



Using an experimental model to study the properties of fine-grained high-performance concrete



Lam Tang Van ^{1,*}, Dien Vu Kim ², Hung Ngo Xuan ¹, Bulgakov Boris Igorevich ², Chien Minh Do ³, Duong Van Nguyen ³

¹ Ha Noi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² Moscow State University of Construction, Moscow, Russia

³ College of Industrial and Constructional, Quang Ninh, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15th Oct. 2020

Revised 21st Jan. 2021

Accepted 01st Feb. 2021

Keywords:

Compressive strength,
Fine-grained high-performance
concrete,
Objective function,
Parameter.

ABSTRACT

This study uses the mathematical method of two-factors rotatable central compositional planning to predict and simulate the effect of the ratio of water-cement (N/X) and sand - binder (C/CKD) as the input parameters on the objective functions of the spreading flow of concrete mixtures and the compressive strength of fine-grained high-performance concrete (FGHPC) at 28 days. Results of the study showed that, from the material source in Vietnam, it is possible to FGHPC with a flow of 18.5 cm in the mini cone, its compressive and flexural strengths at the age of 28 days are 68.5 MPa and 6.13 MPa, respectively. Furthermore, from the obtained objective functions, it has been shown that the both two-input parameters have a significant influence on the values of the experimental models. Particularly, using Matlab software is showed the expression surface, the contour line of the experimental models, and determined the maximum value of compressive strength of FGHPC at this age of 69.84 MPa at $N/X=0.326$ and $C/CKD=1.315$. The contribution of this study is to obtain regression functions to predict the mechanical-physical properties of FGHPC that will be used in the next in-depth studies.

Copyright © 2021 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: lamvantang@gmail.com

DOI: 10.46326/JMES.2021.62(1).09



Sử dụng mô hình thực nghiệm để nghiên cứu các tính chất của bê tông chất lượng cao hạt mịn

Tăng Văn Lâm^{1,*}, Vũ Kim Điển², Ngô Xuân Hùng¹, Bulgakov Boris Igorevich², Đỗ Minh Chiến³, Nguyễn Văn Dương³

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

² Trường Đại học Xây dựng Quốc gia Mátxcova, Mátxcova, Liên bang Nga

³ Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng, Quảng Ninh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 15/10/2020

Sửa xong 21/01/2021

Chấp nhận đăng 01/02/2021

Từ khóa:

Cường độ nén,
Bê tông chất lượng cao hạt
mịn,
Biến ảnh hưởng,
Hàm mục tiêu.

TÓM TẮT

Bài báo đã sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc hai để dự đoán và mô phỏng ảnh hưởng của tỷ lệ nước - xi măng (N/X) và cát - chất kết dính (C/CKD) đến các hàm mục tiêu là độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông và cường độ nén của mẫu bê tông chất lượng cao hạt mịn (BTCLCHM). Kết quả nghiên cứu cho thấy, từ nguồn vật liệu ở Việt Nam có thể chế tạo được BTCLCHM với độ chảy xòe trong khuôn mini là 18,5 cm, cường độ nén và cường độ kéo khi uốn ở tuổi 28 ngày lần lượt là 68,5 MPa và 6,13 MPa. Mặt khác, từ các hàm mục tiêu chỉ ra rằng cả hai biến N/X và C/CKD đều có ảnh hưởng đáng kể đến mô hình thực nghiệm. Sử dụng phần mềm Matlab đã biểu diễn được các bề mặt biểu hiện và đường đồng mức của đối tượng nghiên cứu. Đồng thời, giá trị cường độ nén lớn nhất tại tuổi 28 ngày của mẫu BTCLCHM được xác định là 69,84 MPa tại $N/X=0,326$ và $C/CKD=1,315$. Đóng góp của nghiên cứu này là thu được các hàm hồi quy để dự đoán các tính chất cơ - lý của BTCLCHM sẽ sử dụng trong các nghiên cứu chuyên sâu tiếp theo.

© 2020 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Bê tông hạt mịn là chủng loại bê tông mà trong thành phần cốt liệu chỉ có cốt liệu nhỏ với kích thước từ $0,14 \div 5$ mm. Do vậy thành phần chất kết dính của loại bê tông hạt mịn thường lớn hơn $1,5 \div 3$ lần so với bê tông xi măng thông thường (Bazhenov, 2011; Bazhenov và nnk, 1998). Bê tông

chất lượng cao hạt mịn là loại bê tông hạt mịn đặc biệt, đã được nghiên cứu chế tạo từ hỗn hợp xi măng Poóc lăng và cát vàng thông thường, kết hợp sử dụng phụ gia mịn và siêu mịn với tỷ lệ đảm bảo thành phần hạt hợp lý và vi cấu trúc đặc chắc của hỗn hợp bê tông (Nguyễn Như Quý và Mai Quế Anh, 2020; Nguyễn Văn Tuấn và nnk, 2018; Bazhenov and nnk, 2006). Hiện nay, nhiều nước trên thế giới và trong đó có Việt Nam đã nghiên cứu, chế tạo và phát triển nhiều loại bê tông chất lượng cao hạt mịn với các tính chất cơ-lý khác nhau tùy theo mục đích sử dụng.

*Tác giả liên hệ

E - mail: lamvantang@gmail.com

DOI: 10.46326/JMES.2021.62(1).09

Trong những năm gần đây, bê tông chất lượng cao nói chung và bê tông chất lượng cao hạt mịn nói riêng ngày càng được sử dụng phổ biến và đa dạng hơn, từ kết cấu chịu lực đến vật liệu hoàn thiện bề mặt trong nhà cao tầng (Lam Van Tang và nnk, 2018a), công trình thủy (Tang Van Lam và nnk, 2018b), công trình cơ sở hạ tầng và giao thông trên biển và nhiều công trình đặc biệt khác (Pham Duc Thang và nnk, 2016; Lam Tang Van và nnk, 2017; 2019c). Cùng chung với xu thế phát triển ngành xây dựng trên thế giới và ở Việt Nam cũng đã sử dụng nhiều loại bê tông hạt mịn trong xây dựng các công trình giao thông, công trình ngầm với hiệu quả cao như: gia cố mái dốc và hoàn thiện bề mặt công trình ngầm bằng bê tông phun, kết hợp với neo hoặc đinh đất để gia cố tường và vỏ chống các đường hầm (Đào Viết Đoàn và Tăng Văn Lâm, 2017; Phùng Mạnh Đắc, 2002; Nguyễn Quang Phích, 2002).

Mặt khác, hiện nay ở Việt Nam chưa có tiêu chuẩn nào hướng dẫn để tính toán và thiết kế thành phần bê tông hạt mịn sử dụng chất kết dính từ xi măng Poóc lăng hoặc chất kết dính không xi măng. Các nghiên cứu về bê tông chất lượng cao hạt mịn chủ yếu dựa vào cơ sở của phương pháp thể tích tuyệt đối để tính toán và ước lượng cấp phối ban đầu, sau đó thí nghiệm để kiểm chứng và điều chỉnh thành phần của hỗn hợp bê tông hạt mịn để thu được các tính chất cơ-lý như yêu cầu. Hướng nghiên cứu này có nhược điểm là số lượng thí nghiệm thăm dò và điều chỉnh rất lớn, đôi khi không đánh giá được sự tổng quát và mối tương quan giữa các yếu tố ảnh hưởng đến tính chất của bê tông nghiên cứu (Lam Tang Van và nnk, 2019a; 2019b). Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng, tính công tác của hỗn hợp bê tông và cường độ nén của mẫu bê tông có thể đạt được bằng cách điều chỉnh tính chất cấp phối bê tông thông qua việc tối ưu hóa thành phần cấp phối cũng như giảm độ xốp của bê tông, sử dụng các loại xi măng đặc biệt, phụ gia hóa dẻo, phụ gia phân tán mịn (Tang Van Lam and nnk, 2019e; Ngo Xuan Hung nnk, 2018). Do vậy, trong nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng cao hạt mịn, việc lựa chọn loại nguyên vật liệu, thành phần cấp phối tối ưu cần phải bảo đảm để thu được hỗn hợp bê tông hạt mịn dễ thi công, có độ đặc chắc cao, tốc độ rắn chắc nhanh, cường độ ban đầu và cường độ cuối cùng đạt được đều cao.

Hơn nữa, trong công nghệ bê tông hiện đại có nhiều phương pháp tính toán thiết kế và mô phỏng để tối ưu hoá thành phần của hỗn hợp bê tông.

Cùng với sự hỗ trợ của các phần mềm toán ứng dụng, các công cụ máy tính đã cho phép lựa chọn ứng dụng phương pháp số hiệu quả, độ chính xác và tính khả thi cao về việc dự đoán các tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông (Williams, 2013).

Theo Tang Van Lam và nnk, (2017); Nguyễn Minh Tuyến (2007) 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 thành phần vật liệu ảnh hưởng đến các tính chất của hỗn hợp bê tông, cũng như bê tông. Các quá trình xảy ra trong các đối tượng nghiên cứu - bê tông được đặc trưng bằng các biến điều khiển, giữa chúng có quan hệ nguyên nhân - kết quả với hàm mục tiêu. Các biến đóng vai trò nguyên nhân, gọi là biến vào, còn các biến phản ánh kết quả do nguyên nhân gây ra, được gọi là biến ra. Biến vào có thể kiểm soát và cũng có thể điều khiển được.

Trong nghiên cứu này đã sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay để mô phỏng ảnh hưởng của hai biến là tỷ lệ nước - xi măng (N/X) và tỷ lệ cát - chất kết dính (C/CKD) đến độ chảy xèo và cường độ nén của các mẫu bê tông chất lượng cao hạt mịn ở tuổi 28 ngày. Đồng thời, các bề mặt biểu hiện, đường đồng mức và giá trị cực trị của các hàm hồi quy cũng đã được xác định trong nghiên cứu này. Đóng góp của nghiên cứu này là thu được các hàm hồi quy để phỏng đoán các tính chất cơ - lý của vật liệu mới trong các nghiên cứu chuyên sâu tiếp theo, đặc biệt là bê tông cường độ cao, chất lượng cao hạt mịn sử dụng chất kết dính không xi măng.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu sử dụng

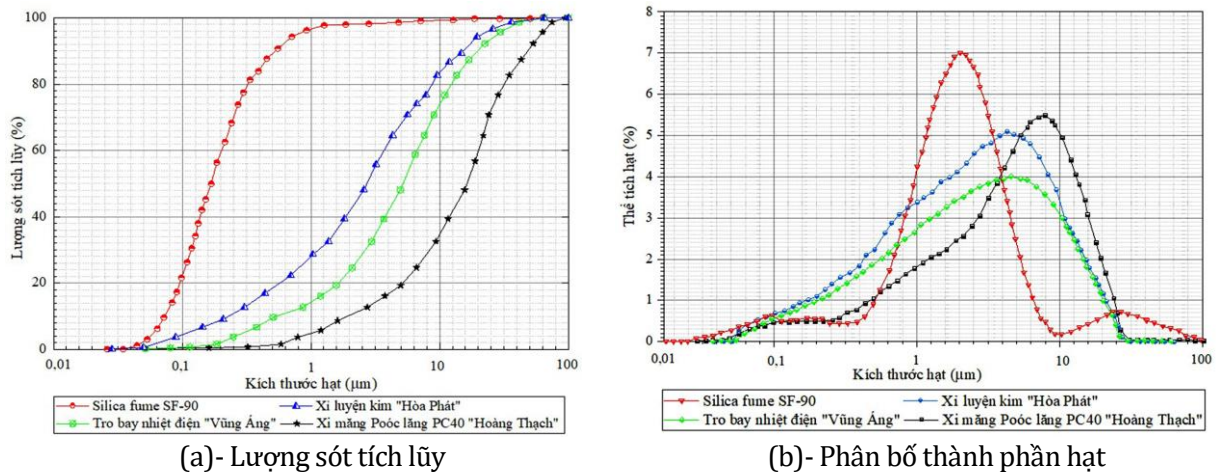
Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu bao gồm:

(1). Chất kết dính (CKD) bao gồm các loại vật liệu sau: xi măng Poóc lăng PC40 "Hoàng Thạch" (X) thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của tiêu chuẩn TCVN 2682:2009 và GOST 31108-2016 (Nga), tro bay (FA) loại F của nhà máy nhiệt điện Vũng Áng thỏa mãn các yêu cầu của TCVN 10302:2014, ASTM C618-03 và GOST P 56592-2015; xỉ lò cao hoạt hóa nghiên mịn (Xi) được lấy trực tiếp tại khu công nghiệp luyện gang thép Hòa Phát (Kinh Môn, Hải Dương) thỏa mãn theo TCVN 11586:2016 và Silica fume SF-90 (SF90) của Vina Pacific. Thành phần hóa học và các tính chất vật lý cơ bản của xi măng, tro bay và silica fume được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học và tính chất vật lý của silica fume SF-90, xỉ luyện kim "Hòa Phát", tro bay "Vũng Áng" và xi măng Poóc lăng PC40 "Hoàng Thạch".

Loại vật liệu	Tro bay	Xỉ luyện kim	Silica Fume SF-90	Xi măng Poóc lăng
Thành phần hóa học của chất kết dính				
SiO ₂ (%)	54,2	36,3	91,6	20,4
Al ₂ O ₃ (%)	23,3	12,6	2,2	4,4
Fe ₂ O ₃ (%)	9,8	3,4	2,5	5,4
SO ₃ (%)	2,5	5,7	-	3,4
K ₂ O (%)	1,4	0,4	-	1,2
Na ₂ O (%)	1,1	0,3	0,5	0,3
MgO (%)	1,8	-	-	2,5
CaO (%)	1,4	40,1	0,7	60,2
Lượng mất khi nung (%)	4,5	1,2	2,5	2,2
Tính chất vật lý của chất kết dính				
Tỷ diện bề mặt riêng (m ² /g)	0,485	2,541	14,45	0,368
Khối lượng riêng (g/cm ³)	2,35	2,92	2,15	3,15
Khối lượng thể tích khô (kg/m ³)	575	1450	760	1550

Thành phần hạt của hỗn hợp chất kết dính được xác định và thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Thành phần hạt của Silica fume, xỉ luyện kim "Hòa Phát", tro bay "Vũng Áng" và xi măng Poóc lăng.

Bảng 2. Tính chất vật lý của cát vàng sông Lô.

Stt	Chỉ tiêu	Đơn vị tính	Kết quả thí nghiệm
1	Kích thước hạt	mm	0,15 ÷ 5
2	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,65
3	Khối lượng thể tích đầm chặt	kg/m ³	1660
4	Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	1550
5	Độ ẩm	%	3,5
6	Hàm lượng bụi, bùn, sét	%	0,9
7	Mô đun độ lớn (M _k)	-	3,1
8	Tạp chất hữu cơ	-	Đạt

(2). Cốt liệu nhỏ sử dụng trong bê tông là cát vàng sông Lô (C), loại hạt thô, chất lượng tốt, thỏa mãn yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 và GOST 8736-2014, được sử dụng làm cốt liệu nhỏ trong hỗn hợp bê tông. Các tính chất vật lý của cốt liệu nhỏ sử dụng đã được thể hiện trong Bảng 2.

(3). Phụ gia siêu dẻo SR 5000F «SilkRoad» (SR5000) có khối lượng riêng $1,12 \text{ g/m}^3$ ở nhiệt độ $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Đây là loại phụ gia giảm nước tầm cao, thể hệ 3, có thành phần dựa trên gốc Polycarboxylate.

(4). Nước sạch (N) được sử dụng để làm nước trộn hỗn hợp bê tông và bảo dưỡng mẫu thí nghiệm, thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 4506:2012 và GOST 23732-2011.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

- Sử dụng phương pháp laze trên máy nhiễu xạ "BT-9300z" đã xác định được phân bố thành phần hạt và thành phần hạt của xi măng, tro bay, xỉ luyện kim và silica fume SF-90.

- Thành phần bê tông chất lượng cao hạt mịn được tính toán thiết kế theo phương pháp thể tích tuyệt đối và kết hợp điều chỉnh bằng thực nghiệm.

- Tính công tác của hỗn hợp bê tông được xác định bằng độ xòe của côn tiêu chuẩn mini, kích thước $70 \times 80 \times 40 \text{ mm}$ theo ASTM C1611 - 18 và TCVN 3106:2007.

- Cường độ nén của bê tông được xác định trên mẫu hình trụ có đường kính $D=150 \text{ mm}$ và chiều cao $H=300 \text{ mm}$ theo tiêu chuẩn TCVN 3105:1993, ASTM C39 và GOST 10180-2012.

- 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.

2.3. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm

Quy hoạch thực nghiệm thực chất là sử dụng kết quả thực nghiệm được trực tiếp xác định trước đó tuân theo quy luật xác suất. Đây là một phương pháp nghiên cứu khoa học được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm (Williams, 2013; Nguyễn Minh Tuyển, 2007; Tang Van Lam và nnk, 2019a; 2019d). Những ưu điểm của phương pháp này là:

- Giảm đáng kể số lượng thí nghiệm, tiết kiệm thời gian và kinh phí.

- Lượng thông tin nhiều hơn, cụ thể hơn nhờ đánh giá được một cách tương đối toàn diện ảnh hưởng của các nhân tố đến hàm mục tiêu.

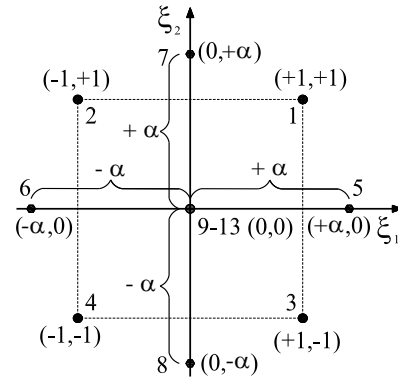
- Thu được mô hình thống kê thực nghiệm, cho phép đánh giá được bức tranh thực nghiệm theo

các tiêu chuẩn thống kê và cho phép xét ảnh hưởng của các thông số với mức độ tin cậy cần thiết.

- Cho phép xác định điều kiện tối ưu đa nhân tố của đối tượng nghiên cứu một cách khá chính xác bằng các công cụ toán học thay cho cách giải gần đúng.

Trong một số nghiên cứu gần đây đã cho thấy, phương pháp thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box-Wilson cho phép thu được mô hình thực nghiệm, đối tượng 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 đòn $\alpha = \sqrt{2} = 1,414$ (Nguyễn Như Quý và Mai Quế Anh, 2020; Lam Van Tang và nnk 2018a; Tang Van Lam và nnk, 2018b).

Vị trí và số lượng các điểm thí nghiệm trong thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box-Wilson đối với hai biến ảnh hưởng được chỉ ra trong Hình 2.



Hình 2. Vị trí các điểm thí nghiệm bậc hai tâm xoay của Box-Wilson cho hai biến ảnh hưởng.

Ma trận thực nghiệm và tương quan giữa các biến mã và giá trị của kế hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box-Wilson dành cho hai biến đầu vào được thể hiện trong Bảng 3.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Cấp phối cơ sở của hỗn hợp bê tông hạt mịn chất lượng cao

a) Các yêu cầu đối với hỗn hợp bê tông hạt mịn chất lượng cao

- Theo tiêu chuẩn TCVN 10306:2014, bê tông cường độ cao là bê tông có cường độ chịu nén đặc trưng 55 MPa hoặc lớn hơn ở tuổi 28 ngày theo tiêu chuẩn ASTM C39 và thí nghiệm trên mẫu hình trụ có đường kính $D=150 \text{ mm}$ và chiều cao $H=300 \text{ mm}$. Từ cơ sở đó, trong nghiên cứu này đã tính toán thiết kế thành phần cấp phối của bê tông chất

Bảng 3. Ma trận thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box-Wilson cho 2 biến ảnh hưởng.

Hệ thống thí nghiệm	Số thí nghiệm	Các biến mã hóa và ma trận thực nghiệm						Giá trị thực nghiệm - Y_j
		ξ_0	ξ_1	ξ_2	$\xi_1\xi_2$	ξ_1^2	ξ_2^2	
Số lượng thí nghiệm tại lõi kế hoạch	1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y_1
	2	+1	-1	+1	-1	+1	+1	Y_2
	3	+1	+1	-1	-1	+1	+1	Y_3
	4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	Y_4
Số điểm thí nghiệm tại "cánh tay đòn"	5	+1	+1,414	0	0	2	0	Y_5
	6	+1	-1,414	0	0	2	0	Y_6
	7	+1	0	+1,414	0	0	2	Y_7
	8	+1	0	-1,414	0	0	2	Y_8
Số điểm thí nghiệm lặp lại tại tâm kế hoạch	9	+1	0	0	0	0	0	Y_9
	10	+1	0	0	0	0	0	Y_{10}
	11	+1	0	0	0	0	0	Y_{11}
	12	+1	0	0	0	0	0	Y_{12}
	13	+1	0	0	0	0	0	Y_{13}

lượng cao hạt mịn có cường độ nén yêu cầu ở tuổi 28 ngày trên 60 MPa, tính công tác tốt với độ xòe 15÷20 cm, được sử dụng làm hỗn hợp bê tông bơm trong xây dựng các công trình ven biển và hải đảo của Việt Nam.

- Silica fume SF-90 với kích thước hạt mịn cỡ nano và chứa đến 91% SiO₂ hoạt tính đã được sử dụng với mục đích giảm lượng Ca(OH)₂ tự do trong bê tông và tăng độ đặc của vi cấu trúc. Hàm lượng silica fume đã được sử dụng là 10% lượng dùng xi măng (Bazhenov, 2011). Tro bay nhiệt điện Vũng Áng và xỉ luyện kim Hòa Phát được sử dụng với hai mục đích chính: (i) phụ gia khoáng mịn, bổ sung thành phần hạt trơ với kích thước nhỏ hơn 0,14 mm, như một phần cốt liệu mịn để tăng bộ khung xương chịu lực và giảm co ngót của hỗn hợp bê tông khi rắn chắc; (ii) thay thế một phần xi măng Poóc lăng để giảm lượng nhiệt thủy hóa, giảm sự hình thành vết nứt trên kết cấu và giảm giá thành sản phẩm. Theo tiêu chuẩn ACI 211.4R-08, hàm lượng tro bay được lựa chọn bằng 20%, trong khi đó hàm lượng xỉ luyện kim được sử dụng là 40% lượng dùng xi măng.

- Lượng phụ gia siêu dẻo lấy bằng 1,5% lượng dùng xi măng (Tang Van Lam nnk, 2018a; 2018b; 2019). Hàm lượng không khí trong hỗn hợp bê tông là 3% thể tích hỗn hợp bê tông (Bazhenov và nnk, 2006).

b) Tính toán cấp phối cơ sở của bê tông hạt mịn chất lượng cao theo phương pháp thể tích tuyệt đối.

Thiết kế cấp phối bê tông theo phương pháp thể tích tuyệt đối đã được áp dụng trong nhiều nghiên cứu về bê tông chất lượng cao, bê tông chất

lượng siêu cao ở Việt Nam (Nguyễn Văn Tuấn và nnk, 2018) cũng như trên thế giới (Bazhenov và nnk, 1998, Pham Duc Thang và nnk, 2016). Theo phương pháp thể tích tuyệt đối, thể tích 1m³ bê tông đã lên chặt coi như là tổng thể tích của nước, cốt liệu, xi măng, phụ gia khoáng, phụ gia siêu dẻo và thể tích không khí cuốn vào trong quá trình nhào trộn. Biểu thức thể tích tuyệt đối của hỗn hợp bê tông trong phương pháp này được trình bày trong công thức (1).

$$\frac{N}{\gamma_N} + \frac{X}{\gamma_X} + \frac{FA}{\gamma_{FA}} + \frac{Xi}{\gamma_{Xi}} + \frac{SF90}{\gamma_{SF90}} + \frac{C}{\gamma_C} + \frac{SR5000}{\gamma_{SR5000}} + A = 1000 \quad (1)$$

Trong đó: N, X, FA, Xi, SF90, C, SR5000 - khối lượng nước, xi măng, tro bay, xỉ luyện kim, silicafume, cát và phụ gia siêu dẻo. $\gamma_N, \gamma_X, \gamma_{FA}, \gamma_{SF90}, \gamma_C, \gamma_{SR5000}$ - khối lượng riêng của nước, xi măng, tro bay, xỉ luyện kim, silicafume, cát và phụ gia siêu dẻo.

A - thể tích rỗng do không khí cuốn vào trong hỗn hợp bê tông, theo tài liệu (Bazhenov, 2011; 2006) thể tích không khí cuốn vào là A = 3%.

Trên cơ sở kết quả nghiên cứu của các tài liệu (Pham Duc Thang và nnk, 2016; Lam Tang Van và nnk, 2017; 2019c) và các kết quả khảo sát thực nghiệm sơ bộ, nghiên cứu đã chọn gốc các hệ số tỷ lệ vật liệu như Bảng 4. Tính toán theo phương pháp thể tích tuyệt đối dựa trên các giá trị tỷ lệ vật liệu, đã thu được cấp phối sơ bộ của hỗn hợp bê tông hạt mịn có thành phần như trong Bảng 5. Thực nghiệm khảo sát sơ bộ trong phòng thí nghiệm để xác định các tính chất cơ học của bê tông hạt mịn chất lượng cao với cấp phối cơ sở, kết quả thu được đã thể hiện trong Bảng 6.

Bảng 4. Các tỷ lệ vật liệu sử dụng.

Tỷ lệ	$\frac{C}{CKD}$	$\frac{N}{X}$	$\frac{SF90}{X}$	$\frac{FA}{X}$	$\frac{Xi}{X}$	$\frac{SR5000}{X}$	A
Giá trị	1,3	0,35	0,1	0,2	0,4	0,015	3%

Với chất kết dính: CKD = XM + FA + Xi + SF90.

Bảng 5. Cấp phối sơ bộ của hỗn hợp bê tông hạt mịn chất lượng cao và các tỷ lệ vật liệu sử dụng

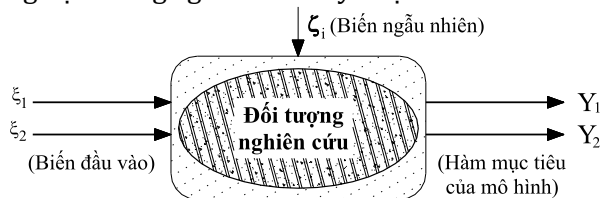
Vật liệu	Ký hiệu	Nguồn cung cấp	Hàm lượng (kg/m ³)
Cát vàng	C	Sông Lô	1202
Xi măng PC40	X	Hoàng Thạch	544
Tro bay	FA	Nhiệt điện "Vũng Áng"	109
Xi luyện kim	Xi	Hòa Phát	218
Silicafume SF-90	SF90	Vina Pacetic	54
Chất kết dính	CKD	XM + FA + Xi + SF90	925
Nước	N	Nước máy sạch	190
Phụ gia siêu dẻo SR 5000F	SR5000	SilkRoad	8,2

Bảng 6. Tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông cường độ cao.

Tính chất của hỗn hợp bê tông			Cường độ nén của bê tông (MPa) ở tuổi				Cường độ kéo khi uốn ở tuổi 28 ngày (MPa)
$\frac{N}{X}$	Độ chảy xòe (mm)	Khối lượng thể tích (kg/m ³)	3 ngày	7 ngày	14 ngày	28 ngày	
0,35	18,5	2324,8	36,8	50,4	63,2	68,5	6,13

3.2. Xây dựng mô hình và kế hoạch thực nghiệm

Theo nhiều nghiên cứu (Nguyễn Như Quý và Mai Quế Anh, 2020; Tang Van Lam và nnk, 2017, Nguyễn Minh Tuyển, 2007) phương pháp quy hoạch thực nghiệm nhằm mục đích tạo ra mô hình toán học để mô phỏng, phân tích đánh giá và dự đoán ảnh hưởng của các biến đầu vào đến bản chất của quá trình hoặc tính chất của đối tượng thực nghiệm, được coi là các hàm mục tiêu đầu ra của quá trình nghiên cứu. Mô hình đối tượng thực nghiệm trong nghiên cứu này được mô tả ở Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ đối tượng nghiên cứu trong mô hình thực nghiệm.

Phương trình tổng quát của các hàm mục tiêu bậc hai đối với hai biến ảnh hưởng trong chương trình thực nghiệm này có dạng như sau:

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

Trong đó: Y – hàm mục tiêu của mô hình thực nghiệm; ξ_1 và ξ_2 – các biến ảnh hưởng; $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4,$ và b_5 – các hệ số của hàm mục tiêu.

a) Hàm mục tiêu: trong nghiên cứu này, hàm mục tiêu bậc hai được lựa chọn gồm có:

+ Y_1 – độ chảy xòe (cm) của hỗn hợp bê tông cường độ trong côn mini, với kích thước 70x80x40 mm;

+ Y_2 – cường độ nén (MPa) của mẫu bê tông hình trụ có đường kính D = 150 mm và chiều cao H = 300 mm ở tuổi 28 ngày.

b) Các biến ảnh hưởng: nghiên cứu đã chọn các biến đầu vào, có ảnh hưởng lớn đến hàm mục tiêu, nhằm điều khiển hàm mục tiêu và khoảng biến thiên của chúng như Bảng 7:

+ Tỷ lệ nước trên xi măng ($\frac{N}{X}$) mã hoá là biến ξ_1 thay đổi 0,311÷0,389.

+ Tỷ lệ cát trên chất kết dính ($\frac{C}{CKD}$) mã hoá là biến ξ_2 thay đổi 1,01÷1,59.

Theo lý thuyết quy hoạch thực nghiệm, số thí nghiệm trong kế hoạch bậc hai tâm xoay của Box – Wilson được xác định theo công thức (3):

$$N = 2^k + 2*k + N_0 = 2^2 + 2*2 + 5 = 13 \quad (3)$$

Trong đó: k - số biến thực nghiệm; N_0 - số thí nghiệm lặp lại ở tâm của mô hình nghiên cứu.

Trên cơ sở các cấp phối thực nghiệm của 13 điểm đối với hai biến đầu vào ξ_1 và ξ_2 đã được trình bày trong Bảng 8. Bên cạnh đó, giá trị trung bình của độ xòe của hỗn hợp bê tông và cường độ

nén của bê tông ở tuổi 28 ngày đã được xác định trực tiếp từ thực nghiệm và mô tả chi tiết trong Bảng 9 và 10.

Bảng 7. 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					Mức quy hoạch	
		-1,414	-1	0	+1	+1,414	δ	$\alpha = \sqrt{2} = 1,414$
$\frac{N}{X}$	ξ_1	0,311	0,32	0,35	0,38	0,389	0,03	0,009
$\frac{C}{CKD}$	ξ_2	1,01	1,1	1,3	1,5	1,59	0,2	0,09

Bảng 8. Cấp phối thực nghiệm theo quy hoạch bậc hai tâm xoay.

STT	Biến mã		Biến thực		Cấp phối thực nghiệm (kg/m ³)						
	ξ_1	ξ_2	$\frac{N}{X}$	$\frac{C}{CKD}$	X	FA	Xi	SF90	C	N	SR5000
1	+1	+1	0,38	1,5	500	100	200	50,0	1274	190	7,5
2	-1	+1	0,38	1,1	576	115	230	57,6	1076	219	8,6
3	+1	-1	0,32	1,5	515	103	206	51,5	1314	165	7,7
4	-1	-1	0,32	1,1	597	119	239	59,7	1116	191	9,0
5	+1,414	0	0,35	1,59	493	99	197	49,3	1331	172	7,4
6	-1,414	0	0,35	1,01	607	121	243	60,7	1043	213	9,1
7	0	+1,414	0,389	1,3	532	106	213	53,2	1176	207	8,0
8	0	-1,414	0,311	1,3	556	111	222	55,6	1229	173	8,3
9	0	0	0,35	1,3	544	109	218	54,4	1202	190	8,2
10	0	0	0,35	1,3	544	109	218	54,4	1202	190	8,2
11	0	0	0,35	1,3	544	109	218	54,4	1202	190	8,2
12	0	0	0,35	1,3	544	109	218	54,4	1202	190	8,2
13	0	0	0,35	1,3	544	109	218	54,4	1202	190	8,2

Bảng 9. Giá trị trung bình độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông hạt mịn chất lượng cao.

Stt	Biến thực		Các biến mã và ma trận thực nghiệm						Độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông, Y_1 (cm)				
	$\frac{N}{X}$	$\frac{C}{CKD}$	ξ_0	ξ_1	ξ_2	$\xi_1\xi_2$	ξ_1^2	ξ_2^2	Y_{1j}	\hat{Y}_{1j}	$(Y_{1j} - \hat{Y}_{1j})^2$	$(Y_{01j} - \hat{Y}_{01j})^2$	
1	0,38	1,5	+1	+1	+1	1	1	1	15,8	15,73	0,005	-	
2	0,38	1,1	+1	-1	+1	-1	1	1	17,0	17,15	0,023	-	
3	0,32	1,5	+1	+1	-1	-1	1	1	18,2	18,07	0,017	-	
4	0,32	1,1	+1	-1	-1	1	1	1	20,0	19,49	0,26	-	
5	0,35	1,59	+1	+1,414	0	0	2	0	16,7	16,73	0,001	-	
6	0,35	1,01	+1	-1,414	0	0	2	0	18,6	18,74	0,019	-	
7	0,389	1,3	+1	0	+1,414	0	0	2	16,0	15,83	0,029	-	
8	0,311	1,3	+1	0	-1,414	0	0	2	18,8	19,14	0,115	-	
9	0,35	1,3	+1	0	0	0	0	0	18,3	18,2	0,01	0,01	
10	0,35	1,3	+1	0	0	0	0	0	18,2	18,2	0	0	
11	0,35	1,3	+1	0	0	0	0	0	18,3	18,2	0,01	0,01	
12	0,35	1,3	+1	0	0	0	0	0	18,0	18,2	0,04	0,04	
13	0,35	1,3	+1	0	0	0	0	0	18,2	18,2	0	0	
$\sum (Y_{1j} - \hat{Y}_{1j})^2 = 0,529$			$S_{1d^2} = 0,066$			$\sum (Y_{01j} - \hat{Y}_{01j})^2 = 0,06$			$S_{111^2} = 0,015$		$S_{11b_j} = 0,034$		$\hat{Y}_{01} = 18,2$

3.3. Mô phỏng ảnh hưởng của hỗn hợp phụ gia biến tính đến tính chất của bê tông chất lượng cao hạt mịn

a) Xác định phương trình các hàm hồi quy bậc hai

Áp dụng các công thức toán học theo lý thuyết quy hoạch thực nghiệm bậc hai tâm xoay của Box - Wilson và sử dụng phần mềm Matlab, đã thu được các phương trình hồi quy bậc hai như sau:

(i) Về độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông trong côn mini:

$$Y_1 = 18,2 - 0,71\xi_1 - 1,17\xi_2 + 0,15\xi_1\xi_2 - 0,219\xi_1^2 - 0,344\xi_2^2 \text{ (cm)} \quad (4)$$

(ii) Về cường độ nén của mẫu bê tông chất lượng cao hạt mịn ở tuổi 28 ngày:

$$Y_2 = 69,28 - 1,998\xi_1 + 0,983\xi_2 - 2,347\xi_1^2 + 0,213\xi_1\xi_2 - 1,776\xi_2^2 \text{ (MPa)} \quad (5)$$

Dựa trên các phương trình hàm hồi quy (4) và (5), giá trị tính toán theo hàm mục tiêu \widehat{Y}_1 , \widehat{Y}_2 và \widehat{Y}_{01} , \widehat{Y}_{02} đã được xác định theo các biến mã ξ_1 ; ξ_2 và trình bày trong các Bảng 9 và 10.

b) Kiểm tra tính có nghĩa của các hệ số b_j trong hàm hồi quy theo chuẩn số Student ($t_\alpha(f_2)$)

Hệ số b_j của hàm hồi quy bậc hai có nghĩa nếu:

$$t_{b_j} \geq t_\alpha(f_2) \quad (6)$$

Trong đó: ($t_\alpha(f_2)$) - giá trị tra bảng của chuẩn số Student, với mức độ có nghĩa $\alpha = 0,05$, bậc tự do lặp lại $f_2 = N \times (k-1) = 13 \times (2-1) = 13$ ($k=2$ là số yếu tố nghiên cứu).

Tra trong Bảng 3.2 trong tài liệu (Bolshev và Smirnov, 1993) đã thu được $t_{0,05}(13) = 1,7709$.

Giá trị của chuẩn số Student t_{b_j} đối với hệ số b_j được xác định theo công thức (7):

$$t_{b_j} = \frac{|b_j|}{S_{b_j}} \Rightarrow |b_j| = t_{b_j} \times S_{b_j} \quad (7)$$

Độ lệch tiêu chuẩn thứ S_{b_j} của hệ số thứ b_j được xác định theo công thức (8):

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{S_{II}^2}{N}} \quad (8)$$

Trong đó: N là tổng số điểm thí nghiệm ($N = 13$) và S_{II}^2 là phương sai lặp, được xác định theo công thức (9) và các trị đã được đưa ra trong Bảng 9 và 10.

$$S_{II}^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (Y_{oj} - \widehat{Y}_o)^2}{m-1} \quad (9)$$

Trong đó: m - Số thí nghiệm lặp ở tâm ($m = 5$), Y_{oj} - giá trị thu được của thí nghiệm thứ i ở tâm kế

hoạch và \widehat{Y}_o - giá trị trung bình của các thí nghiệm ở tâm kế hoạch (Bảng 9 và 10). Theo tính có nghĩa của chuẩn số Student: $t_{b_j} \geq t_\alpha(f_2)$ với $t_{b_j} = \frac{|b_j|}{S_{b_j}}$.

Do đó, hệ số b_j của phương trình hàm hồi quy được coi là có nghĩa, nếu: $|b_j| \geq t_{0,05}(13) \times S_{b_j} = 1,7709 \times S_{b_j}$. Theo giá trị tra bảng của chuẩn số Student và giá trị S_{b_j} đã được tính toán và liệt kê trong các Bảng 9 và 10, phương trình hàm hồi quy bậc hai thu gọn về độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông hạt mịn và cường độ nén của mẫu bê tông chất lượng cao hạt mịn ở tuổi 28 ngày thu được như sau:

$$Y_1 = 18,2 - 0,71\xi_1 - 1,17\xi_2 - 0,219\xi_1^2 - 0,344\xi_2^2 \text{ (cm)} \quad (10)$$

$$Y_2 = 69,28 - 1,998\xi_1 + 0,983\xi_2 - 2,347\xi_1^2 - 1,776\xi_2^2 \text{ (MPa)} \quad (11)$$

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

Theo lý thuyết quy hoạch thực nghiệm (Nguyễn Như Quý và Mai Quế Anh, 2020; Tang Van Lam và nnk, 2017, Nguyễn Minh Tuyển, 2007) tính tương hợp của mô hình thực nghiệm được kiểm tra theo chuẩn số Fisher và xác định theo công thức (12):

$$F_0 = \frac{S_d^2}{S_{II}^2} \quad (12)$$

Với S_{II}^2 - phương sai lặp, được xác định theo công thức (9) và các trị đã được đưa ra trong Bảng 9 và 10.

S_d^2 - phương sai dư, được xác định theo công thức (13) và các trị cũng đã được xác định trong Bảng 9 và 10.

$$S_d^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \widehat{Y}_j)^2}{N - B} \quad (13)$$

Trong đó: Y_j ; \widehat{Y}_j - giá trị thực nghiệm và giá trị tính toán của hàm mục tiêu; N - số thí nghiệm ($N = 13$) và B - số hệ số có nghĩa trong các phương trình hồi quy số (10) và (11) ($B = 5$).

Bên cạnh đó $F_\alpha(f_1; f_2)$ là giá trị của chuẩn số Fisher, xác định bằng cách tra Bảng 3.5 của tài liệu (Bolshev và Smirnov, 1993) ở mức có nghĩa $\alpha = 0,05$; bậc tự do lặp $f_2 = m-1 = 5-1 = 4$; bậc tự do dư $f_1 = N - B = 13 - 5 = 8$. Từ đó, thu được $F_{0,05}(8; 4) = 6,041$.

Theo các giá trị của S^2_d và S^2_{II} thu được trong Bảng 9 và 10, đã xác định được giá trị của chuẩn số Fisher đối với các hàm mục tiêu về độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông và cường độ nén của mẫu bê tông ở tuổi 28 ngày lần lượt như sau:

Với hàm độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông: $F_{01} = 4,40$.

Với hàm cường độ nén của mẫu bê tông ở tuổi 28 ngày: $F_{02} = 1,91$.

Do $F_{01} = 4,40 < F_{0,05}(8; 4) = 6,041$ và $F_{02} < F_{0,05}(8; 4) = 6,041$, vậy các mô hình thực nghiệm, mô tả độ chảy của hỗn hợp bê tông hạt mịn và cường độ nén của mẫu bê tông chất lượng cao hạt mịn, đã được xác định thông qua các hàm hồi quy số (10) và (11) là hoàn toàn tương hợp với bức tranh thực nghiệm, cũng như với kế hoạch thực nghiệm. Qua đó cho thấy rằng, cả tỷ lệ $\frac{N}{X}$ (biến ξ_1) và $\frac{C}{CKD}$ (biến ξ_2) đều có ảnh hưởng đáng kể đến các giá trị của hàm mục tiêu trong mô hình thực nghiệm.

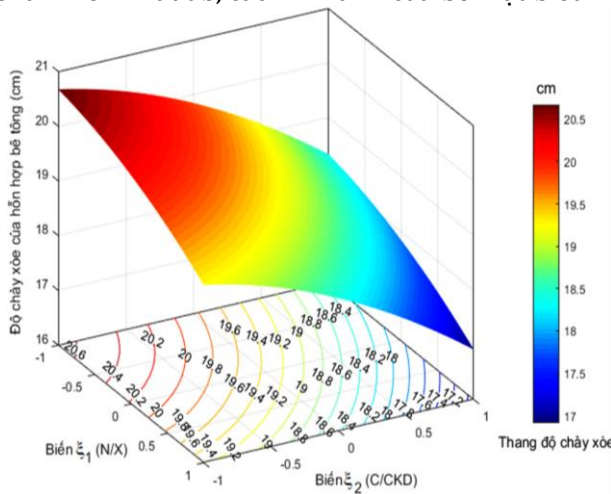
d) Biểu diễn bề mặt và các đường đồng mức của phương trình hồi quy. Bằng cách sử dụng phần mềm Matlab, các hình ảnh của bề mặt biểu

hiện và đường đồng mức tương ứng của phương trình hồi quy (10) và (11) đã được thể hiện trên Hình 4.

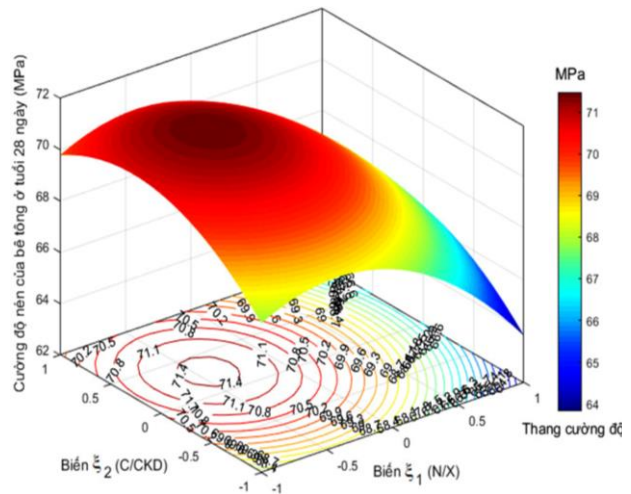
e) Xác định giá trị cường độ nén lớn nhất của hàm mục tiêu và cấp phối tối ưu.

Trong nghiên cứu này đã sử dụng phần mềm toán học Maple và Malab để xác định được giá trị cực trị của phương trình hồi quy (11). Mặt khác, trên cơ sở cường độ nén ở tuổi 28 ngày có giá trị lớn nhất đã tìm được cấp phối tối ưu của hỗn hợp bê tông hạt mịn chất lượng cao và được thể hiện trong Bảng 11.

Từ tỷ lệ tương quan của điểm cực trị trong Bảng 11 đã xác định được cấp phối tối ưu của hỗn hợp bê tông. Tiếp theo, trên cơ sở cấp phối tối ưu này tiến hành thí nghiệm để xác định các tính chất cơ lý của hỗn hợp bê tông và bê tông. Kết quả đo trực tiếp thực nghiệm và tính toán theo các phương trình hồi quy (10) và (11) đã được biểu thị trong Bảng 12.



(a) Hàm hồi quy số (10)



(b) Hàm hồi quy số (11)

Hình 4. Bề mặt biểu hiện và đường đồng mức của các hàm mục tiêu.

Bảng 11. Giá trị cực đại của các hàm mục tiêu và các biến tương ứng.

Số phương trình	Giá trị cực đại của hàm hồi quy cường độ nén ở tuổi 28 ngày	Giá trị của biến mã		Giá trị của biến thực	
		ξ_1	ξ_2	$\frac{N}{X}$	$\frac{C}{CKD}$
11	Max $Y_2 = 69,84$ MPa	-0,425	0,277	0,326	1,315

Bảng 12. So sánh giữa thực nghiệm và tính toán theo phương trình hồi quy.

$\frac{N}{X}$	$\frac{C}{CKD}$	Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông (kg/m ³)	Độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông (mm)		Cường độ nén của bê tông (MPa) ở tuổi 28 ngày		Cường độ kéo khi uốn ở tuổi 28 ngày (MPa)	Khối lượng thể tích của bê tông (kg/m ³)
			Theo thực nghiệm	Theo phương trình hồi quy (10)	Theo thực nghiệm	Theo phương trình hồi quy (11)		
0,326	1,315	2338,2	18,5	18,094	70,7	69,84	6,28	2319,5

Kết quả trên Bảng 12 cho thấy, giá trị độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông và cường độ nén cực đại của các mẫu bê tông được tính toán từ hai phương trình hồi quy số (10) và (11) là khá phù hợp với kết quả kiểm tra từ thực nghiệm. Độ chảy xòe và cường độ nén cực đại thu được từ các hàm hồi quy này đạt lần lượt là 97,8% và 98,8% so với kết quả đo trực tiếp từ thực nghiệm. Do đó, có thể sử dụng các hàm hồi quy số (10) và (11) để phỏng đoán các tính chất cơ - lý (tính công tác, cường độ,...) của bê tông chất lượng cao hạt mịn, cũng như các loại bê tông cường độ cao sử dụng chất kết dính không xi măng,... trong các nghiên cứu chuyên sâu tiếp theo ở Việt Nam và các nước trên thế giới.

4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu thực nghiệm thu được trong phạm vi nghiên cứu, rút ra một số kết luận như sau:

- Trên cơ sở nguồn vật liệu trong nước như: xi măng Poóc lăng PC40 "Hoàng Thạch", cát vàng sông Lô kết hợp với tổ hợp phụ gia biến tính gồm: silica fume SF-90, tro bay "Vũng Áng", xỉ luyện kim "Hòa Phát" và phụ gia siêu dẻo SR 5000F «SilkRoad» có thể chế tạo được bê tông hạt mịn có độ chảy xòe trong côn mini là 18,5 cm, cường độ nén ở tuổi 28 ngày đạt 68,5 MPa và cường độ kéo khi uốn ở tuổi 28 ngày là 6,13 MPa, phù hợp để sử dụng trong xây dựng các công trình ở Việt Nam.

- Trong phạm vi nghiên cứu và bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc hai của Box-Wilson đã được mô phỏng ảnh hưởng của hai biến ξ_1 (N/X) và ξ_2 (C/CKD) đến độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông hạt mịn và cường độ nén của mẫu bê tông chất lượng cao hạt mịn ở tuổi 28 ngày. Các phương trình quan hệ bậc hai giữa độ chảy xòe và cường độ nén ở tuổi 28 ngày của bê tông chất lượng cao hạt mịn đối với hai biến mã hóa ξ_1 và ξ_2 đã được xác định bởi các hàm hồi quy (4), (5), (10) và (11). Các hàm hồi quy này tương hợp với bức tranh thực nghiệm theo chuẩn số Fisher.

- Sử dụng chương trình toán học Matlab và Maple đã biểu diễn được các bề mặt biểu hiện và đường đồng mức của mô hình thực nghiệm trực quan. Đồng thời đã xác định được giá trị lớn nhất của cường độ nén của mẫu bê tông chất lượng cao hạt mịn ở tuổi 28 ngày là 69,84 MPa tại N/X = 0,326 và C/CKD = 1,315.

- Kết quả tính toán độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông và cường độ nén cực đại từ hàm hồi quy số (10) và (11), thu được từ phương pháp quy hoạch thực nghiệm, đạt lần lượt là 97,8% và 98,8% so với kết quả đo trực tiếp từ thực nghiệm. Do đó có thể sử dụng các hàm hồi quy số (10) và (11) để phỏng đoán các tính chất cơ - lý của các loại bê tông cường độ cao không dùng xi măng trong các nghiên cứu chuyên sâu tiếp theo ở Việt Nam và các nước trên thế giới.

- Có thể sử dụng các phương pháp quy hoạch thực nghiệm khác nhau để nghiên cứu, mô phỏng và dự đoán các tính chất cơ - lý - hóa quan trọng khác của bê tông cường độ cao sử dụng chất kết dính không xi măng, bê tông chất lượng cao hạt mịn,... như: thời gian đông kết của hỗn hợp bê tông, độ nở thể tích trong môi trường biển, tuổi thọ hoặc thời gian phá hoại mẫu bê tông trong môi trường xâm thực.

Đóng góp của các tác giả

Tác giả Tăng Văn Lâm: lên ý tưởng, xây dựng mô hình hồi quy, triển khai các nội dung và viết bản thảo gốc; các tác Vũ Kim Diễn, Ngô Xuân Hùng, Bulgakov Boris Igorevich: thực hiện các thí nghiệm và xử lý kết quả thực nghiệm; các tác Nguyễn Văn Dương, Đỗ Minh Chiến: thu thập dữ liệu và chỉnh sửa bản thảo.

Tài liệu tham khảo

- Bazhenov Y. M. (2011). *Concrete technology*. Moscow, (Ed.). ASV, 528 p. (tiếng Nga).
 Bazhenov Y.M., Magdeev U.Kh., Alimov L.A., Voronin V.V., Goldenberg L. B. (1998). *Fine-grained concrete*. Moscow. (Eds.). ASV. 148 p. (tiếng Nga).

- Bazhenov Y.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I., (2006). *Modified high-performance concrete*. Moscow, (Ed.). ASV, 370 p. (tiếng Nga).
- Bolshev L.N., Smirnov N.V., (1993). *Mathematical statistics tables*. Publishing house of Science, Moscow, 416 p. (tiếng Nga).
- Phùng Mạnh Đắc, (2002). Bê tông phun trong xây dựng mỏ với quá trình tăng trưởng của ngành than. *Công nghệ bê tông phun trong xây dựng Mỏ và công trình Ngầm*, Hà Nội. 2002, 70-75.
- Đào Việt Đoàn, Tăng Văn Lâm. (2017). Các tham số công nghệ và lựa chọn phương pháp kiểm tra hiện trường cường độ bê tông phun chống giữ đường hầm, *Tạp chí Công nghiệp Mỏ*, 01, 24-28.
- Ngo Xuan Hung, Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Alexandrova O. V., Larsen O. A., Ha Hoa Ki, Melnikov A. I. (2018). Influence of rice husk ash on the properties of hydraulic concrete. *Scientific and technical journal on construction and architecture "Vestnik MGSU"*, 13(6), 768-777. (tiếng Nga).
- Lam Tang Van, Dien Vu Kim, Bulgakov Boris Igorevich, Bazhenova Sophia Ildarovna. (2019a). Mathematical model of effect of the bottom ash and expanded polystyrene spheres on the polystyrene concrete properties. *Materials Science Forum*, 974. 312-318.
- Lam Tang Van, Dien Vu Kim, Tho Vu Dinh, Bulgakov Boris Igorevich, Bazhenova Sophia Ildarovna, Luong Nguyen Tai Nang. (2019b). 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*, 660-672.
- Tang Van Lam, Vu Kim Dien, Bulgakov Boris Igorevich, Bazhenova Sophia Ildarovna. (2019c). Mô phỏng ảnh hưởng của các thành phần đến cường độ bê tông phun hạt mịn bằng thực nghiệm. *International conference on architecture and civil engineering (ICACE 2019)*. Hà Nội, Việt Nam, 314-324.
- Tăng Văn Lâm, Nguyễn Đình Trinh, Nguyễn Doãn Tùng Lâm, Bulgakov Boris Igorevich. (2019d). Mô phỏng ảnh hưởng của hỗn hợp phụ gia khoáng biến tính đến độ nở sun phát của bê tông dùng trong các công trình thủy. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật và Môi trường*, 66(9/2019), 71-80.
- Tang Van Lam, Vu Kim Dien, Ngo Xuan Hung, Nguyen Trong Chuc, Bulgakov B.I., Bazhenova. O.Yu., Galtseva N. A., (2019e). Influence of the water-binding ratio and complex organic-mineral additive on the properties of concrete suitable for the construction of offshore hydraulic structures. *Journal of Industrial and Civil Engineering*, 03, 7-17. (tiếng Nga).
- Lam Van Tang, Boris Bulgakov, Sofia Bazhenova, Olga Aleksandrova, Anh Ngoc Pham, Tho Dinh Vu. (2018a). Effect of Rice Husk Ash and Fly Ash on the workability of concrete mixture in the High-Rise Construction. *E3S Web of Conferences*, 33, 02029, 13.
- Tang Van Lam, Boris Bulgakov, Olga Aleksandrova, Anh Ngoc Pham, Yuri Mikhaylovich. (2018b). Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 365, 032007, 8.
- Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Alexandrova O.V., Larsen O.A., Ngo Xuan Hung, Nguyen Duc Vinh Quang, (2017). Determination of deformation of fine-grained concrete in a liquid sulfate medium. *Journal of Industrial and Civil Engineering*. No.08, P.82 - 86. (tiếng Nga).
- Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Alexandrova O.V. (2017). Mathematical modeling of the influence of raw materials on the strength of high-performance fine-grained concrete under compression. *Scientific and technical journal on construction and architecture "Vestnik MGSU"*, 12(9), 999-1009 (tiếng Nga).
- Nguyễn Quang Phích. (2002). Khả năng sử dụng bê tông phun trong xây dựng công trình ngầm và mỏ. *Công nghệ bê tông phun trong xây dựng Mỏ và công trình Ngầm*, Hà Nội. 2002, 40-43.
- Nguyễn Như Quý, Mai Quế Anh. (2020). *Lý thuyết bê tông*. NXB Xây dựng, Hà Nội, 210 Tr.
- Pham Duc Thang, Bulgakov B.I., Tang Van Lam. (2016). Application of fine-grained shotcrete for the construction of metro tunnels. *Scientific and technical journal on construction and architecture "Vestnik MGSU"*, 07, 81-90. (tiếng Nga).
- Nguyễn Văn Tuấn, Phạm Hữu Hanh, Nguyễn Công Thắng, Lê Trung Thành, Văn Việt Thiên Ân, Hoàng Tuấn Nghĩa. (2018). *Bê tông chất lượng siêu cao*. NXB Xây dựng, Hà Nội, 300 Tr.
- Nguyễn Minh Tuyển, (2007). *Quy hoạch thực nghiệm*. NXB Khoa học Kỹ thuật. Hà Nội. 264 p.
- Williams H. P. (2013). *Model Building in Mathematical Programming*. John Wiley & Sons.