

**Nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ nước trên chất kết dính và cát trên cốt liệu đến độ cứng của hỗn hợp bê tông và cường độ nén của bê tông đầm lăn bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm
Vũ Ngọc Tru¹, Tăng Văn Lâm^{2*}**

¹*Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 Giải Phóng, phường Đồng Tâm, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

²*Trường Đại học Mỏ - Địa chất, 10 Phó Viên, phường Đức Thắng, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam*

Ngày nhận bài 24/5/2024; ngày chuyển phản biện 27/5/2024; ngày nhận phản biện 3/6/2024; ngày chấp nhận đăng 23/6/2024

Tóm tắt:

Trong công nghệ bê tông đầm lăn (BTĐL), vì sử dụng lượng nước và xi măng thấp nên hỗn hợp BTĐL sau khi nhào trộn có độ cứng cao và phải dùng các thiết bị lu lèn để tạo hình sản phẩm. Do đó, hàm lượng nước nhào trộn, chất kết dính và cốt liệu được coi là những nhân tố quyết định, ảnh hưởng rất lớn đến các tính chất của BTĐL ở cả trạng thái dẻo và trạng thái cứng rắn. Các tác giả sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm để nghiên cứu ảnh hưởng của các tỷ lệ theo thể tích của nước - chất kết dính (V_N/V_{CKD}) và cát - cốt liệu (V_C/V_{CL}) đến các hàm mục tiêu nghiên cứu. Các hàm mục tiêu được lựa chọn là độ cứng của hỗn hợp bê tông và cường độ nén của BTĐL tại tuổi 28 ngày. Các hàm mục tiêu thu được cho thấy, cả hai biến V_N/V_{CKD} và V_C/V_{CL} đều có ảnh hưởng đáng kể đến giá trị của mô hình thực nghiệm. Khi tỷ lệ V_N/V_{CKD} tăng, hàm lượng nước đã góp phần tăng độ lưu động, giảm độ cứng của hỗn hợp bê tông, đồng thời nước dư thừa tồn tại trong khối bê tông dưới dạng các lỗ rỗng, từ đó giảm cường độ nén của sản phẩm. Hơn nữa, tỷ lệ V_C/V_{CL} của cốt liệu quá nhỏ hay quá lớn đều có xu hướng làm cho cường độ nén BTĐL giảm.

Từ khóa: bê tông đầm lăn, biến ảnh hưởng, cường độ nén, độ cứng, hàm mục tiêu.

Chỉ số phân loại: 2.1

Studying the effect of the ratio of water to binder and sand to aggregate on the hardness of concrete mixtures and compressive strength of roller-compacted concrete by experimental method

Ngoc Tru Vu¹, Van Lam Tang^{2*}

¹*Faculty of Bridges and Roads, Hanoi University of Civil Engineering, 55 Giai Phong Street, Hai Ba Trung District, Hanoi, Vietnam*

²*Hanoi University of Mining and Geology, 10 Pho Vien Street, Duc Thang Ward, Bac Tu Liem District, Hanoi, Vietnam*

Received 24 May 2024; revised 3 June 2024; accepted 23 June 2024

*Tác giả liên hệ: Email: tangvanlam@hmg.edu.vn.

Abstract:

In roller-compacted concrete technology, with the use of low water and cement content, the concrete mixture after kneading has high hardness and compaction equipment must be used to compact and shape the product. Therefore, the content of mixing water, binder, and aggregate are considered decisive factors, greatly affecting the properties of roller compacted concrete in both the fresh state and the hardened state. The paper uses the mathematical method of two-factor rotatable central compositional planning to simulate the effect of volumetric ratios of water-binder (V_N/V_{CKD}) and sand-aggregate (V_C/V_{CL}) on the objective functions of the test. The selected objective functions are the hardness of the concrete mixture and the compressive strength of the roller-compacted concrete at the age of 28 days. From the obtained objective functions, it is shown that both control variables V_N/V_{CKD} and V_C/V_{CL} have a significant influence on the values of the experimental model. When the V_N/V_{CKD} ratio increases, the water content contributes to increasing the plasticity and reducing the hardness of the concrete mixture. At the same time, excess water exists in the concrete mass in the form of air bubbles, pores, and magnetism. That reduces the compressive strength of the product. Furthermore, the V_C/V_{CL} ratio of the aggregate that is too small or too large tends to cause the compressive strength of the concrete to decrease.

Keywords: compressive strength, hardness, objective function, parameter, roller compacted concrete.

Classification number: 2.1**1. Đặt vấn đề**

Hiện nay, bê tông đầm lăn (BTĐL) ngày càng được sử dụng đa dạng hơn trong các công trình hạ tầng kỹ thuật, đặc biệt là hạ tầng giao thông [1, 2]. Cùng với quá trình phát triển của ngành xây dựng, công nghệ BTĐL đã được triển khai áp dụng ở nước ta từ những năm 2020. Trước tiên, BTĐL được sử dụng cho các công trình đập thủy điện. Sau đó, một số các nghiên cứu và ứng dụng BTĐL cho các mặt đường giao thông đã được triển khai và thu được nhiều kết quả khả quan [3, 4]. BTĐL là loại bê tông không có độ sụt, việc đầm chặt hỗn hợp này được thực hiện bằng phương pháp đầm bằng hệ thống lu lèn. Do sử dụng hàm lượng nước và xi măng thấp nên thể tích hồ xi măng trong BTĐL thường nhỏ hơn nhiều so với bê tông thường [5, 6]. Một trong những biện pháp hiệu quả để cải thiện cấu trúc và tính chất của bê tông là bổ sung thêm trong thành phần các loại phụ gia khoáng mịn, cũng như tối ưu tỷ lệ nước trên chất kết dính và cát trên cốt liệu [7, 8].

Với công nghệ phát triển, trên thế giới cũng như Việt Nam đã sử dụng nhiều loại BTĐL với các tỷ lệ nước trên chất kết dính và cát trên cốt liệu thích hợp để tạo ra các kết cấu có cường độ cao, khả năng chống thấm nước tốt và giá thành hợp lý. Tuy nhiên, các phương pháp nghiên cứu đã thực hiện vẫn còn sử dụng phương pháp rời rạc, chưa đánh giá được ảnh hưởng tương hỗ giữa hàm lượng vật liệu nền tính chất của BTĐL [1, 3, 9]. Mặt khác, khi sử dụng kết hợp với các loại

phụ gia khoáng như tro bay, xỉ lò cao, puzolan tự nhiên... đã tạo ra tổ hợp nước - chất kết dính - cốt liệu ảnh hưởng lớn tới tính chất của hỗn hợp BTĐL [2, 4, 9].

Hơn nữa, với sự phát triển của cách mạng công nghiệp 4.0, trong công nghệ vật liệu hiện đại có nhiều phương pháp thiết kế, mô phỏng và tối ưu hoá thành phần cấp phối của hỗn hợp BTĐL. Nhờ sự có mặt của các công cụ máy tính và phần mềm toán ứng dụng, như Matlab, Maple... đã cho phép lựa chọn và sử dụng phương pháp số hiệu quả, độ chính xác lớn và tính khả thi cao [10, 11].

Lý thuyết quy hoạch thực nghiệm trên cơ sở mô hình thống kê được sử dụng để nghiên cứu nhiều đối tượng khác nhau, trong đó có đối tượng là các tỷ lệ thành phần vật liệu ảnh hưởng đến các tính chất của hỗn hợp BTĐL, cũng như sản phẩm bê tông sau khi đã cứng rắn [12-14]. Trong mô hình thực nghiệm, quá trình hóa - lý xảy ra đối với các đối tượng nghiên cứu - hỗn hợp bê tông được đặc trưng bằng các biến ảnh hưởng, giữa chúng có quan hệ nguyên nhân - kết quả. Các biến đóng vai trò nguyên nhân, gọi là biến điều khiển đầu vào, còn các biến phản ánh kết quả do nguyên nhân gây ra, được gọi là hàm mục tiêu của mô hình nghiên cứu. Nhiều nghiên cứu cho rằng, biến đầu vào có thể kiểm soát và điều khiển được, là công cụ điều khiển để thu được đối tượng nghiên cứu có tính chất thích hợp.

Bài báo này mô phỏng ảnh hưởng của hai biến điều khiển là tỷ lệ theo thể tích của nước - chất kết dính (V_N/V_{CKD}) và tỷ lệ cát - cốt liệu (V_C/V_{CL}) theo thể tích đến độ cứng của hỗn hợp bê tông và cường độ nén của các mẫu BTĐL tại tuổi 28 ngày bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box-Wilson. Đồng thời, các bề mặt biểu hiện, đường đồng mức và xác suất phân bố của các điểm thí nghiệm của các hàm hồi quy cũng đã được xác định trong nghiên cứu này.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu sử dụng

Chất kết dính gồm có hai thành phần là xi măng Portland PC40 Bút Sơn và tro bay nhiệt điện Phả Lại: a) Xi măng Portland PC40 (X) Bút Sơn thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của tiêu chuẩn TCVN 2682:2020. Các tính chất cơ lý của xi măng Portland PC40 Bút Sơn được giới thiệu trong bảng 1.

Bảng 1. Tính chất cơ lý của xi măng Portland PC40 Bút Sơn.

STT	Chỉ tiêu kỹ thuật	Đơn vị	Kết quả	Theo yêu cầu TCVN 2682:2020
1	Độ mịn, theo phương pháp Blaine	cm ² /g	3520	≥2800
2	Khối lượng riêng	g/cm ³	3,15	-
3	Khối lượng thể tích ở trạng thái tự nhiên	g/m ³	1650	-
4	Lượng nước tiêu chuẩn	%	29,7	-
	Thời gian đông kết			
5	Thời gian bắt đầu	Phút	120	≥45
	Thời gian kết thúc	Phút	280	≤375
	Cường độ nén ở các tuổi:			
6	Tuổi 3 ngày	MPa	28,5	≥21

	Tuổi 28 ngày	MPa	47,5	≥ 40
7	Độ ổn định thể tích, phương pháp Chaterlier	Lemm	6,5	≤ 10

Thành phần khoáng vật và thành phần hóa học của xi măng Portland PC40 Bút Sơn được trình bày trong các bảng 2 và 3.

Bảng 2. Thành phần khoáng vật của xi măng Portland PC40 Bút Sơn.

Thành phần khoáng vật (%)				
Tricanxi-silicat C ₃ S	Dicanxi-silicat C ₂ S	Tricanxi-aluminat C ₃ A	Tetracanxi-Alumino-Ferit C ₄ AF	Thành phần khác
55,1	27,2	5,1	11,3	1,3

Bảng 3. Thành phần hóa học của xi măng Portland PC40 Bút Sơn.

Thành phần hóa học (%)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	CO ₂	P ₂ O ₅	Hàm lượng mất khi nung
18,6	4,5	3,1	3,1	0,6	0,2	3,2	63,6	-	0,9	2,2

b) Tro bay (TB) loại F của nhà máy nhiệt điện Phả Lại thỏa mãn các yêu cầu của TCVN 10302:2014.

Thành phần hóa học và các tính chất vật lý cơ bản của tro bay của Nhà máy nhiệt điện Phả Lại được thể hiện trong các bảng 4 và 5.

Bảng 4. Tính chất vật lý của tro bay nhiệt điện Phả Lại.

STT	Loại vật liệu	Đơn vị tính	Tro bay nhiệt điện Phả Lại
1	Tỷ diện bề mặt riêng	cm ² /g	3750
2	Khối lượng riêng (g/cm ³)	cm ² /g	2,35
3	Khối lượng thể tích khô	kg/m ³	1570
4	Chỉ số hoạt tính ở tuổi:		
	7 ngày	%	84,6
	28 ngày	%	93,1

Bảng 5. Thành phần hóa học của tro bay nhiệt điện Phả Lại.

Thành phần hóa học (%)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	Hàm lượng mất khi nung	
60,22	21,17	5,85	2,42	1,25	1,23	0,57	2,12	1,03	4,14	

Như vậy, tổng hàm lượng chất kết dính (CKD) trong hỗn hợp BTĐL được xác định theo công thức số (1):

$$CKD=X+TB \quad (1)$$

trong đó: X - là khối lượng xi măng Portland PC40 Bút Sơn, kg; TB - là khối lượng tro bay Nhà máy nhiệt điện Phả Lại, kg.

Cốt liệu nhỏ: Cốt liệu nhỏ sử dụng trong nghiên cứu này là cát vàng sông Lô (C), chất lượng tốt. Cát vàng sông Lô được sàng sơ bộ qua sàng kích thước 5,0

mm để loại bỏ lượng các hạt sỏi có kích thước lớn. Các tính chất cơ lý và thành phần hạt của cát vàng sông Lô được trình bày trong bảng 6 và 7.

Bảng 6. Tính chất cơ lý của các loại cát sử dụng cho nghiên cứu.

STT	Tên chỉ tiêu xác định	Đơn vị tính	Kết quả thí nghiệm	Theo yêu cầu TCVN 7570:2006
1	Nguồn gốc	-	Cát vàng sông Lô	-
2	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,65	-
3	Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	1450	-
4	Độ hồng giữa các hạt cốt liệu %		45,1	-
5	Độ hút nước	%	1,25	-
6	Hàm lượng bụi, bùn, sét	%	1,87	<2,0
7	Hàm lượng tạp chất hữu cơ	So màu	Không sẫm hơn màu chuẩn-	
8	Hàm lượng SO ₃	%	0,02	<1,0

Bảng 7. Thành phần hạt của Cát vàng sông Lô sử dụng cho nghiên cứu.

STT	Đường kính mắt sàng	Lượng sót sàng tích lũy theo thí nghiệm (%)	Lượng sót sàng tích lũy theo TCVN 7570:2006 (%)
1	5,0 mm	0	0
2	2,5 mm	2,9	0÷20
3	1,25 mm	16,7	15÷45
4	630 μm	42,3	35÷70
5	315 μm	80,5	65÷90
6	140 μm	92,5	90÷100
7	<140 μm	8,8	<10
8	Mô đun độ lớn M _{d1}	3,05	2,0÷3,3

Từ kết quả thí nghiệm trên các bảng 6 và 7 cho thấy, mẫu cát vàng sông Lô đã khảo sát có các tính chất vật lý như thành phần hạt, mô đun độ lớn, khối lượng riêng, khối lượng thể tích... đáp ứng đầy đủ các yêu cầu trong tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 “Cốt liệu cho bê tông và vữa” và được xếp vào loại cát thô, chất lượng tốt.

Cốt liệu lớn cho bê tông: Cốt liệu lớn sử dụng cho chế tạo BTĐL là loại đá dăm (Đ) có kích thước hạt 5÷20 mm. Đá dăm sử dụng có nguồn gốc từ đá vôi mỏ đá Kiện Khê - Hà Nam. Tính chất cơ lý và thành phần hạt của đá thể hiện trong bảng 8.

Bảng 8. Tính chất cơ lý của đá dăm.

STT	Tên chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị tính	Kết quả thí nghiệm	Theo TCVN 7570:2006
1	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,70	-
2	Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	1450	-
3	Độ hồng giữa các hạt cốt liệu	%	46,5	-
4	Hàm lượng hạt thoi dẹt	%	13,32	<15
5	Hàm lượng bùn, bụi, sét	%	0,78	<2,0
6	Lượng sót sàng tích lũy trên các sàng:			
	40 mm	%	0	0

20 mm	%	5,7	0÷10
10 mm	%	58,3	40÷70
5 mm	%	97,2	90÷100

Vì vậy, hàm lượng cốt liệu (CL) sử dụng trong thành phần hỗn hợp BTĐL được xác định theo công thức số (2):

$$CL=C+Đ \quad (2)$$

trong đó: C - là khối lượng cát vàng sông Lô, kg; Đ- là khối lượng đá dăm, kg.

Nước sạch: Nước sử dụng trộn mẫu trong nghiên cứu này là nước máy sinh hoạt thành phố Hà Nội. Tính chất của nước (N) phù hợp với tiêu chuẩn TCVN 4506:2012 - “Nước trộn cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật”.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Các tiêu chuẩn thí nghiệm: Trong nghiên cứu đã sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với kiểm chứng bằng thực nghiệm để điều chỉnh tính chất của hỗn hợp BTĐL thu được. Các tính chất của hỗn hợp bê tông và BTĐL được xác định theo các tiêu chuẩn sau:

+ Lấy mẫu, đúc mẫu trên bàn rung và bảo dưỡng mẫu BTĐL được thực hiện theo TCVN 3105:2022.

+ Xác định độ cứng của hỗn hợp BTĐL được thực hiện theo TCVN 3107:2022.

+ Cường độ chịu nén của BTĐL được thực hiện theo TCVN 3118:2022.

Phương pháp tính toán cấp phối của hỗn hợp BTĐL: Theo nhiều nghiên cứu về BTĐL cho thấy, thành phần BTĐL được lựa chọn dựa trên quan hệ giữa cường độ nén và một số tính chất khác với tỷ lệ N/CKD [2-6]. Mục tiêu của các phương pháp này là khối lượng hồ xi măng cần vừa đủ để lấp đầy khoảng trống giữa các hạt cốt liệu để hỗn hợp bê tông sau khi lèn chặt có độ rỗng nhỏ hơn.

Trong nghiên cứu này, thành phần cấp phối của hỗn hợp BTĐL được tính toán dựa trên cơ sở của tiêu chuẩn ACI 211.3R [15] kết hợp với một số kết quả nghiên cứu về BTĐL ở Việt Nam [1-7]. Cấp phối sau khi tính toán theo tiêu chuẩn ACI 211.3R đã được điều chỉnh cho hợp lý với nguồn vật liệu trong nước.

- Mô phỏng ảnh hưởng và xác định cấp phối tối ưu của hỗn hợp bê tông được thực hiện theo phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box-Wilson. Phương pháp thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box-Wilson cho phép thu được mô hình thực nghiệm chính xác hơn bằng cách tăng số lượng thí nghiệm lặp lại tại trung tâm và một số điểm thực nghiệm đặc biệt tại cánh tay tròn $\alpha = \sqrt{2}$ [14].

Các yêu cầu đối với hỗn hợp bê tông và mẫu BTĐL sau khi đã cứng rắn: Trong nghiên cứu này, các đặc tính yêu cầu về công nghệ chế tạo BTĐL được lựa chọn như sau:

+ Hỗn hợp BTĐL được sử dụng với mục đích làm lớp lót đệm giữa các lớp đổ cho mặt đường nông thôn, nên theo ACI 211.3R thu được tỷ lệ hồ/vữa $r_{h/v}=0,42$ [15].

+ Độ cứng của hỗn hợp BTĐL từ 20 giây đến 40 giây được xác định bằng bộ dụng cụ Vebe.

+ Cường độ nén yêu cầu trên mẫu lập phương $150 \times 150 \times 150$ mm ở tuổi 28 ngày mục tiêu cần đạt được từ 28 MPa.

+ Tỷ lệ thể tích cát trên tổng thể tích cốt liệu (V_C/V_{CL}) được khảo sát trong khoảng $V_C/V_{CL}=0,41-0,50$ [1, 2].

+ Theo tiêu chuẩn ACI 211.3R với cường độ nén yêu cầu cần đạt được ở tuổi 28 ngày $R_{yc}=28$ MPa thu được:

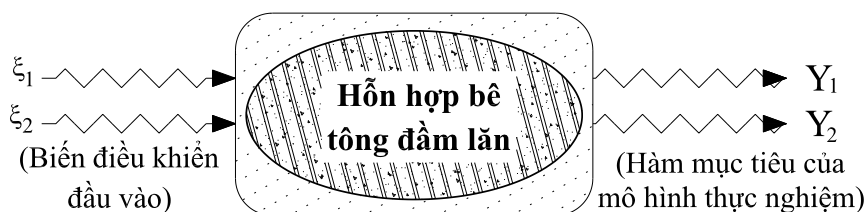
i) Tỷ lệ tro bay (TB) nhiệt điện Phả Lại và xi măng theo thể tích được lựa chọn trong khoảng $V_{TB}/V_X=0,35$.

ii) Tỷ lệ thể tích nước trên thể tích chất kết dính (V_N/V_{CKD}) được khảo sát trong khoảng $V_N/V_{CKD}=1,40-1,60$.

+ Hàm lượng bọt khí trong hỗn hợp BTĐL được lựa chọn là 2% [3, 7].

2.3. Xây dựng mô hình thực nghiệm

Theo các nghiên cứu phương pháp quy hoạch thực nghiệm nhằm mục đích tạo ra mô hình toán học để mô phỏng và dự đoán ảnh hưởng của các biến đầu vào đến tính chất của đối tượng thực nghiệm, được coi là các hàm mục tiêu đầu ra của quá trình nghiên cứu. Mô hình thực nghiệm trong nghiên cứu này được mô tả trên hình 1 [12-14].



Hình 1. Cấu trúc mô hình thực nghiệm.

Trong nghiên cứu này, hàm mục tiêu bậc hai được lựa chọn gồm có:

+ Độ cứng ĐC (giây)= Y_1 được xác định ngay sau khi nhào trộn xong hỗn hợp bê tông bằng bộ dụng cụ Vebe theo TCVN 3105:2022.

+ Cường độ nén R_n^{28} (MPa)= Y_2 được xác định thông qua giá trị cường độ nén trung bình của mẫu hình lập phương kích thước $150 \times 150 \times 150$ mm ở tuổi 28 ngày.

Phương trình tổng quát của các hàm mục tiêu trong mô hình thực nghiệm này có dạng như trong công thức số (3):

$$Y = b_0 + b_1 * \xi_1 + b_2 * \xi_2 + b_3 * \xi_1 * \xi_2 + b_4 * \xi_1^2 + b_5 * \xi_2^2 \quad (3)$$

trong đó: Y là hàm mục tiêu của mô hình thực nghiệm; ξ_1 và ξ_2 là các biến đầu vào của mô hình; $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4,$ và b_5 là các hệ số của hàm mục tiêu Y .

Nghiên cứu này đã chọn các biến số đầu vào nhằm điều khiển hàm mục tiêu và khoảng biến thiên của chúng như sau:

+ Tỷ lệ thể tích nước trên thể tích chất kết dính ($\frac{V_N}{V_{CKD}}$) mã hoá là ξ_1 thay đổi từ 1,40 đến 1,60.

+ Tỷ lệ thể tích cát trên tổng thể tích cốt liệu ($\frac{V_C}{V_{CL}}$) mã hoá là ξ_2 thay đổi từ 0,41 đến 0,50.

Từ các căn cứ trên, nghiên cứu đã xác định được các khoảng biến thiên các biến số đầu vào trong kế hoạch thực nghiệm mô hình bậc hai được trình bày trong bảng 9.

Bảng 9. Khoảng biến thiên các biến số trong kế hoạch thực nghiệm bậc hai.

Các nhân tố ảnh hưởng	Biến mã hóa	Các điểm quy hoạch bậc hai					Khoảng biến thiên δ	Cánh tay đòn $\alpha = \sqrt{2} = 1,414$
		-1,414	-1	0	+1	+1,414		
$\frac{V_N}{V_{CKD}}$	ξ_1	1,32	1,4	1,5	1,6	1,68	0,1	0,08
$\frac{V_C}{V_{CL}}$	ξ_2	0,402	0,41	0,45	0,49	0,498	0,04	0,008

Số thí nghiệm trong kế hoạch bậc hai tâm xoay của Box-Wilson đối với hai biến điều khiển được xác định theo công thức số (4) [12, 14]:

$$N = 2^k + 2 * k + n_0 = 2^2 + 2 * 2 + 5 = 13 \quad (4)$$

trong đó: k - số biến điều khiển mô hình thực nghiệm, $k=2$; n_0 - số thí nghiệm lặp lại ở tâm của mô hình thực nghiệm, $n_0=5$ [8, 10].

Xác định cấp phối BTĐL: Tính toán theo tiêu chuẩn ACI 211.3R [15] dựa trên các giá trị tỷ lệ vật liệu đã lựa chọn trong bảng 9 và hiệu chỉnh cấp phối phù hợp với các tính chất của vật liệu sử dụng, nghiên cứu đã thu được 13 cấp phối thực nghiệm đối với hai biến đầu vào ξ_1 và ξ_2 được trình bày trong bảng 10.

Bảng 10. Cấp phối thực nghiệm theo quy hoạch bậc hai tâm xoay.

STT	Biến mã hóa		Biến thực		Cấp phối BTĐL thực nghiệm (kg/m ³)					
	ξ_1	ξ_2	$\frac{V_N}{V_{CKD}}$	$\frac{V_C}{V_{CL}}$	CKD	X	TB	C	Đ	N
1	+1	+1	1,60	0,49	290	230	60	939	996	158
2	-1	+1	1,40	0,49	315	250	65	939	996	150
3	+1	-1	1,60	0,41	254	201	53	821	1204	138
4	-1	-1	1,40	0,41	275	218	57	821	1204	131
5	+1,414	0	1,68	0,45	264	210	55	881	1098	151
6	-1,414	0	1,32	0,45	305	242	63	881	1098	137
7	0	+1,414	1,50	0,498	306	242	63	951	976	156
8	0	-1,414	1,50	0,402	260	206	54	809	1226	133
9	0	0	1,50	0,45	283	225	59	881	1098	145
10	0	0	1,50	0,45	283	225	59	881	1098	145
11	0	0	1,50	0,45	283	225	59	881	1098	145
12	0	0	1,50	0,45	283	225	59	881	1098	145
13	0	0	1,50	0,45	283	225	59	881	1098	145

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Độ cứng của hỗn hợp bê tông đầm lăn

Sau khi nhào trộn bằng máy trộn cưỡng bức hai trục, độ cứng của hỗn hợp BTĐL được xác định trên thiết bị Vebe tiêu chuẩn. Giá trị trung bình độ cứng ĐC (giây) của hỗn hợp BTĐL được trình bày chi tiết trong bảng 11.

Bảng 11. Giá trị trung bình độ cứng ĐC (giây) của hỗn hợp BTĐL.

STT	Biến mã hóa		Biến thực		Hàm mục tiêu số 01 của mô hình: $Y_1 = \text{ĐC}$ (giây)			
	ξ_1	ξ_2	$\frac{V_N}{V_{CKD}}$	$\frac{V_C}{V_{CL}}$	Y_{1j}	\hat{Y}_{1j}	$(Y_{1j} - \hat{Y}_{1j})^2$	$(Y_{01j} - \hat{Y}_{01j})^2$
1	+1	+1	1,60	0,49	29,5	29,6	0,003	-
2	-1	+1	1,40	0,49	34,5	36,0	2,287	-
3	+1	-1	1,60	0,41	28,0	25,9	4,458	-
4	-1	-1	1,40	0,41	30,5	32,3	3,408	-
5	+1,414	0	1,68	0,45	25,0	26,5	2,319	-
6	-1,414	0	1,32	0,45	38,0	35,6	5,627	-
7	0	+1,414	1,50	0,498	34,5	33,4	1,188	-
8	0	-1,414	1,50	0,402	28,0	28,2	0,058	-
9	0	0	1,50	0,45	34,0	34,7	0,490	0,49
10	0	0	1,50	0,45	36,5	34,7	3,240	3,24
11	0	0	1,50	0,45	33,5	34,7	1,440	1,44
12	0	0	1,50	0,45	34,0	34,7	0,490	0,49
13	0	0	1,50	0,45	35,5	34,7	0,640	0,64
Y_1	$\Sigma(Y_{1j} - \hat{Y}_{1j})^2 = 25,56$		$S_{1d}^2 = 3,21$		$\Sigma(Y_{01j} - \hat{Y}_{01j})^2 = 6,30$		$S_{111}^2 = 1,575$	$S_{1bj} = 0,348$

3.2. Cường độ nén của mẫu bê tông đầm lăn sau khi đã cứng rắn

Thí nghiệm cường độ nén của BTĐL được thực hiện trên mẫu hình lập phương kích thước 150*150*150 mm. Phương pháp lấy mẫu, đúc mẫu trên bàn rung và bảo dưỡng mẫu BTĐL sau khi tạo hình được thực hiện theo TCVN 3105:2022.

Cường độ nén của mẫu được xác định ở tuổi 28 ngày trên hệ thống thiết bị tự động Advantest 9 với tốc độ tăng tải là 1000 N/s theo yêu cầu TCVN 3118:2022. Mỗi tổ mẫu thí nghiệm gồm 06 viên mẫu tương ứng cho mỗi cấp phối.

Các kết quả thực nghiệm về giá trị cường độ nén trung bình mục tiêu ở tuổi 28 ngày được trình bày trong bảng 12.

Bảng 12. Giá trị trung bình cường độ nén của mẫu BTĐL ở tuổi 28 ngày.

STT	Biến mã hóa		Biến thực		Hàm mục tiêu số 02 của mô hình: $Y_2=R_{28}^n$ (MPa)			
	ξ_1	ξ_2	$\frac{V_N}{V_{CKD}}$	$\frac{V_C}{V_{CL}}$	Y_{2j}	\hat{Y}_{2j}	$(Y_{2j} - \hat{Y}_{2j})^2$	$(Y_{02j} - \hat{Y}_{02j})^2$
1	+1	+1	1,60	0,49	23,4	23,07	0,108	-
2	-1	+1	1,40	0,49	28,1	26,45	2,720	-
3	+1	-1	1,60	0,41	20,5	19,73	0,600	-
4	-1	-1	1,40	0,41	24,1	23,10	0,991	-
5	+1,414	0	1,68	0,45	20,2	20,53	0,109	-
6	-1,414	0	1,32	0,45	23,9	25,30	1,947	-
7	0	+1,414	1,50	0,498	24,7	25,62	0,851	-
8	0	-1,414	1,50	0,402	20,1	20,90	0,646	-
9	0	0	1,50	0,45	25,8	27,06	1,588	1,588
10	0	0	1,50	0,45	28,9	27,06	3,386	3,386
11	0	0	1,50	0,45	26,1	27,06	0,922	0,922
12	0	0	1,50	0,45	26,7	27,06	0,130	0,130
13	0	0	1,50	0,45	27,8	27,06	0,548	0,548
Y_2	$\Sigma(Y_{2j} - \hat{Y}_{2j})^2 = 14,544$		$S_{2d}^2 = 1,818$		$\Sigma(Y_{02j} - \hat{Y}_{02j})^2 = 6,572$		$S_{211}^2 = 1,643$	$S_{2b_j} = 0,3555$

3.3. Xác định hàm hồi quy để mô phỏng ảnh hưởng của các biến đến hàm mục tiêu

Áp dụng các công thức toán học theo lý thuyết quy hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box-Wilson và sự hỗ trợ của phần mềm toán học Matlab, đã thu được các phương trình hồi quy bậc hai về độ cứng DC (giây) của hỗn hợp bê tông và cường độ nén ở các tuổi 28 ngày của mẫu BTĐL tương ứng có dạng như trong phương trình số (5) và số (6):

$$DC=Y_1=34,7-3,23*\xi_1+1,83*\xi_2-1,81*\xi_1^2-0,63*\xi_1*\xi_2-1,94*\xi_2^2 \quad (5)$$

(giây)

$$R_{28}^n=Y_2=27,06-1,69*\xi_1+1,67*\xi_2-2,07*\xi_1^2-0,28*\xi_1*\xi_2-1,90*\xi_2^2 \quad (6)$$

(MPa)

Dựa trên các phương trình hàm hồi quy số (5) và số (6), giá trị tính toán của hàm mục tiêu \hat{y}_i và \hat{y}_0 đã được xác định theo hai biến mã hóa ξ_1 ; ξ_2 và trình bày trong các bảng 11 và 12.

a) Kiểm tra tính có nghĩa của các hệ số b_j của các hàm hồi quy theo chuẩn số Student ($t_\alpha(f_2)$). Hệ số b_j có nghĩa nếu:

$$t_{bj} \geq t_\alpha(f_2) \quad (7)$$

trong đó: ($t_\alpha(f_2)$) là giá trị tra bảng của chuẩn số Student, với mức độ có nghĩa là $\alpha=0,05$; bậc tự do lặp lại $f_2=N \times (k-1)=13 \times (2-1)=13$. Theo nghiên cứu của L.N. Bolshev và cs (1983) [16] đã thu được $t_{0,05}(13)=1,7709$.

Giá trị của chuẩn số Student t_{bj} đối với hệ số b_j được xác định theo công thức (8):

$$t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{bj}} \Rightarrow |b_j| = t_{bj} \times S_{bj} \quad (8)$$

Độ lệch tiêu chuẩn S_{bj} của phân bố b_j được xác định theo công thức (9) và giá trị ghi trong bảng 11 và 12:

$$S_{bj} = \sqrt{\frac{S_{II}^2}{N}} \quad (9)$$

trong đó: N là tổng số thí nghiệm ($N = 13$) và S_{II}^2 là phương sai lặp, được xác định theo công thức (10) và các trị tính toán này đã được đưa ra trong bảng 11 và 12.

$$S_{II}^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (Y_{oj} - \hat{Y}_o)^2}{m-1} \quad (10)$$

trong đó: m - Số thí nghiệm lặp ở tâm ($m=n_0=5$), Y_{oj} - giá trị thu được của thí nghiệm thứ i ở tâm kế hoạch và \hat{Y}_o - giá trị trung bình của các thí nghiệm ở tâm.

Theo tính có nghĩa của chuẩn số Student: $t_{bj} \geq t_\alpha(f_2)$ trong đó: $t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{bj}}$. Từ đó thu được $|b_j| \geq t_\alpha(f_2) \times S_{bj}$. Hệ số b_j của phương trình hàm hồi quy được coi là có nghĩa, nếu: $|b_j| \geq t_{0,05}(13) \times S_{bj} = 1,7709 \times S_{bj}$.

Theo giá trị tra bảng của chuẩn số Student và giá trị S_{bj} đã được tính toán và liệt kê trong bảng 11 và 12, phương trình hàm hồi quy bậc hai thu gọn về độ cứng ĐC (giây) hỗn hợp BTĐL và giá trị cường độ nén trung bình R_n^{28} của mẫu bê tông ở tuổi 28 ngày của BTĐL tương ứng có dạng như các phương trình số (11) và số (12):

$$\begin{aligned} \text{ĐC} = Y_1 = & 34,7 - 3,23 * \xi_1 + 1,83 * \xi_2 - 1,81 * \xi_1^2 - 1,94 * \xi_2^2 \text{ (giây);} \\ & (R^2 = 0,8825) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} R_{28}^n = Y_2 = & 27,06 - 1,69 * \xi_1 + 1,67 * \xi_2 - 2,07 * \xi_1^2 - 1,90 * \xi_2^2 \text{ (MPa);} \\ & (R^2 = 0,8933) \end{aligned} \quad (12)$$

b) Kiểm tra tính tương hợp của mô hình theo chuẩn số Fisher.

Tính tương hợp của mô hình thí nghiệm được kiểm tra theo chuẩn số Fisher [9, 10], theo công thức (13):

$$F_0 = \frac{S_d^2}{S_{II}^2} \quad (13)$$

Với s_{II}^2 là phương sai lặp, được xác định theo công thức (9) và các trị đã được đưa ra trong bảng 11 và 12.

s_d^2 là phương sai dư, được xác định theo công thức (14) và các trị cũng đã được trình bày trong bảng 11 và 12.

$$S_d^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N - B} \quad (14)$$

trong đó: Y_i ; \hat{Y}_i - giá trị thực nghiệm và giá trị tính toán của các hàm mục tiêu số (5) và số (6); N - số điểm thí nghiệm, $N=13$; B - số các hệ số có nghĩa trong phương trình hồi quy bậc hai số (5) và số (6), thu được $B=5$.

Bên cạnh đó $F_{\alpha}(f_1, f_2)$ là giá trị của chuẩn số Fisher, xác định bằng cách tra bảng 3.5 trong nghiên cứu của L.N. Bolshev và cs (1983) [16] ở mức có nghĩa $\alpha = 0,05$; bậc tự do lặp $f_2=m-1=5-1=4$ ($m=5$ là số thí nghiệm lặp lại ở tâm); bậc tự do dư $f_1=N-B=13-5=8$. Từ đó đã thu được $F_{0,05}(8, 4) = 6.0410$.

Theo các giá trị của s_d^2 và s_{II}^2 thu được trong bảng 11 và 12, đã tính toán được giá trị của chuẩn số Fisher đối với các hàm mục tiêu độ cứng hỗn hợp BTĐL và giá trị cường độ nén của mẫu bê tông ở tuổi 28 ngày lần lượt như sau:

+ Với hàm độ cứng của hỗn hợp bê tông: $F_0^{DC} = 3,206/1,575 = 2,0355$.

+ Với hàm cường độ nén của tuổi 28 ngày: $F_{0n}^{28} = 1,818/1,643 = 1,1065$.

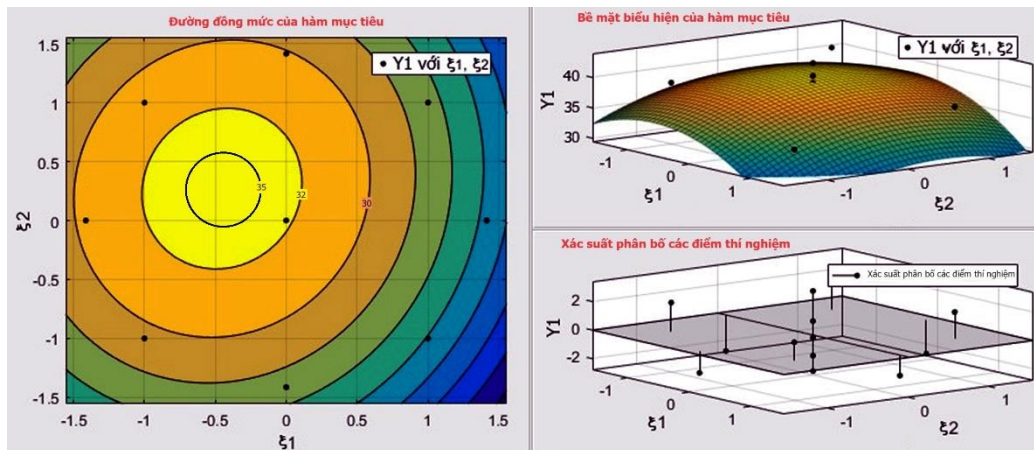
Vì F_0^{DC} và $F_{0n}^{28} < F_{0,05}(8, 4)$, do đó các mô hình thực nghiệm về độ cứng hỗn hợp bê tông và cường độ nén đã được xác định và mô tả thông qua các hàm hồi quy bậc hai số (5) và (6) là tương hợp với bức tranh thực nghiệm chứa các biến điều khiển đã lựa chọn.

Từ các kết quả phân tích bề mặt biểu hiện của các phương trình hồi quy thu gọn (11) và (12) với các hệ số tương quan (R^2), tương ứng, là 0,8825 và 0,8933 đã chỉ ra rằng các tỷ lệ theo thể tích $\frac{V_N}{V_{CKD}}$ và $\frac{V_C}{V_{CL}}$ đều có ảnh hưởng đáng kể đến các giá trị hàm mục tiêu của mô hình thực nghiệm.

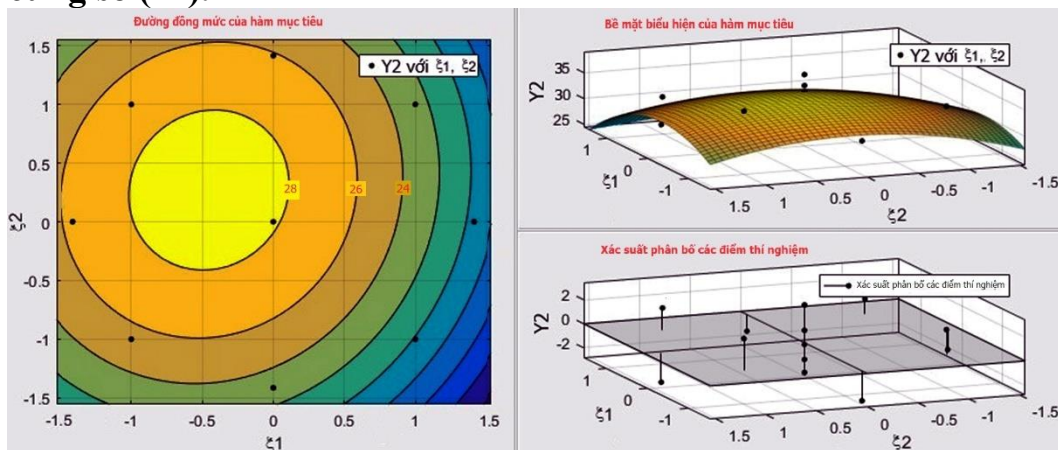
c) Biểu diễn bề mặt và các đường đồng mức của phương trình hồi quy

Bằng cách sử dụng phần mềm Matlab, các hình ảnh của bề mặt biểu hiện và các đường đồng mức tương ứng của phương trình hồi quy (11) và (12) đã được đưa thể hiện trên hình 2 và 3. Hình ảnh của bề mặt biểu hiện và các đường đồng

mức tương ứng của phương trình hồi quy số (11) và số (12) được dùng để chỉ ra được vùng ảnh hưởng nhiều nhất của các biến điều khiển.



Hình 2. Bề mặt biểu hiện và đường đồng mức của các hàm mục tiêu về độ cứng số (11).



Hình 3. Bề mặt biểu hiện và đường đồng mức của các hàm mục tiêu về cường độ nén số (12).

Các phương trình mục tiêu của mô hình thực nghiệm đã thể hiện được ảnh hưởng của các tỷ lệ theo thể tích $\frac{V_N}{V_{CKD}}$ và $\frac{V_C}{V_{CL}}$ đến các độ cứng hỗn hợp BTĐL và cường độ nén ở tuổi 28 ngày dưới dạng hàm số bậc hai. Các hàm số này có thể được sử dụng để nghiên cứu, phân tích ảnh hưởng của các thông số điều khiển đầu vào đến độ cứng của hỗn hợp bê tông và cường độ nén của bê tông, cũng như có thể sử dụng để xác định cấp phối tối ưu đáp ứng các yêu cầu đặt ra, cụ thể như sau:

Từ hình 2 cho thấy, khi tỷ lệ thể tích $\frac{V_N}{V_{CKD}}$ thay đổi thì giá trị độ cứng của hỗn hợp bê tông đã thay đổi mạnh, các đường đồng mức về độ cứng thay đổi rõ rệt trong khoảng từ 30÷35 giây. Trong khi đó, nếu cố định lượng nước và thay đổi tỷ lệ $\frac{V_N}{V_{CKD}}$ thì độ cứng của hỗn hợp sau khi nhào trộn ít thay đổi, mức độ ảnh hưởng nhỏ. Nghĩa là khi có cùng lượng nước, lượng chất kết dính có thể biến thiên trong một khoảng nhất định thì giá trị độ cứng của hỗn hợp bê tông không thay

đôi đáng kể. Điều này phù hợp với quy luật lượng nước không đổi của hỗn hợp bê tông.

Hơn nữa, từ hình 3 thấy rằng các tỷ lệ $\frac{V_N}{V_{CKD}}$ và $\frac{V_C}{V_{CL}}$ đều ảnh hưởng theo chiều tỷ lệ nghịch với giá trị cường độ nén của bê tông ở tuổi 28 ngày. Điều này có thể được biện giải như sau. Với tỷ lệ $\frac{V_N}{V_{CKD}}$ tăng thì hàm lượng nước đã góp phần tăng độ lưu động cho hỗn hợp bê tông, đồng thời tồn tại trong khối bê tông dưới dạng các bọt khí, tăng độ rỗng và từ đó giảm cường độ nén của sản phẩm sau khi cứng rắn.

Tỷ lệ $\frac{V_C}{V_{CL}}$ của cốt liệu quá nhỏ hay quá lớn đều có xu hướng làm cho cường độ nén BTĐL giảm. Khi $\frac{V_C}{V_{CL}}$ thấp, hàm lượng cốt liệu thô lớn, thể tích vữa BTĐL sẽ không đủ để điền đầy khoảng trống giữa các hạt cốt liệu thô, điều này làm giảm độ đặc chắc của cấu trúc, khiến cho cường độ bê tông giảm. Khi tỷ lệ cát/cốt liệu cao sẽ làm dẫn cách các hạt cốt liệu lớn, ảnh hưởng không tốt đến độ ổn định bộ khung chịu lực của BTĐL [1-4]. Hơn nữa, trong nghiên cứu này hỗn hợp BTĐL có tỷ lệ hồ/vữa $r_{h/v}=0,42$ không đổi nên khi cát tăng, lượng hồ chất kết dính không đủ bao bọc bề mặt các hạt cát, ảnh hưởng không tốt tới hệ số lèn chặt hỗn hợp BTĐL và độ bám dính của cốt liệu trong BTĐL do đó cường độ của bê tông giảm.

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy, ảnh hưởng của tỷ lệ theo thể tích của $\frac{V_N}{V_{CKD}}$ và $\frac{V_C}{V_{CL}}$ đến độ cứng của hỗn hợp bê tông và cường độ nén của BTĐL là rõ rệt và được đã được mô phỏng bằng các phương trình hồi quy bậc hai.

Các hàm số này có thể được sử dụng để nghiên cứu, phân tích ảnh hưởng của các thông số điều khiển đầu vào đến độ cứng của hỗn hợp bê tông và cường độ nén của bê tông, cũng như có thể sử dụng để xác định cấp phối tối ưu đáp ứng các yêu cầu đặt ra.

Nghiên cứu cho thấy, khi tỷ lệ thể tích $\frac{V_N}{V_{CKD}}$ thay đổi thì giá trị độ cứng của hỗn hợp bê tông đã thay đổi mạnh, các đường đồng mức về độ cứng thay đổi rõ rệt trong khoảng từ 30 giây ÷ 35 giây.

Cường độ nén của BTĐL ở tuổi 28 ngày tỷ lệ nghịch với các tỷ lệ $\frac{V_N}{V_{CKD}}$ và $\frac{V_C}{V_{CL}}$. Khi tỷ lệ $\frac{V_N}{V_{CKD}}$ tăng thì hàm lượng nước đã góp phần tăng độ lưu động cho hỗn hợp bê tông, đồng thời tồn tại trong khối bê tông dưới dạng các bọt khí, tăng độ rỗng và từ đó giảm cường độ nén của sản phẩm. Hơn nữa, tỉ lệ $\frac{V_C}{V_{CL}}$ của cốt liệu quá nhỏ hay quá lớn đều có xu hướng làm cho cường độ nén BTĐL giảm.

Có thể sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc hai để nghiên cứu tiếp các tính chất quan trọng khác của BTĐL như: thời gian đông kết của hỗn hợp bê tông, độ mài mòn, khả năng thấm nước...

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] D.M. Hoang, K.T. Nguyen (2015), "Use fly ash with high loss during firing in making roller compacted concrete for roads", *Vietnam Institute for Building Science and Technology*, **2**, pp.30-36 (in Vietnamese).

[2] T.T.N. Nguyen (2016), *Research The Main Parameters Of Roller Compacted Concrete In Calculating The Structure Of Automobile And Airport Pavements*, Doctoral Thesis in Engineering, University of Transport and Communications (in Vietnamese).

[3] H.H. Pham (2009), *Roller Compacted Concrete*, Construction Publishing House (in Vietnamese).

[4] T.S. Nguyen, V.Q. Truong, D.H.H. Pham (2021), "Composition design and technical characteristics of roller compacted concrete with high fly ash content for the base layer of automobile pavement", *Transport*, **3**, pp.72-75 (in Vietnamese).

[5] H.Q. Nguyen (2005), *Research On Application Of Roller Compacted Concrete Technology For Road And Gravity Dam Construction*, Doctoral Thesis in Engineering, Vietnam Institute for Building Science and Technology (in Vietnamese).

[6] T.S. Nguyen, D.S. Vu (2012), "Research on the composition and mechanical properties of roller compacted concrete used for cement concrete pavement base layer", *Vietnam Road and Bridge*, **11+12**, pp.64-67 (in Vietnamese).

[7] H.H. Pham, N.L. Nguyen, V.D. Nguyen, et al. (2022), *Roller Compacted Concrete In Traffic Construction*, Construction Publishing House (in Vietnamese).

[8] D.R. Luhr (2004), "Design and construction of roller-compacted concrete pavements for container terminals", *Ports 2004: Port Development in The Changing World*, pp.1-10, DOI: 10.1061/40727(2004)125.

[9] T.S. Nguyen, Q.P. Nguyen (2012), "Using fly ash cement concrete to sustainably develop automobile pavement structures", *Transport*, **8**, pp.30-32 (in Vietnamese).

[10] L.V. Tang, D.V. Kim, B.B. Igorevich, et al. (2019), "Mathematical simulation of bottom ash effect and expanded polystyrene on the polystyrene concrete properties", *Materials Science Forum*, **974**, pp.312-318, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.312.

[11] L.V. Tang, D.V. Kim, D.T. Vu, et al. (2018), "Effects of high temperature on high performance fine-grained concrete properties", *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018*, **982**, pp.660-672, DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_62.

[12] H.P. Williams (2013), *Model Building in Mathematical Programming*, John Wiley & Sons.

[13] L.V. Tang, D.V. Kim, B.I. Bulgakov, et al. (2018), "Mathematical model of effect of the bottom ash and expanded polystyrene spheres on the polystyrene concrete properties", *Materials Science Forum*, **974**, pp.312-318, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.312.

[14] L.V. Tang, B.I. Bulgakov, O.V. Alexandrova (2017), "Mathematical modeling of the impact of raw material composition on compressive strength of high performance fine-grained concrete", *Proceedings of The Moscow State University of Civil Engineering*, **12(9)**, pp.999-1009, DOI: 10.22227/1997-0935.2017.9.999-1009 (in Russian).

[15] ACI 211.3R-02 (2002), *Guide For Selecting Proportion For No-Slump Concrete*, USA: ACI **commutee** 211.

[16] L.N. Bolshev, N.V. Smirnov (1983), *Tables of Mathematical Statistics*, Publishing House, Nauka, Moscow (in Russian).