

# Khả năng chế tạo bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng tổ ong thay đổi trên cơ sở bụi nhôm phế thải và chất tạo bọt EABASSOC

Vũ Ngọc Trụ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Bộ môn Đường ô tô và Đường đô thị, Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

**TỪ KHOÁ**

Bê tông nhẹ  
Cấu trúc rỗng thay đổi  
Bụi nhôm phế thải  
Khối lượng thể tích  
Cường độ nén

**TÓM TẮT**

Bài báo này trình bày một số kết quả thực nghiệm về công nghệ chế tạo và tính chất của bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi trong điều kiện phòng thí nghiệm. Với việc sử dụng hỗn hợp chất điều khiển cấu trúc gồm chất tạo bọt EABASSOC, bụi nhôm phế thải và dung dịch NaOH 5,0 M đã thu được sản phẩm bê tông nhẹ chứa lỗ rỗng tổ ong thay đổi từ khu vực trung tâm đến khu vực ngoại vi. Bên cạnh đó, nghiên cứu đã sử dụng khuôn gỗ hình lập phương cạnh 150 mm với bốn thành khuôn được đục lỗ để loại bỏ thành phần pha lỏng và pha khí ra khỏi mẫu bê tông trong quá trình rắn chắc. Kết quả nghiên cứu cho thấy hoàn toàn có thể chế tạo được loại bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng tế bào thay đổi có khối lượng thể tích khô trung bình 955 kg/m<sup>3</sup>; cường độ nén trung bình ở tuổi 28 ngày khoảng 14,73 MPa. Ảnh hưởng của cấu trúc rỗng thay đổi đến giá trị khối lượng thể tích và cường độ nén ở tuổi 28 ngày là khá rõ ràng. Ở khu vực bên ngoại vi, khối lượng thể tích trung bình đạt khoảng 1021 kg/m<sup>3</sup> nhưng tại tâm viên mẫu, giá trị khối lượng thể tích chỉ còn 798 kg/m<sup>3</sup>. Đồng thời, cường độ nén trung bình ở tuổi 28 ngày của mẫu cũng giảm mạnh, ở các vị trí ngoại vi cường độ đạt 17,99 MPa, nhưng tại vị trí trung tâm của mẫu, cường độ nén chỉ còn 5,75 MPa. Bên cạnh đó, nghiên cứu này cũng đã so sánh tính chất của bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi với bê tông bọt sử dụng bột kim loại nhôm có cùng khối lượng thể tích ướt.

**KEYWORDS**

Lightweight concrete  
Variable cellular structure  
Waste aluminum dust  
Density  
Compressive strength

**ABSTRACT**

This article presents some experimental results on manufacturing technology and properties of lightweight concrete with variable cellular structure under laboratory conditions. Using a mixture of structural control agents including EABASSOC foaming agent, waste aluminum dust, and 5.0 M NaOH solution, a lightweight concrete product containing honeycomb pores varying from the central area to the peripheral area. In addition, the study used a 150 mm cube-shaped wooden mold with four perforated mold walls to remove liquid and gas phase components from the concrete sample during the solidification process. Research results show that it is possible to produce lightweight concrete with a variable cellular structure with an average dry volume of 955 kg/m<sup>3</sup>; The average compressive strength at the age of 28 days is about 14.73 MPa. The influence of the changed hollow structure on the value of volumetric mass and compressive strength at the age of 28 days is quite obvious. In the peripheral area, the average volume is about 1021 kg/m<sup>3</sup>, but at the center of the sample, the volume value is only 798 kg/m<sup>3</sup>. At the same time, the average compressive strength at the age of 28 days of the sample also decreased sharply, at the peripheral positions the strength reached 17.99 MPa, but at the central position of the sample, the compressive strength was only 5.75 MPa. Besides, this study also compared the properties of lightweight concrete with a modified hollow structure with foam concrete using aluminum metal powder with the same wet density.

**1. Phần mở đầu**

Trong giai đoạn cách mạng công nghiệp 4.0 đang phát triển bùng nổ trên khắp thế giới, Việt Nam cũng nằm chung trong xu thế ảnh hưởng toàn cầu. Nhu cầu điện năng của nước ta ngày càng tăng mạnh theo hướng nóng lên của trái đất. Theo thông báo của Trung tâm Điều độ Hệ thống điện Quốc gia cho biết, sản lượng điện tiêu thụ toàn quốc ngày 28/05/2024 lần đầu tiên trong lịch sử vượt 1 tỷ kWh [1]. Một trong những nguyên nhân sử dụng điện năng lớn nhất là sử dụng điều

hòa không khí trong các tòa nhà. Do đó, nếu áp dụng các sản phẩm bê tông nhẹ, có khả năng cách âm cách nhiệt tốt cũng là một giải pháp giảm thiểu lượng dùng điện năng ngày nay. Tuy nhiên, các loại bê tông nhẹ truyền thống có cấu trúc thay rỗng đồng đều, cường độ thấp và khả năng cách nhiệt và chống thấm nước không cao [2, 3].

Ở Việt Nam cũng như nhiều nước trên thế giới, sản phẩm bê tông nhẹ đã phát triển theo nhiều hướng khác nhau. Nhiều nghiên cứu đã tập trung vào hướng chế tạo bê tông bọt, bê tông khí chưng áp từ chất kết dính xi măng và các loại phụ gia khoáng hoạt tính [4-6]. Những

\*Liên hệ tác giả: trunv@huce.edu.vn

Nhận ngày 6/5/2024, sửa xong ngày 20/5/2024, chấp nhận đăng ngày 7/6/2024

Link DOI: 10.54772/jomc.03.2024.724

nguyên cứu này đã chứng tỏ khả năng chế tạo được các loại bê tông nhẹ cường độ cao định hướng sử dụng trong các công trình xây dựng cao tầng. Tuy nhiên, những loại bê tông nhẹ này cần quá trình chưng hấp phức tạp để tạo ra sản phẩm có cường độ cao hơn [7, 8].

Những năm gần đây, nhiều nhà nghiên cứu đã bước đầu đánh giá khả năng chế tạo được sản phẩm bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng tổ ong thay đổi, phù hợp với mục đích sử dụng. Sản phẩm này loại bê tông nhẹ có tỷ trọng thay đổi từ khu vực trung tâm ra khu vực ngoại vi của sản phẩm, thu được bằng cách nén chặt các vùng bề mặt bằng áp suất khí dự trong cấu trúc bê tông khi hỗn hợp đông kết và rắn chắc [9-11]. Với công nghệ này, sản phẩm bê tông có cấu trúc rỗng thay đổi, vùng bên ngoài của mẫu đặc chắc và ít lỗ rỗng, tại trung tâm của mẫu có nhiều lỗ rỗng và xốp. Đây chính là một trong những đặc điểm khác biệt của sản phẩm bê tông nhẹ trong nghiên cứu này. Mặt khác, tại các vị trí ngoại vi, do thành phần pha khí và pha lỏng bị đẩy ra khỏi cấu trúc qua hệ thống lỗ rỗng trên thành khuôn nên chúng đặc chắc hơn, tính chất cơ - lý được tăng lên. Nhờ có công nghệ này đã cải thiện nhiều đặc tính, cường độ, khả năng cách nhiệt của sản phẩm được cải thiện so với các loại bê tông nhẹ truyền thống.

Với quá trình xây dựng cơ sở hạ tầng trên khắp cả nước ta hiện nay, sử dụng các loại bê tông khí, bê tông bọt chưng áp khá phổ biến, tuy nhiên các loại bê tông nhẹ tạo khí với cấu trúc rỗng tổ ong thay đổi thì hầu như chưa được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu và chế tạo [11, 12]. Điểm khác biệt lớn nhất trong công nghệ chế tạo loại bê tông này so với bê tông bọt và bê tông khí thông thường là sử dụng hỗn hợp chất điều khiển cấu trúc lỗ rỗng và công nghệ ván khuôn đục lỗ để tạo hình sản phẩm [13, 14]. Công nghệ này đã kết hợp cả thành phần tạo bọt, tạo khí và chất hoạt động bề mặt để giảm sức căng bề mặt, giúp các pha lỏng và pha khí dễ dịch chuyển và thoát ra ngoài qua

các lỗ rỗng đục sẵn trên các thành khuôn. Với công nghệ này đã thu được cấu trúc rỗng thay đổi của sản phẩm bê tông, tạo ra sản phẩm nhiều đặc tính như khối lượng thể tích giảm nhưng cường độ nén, khả năng cách âm, cách nhiệt cao hơn so với bê tông bọt và bê tông khí cùng tỷ trọng.

Bài viết này trình bày một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm về tính chất của bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi sử dụng xi măng Portland hỗn hợp, tro bay nhiệt điện, Silica fume SF-90VN, bột đá với nghiền mịn, bột gốm sứ, chất tạo bọt EABASSOC, bột nhôm phế thải và dung dịch NaOH 5,0 M để điều chỉnh các thành phần pha khí vào pha lỏng. Kết quả nghiên cứu cho thấy có thể chế tạo được loại bê tông nhẹ có khối lượng thể tích khô trung bình nhỏ hơn 1000 kg/m<sup>3</sup>; cường độ nén trung bình ở tuổi 28 ngày khoảng 15 MPa. Ảnh hưởng của cấu trúc rỗng thay đổi đến giá trị khối lượng thể tích và cường độ nén ở tuổi 28 ngày đã được thực hiện trong nghiên cứu này. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng so sánh tính chất của bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi với bê tông bọt sử dụng bột kim loại nhôm có cùng khối lượng thể tích ướt.

**2. Nguyên vật liệu sử dụng và tiêu chuẩn áp dụng**

**2.1. Nguyên vật liệu sử dụng**

Vật liệu đã sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm:

a. Hỗn hợp chất kết dính. Chất kết dính (CKD) sử dụng trong nghiên cứu này là tổ hợp của ba thành phần: *i*- Xi măng Portland PC40 Hoàng Thạch, *ii*- tro bay nhiệt điện Phả Lại và *iii*- Silica fume SF-90VN (Hình 1).

*i*). Xi măng Portland PC40 (XM) Hoàng Thạch thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của tiêu chuẩn TCVN 2682:2020. Các tính chất cơ lý của xi măng Portland PC40 Hoàng Thạch được giới thiệu trong Bảng 1.

**Bảng 1.** Tính chất cơ lý của xi măng Portland PC40 Hoàng Thạch.

Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	Lượng sót trên sàng N0.09	Tỷ diện bề mặt (cm <sup>2</sup> /g)	Thời gian đông kết (phút)		Cường độ nén (MPa)		Độ dẻo tiêu chuẩn (%)
			Bắt đầu đông kết	Kết thúc đông kết	3 ngày	28 ngày	
3,15	6,5	3500	110 ± 5	350 ± 5	25,5	48,0	29,5

*ii*). Tro bay (TB) loại F của nhà máy nhiệt điện "Phả Lại" thỏa mãn các yêu cầu của TCVN 10302:2014. TB được sử dụng trong nghiên cứu này bằng 30 % hàm lượng XM tính theo khối lượng.

*iii*). Silica fume SF-90VN (SF90VN) là sản phẩm của Công ty TNHH Hoá phẩm xây dựng Buildmix Việt Nam. Đây là phụ gia khoáng có chứa trên 90 % dioxit silic (SiO<sub>2</sub>) siêu mịn hoạt tính cao, khi đưa vào bê tông và vữa sẽ liên kết với Ca(OH)<sub>2</sub> làm tăng độ đặc chắc, tăng cường độ và

cải thiện tính chất sản phẩm. Sản phẩm Silica fume SF-90VN đáp ứng các yêu cầu theo TCVN 6882:2016. SF90VN được sử dụng trong nghiên cứu này bằng 10 % hàm lượng XM tính theo khối lượng.

Thành phần hóa học và các tính chất vật lý cơ bản của Silica fume SF-90VN, tro bay nhiệt điện Phả Lại và xi măng Portland hỗn hợp được thể hiện trong Bảng 2.

**Bảng 2.** Tính chất vật lý của Silica fume SF-90VN, tro bay nhiệt điện Phả Lại và xi măng Portland hỗn hợp PC40 Hoàng Thạch.

Loại vật liệu	Silica fume SF-90VN	Tro bay nhiệt điện Phả Lại	Xi măng Portland PC40 Hoàng Thạch
Ký hiệu vật liệu	SF90VN	TB	XM
Tỷ diện bề mặt riêng (cm <sup>2</sup> /g)	10500	3650	3500
Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	2,15	2,45	3,15
Khối lượng thể tích khô (kg/m <sup>3</sup> )	1450	1650	1750

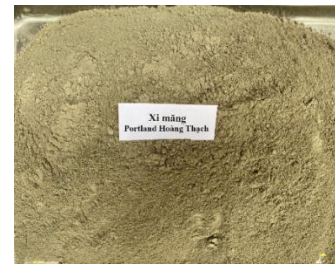
Như vậy: CKD = XM + TB + SF90VN.



a) – Silica fume SF-90VN



b) – Tro bay nhiệt điện Phả Lại



c) - Xi măng Portland Hoàng Thạch

**Hình 1.** Hỗn hợp chất kết dính sử dụng trong nghiên cứu.

**b. Cốt liệu mịn (Hình 2)**

Trong công nghệ bê tông nhẹ không thể sử dụng thành phần cốt liệu có kích thước hạt lớn, vì thành phần cốt liệu thô luôn có xu hướng làm vỡ bọt khí hoặc cản lại quá trình tạo khí bên trong khối bê tông. Với nghiên cứu này, cốt liệu chỉ sử dụng dưới dạng cốt liệu mịn với đường kính hạt nhỏ hơn 0,14 mm. Cốt liệu mịn (CLM) sử dụng trong nghiên cứu bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi là bột đá vôi nghiền

mịn (BD) được tài trợ bởi Công ty Cổ phần JIGCO Việt Nam và bột gốm sứ (BG) được lấy tại kho phế phẩm của công ty gốm sứ TOTO Việt Nam (Hình 2b). Khối lượng riêng của bột đá nghiền mịn và của bột gốm sứ được xác định theo thực nghiệm có giá trị lần lượt là 2,65 g/cm<sup>3</sup> và 2,42 g/cm<sup>3</sup>. Như vậy: CLM = BD + BG.

Trong giới hạn điều kiện nghiên cứu này hàm lượng bột đá nghiền mịn bằng hàm lượng bột gốm (BD/BG = 1:1) và CLM/CKD = 1:1.



a) – Bột đá nghiền mịn



b- Bột gốm sứ TOTO

**Hình 2.** Cốt liệu mịn sử dụng trong nghiên cứu.

**c. Hỗn hợp chất điều khiển cấu trúc (Hình 3)**

*i). Chất tạo bọt*

Trong nghiên cứu này đã sử dụng chất tạo bọt EABASSOC được sản xuất theo công nghệ của Anh Quốc. Chất tạo bọt EABASSOC được pha loãng với nước theo tỷ lệ 2,5 % theo khối lượng [2, 15]. Các đặc tính tạo bọt như độ ổn định của bọt được đánh giá bằng phương pháp trộn trong máy có tốc độ cao. Công nghệ chế tạo bọt này bao gồm việc cho 100 ml dung dịch chất tạo bọt EABASSOC (2,5 %) vào thùng của máy khuấy có thể tích 10 lít và khuấy bằng máy khuấy có cánh khuấy ở tốc độ 10.000 vòng/phút trong 10 phút. Bọt sau khi khuấy được chuyển vào bình chứa có thể tích 1000 ml và thể tích bọt được đo ngay sau khi tạo bọt xong. Thể tích chất tạo bọt ( $V_{\text{bọt}}$ ) được xác định theo công thức của phương pháp thể tích tuyệt đối.

*ii). Chất tạo khí*

Trong nghiên cứu đã sử dụng tác nhân tạo khí là bụi bột phế thải từ làng nghề tái chế nhôm phế liệu tại Yên Phong (Bắc Ninh). Bụi nhôm (BN) do Công ty môi trường Ngôi Sao Xanh cung cấp, đây là loại bụi phế thải phát sinh từ ống khói của các lò nấu nhôm phế liệu. Kích thước hạt bụi nhôm trung bình khoảng 50  $\mu\text{m}$ . Từ thực nghiệm đã xác định

được khối lượng riêng bụi nhôm là 2,25 g/cm<sup>3</sup>. Từ kết quả phân tích thành phần hóa của bụi nhôm phế thải cho thấy, thành phần quan trọng nhất của bụi nhôm là (5-15) % Al nguyên chất; (18-25) % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ngoài ra còn rất nhiều các tạp chất hữu cơ khác có ảnh hưởng xấu đến tính chất của hỗn hợp bê tông. Trong phạm vi nghiên cứu và khảo sát, BN được sử dụng với hàm lượng là 10% hàm lượng CKD theo khối lượng.

Mặt khác, trong nghiên cứu đã sử dụng bột nhôm kim loại do công ty Jigco Việt Nam tài trợ cho nhóm nghiên cứu. Bột nhôm (Al) được dùng trong mẫu đối chứng, mỗi hộp 500 g với hàm lượng kim loại nhôm tinh khiết đạt 86 % và hệ số sản lượng khí tạo đạt 1050 lít khí Hidro/1kg bột nhôm [2, 4, 8]. Độ mịn của bột nhôm theo nhà cung cấp đạt 4500 cm<sup>2</sup>/g. Khối lượng bột nhôm được sử dụng là 0,5 kg/m<sup>3</sup>.

*iii). Chất điều chỉnh bọt khí*

Chất điều chỉnh bọt khí được sử dụng là dung dịch Natri hydroxyt 5,0 M (NaOH). Từ kết quả thực nghiệm cho thấy, dung dịch này được điều chế bằng cách pha 17,4 % NaOH dạng rắn vào 82,6 % nước sạch để đạt được nồng độ mol theo yêu cầu. Từ thực nghiệm đã xác định được khối lượng riêng của Natri hydroxyt 5,0 M là 1,32 g/cm<sup>3</sup>. Dung dịch Natri hydroxyt 5,0 M là dung dịch giảm sức căng bề mặt của các thành phần

pha lỏng trong hỗn hợp bê tông, tạo điều kiện để pha khí và pha lỏng di chuyển từ trong cấu trúc hỗn hợp bê tông ra bên ngoài thông qua các lỗ rỗng trên thành khuôn. Trong phạm vi nghiên cứu và khảo sát, NaOH

được lựa chọn và sử dụng với hàm lượng là 15 % hàm lượng CKD theo khối lượng.



Hình 3. Hỗn hợp chất điều khiển quá trình tạo khí.

d. Nước sạch

Nước sạch (NS) được sử dụng để điều chế dung dịch NaOH 5,0 M và làm dung dịch nhào trộn, thủy hóa xi măng và hỗn hợp bê tông, bảo dưỡng mẫu sản phẩm sau khi thí nghiệm, thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 4506:2012. Trong nghiên cứu không sử dụng phụ gia siêu dẻo, NS được lựa chọn và sử dụng với tỷ lệ NS/CKD = 0,50.

Từ những cơ sở trên kết hợp với các kết quả khảo sát thực nghiệm sơ bộ, nghiên cứu này đã chọn gốc các hệ số tỷ lệ vật liệu như trong Bảng 3.

Bảng 3. Các tỷ lệ vật liệu sử dụng để chế bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi.

Tỷ lệ vật liệu	$\frac{TB}{XM}$	$\frac{SF90VN}{XM}$	$\frac{BĐ}{BG}$	$\frac{CLM}{CKD}$	$\frac{BN}{CKD}$	$\frac{NaOH}{CKD}$	$\frac{NS}{CKD}$
Giá trị	30%	10%	1 : 1	1 : 1	10 %	15 %	0,4

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Các tiêu chuẩn thí nghiệm

Khối lượng thể tích ở trạng thái tự nhiên, độ ẩm, độ hút nước và cường độ nén của mẫu bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi không chương áp trong nghiên cứu này được xác định theo TCVN 9030:2017.

2.2.2. Phương pháp tính toán cấp phối bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi

Hiện nay, phương pháp tính toán thành phần cấp phối bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi dựa trên lý thuyết phương pháp thể tích tuyệt đối [10, 12, 15]. Mục tiêu của phương pháp này là dựa trên giá trị cho trước của khối lượng thể tích ướt của bê tông nhẹ.

Theo nhiều nghiên cứu [10, 12, 16, 17], công thức tính toán các thành phần cấp phối của bê tông nhẹ được đưa ra trong phương trình số (1) và số (2):

$$\rho_{\text{ướt}} = XM + TB + SF90VN + BĐ + BG + BN + NS + NaOH \quad (1)$$

$$V_{\text{Bot}} = K * \left[ 1000 - \left( \frac{XM}{\rho_{XM}} + \frac{TB}{\rho_{TB}} + \frac{SF90VN}{\rho_{SF90VN}} + \frac{BĐ}{\rho_{BĐ}} + \frac{BG}{\rho_{BG}} + \frac{BN}{\rho_{BN}} + \frac{NS}{\rho_{NS}} + \frac{NaOH}{\rho_{NaOH}} \right) \right] \quad (2)$$

Trong đó:

$\rho_{\text{ướt}}$  là khối lượng thể tích ở trạng thái ướt mục tiêu của mẫu thí nghiệm, kg/m<sup>3</sup>;

XM, TB, SF90VN, BĐ, BG, BN, NS, NaOH lần lượt là khối lượng của xi măng Portland hỗn hợp, tro bay nhiệt điện Phả Lại, Silica fume SF-90VN, bột đá vôi nghiền mịn, bột gốm sứ TOTO, nước sạch và dung dịch NaOH 5,0M, (kg);

$\rho_{XM}, \rho_{TB}, \rho_{SF90VN}, \rho_{BĐ}, \rho_{BG}, \rho_{BN}, \rho_{NS}, \rho_{NaOH}$  lần lượt là khối lượng riêng của xi măng Portland hỗn hợp, tro bay nhiệt điện Phả Lại, Silica fume SF-90VN, bột đá vôi nghiền mịn, bột gốm sứ TOTO, nước sạch và dung dịch NaOH 5,0M, (kg/lít);

$V_{\text{bot}}$  là thể tích bọt tạo ra từ chất tạo bọt EABASSOC trong hỗn hợp bê tông nhẹ, lít;

K là hệ số dư bọt, K phụ thuộc vào chất lượng chất tạo bọt và phương pháp tạo bọt, thông thường K = 1,1 ÷ 1,3 [2, 15, 18]. Theo kết quả thực nghiệm, với chất tạo bọt EABASSOC, do độ ổn định và hệ số tạo bọt của chất tạo bọt không ổn định, điều kiện thí nghiệm thủ công, còn nhiều hạn chế nên trong nghiên cứu này đã chọn hệ số dư bọt K = 1,2.

2.2.3. Phương pháp chế tạo sản phẩm bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi

Trong nghiên cứu này để tạo ra các sản phẩm bê tông có độ biến thiên độ rỗng từ trung tâm đến ngoại vi của sản phẩm, nghiên cứu đã sử dụng mẫu thí nghiệm hình lập phương cạnh 150 mm đã đục lỗ trên cả bốn bản của thành khuôn. Các lỗ rỗng trên thành khuôn được khoan sẵn với đường kính 1,5 mm và khoảng cách là 10 mm (Hình 4). Nhưng trong nghiên cứu này hai tấm đáy khuôn không được đục lỗ. Tỷ số giữa tỷ lệ tổng diện tích lỗ trên bề mặt đục lỗ của khuôn so với tổng diện tích bề mặt khuôn được lấy làm chỉ số lỗ thủng. Chỉ số lỗ thủng trên mỗi tấm thành khuôn khoảng 1,43 %. Mặt khác, các thành khuôn đục lỗ bên trong đã được bọc một lớp vải không dệt. Thành phần này nhằm mục đích ngăn cản phần vật chất (xi măng, tro bay, bột gốm, bột đá...) thoát ra bên ngoài. Thông qua các lỗ rỗng này, thành phần pha khí và pha lỏng ở khu vực ngoại vi bị đẩy ra ngoài sản phẩm trong quá trình hình thành cấu trúc của mẫu bê tông (Hình 4).





a)- Khuôn đục lỗ



b)- Quá trình thoát pha khí và pha lỏng

**Hình 4.** Cơ chế thoát khí ra khỏi mẫu bê tông nhẹ.

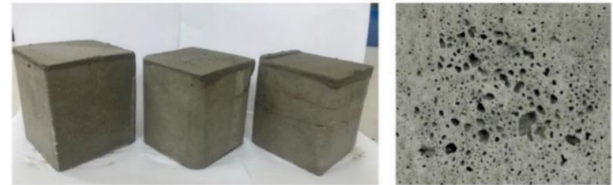
Trong nghiên cứu này, tổ hợp chất điều chỉnh cấu trúc có nhiệm vụ tạo ra các bọt khí trong cấu trúc của mẫu bê tông. Đồng thời khi lượng bọt khí đủ lớn, bụi nhôm tiếp tục phản ứng với nước để tạo thành khí Hydro và hình thành phần áp suất dương bên trong mẫu bê tông. Hơn nữa, với sự có mặt của dung dịch NaOH 5,0M đã làm giảm sức căng bề mặt thành phần pha lỏng, giúp cho thành phần pha lỏng và pha khí ở khu vực ngoại vi gần các lỗ rỗng bị đẩy ra ngoài dễ dàng hơn.

**2.2.4. Các yêu cầu đối với hỗn hợp bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi**

Trong nghiên cứu này, các đặc tính yêu cầu về công nghệ chế tạo bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi được lựa chọn như sau:

- + Khối lượng thể tích ở trạng thái ướt mục tiêu của bê tông nhẹ với

- cấu trúc rỗng thay đổi đặt ra trong nghiên cứu này là  $\rho_{ướt} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ;
- + Cường độ nén trên mẫu lập phương  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  ở tuổi 28 ngày mục tiêu đạt được từ 10 MPa đến 20 MPa;
- + Chất tạo bọt EABASSOC được pha loãng với nước theo tỷ lệ 2,5 % theo khối lượng và khuấy bằng máy khuấy có cánh khuấy ở tốc độ 10.000 vòng/phút trong 10 phút.



**Hình 5.** Tạo hình sản phẩm bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi.

**2.2.5. Xác định cấp phối bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi và cấp phối bê tông nhẹ đối chứng**

Tính toán theo phương pháp thể tích tuyệt đối dựa trên các giá trị tỷ lệ vật liệu đã lựa chọn trong Bảng 3 và hiệu chỉnh cấp phối phù hợp với các tính chất của vật liệu sử dụng, đề tài đã khảo sát các cấp phối của hỗn hợp bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi có tỷ lệ thành cấp phối như trong Bảng 4.

Để có sự so sánh và đối chứng, nghiên cứu đã tiến hành xác định cấp phối bê tông bọt truyền thống có sử dụng thêm chất tạo khí là bột nhôm. Mẫu bê tông nhẹ đối chứng cũng được thiết kế cùng khối lượng thể tích là  $1000 \text{ kg/m}^3$  nhưng chỉ sử dụng duy nhất một tác nhân tạo khí được thay bằng bụi nhôm phế thải bằng chất tạo khí từ  $0,50 \text{ kg/m}^3$  bột nhôm. Kết quả tính toán theo các phương trình số (1) và (2) kết hợp với hiệu chỉnh bằng thực nghiệm đã thu được cấp phối của hỗn hợp bê tông bọt đối chứng với thành phần cấp phối như trong Bảng 4.

Sản phẩm bê tông nhẹ sau khi tạo hình được bảo dưỡng một ngày trong khuôn mẫu, sau một ngày mẫu được tháo khuôn, mẫu bê tông nhẹ tiêu chuẩn, sau đó mẫu được đưa đi ngâm vào trong môi trường nước của bể dưỡng hộ cho đến tuổi thí nghiệm.

**Bảng 4.** Cấp phối của hỗn hợp bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi.

Ký hiệu mẫu	Cấp phối cho 1 m <sup>3</sup> bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi (kg/m <sup>3</sup> )										Thể tích vật liệu (lít)	Thể tích bọt (lít)
	CKD	XM	TB	SF90VN	BĐ	BG	BN	Al	NS	NaOH		
M-01	377	270	81	27	189	189	38	-	151	57	540	552
M-02	377	270	81	27	189	189	-	0,5	151	57	540	552

**3. Kết quả và thảo luận**

Trong giới hạn nghiên cứu của đề tài này, tính chất cơ lý của mẫu bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi được khảo sát gồm có: (i)- Khối lượng thể tích khô ở tuổi 28 ngày; (ii)- Độ ẩm ở trạng thái tự

nhien; (iii)- Độ hút nước; (iv)- Cường độ nén của mẫu bê tông bọt ở các tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày trên hệ thống máy nén uốn tự động ADVANTEST 9 với tốc độ gia tải trong nghiên cứu này là 100 N/s.

Các kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu này được trình bày trong các Bảng 5 và Bảng 6.

**Bảng 5.** Tính chất cơ lý của mẫu bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi sau khi rắn chắc.

TT	Ký hiệu mẫu bê tông	Khối lượng thể tích ở trạng thái tự nhiên, (kg/m <sup>3</sup> )		Độ ẩm tự nhiên ở tuổi 28 ngày, (%)		Độ hút nước ở tuổi 28 ngày, (%)	
		Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
1	M-01	955	5,2	7,7	2,3	15,2	3,0
2	M-02	940	5,0	8,5	2,5	15,8	2,8

**Bảng 6.** Giá trị cường độ nén của mẫu bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi sau khi rắn chắc.

TT	Ký hiệu mẫu bê tông	Cường độ nén (MPa) ở các tuổi:							
		3 ngày		7 ngày		14 ngày		28 ngày	
		Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
1	M-01	6,12	1,2	9,21	1,5	11,08	2,0	14,73	2,2
2	M-02	5,58	1,4	8,35	1,0	10,24	2,6	13,27	2,1

Từ kết quả thí nghiệm trên các bảng 5 và bảng 6 rút ra một số nhận xét như sau:

Các mẫu bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi tại tuổi 28 ngày ở trạng thái tự nhiên đều có khối lượng thể tích nhỏ hơn 1000 kg/m<sup>3</sup>. Các giá trị này phù hợp với mục tiêu thiết kế ban đầu về khối lượng thể tích của bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi.

Do các mẫu bê tông nhẹ có chứa hàm lỗ rỗng lớn do đó giá trị độ ẩm của mẫu thí nghiệm đã lớn hơn đáng kể so với các loại bê tông nặng sử dụng các loại xi măng Portland thông thường. Mặt khác, do cấu trúc rỗng tổ ong đã thay đổi, các lớp ngoại vi (lớp vỏ) đặc chắc, ít lỗ rỗng hở, ít lỗ rỗng thông nhau, nên đã giảm được lượng nước thâm nhập vào bên trong cấu trúc bê tông. Do đó, độ hút nước ở tuổi 28 ngày có tăng so với độ ẩm nhưng tăng không quá nhiều mặc dù cấu trúc tại trung tâm rất rỗng xốp.

Giá trị cường độ nén ở tuổi 28 ngày của các mẫu bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi này khoảng 14,73 MPa. Các giá trị cường độ nén này phù hợp với mục tiêu thiết kế ban đầu về cường độ nén.

Mặt khác, khi thay thành phần tạo khí bụi nhôm phế thải bằng

0,5 kg bột nhôm, khả năng tạo khí của mẫu tăng đáng kể, thành phần Al phản ứng với nước và NaOH tạo khí Hydro nhiều hơn so với bụi nhôm phế thải. Do đó, cùng các thành phần và có khối lượng thể tích ẩm mục tiêu là 1000kg/m<sup>3</sup> nhưng bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi sử dụng bụi nhôm phế thải có khối lượng thể tích cao hơn so với bê tông nhẹ sử dụng chất tạo khí từ bột nhôm kim loại. Điều này được giải thích do bê tông nhẹ dùng bột kim loại nhôm thì có hàm lượng Al nhiều hơn, đã loại bỏ lượng nước dư thừa qua lỗ thủng thành khuôn trong quá trình hình thành cấu trúc (Hình 7 và hình 8) [16, 17].

Ngoài ra, ở tuổi 28 ngày bảo dưỡng, cường độ nén của mẫu bê tông nhẹ (M-01) với cấu trúc rỗng thay đổi sử dụng bụi nhôm phế thải là 14,73 MPa cao hơn cường độ nén của bê tông nhẹ cùng loại sử dụng 0,5 kg bột nhôm (M-02) là 13,27 MPa (Bảng 6). Điều này được giải thích là do mẫu thí nghiệm M-01 có tỷ trọng trung bình cao hơn, độ đặc tăng ở các khu vực từ trung tâm đến ngoại vi, kết quả thu được tính chất cơ học của sản phẩm được cải thiện và có cường độ nén trung bình tốt hơn mẫu thí nghiệm M-02.



**Hình 6.** Cấu trúc và phân bố lỗ rỗng tổ ong đồng đều trong mẫu bê tông nhẹ đối chứng.

**Hình 7.** Cấu trúc và sự phân bố lỗ rỗng tổ ong thay đổi trong mẫu bê tông nhẹ thí nghiệm.

Hơn nữa, từ kết quả thí nghiệm các mẫu theo thời gian bảo dưỡng cho thấy, tốc độ phát triển cường độ nén của bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi nhanh hơn các loại bê tông bọt và bê tông khí thông thường.

Trong điều kiện thực nghiệm và bảo dưỡng của nghiên cứu này cho thấy, ở tuổi 3 ngày, 7 ngày và 14 ngày, cường độ nén của mẫu bê tông nhẹ M-01 và M-02 đã lần lượt đạt trung bình khoảng 42%, 62% và 75% giá trị cường độ kháng nén của mẫu ở tuổi 28 ngày. Điều này được giải thích nguyên nhân là do thành phần nước và khí ở khu vực ngoại vi của sản phẩm được đẩy thoát ra ngoài qua hệ thống lỗ rỗng trên thành khuôn, làm khối bê tông nhẹ trong nghiên cứu này đông kết và rắn chắc nhanh hơn [10, 11]. Tuy nhiên, sau khi tháo, dỡ khuôn, các viên mẫu cần được tưới nước, làm ẩm từ từ... để các thành phần chất kết dính hút nước, nở thể tích, tăng nhiệt từ từ, tránh các nứt nẻ trên bề mặt của viên mẫu.

Để xác định được trực quan sự biến đổi cấu trúc rỗng tổ ong từ

khu vực trung tâm đến khu vực ngoại vi của mẫu bê tông nhẹ M-01, trong nghiên cứu này đã xác định sự thay đổi khối lượng thể tích và cường độ nén ở tuổi 28 ngày từ vị trí trung tâm đến ngoại vi của mẫu M-01.

Từ mẫu bê tông nhẹ M-01 hình lập phương kích thước 150\*150\*150 mm, nhóm nghiên cứu đã cắt thành các mẫu bê tông với kích thước 150\*150\*30 mm (Hình 8a). Như vậy, mỗi viên mẫu 150\*150\*150 mm sau khi cắt sẽ thu được 05 viên mẫu nhỏ dạng tấm mỏng, trong đó gồm có:

- + 02 viên mẫu ở các vị trí biên (vị trí ngoại vi) của sản phẩm (Ký hiệu là B1 và B2);
- + 02 viên mẫu cách mép ngoài của sản phẩm 30 mm (Ký hiệu là M1 và M2);
- + 01 viên mẫu tại khu vực trung tâm của sản phẩm (Ký hiệu là TT) (xem trên Hình 8 và 9).

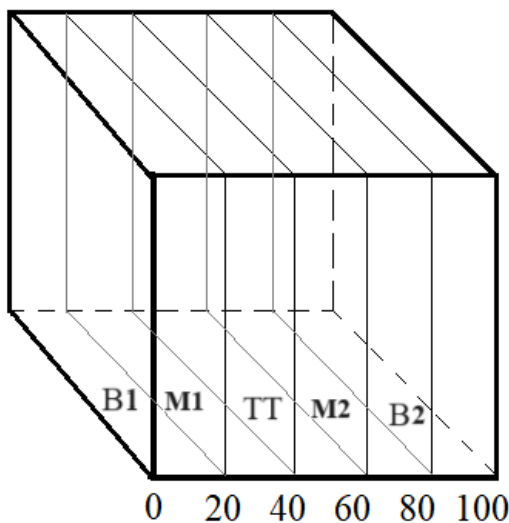


a) Các mẫu bê tông dạng tấm mỏng 150\*150\*30 mm



b) Mẫu bê tông hình lập phương 30\*30\*30 mm

**Hình 8.** Các viên mẫu bê tông nhẹ có cấu trúc rỗng thay đổi sau khi cắt.



**Hình 9.** Sơ đồ cắt mẫu bê tông nhẹ M-01 có cấu trúc tổ ong thay đổi.

Các tấm mỏng 150\*150\*30 mm sau khi cắt được đưa đi đến công đoạn cắt tạo thành các viên hình lập phương kích thước 30\*30\*30 mm, mỗi tấm được cắt thành 05 viên hình lập phương (Hình 8b). Các viên hình lập phương sau khi gia công được mài nhẵn bề mặt, được đưa đi đến bước cân khối lượng và đo kích thước để xác định thể tích viên mẫu. Sau khi áp dụng công thức theo tiêu chuẩn để thu được giá trị khối lượng thể tích.

Tiếp đó, các mẫu sau khi đã xác định khối lượng thể tích xong được chuyển đến công đoạn xác định cường độ nén của viên mẫu. Thí nghiệm này chỉ mang tính chất định tính, để đánh giá cường độ cơ học của các viên mẫu sau khi cắt có sự biến đổi đồng thời với sự tăng giảm độ rỗng trong sản phẩm bê tông nhẹ có sự biến tính lỗ rỗng. Cường độ nén của các viên mẫu hình lập phương 30\*30\*30 mm được xác định trên hệ thống máy nén tự động ADVANTEST 9 với tốc độ gia tải trong trường hợp này là 50 N/s.

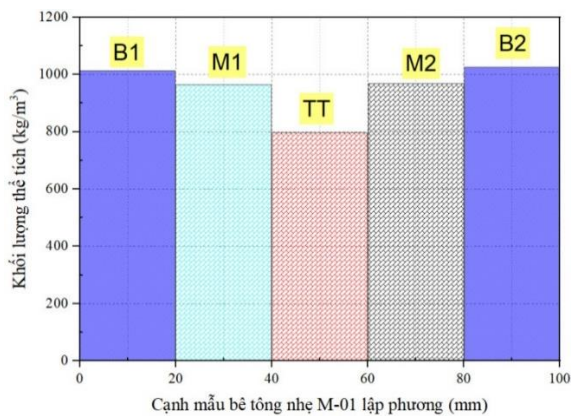
Kết quả xác định giá trị trung bình khối lượng thể tích và cường độ nén trung bình ở tuổi 28 ngày của các mẫu lập phương kích thước 30\*30\*30 mm sau khi gia công từ mẫu bê tông nhẹ M-01 được thể hiện trong Bảng 7.



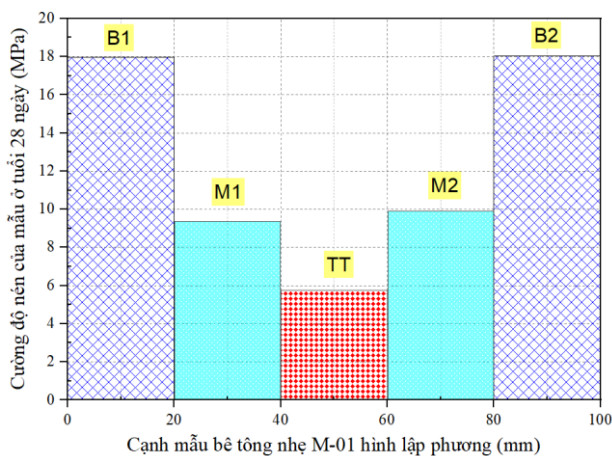
**Bảng 7.** Khối lượng thể tích tự nhiên và giá trị cường độ nén ở tuổi 28 ngày của mẫu bê tông nhẹ.

Số TT	Ký hiệu mẫu bê tông	Khối lượng thể tích tự nhiên ở tuổi 28 ngày (kg/m <sup>3</sup> )		Giá trị cường độ nén ở tuổi 28 ngày (MPa)	
		Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
1	B1	1015	4,0	17,96	2,5
2	B2	1027	3,2	18,02	2,6
Giá trị trung bình		1021	-	17,99	-
3	M1	964	3,5	9,37	2,0
4	M2	970	3,0	9,91	2,0
Giá trị trung bình		967	-	9,64	-
5	TT	798	3,3	5,75	1,8

Sự thay đổi khối lượng thể tích và cường độ nén của các viên mẫu sau khi cắt từ mẫu bê tông nhẹ M-01 trong thí nghiệm được trình bày trên các Hình 10 và Hình 11.



**Hình 10.** Sự thay đổi khối lượng thể tích trên mẫu bê tông nhẹ.



**Hình 11.** Sự thay đổi cường độ nén ở tuổi 28 ngày trên mẫu bê tông nhẹ.

Từ các Hình 10 và Hình 11 đã cho thấy, ở các khu vực ngoại vi bên ngoài do các pha lỏng và pha khí được đẩy và thoát ra khỏi mẫu thí nghiệm qua các lỗ trên thành khuôn, nên cấu trúc rỗng tổ ong đã giảm, tăng được độ đặc chắc. Vì vậy, khối lượng thể tích tự nhiên ở tuổi 28

ngày của các mẫu B1 và B2 được xác định đạt khoảng 1015 kg/m<sup>3</sup> và 1027 kg/m<sup>3</sup>. Tại khu vực trung tâm của mẫu thí nghiệm, các thành phần pha khí và pha lỏng khó khăn trong việc di chuyển đến các lỗ rỗng trên thành khuôn, chính vì vậy các tác nhân này đã tạo ra hệ thống rỗng tổ ong tăng dần và lỗ rỗng đạt giá trị lớn nhất tại tâm của viên mẫu sau khi tạo hình [13, 14]. Điều đó được chứng minh bằng giá trị khối lượng thể tích của viên mẫu đã giảm nhanh. Với các mẫu gần mép biên M1 và M2 thì giá trị khối lượng thể tích là 965 kg/m<sup>3</sup> và 970 kg/m<sup>3</sup>, nhưng tại tâm viên mẫu (TT), giá trị khối lượng thể tích chỉ còn 798 kg/m<sup>3</sup> (Hình 10). Như vậy, cấu trúc rỗng tổ ong của mẫu bê tông nghiên cứu có xu hướng giảm từ tâm của viên mẫu ra phía ngoại vi và điều này đồng nghĩa với việc độ đặc cấu trúc của bê tông tại các lớp giáp với thành khuôn tăng lên và cho ta thu được sản phẩm bê tông có tính chất cơ học tốt hơn.

Bên cạnh giá trị khối lượng thể tích ở trạng thái tự nhiên thay đổi khá rõ rệt, cường độ nén của các viên mẫu hình lập phương kích thước 30\*30\*30 mm cũng thay đổi đáng kể và giảm từ 17,96 MPa (tại biên – mẫu B1); 18,02 MPa (tại biên – mẫu M2) xuống chỉ còn 5,75 MPa với mẫu tại trung tâm (Mẫu TT) (Hình 11). Với giá trị thực nghiệm thu được cho thấy đặc tính thay đổi hệ lỗ rỗng tổ ong của mẫu bê tông thí nghiệm M-01, đã thể hiện được ảnh hưởng lớn các tính chất cơ-lý của bê tông tại các vị trí khu vực ngoại vi và khu vực trung tâm của mẫu sản phẩm.

#### 4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu trong phạm vi phòng thí nghiệm cho thấy có thể chế tạo được bê tông nhẹ có khối lượng thể tích nhỏ hơn 1000 kg/m<sup>3</sup> với cấu trúc tổ ong thay đổi từ khu vực trung tâm ra khu vực ngoại vi của sản phẩm.

Với hỗn hợp chất điều khiển cấu trúc gồm: Chất tạo bọt EABASSOC, bụi nhôm phế thải và dung dịch NaOH 5,0 M đã góp phần tạo ra các hệ thống bọt khí, giá trị áp suất dương và điều chỉnh pha lỏng và pha khí dịch chuyển ra phía thành khuôn, thoát ra các lỗ rỗng đục sẵn trên thành khuôn để tạo thành. Đây là cơ sở tạo ra hệ thống lỗ rỗng thay đổi trong cấu trúc của sản phẩm.

Trong nghiên cứu này, sản phẩm bê tông nhẹ có khối lượng thể tích khô trung bình khoảng 950 kg/m<sup>3</sup>; độ ẩm tự nhiên 7,7 %; độ hút nước 15,2 % và cường độ nén trung bình ở các tuổi 3 ngày, 7 ngày, 14 ngày và 28 ngày lần lượt là: 6,12 MPa, 9,21 MPa; 11,08 MPa và



14,73 MPa;

Khi thay thành phần tạo khí bụi nhôm phế thải bằng 0,5 kg bột nhôm, khả năng tạo khí của mẫu tăng đáng kể, thành phần Al phản ứng với nước và NaOH tạo khí Hydro nhiều hơn so với bụi nhôm phế thải. Do đó, cùng các thành phần và có khối lượng thể tích ẩm mục tiêu là 1000kg/m<sup>3</sup> nhưng bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi sử dụng bụi nhôm phế thải có khối lượng thể tích cao hơn so với bê tông nhẹ sử dụng chất tạo khí từ bột nhôm kim loại.

Ở tuổi 28 ngày bảo dưỡng, cường độ nén của mẫu bê tông nhẹ với cấu trúc rỗng thay đổi sử dụng bụi nhôm phế thải là 14,73 MPa cao hơn cường độ nén của bê tông nhẹ cùng loại sử dụng 0,5 kg bột nhôm là 13,27 MPa

Sự thay đổi cấu trúc rỗng tổ ong trong bê tông đã ảnh hưởng đáng kể đến các tính chất cơ lý của sản phẩm sau khi tạo hình. Với các mẫu ở khu vực bên ngoài vi, khối lượng thể tích trung bình đạt khoảng 1021 kg/m<sup>3</sup>, các mẫu gần mép biên, giá trị khối lượng thể tích là 967 kg/m<sup>3</sup>; tại tâm viên mẫu, giá trị khối lượng thể tích chỉ còn 798 kg/m<sup>3</sup>. Đồng thời, cường độ nén ở tuổi 28 ngày của mẫu cũng giảm mạnh, ở các vị trí ngoại vi cường độ đạt 17,99 MPa, các mẫu gần mép biên, giá trị cường độ nén là 9,64 MPa; nhưng tại vị trí trung tâm của mẫu, cường độ nén chỉ còn 5,75 MPa.

Để củng cố thêm cơ sở cho khả năng ứng dụng của loại bê tông này trong các công trình xây dựng, cần tiếp tục nghiên cứu cơ chế tạo bọt và chế tạo hỗn hợp chất điều chỉnh bọt khí từ các nguồn nguyên vật liệu trong nước.

#### Tài liệu tham khảo

- [1]. Năng lượng Việt Nam (2024). <https://nangluongvietnam.vn/lan-dau-tien-trong-lich-su-tieu-thu-dien-toan-quoc-trong-ngay-vuot-1-ty-kwh-32653.html>.
- [2]. Nguyễn Việt Tùng Dương, Lê Ngọc Trường Sơn, Hoàng Trọng Toàn (2023). *Nghiên cứu tổng quan về tính chất và khả năng ứng dụng bê tông bọt được chế tạo từ vật liệu trong nước*. Đề tài NCKH sinh viên. Trường Đại học Mỏ-Địa chất năm 2023.
- [3]. Nguyễn Duy Hiếu (2016). *Công nghệ bê tông nhẹ cốt liệu rỗng chất lượng cao*. Nhà xuất bản xây dựng, năm 2016. 235 p.
- [4]. Nguyễn Công Thắng, Hàn Ngọc Đức, Hoàng Tuấn Nghĩa (2018). *Nghiên cứu thực nghiệm nâng cao một số tính chất của bê tông nhẹ cốt liệu nhẹ*. Tạp chí KHCN Xây dựng, 2018. 12(2): P. 104-109.
- [5]. Иноземцев А.С., Королев Е.В. (2022). *Высокопрочные лёгкие бетоны* : монография, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2022. 192с. Текст: Непосредственный.
- [6]. Hamad A.J. (2014). *Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete*. International journal of materials science and engineering, 2(2), 152-157.
- [7]. Shafiqh F. S. (2012). *High Strength lightweight concrete using leca, silica fume and limestone*. Arabian Journal of Science and Engineering, vol 37, 2012, 1885-1893.
- [8]. Nguyễn Trọng Lâm, Phạm Hữu Hanh (2014). *Nghiên cứu nâng cao chất lượng bê tông khí cường độ sử dụng cho nhà siêu cao tầng ở Việt Nam*. Tạp chí Khoa học công nghệ Xây dựng. Số 21 – tháng 10/2014. Pp 75-80.
- [9]. Ткаченко Т.Ф., Перцев В.Т. (2011). *Совершенствование технологии неавтоклавных пенобетонов*. Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2011(4), С. 243-50.
- [10]. Ву Ким Знен (2022). *Ячеистые бетоны с использованием плазмомодифицированного доменного шлака*. Шифр и наименование научной специальности: 2.1.5 Строительные материалы и изделия. Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный университет.
- [11]. Tăng Văn Lâm, Nguyễn Đình Trinh, Vũ Kim Diễm, Nguyễn Bá Bình (2023). *Bê tông bọt-khí dị hướng*. Hội Nghị khoa học thường niên năm 2023 – Trường Đại học Thủy lợi, Hà Nội, tháng 11 năm 2023.
- [12]. Tăng Văn Lâm, Võ Đình Trọng, Hồ Anh Cường (2024). *Nghiên cứu khả năng chế tạo bê tông bọt-khí với cấu trúc dị hướng trên cơ sở bột nhôm và chất tạo bọt EABASSOC*. Tạp chí KHCN Xây dựng. Số 01/2024. 49-59. <https://doi.org/10.59382/j-ibst.2024.vi.vol1-7>
- [13]. Королев А.С., Волошин Е.А., Трофимов Б.Я., Шаимов М.Х., Кузьменко С.А. (2004). *Способ изготовления вариатронных ячеистобетонных изделий*. Патент RU 2243190 C1. 27.12.2004. 5с.
- [14]. Большаков В.И, Мартыненко В.А. (2002). *Технологические аспекты производства мелкоштучных ячеистобетонных изделий из ячеистого бетона неавтоклавного твердения*. Киев. НИИСМИ. Строительные материалы и изделия. 2002. С. 13- 15.
- [15]. Nguyễn Trung Hiếu, Nguyễn Xuân Công, Võ Đình Trọng, Đặng Quang Minh, Trương Văn Cường (2023). *Nghiên cứu khả năng chế tạo bê tông nhẹ sử dụng bột nhôm và chất kết dính Geopolymer từ hỗn hợp tro bay, xỉ lò cao và phế thải nhà máy gốm sứ TOTO dùng trong công trình dân dụng và công nghiệp*. Đề tài NCKH sinh viên. Trường Đại học Mỏ-Địa chất.
- [16]. D.V. Kim, L.N. Cong, L.T. Van, and S.I. Bazhenova. (2020). *Foamed concrete containing various amounts of organic-mineral additives*. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1425. 2020. Pp. 12-22. Doi:10.1088/1742-6596/1425/1/012199.
- [17]. Бруяко, М.Г. (2022). *Ячеистые бетонов с вариатронной структурой на стадии формирования изделия / М.Г.Бруяко, С.И.Баженова, К.З.Ву*. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. №7.
- [18]. Miryuk O. (2017). *Formation of structure magnesium foamed concrete*. International Journal of Civil Engineering. February - March 2017. Vol. 6. Issue 2. Pp. 1-10.