



STUDY ON THE INFLUENCE OF MATERIAL COMPOSITION FACTORS ON THE POROSITY AND COMPRESSIVE STRENGTH OF PERVIOUS CONCRETE

Nguyen Tien Dung^{1*}, Nguyen Van Hung²

¹ University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

² Chi Linh City People's Committee, No 168 Nguyen Trai, Sao Do Ward, Chi Linh City, Hai Duong, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 04/10/2024

Revised: 29/11/2024

Accepted: 11/12/2024

Published online: 15/12/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.9.13>

* *Corresponding author*

Email: nguyen.tiendung@utc.edu.vn

Abstract. Pervious concrete is a potential material for sustainable construction solutions, especially in the context of high requirements for stormwater management and flood reduction. This study investigates the influence of material composition factors on some physical and mechanical properties of concrete including porosity, compressive strength and bulk density. Twelve concrete mixes were produced with properties ranging as follows: compressive strength from 7 to 22 MPa, porosity from 11 to 35%, and bulk density from 1760 to 1930 kg/m³. The experimental results show that the important factors affecting the physical and mechanical properties of pervious concrete include particle size and aggregate distribution, water/cement ratio, aggregate/cement paste ratio, cement content and water content. Optimizing these factors is the key to achieving a balance between strength and porosity, meeting the requirements of practical applications. The results in this study contribute valuable experimental data for mix design of pervious concrete using commonly available materials in Vietnam.

Keywords: Pervious concrete; Porosity; Compressive strength; Bulk density; W/C ratio; Cement content.

@ 2024 University of Transport and Communications



NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ YẾU TỐ THÀNH PHẦN VẬT LIỆU TỚI ĐỘ RỖNG VÀ CƯỜNG ĐỘ CHỊU NÉN CỦA BÊ TÔNG XI MĂNG RỖNG

Nguyễn Tiến Dũng^{1*}, Nguyễn Văn Hưng²

¹ Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

² UBND thành phố Chí Linh, Số 168 Nguyễn Trãi, phường Sao Đỏ, thành phố Chí Linh, Hải Dương, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 04/10/2024

Ngày nhận bài sửa: 29/11/2024

Ngày chấp nhận đăng: 11/12/2024

Ngày xuất bản Online: 15/12/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.9.13>

* Tác giả liên hệ

Email: nguyen.tiendung@utc.edu.vn

Tóm tắt. Bê tông rỗng (BTR) là một vật liệu tiềm năng cho các giải pháp xây dựng bền vững, đặc biệt trong bối cảnh yêu cầu cao về quản lý nước mưa và giảm ngập úng. Nghiên cứu này trình bày ảnh hưởng của các yếu tố thành phần vật liệu đến một số tính chất cơ lý của BTR bao gồm độ rỗng, cường độ chịu nén và khối lượng thể tích. 12 cấp phối bê tông đã được chế tạo với các tính năng cơ lý được điều chỉnh trong một phạm vi tương đối rộng: cường độ chịu nén dao động trong khoảng 7-22 MPa, độ rỗng từ 11-35%, khối lượng thể tích từ 1760-1930 kg/m³. Các kết quả thí nghiệm cho thấy các yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến tính chất cơ lý của BTR bao gồm kích thước và phân bố cốt liệu, tỷ lệ nước/xi măng, tỷ lệ thể tích cốt liệu/hồ xi măng, hàm lượng xi măng và hàm lượng nước. Việc tối ưu hóa các yếu tố này là chìa khóa để đạt được sự cân bằng giữa cường độ và độ rỗng, đáp ứng yêu cầu của các ứng dụng trong thực tế. Các kết quả trong nghiên cứu này góp phần bổ sung thêm dữ liệu thực nghiệm cho công tác thiết kế thành phần BTR trên cơ sở sử dụng các vật liệu phổ biến tại Việt Nam.

Từ khóa: Bê tông rỗng, độ rỗng, cường độ chịu nén, khối lượng thể tích, tỷ lệ N/X, hàm lượng xi măng.

©2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông rỗng thoát nước, hay còn gọi là bê tông thoát nước, là một loại vật liệu xây dựng đặc biệt với khả năng cho phép nước mưa thấm qua kết cấu và tiêu thoát xuống nền đất. Điều này không chỉ giúp giảm thiểu tình trạng ngập úng tại các khu đô thị mà còn góp phần duy trì mực nước ngầm và giảm tải cho hệ thống thoát nước công cộng. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và quá trình đô thị hóa diễn ra nhanh chóng tại nước ta, nhu cầu về các giải pháp bền vững trong xây dựng ngày càng cấp thiết hơn bao giờ hết. Bê tông rỗng thoát nước được xem là một trong những giải pháp tiên tiến đáp ứng được yêu cầu này. Các ứng dụng phổ biến của vật liệu này bao gồm xây dựng vỉa hè, bãi đỗ xe, đường giao thông và các công trình cảnh quan, nơi yêu cầu khả năng tiêu thoát nước nhanh chóng và hiệu quả [1]. Bê tông xi măng rỗng là loại bê tông đặc biệt được thiết kế với mục tiêu tối ưu hóa độ rỗng để cho phép nước thoát qua dễ dàng, đồng thời vẫn phải đảm bảo cường độ chịu nén đủ để sử dụng trong các công trình hạ tầng. Để đạt được mục đích này, các yếu tố về thành phần vật liệu và công thức thành phần đóng vai trò quyết định đến các tính chất cơ lý của bê tông rỗng (BTR). Những yếu tố quan trọng nhất có thể kể đến như tỷ lệ nước/xi măng, kích thước hạt cốt liệu, tỷ lệ cốt liệu/xi măng, tỷ lệ thể tích cốt liệu/hồ xi măng, lượng xi măng, hàm lượng nước nhào trộn.

Tỷ lệ nước/xi măng (N/X) là một yếu tố then chốt ảnh hưởng đến cường độ chịu nén, độ rỗng và khả năng thoát nước của BTR. Tỷ lệ N/X thấp (thường từ 0,25 đến 0,35) có thể tăng cường độ của BTR, nhưng nếu quá thấp, sẽ dẫn đến hỗn hợp bê tông bị khô, khó thi công và không đảm bảo sự kết dính tốt giữa xi măng và cốt liệu. Bên cạnh đó, tỷ lệ N/X thấp có nguy cơ làm giảm khả năng thoát nước, điều này có thể không phù hợp với các ứng dụng yêu cầu cao về khả năng thoát nước [2]. Ngược lại, tỷ lệ N/X cao làm tăng tính công tác, tăng khả năng tạo hình nhưng có thể làm giảm cường độ chịu nén của BTR do giảm sự liên kết giữa các hạt xi măng và cốt liệu. Mặt khác, tỷ lệ N/X cao hơn có thể làm giảm độ rỗng và khả năng thoát nước của bê tông vì hồ xi măng thừa sẽ lấp đầy các lỗ rỗng.

Cốt liệu đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định độ rỗng và cường độ chịu nén của BTR. Các yếu tố liên quan đến cốt liệu bao gồm: Kích thước hạt cốt liệu và phân bố kích thước hạt. Khi kích thước hạt cốt liệu tăng, độ rỗng của bê tông cũng tăng, đồng nghĩa với việc khả năng thoát nước tốt hơn, nhưng điều này lại làm giảm cường độ chịu nén. Phân bố kích thước hạt không hợp lý có thể làm giảm độ rỗng và làm cho hỗn hợp bê tông không đồng đều, ảnh hưởng đến các tính chất cơ lý của BTR [3].

Tỷ lệ giữa cốt liệu và xi măng là một yếu tố quan trọng khác ảnh hưởng đến tính công tác, độ rỗng và độ bền của BTR. Tỷ lệ cốt liệu/xi măng cao sẽ tăng độ rỗng, làm tăng khả năng thoát nước, nhưng có thể làm giảm cường độ chịu nén vì hồ xi măng không đủ để liên kết tất cả các hạt cốt liệu. Tỷ lệ cốt liệu/xi măng thấp làm tăng cường độ nhưng giảm độ rỗng và giảm khả năng thoát nước. Các nghiên cứu chỉ ra rằng tỷ lệ cốt liệu/xi măng tối ưu cho BTR thường nằm trong khoảng từ 4:1 đến 6:1 [4].

Một yếu tố khác là lượng xi măng cần thiết phải đủ để đảm bảo sự kết dính giữa các hạt cốt liệu nhưng không quá nhiều để tránh lấp đầy các lỗ rỗng. Lượng xi măng quá cao có thể làm giảm độ rỗng của BTR, từ đó giảm khả năng thoát nước. Tuy nhiên, nó có thể làm tăng cường độ chịu nén. Lượng xi măng quá thấp làm giảm sự kết dính giữa cốt liệu, làm suy giảm cường độ của bê tông. Theo nghiên cứu của Deo và Neithalath [4], sự gia tăng hàm lượng xi măng từ 200 kg/m³ lên 300 kg/m³ đã làm tăng cường độ chịu nén lên khoảng 30%, nhưng đồng thời giảm độ rỗng từ 20% xuống còn 15%, làm ảnh hưởng đến tính năng thoát nước. Nghiên

cứu cho thấy hàm lượng xi măng phù hợp thường nằm trong khoảng 270 - 350 kg/m³ BTR, tùy thuộc vào yêu cầu thiết kế.

Lượng nước nhào trộn ảnh hưởng trực tiếp đến tính công tác, độ rỗng và cường độ chịu nén của BTR. Hàm lượng nước quá ít sẽ làm hỗn hợp khô, khó thi công, giảm tính công tác và gây ra các lỗ rỗng không đều. Hàm lượng nước quá nhiều làm giảm độ rỗng, tăng khả năng co ngót và làm suy yếu cường độ chịu nén của BTR [5-6]. Bên cạnh đó lượng nước dư thừa có thể dẫn đến hiện tượng bê tông bị phân tầng, khiến cho hệ thống lỗ rỗng bị tắc và làm cản trở sự thoát nước của BTR.

Tỷ lệ thể tích cốt liệu/hồ xi măng ảnh hưởng đến cả độ rỗng và khả năng chịu lực của bê tông. Thể tích cốt liệu lớn hơn nhiều lần so với hồ xi măng sẽ tạo ra độ rỗng lớn, tăng khả năng thoát nước nhưng làm giảm cường độ. Ngược lại, khi tỷ lệ thể tích cốt liệu/hồ xi măng giảm, bê tông trở nên đặc chắc hơn, tăng cường độ chịu nén nhưng lại giảm tính thoát nước [4]. Tỷ lệ thể tích tối ưu thường được cân đối trong thiết kế để đảm bảo vừa có khả năng thoát nước vừa có cường độ chịu lực đủ cao. Tỷ lệ cốt liệu/hồ xi măng đóng một vai trò quan trọng trong việc xác định độ rỗng và cường độ của BTR. Việc thay đổi tỷ lệ này sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng thoát nước và độ bền của bê tông. Rất nhiều các nghiên cứu đã chỉ ra tính thoát nước và cường độ của BTR có mối liên hệ mật thiết với độ rỗng [7-11].

Dựa trên các phân tích ở trên, nghiên cứu này tập trung nghiên cứu và làm sáng tỏ thêm ảnh hưởng của các yếu tố thành phần vật liệu đến một số tính chất cơ lý của BTR trong điều kiện sử dụng các vật liệu tại Việt Nam.

2. VẬT LIỆU CHẾ TẠO VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

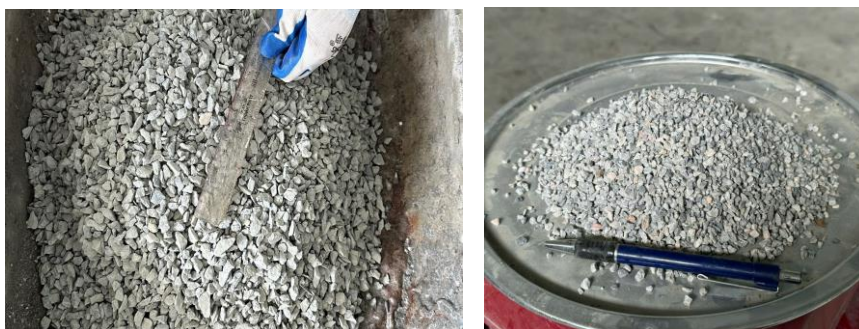
2.1. Vật liệu chế tạo

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm cốt liệu, xi măng, nước và phụ gia siêu dẻo (PGSD).

- **Cốt liệu:** Để chế tạo BTR, cốt liệu thường có cấp phối gián đoạn hoặc chỉ dùng một cỡ hạt. Cấp phối hạt gián đoạn có thể được hiểu là sự phân bố không liên tục, trong đó một số dải kích thước hạt không xuất hiện hoặc chiếm tỷ lệ rất nhỏ, tạo ra sự không đồng đều trong cấu trúc hạt. Thành phần cốt liệu khi đó bao gồm các hạt lớn và nhỏ xen kẽ, nhưng thiếu các hạt trung gian. Do đó, cấu trúc cốt liệu trở nên kém đặc chắc hơn so với cấp phối liên tục. Kích thước hạt phổ biến cho BTR là 5-20 mm. Hiện nay chưa có nhiều nghiên cứu xét đến loại cốt liệu có kích thước dưới 5 mm. Do đó, để nghiên cứu ảnh hưởng của kích thước hạt cốt liệu đến các tính chất của BTR, nghiên cứu này sử dụng 2 loại cốt liệu là cốt liệu 5-10 mm và cốt liệu 3-5 mm có các chỉ tiêu kỹ thuật được trình bày ở bảng 1. Hai loại cốt liệu này thu được bằng cách nghiền từ cùng một nguồn đá gốc, sau đó sàng phân loại theo cỡ hạt.

Bảng 1. Các đặc tính kỹ thuật của 2 loại cốt liệu.

Tên chỉ tiêu	Cốt liệu 5-10 mm	Cốt liệu 3-5 mm
Khối lượng riêng, g/cm ³	2,67	2,66
Khối lượng thể tích xốp, g/cm ³	1,31	1,38
Độ rỗng (giữa các hạt cốt liệu), %	49,8	46,9
Độ hút nước (%)	0,5	0,6



Hình 1. Hai loại cốt liệu sử dụng trong nghiên cứu: Cốt liệu 5-10 mm (trái), Cốt liệu 3-5 mm (phải).

- **Xi măng:** Để chế tạo BTR, có thể sử dụng nhiều loại xi măng khác nhau. Tại Việt Nam, có thể sử dụng xi măng portland (PC) hoặc xi măng portland hỗn hợp (PCB) với 2 mức phổ biến là 30 và 40 MPa. Để tối ưu hoá về cường độ, nghiên cứu này sử dụng xi măng PC40 của hãng Xuân Thành với các chỉ tiêu kỹ thuật phù hợp với tiêu chuẩn TCVN 2682:2020 [12].

- **Phụ gia siêu dẻo:** Để đảm bảo tính công tác cho BTR, nghiên cứu này sử dụng phụ gia siêu dẻo giảm nước cao Sikament NN, gốc Naphthalene Sulfonate Formaldehyde của hãng Sika.

2.2 Tính toán thành phần

Các cấp phối được tính toán và lựa chọn nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố thành phần vật liệu đến các tính chất cơ lý của BTR. Các yếu tố thành phần được xét đến bao gồm kích thước hạt cốt liệu, tỷ lệ N/X, tỷ lệ Cốt liệu/Xi măng (CL/X), tỷ lệ theo thể tích Cốt liệu/Hồ xi măng (CL/H). Chín cấp phối ký hiệu từ CP1 đến CP9 được lựa chọn với các tỷ lệ N/X là 0,25; 0,3 và 0,37, tỷ lệ CL/X là 4,3; 5,6 và 6,3. Các cấp phối này sử dụng cốt liệu 5-10 mm. Ba cấp phối còn lại (từ CP10 đến CP12) sử dụng cốt liệu 3-5 mm và có tỷ lệ N/X=0,37. Tỷ lệ CL/H của 12 cấp phối dao động trong khoảng từ 2 đến 3,6. Các cấp phối được tính toán dựa trên một số khuyến cáo trong chỉ dẫn thiết kế của ACI PRC-522-23 [13], sau đó được điều chỉnh bằng thực nghiệm. Có thể kể đến một số yếu tố như: tỷ lệ N/X khoảng 0,26-0,4 để đảm bảo hồ xi măng đủ gắn kết và không lấp đầy các lỗ rỗng giữa các hạt cốt liệu, lượng nước khoảng 50-120 kg/m³, cốt liệu khoảng 1400-1600 kg/m³. Sau khi nhào trộn các hỗn hợp bê tông, khối lượng thể tích của bê tông tươi được xác định, từ đó tính toán lại thành phần cấp phối cho 1m³ hỗn hợp bê tông và xác định được thể tích rỗng, độ rỗng của bê tông tươi. Thành phần cấp phối cho 1m³ hỗn hợp bê tông của 12 cấp phối (theo khối lượng và theo thể tích) được trình bày ở các bảng 2, 3, 4 và 5.

Bảng 2. Thành phần cấp phối cho 1m³ bê tông theo khối lượng (các cấp phối CP1-CP6).

Vật liệu	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Loại cốt liệu	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Cốt liệu (kg)	1492	1487	1379	1524	1535	1450
Xi măng (kg)	282	315	380	288	326	400
Nước (kg)	104	117	141	86	98	120
Phụ gia siêu dẻo (kg)	0,71	0,79	0,00	1,44	1,63	0,00
Khối lượng thể tích hỗn hợp (kg/m ³)	1880	1920	1900	1900	1960	1970
Tỷ lệ N/X	0,37	0,37	0,37	0,3	0,3	0,3
Tỷ lệ CL/X	5,3	4,7	3,6	5,3	4,7	3,6

Bảng 3. Thành phần cấp phối cho 1m³ bê tông theo khối lượng (các cấp phối CP7-CP12).

Vật liệu	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12
Loại cốt liệu	5-10 mm	5-10 mm	5-10 mm	3-5 mm	3-5 mm	3-5 mm
Cốt liệu (kg)	1438	1485	1419	1540	1534	1510
Xi măng (kg)	272	315	391	291	325	365
Nước (kg)	68	79	98	108	120	135
Phụ gia siêu dẻo (kg)	1,36	1,57	1,71	1,46	0,81	0,00
Khối lượng thể tích hỗn hợp (kg/m ³)	1780	1880	1910	1940	1980	2010
Tỷ lệ N/X	0,25	0,25	0,25	0,37	0,37	0,37
Tỷ lệ CL/X	5,3	4,7	3,6	5,3	4,7	4,1

Bảng 4. Thành phần cấp phối cho 1m³ bê tông theo thể tích (các cấp phối CP1-CP6).

Vật liệu	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Loại cốt liệu	5-10 mm	5-10 mm	5-10 mm	3-5 mm	3-5 mm	3-5 mm
Cốt liệu (lít)	574	572	530	586	590	558
Xi măng (lít)	91	102	123	93	105	129
Nước (lít)	104	117	141	86	98	120
Phụ gia siêu dẻo (lít)	0,64	0,72	0,00	1,31	1,48	0,00
Thể tích rỗng (lít)	230	209	206	233	205	193
Độ rỗng của hỗn hợp bê tông (%)	23,0	20,9	20,6	23,3	20,5	19,3
Hồ xi măng (lít)	196	218	263	179	203	249
Tỷ lệ thể tích CL/H	2,9	2,6	2,0	3,3	2,9	2,2

Bảng 5. Thành phần cấp phối cho 1m³ bê tông theo thể tích (các cấp phối CP7-CP12).

Vật liệu	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12
Loại cốt liệu	5-10 mm	5-10 mm	5-10 mm	3-5 mm	3-5 mm	3-5 mm
Cốt liệu (lít)	553	571	546	592	590	581
Xi măng (lít)	88	102	126	94	105	118
Nước (lít)	68	79	98	108	120	135
Phụ gia siêu dẻo (lít)	1,24	1,43	1,56	1,32	0,74	0,00
Thể tích rỗng (lít)	290	247	229	205	184	167
Độ rỗng của hỗn hợp bê tông (%)	29,0	24,7	22,9	20,5	18,4	16,7
Hồ xi măng (lít)	156	180	224	202	225	253
Tỷ lệ thể tích CL/H	3,6	3,2	2,4	2,9	2,6	2,3

2.3 Chế tạo mẫu và phương pháp thí nghiệm

BTR được trộn bằng máy trộn tự do với tổng thời gian trộn là 5 phút. Trước tiên, toàn bộ hỗn hợp cốt liệu và xi măng được trộn khô trong vòng 1 phút. Tiếp theo, cho từ từ nước đã trộn với PGSD vào máy trộn và trộn trong vòng 4 phút. Sau khi nhào trộn xong, hỗn hợp bê tông được đổ vào khuôn và tiến hành đầm trên máy đầm rung trong thời gian là 30 giây. Sau khi đầm xong, các mẫu được hoàn thiện bề mặt và bảo dưỡng ở điều kiện nhiệt độ của phòng thí

nghiệm và phủ ẩm trên bề mặt trong vòng 24 giờ đầu. Sau đó, mẫu được tháo khuôn và ngâm trong nước cho đến ngày tuổi thí nghiệm.



Hình 2. Trộn hỗn hợp BTR bằng máy trộn tự do Hình 3. Đầm hỗn hợp BTR bằng máy đầm rung

Các tính chất cơ lý của BTR được xét đến trong nghiên cứu này bao gồm khối lượng thể tích của bê tông tươi, khối lượng thể tích của bê tông ở 28 ngày tuổi, độ rỗng ở trạng thái khô và trạng thái bão hoà nước, cường độ chịu nén ở 7 và 28 ngày tuổi. Các mẫu thí nghiệm xác định cường độ chịu nén có dạng hình lập phương cạnh 100 mm. Do hiện nay tại Việt Nam chưa có tiêu chuẩn dành riêng cho BTR, nghiên cứu này sử dụng tiêu chuẩn TCVN 3118:2022 [14] để xác định cường độ chịu nén của BTR. Để xác định độ rỗng, các mẫu BTR có dạng hình trụ, đường kính 87 mm, chiều cao 150 mm đã được chế tạo. Các mẫu hình trụ này được đúc trong khuôn bằng ống nhựa có đường kính ngoài 90 mm, được bịt kín một đầu để tạo thành đáy khuôn.



Hình 4. Bảo dưỡng các mẫu BTR trong nước. Hình 5. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của BTR.

Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông được xác định bằng cách cân khối lượng của mẫu ngay sau khi mẫu đã được đầm chặt trong khuôn. Thể tích của mẫu chính bằng thể tích trong của khuôn. Để xác định độ rỗng của BTR ở trạng thái khô, các mẫu được sấy khô đến khối lượng không đổi trước khi thí nghiệm. Để xác định độ rỗng của BTR ở trạng thái bão hoà nước, các mẫu được ngâm trong nước trong khoảng 48 giờ để đạt đến trạng thái bão hoà nước, sau đó vớt ra, để ráo nước và lau khô bề mặt. Mẫu thí nghiệm được đặt trong khuôn nhựa, đáy bọc kín, sau đó đem cân xác định khối lượng ban đầu (m_1). Sau đó rót nước vào trong mẫu cho đến khi nước dâng đến mặt trên của mẫu. Chờ khoảng 20 phút cho các bọt khí thoát ra rồi tiếp tục rót nước để mực nước cao bằng mặt trên của mẫu. Tiến hành cân lại và xác định được khối lượng

m_2 . Sự chênh lệch khối lượng giữa m_1 và m_2 tương ứng với lượng nước đã lấp đầy các lỗ rỗng. Tiến hành chuyển đổi khối lượng này về thể tích và tính toán độ rỗng của BTR theo thể tích.

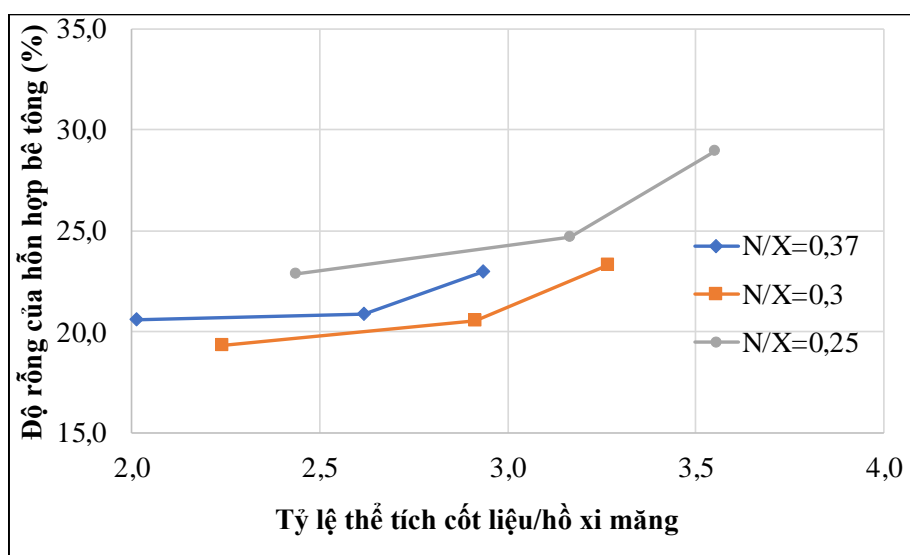
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Độ rỗng của BTR

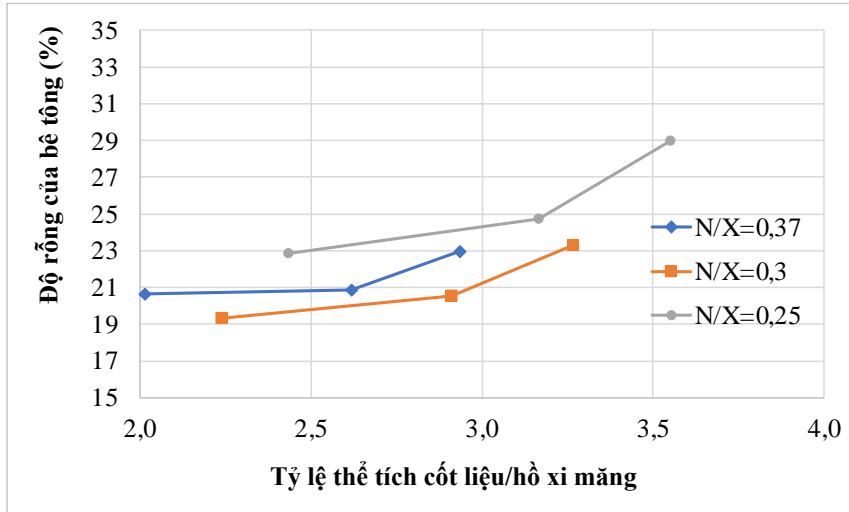
- Ảnh hưởng của tỷ lệ thể tích Cốt liệu/Hồ xi măng và hàm lượng xi măng đến độ rỗng

Các kết quả thực nghiệm cho thấy tỷ lệ thể tích Cốt liệu/Hồ xi măng (CL/H) có mối liên hệ chặt chẽ với độ rỗng của hỗn hợp bê tông. Độ rỗng của hỗn hợp bê tông có xu hướng tăng lên khi tăng tỷ lệ CL/H (hình 6). Giá trị này phụ thuộc vào độ rỗng giữa các hạt cốt liệu, bởi vậy, khi tăng hàm lượng cốt liệu thì phần thể tích rỗng này sẽ tăng lên. Mặt khác, phần thể tích này sẽ được lấp đầy một phần bởi hồ xi măng và do đó, phụ thuộc vào mức độ lấp đầy lỗ rỗng của pha hồ xi măng. Như vậy, độ rỗng của hỗn hợp bê tông tỷ lệ thuận với hàm lượng cốt liệu và tỷ lệ nghịch với hàm lượng xi măng. Do đó giá trị này sẽ có xu hướng tăng lên khi tăng tỷ lệ CL/H hoặc khi giảm hàm lượng xi măng.

Bên cạnh đó, tỷ lệ CL/H cũng ảnh hưởng rõ nét đến độ rỗng của BTR (hình 7). Khi xét các cấp phối có cùng tỷ lệ N/X, độ rỗng của BTR ở trạng thái khô và ở trạng thái bão hoà nước đều có xu hướng tăng lên khi tăng tỷ lệ CL/H. Khi tỷ lệ CL/H = 2,0-2,4 thì BTR có độ rỗng khoảng 17-20%. Khi tỷ lệ CL/H = 2,9-3,3 thì độ rỗng của BTR là khoảng 22-24%. Đặc biệt, khi tăng tỷ lệ CL/H lên đến 3,6 thì độ rỗng của BTR tăng vọt lên đến mức 30,3% như trong trường hợp CP7. Như vậy có thể nhận định tỷ lệ CL/H là một yếu tố quyết định đến độ rỗng của BTR. Đây là yếu tố then chốt trong bài toán thiết kế BTR theo tiêu chí độ rỗng.



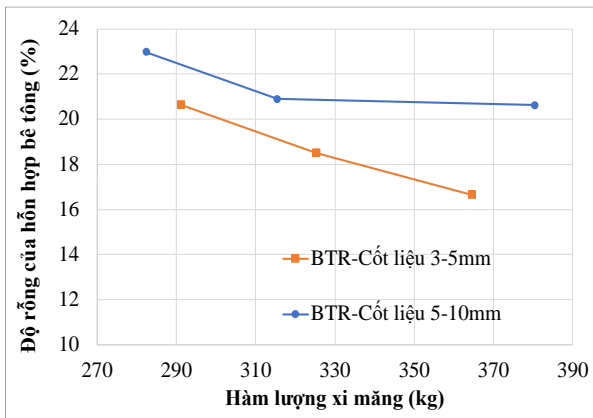
Hình 6. Ảnh hưởng của tỷ lệ thể tích cốt liệu/hồ xi măng đến độ rỗng của hỗn hợp bê tông



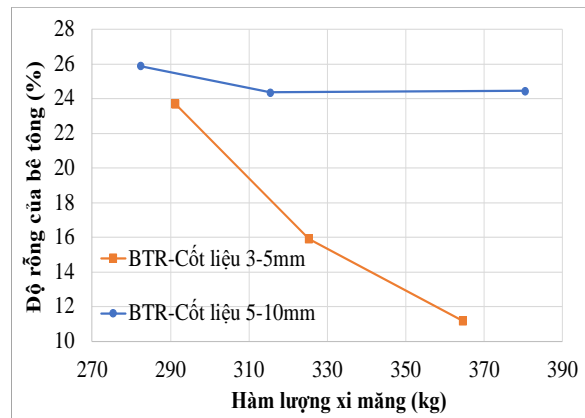
Hình 7. Ảnh hưởng của tỷ lệ thể tích cốt liệu/hồ xi măng đến độ rỗng của bê tông (ở trạng thái khô)

- Ảnh hưởng của kích thước cốt liệu đến độ rỗng

Khi so sánh độ rỗng của hỗn hợp bê tông của các cấp phối CP1, CP2, CP3 dùng cốt liệu 5-10 mm và các cấp phối CP10, CP11, CP12 dùng cốt liệu 3-5 mm, ta thấy các cặp cấp phối có hàm lượng xi măng, thể tích hồ xi măng và tỷ lệ CL/H tương đương nhau là CP1 và CP10, CP2 và CP11, CP3 và CP12. Tuy nhiên các cặp cấp phối này lại có sự chênh lệch về độ rỗng. Các cấp phối CP10, CP11, CP12 có độ rỗng thấp hơn các cấp phối CP1, CP2, CP3 khoảng 2,4-4%. Xu hướng này còn trở nên rõ nét hơn khi so sánh độ rỗng của bê tông (ở trạng thái khô và trạng thái bão hoà nước) của các cấp phối này. Các kết quả thí nghiệm cho thấy độ rỗng (giữa các hạt cốt liệu) của cốt liệu 5-10mm là 49,8%, lớn hơn độ rỗng của cốt liệu 3-5mm (46,9%). Do đó, với cùng một hàm lượng hồ xi măng tương đương thì độ rỗng của các cấp phối dùng cốt liệu 5-10mm sẽ lớn hơn so với khi dùng cốt liệu 3-5mm. Điều này kéo theo sự chênh lệch về độ rỗng của hỗn hợp bê tông và của bê tông đã đóng rắn khi thay thế cốt liệu 5-10mm bằng cốt liệu 3-5 mm.



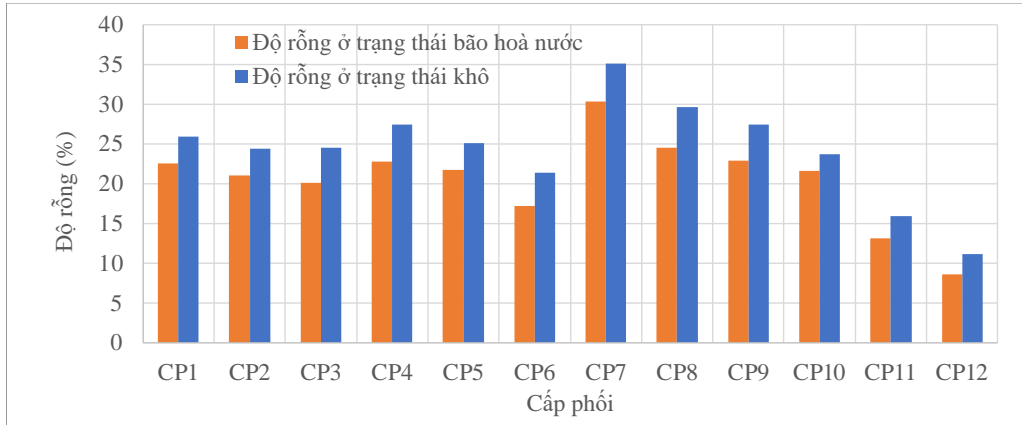
Hình 8. Ảnh hưởng của kích thước cốt liệu đến độ rỗng của hỗn hợp bê tông.



Hình 9. Ảnh hưởng của kích thước cốt liệu đến độ rỗng của bê tông (ở trạng thái khô).

- Tương quan giữa độ rỗng của BTR ở trạng thái khô và độ rỗng của BTR ở trạng thái bão hoà nước

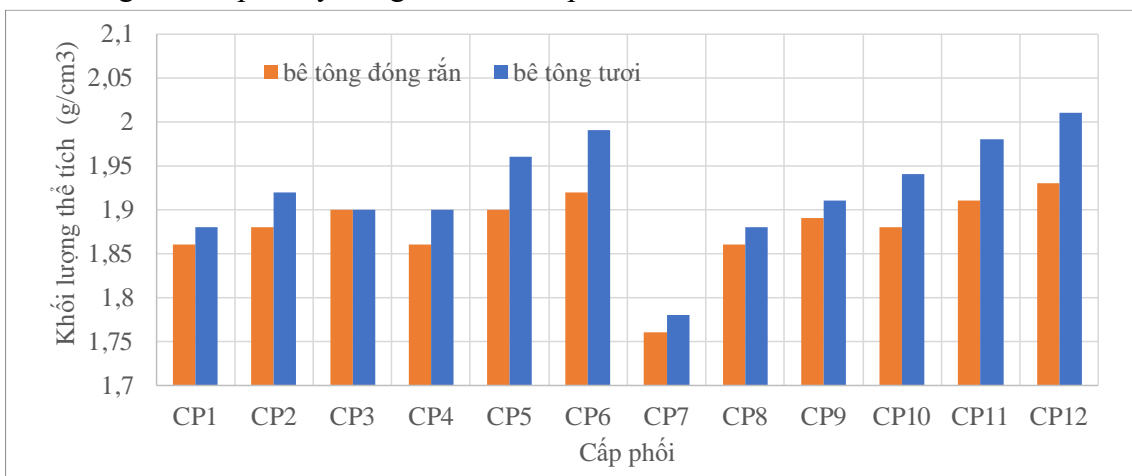
Các kết quả thí nghiệm thu được chỉ ra rằng độ rỗng của BTR ở trạng thái khô tỷ lệ thuận với độ rỗng của BTR ở trạng thái bão hoà nước. Mức chênh lệch về độ rỗng giữa 2 trạng thái này dao động trong khoảng 3-5% (hình 10). Sự chênh lệch này liên quan đến phần thể tích lỗ rỗng trước đó đã được lấp đầy nước ở trạng thái bão hoà nước so với ở trạng thái khô.



Hình 10. Độ rỗng của BTR (ở trạng thái khô và trạng thái bão hoà nước).

3.2. Khối lượng thể tích của BTR

Khối lượng thể tích của của bê tông tươi (hỗn hợp bê tông) và của bê tông đã đóng rắn (ở 28 ngày tuổi) được trình bày ở hình 11. Kết quả cho thấy khối lượng thể tích của bê tông đã đóng rắn giảm so với bê tông tươi. Điều này có thể do một phần nước trong bê tông tươi bị bốc hơi trong 24 giờ đầu tiên kể từ khi đổ khuôn và trước thời điểm mẫu được tháo khỏi khuôn và bảo dưỡng trong nước. Mặt khác mức độ lèn chặt của bê tông có thể thay đổi khi chuyển từ trạng thái ướt sang trạng thái đóng rắn. Cũng có thể thấy khối lượng thể tích của BTR thấp hơn bê tông truyền thống. Bê tông truyền thống có khối lượng thể tích trong khoảng 2300-2450 kg/m³, trong khi đó khối lượng thể tích của các cấp phối BTR trong nghiên cứu này dao động trong khoảng 1760-1990 kg/m³. Điều này giúp giảm đáng kể tải trọng bản thân của kết cấu công trình, từ đó giảm chi phí xây dựng cho kết cấu phần dưới.



Hình 11. Khối lượng thể tích của BTR .

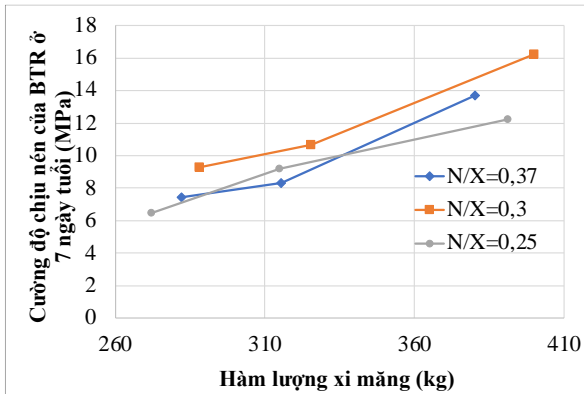
3.3. Cường độ chịu nén của BTR

a. Khi dùng cốt liệu 5-10 mm

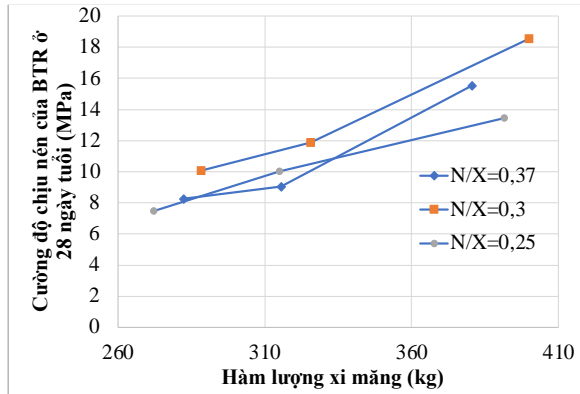
- Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng và thể tích hồ xi măng đến cường độ chịu nén của BTR

Với các cấp phối có cùng tỷ lệ N/X, cường độ chịu nén ở 7 và 28 ngày tuổi tăng khi tăng hàm lượng xi măng và thể tích hồ xi măng. Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng và thể tích hồ xi măng đến cường độ chịu nén của BTR ở 7 và 28 ngày tuổi được trình bày ở các hình 12, 13, 14 và 15. Với các cấp phối có tỷ lệ N/X=0,37: Khi tăng hàm lượng xi măng từ 282 kg lên 315 kg thì cường độ chịu nén của BTR tăng từ 8,3 MPa lên 9,1 MPa ở 28 ngày tuổi. Cường độ chịu nén của BTR có sự thay đổi đáng kể khi hàm lượng xi măng sử dụng là 380 kg. Khi đó, cường độ chịu nén đạt 15,52 MPa ở 28 ngày tuổi. Với các cấp phối có tỷ lệ N/X=0,3 và N/X = 0,25: Tương tự như với trường hợp tỷ lệ N/X=0,37, các cấp phối này cho thấy hàm lượng xi măng và thể tích hồ xi măng là một yếu tố quan trọng trong thiết kế thành phần BTR và có ảnh hưởng rõ rệt đến cường độ chịu nén của BTR.

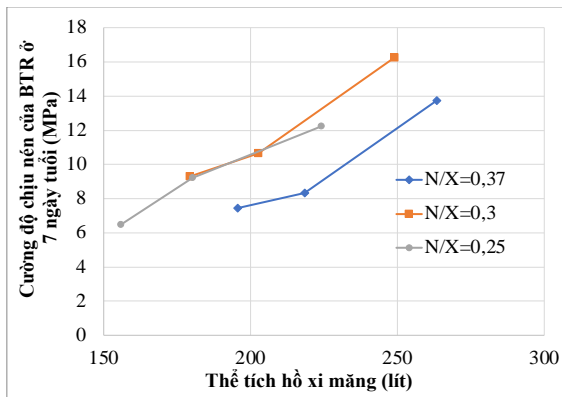
Với 9 cấp phối có tỷ lệ N/X dao động trong khoảng 0,25 đến 0,37, khi hàm lượng xi măng sử dụng dao động trong khoảng 310-320 kg thì cường độ chịu nén của BTR dao động trong khoảng 8-12 MPa. Khi hàm lượng xi măng tăng lên mức 380-400 kg thì cường độ chịu nén của BTR tăng đến 30-70% và đạt khoảng 14-18 MPa.



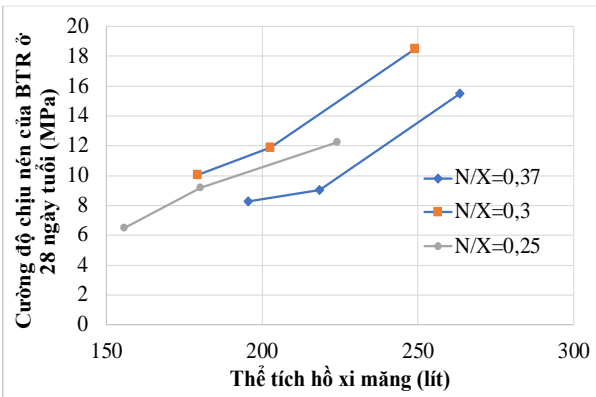
Hình 12. Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến cường độ chịu nén của BTR ở 7 ngày tuổi.



Hình 13. Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến cường độ chịu nén của BTR ở 28 ngày tuổi.



Hình 14. Ảnh hưởng của thể tích hồ xi măng đến cường độ chịu nén của BTR ở 7 ngày tuổi.



Hình 15. Ảnh hưởng của thể tích hồ xi măng đến cường độ chịu nén của BTR ở 28 ngày tuổi.

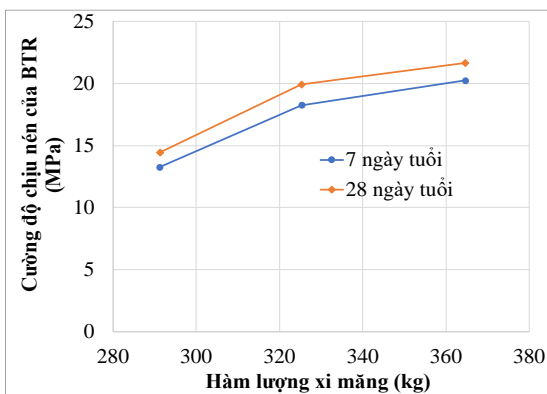
- Ảnh hưởng của tỷ lệ N/X đến Cường độ chịu nén

Khi so sánh các cấp phối có hàm lượng xi măng, thể tích hồ xi măng và lỗ rỗng khí tương đương, các cấp phối có tỷ lệ N/X=0,3 đều có cường độ chịu nén cao hơn các cấp phối có tỷ lệ

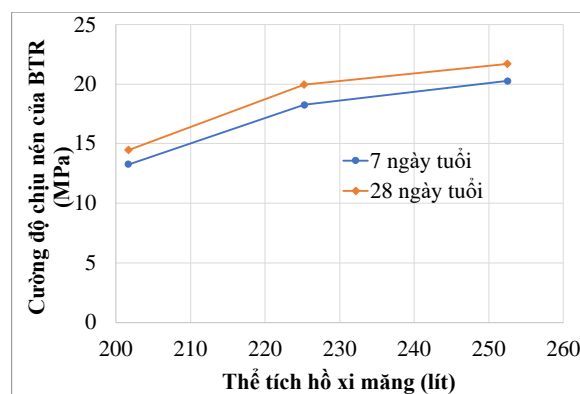
$N/X=0,37$. Điều này đã có thể được giải thích bởi sự khác biệt về chất lượng của pha đá xi măng trong 2 trường hợp tỷ lệ $N/X=0,3$ và $N/X=0,37$. CP1 và CP4 có hàm lượng cốt liệu, xi măng, độ rỗng tương đương. Thể tích hồ xi măng của CP4 thậm chí thấp hơn thể tích hồ xi măng của CP1. Tuy vậy cường độ chịu nén của CP4 cao hơn khoảng 20% so với CP1. Xu hướng tương tự cũng được quan sát thấy khi so sánh CP2 với CP5 và CP3 với CP6. Như vậy, có thể khẳng định tỷ lệ N/X là một yếu quan trọng quyết định đến cường độ chịu nén của BTR.

Tuy nhiên khi giảm tỷ lệ $N/X=0,3$ xuống còn 0,25 thì các cường độ chịu nén của BTR lại suy giảm mạnh. Khi so sánh CP4 với CP7, ta nhận thấy 2 cấp phối này có hàm lượng xi măng tương đương nhau nhưng CP7 có thể tích hồ xi măng thấp hơn CP4 khoảng 13%. Mặt khác độ rỗng trong CP7 là 35%, cao hơn hẳn so với CP4 là 24,5%. Kết quả là 2 cấp phối này có sự chênh lệch đáng kể về cường độ chịu nén. Cường độ chịu nén của CP4 và CP7 ở 28 ngày tuổi lần lượt là 10,1 MPa và 7,5 MPa. Xu hướng tương tự cũng được ghi nhận khi so sánh CP5 với CP8 và CP6 với CP9. Mặc dù chất lượng hồ xi măng tăng lên khi giảm tỷ lệ N/X từ 0,3 xuống còn 0,25, tuy nhiên thể tích hồ xi măng của các cấp phối CP7, CP8, CP9 lại thấp hơn CP4, CP5, CP6 khoảng 10-15%. Bên cạnh yêu cầu về cường độ, thể tích hồ xi măng phải đủ lớn để có thể bao bọc và gắn kết được pha cốt liệu, từ đó cốt liệu mới đảm bảo được vai trò là bộ khung chịu lực chính cho BTR. Ở các cấp phối CP7, CP8, CP9, lượng hồ xi măng như vậy là chưa đủ để bao bọc, gắn kết các hạt cốt liệu, điều này làm giảm khả năng chịu lực của bộ khung cốt liệu, qua đó làm suy giảm khả năng chịu lực của BTR. Mặt khác độ rỗng tăng lên sẽ làm suy giảm khả năng truyền lực giữa các hạt cốt liệu, từ đó ảnh hưởng đến cường độ chịu nén của BTR. Thêm vào đó, lượng nước nhào trộn của các cấp phối CP7, CP8, CP9 đều thấp (dưới 100kg cho $1m^3$ bê tông). Đặc biệt là khi lượng nước quá ít như cấp phối CP7 và CP8 thì sẽ gây khó khăn trong quá trình nhào trộn, hỗn hợp bê tông dễ bị vón cục, hồ xi măng sẽ khó phân bố đồng đều. Điều này dẫn đến cường độ chịu nén bị suy giảm mạnh.

b. Khi dùng cốt liệu 3-5 mm



Hình 16. Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến cường độ chịu nén của BTR (dùng cốt liệu 3-5 mm) ở 7 và 28 ngày tuổi.



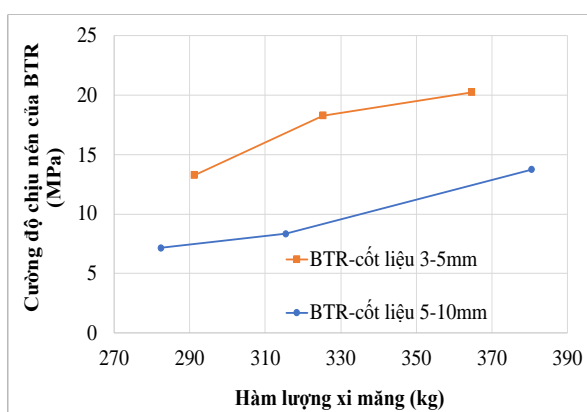
Hình 17. Ảnh hưởng của thể tích hồ xi măng đến cường độ chịu nén của BTR (dùng cốt liệu 3-5 mm) ở 7 và 28 ngày tuổi.

Với các cấp phối CP10, CP11 và CP12 có cùng tỷ lệ $N/X=0,37$, ảnh hưởng của hàm lượng xi măng và thể tích hồ xi măng đến cường độ chịu nén của các cấp phối này được trình bày ở các hình 16, 17. Khi tăng hàm lượng xi măng từ 287 kg (CP10) lên 319 kg (CP11) và 357 kg (CP12) thì cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi tăng từ 14,5 MPa lên lần lượt là 20 MPa và 21,7 MPa. Xét về thể tích hồ xi măng, khi phần thể tích này tăng từ 200 lít lên 250 lít thì cường độ chịu nén của BTR ở 28 ngày tuổi tăng mạnh từ 14,5 MPa lên 21,7 MPa, tương ứng với mức tăng khoảng 50%. Như vậy, ảnh hưởng của hàm lượng xi măng và thể tích hồ xi măng đến

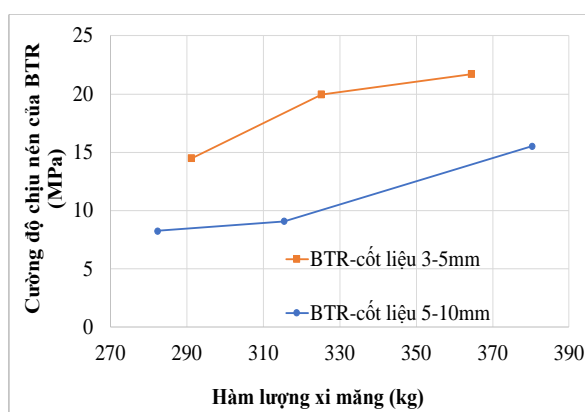
cường độ chịu nén của BTR đều rất rõ nét trong cả 2 trường hợp dùng cốt liệu 5-10 mm và 3-5 mm.

c. Ảnh hưởng của kích thước cốt liệu đến cường độ chịu nén

Khi so sánh cường độ chịu nén của các cấp phối CP1, CP2, CP3 dùng cốt liệu 5-10 mm và các cấp phối CP10, CP11, CP12 dùng cốt liệu 3-5 mm, ta thấy như sau: các cấp phối này có cùng tỷ lệ $N/X=0,37$ và lượng xi măng sử dụng dao động trong khoảng 280-380 kg. Các cấp phối có hàm lượng xi măng, thể tích hồ xi măng tương đương nhau là CP1 và CP10, CP2 và CP11, CP3 và CP12. Tuy nhiên các cấp phối này lại có sự chênh lệch rất lớn về cường độ chịu nén. Tương quan về cường độ chịu nén của các cấp phối này được thể hiện trên hình 18 và 19.



Hình 18. Ảnh hưởng của kích thước cốt liệu đến cường độ chịu nén của BTR ở 7 ngày tuổi.



Hình 19. Ảnh hưởng của kích thước cốt liệu đến cường độ chịu nén của BTR ở 28 ngày tuổi.

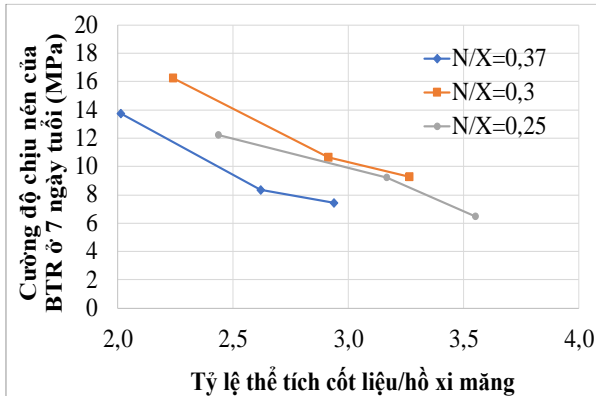
Cấp phối CP1 và CP10 có cùng tỷ lệ N/X và hàm lượng xi măng tương đương (khoảng 280 kg) nhưng cường độ chịu nén của CP10 cao hơn gần gấp đôi so với CP1. Cấp phối CP10 có cường độ chịu nén đạt lần lượt là 13,3 MPa và 14,5 MPa ở 7 và 28 ngày tuổi, trong khi cường độ chịu nén của CP1 ở 7 và 28 ngày tuổi chỉ đạt lần lượt là 7,2 MPa và 8,3 MPa. Sự chênh lệch đáng kể về cường độ chịu nén cũng được quan sát thấy ở các cấp phối CP2 và CP11, CP3 và CP12. Mức khác biệt về cường độ chịu nén của 2 cấp phối này đều trên 40%.

Mặc dù có sự tương đồng về tỷ lệ N/X , hàm lượng xi măng, thể tích hồ xi măng, tỷ lệ thể tích CL/H nhưng các cấp phối này có sự khác biệt tương đối lớn về độ rỗng. Đây chính là nguyên nhân dẫn đến sự chênh lệch về cường độ chịu nén giữa các cấp phối này. Độ rỗng của các cấp phối CP1, CP2, CP3 lần lượt là 25,9%, 24,4% và 24,5%, trong khi độ rỗng của các cấp phối CP11, CP12, CP13 lần lượt là 23,7%, 15,9% và 11,2%, tương ứng với mức chênh lệch về độ rỗng khoảng 2-13%. Điều này cũng kéo theo sự chênh lệch về độ rỗng và hệ quả là chênh lệch về cường độ chịu nén của các cấp phối sử dụng cốt liệu 3-5 mm thay thế cho cốt liệu 5-10 mm. Thêm vào đó, bê tông sử dụng cốt liệu 3-5 mm là loại có kích thước đồng đều, khi đó ngoại lực tác dụng sẽ được phân bố đều hơn trên toàn bộ cấu trúc. Điều này giúp bê tông có khả năng chịu tải tốt hơn. Với bê tông sử dụng cốt liệu 5-10 mm, sự phân bố không đồng đều của cốt liệu có thể tạo ra các khoảng trống lớn, làm giảm cường độ chịu nén và khả năng chịu tải của bê tông.

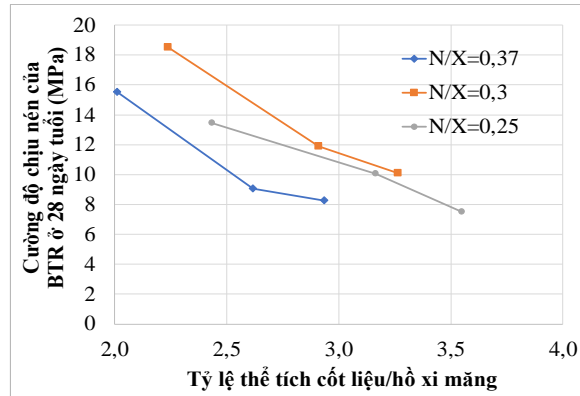
d. Ảnh hưởng của tỷ lệ thể tích Cốt liệu/Hồ xi măng đến cường độ chịu nén của BTR

Các kết quả thực nghiệm cho thấy tỷ lệ thể tích Cốt liệu/Hồ xi măng (CL/H) có mối liên hệ với độ rỗng và cường độ chịu nén của BTR. Với các cấp phối có cùng tỷ lệ N/X , khi tỷ lệ

CL/H tăng thì độ rỗng tăng và dẫn đến cường độ chịu nén giảm (hình 20 và 21). Trường hợp tỷ lệ $N/X = 0,37$, khi tỷ lệ CL/H tăng từ 2,2 lên 2,9 và 3,3 thì cường độ chịu nén của BTR ở 28 ngày tuổi giảm lần lượt từ 18,5 MPa xuống còn 11,9 MPa và 10,1 MPa. Với cả 3 tỷ lệ N/X (0,37, 0,3 và 0,25), tỷ lệ CL/H giảm từ khoảng 2-2,5 xuống còn 3-3,5 kéo theo cường độ chịu nén của BTR ở 28 ngày tuổi giảm khoảng 50%.



Hình 20. Ảnh hưởng của tỷ lệ CL/H đến cường độ chịu nén của BTR ở 7 ngày tuổi.



Hình 21. Ảnh hưởng của tỷ lệ CL/H đến cường độ chịu nén của BTR ở 28 ngày tuổi.

4. KẾT LUẬN

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

Với các vật liệu và các cấp phối sử dụng trong nghiên cứu này, các tính năng cơ lý của BTR có thể được điều chỉnh trong một phạm vi tương đối rộng: BTR có cường độ chịu nén đạt 7-22 MPa, độ rỗng 11-35%, khối lượng thể tích từ 1760-1930 kg/m³. Các đặc trưng cơ lý này có thể đạt được với công thức thành phần bao gồm: cốt liệu (đá 3-5mm hoặc đá 5-10mm): 1380-1540 kg/m³, xi măng: 270-400 kg/m³, nước: 100-140 kg/m³.

Có thể điều chỉnh thành phần cấp phối BTR để chế tạo các loại BTR theo các tiêu chí về cường độ, độ rỗng và khối lượng thể tích. Các yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến cường độ của BTR là thể tích hồ xi măng, lượng xi măng và tỷ lệ N/X . Sử dụng thể tích hồ xi măng quá thấp cũng như lượng nước quá thấp (dưới 100 kg cho kg/m³ hỗn hợp bê tông) sẽ ảnh hưởng đến cường độ chịu nén của BTR.

Tỷ lệ thể tích cốt liệu/hồ xi măng là một yếu tố quyết định đến độ rỗng của BTR và hệ quả là ảnh hưởng đến cường độ chịu nén của BTR. Có thể điều chỉnh độ rỗng thông qua việc điều chỉnh tỷ lệ này. Bên cạnh đó, thay đổi kích thước hạt cốt liệu có thể tác động mạnh đến độ rỗng và cường độ chịu nén của BTR.

Việc thay đổi các yếu tố thành phần như kích thước hạt cốt liệu, tỷ lệ N/X , hàm lượng xi măng và nước, cũng như tỷ lệ thể tích cốt liệu/hồ xi măng cần được cân nhắc kỹ lưỡng để đạt được sự cân bằng giữa độ rỗng và cường độ chịu nén, từ đó tối ưu hóa tính năng của BTR cho từng ứng dụng cụ thể.

Dựa trên các tiêu chí được xét đến trong ACI PRC-522-23 [13], các loại BTR đã chế tạo được trong nghiên cứu này có cường độ, độ rỗng phù hợp để làm các kết cấu hạ tầng thoát nước như gạch lát vỉa hè, đường dành cho người đi bộ, bãi đỗ xe. Tuy nhiên cần có thêm các thí nghiệm đánh giá khả năng thoát nước của các loại BTR này, từ đó lựa chọn loại phù hợp nhất cho từng trường hợp cụ thể.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải trong đề tài mã số T2024-XD-006.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. X. Shu, B. Huang, H. Wu, E.G. Burdette, Performance comparison of rubber-modified porous concrete pavements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (2011) 350-357.
- [2]. P. Chindaprasirt, S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima, Y. Yuasa, Cement paste characteristics and porous concrete properties, *Construction and Building Materials*, 22 (1011) 894-901.
- [3]. J. Yang, G. Jiang, Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials, *Cement and Concrete Research*, 33 (2003) 381-386. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3)
- [4]. O. Deo, N. Neithalath, Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 2331-2339.
- [5]. F. Montes, L.M Haselbach, Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete, *Environmental Engineering Science*, 23 (2006) 960-969.
- [6]. S.B. Park, M. Tia, An experimental study on the water-purification properties of porous concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 177-184. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00223-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00223-0)
- [7]. B. Huang, H. Wu, X. Shu, E.G. Burdette, Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 24 (2004) 818-823.
- [8]. L.M. Haselbach, S. Valavala, The relationship of permeability and porosity in pervious concrete, *ACI Materials Journal*, 103 (2006) 452-458.
- [9]. C. Lian, Y. Zhuge, Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 2664-2671. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057>
- [10]. J. Zhang, H. Sun, X. Shui, Experimental Investigation on the Properties of Sustainable Pervious Concrete with Different Aggregate Gradation, *Int J Concr Struct Mater*, 17 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00625-0>
- [11]. S.H. Wijekoon, T. Shajeeffiranath, D.N. Subramaniam, A mathematical model to predict the porosity and compressive strength of pervious concrete based on the aggregate size, aggregate-to-cement ratio and compaction effort, *Asian J Civ Eng* 25 (2024) 67–79. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00757-4>
- [12]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 2682:2020 - Xi măng Poóc Lãng - Yêu cầu kỹ thuật, 2020.
- [13]. American Concrete Institute, ACI PRC-522-23 - Pervious concrete-Report, 2023.
- [14]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 3118:2022 – Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén, 2022.