

Dự đoán cường độ chịu nén của chất kết dính sử dụng một số phế phẩm làm việc trong môi trường nhiệt độ cao

Vương Lê Thắng¹, Đỗ Thị Phượng^{2*}

¹ Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

² Khoa Xây dựng Cầu đường, trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

TỪ KHOÁ

Chất kết dính
Nhiệt độ cao
Cường độ chịu nén
Tro bay
Bột ngói
Mạng nơ-ron nhân tạo

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, mô hình dự đoán cường độ chịu nén của chất kết dính chứa xi măng Poóc-lăng và tro bay (FA), bột ngói đất sét nung (FGT) ở nhiệt độ cao được thiết lập. Hai phế phẩm FA và FGT được sử dụng để thay thế cho xi măng trong khoảng từ 10% đến 40% (theo khối lượng). Một điểm tiêu biểu của nghiên cứu là chất kết dính sẽ được xem xét với điều kiện nhiệt độ thay đổi trong khoảng rộng từ 25°C đến 800°C. Tất cả 42 tổ mẫu với ba tham số đầu vào khác nhau là tỉ lệ FA, FGT và nhiệt độ được đưa vào nghiên cứu. Mô hình dự đoán sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) có khả năng dự đoán độ chính xác cao về cường độ chịu nén của chất kết dính sau khi đốt nóng ở nhiệt độ cao (với R là 0,9629). Ngoài ra, kết quả phân tích từ biểu đồ Interval Plot cho thấy FA và FGT thay thế 20% xi măng cho cường độ chất kết dính cao nhất.

KEYWORDS

Binder
High temperature
Compressive strength
Fly ash
Finely ground clay tile
Artificial neural network

ABSTRACT

In this study, a model to predict compressive strength of binder containing Portland cement and fly ash (FA), finely ground clay tile (FGT) at high temperature was devised. Portland cement was replaced with waste as FA and FGT at various rates from 10% to 40% (in weight). The highlight of the paper was that the binder worked under temperature conditions ranging from 25°C to 800°C. The database containing three input parameters (FA ratio, FGT ratio and temperature) based on 42 sample groups was employed for the prediction. It was found that the predictive model using artificial neural network (ANN) seemed to have a high prediction capability of the compressive strength of binder after being exposed to elevated temperature (with R is 0.9629). Additionally, analysis results from the Interval Plot chart showed that FA and GFT replacing 20% of cement for the highest binder strength.

1. Giới thiệu

Bê tông là vật liệu được sử dụng phổ biến trong các công trình xây dựng tại Việt Nam. Đây là vật liệu không cháy nhưng tính chất hoá học, vật lý và cơ học bị ảnh hưởng trực tiếp ở nhiệt độ cao [1]. Sự hư hỏng của bê tông khi đốt nóng do nhiều yếu tố gây ra, như nhiệt độ, tốc độ gia nhiệt, tải trọng tác dụng, thành phần của bê tông,... [2]. Chất kết dính cần có khả năng chịu nhiệt sẽ tăng hiệu quả làm việc trong ma trận bê tông cũng như tăng cường độ chịu nén cho bê tông.

Để xác định cường độ chịu nén cho chất kết dính có thể làm thực nghiệm trên mẫu hoặc sử dụng các mô hình toán học [3]. Dự đoán cường độ cho chất kết dính theo thời gian, ở nhiệt độ cao, ... sẽ cho phép rút ngắn thời gian, tiết kiệm một lượng lớn chi phí liên quan đến việc tiến hành các thử nghiệm về mối quan hệ giữa thành phần bê tông và các tính chất cơ học. Nhiều công trình nghiên cứu được công bố về việc xây dựng các mô hình dự đoán cường độ chịu nén cho xi măng cũng như vật liệu gốc xi măng. Trong đó, các kỹ thuật tính toán mềm dự báo cường độ xi măng tốt hơn nhiều so với phân tích hồi quy là công bố của tác giả A. Baykasoğlu [3]. Tác giả J. Huang [4] đề xuất

kết hợp thuật toán Random Forests và Firefly Algorithm để dự đoán cường độ chịu nén của vật liệu gốc xi măng và metakaolin, qua đó cho thấy loại xi măng có ảnh hưởng lớn nhất đến cường độ chịu nén của mẫu.

Những năm gần đây, phương pháp sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) với ưu điểm có thể áp dụng được với cả bộ dữ liệu có tính phi tuyến và độ chính xác cao nên được sử dụng phổ biến. Sự kết hợp của ANN và Particle Swarm Optimization cho thấy rất hiệu quả và mô hình tối ưu rất chính xác dự đoán cường độ của mẫu chứa xi măng là kết luận của tác giả C. Qi [5]. Tác giả A.Ahmad [6] đã áp dụng các phương pháp Supervised Machine Learning để dự đoán cường độ chịu nén của bê tông sử dụng tro bay, silica fume và nano silica ở nhiệt độ cao. Ông đã sử dụng Decision Tree (DT), ANN, Bagging, và Gradient Boosting (GB) cho nghiên cứu. Các mô hình riêng lẻ sử dụng DT và ANN cho hệ số tương quan R^2 lần lượt là 0,83 và 0,82 trong khi sử dụng thuật toán Ensemble Algorithm và GB cho R^2 lần lượt là 0,9 và 0,88. Mô hình ANN cũng được áp dụng trong nghiên cứu của tác giả M. Uysal [7]. Xi măng được thay thế bằng nhiều phụ gia khoáng kết hợp với sợi polypropylen để tạo bê tông làm việc đến 800 °C. ANN dường như có khả năng dự đoán cao về sự suy giảm cường độ nén của hỗn hợp bê

*Liên hệ tác giả: dtphuongbmvldn@gmail.com

Nhận ngày 15/02/2025, sửa xong ngày 09/04/2025, chấp nhận đăng ngày 10/04/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2025.842>

tổng tự đầm sau khi tiếp xúc với nhiệt độ cao với $R^2 = 0,9757$.

Thực trạng hiện nay tại Việt Nam do việc khai thác quá mức các vật liệu có nguồn gốc từ tự nhiên để chế tạo bê tông đã gây ra các tác động xấu đến môi trường. Từ đó nhiều nghiên cứu trong nước đã thực hiện việc thay thế xi măng bằng các vật liệu thân thiện môi trường, có thể kể đến như tro bay, tro trấu, tro đáy, xỉ lò cao,...[8-11].

Từ những phân tích trên, trong nghiên cứu này sẽ tập trung vào việc dự đoán cường độ chịu nén của chất kết dính sử dụng một số phế phẩm tại Việt Nam để thay thế cho vật liệu truyền thống hướng đến chế tạo bê tông làm việc ở nhiệt độ cao. Hiện nay theo số liệu báo cáo hằng năm các nhà máy nhiệt điện tại khu vực phát sinh hàng triệu tấn tro bay và một lượng lớn phế phẩm từ các viên ngói chế tạo bằng đất sét. Do vậy, nghiên cứu thay thế một phần xi măng bằng các phế phẩm là tro bay (FA) và bột ngói (FGT) mang lại nhiều ý nghĩa thực tiễn. Một tính mới tiêu biểu nữa trong nghiên cứu này là việc chất kết dính sẽ được nghiên cứu trong các điều kiện nhiệt độ khác nhau để đáp ứng yêu cầu làm việc của bê tông trong điều kiện nhiệt độ cao. Điều kiện nhiệt độ sẽ được thay đổi với 6 mức khác nhau là 25 °C, 100 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C và 800 °C. Một mô hình dự đoán cường độ chịu nén chất kết dính bằng ANN sẽ được xây dựng với 3 tham số đầu vào là tỉ lệ FA thay thế cho xi măng, tỉ lệ FGT thay thế cho xi măng và nhiệt độ làm việc.

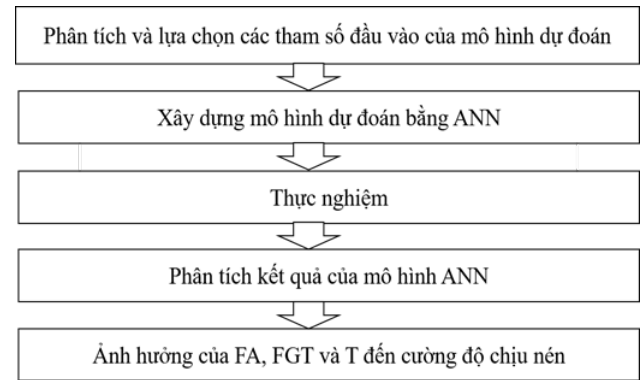
2. Phương pháp thí nghiệm

2.1. Nội dung nghiên cứu

Để thực hiện được mục tiêu nghiên cứu, bài báo thực hiện theo các bước sau:

- Phân tích và lựa chọn các tham số đầu vào của mô hình dự đoán: Thực hiện phân tích và chọn được 3 tham số cần thay đổi trong nghiên cứu là tỉ lệ thay thế FA cho xi măng, tỉ lệ thay thế FGT cho xi măng và nhiệt độ (T); xi măng được lấy với điều kiện thường gặp tại Việt Nam.
- Xây dựng mô hình dự đoán: Sử dụng phương pháp ANN để xây dựng một mô hình dự đoán cường độ chịu nén chất kết dính với 3 tham số đầu vào là tỉ lệ FA, tỉ lệ FGT và T; đầu ra của mô hình là cường độ chịu nén của chất kết dính.
- Bộ dữ liệu thực nghiệm: Dựa trên việc phải thay đổi ba tham số đầu vào của mô hình dự đoán, xác định được số tổ mẫu cần thiết phải chế tạo là 42 tổ mẫu.
- Phân tích kết quả của mô hình dự đoán bằng ANN đã xây dựng: Sử dụng sự hỗ trợ của công cụ tool trong phần mềm Matlab, các biểu đồ của các quá trình như đào tạo, kiểm tra, xác thực được trình bày; qua đó đánh giá được sự phù hợp và độ chính xác của mô hình dự đoán.
- Đánh giá ảnh hưởng của ba tham số là tỉ lệ FA, FGT và T đến cường độ chịu nén của chất kết dính.

Sơ đồ các bước nghiên cứu được thể hiện Hình 1.



Hình 1. Các bước nghiên cứu.

2.2. Các tham số đầu vào của mô hình dự đoán

2.2.1. Vật liệu

Trong phần giới thiệu của bài báo đã nêu ra vấn đề cấp thiết cần tìm các vật liệu mới thay thế cho các vật liệu truyền thống chế tạo chất kết dính. Dựa trên các khảo sát tại Việt Nam, hằng năm phát sinh hàng triệu tấn phế phẩm là FA tại các nhà máy nhiệt điện và một lượng lớn phế phẩm là ngói vỡ có nguồn gốc từ đất sét nung. Vì vậy, nghiên cứu này sử dụng phế phẩm FA tại Nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân (Bình Thuận) và FGT từ các nhà máy sản xuất gạch tuynen tại Miền Trung thay thế một phần cho xi măng (Hình 2). Tỉ lệ FA và FGT thay thế cho xi măng sẽ lần lượt là 10 %, 20 %, 30 % và 40 %, thể hiện trong Bảng 1. Xi măng PC40 Sông Gianh (PC) được sử dụng trong nghiên cứu. Chi tiết đặc tính của các vật liệu được trình bày trong nghiên cứu [12, 13] của cùng nhóm tác giả.



(a) FA



(b) FGT

Hình 2. Phế phẩm tro bay và bột ngói đất sét nung.

Bảng 1. Thành phần hỗn hợp chất kết dính, % [13].

Mẫu	PC, %	FA, %	FGT, %
PC	100	0	0
F10T10	80	10	10
F20T10	70	20	10
F30T10	60	30	10
F40T10	50	40	10
F10T20	70	10	20
F10T30	60	10	30
F10T40	50	10	40

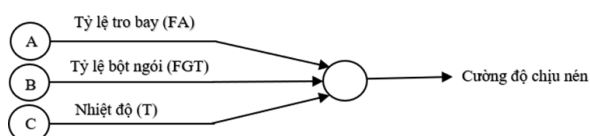
2.2.2. Nhiệt độ

Tại Việt Nam, nhiệt độ bình thường dao động trong khoảng 25 °C đến 35 °C, tuy nhiên bê tông không phải lúc nào cũng làm việc trong môi trường nhiệt độ này. Chẳng hạn trong các nhà máy như nhà máy nhiệt điện, nhà máy điện hạt nhân, nhà máy luyện kim, nhà máy sản xuất gạch ngói, nhiều kết cấu đòi hỏi bê tông phải làm việc trong các khoảng nhiệt độ cao, dao động từ khoảng 100 °C đến 800 °C. Từ đó, bài báo thực hiện nghiên cứu cường độ chịu nén khi chất kết dính làm việc trong khoảng thay đổi nhiệt độ từ 25 °C đến 800 °C, hướng tới chế tạo bê tông làm việc trong khoảng nhiệt độ này.

2.3. Giới thiệu về ANN

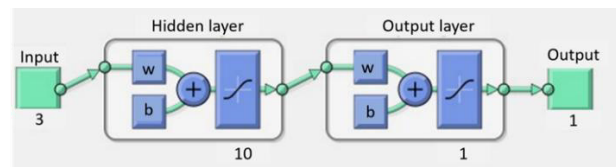
a. Cấu trúc mô hình dự đoán

Mục tiêu của nghiên cứu là xây dựng một mô hình dự đoán cường độ chịu nén chất kết dính với ba tham số đầu vào thay đổi là tỉ lệ tro FA, tỉ lệ FGT và T (Hình 3).



Hình 3. Mô hình dự đoán cường độ chịu nén của chất kết dính ở nhiệt độ cao.

Mô hình dự đoán bằng ANN sẽ gồm ba lớp là lớp đầu vào, lớp ẩn và lớp đầu ra. Lớp đầu vào (Input) như đã phân tích sẽ là ba tham số: tỉ lệ FA, tỉ lệ FGT và T. Lớp đầu ra (Output) là cường độ chịu nén của chất kết dính. Lớp ẩn gồm hai thông số là số lớp ẩn và số nơ-ron trong các lớp ẩn và sự thay đổi các thông số này sẽ ảnh hưởng đến độ chính xác của mô hình dự đoán. Bài báo sử dụng phương pháp dò tìm thử và sai (trial-and-error method) để tìm ra cấu trúc mạng ANN phù hợp nhất. Khi đó một lớp ẩn với 10 nơ-ron được lựa chọn và cấu trúc mạng ANN được thể hiện như Hình 4. Hàm đào tạo được sử dụng là Levenberg Marquardt (TRAINLM), hàm kích hoạt (hàm truyền) được sử dụng là TANSIG.



Hình 4. Cấu trúc mạng ANN được sử dụng để dự đoán cường độ chịu nén của chất kết dính ở nhiệt độ cao.

Tổng cộng có 42 bộ dữ liệu thí nghiệm được sử dụng để đào tạo, xác thực và kiểm tra [13]. Dữ liệu dùng cho đào tạo là 70 % (30 mẫu), dữ liệu dùng để xác thực là 15 % (6 mẫu) và dữ liệu dùng để kiểm tra là 15 % (6 mẫu). Việc phân bổ 42 tập dữ liệu cho 3 tập dữ liệu nêu trên được thực hiện ngẫu nhiên bằng công cụ tool trong phần mềm Matlab.

b. Thông số đánh giá

Trong nghiên cứu này, hệ số R được sử dụng để đánh giá mức độ phù hợp của mô hình phân tích với dữ liệu thực nghiệm. Hệ số R được xác định theo phương trình (1).

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

trong đó: y_i là giá trị biến đầu ra của thí nghiệm i ; $\hat{y}_i$ là giá trị dự đoán của biến đầu ra của thí nghiệm thứ i ; $\bar{y}$ là giá trị trung bình của biến đầu ra của tất cả các thí nghiệm; và n là số lượng mẫu được kiểm tra.

2.4. Thực nghiệm

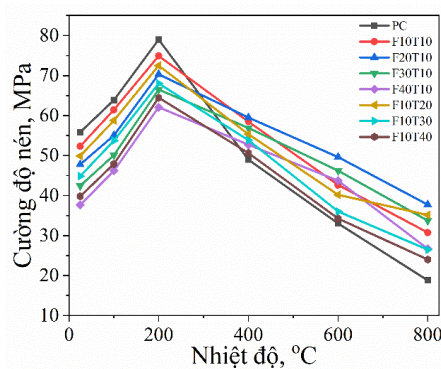
Mẫu chất kết dính để thí nghiệm được đúc từ khuôn thép hình lập phương cạnh 2 cm (Hình 5). Bảo dưỡng mẫu bằng cách để khuôn mẫu trong điều kiện 27 ± 2 °C, độ ẩm không nhỏ hơn 95 % trong 20 h rồi tháo mẫu và đem chưng hấp (nhiệt độ 100 °C với thời gian 4 giờ kể từ khi sôi). Tiếp theo, mẫu được sấy ở 105 ± 5 °C trong 24 giờ và được đưa vào lò điện (Hình 6) nung lần lượt ở 200, 400, 600 và 800 °C với tốc độ nâng nhiệt không quá 5 °C/ph, thời gian hằng nhiệt là 2h. Sau đó, mẫu được làm nguội đến nhiệt độ phòng với tốc độ không lớn hơn 1 °C/ph và xác định cường độ chịu nén [12-14]. Kết quả giá trị cường độ chịu nén của đá chất kết dính theo nhiệt độ được thể hiện trong Hình 7 được trích dẫn từ nghiên cứu số [13] của nhóm tác giả.



Hình 5. Khuôn mẫu.



Hình 6. Lò nung mẫu.

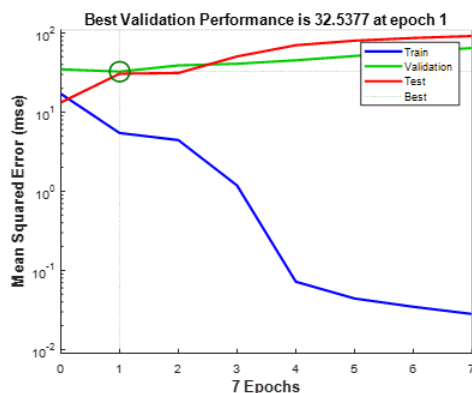


Hình 7. Cường độ chịu nén các mẫu chất kết dính ở các cấp nhiệt độ [13].

3. Kết quả và thảo luận

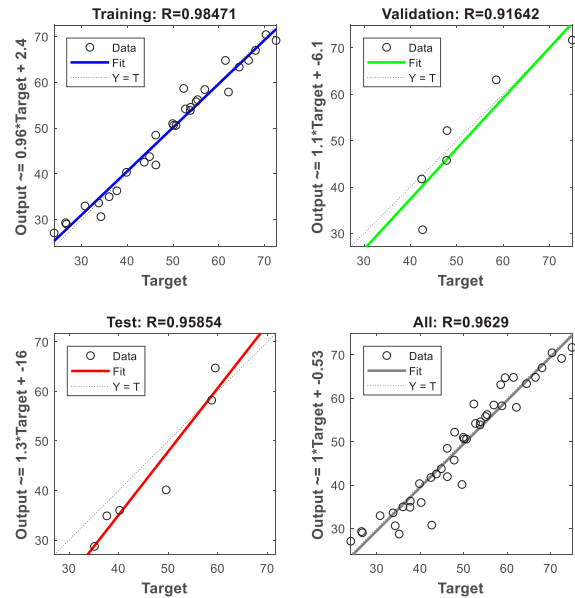
3.1. Dự đoán cường độ chịu nén của chất kết dính ở nhiệt độ cao bằng ANN

Quá trình huấn luyện mạng ANN được thể hiện ở Hình 8, trong đó trục tung là sai số toàn phương trung bình (MSE) và trục hoành là số lần lặp huấn luyện. Quá trình huấn luyện cho thấy các đường đào tạo, xác nhận và kiểm tra là tương tự nhau. Hiệu suất xác nhận tốt nhất với chỉ số MSE là 32.5377 tại vòng lặp thứ nhất, sau đó việc đào tạo tiếp tục cho đến vòng lặp thứ 7 thì dừng lại. Hơn nữa, quá trình huấn luyện cho thấy không ghi nhận hiện tượng Overfitting.



Hình 8. Quá trình huấn luyện dự đoán cường độ chịu nén của chất kết dính ở nhiệt độ cao.

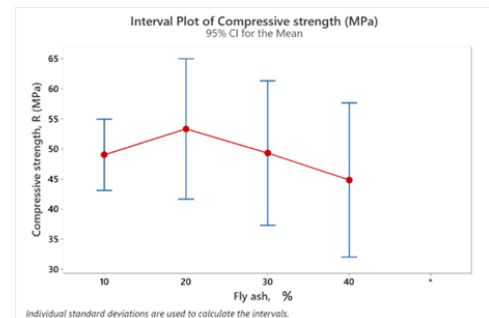
Hình 9 cho thấy mối quan hệ giữa đầu ra của mạng và các mục tiêu. Ba biểu đồ đại diện cho dữ liệu đào tạo, xác thực và kiểm tra. Đường nét đứt trong mỗi biểu đồ biểu thị kết quả hoàn hảo khi đầu ra bằng với mục tiêu. Đường nét liền biểu thị đường hồi quy tuyến tính phù hợp nhất giữa đầu ra và mục tiêu. Cường độ nén dự đoán (đầu ra) so với kết quả thí nghiệm (mục tiêu) của cả ba mô hình có sự phù hợp tốt. Đồng thời, đường xấp xỉ cường độ nén dự đoán cho cả hai trường hợp trên trùng với đường thẳng $Y = T$ của đồ thị. Với cấu trúc mô hình dự báo như trên, kết quả cho thấy các mô hình mạng ANN có độ chính xác cao ($R = 0,9629$).



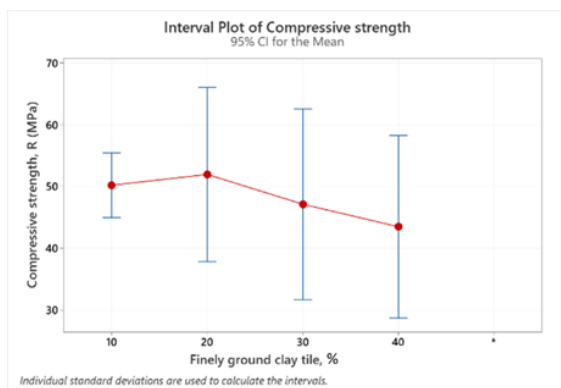
Hình 9. Kết quả dự đoán cường độ chịu nén của chất kết dính ở nhiệt độ cao.

3.2. Ảnh hưởng của các tham số đầu vào của mô hình đến cường độ chịu nén của chất kết dính ở nhiệt độ cao

Sử dụng Biểu đồ Interval Plot trong phần mềm Minitab 19 để phân tích ảnh hưởng của ba tham số đầu vào của mô hình dự đoán ở Hình 3 đến cường độ chịu nén của đá chất kết dính.

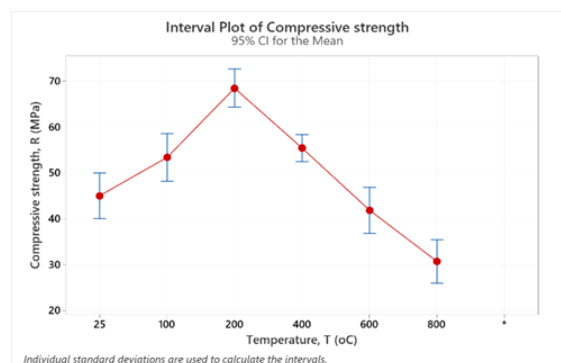


Hình 10. Ảnh hưởng của tỷ lệ FA đến cường độ chịu nén của chất kết dính ở nhiệt độ cao.



Hình 11. Ảnh hưởng của tỷ lệ FGT đến cường độ chịu nén của chất kết dính ở nhiệt độ cao.

Các Hình 10, Hình 11 và Hình 12 thể hiện sự ảnh hưởng của các yếu tố tỷ lệ FA, tỷ lệ FGT và nhiệt độ đến cường độ chịu nén của đá chất kết dính. Trong đồ thị thể hiện giá trị trung bình tương ứng của cường độ chịu nén và khoảng biến thiên của các tham số đầu vào. Kết quả cho thấy khi tăng tỉ lệ thay thế FA và FGT từ 10 % đến 20 % thì cường độ chịu nén tăng, trong khi đó khi tăng tỉ lệ thay thế hai phế phẩm này từ 20 % đến 40 % thì cường độ chịu nén sẽ giảm. Điều này chứng tỏ tỉ lệ thay thế hai phế phẩm này cho xi măng phù hợp nhất là 20 %.



Hình 12. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến cường độ chịu nén của chất kết dính.

Đối với ảnh hưởng của nhiệt độ đến cường độ chịu nén ở Hình 12 cho thấy trong giai đoạn nhiệt độ nhỏ hơn 200 °C thì ảnh hưởng nhiệt độ đến cường độ chịu nén là quan hệ tỉ lệ thuận, nhưng khi nhiệt độ lớn hơn 200 °C thì quan hệ nhiệt độ đối với cường độ nén là tỉ lệ nghịch. Giải thích cho điều này là với điều kiện nhiệt độ nhỏ hơn 200 °C, quá trình sấy và đốt nóng đã xảy ra sự mất nước làm đá chất kết dính co lại làm tăng mật độ, đồng thời nước tự do tách ra thúc đẩy quá trình thủy hóa của xi măng PC làm tăng cường độ (quá trình “tự chưng hấp”) [15]. Tiếp tục tăng nhiệt độ, sự mất nước chủ yếu của gel C-S-H, ettringite, quá trình phân hủy $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ở khoảng 200 đến 400 °C, phân hủy $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ở khoảng 400 đến 600 °C, và phân hủy C-S-H và CaCO_3 ở khoảng 600 đến 800 °C làm cường độ chịu nén của các mẫu suy giảm [16-18].

4. Kết luận

Từ những kết quả nghiên cứu trên, một số kết luận của bài báo như sau:

- Mô hình ANN đã xây dựng giúp dự đoán chính xác cao cường độ chịu nén của chất kết dính ở nhiệt độ cao ($R=0.9629$), điều này giúp việc xác định cường độ chịu nén ở nhiệt độ cao một cách nhanh chóng mà không cần làm các thí nghiệm tốn kém thời gian và chi phí.
- Từ biểu đồ Interval Plot đã xác định được sự ảnh hưởng của hàm lượng FA, FGT đến cường độ chịu nén của đá chất kết dính ở nhiệt độ cao.
- Các kết quả phân tích từ biểu đồ Interval Plot cũng cho thấy khi FA và FGT được thay thế cho 20 % xi măng sẽ mang lại giá trị cường độ chịu nén cao nhất. Đối với tham số nhiệt độ, giá trị cường độ chịu nén của chất kết dính lớn nhất tương ứng với nhiệt độ là 200 °C.

Trong tương lai, nghiên cứu sẽ mở rộng việc tái sử dụng các phế phẩm khác tại Việt Nam nhưng vẫn đảm bảo được cường độ chịu nén hoặc các đặc tính khác của chất kết dính cũng như bê tông làm việc trong môi trường nhiệt độ cao.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Nguyen, K.T.; Navaratnam, S.; Mendis, P.; Zhang, G.K.; Barnett, J.; Wang, H, “Fire safety of composites in prefabricated buildings: From fibre reinforced polymer to textile reinforced concrete,” *Compos Part B Eng*, pp. 187, 107815, 2020.
- [2]. Roy, T.; Matsagar, V, “Mechanics of damage in reinforced concrete member under post-blast fire scenario,” *Structures*, vol. 31, pp. 740–760, 2021.
- [3]. Adil Baykasoğlu, Turkey Dereli, Serkan Tanış, “Prediction of cement strength using soft computing techniques,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34 (11), pp. 2083–2090, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.028>.
- [4]. Jiandong Huang, Mengmeng Zhou 1 and , Hongwei Yuan, Mohanad Muayad Sabri Sabri, Xiang Li, “Prediction of the Compressive Strength for Cement-Based Materials with Metakaolin Based on the Hybrid Machine Learning Method,” *Material*, vol. 15, p. 3500, 2022, <https://doi.org/10.3390/ma15103500>.
- [5]. Chongchong Qi, , Andy Fourie, and , Qiusong Chen, “Neural network and particle swarm optimization for predicting the unconfined compressive strength of cemented paste backfill,” *Constr Build Mater*, vol. 159, pp. 473–478, 2018.
- [6]. Ayaz Ahmad, Krzysztof Adam Ostrowski, Mariusz Maślak 2, , Furqan Farooq, Imran Mehmood, and and Afnan Nafees, “Comparative Study of Supervised Machine Learning Algorithms for Predicting the Compressive Strength of Concrete at High Temperature,” *Material*, vol. 14(15), p. 4222, 2021, <https://doi.org/10.3390/ma14154222>.
- [7]. Mucteba Uysal, Harun Tanyildizi, “Estimation of compressive strength of self compacting concrete containing polypropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using artificial neural network,” *Constr Build Mater*, vol. 27(1), pp. 404–414, 2012.
- [8]. Đỗ Thị Phượng, Nguyễn Ngọc Lâm Nguyễn Nhân Hoà, Vũ Minh Đức, “Thành phần và vi cấu trúc của chất kết dính sử dụng xi măng poóclăng và tro bay ở nhiệt độ cao,” *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng KHCNXD - ĐHXD*, vol. 15 (6V), pp. 137–145, 2021, [https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(6V\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(6V)-12).
- [9]. Vương Lê Thắng, Lê Cung, Nguyễn Đình Sơn, “Nghiên cứu ảnh hưởng của

- cấp phối bê tông sử dụng phế phẩm tro bay và bột đá đến vận tốc và biên độ xung siêu âm,” *Tạp Chí Khoa Học Và Công Nghệ - Đại Học Đà Nẵng*, vol. 21 (4), pp. 75–79, 2023.
- [10]. Văn Viết Thiên Ân, Bùi Danh Đại, “Nghiên cứu ảnh hưởng của silica fume kết nén có độ mịn khác nhau và tro trấu đến tính chất của bê tông chất lượng cao,” *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng KHCN XD - ĐHXD*, vol. 13(2V), pp. 13–20, 2019, [https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(2V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(2V)-02).
- [11]. Lê Mạnh Hùng, “Sử dụng xi lò cao nghiền mịn làm phụ gia khoáng sản xuất bê tông,” Viện Vật liệu xây dựng, Chỉ dẫn kỹ thuật, 2021.
- [12]. Đỗ Thị Phượng, Vũ Minh Đức, “Tính chất của chất kết dính sử dụng phụ gia tro bay và ngói đất sét nung ở nhiệt độ cao,” *Tạp Chí Vật Liệu Xây Dựng - Bộ Xây Dựng*, vol. 11(6), pp. 49–54, 2021, <https://doi.org/10.54772/jomc.6.2021.209>.
- [13]. Đỗ Thị Phượng, Vũ Minh Đức, “Tối ưu hoá thành phần bê tông sử dụng tro xi nhiệt điện và bột ngói đất sét nung ở nhiệt độ cao,” *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng KHCN XD - ĐHXD*, vol. 15 (6V), pp. 125–136, 2021, [https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(6V\)-11](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(6V)-11).
- [14]. Heikal, M., “Effect of elevated temperature on the physico-mechanical and microstructural properties of blended cement pastes,” *Ceram. - Silikáty*, vol. 50(3), pp. 167–177, 2006.
- [15]. Schneider, U., “Concrete at high temperatures—A general review,” *Fire Saf. J.*, vol. 13(1), pp. 55–68, 1988, [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(88\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0379-7112(88)90033-1).
- [16]. Remnev, V.V., “Heat-resistant properties of cement stone with finely milled refractory additives,” *Refract. Ind. Ceram.*, vol. 37(5), pp. 151–152, 1996.
- [17]. Alonso, C., Fernandez, L., “Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments,” *J. Mater. Sci.*, vol. 39(9), pp. 3015–3024, 2004.
- [18]. Hager, I., “Behaviour of cement concrete at high temperature,” *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, no. 61(1), pp. 145–154, 2013.