

# Thực nghiệm xác định nhiệt thủy hóa cho bê tông tính năng cao theo phương pháp đoạn nhiệt

- PGS. TS. ĐỖ ANH TỬ - Trường Đại học Giao thông vận tải  
 ■ ThS. NCS. VŨ XUÂN THÀNH - Sở Xây dựng TP. Hà Nội  
 ■ ThS. NCS. TRẦN ĐỨC TÂM - Sở Giao thông vận tải tỉnh Hòa Bình  
 ■ NGUYỄN THỊ MỸ LINH; NGUYỄN THỊ HÀ LY; NGUYỄN ĐĂNG THANH - Trường Đại học Giao thông vận tải

**TÓM TẮT.** Trong nghiên cứu này, một bộ thiết bị thí nghiệm đo nhiệt độ đoạn nhiệt được chế tạo và sử dụng để đo nhiệt thủy hóa của xi măng cho một hỗn hợp bê tông tính năng cao (HPC). Nhiệt độ đoạn nhiệt của mẫu đạt mức tối đa 63,3°C tại thời điểm 50 giờ sau khi trộn bê tông với nhiệt độ ban đầu là 24,3°C. Từ kết quả thí nghiệm, các tham số nhiệt thủy hóa bao gồm tham số thời gian ( $t$ ) và tham số hình dạng ( $\beta$ ) được xác định. Các tham số nhiệt thủy hóa quan trọng này được dùng làm tham số đầu vào cho mô hình phân tích nhiệt, ứng suất nhiệt và dự báo khả năng xuất hiện vết nứt theo thời gian của kết cấu cầu sử dụng HPC.

**TỪ KHÓA:** Bê tông tính năng cao (HPC), nhiệt độ đoạn nhiệt, tham số nhiệt thủy hóa, mức độ thủy hóa.

**ABSTRACT:** This paper presents a test setup for determining adiabatic temperature rise of a concrete mix during cement hydration. The adiabatic temperature rise of a high performance concrete (HPC) mix was measured using the developed adiabatic calorimeter. The adiabatic temperature for the concrete peaked a high temperature of 63.3°C at 50h after mixing. The hydration parameters such as time and shape parameters ( $t$  and  $\beta$ ) were then determined using the curve fitting method. These hydration parameters are key inputs used in models for predicting temperature, thermal stresses and cracking risk in concrete bridge structures.

**KEYWORDS:** High performance concrete (HPC), adiabatic temperature rise, heat of hydration parameters, degree of hydration.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, HPC đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như: Xây dựng công trình giao thông, thủy lợi, dân dụng và công nghiệp [1]. HPC cũng đang dần được sử dụng trong các công trình cầu ở Việt Nam. HPC thường sử dụng hàm lượng xi măng cao

trong thành phần cấp phối, vì vậy nhiệt tỏa ra trong quá trình thủy hóa xi măng lớn hơn so với hỗn hợp bê tông (BT) thường. Do đó, nhiệt độ chênh lệch giữa bề mặt và lõi của khối BT kết cấu có thể rất lớn, gây ra khả năng nứt cao [2]. Hiện nay ở Việt Nam vẫn chưa có các nghiên cứu thực nghiệm xác định nhiệt thủy hóa cho HPC.

Trên thế giới, các phương pháp thí nghiệm đo nhiệt cho BT được phân thành 3 loại: Đoạn nhiệt (không có trao đổi nhiệt giữa hệ thống với bên ngoài), bán đoạn nhiệt (có mất mát một lượng nhiệt xác định khỏi hệ thống) và đẳng nhiệt (nhiệt độ không đổi trong hệ thống). Trong các phương pháp này thì phương pháp đoạn nhiệt và bán đoạn nhiệt có chi phí thấp và dễ áp dụng. Ở Việt Nam, phương pháp thí nghiệm tiêu chuẩn áp dụng để đo nhiệt thủy hóa của vữa xi măng là Tiêu chuẩn TCVN 6070:2005 [3]. Đây là phương pháp cũ kỹ và có nhiều nhược điểm. Vì vậy, việc chế tạo một bộ thí nghiệm đo nhiệt đoạn nhiệt với độ chính xác cao và ứng dụng để xác định nhiệt thủy hóa cho HPC là cần thiết.

## 2. CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐO NHIỆT THỦY HÓA CỦA HỖN HỢP CHẤT KẾT DÍNH

Thủy hóa của xi măng là phản ứng tỏa nhiệt cao và phản ứng kích hoạt nhiệt. Nhiệt thủy hóa có ảnh hưởng mẫu chốt đến quá trình ninh kết và đóng rắn của xi măng cũng như đến khả năng nứt của bê tông ở tuổi sớm. Có nhiều phương pháp khác nhau để xác định nhiệt tỏa ra trong quá trình thủy hóa của xi măng của một hỗn hợp bê tông, bao gồm cả phương pháp lý thuyết lẫn thực nghiệm. Gần đây, các phương pháp sử dụng phép đo nhiệt lượng, với thiết bị theo dõi quá trình tỏa nhiệt theo thời gian, được sử dụng khá phổ biến. Các thí nghiệm đo nhiệt lượng được phân thành 3 loại: Đoạn nhiệt, bán đoạn nhiệt và đẳng nhiệt.

Phép đo đoạn nhiệt đo nhiệt hydrat hóa của các mẫu thí nghiệm trong điều kiện cách nhiệt - không có mất mát về nhiệt. Phép đo này được tiến hành bằng cách đo nhiệt độ của các mẫu thí nghiệm đồng thời thay đổi nhiệt độ của môi trường xung quanh cho tương ứng với nhiệt độ của mẫu theo thời gian. Đối với phép đo này, mặc dù trong thực tế có thể có một lượng nhiệt nhỏ thoát ra khỏi hệ thống, nhưng hệ thống vẫn được coi là đoạn nhiệt nếu

nhu mất mát về nhiệt độ của mẫu thí nghiệm không vượt quá 0.02 K/h ( $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ) [4]. Hầu hết các dụng cụ nhiệt lượng kế đo nhiệt sử dụng sự tuần hoàn kết hợp của nước với không khí hoặc dầu xung quanh mẫu thí nghiệm để giảm thiểu sự mất mát nhiệt lượng. Bởi vì dụng cụ nhiệt lượng kế này được cách nhiệt kỹ lưỡng nên phép đo nhiệt lượng đoạn nhiệt sẽ cho kết quả khá chính xác về độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt trong mẫu bê tông thí nghiệm. Tuy nhiên, chi phí thiết lập thí nghiệm và mẫu thí nghiệm lớn có thể làm cho dụng cụ thí nghiệm này ít tiện lợi hơn dụng cụ thí nghiệm bán đoạn nhiệt.

Phép đo bán đoạn nhiệt tương tự như phép đo đoạn nhiệt ngoài trừ việc cho phép mất mát một lượng nhiệt nhất định ra môi trường xung quanh. Nhiệt tỏa ra trong phép đo này ít hơn so với nhiệt tỏa ra từ mẫu thí nghiệm trong phép đo nhiệt lượng đoạn nhiệt do sự mất mát về nhiệt. Trong phép đo này, lượng nhiệt mất mát tối đa được giới hạn là 100 J/(h.K) [4]. Nhiệt độ đo bởi thí nghiệm bán đoạn nhiệt thông thường nhỏ hơn 0.2 - 3% so với kết quả từ các thí nghiệm đoạn nhiệt. Điều này có nghĩa là phép đo bán đoạn nhiệt có thể dự đoán nhiệt độ đoạn nhiệt dựa vào năng lượng kích hoạt, tổng lượng nhiệt thủy hóa và mất mát nhiệt do cân chỉnh thiết bị. Thí nghiệm này thường đơn giản và rẻ tiền hơn bởi vì việc cách nhiệt hoặc hệ thống điều khiển đơn giản hơn nhiều so với thí nghiệm đoạn nhiệt. Tuy nhiên, hiện nay vẫn chưa có phương pháp thí nghiệm tiêu chuẩn nào áp dụng cho phép đo này, vì vậy ảnh hưởng của sai số do thiết bị, độ nhạy của kết quả thí nghiệm và quá trình cân chỉnh thiết bị đến độ chính xác của kết quả đo vẫn chưa được xác định.

Thí nghiệm nhiệt lượng đẳng nhiệt do tốc độ sinh nhiệt thủy hóa từ mẫu thí nghiệm, trong đó nhiệt độ của mẫu và nhiệt độ môi trường được giữ bằng nhau trong suốt quá trình đo. Buồng đo được điều khiển để luôn được giữ ở một nhiệt độ cố định và thỉnh thoảng được đo nhiệt lượng yêu cầu để duy trì nhiệt độ đó. Đây có thể là nhược điểm của phép đo này, bởi vì nó không xét đến sự biến thiên nhiệt độ ngoài thực tế của công trình. Tuy nhiên, dữ liệu thu được từ phép đo nhiệt lượng đẳng nhiệt cung cấp thông tin hữu ích và quyết định về động học hydrat hóa của hệ thống. Tốc độ phát sinh nhiệt của mẫu thí nghiệm được theo dõi và xác định bởi tổng nhiệt lượng đo được theo thời gian. Dạng đường cong ghi được của tốc độ năng lượng sinh ra trên một đơn vị khối lượng theo thời gian miêu tả động học hydrat hóa của vữa hoặc hồ xi măng. Phép đo này phù hợp với thí nghiệm các mẫu trong một khoảng thời gian tương đối ngắn và thông thường được sử dụng cho các mẫu vữa hoặc hồ xi măng. Nguyên lý đo và ưu nhược điểm của 3 phương pháp này được so sánh trong Bảng 2.1.

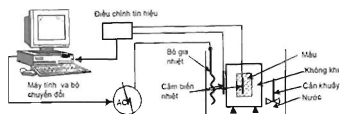
**Bảng 2.1. So sánh các phương pháp đo nhiệt lượng**

	Đoạn nhiệt	Bán đoạn nhiệt	Đẳng nhiệt
<b>Nguyên lý</b>	Đo độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt và tính toán nhiệt thủy hóa	Đo tốc độ mất mát nhiệt và nhiệt độ của mẫu	Đo tốc độ mất mát nhiệt tại nhiệt độ không đổi và tính nhiệt lượng

	Đoạn nhiệt	Bán đoạn nhiệt	Đẳng nhiệt
<b>Loại mẫu thí nghiệm</b>	Mẫu bê tông lớn, phù hợp với hỗn hợp bê tông tỏa nhiệt ít	Bê tông hoặc vữa xi măng	Xi măng hoặc vữa xi măng
<b>Kích thước mẫu</b>	Đường kính 230 - 300 mm hoặc lớn hơn	Mẫu hình trụ tiêu chuẩn 50x100, 100x200, 150x300 mm	Vài gam, đường kính 13 - 25mm
<b>Khả năng thực hiện ngoài hiện trường</b>	Không sử dụng được tại hiện trường Yêu cầu độ chính xác cao khi điều khiển nhiệt độ	Có thể sử dụng trong xe kéo tại hiện trường, không yêu cầu điều kiện trong phòng thí nghiệm	Không sử dụng được tại hiện trường; yêu cầu kiểm soát chặt chẽ nhiệt độ của buồng đo và điều kiện trong phòng
<b>Ưu điểm</b>	Có độ chính xác cao	Không yêu cầu trình độ cao khi thực hiện thí nghiệm	Có độ chính xác rất cao; có thể thực hiện thí nghiệm tại các mức nhiệt độ khác nhau để xác định năng lượng kích hoạt thủy hóa
<b>Nhược điểm</b>	Đắt tiền, cần thiết bị điều khiển chính xác	Không thể đo được nhiệt thủy hóa trong thời gian ngay sau khi trộn xi măng với nước (15 phút đầu tiên)	Rất đắt tiền; không thể thực hiện thí nghiệm với mẫu bê tông hoặc vữa có kích thước lớn

Sơ đồ bố trí thí nghiệm đo nhiệt lượng đoạn nhiệt được minh họa trên Hình 2.1. Trong cấu hình thí nghiệm này, mẫu bê tông thí nghiệm được đặt vào trong một hộp chứa không khí, hộp này lại được đặt trong một bồn nước nhỏ. Một cảm biến nhiệt độ đặt ở tâm của khối bê tông để đo nhiệt độ của bê tông liên tục theo thời gian. Tín hiệu nhiệt độ từ cảm biến sẽ được theo dõi bởi một máy tính thông qua thẻ chuyển đổi tín hiệu tương tự (analog) sang tín hiệu số (digital). Một bộ gia nhiệt đặt trong bồn nước sẽ được điều khiển tự động bật/tắt để luôn giữ cho nhiệt độ của nước bằng với nhiệt độ của khối bê tông. Điều này đảm bảo rằng không xảy ra sự trao đổi nhiệt giữa mẫu bê tông và môi trường xung quanh. Không khí xung quanh có tác dụng ngăn cản sự trao đổi nhiệt tiếp giáp giữa mẫu bê tông và nước. Thí nghiệm này thường được tiến hành trong khoảng thời gian từ 3 đến 7 ngày, thông thường đến thời điểm đó thì tốc độ sinh nhiệt thủy hóa của mẫu thí nghiệm sẽ rất nhỏ để có thể nhận biết được thông qua cảm biến nhiệt độ. Thiết bị đo nhiệt lượng sẽ được cân chỉnh thông qua các thông số cài đặt sẵn trong phần mềm điều khiển.

Trước khi thí nghiệm đoạn nhiệt được tiến hành, nhiệt độ phòng được điều chỉnh bằng với nhiệt độ dự định bắt đầu của thí nghiệm. Thiết bị đo và các thành phần vật liệu của bê tông được trữ trong phòng thí nghiệm ít nhất 24 giờ trước khi bắt đầu tiến hành. Ngay sau khi đặt mẫu bê tông vào thùng chứa mẫu, đổ nước vào và tiến hành đo nhiệt độ của bê tông ngay sau đó.



Hình 2.1: Sơ đồ bố trí thí nghiệm đo nhiệt lượng đoạn nhiệt

### 3. CHẾ TẠO THIẾT BỊ VÀ TIẾN HÀNH THÍ NGHIỆM

Thiết bị thí nghiệm đo nhiệt được nhóm nghiên cứu thiết kế và chế tạo tại Trường Đại học GTVT. Sau khi chạy thử nghiệm, thiết bị đã vận hành tương đối ổn định. Thí nghiệm đo nhiệt đoạn nhiệt được tiến hành đối với một hỗn hợp HPC. Thành phần hỗn hợp HPC sử dụng chất kết dính bổ sung muội silic được lựa chọn như trong Bảng 3.1. Trong đó, xi măng sử dụng là PC40 Bút Sơn, đá Sx10, cát nghiền Hòa Bình.

Bảng 3.1. Thành phần hỗn hợp chất kết dính cho HPC

N/C/K/D	Nước (kg)	Xi măng (kg)	Muội silic (kg)	Đá Sx10 (kg)	Cát (kg)	Phụ gia Silkroad SPR3000 (lit)
0,34	170	475	25	1092	735	7,5

Các bước tiến hành thí nghiệm:

- Chuẩn bị thùng đo, thiết bị đo, nguồn điện, máy tính kết nối, vật liệu để làm BT, ván khuôn, đầm.

- Cấp nước gần đầy vào thùng đo (gắn đến miệng của thùng nhỏ/khuôn chứa BT). Nước phải có nhiệt độ xấp xỉ nhiệt độ ban đầu của mẫu BT.

- Trộn BT, đổ vào khuôn, đặt đầu đo nhiệt vào giữa khối, đầm (nếu cần thiết) (Hình 3.1, 3.2).

- Đặt khuôn chứa BT vào thùng đoạn nhiệt. Nối dây cảm biến nhiệt vào bộ điều khiển. Cố gắng giảm thiểu thời gian thao tác để phép đo được bắt đầu ngay khi xi măng phản ứng với nước (Hình 3.3).

- Tiến hành đo nhiệt và điều chỉnh nhiệt của nước liên tục với tần suất đủ lớn để đảm bảo độ chính xác. Trong thí nghiệm này, tần suất quét nhiệt là 10 Hz.

- Đo liên tục trong khoảng thời gian từ 3 - 7 ngày. Lưu dữ liệu trên máy tính với tần suất 02 phút/lần ghi dữ liệu. Kiểm tra thường xuyên xem có dấu hiệu bất thường nào không để điều chỉnh.

- Kết thúc đo, cân lại mẫu (Hình 3.4, 3.5). Phá vỡ mẫu để lấy lại cảm biến nhiệt nếu cần.

- Vệ sinh thiết bị đo.



Hình 3.1: Trộn vật liệu hỗn hợp BT



Hình 3.2: Chuẩn bị khay đựng mẫu



Hình 3.3: Đặt khay mẫu vào thùng đoạn nhiệt, nối cảm biến với máy đo



Hình 3.4: Mẫu thí nghiệm sau khi đo xong



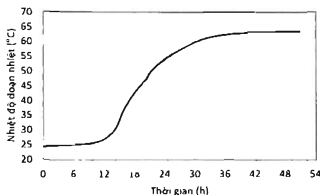
Hình 3.5: Cân lại mẫu bê tông đã đo nhiệt

**4. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM**

Kết quả thí nghiệm đo nhiệt độ đoạn nhiệt của mẫu bê tông HPC bao gồm lịch sử nhiệt độ của lõi mẫu HPC (T1) và của nước bao quanh khay đựng mẫu (T2). Nhiệt độ T2 luôn được kiểm soát sao cho độ chênh lệch với T1 là không quá +/- 0.4°C.

Sau khi khử nhiễu tín hiệu nhiệt độ, nhiệt độ đoạn nhiệt đo được của mẫu HPC được thể hiện trên Hình 4.1. Nhiệt độ ban đầu của mẫu là 24.3°C. Nhiệt độ của mẫu đạt mức tối đa 63.3°C tại thời điểm 50 giờ sau khi trộn bê tông. Nhiệt độ này hầu như giữ nguyên cho đến khi kết thúc quá trình đo đạc ở ngày thứ 7.

Do hỗn hợp HPC này sử dụng phụ gia siêu dẻo Silkroad SPR3000 giảm nước - có tác dụng làm chậm quá trình ninh kết của xi măng, cho nên có thể thấy trên biểu đồ, nhiệt độ tăng rất chậm từ khi bắt đầu xảy ra phản ứng thủy hóa. Sau 12 giờ, tốc độ thủy hóa mới tăng nhanh, làm nhiệt độ của mẫu HPC tăng rất nhanh trong khoảng thời gian từ 12 đến 30 giờ. Do lượng nước trong hỗn hợp rất ít (tỉ lệ N/CKD = 0.34), cho nên quá trình thủy hóa diễn ra rất nhanh chóng. Sau 30 giờ, nhiệt lượng tăng từ từ và gần như không tăng lên nữa sau 50 giờ từ khi trộn bê tông.



Hình 4.1: Nhiệt độ đoạn nhiệt thực nghiệm của mẫu HPC

Tốc độ tỏa nhiệt trong quá trình thủy hóa của chất kết dính phụ thuộc mạnh mẽ vào nhiệt độ của chất tại thời điểm đó. Nhiệt độ càng cao sẽ càng làm tăng tốc độ phản ứng thủy hóa của chất kết dính [5]. Trong thực tế, các bộ phận cấu kiện BT có điều kiện biên về bề mặt khác nhau (tiếp xúc với ván khuôn, với lớp vật liệu cách nhiệt, trực tiếp với không khí...), vì vậy các điểm khác nhau trong BT sẽ có nhiệt độ khác nhau và do đó tốc độ sinh nhiệt tại các điểm đó cũng khác nhau.

Để xác định lượng nhiệt tỏa ra trong quá trình thủy hóa, van Breugel [6], Schindler và Folliard [7] đã đưa ra quan hệ giữa mức độ thủy hóa của xi măng với nhiệt lượng tích lũy tại thời điểm t theo công thức dưới đây:

$$\alpha(t) = \frac{H(t)}{H_u} \quad (1)$$

Trong đó:

- $\alpha(t)$  - Mức độ thủy hóa tại thời điểm t;
- $H(t)$  - Tổng nhiệt lượng tỏa ra tính đến thời điểm t (J/g);
- $H_u$  - Tổng nhiệt lượng tỏa ra ở thời điểm cuối cùng của quá trình thủy hóa (J/g).

Để mô tả mức độ thủy hóa theo tuổi tương đương của bê tông, mô hình toán học lũy thừa với 3 tham số [8] được sử dụng khá phổ biến:

$$\alpha(t_s) = \alpha_\infty \exp \left[ - \left( \frac{t_s}{t_c} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

Trong đó:

- $\alpha(t_s)$  - Mức độ thủy hóa tại thời điểm t;
- $\alpha_\infty$  - Mức độ thủy hóa ở thời điểm cuối cùng của quá trình thủy hóa;
- $t_c$  - Tuổi tương đương của bê tông (h);
- $\tau$  - Tham số thời gian (h);
- $\beta$  - Tham số độ dốc.

Mức độ thủy hóa ở thời điểm cuối cùng được xác định như sau [9]:

$$\alpha_\infty = \frac{1.031w/c}{0.194 + w/c} \quad (3)$$

Trong đó: w/c - Tỷ lệ nước trên chất kết dính.

Tuổi tương đương của bê tông được tính theo công thức [10]:

$$t_s = \int_0^t \exp \left[ - \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{273+T_s} - \frac{1}{273+T_r} \right) \right] dt \quad (4)$$

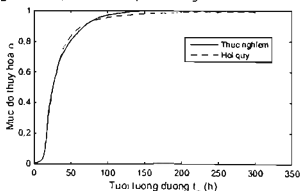
Hay:

$$t_s = \sum_{i=1}^n \exp \left[ - \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{273+T_i} - \frac{1}{273+T_{i-1}} \right) \right] \Delta t_i \quad (5)$$

Trong đó:

- $E_a$  - Năng lượng kích hoạt bình kiến, (J/mol);
- R - Hằng số của các khí, R = 8.314 J/K.mol;
- $T_c$  - Nhiệt độ trung bình của bê tông trong khoảng thời gian  $\Delta t_i$  (°C);
- $T_i$  - Nhiệt độ tham chiếu (thông thường 20°C hoặc 23°C);
- $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$  - Khoảng thời gian giữa hai bước thời gian liên tiếp  $t_i$  và  $t_{i-1}$  (h);
- i - Bước thời gian thứ i, i = 1 - n.

Để sử dụng đường cong mức độ thủy hóa trình bày ở công thức (2), cần phải xác định các tham số  $\tau$  và  $\beta$  từ kết quả thực nghiệm đoạn nhiệt. Đường cong độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt theo thời gian thực được quy đổi về đường cong độ tăng theo nhiệt độ theo tuổi tương đương của bê tông. Sau đó, các tham số  $\tau$  và  $\beta$  được xác định theo phương pháp bình phương tối thiểu. Đối với hỗn hợp HPC trong thí nghiệm này thì các tham số nhiệt thủy hóa xác định được là:  $\tau = 21.39$  h,  $\beta = 2.02$ , với  $R^2 = 0.9966$ . Đường cong thực nghiệm và đường cong hồi quy của mức độ thủy hóa được thể hiện trên Hình 4.2. Các tham số  $\tau$  và  $\beta$  là những tham số quan trọng để mô tả đặc tính phát triển nhiệt của bê tông, được sử dụng để đưa vào mô hình phân tích ứng xử nhiệt và sau đó là phân tích ứng suất nhiệt của cấu kiện bê tông.



Hình 4.2: Đường cong mức độ thủy hóa thực nghiệm và hồi quy

### 5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp đo nhiệt đoạn nhiệt và thực nghiệm xác định độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt cho một hỗn hợp HPC. Nhiệt độ đoạn nhiệt của mẫu đạt mức tối đa 63.3°C tại thời điểm 50 giờ sau khi trộn bê tông. Từ kết quả thí nghiệm, các tham số nhiệt thủy hóa bao gồm tham số thời gian ( $\tau = 21.39$  h) và tham số hình dạng ( $\beta = 2.02$ ) được xác định dựa vào đường cong hồi quy theo phương pháp bình phương tối thiểu. Các tham số nhiệt thủy hóa này có thể được dùng làm tham số đầu vào cho mô hình phân tích nhiệt, ứng suất nhiệt, dự báo khả năng hình thành vết nứt theo thời gian của kết cấu cầu sử dụng HPC.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.02-2016.25.

#### Tài liệu tham khảo

- [1]. Shi, C., & Mo, Y. L. (Eds.) (2008), *High-performance construction materials: science and applications* (vol.1), World scientific.
- [2]. Đỗ Anh Tú (2017), *Hiệu ứng nhiệt trong bê tông*, NXB. Xây dựng, Hà Nội.
- [3]. TCVN 6070 2005 (2005), *Hydraulic cement - Test Method For Heat Of Hydration*, Hanoi, Vietnam.
- [4]. RILEM 119-TCE1 (1997), *Adiabatic and Semi-Adiabatic Calorimetry to Determine the Temperature Increase in Concrete due to Hydration Heat of Cement*, Materials and Structures, 30, pp.451-457.
- [5]. Riding, K. A., Poole, J. L., Folliard, K. J., Juenger, M. C., & Schindler, A. K. (2012), *Modeling hydration of cementitious systems*, ACI Materials Journal, 109(2), 225-234.
- [6]. Van Breugel, K. (1997), *Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials*, Ph. D thesis 2nd ed., TU Delft.
- [7]. Schindler, A. K., & Folliard, K. J. (2005), *Heat of hydration models for cementitious materials*, ACI Materials Journal, 102(1), 24.
- [8]. Hansen, P.F. and E.J. Pedersen (1977), *Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete*.
- [9]. Mills, R. (1966), *Factors influencing cessation of hydration in water cured cement pastes*, Highway Research Board Special Report, (90).
- [10]. Hansen, P.F. and E. Pedersen (1984), *Curing of concrete structures*, BKI.

**Ngày nhận bài: 20/3/2019**

**Ngày chấp nhận đăng: 11/4/2019**

**Người phản biện: TS. Lê Bá Anh**

**TS. Nguyễn Văn Hậu**