

## Building regression equation between compressive strength, chloride ion permeability and compositions of silica-fume concrete using Taguchi method

Nguyen Long Khanh<sup>1,\*</sup>, Nguyen Thi Tuyet Trinh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Transport Technology, Hanoi 100000, Vietnam

<sup>2</sup>University of Transport and Communications, Hanoi 100000, Vietnam

### Article info

#### Type of article:

Original research paper

#### Corresponding author:

E-mail address:

khanhnl@utt.edu.vn

**Published:** 30 September

2021

**Abstract:** Vietnam has a long coastline, a humid tropical monsoon climate, so the reinforced concrete structures in the marine environment are being greatly affected by harmful factors (chloride ions, sulfate, carbonation...) which caused corrosion of reinforcement shortening the service life of the structures. In recent years, there have been many studies on the use of silica fume admixtures to improve concrete durability, especially to improve compressive strength and chloride ion impermeability of concrete. This paper aims to build a regression equation between compressive strength chloride ion permeability and water/binder ratio, silica-fume content of silica-fume concrete using Taguchi method.

**Keywords:** Concrete, Silica fume, The ration of water-binder

## Nghiên cứu xây dựng phương trình hồi quy giữa cường độ chịu nén, độ thấm ion clo với các thành phần của bê tông muối silic bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi

Nguyễn Long Khánh<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Thị Tuyết Trinh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghệ GTVT, Hà Nội 100000, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Giao thông vận tải, Hà Nội 100000, Việt Nam

### Thông tin bài viết

#### Tác giả liên hệ:

Địa chỉ E-mail:  
khanhnl@utt.edu.vn

#### Ngày đăng bài:

30/09/2021

**Tóm tắt:** Đất nước Việt Nam có đường bờ biển dài, khí hậu nhiệt đới gió mùa ẩm, do đó các công trình bê tông cốt thép trong khu vực biển phải chịu ảnh hưởng rất lớn từ các yếu tố có hại (ion clo, sunphat, cacbonat hóa...) gây ra hiện tượng ăn mòn cốt thép bên trong, làm suy giảm tuổi thọ của các công trình. Trong những năm gần đây, có nhiều nghiên cứu phụ gia muối silic nhằm cải thiện độ bền bê tông, đặc biệt là cải thiện cường độ chịu nén và độ thấm ion clo. Bài báo có mục đích xây dựng phương trình hồi quy giữa đặc tính cường độ chịu nén, độ thấm ion clo và tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD), hàm lượng muối silic (MS) của bê tông muối silic thông qua phương pháp Quy hoạch thực nghiệm (QHTN) Taguchi.

**Từ khóa:** Bê tông, muối silic, độ thấm ion clo, tỷ lệ N/CKD

## 1. Giới thiệu

Với đặc điểm địa lý đường bờ biển trải dài từ Bắc vào Nam với chiều dài hơn 3.260 km chưa kể các hải đảo, phần lớn các công trình bê tông cốt thép xây dựng ở khu vực này sau 10-20 năm sử dụng đều bị ăn mòn cốt thép bên trong, nguyên nhân chủ yếu là do hiện tượng thấm ion clo [1, 2]. Muối silic là loại phụ gia có ảnh hưởng lớn tới đặc tính độ bền của bê tông như cải thiện cường độ chịu nén, giảm độ thấm ion clo và đặc biệt giảm giá thành trong thi công [3, 4]. Nhiều nghiên cứu trên thế giới cũng như ở Việt Nam cho thấy, khi thêm muối silic vào thành phần cấp phối của bê tông, sản phẩm tạo thành thỏa mãn yêu cầu về cường độ của bê tông cường độ cao.

Hiện nay ở Việt Nam, có nhiều nghiên cứu cũng như tiêu chuẩn về các biện pháp chống ăn

mòn cốt thép do độ thấm ion clo gây ra. Tuy nhiên trong Tiêu chuẩn TCVN 9346-2012: Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Yêu cầu bảo vệ chống ăn mòn trong môi trường biển [5], quá trình thiết kế thành phần bê tông chưa xét đến độ bền chống ăn mòn và chỉ yêu cầu sử dụng xi măng bền sun phat trong quá trình thi công. Điều này chưa tạo thuận lợi cho việc định lượng hay lựa chọn vật liệu sử dụng cho các kết cấu công trình trong môi trường biển.

Bài báo trình bày tóm tắt nghiên cứu thí nghiệm ảnh hưởng của tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) và hàm lượng muối silic (MS) đến đặc tính cường độ chịu nén và độ thấm ion clo của bê tông muối silic bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi. Từ đó xây dựng phương trình hồi quy giữa đặc tính

cường độ chịu nén, độ thấm ion clo và thành phần bê tông muối silic (tỷ lệ N/CKD và MS), phục vụ cho công tác thiết kế thành phần bê tông muối silic khi xét đến độ bền.

## 2. Kế hoạch thí nghiệm

### 2.1. Vật liệu chế tạo, thiết kế thành phần và phương pháp sử dụng thí nghiệm

#### 2.1.1. Vật liệu chế tạo

Xi măng Bút Sơn PC40; khối lượng riêng 3,1 g/cm<sup>3</sup>.

Đá dăm từ mỏ đá Sunway (Lương Sơn, Hòa Bình); khối lượng riêng 2,74 g/cm<sup>3</sup>; khối lượng thể tích đầm chặt ở trạng thái khô 1,615 g/cm<sup>3</sup>; độ hấp thụ nước 0,71%; độ ẩm tự nhiên 0,4%.

Cốt liệu nhỏ (cát vàng thô) khai thác trên sông Hồng (Việt Trì). Cát được sàng phân tích thành phần hạt theo tiêu chuẩn TCVN 7572:2006. Cát có khối lượng riêng 2,66 g/cm<sup>3</sup>; khối lượng thể tích đầm chặt ở trạng thái khô 1,735g/cm<sup>3</sup>; mô đun độ lớn 2,7; độ hấp thụ nước 1,05%; độ ẩm cát tự nhiên 2%.

Phụ gia khoáng (muối silic) là sản phẩm gốc silicafume Sikacrete PP1 của hãng Sika; khối lượng riêng 2,2 g/cm<sup>3</sup>, phù hợp với Tiêu chuẩn ASTM C1240-03.

Phụ gia siêu dẻo hãng Sika loại Viscocrete 3000-20 phù hợp Tiêu chuẩn ASTM C494 loại G.

Nước trộn bê tông là nước sạch lấy từ nguồn nước máy của hệ thống cấp nước sinh hoạt Hà Nội.

#### 2.1.2. Thiết kế thành phần cấp phối

Thành phần cấp phối bê tông được thiết kế theo Tiêu chuẩn TCVN 10306:2014 [6]. Tiến hành thiết kế thành phần bê tông muối silic với các tỷ lệ N/CKD lần lượt là 0,25; 0,30 và 0,35 tương ứng với mỗi mức tỷ lệ N/CKD là MS xi măng là 8%; 10% và 12%. Thành phần cấp phối chi tiết được mô tả trong Bảng 1 dưới đây

#### 2.1.3. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Các mẫu sử dụng thí nghiệm được đúc theo tiêu chuẩn TCVN 3105: 1993 [7] có kích thước như sau:

Đối với thí nghiệm đo cường độ chịu nén của bê tông: Mỗi cấp phối chế tạo 09 mẫu hình trụ, có kích thước 150 mm x 300 mm.

Đối với thí nghiệm thấm ion clo: Mỗi cấp phối chế tạo 09 mẫu hình trụ có kích thước (100 ± 2) mm x (50 ± 3) mm được cắt ra từ mẫu bê tông hình trụ có kích thước 100 mm x 200 mm.

**Bảng 1.** Thành phần cấp phối chi tiết của mẫu thí nghiệm

STT	Kí hiệu bê tông xi măng	X (kg)	N (lít)	MS (kg)	C (kg)	Đ (kg)	N/CKD	PG (lít)
1	8MS 0.25N/CKD	552	150	48	612	1100	0,25	8,3
2	10MS 0.25N/CKD	540	150	60	612	1100	0,25	8,1
3	12MS 0.25N/CKD	528	150	72	612	1100	0,25	7,9
4	8MS 0.30N/CKD	460	150	40	692	1100	0,30	6,9
5	10MS 0.30N/CKD	450	150	50	692	1100	0,30	6,8
6	12MS 0.30N/CKD	440	150	60	692	1100	0,30	6,6
7	8MS 0.35N/CKD	395	150	34	745	1100	0,35	5,9
8	10MS 0.35N/CKD	386	150	43	745	1100	0,35	5,8
9	12MS 0.35N/CKD	377	150	52	745	1100	0,35	5,7

Ghi chú:

X: Xi măng; N: Nước; MS: Muối silic; C: Cát; Đ: Đá dăm; N/CKD: Tỷ lệ Nước/Chất kết dính; PG: Phụ gia siêu dẻo

2.1.4. Phương pháp sử dụng thí nghiệm

Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của BTXM muối silic theo Tiêu chuẩn TCVN 3118-93 [8].

Thí nghiệm thẩm ion clo được tiến hành theo phương pháp thẩm nhanh bằng điện lượng theo Tiêu chuẩn 9337 : 2012 [9].

2.2. Thiết kế thí nghiệm theo phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi

2.2.1. Giới thiệu tổng quan về phương pháp Quy hoạch thực nghiệm Taguchi

Phương pháp Quy hoạch thực nghiệm (QHTN) Taguchi là công cụ thiết kế ma trận thí nghiệm đơn giản, ứng dụng trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật và cho hiệu quả cao. Các ma trận thí nghiệm được thiết kế dựa vào các ma trận trực giao cố định. Các thông số công nghệ đưa vào ma trận thí nghiệm với số lượng lớn (3÷50) với các mức có thể khác nhau (cả trị số và số lượng).

Thay vì phải kiểm tra tất cả các sự kết hợp của chúng, phương pháp Taguchi tiến hành kiểm tra các cặp của các kết hợp. Điều này cho phép xác định được ảnh hưởng của hầu hết các thông số đến giá trị trung bình của kết quả đầu ra với số

lượng thí nghiệm nhỏ nhất, thời gian và chi phí ít nhất. Đồng thời xác định được các thông số ảnh hưởng mạnh nhất đến các kết quả đầu ra, từ đó đưa ra những thử nghiệm tiếp theo và loại bỏ những thông số có ảnh hưởng không đáng kể (ảnh hưởng yếu).

2.2.2. Lựa chọn các yếu tố, mức độ khảo sát và các chỉ tiêu đánh giá

Từ các vật liệu lựa chọn, tham khảo kết quả nghiên cứu đã có từ trước và phân tích như trên. Theo mục đích nghiên cứu, để tiến hành khảo sát trong QHTN Taguchi, đề xuất 2 yếu tố khảo sát là tỷ lệ N/CKD và MS, với mỗi yếu tố có 3 mức khác nhau (Bảng 2). Các chỉ tiêu để đánh giá và xem xét ảnh hưởng của các yếu tố và các mức gồm: cường độ chịu nén và độ thẩm ion clo của bê tông.

**Bảng 2.** Các yếu tố và các mức được khảo sát trong QHTN Taguchi.

Yếu tố	Mức và trị số		
	1	2	3
1 N/CKD	0,25	0,30	0,35
2 MS	8%	10%	12%

**Bảng 3.** Bố trí thí nghiệm theo phương pháp QHTN Taguchi và kết quả thí nghiệm

Tên cấp phối	Bố trí trực giao các mức của yếu tố		N/CKD	MS(%)	R <sub>n</sub> <sup>28</sup> trung bình (MPa)	Q <sup>28</sup> trung bình (Culong)
	N/CKD	Hàm lượng muối silic				
T01	1	1	0,25	8	80,2	107,11
T02	1	2	0,25	10	84,5	90,00
T03	1	3	0,25	12	83,2	82,22
T04	2	1	0,30	8	68,5	211,44
T05	2	2	0,30	10	72,4	151,11
T06	2	3	0,30	12	71,1	110,22
T07	3	1	0,35	8	61,2	250,00
T08	3	2	0,35	10	65,3	196,67
T09	3	3	0,35	12	63,2	140,00

Ghi chú: Ghi chú:

R<sub>n</sub><sup>28</sup> trung bình (MPa): Cường độ chịu nén trung bình của tổ hợp 9 mẫu thí nghiệm

Q<sup>28</sup> trung bình (Culong): Điện lượng trung bình truyền qua mẫu bê tông đo được của tổ hợp 9 mẫu thí nghiệm

**c. Sắp xếp trực giao và thành phần bê tông thiết kế**

Theo tài liệu sổ tay kỹ thuật chất lượng Taguchi [10], với việc khảo sát 2 yếu tố, mỗi yếu tố 4 mức, lựa chọn quy hoạch loại L9 với 9 cấp phối thí nghiệm, tổ hợp các thí nghiệm được bố trí trực giao. Chi tiết bố trí các thí nghiệm và kết quả đối với từng tổ hợp được tổng hợp ở Bảng 3.

**3. Phân tích kết quả**

**3.1. Mối quan hệ giữa các thành phần bê tông xi măng muối silic và cường độ chịu nén**

**3.1.1. Phân tích ảnh hưởng của thành phần bê tông xi măng muối silic đến cường độ chịu nén**

Kết quả từ Bảng 3 được mô tả dưới dạng đồ thị ở Hình 1 cho thấy ảnh hưởng của thành phần bê tông xi măng muối silic (tỷ lệ N/CKD và MS) đến đặc tính cường độ chịu nén của bê tông muối silic.

Từ biểu đồ quan hệ Hình 1 có thể đưa ra nhận xét sau:

- Cường độ chịu nén của bê tông muối silic đạt từ 62 MPa-83 MPa và lớn hơn, đáp ứng yêu cầu về cường độ của bê tông cường độ cao và phù hợp với hướng dẫn thiết kế thành phần theo Tiêu chuẩn TCVN 10306:2014 [6].

- Cường độ chịu nén của bê tông muối silic giảm khi tăng tỷ lệ N/CKD do lượng nước dư thừa làm ảnh hưởng đến cấu trúc lỗ rỗng và phân bố lỗ rỗng trong bê tông.

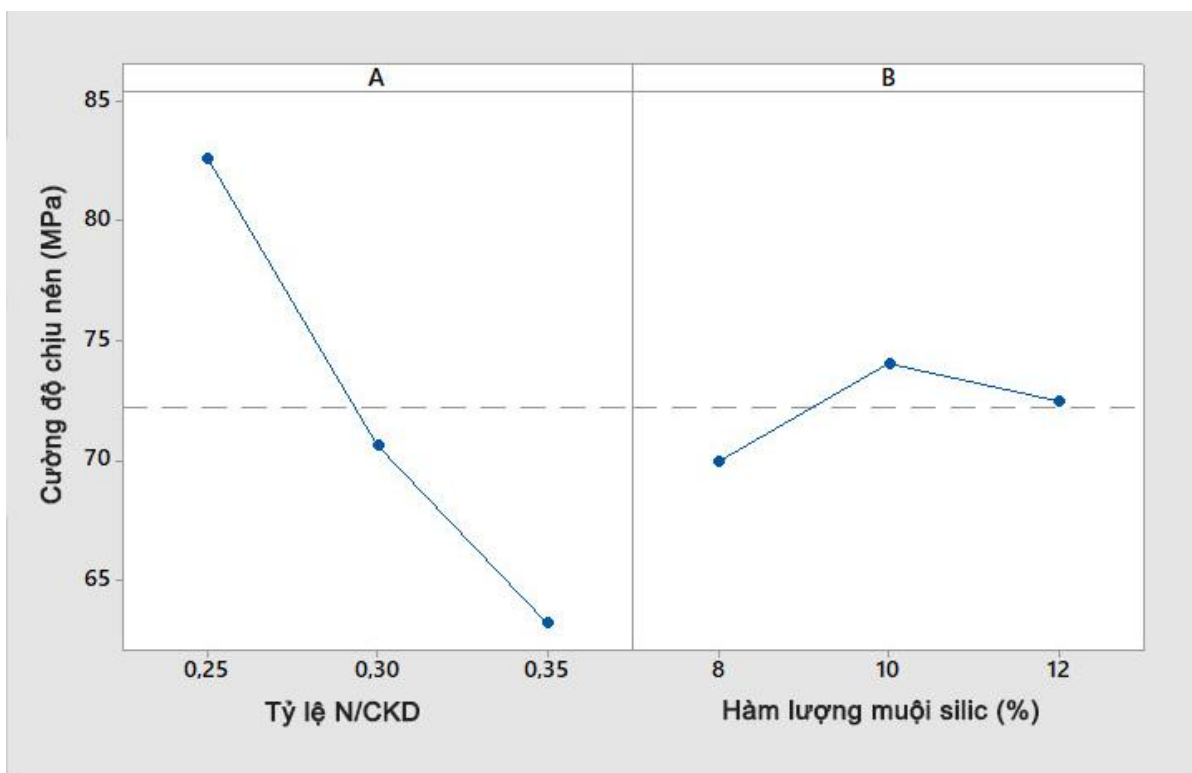
- Cường độ chịu nén của bê tông muối silic tăng khi MS tăng từ 8%-10%, đạt giá trị lớn nhất là khi MS là 10%, sau đó giảm khi MS tăng từ 10%-12%.

**3.1.2. Phân tích hồi quy mối quan hệ giữa thành phần bê tông xi măng muối silic và cường độ chịu nén**

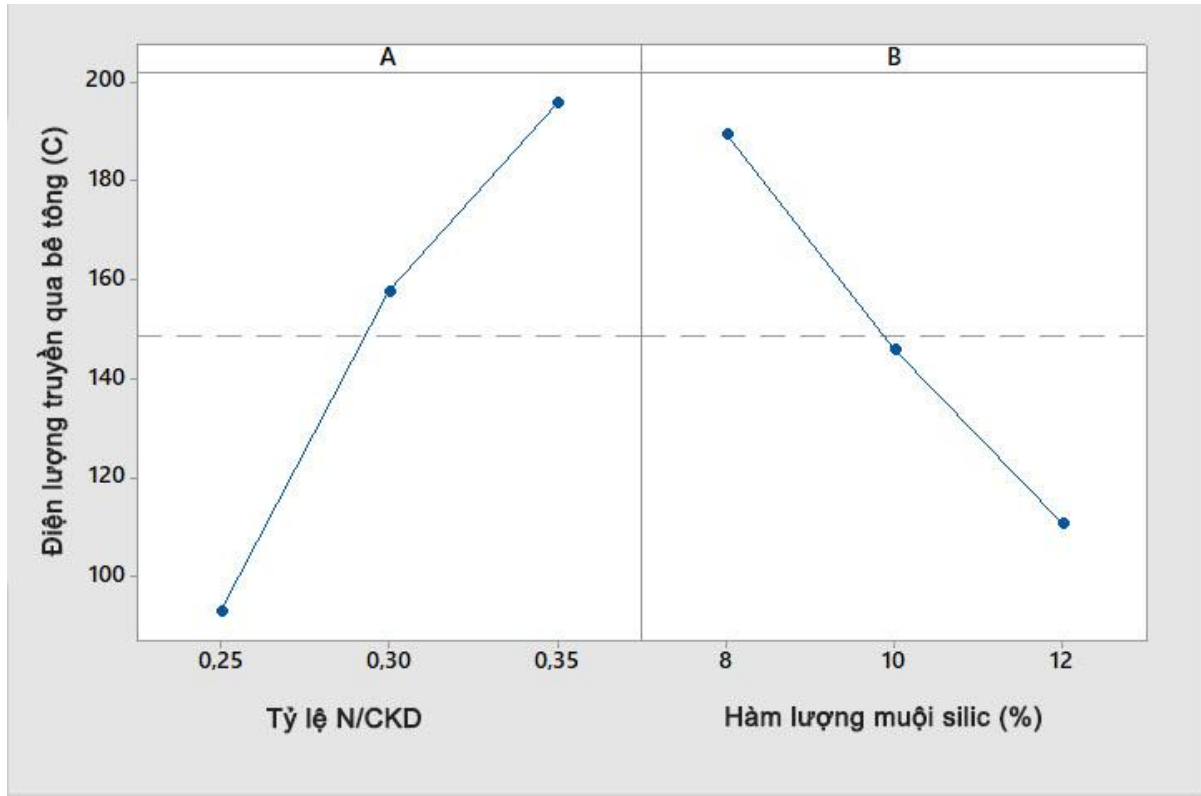
Các thông số đầu vào được phân tích hồi quy (PTHQ) bao gồm các yếu tố:

- Tỷ lệ N/CKD
- Hàm lượng muối silic (MS)

Ngoài ra còn đưa vào thêm các thông số như:



**Hình 1.** Quan hệ giữa tỷ lệ N/CKD, MS và cường độ chịu nén



Hình 2. Quan hệ giữa độ thấm ion clo và tỷ lệ N/CKD, MS.

- Chất kết dính (CKD) = Xi măng + Muối silic
- Tỷ lệ nước/chất kết dính hiệu quả (N/CKD<sub>hq</sub>)
- Hàm lượng muối silic hiệu quả MSh<sub>q</sub>
- Sự tương tác giữa các yếu tố trên với nhau.

Nghiên cứu sử dụng phần mềm Minitab để hỗ trợ PTHQ cường độ chịu nén của BTCT. Mô hình hồi quy được coi là có ý nghĩa khi thông số P-Value (giá trị xác suất) của mô hình hồi quy có giá trị nhỏ hơn hoặc bằng 0,05.

Kết quả PTHQ được thể hiện qua hệ số tương quan và các hệ số ảnh hưởng của mô hình hồi quy giữa thành phần bê tông xi măng muối silic và cường độ chịu nén được trình bày ở Bảng 4 và 5.

Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén với các yếu tố đầu vào được thể hiện ở Phương trình (1) sau:

$$R_n = 135,19 - 738,0 \cdot \frac{N}{CKD_{hq}} + 14,80 \cdot MS \quad (1)$$

$$+ 906,7 \cdot \left(\frac{N}{CKD_{hq}}\right)^2 - 0,7083 \cdot MS^2$$

Bảng 1. Hệ số ảnh hưởng của các biến trong cường độ chịu nén.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Hằng số	135,19	8,86	15,25	0,0001
N/CKD <sub>hq</sub>	-738,0	49,40	-14,95	0,0001
MS <sub>hq</sub>	14,80	1,03	14,38	0,0001
(N/CKD <sub>hq</sub> ) <sup>2</sup>	906,7	82,20	11,03	0,0004
MS <sub>hq</sub> <sup>2</sup>	-0,708	0,0514	-13,79	0,0002

Ghi chú:

Coef: Hệ số trong PTHQ

SE Coef: Sai số chuẩn

T-Value: là tỷ số giữa hệ số và sai số chuẩn

P-Value: Giá trị xác suất

Kết quả phân tích cho thấy, cường độ chịu nén của bê tông muối silic phụ thuộc vào cả hai yếu tố là tỷ lệ N/CKD và MS ở dạng phương trình bậc 2. Theo lý thuyết về hồi quy thực nghiệm, mỗi mô hình thực nghiệm có thể phù hợp nhất với một hàm hồi quy xác định tùy theo sự phân bố kết quả thực nghiệm. Để đánh giá sự phù hợp của hàm hồi quy được xác định thông qua chỉ số R-sq (hệ số xác định của hàm), R-sq(adj) (hệ số xác định điều chỉnh của hàm), R-

sq(pred) (hệ số xác định dự đoán của hàm). Các giá trị này có giá trị từ 0% tới 100%, nếu càng gần 100% thì cho thấy mô hình hồi quy càng phù hợp với số liệu được đưa vào và đạt độ tin cậy càng cao. Do đó, các hệ số hồi quy R-sq = 99,94%, R-sq(adj) = 99,89%, R-sq(pred) = 99,72% ở Bảng 5 và giá trị xác suất P ở Bảng 4 cho thấy phương trình hồi quy có sự tương quan chặt chẽ với số liệu thí nghiệm và có thể sử dụng phương trình để dự đoán cường độ chịu nén của bê tông muối silic.

3.2. *Mối quan hệ giữa thành phần bê tông muối silic và độ thấm ion clo*

3.2.1. *Phân tích ảnh hưởng của thành phần bê tông muối silic đến độ thấm ion clo*

Kết quả từ Bảng 3 được mô tả dưới dạng đồ thị ở Hình 2 cho thấy ảnh hưởng của thành phần bê tông xi măng muối silic (tỷ lệ N/CKD và MS) đến độ thấm ion clo của bê tông muối silic.

**Bảng 2.** Hệ số tương quan của PTHQ cường độ chịu nén.

S (độ lệch chuẩn)	R-sq (Hệ số xác định)	R-sq(adj) (Hệ số xác định điều chỉnh)	R-sq(pred) (Hệ số xác định dự đoán)
0,290593	99,94%	99,89%	99,72%

Từ biểu đồ quan hệ Hình 2 có thể đưa ra một số nhận xét. Khi thêm thành phần muối silic vào bê tông, độ thấm ion clo của bê tông đều đạt mức rất thấp (từ 100 – 1000 culong), đặc biệt đạt mức không đáng kể khi tỷ lệ N/CKD là 0,25 theo bảng phân loại độ thấm ion clo theo tiêu chuẩn TCVN 9337:2012 [9]. Độ thấm ion clo của bê tông muối silic tăng khi tỷ lệ N/CKD tăng từ 0,25 tới 0,35 và giảm khi MS tăng từ 8% đến 12%. Thực tế cho thành phần muối silic không ảnh hưởng tới độ rỗng của bê tông xi măng, tuy nhiên lại ảnh hưởng tới hệ số thấm do tác động làm giảm kích thước lỗ rỗng trong bê tông. Theo Powers và các cộng sự, thành phần muối silic gây giảm kích thước lỗ rỗng và các mao dẫn từ đó làm mất tính liên tục của hệ thống mao dẫn trong bê tông, khiến cho độ thấm thấu của chất lỏng hoặc khí vào bê tông giảm xuống đáng kể [11]. Về mặt hóa học, do phản ứng muối silic với Canxi hydroxit (CH) tạo

thành Canxi silicat ngậm nước (CSH) làm tăng pha rắn trong đá xi măng hơn diễn ra nhanh hơn khi có mặt tinh thể silic. Do đó, kết hợp với khả năng điền đầy của hạt muối silic đóng vai trò là chất độn mịn, dẫn đến làm giảm hệ thống lỗ rỗng, các lỗ rỗng lớn được chia làm các lỗ rỗng nhỏ hơn và do đó làm thay đổi vi cấu trúc của hồ xi măng, làm tăng độ đặc và cải thiện cấu trúc vùng tiếp giáp cốt liệu - đá xi măng, bê tông trở nên ít thấm nước và cải thiện khả năng chống xâm nhập ion clo và tăng cường độ chịu nén của bê tông [12-14].

3.2.2. *Phân tích hồi quy mối quan hệ giữa thành phần bê tông muối silic và độ thấm ion clo*

Các thông số đầu vào được phân tích tương tự như đối với việc PTHQ cường độ chịu nén được trình bày ở mục 3.1. Kết quả PTHQ được thể hiện qua hệ số tương quan và các hệ số ảnh hưởng của mô hình hồi quy giữa độ thấm ion clo và các yếu tố đầu vào được trình bày ở Bảng 6 và Bảng 7. Phương trình hồi quy điện lượng truyền qua bê tông với các yếu tố đầu vào được biểu diễn ở Phương trình (2) dưới đây:

$$Q = -600 + 3152 \cdot \frac{N}{CKD_{hq}} + 44,2 \cdot MS_{hq} - 212,8 \cdot \left(\frac{N}{CKD_{hq}}\right) \cdot MS_{hq} \tag{2}$$

**Bảng 3.** Hệ số ảnh hưởng của các biến trong PTHQ độ thấm ion clo của bê tông muối silic.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Hằng số	-600	195	-3,07	0,028
N/CKD <sub>hq</sub>	3152	645	4,89	0,005
MS <sub>hq</sub>	44,2	19,3	2,29	0,071
(N/CKD <sub>hq</sub> ).MS <sub>hq</sub>	-212,8	63,7	-3,34	0,021

Kết quả phương trình (2) cho thấy tỷ lệ N/CKD<sub>hq</sub> và MS<sub>hq</sub> đều ảnh hưởng tới độ thấm ion clo thông qua điện lượng truyền qua mẫu bê tông. Giá trị P ở Bảng 6 thỏa mãn điều kiện nhỏ hơn 0,05. Các giá trị R-sq = 97,07%; R-

sq(adj) = 95,31%; R-sq(pred) = 88,26% cũng tiệm cận với 100% cho thấy mối quan hệ giữa phương trình hồi quy có sự tương quan chặt chẽ với số liệu thí nghiệm và có thể sử dụng phương trình để dự đoán độ thấm ion clo của bê tông muối silic.

**Bảng 4.** Hệ số tương quan của PTHQ độ thấm ion clo của bê tông muối silic.

S (Độ lệch chuẩn)	R-sq (Hệ số xác định)	R-sq(adj) (Hệ số xác định điều chỉnh)	R-sq(pred) (Hệ số xác định dự đoán)
12,7364	97,07%	95,31%	88,26%

**4. Kết luận**

Nghiên cứu đã sử dụng phương pháp QHTN Taguchi để lựa chọn các mức, yếu tố N/CKD và hàm lượng muối silic, qua đó thiết kế, bố trí thí nghiệm xác định đặc tính cường độ chịu nén, độ thấm ion clo của bê tông muối silic. Qua kết quả phân tích tương quan đã đưa ra được các hệ số ảnh hưởng của các yếu tố thành phần (tỷ lệ N/CKD, hàm lượng muối silic) tới đặc tính cường độ chịu nén, độ thấm ion clo. Từ đó xác định được 02 phương trình hồi quy:

PTHQ giữa cường độ chịu nén và tỷ lệ N/CKD, hàm lượng muối silic:

$$R_n = 135,19 - 738,0 \cdot \frac{N}{CKD_{hq}} + 14,80 \cdot MS + 906,7 \cdot \left(\frac{N}{CKD_{hq}}\right)^2 - 0,7083 \cdot MS^2 \tag{1}$$

PTHQ giữa độ thấm ion clo và tỷ lệ N/CKD, hàm lượng muối silic:

$$Q = -600 + 3152 \cdot \frac{N}{CKD_{hq}} + 44,2 \cdot MS_{hq} - 212,8 \cdot \left(\frac{N}{CKD_{hq}}\right) \cdot MS_{hq} \tag{2}$$

Cả hai phương trình trên cho thấy được ảnh hưởng giữa tỷ lệ N/CKD, hàm lượng muối silic tới

đặc tính cường độ chịu nén, độ thấm ion clo của bê tông muối silic. Từ hai PTHQ (1), (2) nhận được có thể sử dụng để xây dựng phương pháp thiết kế thành phần bê tông muối silic có xét đến độ bền.

**Tài liệu tham khảo**

- [1]. D. T. Cao, Q. H. Lê, V. K. Phạm, T. N. Nguyễn (1998). Ứng dụng hóa học trong công tác khảo sát và sửa chữa hư hỏng do ăn mòn các kết cấu bê tông cốt thép vùng ven biển Việt Nam, *Hội thảo Hóa học trong xây dựng*, Hà Nội.
- [2]. L. K. Nguyễn, T. T. T. Nguyễn. (2021). Dự báo tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường biển bằng phần mềm Life-365, *Tạp chí GTVT*.
- [3]. D. H. Phạm, V. Đ. Đào, D. A. Phạm, T. D. Nguyễn, Đ. H. Nguyễn, Giáo trình. Vật liệu mới trong xây dựng công trình giao thông, NXB Giao thông vận tải.
- [4]. T. T. H. Nguyễn, T. V. Ngô, Q. V. Vũ. (2015). Nghiên cứu sử dụng phụ gia để nâng cao độ bền cho bê tông các công trình bảo vệ bờ biển Việt Nam, *Tuyển tập báo cáo hội thảo "Sự bền vững của kết cấu hạ tầng xây dựng - Vai trò và kinh nghiệm sử dụng phụ gia hoá học, phụ gia khoáng trong bê tông"*.
- [5]. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 9346 : 2012, "Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép – Yêu cầu bảo vệ chống ăn mòn trong môi trường biển".
- [6]. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 10306 : 2014, "Bê tông cường độ cao – Thiết kế thành phần mẫu hình trụ".
- [7]. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 3015 : 1993, "Hỗn hợp bê tông nặng và bê tông nặng – Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử".
- [8]. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 3118 : 1993, "Bê tông nặng – Phương pháp xác định cường độ nén".
- [9]. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 9337 : 2012, "Bê tông nặng – Xác định độ thấm ion clo bằng phương pháp điện lượng".
- [10]. G., S. Taguchi, Chowdhury, and Y. Wu. (2005). Taguchi's quality engineering handbook. *Wiley*.
- [11]. POWERS, T.C.; Copeland, L.E.; Hayes, J.C.; và Mann, H.M., "Permeability of Portland Cement Paste", *ACI Journal, Proceedings*, 51, 285-298.
- [12]. J. Prasad, D.K. Jain and A.K. Ahuja. (2006). Factors influencing the sulphate resistance of cement concrete and mortar, *Asian journal of civil engineering (Building and housing)* 7 (3), 259-268.



- [13]. A. A. Ramezaniapur. (2013). Cement Replacement Materials: Properties, Durability, Sustainability, *Springer Verlag*.
- [14]. R. D. Hooton. (1986). Permeability and Pore Structure of Cement Pastes Containing Fly Ash, Slag and Silica Fume, Blended Cements, *ASTM STP, 897, 128-143*.