

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA DUNG DỊCH HOẠT HÓA ĐỐI VỚI KHẢ NĂNG LINH ĐỘNG CỦA VỮA GEOPOLYMER

Effect of activated solution on workability of Geopolymer mortar

Phan Thanh Phúc¹, Nguyễn Thanh Vân² và Đỗ Đại Thắng³

¹Học viên cao học Trường Đại học Kinh tế Công nghiệp Long An, Tây Ninh, Việt Nam

²Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Quốc Gia TP.HCM, TP.HCM, Việt Nam

³Đại học Quốc Gia TP.HCM, TP.HCM, Việt Nam

phanthanhphuc1990@gmail.com

Tóm tắt — Nghiên cứu này, sử dụng các tỷ lệ và thành phần dung dịch hoạt hóa khác nhau nhằm đánh giá ảnh hưởng đến khả năng làm việc của vữa geopolymer. Thực nghiệm cho thấy các cấp phối vữa có tỷ lệ dung dịch – tro bay cao và hàm lượng Na_2SiO_3 trong dung dịch càng cao có khả năng cải thiện độ linh động của vữa nhưng cũng tác động đến khả năng giữ ổn định lớp vữa khi dùng cho việc tạo các lớp vữa in 3D. Các cấp phối với tỷ lệ dung dịch – tro bay là 0,5 và 0,6 theo khối lượng với có tỷ lệ Na_2SiO_3 – NaOH là 1 – 1 cho các tính chất về khả năng làm việc của vữa geopolymer. Do đó, ngoài việc dùng tỷ lệ dung dịch – tro bay cao và tỷ lệ Na_2SiO_3 – NaOH cao thì cũng cần có khả năng giữ ổn định lâu dài cho lớp vữa.

Abstract — In this research, the investigation with different ratios and compositions of activated solution to evaluate the influence on the workability of geopolymer mortars. Experiments show that mortar mixes with high ratios of solution to fly ash and higher Na_2SiO_3 content in the solution have the ability to improve the flexibility of the mortar but also affect the ability to maintain the stability of the mortar layer when used for creating 3D printed mortar layers. The mix proportion with ratio of activated solution – fly ash from 0.5 and 0.6, respectively, and ratio of Na_2SiO_3 – NaOH is 1 – 1 by weight for the workability properties of geopolymer mortar. Therefore, in addition to using a high solution – fly ash ratio and a high Na_2SiO_3 – NaOH ratio, it is also necessary to have the ability to maintain long-term stability for the mortar layer.

Từ khóa — Dung dịch hoạt hóa, độ linh động, độ ổn định, thời gian chảy, vữa geopolymer.

1. Giới thiệu sự cần thiết

Trong bối cảnh áp lực tăng trưởng điện tới năm 2030 vẫn còn rất lớn, Việt Nam đang đối mặt với các nguồn cung cấp năng lượng từ thủy điện và năng lượng tái tạo chưa đáp ứng được nhu cầu, thì vai trò của nhiệt điện than là nguồn năng lượng giá thành thấp có khả năng đáp ứng nhanh để thúc đẩy sự phát triển kinh tế xã hội [1].



Hình 1. Cơ cấu các nguồn năng lượng đến 2030 [1]

Trong đó, nhiệt điện than của Việt Nam rất lạc hậu so với thế giới khi chiếm đa số là công nghệ cận tới hạn với dải hiệu suất thấp nhất và cũng phát thải ô nhiễm cao nhất. Các nhà máy

nhiệt điện hiện nay và trong tương lai của nước ta đang ngày ngày thải ra một lượng phế thải tro bay, tro xỉ vô cùng lớn nếu không được xử lý và tái sử dụng thì nó sẽ gây ô nhiễm môi trường. Trong năm 2024 tổng lượng tro, xỉ phát thải từ các nhà máy nhiệt điện trên cả nước khoảng hơn 30 triệu tấn. Lượng phát thải tập trung chủ yếu ở khu vực miền Bắc chiếm 60 (%), miền Trung chiếm 27 (%) và miền Nam chiếm 13 (%) tổng lượng thải. Việc sử dụng phế thải tro, xỉ trên làm vật liệu xây dựng được coi là giải pháp nhằm giải quyết vấn đề ô nhiễm môi trường hiện nay. [2] Với chủ trương và định hướng tiếp tục đẩy mạnh việc xử lý tro, xỉ phát thải từ các nhà máy nhiệt điện dùng để sản xuất vật liệu xây dựng và sử dụng trong các công trình xây dựng sẽ tiết kiệm nguồn tài nguyên thiên nhiên, thay thế vật liệu xây dựng truyền thống có giá thành cao do nguồn cung ngày càng khan hiếm và giảm thiểu đáng kể ô nhiễm môi trường [3].

Panda và cộng sự [4] đã nghiên cứu khả năng ứng dụng công nghệ geopolymer trong in 3D. Nghiên cứu đã trình bày quá trình phát triển

<https://doi.org/10.63783/dla.2025.069>

Ngày nộp bài: 14/07/2025; Ngày nhận bản chỉnh sửa: 24/09/2025; Ngày duyệt đăng: 22/12/2025

hỗn hợp geopolymer gốc tro bay để in bê tông 3D. Ảnh hưởng tới 10 (%) xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS) và bột mịn silica (SF) trong hỗn hợp geopolymer được bảo dưỡng trong điều kiện môi trường xung quanh đã được nghiên cứu về các đặc tính mới và đã đông cứng.

Bong và cộng sự [5] đã nghiên cứu vai trò của cường độ geopolymer dùng trong công nghệ in 3D. Nghiên cứu đã cho thấy phương pháp tạo thành geopolymer để in bê tông 3D dạng bột (3DCP) cho các ứng dụng xây dựng. Kết quả cho thấy các mẫu geopolymer in được bảo dưỡng trong dung dịch kết hợp gồm dung dịch natri silicat cấp N và dung dịch natri hydroxit (8,0M) ở 60°C đạt được độ bền nén cao nhất là 30MPa.

Vũ Văn Linh và cộng sự [6] đã nghiên cứu và đánh giá một số kết quả thực nghiệm về ứng dụng tro bay trong bê tông in 3D. Thực nghiệm đánh giá cho thấy thành phần và tính chất của bê tông in 3D sử dụng các vật liệu sẵn có ở Việt Nam bao gồm cát, xỉ măng, silica fume, tro bay, phụ gia hóa dẻo và nước. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy hoàn toàn có thể chế tạo

được loại bê tông in 3D có độ chảy loãng nằm trong khoảng từ 150 đến 200 (mm), thời gian thi công 1 giờ.

Nghiên cứu công nghệ geopolymer được coi là một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn cho vật liệu xi măng để in 3D nhằm tăng cường tính bền vững của ngành xây dựng. Khả năng quan trọng về ứng dụng của geopolymer in 3D từ góc độ quy trình sản xuất, yêu cầu về khả năng in, thiết kế hỗn hợp, tính chất vật liệu giai đoạn đầu và tính bền vững. Nghiên cứu này thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của dung dịch hoạt hóa đến khả năng làm việc của vữa geopolymer dùng cho việc sử dụng trong in 3D.

2. Nguyên vật liệu và phương pháp thực nghiệm

2.1. Nguyên vật liệu

Tro bay được tái sử dụng từ các nhà máy nhiệt điện có khối lượng riêng là 2,17 (g/cm³) và độ mịn thỏa điều kiện 94 (%) lọt qua cỡ sàng 0,08 (mm).

Bảng 1. Thành phần hóa của tro bay

Thành phần	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	SO ₃	Mất khi nung
%	53,5	34,8	4,1	1,2	0,3	0,83	0,25	8,87

(Nguồn: Tác giả tổng hợp)

Thành phần hóa trình bày trong Bảng 1 cát được sử dụng là cát mịn, có khối lượng riêng 2,61 (g/cm³), khối lượng thể tích 1,45 (g/cm³), mô đun độ lớn 0,8.

Dung dịch hoạt hóa dùng để tạo phản ứng kết dính vật liệu hỗn hợp chính là dung dịch Sodium Silicate (Na₂SiO₃) và dung dịch Sodium Hydroxide (NaOH). Trong dung dịch Sodium Silicate thì tỷ lệ SiO₂/Na₂O = 3,2.

2.2. Thành phần cấp phối và phương pháp

thực nghiệm

Thành phần cấp phối vữa geopolymer được thiết kế với tỷ lệ tro bay – cát được thiết kế với tỷ lệ 1-3 theo khối lượng. Tỷ lệ dung dịch hoạt hóa geopolymer – tro bay được sử dụng lần lượt là 0,5 và 0,6 theo khối lượng. Trong dung dịch hoạt hóa geopolymer, tỷ lệ giữa Na₂SiO₃ (SS) và NaOH (SH) được thay đổi với tỷ lệ lần lượt là 0,5; 0,75; 1; 1,25 và 1,5 theo khối lượng.

Bảng 2. Thành phần cấp phối vữa geopolymer

Cấp phối	Tỷ lệ tro bay - dung dịch	Tỷ lệ SS-SH	Tro bay (kg)	Cát (kg)	Dung dịch SS (L)	Dung dịch SH (L)
G1H1	0,5	0,5	500	1500	67	133
G1H2		0,75	500	1500	86	114
G1H3		1	500	1500	100	100
G1H4		1,25	500	1500	111	89
G1H5		1,5	500	1500	120	80
G2H1	0,6	0,5	480	1140	79	157
G2H2		0,75	480	1140	101	135
G2H3		1	480	1140	118	118

G2H4		1,25	480	1140	131	105
G2H5		1.5	480	1140	142	94

(Nguồn: Tác giả tổng hợp)

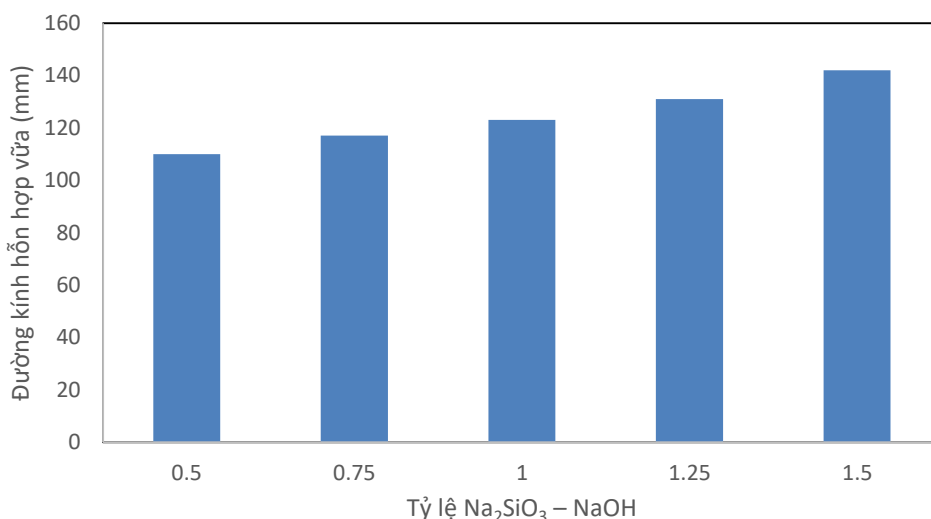
- Hỗn hợp vữa geopolimer được xác định độ lưu động theo Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 3121-3: 2003.

- Hệ số ổn định của vữa geopolimer được xác định theo bằng tỷ lệ bề rộng trung bình của lớp vữa trước và sau khi tháo côn mini xác định độ lưu động theo TCVN 3121-3: 2003.

- Thời gian chảy của hỗn hợp vữa geopolimer được xác định theo tiêu chuẩn của Châu Âu EFNARC 2002.

3. Kết quả thực nghiệm và đánh giá

3.1. Ảnh hưởng dung dịch hoạt hóa đến độ linh động của vữa geopolimer

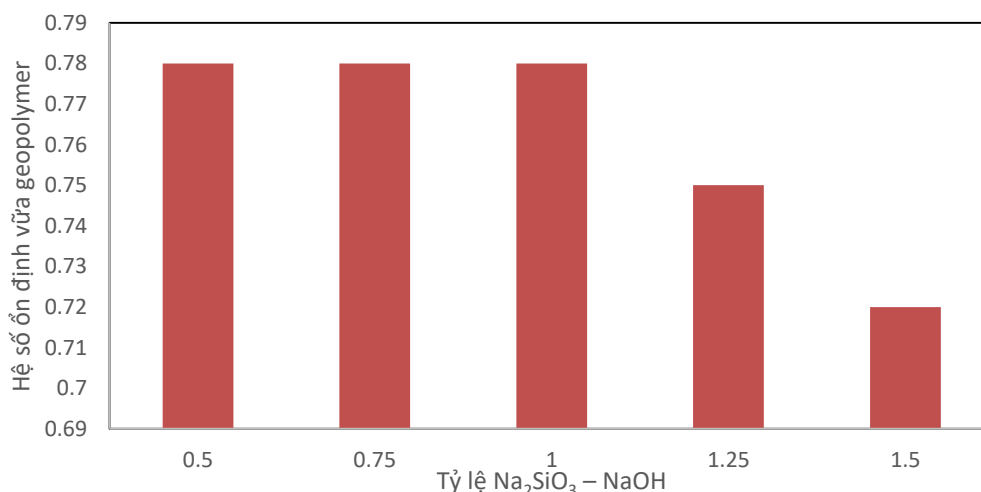


Hình 2. Mối quan hệ giữa dung dịch hoạt hóa và độ linh động của vữa geopolimer

Khi dung dịch hoạt hóa thay đổi tỷ lệ của $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH}$ lần lượt từ 0,5 đến 1,5 ảnh hưởng đến khả năng làm việc và tính chất của vữa geopolimer. Kết quả thực nghiệm trên Hình 2 trình bày cấp phối G1H1 có độ bệt đạt 110 (mm) và có xu hướng tăng dần khi tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 -$

NaOH trong dung dịch hoạt hóa tăng dần. Cấp phối G1H5 có độ bệt đạt 142 (mm), tăng khoảng 30 (%) tính linh động của vữa.

3.2. Ảnh hưởng của dung dịch hoạt hóa đến độ ổn định của vữa geopolimer



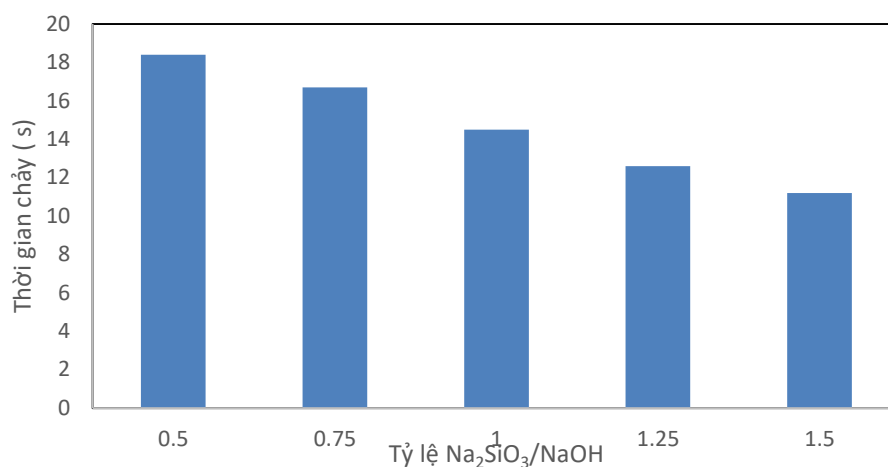
Hình 3. Ảnh hưởng của dung dịch hoạt hóa đến độ ổn định của vữa geopolimer

Thực nghiệm trên Hình 3 thể hiện hệ số ổn định của hỗn hợp vữa đạt 0.78 với cấp phối G1H1 có tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH} = 0,5$ và có xu hướng giữ ổn định giá trị này với tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH} =$ đạt đến 1, sau đó hệ số ổn định của vữa có xu

hướng giảm dần khi càng tăng tỷ lệ này trong dung dịch hoạt hóa. Cấp phối G1H5 cho thấy hệ số ổn định vữa đạt 0,72. Sự ổn định của hỗn hợp vữa giảm đi khoảng 20 (%) khi tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH}$ lớn hơn 1 trong thành phần dung dịch hoạt

hóa geopolymer cho thấy khi đó độ nhớt của vữa sẽ vượt qua ứng suất dính làm thay đổi khả năng giữ chiều cao vữa ổn định.

3.3. Ảnh hưởng dung dịch hoạt hóa đến thời gian chảy của vữa geopolymer



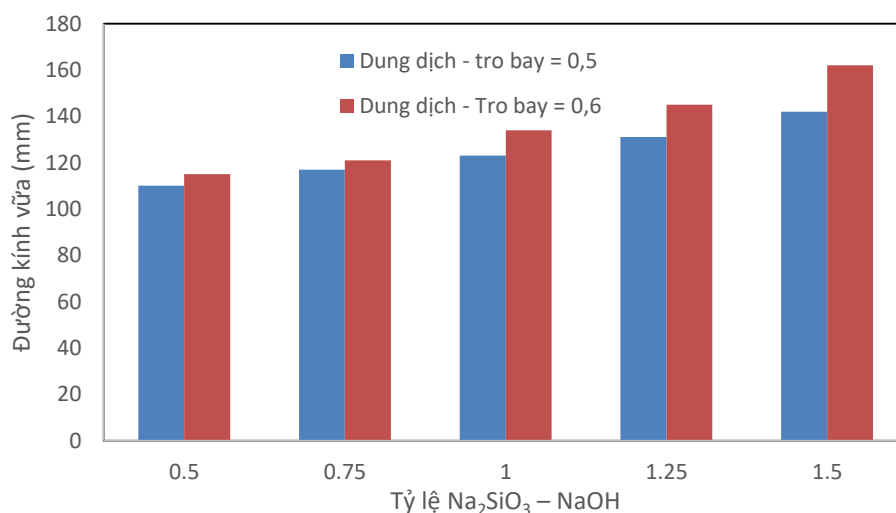
Hình 4. Ảnh hưởng của dung dịch hoạt hóa đến thời gian chảy của vữa geopolymer

Thực nghiệm trên Hình 4 trình bày tác động của tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH}$ đến thời gian chảy của vữa geopolymer. Cấp phối G1H1 có thời gian chảy đạt 18,4 (giây) và có xu hướng giảm dần thời gian chảy khi thực nghiệm tăng dần hàm lượng NaSiO_3 trong dung dịch hoạt hóa.

Cấp phối G1H5 có thời gian chảy trong phễu còn 11,2 (giây), giảm đến hơn 30 (%). Điều này cho thấy thành phần thay đổi trong dung dịch hoạt hóa với xu hướng tăng sodium silicate làm

cho hỗn hợp vữa có độ nhớt được gia tăng, kéo theo hỗn hợp vữa có độ dính kết và chảy khỏi phễu nhanh hơn. Tính chất này khá quan trọng trong việc thay đổi đặc tính của vữa geopolymer thường để chuyển thành vữa geopolymer có khả năng dính kết, tự chảy khỏi miệng rải cho việc tạo thành các lớp vật liệu liên tục khi sử dụng cho công nghệ in 3D.

3.4. Ảnh hưởng tỷ lệ dung dịch hoạt hóa khả năng làm việc của vữa geopolymer



Hình 5. Mối quan hệ giữa tỷ lệ dung dịch hoạt hóa và độ linh động của vữa geopolymer

Kết quả thực nghiệm trong Hình 5 trình bày ảnh hưởng của dung dịch hoạt hóa đến độ bệt của hỗn hợp vữa geopolymer. Cấp phối sử dụng tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH} = 0,5$ cho thấy G2H1 có độ bệt đạt 115 (mm), cao hơn so với G1H1. Khi tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH}$ trong các cấp phối càng tăng thì xu hướng độ bệt được cải thiện với tỷ lệ dung

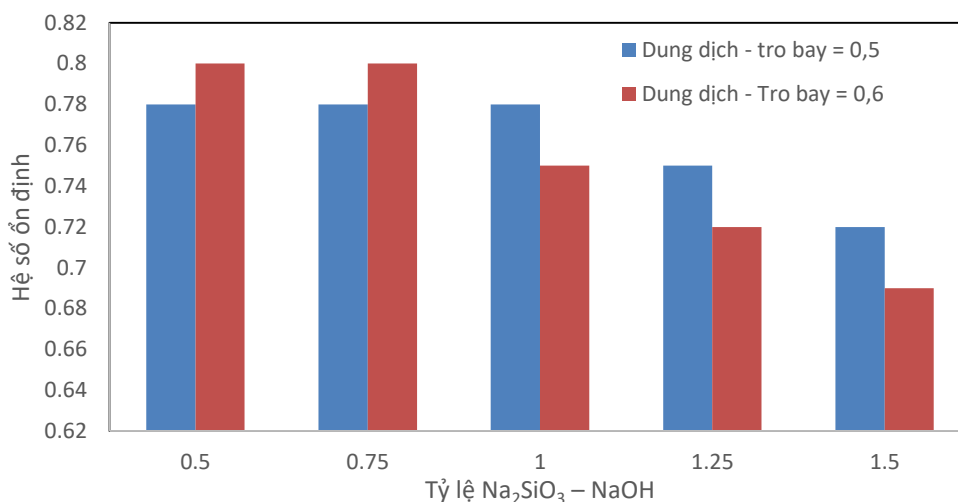
dịch – tro bay cao. Cấp phối G2H5 có độ bệt đạt đến 162 (mm), tăng đến 40 (%) so với G2H1 và tăng hơn 15 (%) so với G1H1. Điều này cho thấy, cấp phối vữa có tỷ lệ dung dịch – tro bay cao và hàm lượng Na_2SiO_3 trong dung dịch càng cao thì có khả năng cải thiện khả năng linh động của vữa geopolymer.

Kết quả thực nghiệm trong Hình 6 trình bày ảnh hưởng của dung dịch hoạt hóa đến hệ số ổn định của hỗn hợp vữa geopolimer.

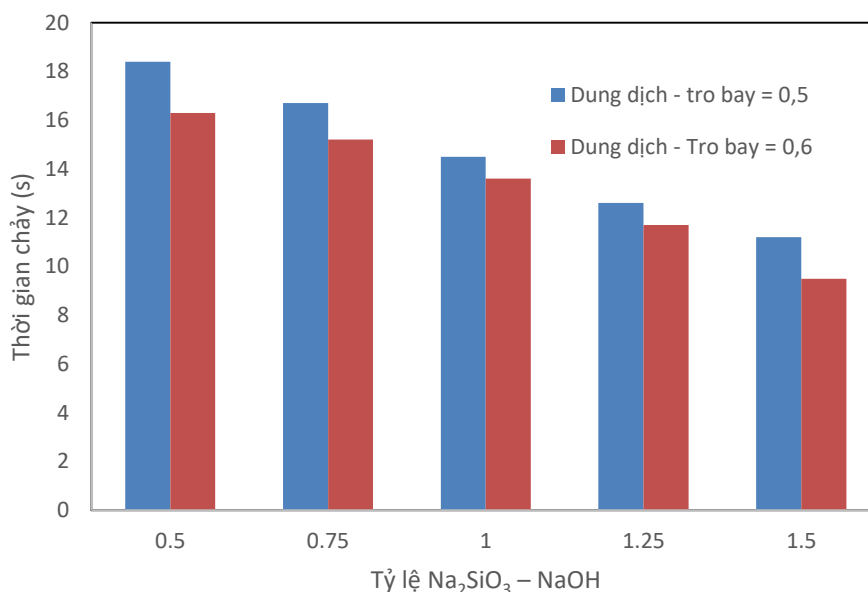
Cấp phối sử dụng tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH} = 0,5$ cho thấy G2H1 có hệ số ổn định đạt 0,8 so với 0,78 của cấp phối G1H1. Khi tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH} = 0,75$ thì hệ số ổn định vẫn được giữ ổn định trong G2H2. Khi tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH}$ tiếp

tục tăng thêm thì hệ số ổn định có xu hướng giảm xuống.

Cấp phối G2H5 có hệ số ổn định chỉ còn 0,69. Với tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH} = 1-1,5$ thì các cấp phối G1H3, G1H4 và G1H5 cho thấy khả năng giữ ổn định vữa geopolimer tốt hơn so với các cấp phối G2.



Hình 6. Mối quan hệ giữa tỷ lệ dung dịch hoạt hóa và hệ số ổn định của vữa geopolimer



Hình 7. Mối quan hệ giữa tỷ lệ dung dịch hoạt hóa và thời gian chảy của vữa geopolimer

Kết quả thực nghiệm trong Hình 7 trình bày ảnh hưởng của dung dịch hoạt hóa đến thời gian chảy của hỗn hợp vữa geopolimer.

Cấp phối sử dụng tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH} = 0,5$ cho thấy G2H1 có đạt 16,3 (giây), thấp hơn so cấp phối G1H1.

Khi tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH}$ tăng dần thì các cấp phối G2 có xu hướng rút ngắn dần thời gian chảy.

Khi tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \text{NaOH} = 1.5$ thì cấp phối G2H5 có thời gian chảy còn 9,5 (giây), rút ngắn được đến 40 (%) so với G2H1 và rút ngắn 50 (%) so với G1H1.

4. Kết luận

Nghiên cứu sử dụng tỷ lệ và thành phần dung dịch hoạt hóa thay đổi nhằm đánh giá ảnh hưởng đến khả năng làm việc của vữa geopolimer dùng cho công nghệ in 3D đạt được các kết quả cho thấy các cấp phối vữa có tỷ lệ

dung dịch – tro bay cao và hàm lượng NaSiO_3 trong dung dịch càng cao có khả năng cải thiện độ linh động của vữa nhưng cũng tác động đến khả năng giữ ổn định lớp vữa khi dùng cho việc tạo các lớp vữa in 3D.

Các cấp phối G1 và G2 có tỷ lệ Na_2SiO_3 – NaOH là 1-1 cho các tính chất về khả năng làm việc của vữa geopolymer. Do đó, ngoài việc dùng tỷ lệ dung dịch – tro bay cao và tỷ lệ Na_2SiO_3 – NaOH cao thì cũng cần có khả năng giữ ổn định lâu dài cho lớp vữa.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bộ Công thương, *Điều chỉnh Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050 (Quy hoạch điện VIII)*, 2025.
- [2] Viện Vật liệu xây dựng, *Điều tra, khảo sát đánh giá và đề xuất giải pháp sử dụng triệt để nguồn tro xỉ nhiệt điện trong sản xuất vật liệu xây dựng*, 2016.
- [3] Sở Khoa học Công nghệ Thành phố Hồ Chí Minh, *Báo cáo phân tích xu hướng công nghệ, Xu hướng ứng dụng tro, xỉ nhiệt điện trong sản xuất vật liệu xây dựng*, 2019.
- [4] B. Panda, C. Unluer and M.J. Tan, “Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing”, *Cement Concr. Compos.*, 94, pp. 307-314, 2018.
- [5] S.H. Bong, M. Xia, B. Nematollahi and C. Shi, “Ambient temperature cured ‘just-add-water’ geopolymer for 3D concrete printing applications”, *Cement Concr. Compos.*, vol.121, 2021
- [6] Vũ Văn Linh, Lê Việt Hùng, Lê Trung Thành, Nguyễn Công Hậu, Tạ Minh Phương Bảo và Nguyễn Văn Tuấn, “Một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm về bê tông in 3D”, *Tạp chí Vật liệu & Xây dựng*, Bộ Xây dựng: tập 11, số 6, 2021.