

Experiment and numerical modelling of heat transfer inside calcium aluminate cement-based refractory concrete



Tien Manh Tran ^{1,*}, Hong Xuan Vu ², Emmanuel Ferrier ²

¹ Department of Mechanisms of Materials, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam

² Université de LYON, Université Claude Bernard LYON 1; Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction LMC2, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10th Oct. 2020

Revised 5th Nov. 2020

Accepted 31st Dec. 2020

Keywords:

Calcium aluminate cement,
Thermal diffusion,
Temperature evolution,
Thermal conductivity,
Temperature gradient

ABSTRACT

In the case of fire in infrastructure works, the bearing capacity of reinforced-concrete structures will be reduced due to the effect of high temperatures. So, the refractory concrete with good thermal properties contributes an important role in reducing the impact of fire on the durability of the building. Nowadays, calcium aluminate cement is widely used for that thanks to the thermal stability of the respective concrete by the high content of aluminum. This paper presents experimental and numerical results of heat transfer in cylindrical specimens of calcium aluminate cement-based refractory concrete. As experimental results, with a calcium aluminate content of about 50% in concrete, its thermal properties have been significantly improved in comparison with other types of cementitious concrete. The evolution of temperature as a function of time (inside and outside of the concrete specimen) was also recorded and analyzed. In the 3-D model, the thermal properties of refractory concrete were used from the previous experimental results. The results of this model were used to compare with experiments, then analyze and evaluate factors affecting the model results. The numerical model could also be exploited to determine the thermal parameters in the heat transfer in refractory concrete specimen.

Copyright © 2020 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: tranmanhtien@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.HTCS2020.19



Nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng quá trình truyền nhiệt trong mẫu bê tông chế tạo từ xi măng canxi aluminat

Trần Mạnh Tiến ^{1,*}, Vũ Xuân Hồng ², Emmanuel Ferrier ²

¹ Khoa Mỏ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam;

² Phòng thí nghiệm vật liệu Composite cho xây dựng (LMC2), Trường Đại học Claude Bernard Lyon 1, CH Pháp;

THÔNG TIN BÀI BÁO

TÓM TẮT

Quá trình:

Nhận bài 10/10/2020

Sửa xong 5/11/2020

Chấp nhận đăng 31/12/2020

Từ khóa:

Bê tông canxi aluminat,
Biến thiên nhiệt độ,
Hệ số khuếch tán nhiệt,
Hệ số truyền nhiệt,
Gradient nhiệt độ

Trường hợp hỏa hoạn xảy ra trong các công trình hạ tầng cơ sở, kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) sẽ bị suy giảm cường độ bởi ảnh hưởng của nhiệt độ cao. Việc nghiên cứu ứng dụng các loại bê tông có các đặc tính nhiệt học ưu việt góp phần làm giảm ảnh hưởng của hỏa hoạn đến độ bền và tuổi thọ công trình. Do đó, xi măng canxi aluminat được phát triển và sử dụng khá rộng rãi nhờ vào sự ổn định nhiệt của bê tông tương ứng bởi hàm lượng cao của aluminium. Bài báo này giới thiệu các kết quả thực nghiệm và mô phỏng số quá trình truyền nhiệt trong mẫu bê tông hình trụ chế tạo từ xi măng canxi aluminat. Kết quả thực nghiệm cho thấy, với hàm lượng canxi aluminat khoảng 50% trong bê tông, các đặc tính nhiệt học của nó đã được cải thiện đáng kể so với các loại bê tông xi măng thông thường. Ngoài ra, quá trình tăng nhiệt độ trong và ngoài mẫu bê tông cũng đã được ghi lại và phân tích so sánh. Trong mô hình số 3-D, các tham số nhiệt học của bê tông xi măng được sử dụng từ các kết quả thực nghiệm trước đó. Kết quả của mô hình cũng được so sánh với thực nghiệm, sau đó phân tích đánh giá những yếu tố ảnh hưởng đến kết quả mô hình. Ngoài ra, mô hình số còn được khai thác để xác định các tham số nhiệt học trong quá trình truyền nhiệt trong bê tông.

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

1. Mở đầu

Trường hợp hỏa hoạn xảy ra trong các công trình hạ tầng cơ sở, kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) sẽ bị suy giảm cường độ bởi ảnh hưởng của nhiệt độ cao (có thể lên đến 1200°C). Khi đó,

cường độ bê tông sẽ bị suy giảm chủ yếu liên quan đến các hiện tượng hóa lý xảy ra với các vật chất thành phần trong nó. Quá trình bay hơi của nước tự do và nước liên kết trong bê tông, hay quá trình tách nước rồi phân hủy của các tinh thể vật chất trong hồ xi măng ở các nhiệt độ khác nhau như Ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), thạch cao ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hay các keo liên kết C-S-H, có thể gây suy yếu kết cấu vi mô của bê tông (Kodur, 2014), (Missemer, 2011), (Fares, 2009). Do đó, việc nghiên cứu ứng dụng các loại bê tông có các

* Tác giả liên hệ

E - mail: tranmanhtien@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.HTCS2020.19

đặc tính cơ học và nhiệt học ưu việt là rất cần thiết, có thể góp phần làm giảm ảnh hưởng của nhiệt độ cao đến độ bền và tuổi thọ công trình. Ngày nay, xi măng canxi aluminat được phát triển và sử dụng khá rộng rãi nhờ vào sự ổn định nhiệt của bê tông tương ứng bởi hàm lượng nhôm cao trong thành phần. Một vài nghiên cứu trên thế giới đã chỉ ra rằng, hàm lượng nhôm trong thành phần bê tông có ảnh hưởng đáng kể đến các đặc tính cơ học và nhiệt học của bê tông (Bareiro và nnk., 2018).

Trong khoảng một thập kỷ trở lại đây, một số nghiên cứu thực nghiệm đã xác định được các đặc tính nhiệt học (hệ số dẫn nhiệt, nhiệt dung riêng, độ khuếch tán nhiệt,...) của bê tông chịu nhiệt được chế tạo từ xi măng canxi aluminat. Kết quả thực nghiệm là rất khả quan, cho thấy những dấu hiệu tích cực của việc ứng dụng bê tông xi măng canxi aluminat vào các công trình thường xuyên chịu ảnh hưởng của nhiệt độ cao. Trong một nghiên cứu mới đây, lớp nền bằng vữa xi măng hạt mịn với hàm lượng canxi aluminat 50% đã được sử dụng để chế tạo các tấm bê tông cốt sợi (vật liệu composite TRC: textile-reinforced concrete), ứng dụng để gia cường kết cấu BTCT trong các trường hợp chịu ảnh hưởng của nhiệt độ cao (Tran và nnk., 2019). Khi so sánh với lớp nền trong vật liệu polymer cốt sợi (vật liệu composite FRP: fibre-reinforced polymer), độ bền của tấm TRC được cải thiện hơn hẳn, khoảng 200°C (hoặc 10 phút) trong cùng một điều kiện gia nhiệt.

Rõ ràng là các ảnh hưởng của nhiệt độ cao đến độ bền của kết cấu đều được bắt đầu từ quá trình truyền nhiệt trong bê tông xi măng. Vì vậy, việc hiểu rõ bản chất của bài toán truyền nhiệt, cũng như các tham số ảnh hưởng đến quá trình truyền nhiệt là hết sức cần thiết. Theo khảo sát, chưa có một nghiên cứu nào trước đây về quá trình truyền nhiệt trong bê tông chế tạo từ xi măng canxi aluminat mà có sự kết hợp giữa thực nghiệm và mô phỏng. Bài báo này giới thiệu một vài kết quả tương ứng về quá trình truyền nhiệt trong mẫu bê tông hình trụ từ xi măng canxi aluminat. Hàm lượng canxi aluminat trong thành phần bê tông khoảng 40 ÷ 50 % về khối lượng. Trước tiên, mẫu bê tông hạt mịn được thí nghiệm để xác định các tham số nhiệt. Sau đó, mẫu hình trụ bê tông hạt mịn được lắp đặt các thiết bị cảm biến nhiệt độ (thermocouples), bố trí từ ngoài vào trong theo phương bán kính để xác định nhiệt độ trong mẫu. Cuối cùng, mô hình số 3-D được xây dựng trong

Ansys Mechanical 15 để mô phỏng lại quá trình truyền nhiệt này, có đối chứng so sánh và phân tích. Ngoài ra, mô hình còn được sử dụng để xác định một vài thông số về nhiệt mà thực nghiệm không thể đo được do hạn chế của thiết bị. Bài báo được bố cục từ phần thực nghiệm rồi đến mô hình số 3-D, rồi được kết thúc bằng các kết luận và kiến nghị.

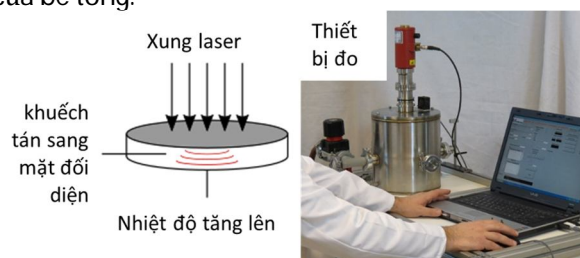
2. Nghiên cứu thực nghiệm

Phần này mô tả đầy đủ các công việc trong phòng thí nghiệm liên quan đến việc chế tạo mẫu, giới thiệu các loại thiết bị thí nghiệm phục vụ cho việc xác định các tham số nhiệt học của bê tông xi măng canxi aluminat.

2.1. Mô tả thí nghiệm

2.1.1. Thí nghiệm xác định hệ số khuếch tán nhiệt

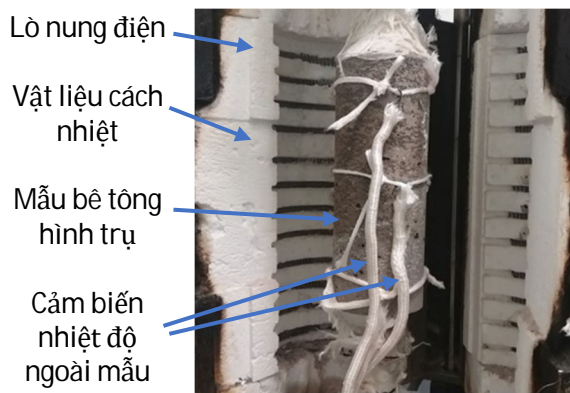
Thí nghiệm xác định hệ số khuếch tán nhiệt của bê tông xi măng canxi aluminat được thực hiện trên thiết bị đo độ khuếch tán nhiệt (HTD), dựa trên phương pháp tia chớp (flash method). Thiết bị này đã được thiết kế và phát triển để đo sự khuếch tán nhiệt trong các nhiệt độ từ 20 °C đến 1000°C trong môi trường chân không. Nó được xác định nhờ vào việc tác dụng một đơn vị năng lượng (Dirac) ở mặt trước của mẫu, sau đó ghi lại sự biến thiên nhiệt độ ở mặt sau như là một hàm số theo thời gian. Có hai cách để xác định hệ số này là xác định tại một thời điểm hoặc trong một khoảng thời gian nào đó. Kết quả cuối cùng là giá trị trung bình của hai cách, tuy nhiên không được sai khác nhau quá 5%. Hình 1 dưới đây mô tả nguyên lý của phương pháp tia chớp cũng như thiết bị được sử dụng để đo độ khuếch tán nhiệt của bê tông.



Hình 1. Phương pháp tia chớp và thiết bị đo độ khuếch tán nhiệt.

2.1.2. Thí nghiệm truyền nhiệt trong bê tông

Thí nghiệm truyền nhiệt trong bê tông được thực hiện trên hệ thống các máy móc thiết bị đồng bộ, bao gồm máy thí nghiệm kéo nén vật liệu được trang bị một lò nung bằng điện, hình trụ có kích thước cao 40cm, đường kính trong 10 cm và đường kính ngoài 27,5 cm. Nó có thể tạo ra nhiệt độ lên đến 1200 °C cho mẫu với tốc độ gia nhiệt tối đa là 30°C/phút. Ngoài ra, máy còn được kết nối với một hệ thống đo lường để liên kết với cảm biến nhiệt độ được bố trí trong và ngoài mẫu bê tông. Máy thí nghiệm, lò điện, cảm biến nhiệt độ được điều khiển và kiểm soát bởi chương trình trên máy tính. Toàn bộ các dữ liệu liên quan đều được ghi lại (2 lần/ 1 giây) thành các tập dữ liệu để phục vụ cho công tác xử lý kết quả. Hình 2 dưới đây mô tả cách bố trí thí nghiệm truyền nhiệt trong mẫu bê tông xi măng canxi aluminat.



Hình 2. Bố trí thí nghiệm truyền nhiệt trong mẫu bê tông hình trụ.

2.2. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

2.2.1. Bê tông xi măng canxi aluminat

Bê tông xi măng hạt mịn sử dụng trong nghiên cứu này có thành phần được thiết kế theo mô hình CPM (Compressible Packaging Model) và được điều chỉnh cho phù hợp với điều kiện của phòng thí nghiệm. Nó được cấu tạo từ cốt liệu tổng hợp canxi – nhôm – silic với hàm lượng nhôm chiếm khoảng 40%, kết hợp với chất kết dính hồ xi măng canxi aluminat với hàm lượng nhôm khoảng trên 50%. Hàm lượng canxi aluminat cao giúp cho bê tông có các đặc tính cơ học và nhiệt học phù hợp với những kết cấu thường xuyên chịu ảnh hưởng của nhiệt độ cao. Ngoài ra, để tăng tính công tác của bê tông, một lượng nhỏ phụ gia siêu dẻo và chất điều chỉnh độ nhót đã được thêm vào trong

thành phần của nó. Tỷ lệ nước/xi măng của bê tông là 0,35. Bảng 1 giới thiệu thành phần của bê tông trong nghiên cứu thực nghiệm này.

Bảng 1. Thành phần của bê tông.

Khối lượng thể tích của bê tông tươi: $\rho = 2584.4 \text{ kg/m}^3$	
Cốt liệu (kg/m ³)	1676.39
Xi măng (kg/m ³)	668.99
Phụ gia siêu dẻo (kg/m ³)	4.34
Phụ gia điều chỉnh độ nhót – VMA (kg/m ³)	0.51
Nước (kg/m ³)	234.18
Tỷ lệ nước/xi măng	0.35

2.2.2. Tính chất cơ học và vật lý của bê tông

Các tính chất vật lý của bê tông tươi được xác định từ các thí nghiệm trong phòng, theo tiêu chuẩn Châu Âu, như độ chảy của vữa bê tông tươi trên bàn lắc, tính công tác của vữa bê tông tươi khi rung và hàm lượng không khí trong bê tông tươi. Đối với các đặc tính cơ học của bê tông đóng rắn, các thí nghiệm xác định cường độ nén và kéo uốn 3 điểm được thực hiện trên mẫu kích thước 4x4x16 (cm) được bảo quản trong điều kiện phòng thí nghiệm ở 28 ngày tuổi. Hình 3 minh họa các thí nghiệm xác định các tính chất cơ học và vật lý của vữa bê tông ở trạng thái tươi và đóng rắn. Các kết quả thí nghiệm được tổng hợp trong Bảng 2.

2.1.3. Mẫu bê tông hình trụ

Có hai loại mẫu bê tông hình trụ được sử dụng cho nghiên cứu thực nghiệm này, tương ứng với hai thí nghiệm nhiệt được mô tả ở trên. Mẫu bê tông hình trụ dùng cho thí nghiệm xác định hệ số khuếch tán nhiệt có kích thước bé để phù hợp với thiết bị đo, đường kính 2,4 cm và dày từ 0,5 đến 1cm. Mẫu bê tông hình trụ dùng cho thí nghiệm truyền nhiệt thì có kích thước lớn hơn, đường kính 7,8 cm và chiều cao 20 cm. Trong quá trình thí nghiệm, 3 cảm biến nhiệt độ được gắn trên bề mặt ngoài của mẫu (Hình 2). Trước đó, trong quá trình chuẩn bị mẫu này, người ta đã bố trí ở trọng tâm của mặt cắt giữa hình trụ một cảm biến nhiệt độ khác. Những cảm biến nhiệt độ này có vai trò xác định nhiệt độ trong và ngoài mẫu bê tông trong quá trình truyền nhiệt.



(a) Đo độ chảy của bê tông tươi



(b) Đo cường độ kéo uốn



(c) Đo cường độ nén

Hình 3. Minh họa các thí nghiệm xác định tính chất cơ học và vật lý của bê tông tươi và sau khi đông cứng.

Bảng 2. Các tính chất cơ học và vật lý của bê tông tươi và sau khi đông cứng.

Các tính chất của bê tông		Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
Tính chất vật lý của bê tông tươi	Độ chảy của vữa bê tông tươi (cm)(BS EN 413-2, 2005)	19	1,5
	Tính công tác của bê tông tươi (s)(NF P15-437, 1987)	4,5	0
	Hàm lượng không khí trong bê tông (%) (BS EN 413-2, 2005)	2	0
Tính chất cơ học của bê tông đông rắn	Cường độ nén sau 28 ngày (MPa)(BS EN 196-1, 2005)	58,1	2.5
	Cường độ kéo uốn 3 điểm sau 28 ngày (MPa)(BS EN 196-1, 2005)	12,5	1,04

2.3. Kết quả thực nghiệm

2.3.1. Hệ số khuếch tán nhiệt của bê tông xi măng canxi aluminat

Hệ số khuếch tán nhiệt của bê tông canxi aluminat được xác định ở 3 mức nhiệt độ, 20°C, 75°C và 150°C. Bảng 3 dưới đây thể hiện các giá trị của hệ số khuếch tán nhiệt với 3 mức nhiệt độ

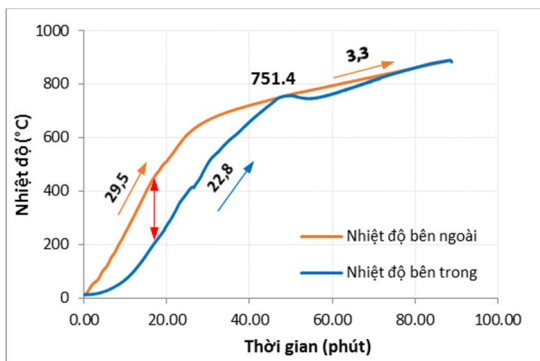
trên, tương ứng với hai cách xác định tại một thời điểm hoặc trong một khoảng thời gian. Có thể thấy rằng hai cách tính trên đều cho kết quả tương đối hội tụ. Hệ số khuếch tán nhiệt trung bình của bê tông canxi aluminat giảm nhẹ từ 0,46 mm/s ở 20°C xuống còn 0,39 mm/s ở 150°C. So với các loại bê tông thông thường thì kết quả này bé hơn khoảng 3 lần, cho thấy khả năng ổn định nhiệt của bê tông canxi aluminat.

Bảng 3. Kết quả thực nghiệm hệ số khuếch tán nhiệt của bê tông canxi aluminat.

Mẫu bê tông hình trụ	Đường kính (mm)	Độ dày (mm)	Nhiệt độ thí nghiệm (°C)	Hệ số khuếch tán nhiệt (mm ² /s)		
				Tính trong khoảng thời gian	Tính tại một thời điểm	Giá trị trung bình
Mẫu 1 - 20	24	7.94	21.2	0.45	0.48	0.46
Mẫu 2 - 75	24	7.94	75.1	0.39	0.41	0.40
Mẫu 3 - 150	24	7.94	150.7	0.39	0.40	0.39

2.3.2. Quá trình truyền nhiệt trong bê tông

Sự gia tăng nhiệt độ bên ngoài và bên trong mẫu hình trụ của bê tông canxi aluminat xác định bằng cảm biến nhiệt độ được thể hiện trên Hình 4. Có thể thấy rằng nhiệt độ trung bình bên ngoài mẫu hình trụ, xác định bằng giá trị trung bình của ba cảm biến nhiệt gắn trên mẫu, tăng lên theo hai giai đoạn: thứ nhất với tốc độ trung bình khoảng 29,5°C/phút và thứ hai khoảng 3,3°C/phút. Với điểm đo ở giữa mẫu hình trụ, nhiệt độ tăng lên chậm hơn bởi lớp bảo vệ bằng bê tông canxi aluminat. Đường cong tăng nhiệt trong trường hợp này uốn cong trong khoảng nhiệt độ dưới 150°C rồi tuyến tính với tốc độ tăng nhiệt trung bình 22,8°C/phút. Sự đồng nhất nhiệt độ trong mẫu hình trụ xảy ra sau 47,5 phút thử nghiệm và



Hình 4. Biến thiên nhiệt độ trong và ngoài mẫu hình trụ bê tông canxi aluminat.

3. Nghiên cứu mô phỏng

Trong phần này, mô hình số 3-D được xây dựng và phát triển trong Ansys Mechanical 15 nhằm mô phỏng lại quá trình truyền nhiệt trong mẫu hình trụ bê tông canxi aluminat. Mô hình có kích thước cũng như các điều kiện biên như trên thực nghiệm. Số liệu đầu vào của mô hình là những đặc tính nhiệt của vật liệu đã được xác định từ thực nghiệm trước đó.

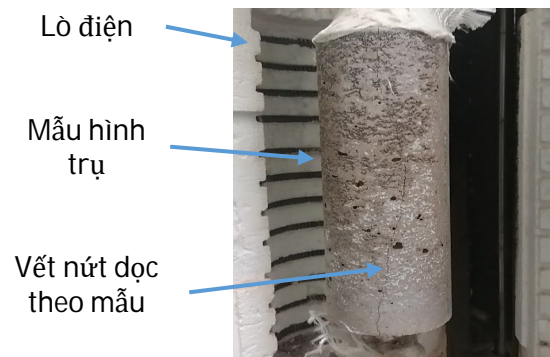
3.1. Mô hình số 3-D

3.1.1. Phần tử

Trong mô hình truyền nhiệt này, phần tử SOLID87 (3-D 10-Node Tetrahedral Thermal Solid) được sử dụng cho toàn bộ mẫu bê tông hình trụ. Nó có dạng tứ diện với một bậc tự do là nhiệt độ tại mỗi điểm nút của phần tử. Các điểm nút của

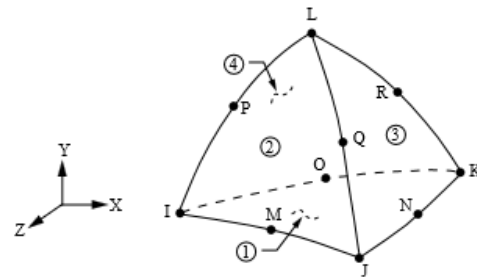
ở nhiệt độ 751,4°C. Chênh lệch tối đa giữa hai nhiệt độ (bên ngoài và bên trong) là 250,6°C vào thời điểm gần 19 phút tính từ lúc bắt đầu thí nghiệm truyền nhiệt.

Mẫu bê tông hình trụ sau quá trình thí nghiệm được quan sát để xác định những hư hỏng của bê tông trên bề mặt. Nhận thấy rằng có sự xuất hiện vết nứt dài dọc theo trục của mẫu (hình 5), có thể là nguyên nhân của quá trình bay hơi của nước tự do và nước liên kết trong mẫu cũng như quá trình phân hủy của một số thể vật chất (CAH_{10} và C_2AH_8) trong khoảng nhiệt độ 100°C đến 150°C (Bareiro et al. 2018). Sự xuất hiện của vết nứt dọc trục mẫu này có thể đẩy nhanh quá trình truyền nhiệt trong mẫu, khiến cho sự đồng nhất nhiệt độ diễn ra sớm hơn.



Hình 5. Mẫu hình trụ sau thí nghiệm truyền nhiệt với sự xuất hiện vết nứt trên bề mặt mẫu.

phần tử được đánh dấu như được mô tả trên Hình 6 dưới đây.



Hình 6. Phần tử SOLID87 trong mô hình 3-D.

Với phần tử SOLID87 này, còn tồn tại một vài giả thuyết tính toán và hạn chế như sau: cạnh giữa hai nút có phân bố nhiệt độ tuyến tính; nhiệt dung riêng và entanpi của một phần tử được đánh giá tại một điểm tích hợp; bề mặt tự do của phần tử được coi là đoạn nhiệt.

3.1.2. Mô hình vật liệu

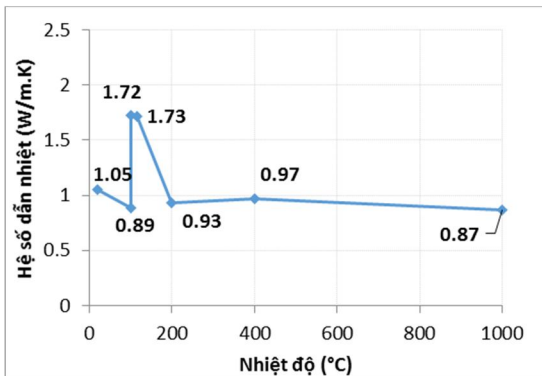
Mô hình truyền nhiệt để dự đoán sự biến thiên của nhiệt độ trong mẫu 3-D dựa trên phương trình vi phân như sau:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Trong đó: T là nhiệt độ tại một nút phần tử; t là thời điểm phân tích nhiệt; ρ là khối lượng riêng của bê tông ở nhiệt độ T; c là nhiệt dung riêng của bê tông ở nhiệt độ T; k_i là hệ số dẫn nhiệt của bê tông ở nhiệt độ T và theo hướng i (i=x,y,z). Hệ số dẫn nhiệt của bê tông có thể coi là như nhau theo 3 phương x, y, z, và có thể được xác định theo công thức sau:

$$k_{(T)} = a_{(T)} \times \rho_{(T)} \times C_{p(T)}$$

Trong đó, a_(T) là hệ số khuếch tán nhiệt của bê tông ở nhiệt độ T. Dựa vào kết quả thực nghiệm về hệ số khuếch tán nhiệt của bê tông canxi aluminat (Bảng 3) và giá trị nhiệt dung riêng của bê tông theo Euro code, sự biến thiên theo nhiệt độ của hệ số dẫn nhiệt của bê tông được mô tả trong Hình 7 dưới đây.

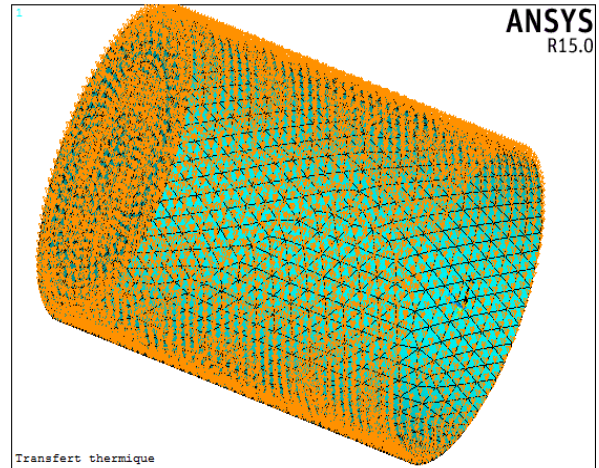


Hình 7. Biến thiên của hệ số dẫn nhiệt của bê tông theo nhiệt độ.

3.1.3. Kích thước, lưới phần tử, điều kiện biên

Nhờ sự đối xứng của hình học và tải nhiệt độ của mẫu hình trụ nên chỉ cần mô hình hóa sự truyền nhiệt của một nửa mẫu (đường kính 3,8 cm, dài 10 cm). Điều này cho phép giảm số lượng phần tử nhưng vẫn đảm bảo kết quả số hợp lý. Về lưới của mô hình, kích thước được chọn là 5 mm cho tất cả các cạnh của phần tử. Các điều kiện biên của mô hình là nhiệt độ tại các nút trên bề mặt mẫu, nhiệt đối lưu giữa bề mặt mẫu và môi trường, và nhiệt lượng truyền qua giữa 2 mặt cắt. Trong mô hình 3-D này, nhiệt độ của mặt ngoài mẫu được tăng lên theo thời gian như kết quả thực

nghiệm. Sự đối lưu nhiệt giữa mẫu và môi trường là không đáng kể vì nhiệt độ trong lò điện gần như đồng nhất. Nhiệt lượng truyền đi tại mặt cắt giữa mẫu bằng không vì nó có tính đối xứng tại mặt cắt này. Hình 8 mô tả mô hình 3-D (cho một nửa mẫu) với lưới phần tử và điều kiện biên về nhiệt độ.

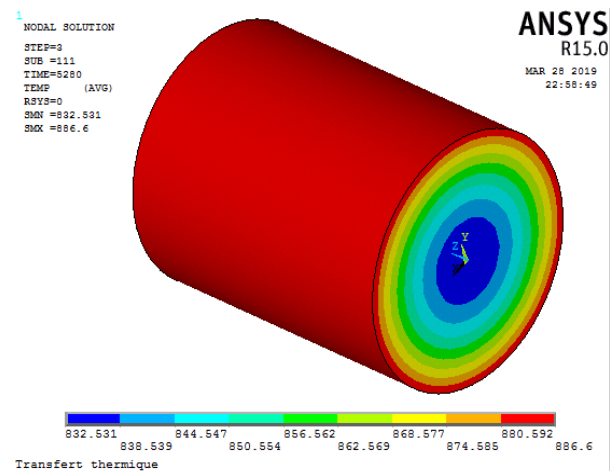


Hình 8. Mô hình số 3-D với lưới phần tử và điều kiện biên nhiệt độ.

3.2. Kết quả mô phỏng

3.2.1. Phân bố nhiệt độ trên mẫu

Mô hình phần tử hữu hạn có thể dự báo được nhiệt độ trên mẫu hình trụ ở mỗi bước phân tích nhiệt. Từ đó, sự phân bố nhiệt độ trong mẫu bê tông có thể được hiển thị, như trên Hình 9. Có thể thấy rằng nhiệt độ trên một mặt cắt được phân bố dưới dạng các vòng tròn đồng màu tùy thuộc vào khoảng cách đến tâm mặt cắt.

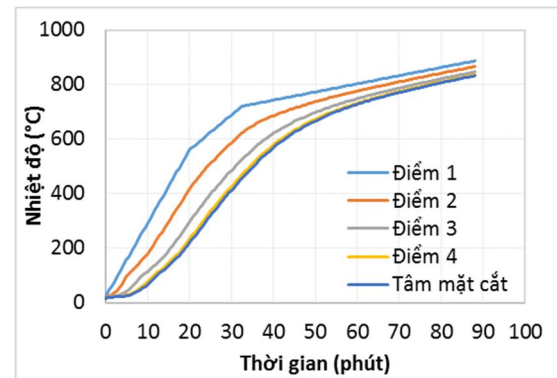


Hình 9. Phân bố nhiệt độ trên mẫu bê tông hình trụ ở thời điểm 40 phút.

3.2.2. Biến thiên nhiệt độ theo thời gian

Để quan sát được quá trình truyền nhiệt, trên mặt cắt chính giữa mẫu, người ta xác định các điểm đặc biệt như sau: điểm 1 nằm ngoài mặt cắt, trong khi bốn điểm còn lại theo cùng phương bán kính và cách điểm 1 lần lượt là 10 mm (điểm 2), 19,5 mm (điểm 3), 29,25 mm (điểm 4) và 39 mm (điểm trung tâm). Theo kết quả mô phỏng thu được, nhiệt độ giảm dần từ ngoài vào trong theo phương hướng tâm. Các điểm ở cùng khoảng cách với tâm của mặt cắt có nhiệt độ gần như tương tự nhau. Nhiệt độ tăng ngày càng chậm với các điểm ở xa bề mặt của mẫu bê tông. Chênh lệch nhiệt độ trung bình giữa điểm 1 và trọng tâm mặt cắt là khoảng 300°C. Hình 10 biểu diễn biến thiên nhiệt độ theo thời gian tại các điểm nghiên cứu trên mặt cắt chính giữa mẫu.

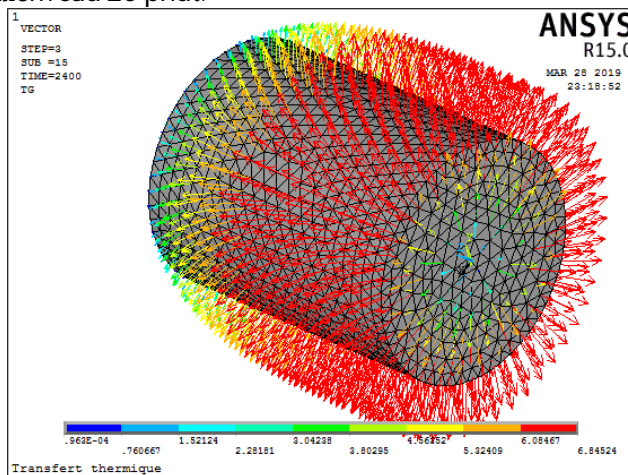
Tốc độ tăng nhiệt trong mẫu bê tông cũng được xác định bằng biến thiên nhiệt độ trong khoảng thời gian tính toán. Đại lượng này phụ thuộc vào vị trí của điểm nghiên cứu, và có sự trễ pha của điểm nằm xa bề mặt mẫu so với điểm gần hơn. Tuy nhiên, sự biến thiên tốc độ tăng nhiệt theo thời gian thường có dạng hình chuông, tốc độ tăng nhanh trong 20 phút đầu rồi giảm dần theo đường cong đến hết thời gian tính toán. Giá trị cực đại của tốc độ tăng nhiệt là 24.55°C/phút tại điểm 2, 21.76°C/phút tại điểm 3, 20.50°C/phút tại điểm 4 và 20.30°C/phút tại điểm trọng tâm mặt cắt. Tốc độ tăng nhiệt thường đạt được giá trị trên ở thời điểm sau 20 phút.



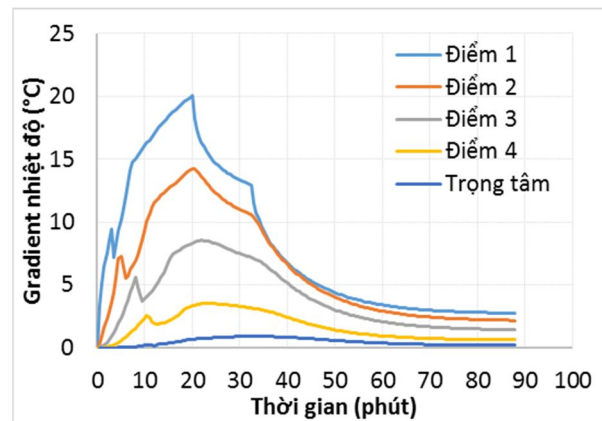
Hình 10. Biến thiên nhiệt độ theo thời gian tại các điểm nghiên cứu trên mặt cắt chính giữa mẫu

3.2.3. Gradient nhiệt độ

Gradient nhiệt độ tại một điểm trên mẫu bê tông được tính bằng tỷ số giữa chênh lệch nhiệt độ của hai điểm rất gần nhau (trên cùng một đường thẳng với điểm được nghiên cứu) với khoảng cách giữa chúng. Hình 11a biểu diễn các véc tơ gradien nhiệt độ trên mẫu bê tông hình trụ. Có thể thấy rằng, vectơ tổng của gradien nhiệt độ gần như có phương của bán kính. Giá trị của nó cũng giảm dần từ ngoài vào trong trên một mặt cắt mẫu bê tông. Cũng giống như vận tốc tăng nhiệt của các điểm nghiên cứu, gradien nhiệt độ tại các điểm này biến thiên theo thời gian và đạt cực trị tại thời điểm sau 20 phút. Hình 11b biểu diễn biến thiên của giá trị gradien nhiệt độ theo thời gian tại các điểm nghiên cứu.



(a) Véc tơ gradien nhiệt độ tại thời điểm 40 phút

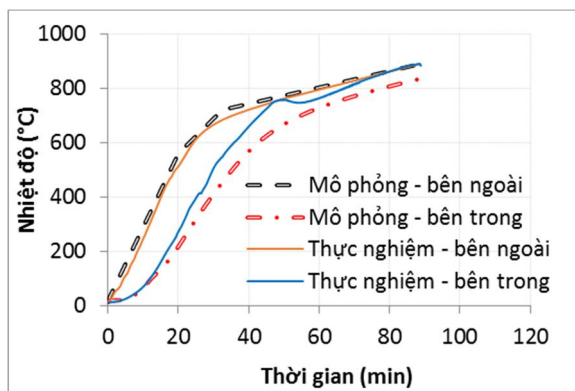


(b) Biến thiên của giá trị gradien nhiệt độ theo thời gian

Hình 11. Kết quả từ mô hình số 3-D về gradien nhiệt độ của mẫu bê tông canxi alumunat.

3.3. So sánh với kết quả thực nghiệm

Hình 12 cho thấy sự so sánh giữa hai kết quả thực nghiệm và mô phỏng số liên quan đến sự gia tăng nhiệt độ theo thời gian. Theo hình 12, có thể thấy rằng tải nhiệt độ cho mô hình phần tử hữu hạn của mẫu bê tông hình trụ có thể mô phỏng nhiệt độ trong lò điện. Sự tăng nhiệt độ theo thời gian ở mặt ngoài mẫu gần như sát nhau giữa hai kết quả thực nghiệm và mô phỏng số. Đối với nhiệt độ tăng tương tự nhau giữa hai đường cong thực nghiệm và mô phỏng số khi nhiệt độ dưới 150°C. Ở nhiệt độ cao hơn (trên 150°C), có sự chênh lệch giữa hai đường cong này, ngày càng được mở rộng cho đến thời điểm xảy ra sự đồng nhất nhiệt độ trong mẫu bê tông. Có thể giải thích sự chênh lệch này bởi ảnh hưởng của sự xuất hiện vết nứt dọc mẫu đến quá trình truyền nhiệt trong mẫu.



Hình 12. So sánh giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm về biến thiên nhiệt độ theo thời gian.

4. Kết luận và Kiến nghị

Bài báo này giới thiệu kết quả thực nghiệm và mô phỏng số liên quan đến quá trình truyền nhiệt trong mẫu hình trụ bê tông canxi aluminat. Một vài kết luận được rút ra cho bài báo này như sau:

Đối với phần thực nghiệm, tác giả đã xác định được các thông số nhiệt học cho bê tông canxi aluminat. Kết quả cho thấy, với hàm lượng canxi aluminat cao (khoảng 50%) trong bê tông, hệ số khuếch tán nhiệt được giảm xuống khoảng 3 lần so với các loại bê tông thường khác. Với thí nghiệm truyền nhiệt, kết quả đã xác định được sự biến thiên nhiệt độ trong mẫu bê tông hình trụ, cũng như dạng phá hủy của mẫu do gia nhiệt.

Đối với mô hình số 3-D, kết quả đã được đối chứng và so sánh với kết quả thực nghiệm, cho thấy mô hình đã tiếp cận tốt các tham số nhiệt học của vật liệu. Ngoài ra, mô hình còn có thể đánh giá các thông số nhiệt trong thí nghiệm truyền nhiệt mà các thiết bị thực nghiệm không thể xác định được.

Những đóng góp của tác giả

Bài báo được dựa trên kết quả của luận án tiến sĩ của tác giả thứ 1. Tác giả thứ nhất là tác giả chính, là người thực hiện các thí nghiệm và mô hình số, viết toàn văn bài báo. Tác giả thứ 2 là người hướng dẫn khoa học (hướng dẫn 2), sửa chữa các lỗi khoa học, ngôn ngữ của bài báo. Tác giả thứ 3 là người hướng dẫn khoa học (hướng dẫn chính), sửa chữa các lỗi khoa học, ngôn ngữ của bài báo.

Tài liệu tham khảo

- Bareiro, W. G., F. de Andrade Silva, E. D. Sotelino, and O. da F. M. Gomes., (2018). "The Influence of Alumina Content on the Chemical and Mechanical Behavior of Refractory Concretes Fired at Different Temperatures." *Construction and Building Materials* 187: 1214–23.
- Fares, Hanaa, (2009). "Propriétés mécaniques et physico-chimiques de Bétons autoplaçants exposés à une température élevée." phdthesis. Université de Cergy Pontoise.
- French standard NF P15-437, (1987). "Hydraulic Binders. Testing Technics. Characterization of Cements by Fluidity Measurement under Mortar Vibration, s.l.: S.n."
- Kodur, Venkatesh, (2014). "Properties of Concrete at Elevated Temperatures." *ISRN Civil Engineering*.
- Missemer, Ludovic., (2011). "Etude du comportement sous très hautes températures des bétons fibrés à ultra performances: application au BCV." phdthesis. Université de Grenoble.
- Tran, M. T, X. H. Vu, and E. Ferrier., (2019). "Mesoscale Experimental Investigation of Thermomechanical Behaviour of the Carbon Textile Reinforced Refractory Concrete under Simultaneous Mechanical Loading and Elevated Temperature." *Construction and Building Materials* 217: 156–71.