



NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA LOẠI CANXI SUN PHÁT ĐẾN ĐỘ CO HOÁ HỌC VÀ NHIỆT THỦY HÓA CỦA VỮA TỰ SAN PHẲNG SỬ DỤNG CHẤT KẾT DÍNH ETTRINGITE

Nguyễn Ngọc Lâm^{1*}

Tóm tắt: Co hoá học của vật liệu xi măng có liên quan đến sự thay đổi thể tích ở tuổi sớm của vữa và bê tông, vì vậy việc xác định chính xác độ co hóa học có ý nghĩa quan trọng trong việc phán đoán và phòng ngừa hiện tượng nứt ở tuổi sớm của vật liệu sử dụng xi măng. Trong nghiên cứu này, độ co hoá học của vữa tự san phẳng sử dụng chất kết dính ettringite được thực hiện bằng phương pháp cân trong nước, số liệu được ghi lại tự động và liên tục để làm cơ sở nghiên cứu động học quá trình thủy hóa của chất kết dính. Kết quả nghiên cứu cho thấy độ co hóa học của vữa tự san phẳng sử dụng hemihydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ nhỏ hơn so với các cấp phối sử dụng anhydrite CaSO_4 , tuy nhiên tốc độ thủy hóa theo thời gian của chất kết dính sử dụng anhydrite lại diễn ra nhanh hơn so với trường hợp sử dụng hemihydrate.

Từ khóa: Vữa tự san phẳng; chất kết dính ettringite; co hóa học; nhiệt thủy hóa.

Influence of type of calcium sulfate on chemical shrinkage and heat of hydration in self-leveling underlayments using ettringite binder

Abstract: Chemical shrinkage of cementitious materials relates to the early-age volume change of mortar and concrete. Therefore, determining exactly the chemical shrinkage plays a significant role in predicting and preventing early-age cracking in materials using cement as binder. In this study, the chemical shrinkage of self-leveling underlayment using ettringite binder is investigated by a buoyancy method, data was recorded automatically for studying the hydration kinetics of the binder. The results show that the chemical shrinkage of self-leveling underlayments using hemihydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ is smaller than that of self-leveling underlayment using anhydrite CaSO_4 . However, the hydration rate of the anhydrite-based mixtures occurs faster than that using hemihydrate.

Keywords: Self-leveling underlayment; ettringite binder; chemical shrinkage; heat of hydration.

Nhận ngày 16/01/2018; sửa xong 13/02/2018; chấp nhận đăng 28/02/2018

Received: January 16th, 2018; revised: February 13th, 2018; accepted: February 28th, 2018



1. Giới thiệu về co ngót hóa học

1.1 Giới thiệu chung về co hóa học

Độ co hóa học được định nghĩa là sự giảm thể tích tuyệt đối của chất kết dính xảy ra do quá trình thủy hóa, tức tổng thể tích của sản phẩm thủy hóa tạo thành nhỏ hơn tổng thể tích của khoáng tham gia thủy hóa và nước [1,2]. Giá trị co hóa học có thể được tính toán thông qua khối lượng phân tử và khối lượng riêng của các khoáng tham gia phản ứng [3,4]. Sự thay đổi thể tích hồ xi măng trong vữa và bê tông ở tuổi sớm xảy ra chủ yếu là do co ngót hóa học gây ra và được coi là một trong những nguyên nhân chính dẫn đến sự hình thành vết nứt ở tuổi sớm, từ đó làm giảm độ bền lâu của các kết cấu bê tông [5], nhất là đối với bê tông có tỷ lệ nước trên xi măng thấp như bê tông cường độ cao, chất lượng cao [6-8]. Ngoài ra, việc nghiên cứu độ co hóa học còn cho phép nghiên cứu động học quá trình thủy hóa của xi măng, nghiên cứu ảnh hưởng của loại và hàm lượng phụ gia khoáng cũng như phụ gia hóa học đến mức độ thủy hóa của chất kết dính.

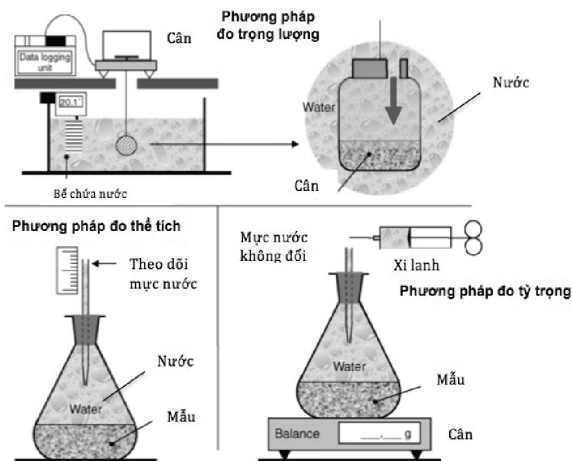
1.2 Phương pháp xác định độ co hóa học

Việc xác định chính xác độ co hóa học rất cần thiết cho việc đánh giá sự thay đổi thể tích ở tuổi sớm của hồ xi măng nói riêng và vữa, bê tông nói chung, giúp người nghiên cứu có những hiểu biết tốt và sâu

¹ TS, Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng.

* Tác giả chính. E-mail: lamnn@nuce.edu.vn.

hơn về các yếu tố ảnh hưởng đến mức độ co hóa học. Từ đó, có thể đưa ra những biện pháp nhằm hạn chế, ngăn ngừa sự hình thành vết nứt trong các vật liệu có sử dụng xi măng cũng như hiểu biết rõ hơn về động học quá trình thủy hóa của chất kết dính. Hiện nay, có ba phương pháp đo co hóa học đã được nêu trong các tài liệu nghiên cứu [9-11]: dilatometry (đo thể tích), pycnometry (đo tỷ trọng) và gravimetry (đo trọng lượng) được thể hiện trong Hình 1 như sau:



Hình 1. Các phương pháp đo co hoá học [11]

- Phương pháp đo thể tích (Dilatometry): đây là phương pháp đo thông qua độ giảm mực nước trong một hệ hồ xi măng đang thủy hóa bằng cách sử dụng pipet hoặc một ống thủy tinh có chia vạch. Độ co hóa học xi măng lúc này chính là sự giảm thể tích của nước trong pipet.

- Phương pháp đo tỷ trọng (Pycnometry): độ co hóa học theo phương pháp này được đo thông qua sự tăng khối lượng của hệ xi măng đang thủy hóa. Do hệ quả của co hóa học, thể tích của hệ xi măng đang thủy hóa sẽ giảm đi, nên để giữ thể tích của hệ là không đổi thì cần thiết phải thêm nước vào hệ để giữ cho mực nước không đổi, do đó độ co hóa học của hồ xi măng thủy hóa có thể được tính theo sự gia tăng trọng lượng toàn hệ chất kết dính [11].

- Phương pháp đo trọng lượng (Gravimetry): được phát triển từ phương pháp pycnometry, trong đó kết quả có thể được ghi lại tự động một cách liên tục. Phương pháp này dựa trên định luật Ác-si-mét bằng cách cân (thủy tĩnh) mẫu chất kết dính trong nước suốt quá trình thủy hóa của xi măng.

Cả ba phương pháp trên đều được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng, được đánh giá là phương pháp thí nghiệm đáng tin cậy, phù hợp để nghiên cứu động học của quá trình thủy hóa chất kết dính.

Việc xác định độ co hóa học để nghiên cứu động học quá trình thủy hóa của xi măng Poóc lăng đã được một số tác giả nghiên cứu [12-14], bài báo này sẽ trình bày nghiên cứu trên hệ vữa tự san phẳng sử dụng chất kết dính ettringite. Loại chất kết dính này có thành phần chủ yếu gồm xi măng cao alumin (CAC) và canxi sunphát (C\$H_x\$), khoáng thủy hóa chính của hệ chất kết dính này là ettringite (C₆A\$₃H₃₂), aluminum hydroxide (AH₃):



Tốc độ phản ứng của chất kết dính ettringite phụ thuộc chủ yếu vào tỷ lệ CAC/C\$H_x\$, loại canxi sunphát sử dụng cũng như sự có mặt của phụ gia hóa học hay không [15,16]. Có 3 loại canxi sunphát được sử dụng chủ yếu trong sản xuất vật liệu xây dựng, đó là CaSO₄.2H₂O (đá thạch cao), CaSO₄.0.5H₂O (hemihydrate) và CaSO₄ (anhydrite). Khi gặp nước, CaSO₄ và CaSO₄.2H₂O sẽ hòa tan và rắn chắc rất chậm, trong khi đó hemihydrate tan nhanh và phản ứng ngay với nước, nên quá trình rắn chắc diễn ra nhanh hơn rất nhiều [17,18]. Vì vậy, động học quá trình thủy hóa của chất kết dính ettringite phụ thuộc lớn vào loại canxi sunphát sử dụng.

Trong bài báo này, ảnh hưởng của loại canxi sunphát đến độ co hóa học và nhiệt thủy hóa của vữa tự san phẳng trên cơ sở chất kết dính chất kết dính ettringite sẽ được nghiên cứu, góp phần vào việc nghiên cứu động học quá trình thủy hóa của chất kết dính trong lĩnh vực vật liệu xây dựng.

2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm

2.1 Vật liệu

Thành phần của chất kết dính ettringite dùng chế tạo vữa tự san phẳng bao gồm xi măng cao alumin (CAC) chứa 2 khoáng chính là CA (57,7%) và CA₂ (37,5%) và 2 loại canxi sunphát: Anhydrite còn gọi là thạch cao khan (CaSO₄) và hemihydrate còn gọi là thạch cao xây dựng (CaSO₄.0,5H₂O). Thành phần hóa học của chất kết dính này được thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học của chất kết dính

Loại chất kết dính	Các ôxit chính trong chất kết dính, % theo khối lượng										
	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MnO	L.O.I
CAC	69,68	29,78	0,26	0,16	0,15	0,04	-	0,23	0,27	0,01	-
Hemihydrate	-	38,70	0,27	0,03	0,10	0,003	-	-	52,40	-	8,4
Anhydrite	-	42,69	-	0,07	0,05	0,002	-	-	56,83	0,006	3,9

Bảng 2. Thành phần của vữa tự san phẳng

Vật liệu sử dụng	Hàm lượng % theo khối lượng các vật liệu thành phần cho các cấp phối vữa khác nhau			
	75CAC/25P	90CAC/10P	75CAC/25A	90CAC/10A
Chất kết dính ettringite	32,4 (trong đó 75% CAC và 25% CaSO ₄ .0,5H ₂ O)	32,4 (trong đó 90% CAC và 10% CaSO ₄ .0,5H ₂ O)	32,4 (trong đó 75% CAC và 25% CaSO ₄)	32,4 (trong đó 90% CAC và 10% CaSO ₄)
Xi măng CEM I	4,0			
Cát silic + Bột đá vôi + Xi lò cao nghiền mịn	33,4			
Phụ gia hóa học (siêu dẻo + điều chỉnh đông kết)	5,6			
Nước	24,6			

Thành phần cấp phối của vữa tự san phẳng dùng trong nghiên cứu được thể hiện ở Bảng 2.

2.2 Phương pháp thí nghiệm

2.2.1 Đo độ co hóa học

Trong nghiên cứu này, độ co hóa học của vữa tự san phẳng được xác định theo phương pháp đo trọng lượng (Gravimetry): Vữa tự san phẳng sau khi nhào trộn sẽ được cho vào một dụng cụ chứa với chiều dày khoảng 6mm, sau đó được đưa lên bàn rung trong khoảng thời gian 1 phút để bọt khí thoát hết khỏi vữa trong quá trình nhào trộn. Để tránh hiện tượng chảy hồ chất kết dính ra ngoài môi trường, một tấm giấy thấm mỏng được đặt trên bề mặt mẫu trước khi nhúng mẫu vào trong hệ thống giá treo trong nước. Hệ thống giá treo này được kết nối với cân điện tử để đọc và ghi số liệu tự động sau mỗi phút thí nghiệm. Tất cả các cấp phối sẽ được đo bắt đầu từ phút thứ 10 kể từ lúc nhào trộn vữa với nước. Độ co hóa học sẽ được biểu diễn qua đơn vị (mm³ nước/ g CKD). Khi biết khối lượng ban đầu của mẫu thí nghiệm cũng như thành phần cấp phối vữa, thì độ co hóa học sẽ được tính toán và quy đổi theo lượng dùng chất kết dính có trong vữa tự san phẳng theo công thức sau:

$$\text{Độ co hóa học} = \frac{[\text{Sự tăng khối lượng của vữa khi cân trong nước (g)} \times 1000 / \text{KL riêng của nước } 20^{\circ}\text{C}] (\text{mm}^3)}{\text{Lượng chất kết dính sử dụng (g)}}$$

Để đảm bảo độ chính xác của phép đo, mỗi cấp phối sẽ được thực hiện 3 lần để tính giá trị trung bình.

2.2.2 Nhiệt thủy hóa

Nhiệt thủy hóa của vữa tự san phẳng được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C1679 (Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry) thông qua thiết bị đo của hãng Tam Air. Đây là phương pháp được sử dụng nhiều trong nghiên cứu do thực hiện được các mục đích khác nhau như: Đo tổng lượng nhiệt sinh ra do thủy hóa, xác định sản phẩm thủy hóa, cũng như tốc độ sinh nhiệt, tốc độ thủy hóa của chất kết dính. Mỗi lần đo nhiệt thủy hóa sử dụng 10 (g) vữa tự san phẳng và được thực hiện hai lần để lấy giá trị trung bình. Kết quả thí nghiệm cũng sẽ được quy đổi theo lượng dùng chất kết dính có trong vữa tự san phẳng để so sánh với độ co hóa học.

3. Kết quả thí nghiệm và bàn luận

3.1 Cơ hóa học của chất kết dính ettringite

Mục tiêu của việc đo cơ hóa học là để định lượng sự giảm thể tích hệ vữa tự san phẳng theo thời gian do phản ứng thủy hóa gây ra. Kết quả đo độ cơ hóa học của 4 cấp phối nghiên cứu được thể hiện trong Hình 2.

Kết quả ở Hình 2 cho thấy độ cơ hóa học bắt đầu tăng mạnh ngay từ những giờ đầu tiên do sự hình thành các sản phẩm thủy hóa. Trong 24 giờ đầu, khi sử dụng cùng loại canxi sunphat, tỷ lệ CAC/C\$H_x\$ có ảnh hưởng lớn đến độ cơ hóa học, khi tỷ lệ này tăng lên thì độ cơ hóa học cũng tăng theo. Hiện tượng này có liên quan đến quá trình thủy hóa của xi măng CAC trong cấp phối 90CAC/10C\$H_x\$ xảy ra nhanh và mạnh hơn so với cấp phối 75CAC/25C\$H_x\$ và thúc đẩy quá trình cơ hóa học. Độ cơ này đạt khoảng 106 mm³/g CKD đối với cấp phối 75CAC/25C\$H_x\$, 116 mm³/g CKD đối với 90CAC/10C\$H_x\$ sau 24 giờ thí nghiệm.

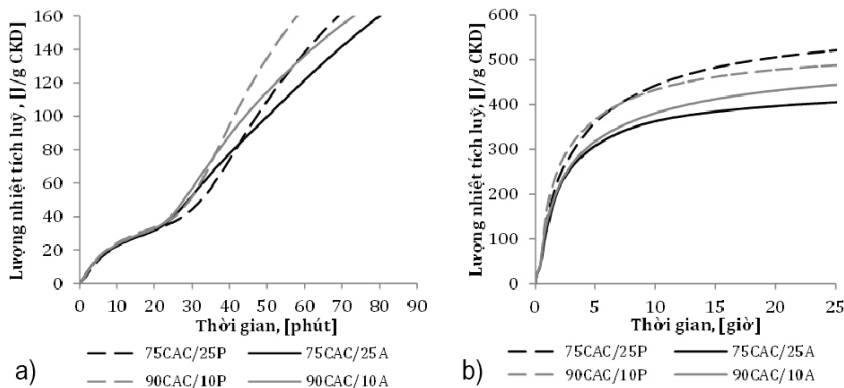
Mặt khác, khi tỷ lệ CAC/C\$H_x\$ không đổi, độ cơ hóa học ban đầu của các cấp phối sử dụng hemihydrate CaSO₄·0,5H₂O sẽ thấp hơn so với các cấp phối sử dụng anhydrite CaSO₄. Tuy nhiên, ảnh hưởng của loại canxi sunphat đến giá trị cơ ở thời điểm 24 giờ khi cùng tỷ lệ CAC/C\$H_x\$ là không đáng kể.

Từ các kết quả đạt được, tốc độ cơ hoá học được tính toán (theo phương pháp vi phân) và trình bày trong Hình 3.

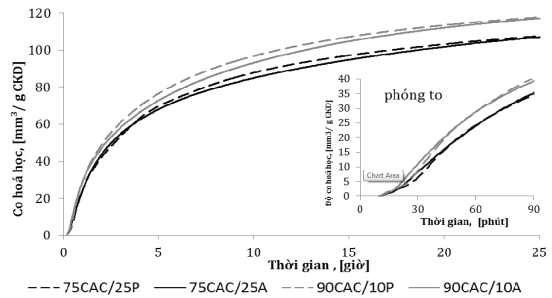
Kết quả trên Hình 3 cho thấy giá trị lớn nhất của tốc độ cơ hóa học của các cấp phối 90CAC/10C\$H_x\$ sẽ cao hơn do lượng xi măng CAC trong vữa lớn hơn. Tốc độ này đạt giá trị lớn nhất đối với hỗn hợp 90CAC/10P ($v^{90CAC/10P} = 0,872 \text{ mm}^3/\text{g CKD}/\text{phút}$), trong khi đó cấp phối có giá trị tốc độ cơ hóa học nhỏ nhất là 75CAC/25A ($v^{75CAC/25A} = 0,685 \text{ mm}^3/\text{g CKD}/\text{phút}$), các cấp phối còn lại là ($v^{90CAC/10A} = 0,809 \text{ mm}^3/\text{g CKD}/\text{phút}$ và $v^{75CAC/25P} = 0,747 \text{ mm}^3/\text{g CKD}/\text{phút}$). Ngoài ra, các cấp phối chứa anhydrite sẽ có tốc độ cơ hóa học nhanh hơn cấp phối sử dụng hemihydrate, điều này có thể được giải thích là do hàm lượng AH₃ trong các cấp phối chứa anhydrite hình thành sớm và nhiều hơn nên thúc đẩy quá trình kết tinh và rắn chắc của vữa. Sau 60 phút thủy hóa, sự khác nhau về tốc độ cơ của 4 cấp phối trên hầu như không đáng kể.

3.2 Nhiệt thủy hóa

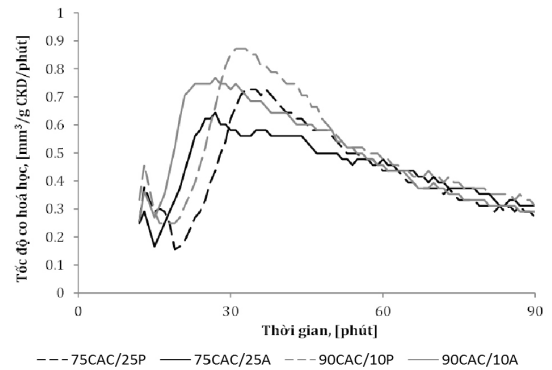
Việc đo nhiệt thủy hóa cho phép đánh giá mức độ thủy hóa của chất kết dính, kết quả đo lượng nhiệt thủy hóa tích lũy của 4 cấp phối được trình bày trên Hình 4.



Hình 4. Nhiệt tích lũy của 4 cấp phối vữa tự san phẳng: a) Đến thời điểm 90 phút; b) Đến thời điểm 24 giờ



Hình 2. Ảnh hưởng của loại và hàm lượng canxi sunphat đến độ cơ hóa học vữa tự san phẳng sử dụng chất kết dính ettringite sau 24 giờ thí nghiệm



Hình 3. Tốc độ cơ hóa học của vữa tự san phẳng theo thời gian

Kết quả trên Hình 4 cho thấy trong 90 phút đầu của quá trình thủy hóa, lượng nhiệt tích lũy của các cấp phối sử dụng nhiều CAC hơn sẽ có giá trị lớn hơn. Tuy nhiên, ở tuổi muộn, lượng nhiệt tích lũy của các cấp phối sử dụng $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ lại có giá trị cao hơn, nguyên nhân là do $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ có tốc độ hòa tan lớn, nên thúc đẩy phản ứng giữa CAC và $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ xảy ra nhiều hơn, kết quả là nhiệt thủy hóa tạo ra càng lớn. Trường hợp ngược lại các cấp phối sử dụng anhydrite sẽ có nhiệt tỏa ra thấp hơn. Lượng nhiệt tích lũy theo thứ tự các cấp phối như sau:

75CAC/25P > 90CAC/10P > 90CAC/10A > 75CAC/25A

Từ kết quả thu được, tốc độ tỏa nhiệt thủy hóa của 4 cấp phối được thể hiện trên Hình 5. Tùy theo loại và lượng canxi sunphat sử dụng và tỷ lệ CAC/C SH_x mà tốc độ tỏa nhiệt sẽ có sự khác nhau.

Các hỗn hợp vữa sử dụng chất kết dính chứa hemihydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ có 2 pic tỏa nhiệt, trong đó các cấp phối chứa anhydrite có pic nhiệt thứ 3 ở phút thứ 55, cụ thể:

Pic nhiệt đầu tiên (1) là sự hòa tan của CAC và canxi sunphat. Các phản ứng đều tỏa nhiệt trong khoảng thời gian rất ngắn. Sau giai đoạn hòa tan này kéo dài khoảng 20 phút, sau đó nhiệt thủy hóa bắt đầu tăng mạnh. Độ lớn của dòng nhiệt này thay đổi theo cấp phối tùy thuộc loại và hàm lượng canxi sunphat sử dụng như sau:

90CAC/10P > 75CAC/25P > 90CAC/10A > 75CAC/25A

Pic tỏa nhiệt thứ (2) tương ứng với sự hình thành khoáng ettringite, có thể thấy rằng khi cùng loại canxi sunphat, độ lớn của dòng nhiệt tăng lên khi tăng hàm lượng CAC do tốc độ thủy hóa của CAC diễn ra nhanh. Kết quả này tương hợp với các kết quả nghiên cứu khác [19-21]. Mặt khác, tốc độ hòa tan của hemihydrate nhanh hơn anhydrite vì vậy mà tốc độ hình thành ettringite diễn ra nhanh hơn và nhiệt tỏa ra nhiều hơn.

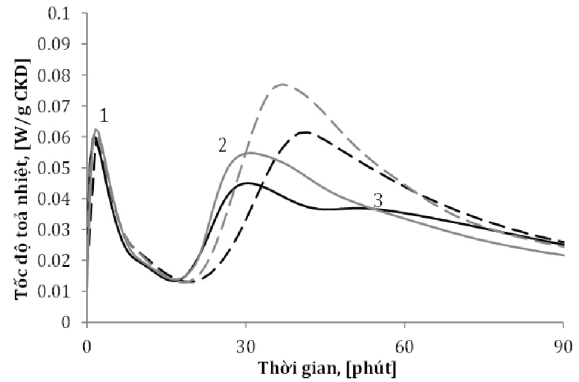
Pic nhiệt thứ (3) chỉ xảy ra trong cấp phối chứa anhydrite, nhất là đối với cấp phối 75CAC/25A, đây có thể là do sự hình thành dung dịch rắn của AFm-OH và AFm ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{C}\text{S} \cdot \text{H}_{12}$) [17,18].

Như vậy, sự tăng lượng nhiệt thủy hóa của các cấp phối chứa anhydrite xảy ra sớm hơn cấp phối dùng $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Tuy nhiên độ lớn của dòng nhiệt thủy hóa này cũng như lượng nhiệt tích lũy của các cấp phối chứa $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ lại lớn hơn hoặc chứa hàm lượng CAC cao hơn.

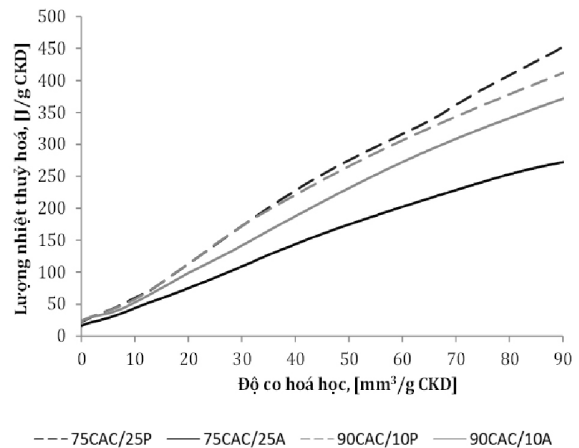
3.3 Mối liên hệ giữa nhiệt thủy hóa và co hóa học

Mối liên hệ giữa lượng nhiệt thủy hóa và độ co hóa học của chất kết dính ettringite được thể hiện qua Hình 6.

Độ co hóa học và nhiệt thủy hóa tích lũy có quan hệ tuyến tính. Qua kết quả trên có thể thấy khi sử dụng $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ trong chất kết dính ettringite, với cùng một giá trị co hóa học thì nhiệt thủy hóa phụ thuộc chủ yếu vào tỷ lệ C SH_x /CAC, tỷ lệ này càng cao thì nhiệt thủy hóa càng lớn. Trong khi đó, với trường hợp sử dụng anhydrite, nhiệt thủy hóa lại tỷ lệ nghịch với tỷ lệ C SH_x /CAC, khi tỷ lệ này tăng lên nghĩa là lượng dung xi măng CAC giảm đi thì nhiệt thủy hóa lại giảm đi. Ngoài ra, kết quả nghiên cứu còn cho thấy với cùng giá trị co hóa học thì các cấp phối sử dụng $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ có nhiệt thủy hóa cao hơn so với trường hợp sử dụng anhydrite CaSO_4 .



Hình 5. Nhiệt thủy hóa của 4 cấp phối vữa tự sản phẩm



Hình 6. Mối quan hệ giữa độ co hóa học và lượng nhiệt thủy hóa tích lũy

4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu tổng quan và thực nghiệm có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

- Việc nghiên cứu động học quá trình thủy hóa của chất kết dính hoàn toàn có thể được thực hiện thông qua phương pháp đo cơ hóa học nhất là ở tuổi sớm của chất kết dính do độ cơ hóa học và nhiệt thủy hóa có quan hệ tuyến tính.

- Độ cơ hóa học của vữa tự san phẳng trên cơ sở chất kết dính ettringite sử dụng hemihydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ sẽ thấp hơn so với các cấp phối sử dụng anhydrite CaSO_4 , tuy nhiên tốc độ thủy hóa của chất kết dính sử dụng anhydrite lại nhanh hơn so với khi sử dụng hemihydrate./.

Tài liệu tham khảo

- Balonis M. (2009), "The density of cement phases", *Cement and Concrete Research*, 39(9):733-739.
- Bentz D.P. (1997), "Three-dimensional computer simulation of cement hydration and microstructure development", *Journal American ceramic society*, 80(1):3-21.
- Erika E.H. (2001), *Early age autogenous shrinkage of concrete*, Vol 446, Technical Research Centre of Finland.
- Tazawa E., Kasai T. (1995), "Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste", *Cement and Concrete Research*, 25(2):288-292.
- Mounanga P., Khelidi A., Loukili A., Baroghel-Bouny V. (2004), "Predicting $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach", *Cement and Concrete Research*, 34(2):255-265.
- Whiting D.A., Lagergren E.S. (2009), "Cracking tendency and drying shrinkage of silica fume concrete for bridge deck applications", *ACI Materials Journal*, 97(1):71-78.
- Yodsudjai W. (2013), "Chemical shrinkage behavior of pastes made with different types of cements", *Construction Building Materials*, (40):854-862.
- Hansen W. (2011), "Report on early-age cracking - A summary of the latest document from ACI committee 231", *Concrete International*, 33(3):48-51.
- Justnes H., Sellevold E.J., Reynier B., Vanloo D., Verboven F., Van G.A., Van G.D. (2000), "Chemical shrinkage of cement pastes with plasticizing admixtures", *Nordic Concrete Research*, (24):39-54.
- Le-Bihan T. (2010), *Etude du comportement des chapes autonivelantes en ciment sulfo-alumineux: outils expérimentaux et de modélisation*, Thèse de doctorat - Insa de Lyon.
- Bouasker M., Mounanga P., Turcry P., Loukili A., Khelidj A. (2008), "Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions", *Cement and Concrete Composites*, 30(1):13-22.
- Feng L., Christian M. (2009), "Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure", *Cement and Concrete Research*, 39(4):255-265.
- Meyer C., Xueyu P. (2012), "Cement Chemical Shrinkage as Measure of Hydration Kinetics and Its Relationship with Nonevaporable Water", *International Concrete*, 109(3):341-352.
- Gaurav-Sant M.D., Dale B., Pietro L., Chiara F., Jeffrey W.B., and Jason W. (2009), "Detecting the Fluid-to-Solid Transition in Cement Pastes", *Concrete International - ACI Committee 236*.
- Bayoux J.P., Bonin A., Marcdargent S., Verschaeve M. (1990), "Study of the hydration properties of aluminous cement and calcium sulphate mixes", in *Calcium Aluminate Cements 1990*, London: E & F.N. Spon, Chapman and Hall.
- Scrivener K.L., Capmas A.(1998), *Chapter 13: Calcium Aluminate Cements*, in *LEA's Chemistry of Cement and Concrete* - P.C. Hewlett, Elsevier Science & Technology Books - London.
- Daimon M., Rhee K.H., Kondo R.(1970), "On the hydration mechanisms of calcium sulfate hemihydrate", *Journal of the Ceramic Association of Japan*, (78):277-282.
- Onishi K., Thomas A.B. (2010), "Investigation into relations among technological properties, hydration kinetics and early age hydration of self-leveling underlayments", *Cement and Concrete Research*, 40(7):1034-1040.
- Le-Saout G., Lothenbach B., Taquet P., Fryda H., Winnefeld F. (2014), "Hydration study of a calcium aluminate cement blended with anhydrite", *Calcium aluminates - Proceedings of the international conference 2014*, Avignon-France.
- Martin I., Patapy C., Cyr M. (2014), "Parametric study of binary and ternary ettringite-based systems", *Calcium aluminates-Proceedings of the international conference 2014*, Avignon - France.
- Evju C., Staffan H. (2005), "The kinetics of ettringite formation and dilatation in a blended cement with beta-hemihydrate and anhydrite as calcium sulfate", *Cement and Concrete Research*, 35(12):2310-2321.