



## DEGREE OF HYDRATION AND STRENGTH DEVELOPMENT IN HIGH-STRENGTH CONCRETE

Do Anh Tu<sup>1,\*</sup>, Vu Xuan Thanh<sup>2</sup>, Hoang Viet Hai<sup>1</sup>,  
Hoang Thi Tuyet<sup>1</sup>, Nguyen Hoai Nam<sup>3</sup>

<sup>1</sup>University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam.

<sup>2</sup>Hanoi Department of Construction, 52 Le Dai Hanh Street, Hanoi, Vietnam.

<sup>3</sup>Phuc Yen City Investment & Construction Project Management Unit, 145 Tran Hung Dao, Phuc Yen, Vinh Phuc, Vietnam.

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 1/7/2019

Revised: 12/8/2019

Accepted: 12/8/2019

Published online: 15/11/2019

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.2.31>

\* Corresponding author

Email: doanhtu@utc.edu.vn; Tel: 0947989218

**Abstract.** This paper presents a relationship between the strength development in a high-strength concrete (HSC) mix and the degree of cement hydration. Compressive strength and splitting tensile strength development was experimentally obtained for the HSC mix, while the adiabatic temperature rise was measured from an adiabatic calorimeter. The hydration parameters consisting of time and shape parameters were determined using the curve fitting method. The concrete compressive strength and degree of hydration had a linear relationship, similar to normal concrete. However, the HSC mix had a greater splitting tensile strength development rate compared with that of normal ones.

**Keywords:** high-strength concrete, adiabatic temperature rise, hydration parameters, degree of hydration, compressive strength, splitting tensile strength.



## MỨC ĐỘ THỦY HÓA VÀ SỰ PHÁT TRIỂN CƯỜNG ĐỘ TRONG BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO

Đỗ Anh Tú<sup>1,\*</sup>, Vũ Xuân Thành<sup>2</sup>, Hoàng Việt Hải<sup>1</sup>,  
Hoàng Thị Tuyết<sup>1</sup>, Nguyễn Hoài Nam<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Giao thông vận tải, số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

<sup>2</sup>NCS, Sở Xây dựng Thành phố Hà Nội, 52 Phố Lê Đại Hành, Hà Nội, Việt Nam.

<sup>3</sup>Ban Quản Lý Dự án Đầu Tư & Xây Dựng Thành phố Phúc Yên, 145 Trần Hưng Đạo, Thành phố Phúc Yên, Vĩnh Phúc, Việt Nam.

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 1/7/2019

Ngày nhận bài sửa: 12/8/2019

Ngày chấp nhận đăng: 12/8/2019

Ngày xuất bản Online: 15/11/2019

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.2.31>

\* Tác giả liên hệ

Email: doanhtu@utc.edu.vn; Tel: 0947989218

**Tóm tắt.** Bài báo trình bày mối quan hệ giữa sự phát triển cường độ của bê tông cường độ cao (BTCĐC) và mức độ thủy hóa xác định từ thí nghiệm nhiệt độ đoạn nhiệt. Trong đó, các dữ liệu cần thiết được lấy từ kết quả thực nghiệm cường độ chịu nén, ép chẻ và nhiệt độ đoạn nhiệt của 1 hỗn hợp BTCĐC. Các tham số nhiệt thủy hóa bao gồm tham số thời gian và tham số hình dạng được tính toán dựa vào đường cong đoạn nhiệt, từ đó xác định được mức độ thủy hóa. Đối với hỗn hợp BTCĐC thí nghiệm, cường độ chịu nén cũng có quan hệ tuyến tính với mức độ thủy hóa, tương tự như bê tông thường. Tuy nhiên cường độ ép chẻ của BTCĐC có tốc độ phát triển nhanh hơn so với bê tông thường, gần như tỷ lệ thuận với cường độ chịu nén.

**Từ khóa:** bê tông cường độ cao, nhiệt độ đoạn nhiệt, tham số nhiệt thủy hóa, mức độ thủy hóa, cường độ chịu nén, cường độ ép chẻ.

© 2019 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, trong lĩnh vực xây dựng cầu, bê tông cường độ cao (BTCĐC) được sử dụng rất phổ biến cho các công trình đòi hỏi khẩu độ nhịp lớn và thời gian thi công nhanh. BTCĐC 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 thường [1,2]. Đối với các công

trình cầu sử dụng BTCĐC, việc kiểm soát nhiệt độ của bê tông trong giai đoạn thi công là rất quan trọng nhằm đảm bảo kết cấu không xuất hiện vết nứt nhiệt làm ảnh hưởng đến khả năng khai thác và độ bền sau này.

Các nghiên cứu về nhiệt thủy hóa của xi măng cho bê tông thường đã được thực hiện ở Việt Nam [3,4], tuy nhiên các nghiên cứu trên BTCĐC và bê tông tính năng cao còn rất hạn chế. Ở một nghiên cứu gần đây, các tác giả [5] đã tiến hành thực nghiệm đo nhiệt độ đoạn nhiệt cho bê tông tính năng cao dựa vào thiết bị thí nghiệm theo phương pháp đoạn nhiệt. Dựa vào kết quả thực nghiệm đoạn nhiệt, các tham số về nhiệt thủy hóa bao gồm tham số thời gian ( $\tau$ ) và tham số hình dạng ( $\beta$ ) có thể được xác định. Các tham số nhiệt thủy hóa này sẽ xác định mức độ thủy hóa của xi măng theo thời gian. Hơn nữa, từ mức độ thủy hóa có thể dự đoán được xu hướng phát triển cường độ của bê tông như được trình bày trong nghiên cứu của Schutter [6] trên bê tông thông thường. Bài báo này sẽ thiết lập mối quan hệ giữa cường độ tuổi sớm và mức độ thủy hóa dựa trên kết quả thực nghiệm về cường độ và nhiệt độ đoạn nhiệt của một hỗn hợp BTCĐC.

## 2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Thực nghiệm xác định cường độ hỗn hợp BTCĐC

Thành phần hỗn hợp BTCĐC được lựa chọn dựa vào một số hỗn hợp bê tông sử dụng trong xây dựng cầu, thể hiện trong Bảng 1. Hỗn hợp bê tông sử dụng xi măng VICEM Bút Sơn PC40 có thành phần hóa học và khoáng vật cho trong Bảng 2 và 3.

*Bảng 1. Thành phần cấp phối cho 1m<sup>3</sup> bê tông.*

N/X	N/CKD	Tro bay (%)	Nước (l)	Xi măng (kg)	Tro bay (kg)	Đá 5x10 (kg)	Cát vàng (kg)	Cát nghiền (kg)	Phụ gia siêu dẻo (kg)
0,40	0,32	20%	170	424	106	1050	278	278	7,5

*Bảng 2. Thành phần hóa học của xi măng (%).*

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MKN
21,49	5,40	3,49	63,56	1,40	1,65	0,15	0,70	1,20

*Bảng 3. Thành phần khoáng vật của xi măng (%).*

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
51,74	24,20	8,16	10,35

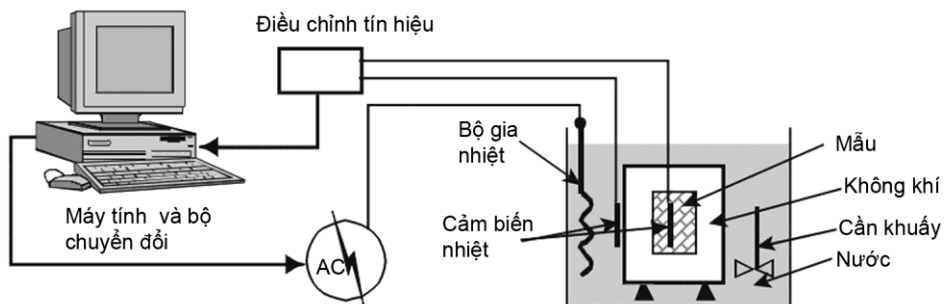
Sau khi lựa chọn thành phần cấp phối bê tông như trên, tiến hành đúc mẫu thí nghiệm xác định cường độ nén và ép chẻ của BT ở 1, 2, 3, 7, và 28 ngày tuổi. Kết quả thí nghiệm được cho trong Bảng 4.

### 2.2. Thực nghiệm đo nhiệt độ đoạn nhiệt cho hỗn hợp BTCĐC

Sơ đồ bố trí thí nghiệm đo nhiệt độ theo phương pháp đoạn nhiệt [7] cho mẫu bê tông tươi được minh họa trên Hình 1. Thiết bị thí nghiệm đo nhiệt được thiết kế và chế tạo tại Trung tâm Khoa học Công nghệ, Trường Đại học Giao thông vận tải. Trong cấu hình thí nghiệm này, mẫu bê tông được đặt vào một hộp cách nhiệt (ở đây sử dụng vật liệu xốp thay

cho không khí), hộp này lại được đặt trong một thùng có vỏ cách nhiệt chứa đầy nước. Một cảm biến nhiệt độ (T1) đặt ở tâm của mẫu bê tông và một cảm biến khác (T2) đặt trong nước để đo nhiệt độ của bê tông và nước liên tục theo thời gian. Tín hiệu nhiệt độ từ cảm biến T1 sẽ được theo dõi bởi máy tính thông qua thẻ chuyển đổi tín hiệu tương tự (analog) sang tín hiệu số (digital). Một bộ gia nhiệt đặt trong thùng 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. Thí nghiệm này thường được tiến hành từ khi trộn bê tông xong cho đến thời điểm nhiệt độ của mẫu thí nghiệm hầu như không tăng nữa, thông thường là trong khoảng thời gian từ 2 đến 5 ngày. Thiết bị đo nhiệt lượng có thể được cân chỉnh thông qua các thông số cài đặt sẵn trong phần mềm điều khiển.

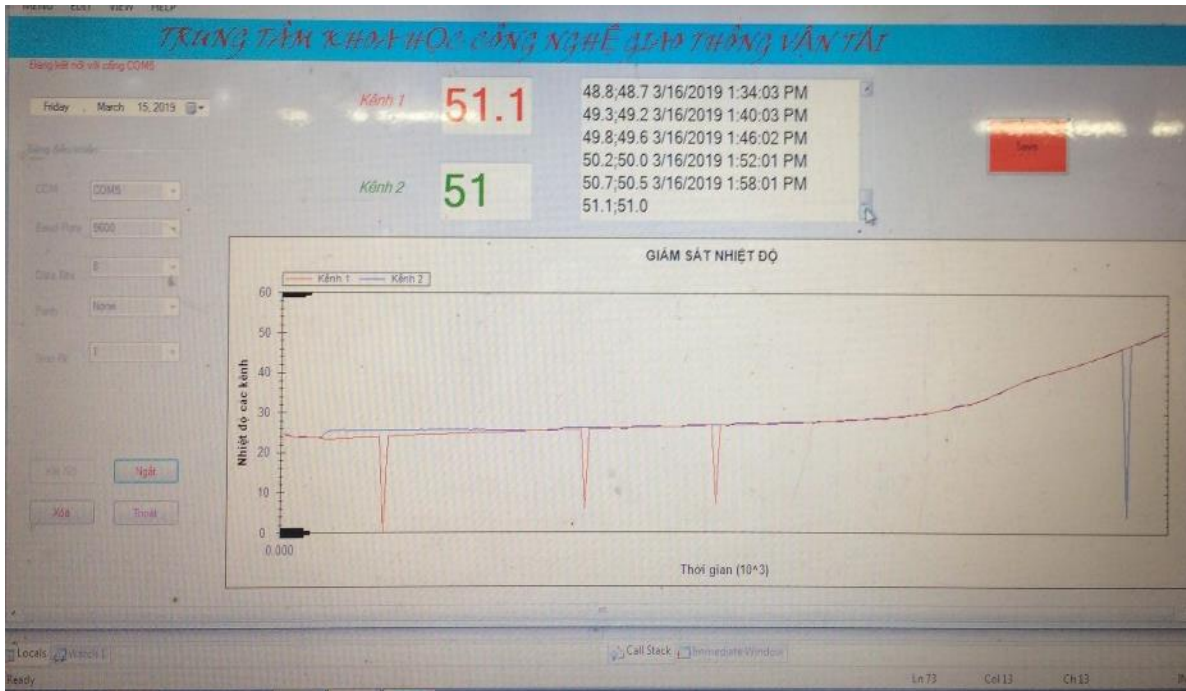
Trước khi thí nghiệm đoạn nhiệt được tiến hành, nhiệt độ của nước trong thùng được điều chỉnh bằng với nhiệt độ của bê tông tươi (nhiệt độ bắt đầu của thí nghiệm). Ngay sau khi đặt mẫu bê tông vào hộp chứa mẫu, lắp cảm biến nhiệt, đổ đầy nước vào thùng và tiến hành đo nhiệt độ đoạn nhiệt của bê tông (Hình 2, 3). Trong thí nghiệm này, tần suất quét nhiệt của 2 cảm biến là 10 Hz, đủ lớn để đảm bảo độ chính xác.



**Hình 1.** Sơ đồ bố trí thí nghiệm đo nhiệt lượng đoạn nhiệt.



**Hình 2.** Đặt mẫu bê tông vào thùng, kết nối các cảm biến nhiệt.



Hình 3. Màn hình theo dõi nhiệt độ đoạn nhiệt của bê tông.

### 2.3. Kết quả thực nghiệm và thảo luận

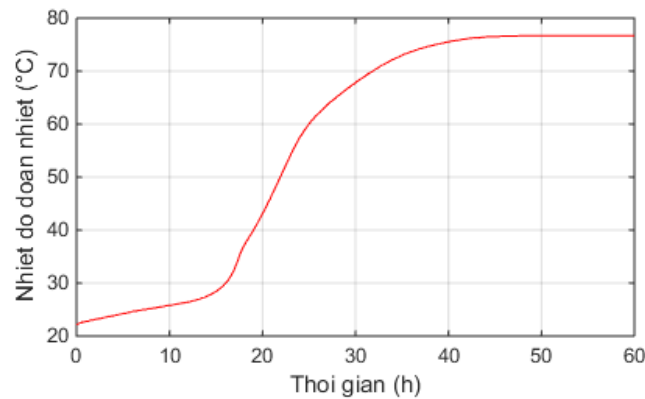
Kết quả thí nghiệm về cường độ của hỗn hợp bê tông được thể hiện trong Bảng 4 dưới đây.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm nén và ép chế mẫu.

Tuổi (ngày)	Cường độ nén trung bình (MPa)	Cường độ ép chế trung bình (MPa)
1	16,8	1,1
2	38,69	2,55
3	47,75	3,48
7	55,96	3,77
28	66,34	4,62

Đối với thí nghiệm đo nhiệt độ đoạn nhiệt, sau khi khử nhiễu tín hiệu nhiệt độ, nhiệt độ đoạn nhiệt đo được của mẫu BTCĐC được trình bày trên Hình 4. Nhiệt độ ban đầu của mẫu là 22,2°C. Nhiệt độ của mẫu đạt mức tối đa 76,7°C tại thời điểm khoảng 50 giờ sau khi trộn bê tông.

Do hỗn hợp bê tông này sử dụng phụ gia siêu dẻo Silkroad SPR3000 giảm nước – có tác dụng làm chậm quá trình đông 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 khoảng 16 giờ, phản ứng thủy hóa mới gia tốc, làm nhiệt độ của mẫu tăng rất nhanh trong khoảng thời gian từ 16 đến 35 giờ. Do lượng nước trong hỗn hợp rất ít (tỉ lệ N/CKD = 0,32) cho nên quá trình thủy hóa diễn ra rất nhanh chóng. Sau 40 giờ, nhiệt lượng tăng từ từ và gần như không tăng lên nữa sau 50 giờ.



Hình 4. Nhiệt độ đo nhiệt thực nghiệm của mẫu bê tông thí nghiệm.

## 2.4. Xác định mức độ thủy hóa

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 [8]. 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 ước lượng nhiệt tỏa ra trong quá trình thủy hóa, van Breugel [9], Schindler và Folliard [10] 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), xác định theo công thức (2) và (3).

$$H_u = H_{cem}p_{cem} + 461p_{slag} + 1800p_{FA}p_{FA-CaO} \quad (2)$$

$$H_{cem} = 500p_{C_3S} + 260p_{C_2S} + 866p_{C_3A} + 420p_{C_4AF} + 624p_{SO_3} + 1186p_{FreeCa} + 850p_{MgO} \quad (3)$$

trong đó  $H_{cem}$  - tổng nhiệt lượng thủy hóa của xi măng (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 [11] được sử dụng khá phổ biến:

$$\alpha(t_e) = \alpha_u \exp \left[ - \left( \frac{\tau_s}{t_e} \right)^\beta \right] \quad (4)$$

trong đó:

$\alpha(t_e)$  - mức độ thủy hóa tại thời điểm  $t$ ;

$\alpha_u$  - mức độ thủy hóa ở thời điểm cuối cùng của quá trình thủy hóa;

$t_e$  - 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 [12]:

$$\alpha_u = \frac{1.031w/c}{0.194 + w/c} \quad (5)$$

trong đó:  $w/c$  – tỷ lệ nước trên chất kết dính.

Tuổi tương đương của bê tông được tính theo công thức [13]:

$$t_e = \int_0^t \exp \left[ -\frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{273+T_c} - \frac{1}{273+T_r} \right) \right] dt \quad (6)$$

hay:

$$t_e = \sum_{i=1}^n \exp \left[ -\frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{273+T_c} - \frac{1}{273+T_r} \right) \right] \Delta t_i \quad (7)$$

trong đó:

$E_a$  - năng lượng kích hoạt biểu 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  $\Delta t_i$ , ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_r$  - nhiệt độ tham chiếu (thông thường  $20^{\circ}\text{C}$  hoặc  $23^{\circ}\text{C}$ );

$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$  - khoảng thời gian giữa 2 bước thời gian liên tiếp  $t_i$  và  $t_{i-1}$  (h);

$i$  - bước thời gian thứ  $i$ ,  $i = 1 - n$ .

Năng lượng kích hoạt biểu kiến là thước đo độ nhạy nhiệt độ của phản ứng hydrat hóa, có thể xác định theo công thức thực nghiệm thiết lập bởi Poole [14] như sau:

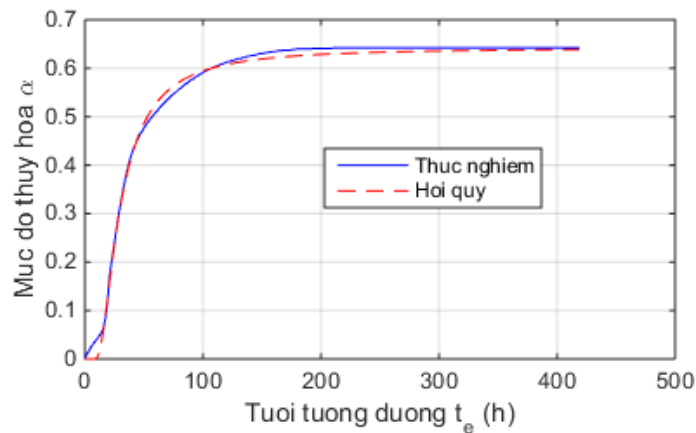
$$\begin{aligned} E_a = & 41230 + 1416000 \left( p_{C_3A} + p_{C_4AF} \right) p_{cem} p_{SO_3} p_{cem} \\ & - 347000 p_{Na_2O_{eq}} - 19.8 Blaine + 29600 p_{FA} p_{FA-CaO} \\ & + 16200 p_{slag} - 51600 p_{SF} - 3090000 WRRET - 345000 ACCL \end{aligned} \quad (8)$$

trong đó:  $p_{FA}$  – tỷ lệ tro bay theo hàm lượng chất kết dính,  $p_{FA-CaO}$  – tỷ lệ CaO có trong tro bay,  $p_{slag}$  – tỷ lệ xỉ theo hàm lượng chất kết dính,  $p_{SF}$  – tỷ lệ silica fume theo hàm lượng chất kết dính, Blaine - độ mịn của xi măng, trong nghiên cứu này lấy bằng 375 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ),  $p_X$  – tỷ lệ hàm lượng của chất X (cem = xi măng,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ,  $SO_3$ ) có trong toàn bộ xi măng,  $p_{Na_2O_{eq}}$  – tỷ lệ phần trăm  $Na_2O$  tương đương có trong xi măng, WRRET – tỷ lệ phần trăm của phụ gia giảm nước ASTM loại B và D theo khối lượng chất kết dính, ACCL – tỷ lệ phần trăm của phụ gia tăng tốc ASTM loại C.

Từ tỷ lệ thành phần hóa học và khoáng vật của xi măng, năng lượng kích hoạt biểu kiến của hỗn hợp bê tông được xác định  $E_a = 34454$  (J/mol), mức độ thủy hóa ở thời điểm cuối cùng  $\alpha_u = 0.642$ .

Để vẽ được đường cong mức độ thủy hóa của mẫu bê tông từ nhiệt độ đoạn nhiệt thực nghiệm, cần phải xác định tuổi tương đương của bê tông theo công thức (7). Mức độ thủy hóa tỷ lệ thuận với nhiệt lượng tích lũy hay nhiệt độ đoạn nhiệt theo công thức (1), do đó có thể vẽ được đường cong mức độ thủy hóa thực nghiệm theo tuổi tương đương của bê tông như trên Hình 5.

Để sử dụng đường cong mức độ thủy hóa trình bày ở công thức (4), cần phải xác định các tham số  $\tau$  và  $\beta$  từ kết quả thực nghiệm đoạn nhiệt. Giá trị phù hợp nhất của các tham số  $\tau$  và  $\beta$  được xác định theo phương pháp bình phương tối thiểu. Đối với hỗn hợp BTCĐC trong thí nghiệm này thì các tham số nhiệt thủy hóa xác định được là:  $\tau = 24,98$  h,  $\beta = 1,842$ , với  $R^2 = 0,9949$ . Đường cong thực nghiệm và đường cong hồi quy của mức độ thủy hóa được thể hiện trên Hình 5.

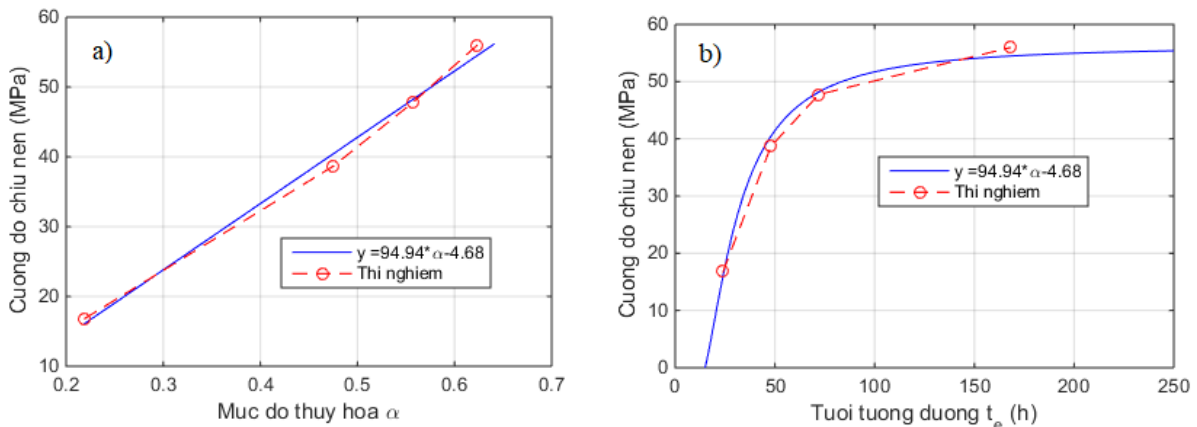


Hình 5. Đường cong mức độ thủy hóa thực nghiệm và hồi quy.

## 2.5. Thảo luận về mối quan hệ giữa mức độ thủy hóa và cường độ

Nghiên cứu của Schutter [6] chỉ ra rằng cường độ chịu nén tuổi sớm của bê tông thường có mối quan hệ tuyến tính với mức độ thủy hóa ( $\alpha$ ). Sự tương quan tuyến tính cũng được kiểm chứng và khẳng định bởi nghiên cứu của Lin và Chen [15]. Tuy nhiên, đối với hỗn hợp bê tông cường độ cao có sử dụng hàm lượng chất kết dính và phụ gia siêu dẻo lớn thì chưa chắc hai đại lượng này có mối tương quan chặt như đối với hỗn hợp bê tông thường. Để tìm hiểu mối quan hệ giữa hai đại lượng trên, giá trị cường độ chịu nén thực nghiệm được vẽ theo mức độ thủy hóa ở các ngày tuổi tương đương của bê tông như trên Hình 6a. Có thể dễ dàng nhận thấy sự phát triển cường độ chịu nén của hỗn hợp bê tông này cũng có quan hệ tuyến tính với mức độ thủy hóa. Sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu có thể xác định được hàm tương quan giữa cường độ chịu nén và mức độ thủy hóa như sau:

$$f_c = y = 94,94\alpha - 4,68 \text{ (MPa)}, \text{ với } R^2 = 0,993 \quad (9)$$



Hình 6. Tương quan hồi quy giữa cường độ chịu nén và mức độ thủy hóa.

Tác giả Wight và MacGregor [16] cũng đã trình bày sự tương quan chặt giữa cường độ ép chẻ và căn bậc hai của cường độ chịu nén của bê tông thường dựa trên một cơ sở dữ liệu lớn:

$$f_{ct} = 0.53\sqrt{f_c} \quad (10)$$

Hai công thức dự đoán mối quan hệ giữa cường độ chịu ép chẻ và cường độ chịu nén cho



hỗn hợp BTCĐC được đề xuất như sau:

$$f_{ct} = a \cdot \sqrt{f_c} \quad (11)$$

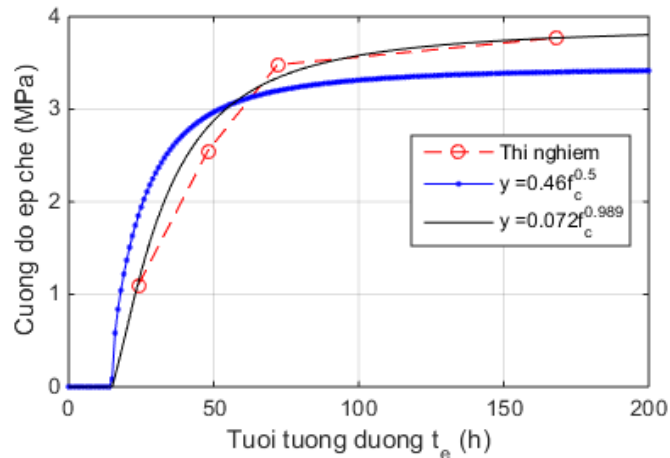
$$f_{ct} = A \cdot f_c^B \quad (12)$$

trong đó  $a$ ,  $A$ ,  $B$  là các hệ số xác định từ đường cong hồi quy theo phương pháp bình phương tối thiểu. Đường cong hồi quy lần lượt được xác định như sau:

$$f_{ct} = 0.46\sqrt{f_c} \quad (MPa) \quad \text{với } R^2 = 0,766 \quad (13)$$

$$f_{ct} = 0.072f_c^{0.989} \quad (MPa) \quad \text{với } R^2 = 0,981 \quad (14)$$

Có thể thấy trên Hình 7, công thức (14) thể hiện mối quan hệ giữa cường độ ép chẻ và cường độ chịu nén tốt hơn công thức (13) cho hỗn hợp BTCĐC trong nghiên cứu này. Hệ số  $B \approx 1$  cho thấy cường độ ép chẻ của hỗn hợp BTCĐC có tốc độ phát triển nhanh hơn so với bê tông thường.



Hình 7. Tương quan hồi quy giữa cường độ ép chẻ và cường độ chịu nén.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả thực nghiệm cường độ chịu nén, ép chẻ và nhiệt độ đoạn nhiệt của 1 hỗn hợp BTCĐC có tỉ lệ N/CKD = 0,32 với hàm lượng tro bay thay thế xi măng là 20%. Từ kết quả thí nghiệm đoạn nhiệt, các tham số nhiệt thủy hóa của hàm mũ bao gồm tham số thời gian ( $\tau = 24,98$  h) và tham số hình dạng ( $\beta = 1,842$ ) được xác định dựa vào đường cong hồi quy theo phương pháp bình phương tối thiểu.

Đối với hỗn hợp BTCĐC trong nghiên cứu này, cường độ chịu nén có quan hệ tuyến tính với mức độ thủy hóa, giống như bê tông thường. Tuy nhiên cường độ ép chẻ có tốc độ phát triển nhanh hơn so với bê tông thường, gần như tỷ lệ thuận với sự phát triển cường độ chịu nén.

Kết quả nghiên cứu ở trên mới chỉ được thực hiện trên 1 hỗn hợp BTCĐC, chưa mang

tính đại diện cho BTCĐC, vì vậy cần phải thực hiện thí nghiệm trên nhiều hỗn hợp BTCĐC để kiểm chứng và tinh chỉnh các phương trình tương quan đã thiết lập trong bài báo này.

## 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] Đỗ Anh Tú, Hiệu ứng nhiệt trong bê tông, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2017.
- [2] T. A. Do, H. L. Chen, G. Leon, T. H. Nguyen, A combined finite difference and finite element model for temperature and stress predictions of cast-in-place cap beam on precast columns, *Construction and Building Materials*, 217 (2019) 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.019>
- [3] Hồ Ngọc Khoa, Vũ Chí Công, Phân tích trường nhiệt độ và ứng suất trong bê tông khối lớn bằng phương pháp phần tử hữu hạn, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Xây dựng*, 6 (2012) 17-27.
- [4] Trần Văn Miên, Nguyễn Lê Thi, Nghiên cứu đặc trưng nhiệt của bê tông sử dụng hàm lượng tro bay lớn, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, số 3+4 (2013).
- [5] Đỗ Anh Tú, Vũ Xuân Thành, Trần Đức Tâm, Nguyễn Thị Mỹ Linh, Nguyễn Thị Hà Ly, Nguyễn Đăng Thanh, Thực nghiệm xác định nhiệt thủy hóa cho bê tông tính năng cao theo phương pháp đoạn nhiệt, *Tạp chí Giao thông Vận tải*, 4 (2019) 36-40.
- [6] G. De Schutter, Fundamental study of early age concrete behaviour as a basis for durable concrete structures, *Materials and Structures*, 35 (2002) 15. <https://doi.org/10.1007/BF02482085>
- [7] RILEM 119-TCE1, Adiabatic and Semi-Adiabatic Calorimetry to Determine the Temperature Increase in Concrete due to Hydration Heat of Cement, *Materials and Structures*, 30 (1997) 451-457. <https://doi.org/10.1007/BF02524773>
- [8] Kyle A. Riding, Jonathan L. Poole, Kevin J. Folliard, Maria C. G. Juenger, Anton K. Schindler, Modeling hydration of cementitious systems, *ACI Materials Journal*, 109 (2012) 225-234.
- [9] K. van Breugel, Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials, Ph. D thesis 2nd ed., TU Delft, 1997. ISBN: 90-900-4618-6
- [10] A. K. Schindler, K. J. Folliard, Heat of hydration models for cementitious materials, *ACI Materials Journal*, 102 (2005) 24-33.
- [11] P.F. Hansen, E.J. Pedersen, Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete, *Nordisk Betong*, 1 (1977) 21-25.
- [12] R. Mills, Factors influencing cessation of hydration in water cured cement pastes, *Highway Research Board Special Report*, 90 (1966) 406-424. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr90/90-034.pdf>
- [13] Hansen, P.F. and E. Pedersen, Curing of concrete structures. BKI. 1984
- [14] J. L. Poole, Modeling temperature sensitivity and heat evolution of concrete, The University of Texas at Austin, 2007.
- [15] Y. Lin, H.-L. Chen, Thermal analysis and adiabatic calorimetry for early-age concrete members, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 122 (2015) 937-945. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4843-2>
- [16] J.K. Wight, J.G. MacGregor, Reinforced concrete: Mechanics and design. 5 ed. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2009.