



EFFECTS OF WASTE CERAMIC TILES AS REPLACEMENT OF COARSE AGGREGATE AND BLAST FURNACE SLAG AS PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT ON MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE

Ho Van Quan*, Nguyen Cong Tam

The University of Danang - University of Technology and Education, 48 Cao Thang Street, Danang, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 31/01/2024

Revised: 25/04/2024

Accepted: 28/05/2024

Published online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.8>

* *Corresponding author*

Email: hvquan@ute.udn.vn; Tel: +84905548169

Abstract. The rapid growth in urbanization and industrialization has led to increased concrete consumption, resulting in the depletion of natural resources and a large amount of construction waste over the past decades. Using waste ceramic tiles (WCT) to replace natural aggregates in concrete is considered a sustainable development solution, saving energy and natural resources. The article presents the effects of (50-100) % WCT replacing crushed stone and 35% ground granulated blast furnace slag (GGBFS) replacing cement on some mechanical properties and durability of concrete. Research results show that the WCT reduces the workability and volumetric weight of concrete mixtures, and reduces bending tensile strength, compressive strength, and ultrasonic pulse velocity of concrete, especially concrete with 50% WCT has similar properties to reference concrete. The WCT aggregate concrete significantly reduces water absorption and chloride permeability, however, using 100% WCT tends to increase permeability. The increase in strength and decrease in permeability over time of WCT aggregate concretes are larger than those of reference concrete. Using 35% GGBFS to replace cement improves workability, and mechanical properties and significantly reduces permeability of concrete.

Keywords: waste ceramic tiles, ground granulated blast furnace slag, flexural strength, compressive strength, water absorption, chloride ion permeability.

@ 2024 University of Transport and Communications



ẢNH HƯỞNG CỦA GẠCH MEN THẢI THAY THẾ CỐT LIỆU THÔ VÀ XI LÒ CAO THAY THẾ MỘT PHẦN XI MĂNG ĐẾN MỘT SỐ TÍNH CHẤT CƠ HỌC VÀ ĐỘ BỀN CỦA BÊ TÔNG

Hồ Văn Quân*, Nguyễn Công Tâm

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng, số 48 Cao Thắng, Đà Nẵng, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 31/01/2024

Ngày nhận bài sửa: 25/04/2024

Ngày chấp nhận đăng: 28/05/2024

Ngày xuất bản Online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.8>

* Tác giả liên hệ

Email: hvquan@ute.udn.vn; Tel: +84905548169

Tóm tắt. Với sự đô thị hóa và công nghiệp hóa nhanh chóng trong những thập kỷ qua, nhu cầu sử dụng bê tông ngày càng tăng cao, các nguồn cốt liệu thiên nhiên đang dần cạn kiệt và phế thải xây dựng (PTXD) thải ra ngày càng nhiều. Việc tái chế và tái sử dụng PTXD được xem là giải pháp phát triển bền vững, tiết kiệm năng lượng và tài nguyên thiên nhiên, trong đó, việc sử dụng gạch men thải (GMT) để thay thế cho cốt liệu thiên nhiên trong bê tông đã nhận được rất nhiều sự quan tâm trong thời gian gần đây. Bài báo trình bày ảnh hưởng của (50-100)% GMT thay thế đá dăm và 35% xi lò cao nghiền mịn (XL) thay thế xi măng đến một số tính chất cơ học và độ bền của bê tông. Kết quả nghiên cứu cho thấy GMT làm giảm tính công tác, khối lượng thể tích (KLTT) của hỗn hợp bê tông, giảm cường độ kéo uốn, cường độ nén và vận tốc xung siêu âm của bê tông, trong đó bê tông sử dụng 50% GMT có tính chất tương tự như bê tông đối chứng. Bên cạnh đó, bê tông cốt liệu GMT làm giảm đáng kể độ hấp thụ nước và độ thấm ion clo, tuy nhiên, khi sử dụng 100% GMT lại có xu hướng gia tăng độ thấm. Sự gia tăng cường độ và suy giảm tính thấm theo thời gian của các bê tông cốt liệu GMT lớn hơn so với bê tông đối chứng. Sử dụng 35% XL thay thế xi măng cải thiện tính công tác, tính chất cơ học và làm giảm đáng kể tính thấm của bê tông.

Từ khóa: gạch men thải, xi lò cao nghiền mịn, cường độ kéo uốn, cường độ nén, độ hấp thụ nước, độ thấm ion clo.

@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. GIỚI THIỆU

Bê tông là một trong những vật liệu được sử dụng rộng rãi nhất trong xây dựng công trình và cơ sở hạ tầng trên thế giới, bê tông có cường độ cao, độ bền, khả năng chống cháy, dễ bảo trì, sử dụng đơn giản và dễ tạo hình [1, 2]. Với tất cả những đặc điểm nổi bật này cùng với hiệu quả kinh tế mà việc sử dụng bê tông ngày càng tăng lên [1]. Mỗi năm có hơn 21 tỉ tấn bê tông được sản xuất trên toàn thế giới [2]. Việc gia tăng sản lượng sản xuất bê tông đồng nghĩa với việc gia tăng khai thác tài nguyên thiên nhiên và sản xuất xi măng, điều này sẽ làm cạn kiệt các nguồn tài nguyên, thải khí nhà kính gây ra những tác hại đối với môi trường và xã hội. Để giảm tác động đến môi trường trong việc sản xuất bê tông, cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA) cũng như nhiều quốc gia trên thế giới khuyến khích sử dụng vật liệu tái chế để thay thế cốt liệu tự nhiên [1]. Chính phủ Việt Nam cũng đã khuyến khích sử dụng các rác thải công nghiệp để sản xuất vật liệu xây dựng tiết kiệm tài nguyên khoáng sản, tiết kiệm năng lượng và thân thiện với môi trường [3, 4].

Nhu cầu xây dựng công trình và cơ sở hạ tầng ngày càng tăng cao không những tiêu thụ một lượng lớn bê tông mà còn thải ra một lượng rác thải đáng kể, trong đó phế thải xây dựng (PTXD) trong hoạt động xây dựng và do phá dỡ công trình chiếm phần lớn. Việc quản lý và xử lý chất thải này không đúng cách sẽ tác động xấu đến môi trường và xã hội, hiện nay phương pháp xử lý PTXD phổ biến nhất là tập kết ở các hố chôn lấp. Ở nhiều khu vực trên thế giới, PTXD chiếm khoảng 50% lượng rác thải được chôn lấp, tuy nhiên, ở một số quốc gia như Hoa Kỳ và Châu Âu, việc quản lý chất thải đô thị đã mang lại tỷ lệ tái chế lần lượt là 70% và 90% [2]. Ở Việt Nam, PTXD chiếm khoảng 10–12% lượng chất thải rắn đô thị thải ra hàng ngày, khoảng 6000–7200 tấn mỗi ngày, lượng PTXD này chủ yếu là được tập kết ở bãi rác để chôn lấp, tỷ lệ tái chế PTXD dưới 10% [5].

Các sản phẩm gốm sứ đóng một vai trò quan trọng trong xây dựng và trang trí các công trình xây dựng, vật liệu gốm sứ phổ biến nhất là gạch men ốp tường, gạch men lát sàn và thiết bị vệ sinh, trong đó gạch men ốp, lát chiếm tỉ lệ nhiều nhất. Vật liệu gốm sứ được sản xuất bằng cách nung hỗn hợp chủ yếu gồm đất sét và một số thành phần khác như silic, cacbua, các oxit kim loại, ... ở nhiệt độ cao nên chúng có tính giòn [1, 2]. Trong các ngành công nghiệp gốm sứ trên khắp thế giới có đến 30% sản lượng sản xuất hàng ngày bị lỗi phải loại bỏ, và khoảng 3-7% trong số đó không thể tái sử dụng được [1]. Trong đó, gạch men thải (GMT) là một trong những PTXD được tạo ra trong quá trình sản xuất (các sản phẩm bị lỗi về kích thước, tráng men, nứt, vỡ, ...), trong quá trình xây dựng công trình (vận chuyển đến công trình, gia công, cắt, lát, ốp, ...) hoặc khi phá dỡ công trình. Quy mô sản xuất gạch men trên thế giới năm 2019 là khoảng 12,6 tỷ m² và tăng lên 18,2 tỷ m² vào năm 2021 [2]. GMT cứng, bền và có khả năng chống lại các lực phân hủy sinh học, hóa học và vật lý cao, do vậy thời gian phân hủy GMT kéo dài rất lâu, có thể lên tới 4000 năm [6]. Việc tập kết để chôn lấp GMT không những lãng phí nguồn tài nguyên, chiếm diện tích đất làm bãi chứa, mà còn có thể dẫn đến ô nhiễm môi trường đất, không khí và nước ngầm [7]. Để hạn chế khai thác tài nguyên thiên nhiên, giảm thiểu việc chôn lấp GMT, trên thế giới đã có nhiều tác giả sử dụng GMT làm vật liệu sản xuất bê tông, GMT được gia công đến cỡ hạt nhất định và chủ yếu được dùng làm cốt liệu thô thay thế một phần hoặc toàn bộ đá dăm [6, 8-15] hoặc làm cốt liệu mịn thay thế một phần hoặc toàn bộ cát [11, 16, 17], bên cạnh đó GMT chứa hàm lượng SiO₂ rất cao [1] nên chúng còn được nghiền mịn làm vật liệu puzolan để thay thế một phần xi măng [7]. Ở nước ta, việc sử dụng các PTXD như gạch đỏ và bê tông làm cốt liệu cho bê tông đã có một số nghiên cứu [18-20], tuy nhiên việc sử dụng GMT để làm cốt liệu cho bê tông gần như chưa được nghiên cứu. Bên cạnh đó, việc sử dụng các phụ gia khoáng như xi lô cao nghiên

mịn thay thế một phần xi măng không những giảm thiểu được lượng xi măng sử dụng, mang lại lợi ích kinh tế và môi trường, mà còn rất hiệu quả trong việc cải thiện một số tính chất của bê tông, đặc biệt là các tính chất độ bền [20-25].

Mục tiêu chính của nghiên cứu này là sử dụng 50% GMT và 100% GMT thay thế đá dăm và đồng thời sử dụng 35% XL thay thế xi măng trong thành phần bê tông, sau đó đánh giá tính công tác và khối lượng thể tích của bê tông tươi, cường độ kéo uốn, cường độ nén, vận tốc xung siêu âm, độ hấp thụ nước mao dẫn và độ thấm ion clo của các bê tông cứng.

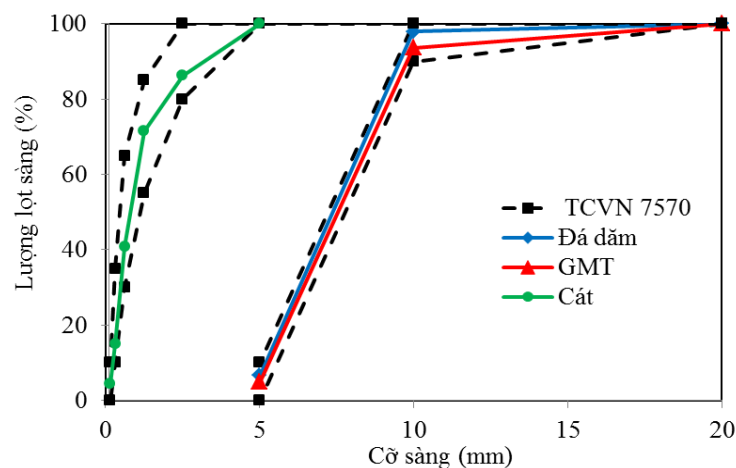
2. VẬT LIỆU SỬ DỤNG, THIẾT KẾ THÀNH PHẦN BÊ TÔNG, CHẾ TẠO MẪU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu sử dụng và thiết kế thành phần bê tông

Đá dăm (Đ): Sử dụng Đ có kích cỡ 5-10 mm, có khối lượng riêng (KLR) là $2,75 \text{ kg/m}^3$, độ hút nước là 1,15%, độ hao mòn LA = 23,0%, thành phần hạt của Đ phù hợp với TCVN 7570:2006 và được thể hiện trên Hình 1.

Gạch men thải (GMT): Được thu thập tại một đại lý phân phối trên địa bàn thành phố Đà Nẵng, GMT bao gồm các loại gạch men bị hư hỏng như nứt, vỡ, mất góc cạnh, ... được thải bỏ. GMT có chiều dày khoảng 8 mm, chúng được đập nhỏ và sàng qua các cỡ sàng để đảm bảo cỡ hạt từ 5-10 mm phù hợp với TCVN 7570:2006 (Hình 1, 2). GMT có KLR = $2,42 \text{ g/cm}^3$, độ hút nước là 8,26%, độ hao mòn LA = 20,5%. Kết quả trên cho thấy thành phần hạt và các chỉ tiêu chất lượng của GMT đảm bảo yêu cầu theo TCVN 11969:2018 “Cốt liệu lớn tái chế cho bê tông”. Vì GMT có độ hút nước lớn sẽ ảnh hưởng đến tính công tác của bê tông tươi, trong nghiên cứu này GMT được xử lý bằng cách ngâm trong nước 24 h để bão hòa nước, sau đó chúng được vớt ra làm ráo bề mặt trước khi đưa vào máy trộn.

Cát (C): Sử dụng cát sông có mô đun độ lớn $M_{dl} = 2,82$, KLR = $2,64 \text{ g/cm}^3$, độ hút nước là 0,74%, thành phần hạt của cát phù hợp với TCVN 7570:2006 (Hình 1).



Hình 1. Thành phần hạt của đá dăm, GMT và cát sông.

Xi măng (XM): Sử dụng XM PC50 có KLR = $3,08 \text{ g/cm}^3$, cường độ nén ở 28 ngày là 53,4 MPa, độ mịn là $3480 \text{ cm}^2/\text{g}$, các chỉ tiêu khác của xi măng PC50 phù hợp với TCVN 2682:2020.

Xi lò cao nghiền mịn (XL): Sử dụng XL S95 có KLR = 2,88 g/cm³, độ mịn là 5140 cm²/g, chỉ số hoạt tính cường độ ở 28 ngày là 101,4%, các chỉ tiêu khác của XL S95 phù hợp với TCVN 11586:2016.

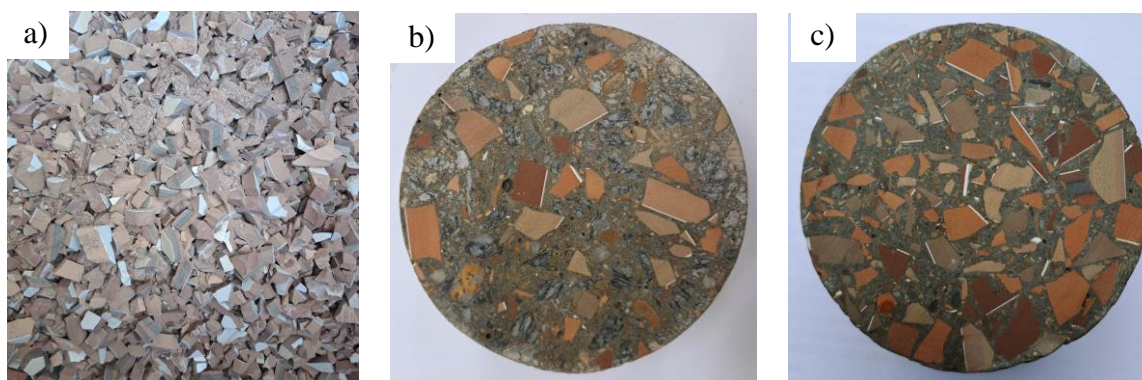
Phụ gia siêu dẻo (SD): Sử dụng SD Master Glenium SKY 8713 của Công ty Master Builders Solutions Việt Nam, có KLR = 1,06 g/cm³ phù hợp với ASTM C494 loại G.

Nước trộn: Dùng nước máy sạch phù hợp với TCVN 4506:2012.

Thành phần của các bê tông được thiết kế tham khảo theo tiêu chuẩn ACI 211.1. Trong nghiên cứu này gồm có bê tông đối chứng sử dụng cốt liệu lớn hoàn toàn là đá dăm (0GM), bê tông sử dụng 50%GMT thay thế đá dăm (50GM) và bê tông sử dụng 100%GMT thay thế đá dăm (100GM). Ngoài ra, để cải thiện một số tính chất của các bê tông GMT, nghiên cứu còn sử dụng 35%XL để thay thế một phần XM trong các bê tông chứa 50%GMT và 100%GMT thay thế đá dăm (các bê tông 50GM35XL và 100GM35XL), việc chọn tỉ lệ 35%XL là dựa trên khoảng hàm lượng XL tối ưu trong các nghiên cứu trước đây [23-25]. Vì khối lượng riêng của GMT nhỏ hơn đá dăm nên lượng GMT được thay thế đá dăm theo thể tích. Lượng SD được điều chỉnh để đảm bảo độ sụt yêu cầu của các hỗn hợp bê tông từ 10-12 cm. Thành phần của các loại bê tông được ghi trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần vật liệu của các loại bê tông.

Loại bê tông	XM (kg)	N (lit)	XL (kg)	C (kg)	Đ (kg)	GMT (kg)	SD (kg)	Độ sụt (cm)
0GM	437,5	175	0	852,3	972	0	7,0	10-12
50GM	437,5	175	0	851,3	486	427,7	7,4	
100GM	437,5	175	0	849,0	0	855,4	8,1	
50GM35XL	284,4	175	153,1	847,6	486	427,7	5,3	
100GM35XL	284,4	175	153,1	846,5	0	855,4	5,7	



Hình 2. GMT cỡ hạt 5-10 mm (a), mặt cắt ngang của mẫu bê tông chứa 50%GMT (b) và mẫu bê tông chứa 100%GMT (c) đường kính 100 mm.

2.2. Chế tạo mẫu và phương pháp thí nghiệm

2.2.1. Chế tạo và bảo dưỡng các mẫu thử

Các thành phần vật liệu được cân đong phù hợp với từng mẻ trộn, GMT được xử lý đảm bảo đạt trạng thái bão hòa khô bề mặt trước khi cho vào máy trộn, khối lượng đá dăm cũng được bù nước trong quá trình trộn để đảm bảo ở trạng thái bão hòa khô bề mặt tương tự như GMT (lượng nước bù bằng độ hút nước trừ đi độ ẩm tự nhiên của đá dăm).

Các mẫu dầm và mẫu trụ kích thước 100x100x400 mm và 100x200 mm được đúc và dưỡng hộ theo TCVN 3105:2022, sau khi tháo khuôn, các mẫu được ngâm trong bể dưỡng hộ

cho đến ngày thí nghiệm. Các mẫu dầm 100x100x400 mm dùng để xác định cường độ kéo uốn, sau đó dùng các nửa mẫu dầm bị uốn gãy để xác định cường độ chịu nén tương ứng với mẫu lập phương 100x100x100 mm, các mẫu trụ 100x200 mm dùng để xác định vận tốc xung siêu âm, độ hút nước mao dẫn và độ thấm ion clo.

2.2.2. Phương pháp thí nghiệm

Độ sụt của các hỗn hợp bê tông (HHT) tươi đã được kiểm tra theo TCVN 3116:2022. Khối lượng thể tích (KLTT) của các HHT tươi được xác định theo ASTM C138:2017 trong quá trình đúc mẫu.

Cường độ kéo uốn (R_{ku}) và cường độ nén (R_n) của các bê tông được xác định ở 7, 28, 56 và 90 ngày tương ứng theo TCVN 3119:2022 và TCVN 3118:2022. R_{ku} và R_n của các bê tông là giá trị trung bình của 3 mẫu và 6 mẫu.

Vận tốc xung siêu âm (V_{xsa}) truyền qua các bê tông được thí nghiệm ở 7, 28, 56 và 90 ngày theo TCVN 13537:2022 trên các mẫu trụ 100x200 mm. Các mẫu được mài nhẵn hai mặt đáy để tiếp xúc tốt với đầu dò siêu âm, sau khi lấy mẫu ra khỏi bể bảo dưỡng, lau ráo bề mặt mẫu và tiến hành siêu âm. V_{xsa} truyền qua các bê tông là giá trị trung bình của 3 mẫu.

Độ hấp thụ nước do mao dẫn (ĐHTN) của bê tông được thí nghiệm ở 7, 28, 56 và 90 ngày theo ASTM C1585:2020 trên các lát mẫu trụ $d_{xh} = 100 \times 50$ mm được cắt ra từ mẫu trụ 100x200 mm. Các mẫu được sấy trong tủ sấy ở nhiệt độ $110 \pm 5^\circ C$ trong 24 h, sau đó lấy mẫu khỏi tủ sấy và để nguội tự nhiên trong bình hút ẩm. Khi các mẫu bê tông đã nguội tiến hành quét hai lớp keo chống thấm xung quanh mẫu, mặt trên mẫu được bịt kín bằng bao nilong để chống bay hơi. Các mẫu được đặt trên hai thanh kê bằng nhựa đặt trong chậu có đáy bằng phẳng và đổ nước ngập trên đáy mẫu đến 5 mm. ĐHTN của các bê tông được đo lúc 1, 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72, 96, 120, 144 và 168 h, ĐHTN của các bê tông là giá trị trung bình của 3 mẫu.

ĐHTN I của các bê tông được tính theo công thức:

$$I = \frac{m_t}{ad} \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

Trong đó: m_t - khối lượng nước mẫu hút vào tại thời điểm t (g); a - diện tích mặt mẫu tiếp xúc với nước (mm^2); d - KLR của nước, $d = 1.10^{-3} \text{ g/mm}^3$.

Tốc độ hấp thụ nước (TĐHT) ban đầu S_{bd} ($\text{mm/s}^{0.5}$) của các bê tông được xác định trên cơ sở phương trình hồi qui từ đồ thị quan hệ giữa ĐHTN I (mm) và căn bậc hai của thời gian t ($s^{0.5}$) dựa trên các điểm từ 1-6 h theo phương trình (2). TĐHT thứ cấp S_{tc} ($\text{mm/s}^{0.5}$) xác định tương tự như S_{bd} nhưng sử dụng các điểm từ 24-168 h theo phương trình (3):

$$I_{bd} = S_{bd} \sqrt{t} + b \quad (2)$$

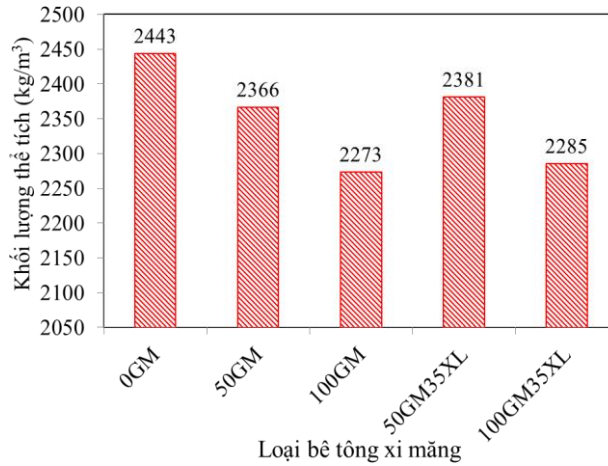
$$I_{tc} = S_{tc} \sqrt{t} + b \quad (3)$$

Độ thấm ion clo của các bê tông được thí nghiệm trên các lát mẫu trụ $d_{xh} = 100 \times 50$ mm theo ASTM C1202:2022. Trước khi thí nghiệm, các mẫu bê tông được xử lý quét chống thấm xung quanh mẫu và hút chân không theo qui định. Độ thấm ion clo của các bê tông là giá trị trung bình của 3 mẫu.

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

3.1. Độ sụt và khối lượng thể tích

Lượng SD sử dụng cho các HHBT 0GM, 50GM, 100GM, 50GM35XL, 100GM35XL để đạt độ sụt 10-12 cm lần lượt là 7,0; 7,44; 8,09; 5,25; 5,69 kg/m³. Điều này có nghĩa là việc sử dụng GMT thay thế đá dăm làm giảm tính công tác của các HHBT tươi, lượng GMT càng nhiều thì độ sụt càng thấp, sử dụng 35%XL thay thế XM cải thiện đáng kể độ sụt của các HHBT. Độ sụt của các hỗn hợp chứa GMT giảm là do các hạt GMT có nhiều góc cạnh và bề mặt nhám hơn đá dăm làm tăng ma sát dẫn đến giảm độ sụt. Kết quả này tương tự như các nghiên cứu [6, 14].

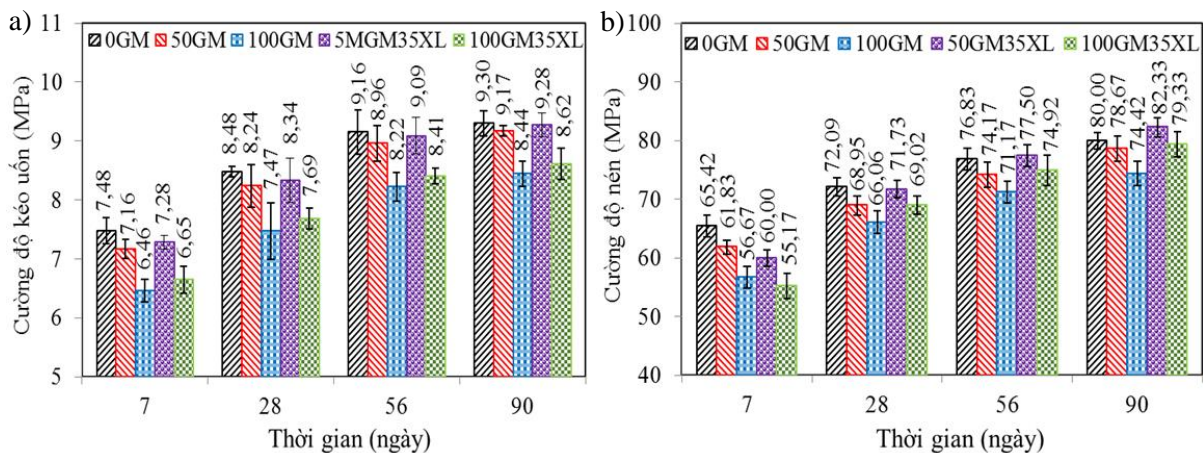


Hình 3. KLTT của các hỗn hợp bê tông tươi.

KLTT của các HHBT tươi được thể hiện trên Hình 3. KLTT của các HHBT sử dụng GMT đều nhỏ hơn so với HHBT 0GMT, GMT càng nhiều thì KLTT càng nhỏ. KLTT của các HHBT 50GM, 100GM, 50GM35XL, 100GM35XL giảm lần lượt tương ứng 3,2%, 7,0%, 2,6% và 6,5% so với HHBT 0GM. GMT làm giảm KLTT của các HHBT là do nó có KLR nhỏ hơn đá dăm, kết quả này phù hợp với nghiên cứu [14]. Trong khi đó, các HHBT 50GM35XL và 100GM35XL có KLTT tăng lần lượt khoảng 0,60% và 0,53% so với các HHBT 50GM và 100GM, việc tăng nhẹ KLTT của các HHBT là do các hạt XL có độ mịn lớn, chúng chèn lấp vào các lỗ rỗng làm tăng độ đặc của vữa xi măng [23, 24].

3.2. Cường độ kéo uốn và cường độ nén

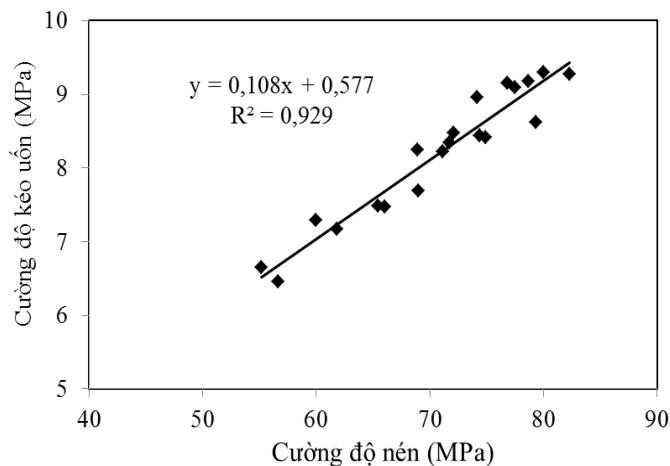
Cường độ kéo uốn và cường độ nén của các bê tông xác định tương ứng trên các mẫu dầm 100x100x400 mm và mẫu lập phương 100x100x100 mm được thể hiện trên Hình 4.



Hình 4. Cường độ kéo uốn (a) và cường độ nén (b) của các bê tông.

Hình 4 cho thấy các bê tông sử dụng 50-100%GMT thay thế đá dăm có R_{ku} và R_n thấp hơn so với bê tông 0GM ở tất cả các ngày tuổi. Sử dụng 35%XL thay thế XM giúp cải thiện R_{ku} và R_n của các bê tông cốt liệu GMT từ sau 28 ngày. R_{ku} của các bê tông 50GM, 100GM, 50GM35XL, 100GM35XL ở 7 và 28 ngày giảm lần lượt tương ứng là 4,2% và 2,8%, 13,7% và 11,9%, 2,6% và 2,2%, 11,1% và 9,3%; ở 56 và 90 ngày giảm lần lượt tương ứng là 2,2% và 1,3%, 10,2% và 9,2%, 0,5% và 0,2%, 8,2% và 7,3% so với bê tông 0GM. R_n của các bê tông 50GM, 100GM, 50GM35XL, 100GM35XL ở 7 và 28 ngày giảm lần lượt tương ứng là 5,5% và 4,4%, 13,4% và 8,4%, 8,3% và 0,5%, 15,7% và 4,3%. Ở 56 và 90 ngày, R_n của các bê tông 50GM, 100GM, 100GM35XL giảm lần lượt tương ứng là 3,5% và 1,7%, 7,4% và 7,0%, 2,5% và 0,8%; riêng bê tông 50GM35XL có R_n tăng lần lượt tương ứng là 0,9% và 2,9% so với bê tông 0GM. Có thể thấy rằng khi sử dụng 50%GMT thay thế đá dăm, R_{ku} và R_n của bê tông xấp xỉ với bê tông 0GM, tuy nhiên khi sử dụng 100%GMT dẫn đến R_{ku} và R_n giảm sâu hơn. Mặc dù GMT có độ mài mòn LA nhỏ hơn một chút so với đá dăm, có nhiều góc cạnh và bề mặt gồ ghề góp phần cải thiện khả năng liên kết của hồ XM làm gia tăng cường độ [1, 6, 8, 11], tuy nhiên, GMT có một mặt tráng men bóng nhẵn, đây chính là điểm yếu làm giảm khả năng liên kết của hồ XM với GMT dẫn đến sự suy giảm cường độ, mặt khác GMT lại có tính giòn dễ gãy và có nhiều hạt không đều (hạt thoi dẹt) [1, 2] nên chúng góp phần làm giảm cường độ, đặc biệt là R_{ku} , do đó khi sử dụng 100%GMT thay thế đá dăm dẫn đến giảm R_{kn} và R_n , kết quả này tương đồng với các nghiên cứu [8, 9, 14]. Kết quả trên cũng cho thấy rằng sự phát triển R_{ku} và R_n của các bê tông GMT ở các độ tuổi từ 28 ngày về sau là cao hơn so với bê tông 0GM, điều này có thể được giải thích là do sự bảo dưỡng bổ sung bên trong của GMT, cốt liệu GMT được ngâm no nước nên chúng cung cấp nước cho quá trình hydrat của XM theo thời gian, dẫn đến vữa XM trong các bê tông cốt liệu GMT đặc chắc hơn so với bê tông 0GM, kết quả này khá phù hợp với các nghiên cứu [9, 11-13]. Khi so sánh các bê tông GMT có và không có 35%XL, R_{ku} của bê tông 50GM35XL và 100GM35XL ở 7, 28, 56 và 90 ngày cao hơn lần lượt tương ứng là 1,7%, 2,1%, 2,4%, 2,0% và 3,7%, 2,9%, 2,3%, 2,1% so với bê tông 50GM và 100GM; R_n của bê tông 50GM35XL và 100GM35XL ở 7 ngày thấp hơn 3,0% và 2,7% nhưng ở 28, 56 và 90 ngày cao hơn lần lượt tương ứng là 4,0%, 4,5%, 4,7% và 4,5%, 5,3%, 6,6% so với bê tông 50GM và 100GM. Các bê tông GMT chứa 35%XL có cường độ cao hơn là do cơ chế chèn khe lấp lỗ rỗng và phản ứng puzolan của XL cải thiện độ đặc chắc của vữa XM [10, 20-25].

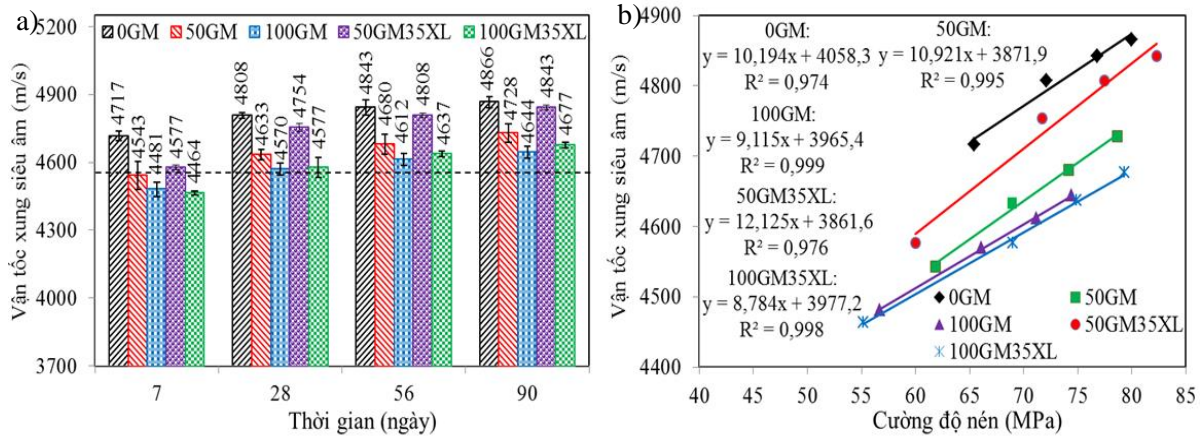
Quan hệ giữa R_n và R_{ku} của các bê tông được thể hiện trên Hình 5. Quan hệ này có dạng tuyến tính rất chặt chẽ với hệ số xác định $R^2 = 0,929$.



Hình 5. Quan hệ giữa cường độ kéo uốn và cường độ nén của các bê tông.

3.3. Vận tốc xung siêu âm

V_{xsa} truyền qua các mẫu trụ bê tông kích thước 100x200 mm được thể hiện trên Hình 6.a. V_{xsa} truyền qua tất cả các bê tông chứa GMT đều nhỏ hơn so với bê tông 0GM, tuy nhiên sự gia tăng V_{xsa} truyền qua các bê tông GMT theo thời gian có xu hướng mạnh hơn so với bê tông 0GM nhờ sự bảo dưỡng bên trong, việc thay thế XM bằng 35%XL cải thiện đáng kể V_{xsa} truyền qua các bê tông GMT. V_{xsa} truyền qua các bê tông 50GM, 100GM, 50GM35XL và 100GM35XL ở 7 ngày lần lượt tương ứng bằng 96,3%, 95,0%, 97,0% và 94,6%; ở 28 ngày lần lượt tương ứng bằng 96,6%, 95,1%, 98,9% và 95,2% so với bê tông 0GM, trong khi ở 90 ngày, các con số này lần lượt là 97,2%, 95,4%, 99,5% và 96,1%. Các bê tông GMT có V_{xsa} truyền qua bé hơn là do GMT có KLR thấp hơn và độ rỗng cao hơn so với đá dăm, kết quả này có xu hướng tương đồng với các nghiên cứu trước đây [14, 15]. Tất cả các bê tông GMT có V_{xsa} truyền qua ở 28 ngày ≥ 4550 m/s nên được xem là bê tông có chất lượng tốt [26].

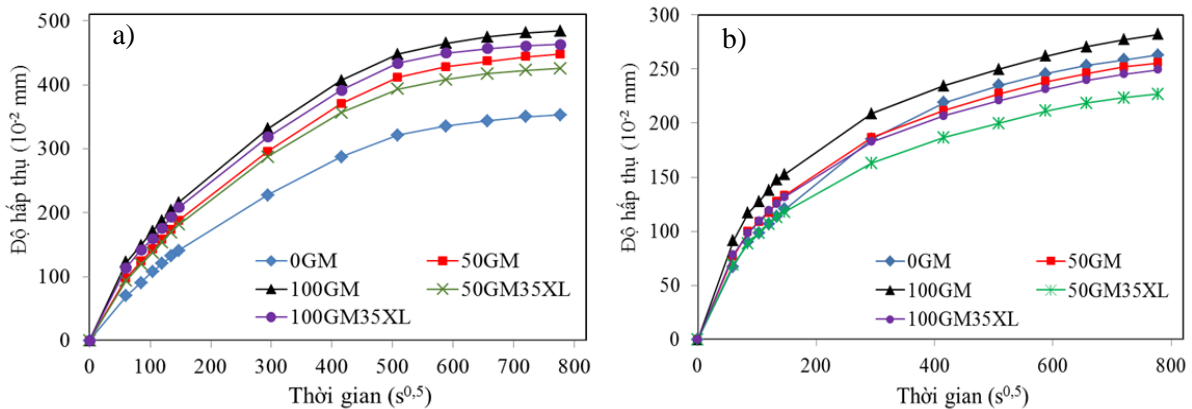


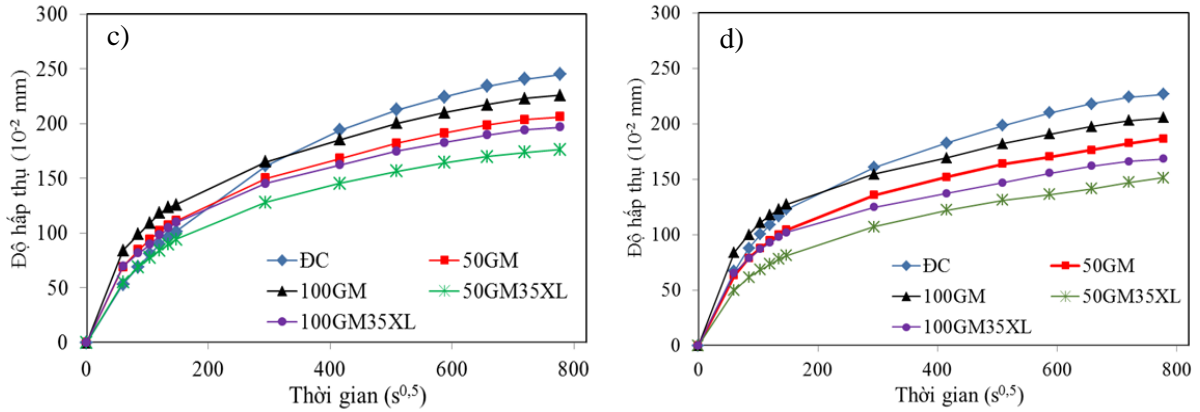
Hình 6. Vận tốc xung siêu âm (a) và quan hệ giữa V_{xsa} và R_n (b) của các bê tông.

Quan hệ giữa V_{xsa} và R_n của các bê tông được thể hiện trên Hình 6.b. Các quan hệ này có dạng tuyến tính rất chặt chẽ với hệ số xác định $R^2 \geq 0,97$.

3.3. Độ hấp thụ nước do mao dẫn

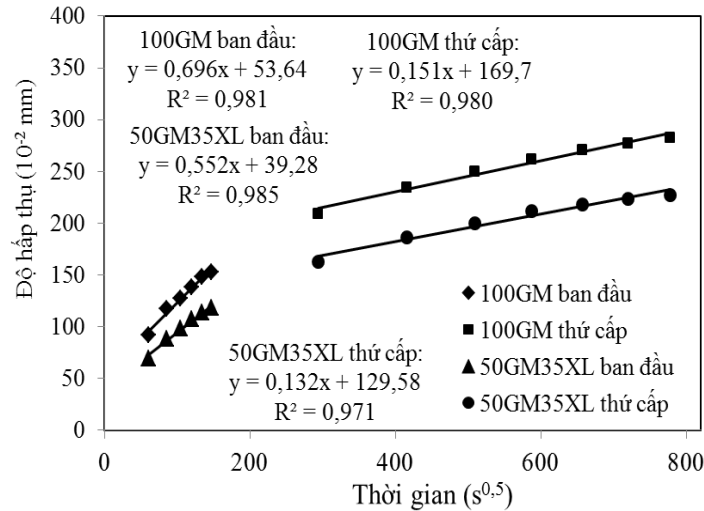
Độ ĐHTN của các bê tông theo thời gian được thể hiện trên Hình 7.





Hình 7. ĐHTN của các bê tông ở 7 ngày (a), ở 28 ngày (b), ở 56 ngày (c) và ở 90 ngày (d).

Hồi qui theo các phương trình (2) và (3) xác định được S_{bd} , S_{tc} của các bê tông và các hệ số xác định R^2 được thể hiện trong Bảng 2. Hình 8 thể hiện các phương trình hồi qui xác định S_{bd} và S_{tc} của các bê tông 100GM và 50GM35XL ở 28 ngày, đối với S_{bd} và S_{tc} của các bê tông khác ở các thời điểm khác nhau cũng được xác định theo cách tương tự.



Hình 8. Hồi qui xác định S_{bd} và S_{tc} của các bê tông 100GM và 50GM35XL ở 28 ngày.

Bảng 2. Tốc độ hấp thụ nước ban đầu và thứ cấp của các bê tông.

Thời gian (ngày)	Loại bê tông										
	0GM		50GM		100GM		50GM35XL		100GM35XL		
	S	R ²	S	R ²	S	R ²	S	R ²	S	R ²	
7	Ban đầu	0,820	0,999	1,024	0,999	1,081	1,000	1,008	1,000	1,067	0,998
	Thứ cấp	0,249	0,890	0,299	0,878	0,302	0,877	0,272	0,873	0,285	0,852
28	Ban đầu	0,583	0,977	0,633	0,986	0,696	0,981	0,552	0,985	0,605	0,989
	Thứ cấp	0,154	0,945	0,142	0,970	0,151	0,980	0,132	0,971	0,137	0,976
56	Ban đầu	0,560	0,994	0,483	0,986	0,495	0,982	0,448	0,993	0,463	0,999
	Thứ cấp	0,170	0,962	0,119	0,978	0,127	0,976	0,099	0,970	0,107	0,979
90	Ban đầu	0,635	0,988	0,468	0,986	0,494	0,982	0,356	0,989	0,417	0,990
	Thứ cấp	0,139	0,975	0,104	0,988	0,108	0,986	0,089	0,989	0,093	0,987

Ghi chú: S có đơn vị là $10^{-2} \text{ mm/s}^{0,5}$.

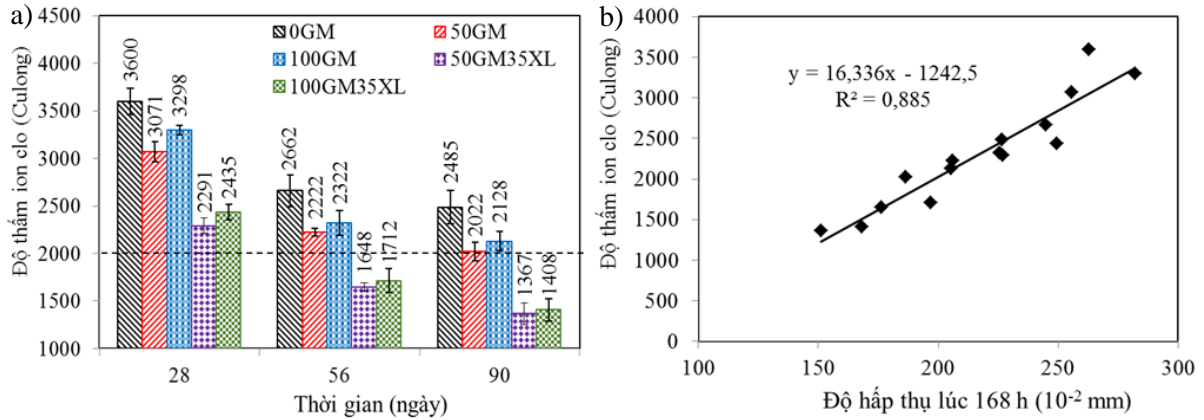
Hình 7.a cho thấy rằng ở thời điểm 7 ngày, bê tông 0GM có ĐHTN bé nhất, bê tông chứa GMT càng nhiều thì ĐHTN càng lớn, tuy nhiên từ 28 ngày về sau (Hình 7.b, c, d), các bê tông sử dụng cốt liệu GMT thể hiện ĐHTN giảm dần và có xu hướng nhỏ hơn so với bê tông 0GM, việc sử dụng 35%XL thay thế XM làm giảm đáng kể ĐHTN. Ở 7 ngày, ĐHTN của bê tông 0GM là thấp nhất, các bê tông chứa GMT có ĐHTN tăng theo tỉ lệ thuận với lượng GMT sử dụng. ĐHTN của các bê tông 50GM, 100GM, 50GM35XL, 100GM35XL lúc 6 h tăng lên lần lượt tương ứng là 33,6%, 53,5%, 29,0%, 48,3%; lúc 168 h tăng lên lần lượt tương ứng là 26,8%, 37,1%, 20,4%, 31,2% so với bê tông 0GM. Ở 28 ngày, ĐHTN lúc 6 h của các bê tông 50GM, 100GM và 100GM35XL tăng lên lần lượt tương ứng là 10,6%, 27,0% và 9,5%, của bê tông 50GM35XL giảm xuống 1,9%; ĐHTN lúc 168 h của bê tông 100GM tăng lên 7,4%; của các bê tông 50GM, 50GM35XL và 100GM35XL giảm xuống lần lượt tương ứng là 2,7%, 13,6% và 5,1% so với bê tông 0GM. Ở 56 ngày, ĐHTN lúc 6 h của các bê tông 50GM, 100GM và 100GM35XL tăng lên lần lượt là 9,3%, 23,9% và 7,9%, của bê tông 50GM35XL giảm xuống 7,3%; ĐHTN lúc 168 h của các bê tông 50GM, 100GM, 50GM35XL và 100GM35XL giảm xuống lần lượt là 15,8%, 7,8%, 28,0% và 19,6% so với bê tông 0GM. Ở 90 ngày, ĐHTN lúc 6 h của bê tông 100GM tăng lên 3,6%, của các bê tông 50GM, 50GM35XL và 100GM35XL giảm xuống lần lượt là 15,1%, 34,0% và 17,0%; ĐHTN lúc 168 h của các bê tông 50GM, 100GM, 50GM35XL và 100GM35XL giảm xuống lần lượt là 17,6%, 9,9%, 33,3% và 25,8% so với bê tông 0GM.

Bảng 2 cho thấy TĐHT ban đầu và thứ cấp của bê tông 0GM ở 7 ngày là bé nhất, tuy nhiên từ 28 ngày về sau, các bê tông GMT thể hiện TĐHT nhỏ hơn bê tông 0GM, đặc biệt là TĐHT thứ cấp và các bê tông GMT chứa 35%XL. Chẳng hạn ở 7 ngày, S_{bd} và S_{tc} của các bê tông 50GM, 100GM, 50GM35XL, 100GM35XL tăng lên lần lượt là 24,9%, 31,8%, 22,9%, 30,1% và 20,1%, 21,3%, 9,2%, 14,5% so với bê tông 0GM; trong khi ở 56 ngày, S_{bd} và S_{tc} của các bê tông 50GM, 100GM, 50GM35XL, 100GM35XL giảm xuống lần lượt là 13,8%, 11,6%, 20,0%, 17,3% và 30,0%, 25,3%, 41,8%, 37,1% so với bê tông 0GM.

Rõ ràng ĐHTN và TĐHT của các bê tông GMT giảm xuống sâu hơn so với bê tông 0GM khi thời gian bảo dưỡng tăng lên, điều này là do cơ chế bảo dưỡng bên trong của GMT. Theo thời gian, XM được hydrat hóa bổ sung từ nước chứa trong GMT làm cho cấu trúc hồ XM đặc chắc hơn dẫn đến giảm ĐHTN, kết quả trên cũng cho thấy rằng ĐHTN và TĐHT ban đầu (1-6 h) của các bê tông cốt liệu GMT tăng nhanh nhưng ĐHTN và TĐHT thứ cấp (24-168 h) lại giảm rõ rệt, điều này có thể giải thích như sau: khi bắt đầu cho mẫu bê tông tiếp xúc với nước, mẫu sẽ hút nước vào bên trong thông qua các lỗ rỗng mao dẫn, trên bề mặt và lân cận bề mặt mẫu tiếp xúc với nước có các cốt liệu GMT, các hạt GMT nhanh chóng hút nước vào bên trong do độ rỗng lớn của nó, theo thời gian, lượng nước dần được hấp thụ sâu vào bên trong mẫu, tuy nhiên ĐHTN và TĐHT thứ cấp chủ yếu phụ thuộc vào độ hút nước vữa XM, vì các hạt GMT được bao bọc bởi vữa XM, nhờ cơ chế bảo dưỡng bên trong nên vữa XM trong các bê tông chứa GMT đặc chắc hơn dẫn đến giảm ĐHTN, kết quả này khá tương đồng với các nghiên cứu trước đây [10, 15, 16]. Các bê tông GMT chứa 35%XL thể hiện ĐHTN và TĐHT rất thấp là nhờ cơ chế lấp đầy lỗ rỗng và phản ứng puzolan của các hạt XL mịn [10, 22-25]. Mặc dù các bê tông chứa 100GMT có sự bổ sung nước để bảo dưỡng bên trong là đầy đủ nhất, nhưng do lượng GMT nhiều nên tạo ra nhiều mặt liên kết yếu giữa bề mặt tráng men của GMT và hồ xi măng, hình thành các lỗ rỗng trên mặt tiếp giáp GMT-hồ xi măng dẫn đến sự gia tăng ĐHTN và TĐHT.

3.4. Độ thấm ion clo

Độ thấm ion clo của các bê tông được thể hiện trong Hình 9.a.



Hình 9. Độ thấm ion clo (a) và quan hệ giữa độ thấm ion clo và ĐHTN lúc 168 h (b) của các bê tông.

Hình 9.a cho thấy độ thấm ion clo của tất cả các bê tông chứa GMT đều nhỏ hơn so với bê tông 0GM, thời gian bảo dưỡng càng dài thì suy giảm độ thấm ion clo của các bê tông chứa GMT càng lớn, khi sử dụng 100%GMT thay thế đá dăm dẫn đến sự gia tăng độ thấm ion clo. Chẳng hạn, ở 28 ngày, độ thấm ion clo của các bê tông 50GM, 100GM, 50GM35XL và 100GM35XL lần lượt tương ứng bằng 85,3%, 91,6%, 63,6% và 67,7% so với bê tông 0GM, ở 90 ngày các con số này lần lượt tương ứng là 81,4%, 85,7%, 55,0% và 56,7%. Theo ASTM C1202, độ thấm ion clo của các bê tông ở 56 ngày thuộc mức trung bình (2000-4000 Culong), riêng các bê tông 50GM35XL và 100GM35XL có độ thấm ion clo ở mức thấp (< 2000 Culong). Độ thấm ion clo của các bê tông GMT và các bê tông kết hợp GMT với XL giảm là nhờ sự bảo dưỡng bên trong của GMT, cũng như cơ chế chèn khe lấp lỗ rỗng và phản ứng puzolan của các hạt XL như đã giải thích ở trên, ngoài ra, các hạt XL còn có khả năng liên kết các ion clo góp phần làm giảm thêm độ thấm ion clo [23]. Kết quả trên khá tương đồng với nghiên cứu [15, 17]. Quan hệ giữa độ thấm ion clo và độ ĐHTN của các bê tông lúc 168 h được thể hiện trên Hình 9.b, quan hệ này có dạng tuyến tính tỉ lệ thuận khá chặt chẽ với hệ số xác định $R^2 = 0,885$.

4. KẾT LUẬN

Một số kết luận được rút ra từ nghiên cứu này như sau:

Sử dụng (50-100)%GMT thay thế đá dăm trong bê tông làm giảm KLTT và độ sụt của bê tông tươi, tỉ lệ GMT thay thế dăm càng nhiều thì KLTT và độ sụt của các hỗn hợp bê tông càng giảm. Sử dụng 35%XL thay thế XM không ảnh hưởng đáng kể đến KLTT nhưng chúng cải thiện đáng kể độ sụt của các hỗn hợp bê tông.

R_{ku} , R_n và V_{xsa} của các bê tông chứa (50-100)%GMT nhỏ hơn, nhưng sự gia tăng R_{ku} , R_n và V_{xsa} theo thời gian của các bê tông này lại lớn hơn so với bê tông 0GM. Sử dụng 35%XL trong các bê tông giúp cải thiện R_{ku} , R_n và V_{xsa} của các bê tông. R_{ku} và R_n của các bê tông 50GM, 100GM, 50GM35XL, 100GM35XL ở 28 ngày giảm lần lượt tương ứng là 3,2% và 4,4%, 12,6% và 8,4%, 1,8% và 0,5%, 10,1% và 4,3% so với bê tông 0GM. V_{xsa} truyền qua các bê tông 50GM, 100GM, 50GM35XL, 100GM35XL ở 28 ngày giảm lần lượt tương ứng bằng 3,4%, 4,6%, 0,7% và 4,4% so với bê tông 0GM.

ĐHTN và TĐHT do mao dẫn của các bê tông chứa (50-100)%GMT ở 7 ngày lớn hơn, nhưng từ 28 ngày về sau lại có xu hướng nhỏ hơn so với bê tông 0GM, đặc biệt là ĐHTN và

TĐHT thứ cấp từ sau 24 h. Độ thấm ion clo của các bê tông chứa (50-100)%GMT nhỏ hơn so với bê tông 0GM ở tất cả các độ tuổi. Thời gian bảo dưỡng càng lâu thì sự suy giảm ĐHTN, TĐHT và độ thấm ion clo của các bê tông GMT càng lớn. Độ thấm ion clo ở 28 ngày của các bê tông 50GM, 100GM, 50GM35XL và 100GM35XL giảm lần lượt tương ứng là 14,7%, 8,4%, 36,4% và 32,3% so với bê tông 0GM.

Sự gia tăng cường độ lớn và cải thiện độ chống thấm đáng kể theo thời gian của các bê tông chứa (50-100)%GMT là nhờ sự bảo dưỡng bên trong của GMT cũng như cơ chế chèn khe lấp lỗ rỗng và phản ứng puzolan của các hạt XL. Hoàn toàn có thể sử dụng (50-100)%GMT đã xử lý bão hòa nước để thay thế đá dăm và kết hợp 35%XL để sản xuất bê tông có độ bền cao và thân thiện môi trường.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Ray, M. Haque, M. N. Sakib, A. F. Mita, M. D. M. Rahman, B. B. Tanmoy, Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review, *Journal of Building Engineering*, 43 (2021) 102567. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102567>
- [2]. A. O. Tanash, K. Muthusamy, A. M. A. Budiea, M. A. Fauzi, G. Jokhio, R. Jose, A review on the utilization of ceramic tile waste as cement and aggregates replacement in cement based composite and a bibliometric assessment, *Cleaner Engineering and Technology*, 17 (2023) 100699. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100699>
- [3]. Thủ tướng Chính phủ, Nghị định số 09/2021/NĐ-CP về quản lý vật liệu xây dựng, ngày 9/2/2021.
- [4]. Thủ tướng Chính phủ, Quyết định số 1266/QĐ-TTg, Phê duyệt Chiến lược phát triển vật liệu xây dựng Việt Nam thời kỳ 2021-2030, định hướng đến năm 2050, 18/8/2020.
- [5]. N. H. Hoang, T. Ishigaki, R. Kubota, M. Yamada, K. Kawamoto, A review of construction and demolition waste management in Southeast Asia, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22 (2020) 315–325. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00914-5>
- [6]. A. M. Pitarch, L. Reig, A. E. Tomás, F. J. López, Effect of tiles, bricks and ceramic sanitary-ware recycled aggregates on structural concrete properties, *Waste and Biomass Valorization*, 10 (2017) 1779-1793. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0154-0>
- [7]. S. T. Aly, A. S. El-Dieb, M. R. Taha, Ceramic waste powder for eco-friendly self compacting concrete (SCC). *Advances in Civil Engineering Materials*, 7 (2018) 426–446. <https://doi.org/10.1520/ACEM20180043>
- [8]. P. O. Awoyera, J. O. Akinmusuru, J. M. Ndambuki, Green concrete production with ceramic wastes and laterite, *Construction and Building Materials*, 117 (2016) 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.108>
- [9]. D. J. Anderson, S. T. Smith, F. T. K. Au, Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate, *Construction and Building Materials*, 117 (2016) 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.153>
- [10]. M. Amin, B. A. Tayeh, I. S. Agwa, Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete, *Journal of Cleaner Production*, 273 (2020) 123073. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123073>
- [11]. P. O. Awoyera, J. M. Ndambuki, J. O. Akinmusuru, D. O. Omol, Characterization of ceramic waste aggregate concrete, *HBRC Journal*, 14 (2018) 282-287. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2016.11.003>
- [12]. M. Suzuki, M. S. Meddah, R. Sato, Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 39 (2009) 373–381. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.007>

- [13]. F. Xu, X. Lin, A. Zhou, Q. Liu, Effects of recycled ceramic aggregates on internal curing of high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 322 (2022) 126484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126484>
- [14]. H. Elçi, Utilisation of crushed floor and wall tile wastes as aggregate in concrete production, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016) 742–752. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.003>
- [15]. G. Sua-iam, S. Jamnam, Influence of calcium carbonate on green self-compacting concrete incorporating porcelain tile waste as coarse aggregate replacement, *Case Studies in Construction Materials*, 19 (2023) e02366. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02366>
- [16]. R. V. Meena, J. K. Jain, A. S. Beniwal, H. S. Chouhan, Sustainable self-compacting concrete containing waste ceramic tile aggregates: Fresh, mechanical, durability, and microstructural properties, *Journal of Building Engineering*, 57 (2022) 10494. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104941>
- [17]. S. Siddique, S. Chaudhary, S. Shrivastava, T. Gupta, Sustainable utilisation of ceramic waste in concrete: Exposure to adverse conditions, *Journal of Cleaner Production*, 210 (2019) 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.231>
- [18]. Pham Dinh Huy Hoang, Nguyen Thanh Sang, Vu Ba Duc, Effect of recycled aggregate content from burnt clay bricks and waste concrete on mechanical properties of high strength concrete, *Transport and Communications Science Journal*, 71 (2020) 944-955. <https://doi.org/10.47869/tcsj.71.8.6>
- [19]. Ngô Kim Tuấn, Phan Quang Minh, Nguyễn Hoàng Giang, Nguyễn Tiên Dũng, Nghiên cứu ảnh hưởng của cốt liệu tái chế từ phế thải xây dựng đến tính chất của bê tông rỗng thoát nước, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN*, 15 (2021) 58–69. [http://dx.doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(6V\)-06](http://dx.doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(6V)-06)
- [20]. Lê Trung Thành, Tống Tôn Kiên, Ảnh hưởng của xi lò cao nghiền mịn đến ứng xử cơ học của bê tông sử dụng cốt liệu tái chế, *Tạp chí xây dựng*, 08 (2017) 26-29.
- [21]. Tống Tôn Kiên, Lê Trung Thành, Ảnh hưởng của xi lò cao nghiền mịn đến một số tính chất của bê tông sử dụng cốt liệu tái chế, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 24 (2015) 77-84. <https://stce.huce.edu.vn/index.php/vn/article/view/489/309>
- [22]. T. K. Tong, T.T. Le, T.V.L. Pham, Enhancing the compressive strength and capillary water absorption of recycled aggregate concrete prepared with ground granulated blast-furnace slag, *Proceeding of The 7th international conference of Asian Concrete*, Hanoi, Vietnam, 2016, pp. 139, 8 pages.
- [23]. Quan Van Ho, Trong-Phuoc Huynh, A comprehensive investigation on the impacts of steel slag aggregate on characteristics of high-performance concrete incorporating industrial by-products, *Journal of Building Engineering*, 80 (2023) 107982. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107982>
- [24]. T. P. Huynh, L. S. Ho, Q. V. Ho, Experimental investigation on the performance of concrete incorporating fine dune sand and ground granulated blast-furnace slag, *Construction and Building Materials*, 347 (2022) 128512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128512>
- [25]. Ho Van Quan, The effect of the binder on porosity and chloride diffusion decay coefficient of HPC, *Transport and Communications Science Journal*, 71 (2020) 1120-1129. <https://doi.org/10.47869/tcsj.71.9.10>
- [26]. R. S. Carcano, E. I. Moreno, Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity, *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 1225–1231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.014>