi măng không đủ để lấp đầy khoảng trống giữa các hạt cốt liệu. Cấu trúc bê tông sẽ bao gồm các lỗ hổng giữa các hạt cốt liệu, độ rỗng tăng khiến độ hút nước tăng.

Một biện pháp để cải thiện cấu trúc bê tông là sử dụng phụ gia điều chỉnh độ nhớt. Khi đó, lượng nước trộn để đạt cùng tính công tác cần tăng thêm khiến, một mặt, cường độ của đá xi măng suy giảm do tỷ lệ xi măng trên nước (X/N) giảm, mặt khác tổng thể tích hồ xi măng lại gia tăng đáng kể giúp giảm được độ rỗng giữa các hạt. Hỗn hợp bê tông có mức độ liên kết tốt hơn.

Tỷ lệ X/N có ảnh hưởng lớn đến cường độ bê tông thông qua cường độ đá xi măng. Với bê tông hạt nhỏ cần xem xét mối quan hệ này trong tương quan với tỷ lệ cát trên xi măng (C/X) do đôi khi lượng hồ xi măng không đủ để lấp đầy độ hổng giữa các hạt cốt liệu. Với các thành phần có tỷ lệ C/X gần tương đương như B1 và B2 ở mức 7,3 khi tỷ lệ X/N tăng từ 0,75 đến 1,25 thì cường độ chịu nén tăng từ 4,0 MPa lên 7,5 MPa. Tuy nhiên, thành phần B2 có độ hút nước ở mức 9,1 % cao hơn thành phần B1 ở mức 7,8 %. Điều này có thể giải thích là do thành phần B2 có độ hổng giữa hạt cao hơn do tổng thể tích hồ xi măng thấp hơn so với thành phần B1.

Với các thành phần B7 và B9 có tỷ lệ C/X ở mức 9,8 và 9,9 thì khi tăng tỷ lệ X/N từ 1,0 lên 1,12 cường độ bê tông không thay đổi đáng kể. Ở đây, mặc dù tỷ lệ X/N tăng nhưng do giảm lượng nước trộn nên thể tích hồ xi măng trong thành phần B9 giảm so với thành phần B7. Điều này khiến độ hút nước của bê tông tăng từ 8,3 % lên đến 9,6 %. Độ rỗng tăng cũng khiến cho cường độ bê tông không được cải thiện mặc dù cường độ đá xi măng tăng do tăng tỷ lệ X/N. Với cùng tỷ lệ C/X để tăng X/N cần phải giảm lượng nước trộn. Nếu tính đến khối lượng riêng của xi măng và nước thì điều này sẽ khiến thể tích hồ xi măng suy giảm. Ảnh hưởng này đến cường độ phụ thuộc nhiều vào cấu trúc và giảm dần khi cấu trúc trở nên liên tục.

Tỷ lệ C/X trong các thành phần nghiên cứu biến động trong khoảng rộng, từ 5,7 đến 18,7. Nhìn chung khi giảm tỷ lệ C/X, cường độ bê tông hạt nhỏ được cải thiện, kể cả trong một số trường hợp khi thể tích vữa giảm. Các thành phần B5, B6, B7 có cùng tỷ lệ X/N bằng 1 nhưng tỷ lệ C/X giảm từ 15,5 xuống 9,8. Khi đó cường độ bê tông từ 4,3 MPa đã tăng lên đến 9,8 MPa, đồng thời độ hút nước cũng có xu hướng giảm. Thành phần B14 và B15 cũng có cùng tỷ lệ X/N nhưng tỷ lệ C/X ở thành phần B15 là 9,2 so với 10,0 ở thành phần B14. Cường độ chịu nén của bê tông cũng có xu hướng tăng nhẹ từ 7,8 MPa lên 8,7 MPa. Giữ nguyên tỷ lệ X/N và giảm C/X đồng nghĩa với việc tăng cả lượng dùng xi măng và nước. Điều này rõ ràng làm tăng mật độ thể tích hồ xi măng cùng mức chất lượng, do đó cải thiện được cấu trúc và cường độ bê tông.

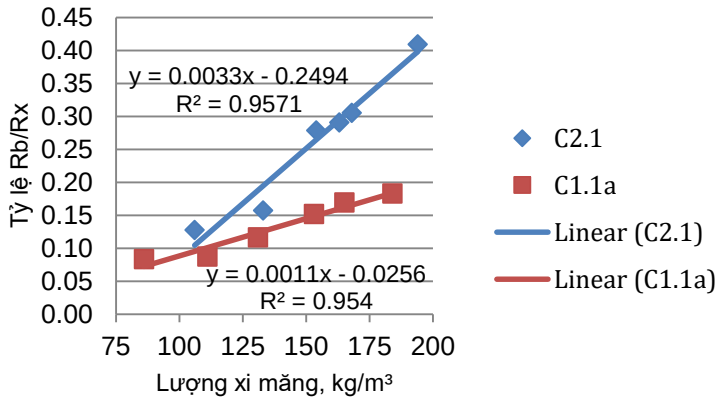
Trong các thành phần từ B11 đến B16, tăng lượng dùng xi măng sẽ đồng thời khiến tỷ lệ X/N tăng và tỷ lệ C/X giảm. Kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ bê tông không ngừng được cải thiện, tăng từ 4,3 MPa lên đến 9,4 MPa.

Trong thành phần B17 và B18 đã sử dụng phụ gia điều chỉnh độ nhớt gốc cellulo với hàm lượng 0,1 % lượng dùng xi măng. Do cellulor có tính ưa nước, giữ các phân tử nước quanh mạch polymer thông qua liên kết hydro, làm giảm lượng nước tự do trong hệ. Khi sử dụng phụ gia cellulor, để giữ nguyên tính công tác, cần tăng đáng kể lượng nước trộn của hỗn hợp bê tông lên đến khoảng 240 l/m³. Nhờ đó, thể tích hồ trong hỗn hợp bê tông được nâng lên đến trên 280 l/m³. Khi đó, mặc dù tỷ lệ X/N của các cấp phối giảm xuống còn 0,44 và 0,73 nhưng cường độ bê

tông vẫn đạt giá trị 6,2 MPa và 10,6 MPa. Trong khi đó, thành phần bê tông có tỷ lệ C/X tương đương là B12 và B16 với tỷ lệ X/N là 1,25 và 1,26 có cường độ 4,5 MPa và 9,4 MPa. Một điểm đáng chú ý là khi đó, mặc dù lượng nước trộn tăng mạnh nhưng độ hút nước của bê tông lại giảm chỉ còn trên 7 %.

Kết quả nghiên cứu cho thấy, có thể chế tạo bê tông hạt nhỏ cho gạch bê tông đạt mác từ M5 đến M10 tạo hình bằng rung ép với lượng dùng xi măng từ 130 kg/m³ đến 200 kg/m³. So sánh các thành phần tạo hình bằng đầm rung (B1-B4) và tạo hình bằng rung ép (B5-B18) cho thấy, khi thay đổi phương pháp tạo hình đã chuyển từ sử dụng hỗn hợp bê tông có độ dẻo sang hỗn hợp bê tông có độ cứng. Qua đó giảm lượng nước trộn và lượng dùng xi măng. Với phương pháp đầm rung, để đạt được cường độ trên 7,5 MPa cần sử dụng lượng xi măng trên 200 kg/m³. Còn khi sử dụng phương pháp rung ép, lượng dùng xi măng để bê tông đạt cường độ 7,5 MPa chỉ khoảng 150 kg/m³. Qua đây có thể thấy, để sản xuất vật liệu xây không nung từ cát phế thải, sử dụng biện pháp tạo rung ép có thể tiết kiệm khoảng 25 % lượng dùng xi măng, nâng cao hiệu quả kinh tế kỹ thuật.

Ảnh hưởng của hàm lượng mica được đánh giá trên cơ sở so sánh kết quả thí nghiệm bê tông có độ cứng sử dụng mẫu cát C2.1 và C1.1a (B5 đến B10 với cát C2.1 và B11 đến B16 với cát C1.1a). Đồ thị tương quan giữa tỷ lệ cường độ bê tông trên cường độ xi măng ở tuổi 28 ngày và lượng dùng xi măng được trình bày tại Hình 2.



Hình 2. *Tương quan giữa lượng dùng xi măng và tỷ lệ cường độ bê tông trên cường độ xi măng*

Dựa trên kết quả thí nghiệm đã tính toán phương trình hồi quy tuyến tính mô tả quan hệ giữa tỷ lệ cường độ bê tông trên cường độ xi măng ở tuổi 28 ngày với lượng dùng xi măng, có dạng như sau:

- với cát C2.1:

$$R_{b,C2.1} / R_x = 0,0033 \times X - 0,2494 \quad (1)$$

- với cát C1.1a:

$$R_{b,C1.1a} / R_x = 0,0011 \times X - 0,0256 \quad (2)$$

Hệ số xác định R^2 của hai phương trình trên đều có giá trị lớn hơn 0,95 cho thấy mô hình phù hợp tốt với dữ liệu thực tế. Tính toán theo phương trình hồi quy với lượng dùng xi măng lần lượt là 120 kg/m³, 150 kg/m³ và 180 kg/m³ cho thấy với cát C2.1 tỷ lệ cường độ bê tông trên cường độ xi măng tương ứng bằng 0,1466, 0,2456 và 0,3446. Tỷ lệ này với cát C1.1a tương ứng bằng 0,1064, 0,1394 và 0,1724. Điều này có nghĩa là với cùng loại và lượng xi măng, việc sử dụng cát C1.1a với hàm lượng mica 11,3 % làm giảm đáng kể cường độ bê tông hạt nhỏ so với khi dùng cát C2.1 với hàm lượng mica 0,45 %. Mức độ suy giảm cường độ phụ thuộc vào cường độ bê tông hay lượng dùng xi măng, với lượng dùng xi măng từ 120 kg/m³ đến 180 kg/m³, mức độ suy giảm cường độ tương ứng là từ 27,4 % đến 50 %.

Mica là khoáng vật dạng phiến và không bám dính với đá xi măng. Do đó, ngoài việc mica làm tăng lượng nước trộn và ảnh hưởng đến cường độ thì sự có mặt của mica trong cấu trúc cũng hình thành những khu vực gián đoạn, có mức độ liên kết kém. Các khu vực này có thể trở thành các vị trí phát sinh nứt khi bê tông làm việc dưới tải trọng. Điều này có thể giải thích là do kaolin tại Láng Đồng hình thành từ phong hóa pegmatit chứa muscovite [2]. Kết quả này về mica muscovite cũng phù hợp với các nghiên cứu trước đây của Batos F. [6] và Muller O.H. [15].

Kết quả tại Bảng 4 cho thấy, với cát C1.1a, khi sử dụng PCB40 với lượng dùng từ 131 kg/m³ đến 184 kg/m³ cường độ bê tông có thể đạt từ 5,3 MPa đến 13,8 MPa còn với cát C2.1, khi sử dụng PCB30 với lượng dùng từ 133 kg/m³ đến 194 kg/m³ cường độ bê tông có thể đạt từ 6,0 MPa đến 9,4 MPa. Qua đây, có thể thấy, để nâng cao hiệu quả sử dụng xi măng trong bê tông, cải thiện hiệu quả kinh tế kỹ

thuật của sản phẩm thì cần kiểm soát lượng mica trong cát phế thải. Phế thải với hàm lượng mica cao như cát C1.1a chỉ nên sử dụng trong gạch bê tông cốt liệu nhỏ với mác đến M7,5.

5. Kết luận

Dựa trên kết quả nghiên cứu trình bày trong bài báo này có thể kết luận một số nội dung sau:

- Với trữ lượng lớn, nước ta có tiềm năng phát triển ngành khai thác chế biến kaolin. Tuy nhiên, cùng với việc đẩy mạnh khai thác, chế biến sâu, các nhà máy cần quan tâm việc xử lý phế thải. Trong đó, một trong những giải pháp có triển vọng là sử dụng cát từ phế thải cao lanh làm bê tông cốt liệu nhỏ cho sản xuất gạch bê tông theo phương pháp rung ép;

- Nghiên cứu phế thải khai thác kaolin khu vực Láng Đồng (Thạch Khoán) cho thấy sau khi xử lý tuyển kaolin bằng phương pháp lọc rửa, cát thu được có thành phần hạt thuộc nhóm cát thô bao gồm các khoáng chính là thạch anh, feldspat. Tỷ lệ mica trong cát từ phế thải khai thác kaolin biến động trong khoảng từ 0,45 % đến 11,3 % phụ thuộc vào quặng nguyên khai và chế độ tuyển rửa;

- Tính công tác và cường độ của bê tông cốt liệu nhỏ chịu ảnh hưởng của thể tích hồ xi măng. Theo đó, sử dụng phụ gia điều chỉnh độ nhớt mặc dù làm tăng lượng nước trộn, giảm tỷ lệ X/N, nhưng cường độ bê tông vẫn tăng do thể tích hồ xi măng tăng đáng kể. Có thể chế tạo bê tông cốt liệu nhỏ cho gạch bê tông mác M5 đến M10 tạo hình bằng rung ép với lượng dùng xi măng từ 130 kg/m³ đến 200 kg/m³;

- Hàm lượng mica trong cát có ảnh hưởng lớn đến cường độ bê tông. Cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày của bê tông sử dụng cát phế thải có hàm lượng mica 11,3 % so với 0,45 % khi lượng dùng xi măng tăng từ 120 kg/m³ đến 180 kg/m³ có thể suy giảm từ 27,4 % đến 50 %. Phế thải với hàm lượng mica cao chỉ nên sử dụng trong gạch bê tông cốt liệu nhỏ mác đến M7,5. Để nâng cao chất lượng và chỉ tiêu kinh tế kỹ thuật của bê tông cốt liệu nhỏ cần kiểm soát hàm lượng mica trong cát phế thải.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Insights Business Research (2026), *"Kaolin clay market size, share, growth, and industry analysis, by type (calcined, water-washed, surface-modified), by application (paper, ceramics, fiberglass, paints & coatings, rubber, plastics, others), and regional forecast 2026–2035".*

[2] Đ. T. Lê (2016), *"Đánh giá tiềm năng khoáng sản kaolin vùng bắc bộ Việt Nam và định hướng sử dụng. Luận án Tiến sĩ địa chất"*, Trường Đại học Mỏ địa chất.

[3] Đ. T. Lê, P. Nguyễn và T. T. Nguyễn (2008), *"Tiềm năng kaolin Việt Nam và định hướng công tác thăm dò, khai thác phục vụ phát triển kinh tế - xã hội"*, *Tạp Chí Địa Chất*, tập 7–8, số 307.

[4] S. de F. Marylinda and M. P. C. Arnaldo (2023), *"Using kaolin mining waste to produce sustainable building materials"*, in The 16th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC2023), 2023.

[5] W. Xu *et al.* (2018), *"Feasibility of kaolin tailing sand to be as an environmentally friendly alternative to river sand in construction applications",* J. Clean. Prod., vol. 205, pp. 1114–1126, Dec. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.09.119.

[6] F. Bastos, A. Cabral, P. Alcântara, and L. Maia (2021), *"Study case about the production of masonry concrete blocks with CDW and kaolin mining waste"*, *AIMS Mater. Sci.*, vol. 8, no. 6, pp. 990–1004, [Online]. Available: 10.3934/matersci.2021060

[7] C. M. dos. Anjos and G. A. Neves (2011), *"Use of kaolin waste for production os soil-lime blocks"*, *Rev. eletronica Mater. e Process.*, vol. 6, no. 2, pp. 91–96.

[8] M. A. Longhi, E. D. Rodríguez, Z. Zhang, S. M. Torres, M. S. Barata, and A. P. Kirchheim (2022), *"Kaolin mining waste to produce geopolymers: Physicomechanical properties and susceptibility to efflorescence formation",* Case Stud. Constr. Mater., vol. 16, p. e00846, Jun. doi: 10.1016/J.CSCM.2021.E00846.

[9] M. del P. D. Ingunza, O. F. dos S. Júnior, and C. G. Costa (2013), *"Recycling of Kaolin Processing Waste as Aggregate in Asphalt Concrete"*, Adv. Mater. Res., vol. 717, pp. 21–26, Jul. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.717.21.

[10] L. R. de Carvalho Costa, J. Toffoli de Oliveira, A. B. Habenschuss Pereira, A. Flôres Lima, K. Kaipers Stocker, and L. Amaral Féris (2025), *"Amazon kaolin waste as a sustainable adsorbent for the simultaneous removal of individual and mixed fluoroquinolones: Evaluation of large-scale applicability",* J. Water Process Eng., vol. 77, p. 108489, Sep. doi: 10.1016/J.JWPE.2025.108489.

[11] J. D. Dewar (1963), *"Effect of Mica in the Fine Aggregate on the Water Requirement and Strength of Concrete (TRA/370)".*

[12] J. Q. Xing, S. L. Zhan, and X. Y. Li (2014), *"Effect of Mica Content in Stone Powder of Manufactured Sand on Performance of Cement Mortar"*, Adv. Mater. Res., vol. 1044–1045, pp. 624–628, Oct, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1044-1045.624.

[13] H. Liu, X. Yang, L. Jiang, K. Li, L. Wang, and W. Jin (2024), *"Study on the Effect of Interfacial Modification on the Properties of Super Standard Mica Sand Cement-Based Materials"*, doi: 10.3390/buildings14061665.

[14] W. D. Ken (1999), *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification (Second edition)*. E & FN Spon.

[15] Muller O. H.(1971), *"Some aspects of the effect of micaceous sand on concrete,"* Civ Eng S Afr, vol. 13, no. 9, pp. 313–315.

[16] S. W. Danielsen and H. G. Rueslatten (1984), *"Feldspar and mica. Key minerals for fine aggregate quality"*, Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., vol. 30, pp. 215–219.