



TAGUCHI-BASED ANALYSIS OF SLUMP AND COMPRESSIVE STRENGTH OF FINE-GRAINED ONE-PART GEOPOLYMER CONCRETE INCORPORATING CRUSHED SAND

Trinh Hoang Son

University of Transport Technology, 54 Trieu Khuc, Thanh Liet, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 10/05/2026

Revised: 11/08/2026

Accepted: 12/08/2026

Published online: 15/08/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.6.5>

* *Corresponding author*

Email: sonth@utt.edu.vn; Tel: +84989930513

Abstract. The need to reduce Portland cement consumption and replace natural sand has increased interest in one-part geopolymer concrete incorporating crushed sand. However, achieving adequate workability without compromising strength remains challenging. This study investigated the effects of the water-to-binder ratio (N/CKD), dry activator-to-binder ratio (CHH/CKD), and superplasticizer content (PG) on the slump and 28-day compressive strength of fine-grained one-part geopolymer concrete. The experiments were arranged using a Taguchi orthogonal array and evaluated using mean responses, signal-to-noise ratios (S/N). Increasing PG from 0.8% to 1.6% increased the average slump from 74 mm to 108 mm. Increasing N/CKD from 0.28 to 0.36 increased the average slump from 80 mm to 106 mm but reduced the average compressive strength from 68.28 MPa to 42.41 MPa. The factors affecting slump were ranked as $PG > N/CKD > CHH/CKD$, whereas those affecting compressive strength were ranked as $N/CKD > CHH/CKD > PG$. Within the investigated ranges, increasing the superplasticizer content was more effective than increasing the water-to-binder ratio for improving workability while limiting strength loss. The results provide an experimental basis for proportioning fine-grained one-part geopolymer concrete containing crushed sand.

Keywords: One-part geopolymer concrete; dry activator; crushed sand; Taguchi method; slump; compressive strength.

@ 2026 University of Transport and Communications



PHÂN TÍCH ĐỘ SỤT VÀ CƯỜNG ĐỘ NÉN CỦA BÊ TÔNG GEOPOLYMER HẠT NHỎ SỬ DỤNG CÁT NGHIỀN VÀ CHẤT HOẠT HÓA MỘT THÀNH PHẦN BẰNG PHƯƠNG PHÁP TAGUCHI

Trịnh Hoàng Sơn

Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải, Số 54 Triều Khúc, Thanh Liệt, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 10/05/2026

Ngày nhận bài sửa: 11/08/2026

Ngày chấp nhận đăng: 12/08/2026

Ngày xuất bản Online: 15/08/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.6.5>

* Tác giả liên hệ

Email: sonth@utt.edu.vn; Tel: +84989930513

Tóm tắt. Nhu cầu giảm sử dụng xi măng Portland và thay thế cát tự nhiên đang thúc đẩy nghiên cứu bê tông geopolymer một thành phần sử dụng cát nghiền, trong đó việc bảo đảm đồng thời tính công tác và cường độ vẫn là một thách thức. Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD), tỷ lệ chất hoạt hóa khô/chất kết dính (CHH/CKD) và hàm lượng phụ gia siêu dẻo (PG) đến độ sụt và cường độ nén 28 ngày của bê tông geopolymer hạt nhỏ. Các thí nghiệm được bố trí theo ma trận trực giao và phân tích bằng giá trị trung bình, tỷ số tín hiệu trên nhiễu (S/N). Khi PG tăng từ 0,8% lên 1,6%, độ sụt trung bình tăng từ 74 mm lên 108 mm. Khi N/CKD tăng từ 0,28 lên 0,36, độ sụt trung bình tăng từ 80 mm lên 106 mm, trong khi cường độ nén trung bình giảm từ 68,28 MPa xuống 42,41 MPa. Thứ tự ảnh hưởng đến độ sụt là $PG > N/CKD > CHH/CKD$, còn đối với cường độ nén là $N/CKD > CHH/CKD > PG$. Trong phạm vi nghiên cứu, kết quả cho thấy việc tăng PG phù hợp hơn việc tăng N/CKD khi cần cải thiện tính công tác mà vẫn hạn chế được suy giảm cường độ.

Từ khóa: Bê tông geopolymer một thành phần; chất hoạt hóa khô; cát nghiền; phương pháp Taguchi; độ sụt; cường độ nén.

@2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông geopolimer là một hướng vật liệu thay thế có tiềm năng trong bối cảnh ngành xây dựng cần giảm sự phụ thuộc vào xi măng Portland và tăng cường sử dụng các nguồn vật liệu giàu aluminosilicat như tro bay và xỉ hạt lò cao. Khác với bê tông xi măng truyền thống, chất kết dính geopolimer được hình thành thông qua quá trình hoạt hóa các tiền chất giàu SiO_2 và Al_2O_3 trong môi trường kiềm, tạo thành các sản phẩm liên kết có khả năng đóng rắn và phát triển cường độ [1, 2]. Các kết quả nghiên cứu cho thấy tính công tác và cường độ của bê tông geopolimer phụ thuộc đáng kể vào loại tiền chất, đặc điểm cốt liệu, lượng nước và chất hoạt hóa. Nagajothi và Elavenil [3] cho thấy sự thay đổi hàm lượng GGBS, cát nghiền và tỷ lệ chất hoạt hóa có thể tạo ra các xu hướng khác nhau đối với độ sụt và cường độ nén của bê tông geopolimer.

Trong các hệ geopolimer, geopolimer một thành phần (one-part geopolimer) được quan tâm nhờ khả năng đơn giản hóa quá trình chuẩn bị và thi công so với hệ hoạt hóa lỏng truyền thống. Thay vì phải chuẩn bị trước dung dịch kiềm, chất hoạt hóa (ở trạng thái rắn) và trộn cùng các thành phần khô trước khi bổ sung nước [4]. Cách tiếp cận này có thể làm giảm các thao tác liên quan đến pha chế, vận chuyển và sử dụng dung dịch kiềm đậm đặc, qua đó thuận lợi hơn cho khả năng ứng dụng thực tế. Tuy nhiên, tính chất của geopolimer một thành phần phụ thuộc chặt chẽ vào tỷ lệ nước/chất kết dính, hàm lượng chất hoạt hóa và phụ gia hóa học. Sự thay đổi các thông số này có thể ảnh hưởng đồng thời đến tính công tác của hỗn hợp tươi và sự phát triển cường độ của vật liệu sau đóng rắn [4-6]. Vì vậy, việc đánh giá có hệ thống mức độ ảnh hưởng tương đối của chúng đối với quá trình phát triển loại vật liệu này là rất cần thiết.

Bên cạnh hệ chất kết dính, cát nghiền là một nguồn cốt liệu nhỏ thay thế đáng quan tâm trong điều kiện nhu cầu sử dụng cát cho bê tông ngày càng lớn. Saravanan và các cộng sự [7] cũng khảo sát bê tông geopolimer tro bay sử dụng cát nghiền làm cốt liệu nhỏ, qua đó cho thấy khả năng sử dụng cát nghiền thay thế cát tự nhiên trong loại vật liệu này. Tuy nhiên, cát nghiền khác cát tự nhiên ở hình thái hạt thường góc cạnh, bề mặt nhám và thành phần hạt mịn đặc trưng, do đó có thể làm tăng ma sát nội và nhu cầu nước của hỗn hợp. Ngược lại, khi thành phần hạt được kiểm soát phù hợp, cát nghiền có thể góp phần cải thiện khả năng chèn lấp và cấu trúc của hệ cốt liệu. Nagajothi và Elavenil [3] nhận thấy rằng độ sụt có xu hướng giảm khi tăng tỷ lệ cát nghiền, trong khi một số hỗn hợp thay thế 50% và 100% cát tự nhiên bằng cát nghiền lại đạt cường độ nén cao hơn hỗn hợp đối chứng. Kết quả này cho thấy ảnh hưởng của cát nghiền đến tính công tác và cường độ nén không nhất thiết diễn ra theo cùng một xu hướng và cần được xem xét cùng với các thông số của hệ chất kết dính.

Sự đánh đổi giữa tính công tác và cường độ cũng được quan sát đối với hàm lượng chất hoạt hóa và nước. Trong nghiên cứu của Nagajothi và Elavenil [3], các cấp phối chứa nhiều dung dịch hoạt hóa hơn có độ sụt lớn hơn, trong khi khả năng chịu nén ở 28 ngày suy giảm. So với mức 40%, việc sử dụng 45% và 50% dung dịch hoạt hóa làm cường độ giảm tương ứng khoảng 7% và 14%. Đồng thời, việc tăng hàm lượng GGBS trong hệ FA-GGBS làm giảm tính công tác nhưng cải thiện cường độ nén; ở tuổi 28 ngày, các mức GGBS 10%, 20% và 30% cho cường độ cao hơn lần lượt khoảng 17%, 31% và 41% so với hệ chỉ sử dụng tro bay. Các kết quả này cho thấy việc đánh giá riêng một đáp ứng có thể chưa phản ánh đầy đủ ảnh hưởng của các thông số cấp phối. Độ sụt và cường độ nén 28 ngày vì vậy được xem là hai đáp ứng kỹ thuật quan trọng, đại diện tương ứng cho tính công tác của hỗn hợp tươi và khả năng chịu lực của vật liệu sau đóng rắn.

Để đánh giá có hệ thống ảnh hưởng của nhiều thông số cấp phối, phương pháp Taguchi cung cấp một khung thiết kế thực nghiệm trực giao kết hợp với tỷ số tín hiệu trên nhiễu (signal-to-noise ratio, S/N). Khác với mục tiêu xây dựng một hàm đáp ứng liên tục để nội suy các điểm tối ưu ngoài các mức thực nghiệm, Taguchi phù hợp với mục tiêu so sánh hiệu ứng của các yếu tố tại các mức khảo sát xác định. Tại Việt Nam, Nguyễn Thị Thu Nga và Trần Việt Hưng [9] đã áp dụng ma trận trực giao Taguchi để đánh giá ảnh hưởng của thời gian dưỡng hồ nhiệt, nồng độ dung dịch NaOH, tỷ lệ dung dịch hoạt hóa/tro bay và tuổi thí nghiệm đến cường độ của vữa geopolimer tro bay (không sử dụng xỉ lò cao GGBS). Kết quả cho thấy phương pháp Taguchi có thể hỗ trợ nhận diện mức ảnh hưởng của các yếu tố chi phối và lựa chọn các mức yếu tố phù hợp với số lượng tổ hợp thí nghiệm hạn chế.

Mặc dù các nghiên cứu trước đã xem xét ảnh hưởng của GGBS, cát nghiền, chất hoạt hóa và tỷ lệ dung dịch hoạt hóa đến tính công tác và cường độ của bê tông geopolimer, số lượng nghiên cứu đánh giá đồng thời ba thông số N/CKD, CHH/CKD và PG đối với cả độ sụt và cường độ nén của bê tông geopolimer một thành phần FA-GGBS sử dụng cát nghiền vẫn còn hạn chế [3-7]. Nghiên cứu liên quan trực tiếp như Nagajothi và Elavenil [3] sử dụng hệ hoạt hóa kiềm dạng lỏng, trong khi hệ geopolimer sử dụng chất hoạt hóa khô một thành phần kết hợp cát nghiền vẫn cần được nghiên cứu sâu hơn. Bên cạnh đó, việc đánh giá trong cùng một chương trình thực nghiệm ảnh hưởng của tỷ lệ nước/chất kết dính, tỷ lệ chất hoạt hóa khô/chất kết dính và hàm lượng phụ gia siêu dẻo đến cả độ sụt và cường độ nén 28 ngày còn hạn chế, đặc biệt đối với nguồn tro bay, GGBS và cát nghiền sử dụng tại Việt Nam. Khoảng trống này đặt ra nhu cầu xác định chiều hướng và thứ tự ảnh hưởng của từng yếu tố đối với hai đáp ứng độ sụt và cường độ nén.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của ba yếu tố gồm tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD), tỷ lệ chất hoạt hóa khô/chất kết dính (CHH/CKD) và hàm lượng phụ gia siêu dẻo (PG) đến độ sụt và cường độ nén 28 ngày của bê tông geopolimer hạt nhỏ một thành phần sử dụng cát nghiền. Hỗn hợp bê tông geopolimer trong nghiên cứu không sử dụng cốt liệu lớn; cát nghiền là cốt liệu duy nhất. Các thí nghiệm được bố trí theo ma trận trực giao Taguchi; so sánh các mức yếu tố và thiết lập thứ tự ảnh hưởng đối với từng đáp ứng được đánh giá thông qua giá trị trung bình đáp ứng, tỷ số S/N. Qua đó, nghiên cứu xác định thứ tự ảnh hưởng của từng yếu tố đối với các đáp ứng khảo sát, cung cấp cơ sở thực nghiệm cho bước đầu lựa chọn các thông số thành phần phù hợp của bê tông geopolimer hạt nhỏ một thành phần sử dụng cát nghiền và bổ sung dữ liệu cho hướng phát triển vật liệu này trong điều kiện Việt Nam.

2. VẬT LIỆU CHẾ TẠO VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu sử dụng

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu gồm tro bay (FA), xỉ hạt lò cao nghiền mịn (GGBS), cát nghiền, chất hoạt hóa khô, phụ gia siêu dẻo và nước trộn. Tro bay Phả Lại và xỉ hạt lò cao nghiền mịn S95 Hòa Phát đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật tương ứng của TCVN 10302:2014 [10] và TCVN 11586:2016 [11] và được sử dụng làm các tiền chất aluminosilicat của hệ chất kết dính geopolimer. Thành phần hóa học của hai vật liệu được trình bày trong Bảng 1.

Chất hoạt hóa sử dụng là chất hoạt hóa kiềm dạng bột khô, được bổ sung trực tiếp vào hỗn hợp vật liệu rắn trước khi cho nước vào quá trình trộn. Chất hoạt hóa có công thức ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), khối lượng riêng $2,55 \text{ g/cm}^3$ và khối lượng thể tích xốp $0,89 \text{ g/cm}^3$; thành phần hóa học gồm Na_2O 29,00%, SiO_2 29,12%, cặn không tan 0,02% và Fe 54 ppm.



Hình 1. Chất kết dính geopolymer sử dụng chất hoạt hóa một thành phần dạng bột khô.

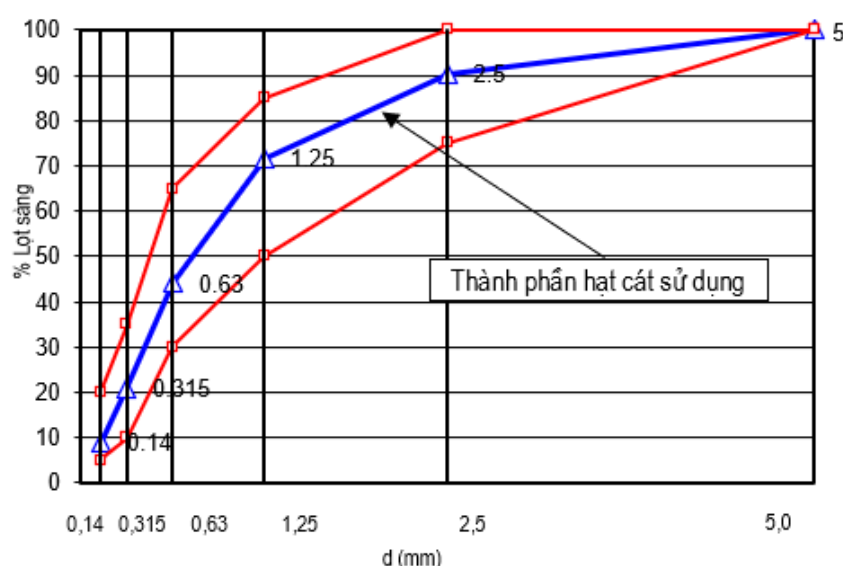


Hình 2. Cát nghiền.

Phụ gia hóa học được sử dụng để cải thiện tính công tác của hỗn hợp. Nghiên cứu sử dụng phụ gia siêu dẻo BestFlow R342 do Bestmix, Việt Nam sản xuất, thuộc nhóm polycarboxylate ether/ester (PCE). Phụ gia ở dạng lỏng nhớt, màu nâu nhạt, có pH 4,28 tại 20 °C và khối lượng riêng 1,07 g/cm³.

Nước sử dụng cho thí nghiệm là nước sạch, không chứa tạp chất có khả năng ảnh hưởng bất lợi đến quá trình đông rắn và phát triển cường độ của bê tông. Nước trộn đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của TCVN 4506:2012 [12].

Cát nghiền được sử dụng làm cốt liệu duy nhất của bê tông geopolymer hạt nhỏ; hỗn hợp không sử dụng cốt liệu lớn. Cát có kích thước hạt lớn nhất 4,75 mm và mô đun độ lớn 2,92. Thành phần hạt được xác định theo TCVN 7572-2:2006 [13] và đối chiếu với yêu cầu kỹ thuật đối với cát nghiền dùng cho bê tông theo TCVN 9205:2012 [14]. Theo TCVN 9205:2012 [14], với mô đun độ lớn 2,92, cát dùng cho thí nghiệm thuộc nhóm cát nghiền thô, là nhóm cát được phép sử dụng để chế tạo bê tông. Tỷ lệ hạt lọt qua kích thước 0,075 mm đạt 8,20%, nhỏ hơn mức giới hạn 16% áp dụng cho nhóm này theo TCVN 9205:2012 [14]. Các đặc trưng kỹ thuật của cát nghiền được trình bày trong Bảng 2, còn đường cong thành phần hạt và giới hạn quy định được thể hiện ở Hình 3.



Hình 3. Thành phần hạt của cát nghiền và giới hạn theo TCVN 9205:2012.

Bảng 1. Thành phần hóa học của FA và GGBS.

Thành phần hóa học	FA, % khối lượng	GGBS, % khối lượng
SiO ₂	54,20	34,80
Al ₂ O ₃	24,10	13,20
Fe ₂ O ₃	7,35	0,70
CaO	3,80	39,50
MgO	1,60	7,20
SO ₃	0,58	1,60
Na ₂ O	0,72	0,25
K ₂ O	1,20	0,45
Mất khi nung	3,10	1,10
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	85,65	-

Bảng 2. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của cát nghiền.

Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị
Kích thước hạt lớn nhất	mm	4,75
Mô đun độ lớn		2,92
Khối lượng riêng	g/cm ³	2,69
Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	1 550
Độ hút nước	%	1,45
Hàm lượng hạt nhỏ hơn 0,075 mm	%	8,20
Hàm lượng bụi, bùn, sét	%	1,20
Độ ẩm tự nhiên	%	0,50

2.2. Thiết kế thí nghiệm và các yếu tố khảo sát theo Taguchi

Nghiên cứu sử dụng ma trận trực giao Taguchi L9(3³) để xác định mức độ ảnh hưởng của ba thông số cấp phối đến độ sụt và cường độ nén 28 ngày của bê tông geopolymere hạt nhỏ một thành phần. Các yếu tố khảo sát gồm tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD), tỷ lệ chất hoạt hóa khô/chất kết dính (CHH/CKD) và hàm lượng phụ gia hóa học (PG), mỗi yếu tố được bố trí tại ba mức như trình bày trong Bảng 3. Khối lượng chất kết dính (CKD) được xác định bằng tổng khối lượng tro bay, GGBS và chất hoạt hóa khô. Theo đó, N/CKD là tỷ số giữa khối lượng nước trộn và khối lượng CKD; CHH/CKD là tỷ số giữa khối lượng chất hoạt hóa khô và khối lượng CKD; PG được tính theo phần trăm khối lượng CKD. Khoảng khảo sát được lựa chọn dựa trên thí nghiệm sơ bộ, khuyến cáo sử dụng phụ gia của nhà sản xuất và tham khảo các các miền cấp phối đã được công bố đối với geopolymere một thành phần [5, 6, 15].

Trong phần tiền chất, tỷ lệ FA:GGBS được giữ cố định ở 60:40 theo khối lượng trong toàn bộ chương trình thí nghiệm. Lượng cát nghiền cũng được giữ không đổi ở 1430 kg/m³ nhằm tách biệt ảnh hưởng của N/CKD, CHH/CKD và PG. Việc lựa chọn tỷ lệ FA:GGBS tham khảo kết quả thí nghiệm sơ bộ và các hệ geopolymere một thành phần FA–GGBS đã được công bố [16].

Bảng 3. Các yếu tố và mức thí nghiệm theo phương pháp Taguchi

Ký hiệu	Yếu tố khảo sát	Đơn vị	Mức 1	Mức 2	Mức 3
A	N/CKD		0,28	0,32	0,36
B	CHH/CKD	%	8	12	16
C	PG	% khối lượng CKD	0,8	1,2	1,6

Ma trận trực giao Taguchi gồm 9 tổ hợp của ba yếu tố, mỗi yếu tố có ba mức. Mỗi tổ hợp được thực hiện bằng ba mẻ trộn độc lập. Tổng cộng có 27 mẻ thí nghiệm độc lập, tương ứng 27 kết quả độ sụt và 27 cường độ nén. Các kết quả này được sử dụng trong phân tích Taguchi. Ma trận Taguchi trong nghiên cứu được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Ma trận Taguchi.

Cấp phối	Lần lặp	N/CKD	CHH/CKD (%)	PG (%)	Độ sụt (mm)	Cường độ nén 28 ngày (MPa)
M1	1	0,28	8,0	0,8	59	55,6
M1	2	0,28	8,0	0,8	63	59,0
M1	3	0,28	8,0	0,8	64	61,2
M2	1	0,28	12,0	1,2	82	72,6
M2	2	0,28	12,0	1,2	86	78,2
M2	3	0,28	12,0	1,2	90	81,3
M3	1	0,28	16,0	1,6	89	66,5
M3	2	0,28	16,0	1,6	92	69,1
M3	3	0,28	16,0	1,6	95	71,0
M4	1	0,32	8,0	1,2	91	49,0
M4	2	0,32	8,0	1,2	97	52,5
M4	3	0,32	8,0	1,2	100	55,0
M5	1	0,32	12,0	1,6	104	58,9
M5	2	0,32	12,0	1,6	109	62,8
M5	3	0,32	12,0	1,6	111	65,9
M6	1	0,32	16,0	0,8	69	52,5
M6	2	0,32	16,0	0,8	72	56,0
M6	3	0,32	16,0	0,8	75	58,8
M7	1	0,36	8,0	1,6	119	35,2
M7	2	0,36	8,0	1,6	124	37,4
M7	3	0,36	8,0	1,6	129	39,6
M8	1	0,36	12,0	0,8	84	44,5
M8	2	0,36	12,0	0,8	89	47,6
M8	3	0,36	12,0	0,8	91	49,8
M9	1	0,36	16,0	1,2	101	40,0
M9	2	0,36	16,0	1,2	107	42,8
M9	3	0,36	16,0	1,2	110	44,8

2.3. Quy trình chế tạo và thí nghiệm mẫu

Tro bay, GGBS, chất hoạt hóa khô và cát nghiền được định lượng theo cấp phối thiết kế. Các vật liệu được định lượng theo thành phần của từng cấp phối trong ma trận thí nghiệm.

Tro bay, xỉ hạt lò cao nghiền mịn, chất hoạt hóa khô và cát nghiền được trộn khô trước nhằm bảo đảm sự phân bố đồng đều của các thành phần rắn. Sau đó, nước cùng phụ gia được bổ sung vào hỗn hợp và tiếp tục được trộn cho đến khi đạt trạng thái đồng nhất. Ngay sau khi kết thúc quá trình trộn, độ sụt của hỗn hợp bê tông tươi được xác định bằng phương pháp côn tiêu chuẩn theo TCVN 3106: 2022 [17]. Sau khi xác định độ sụt, hỗn hợp được đổ vào khuôn hình trụ có kích thước 150 mm × 300 mm và được đầm bàn rung theo cùng một quy trình đối với tất cả các cấp phối. Mỗi cấp phối được chế tạo 3 mẻ độc lập để xác định cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày. Mẫu lưu trong khuôn 24 h trước khi tháo khuôn và bảo dưỡng ở điều kiện phòng với nhiệt độ 28 ± 2 °C, độ ẩm tương đối $60 \pm 20\%$ cho đến tuổi thí nghiệm. Cường độ chịu nén được xác định ở tuổi 28 ngày theo TCVN 3118: 2022 [18]. Mẫu được đặt vào máy nén và gia tải đến khi phá hoại.



Hình 4. Mẫu bê tông Geopolymer sau khi đúc mẫu.

2.4. Phương pháp phân tích Taguchi

Ảnh hưởng của N/CKD, CHH/CKD và PG đến độ sụt và cường độ nén 28 ngày được đánh giá thông qua giá trị trung bình đáp ứng và tỷ số tín hiệu trên nhiễu (signal-to-noise ratio, S/N) theo phương pháp Taguchi [8]. Tiêu chí “lớn hơn là tốt hơn” (larger-the-better) được sử dụng cho cả hai đáp ứng để xếp hạng xu hướng ảnh hưởng trong phạm vi khảo sát. Đối với độ sụt, tiêu chí này chỉ phản ánh khả năng làm tăng tính công tác, không hàm ý rằng độ sụt càng lớn càng tối ưu. Tỷ số S/N được xác định theo biểu thức:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

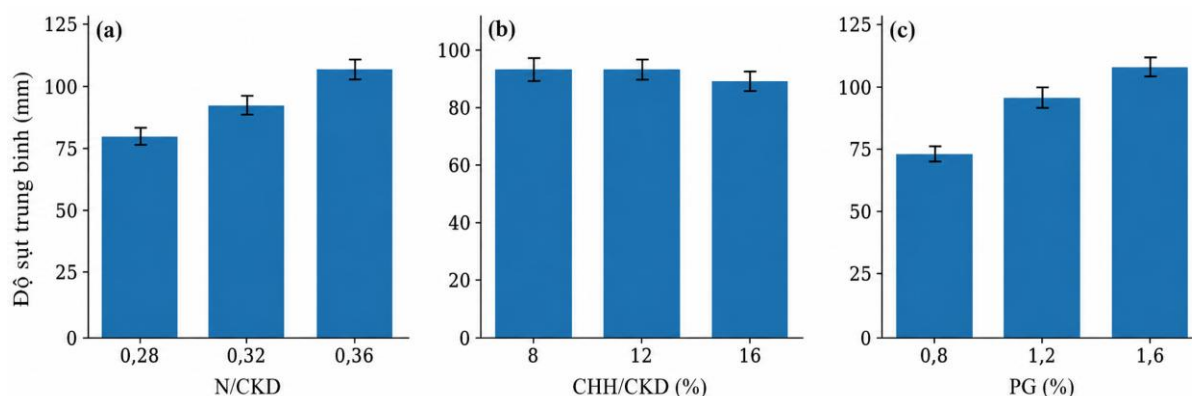
Trong đó, y_i là giá trị đáp ứng của phép đo thứ i và n là số phép đo lặp. Giá trị Delta được xác định bằng chênh lệch giữa giá trị lớn nhất và nhỏ nhất tại ba mức của từng yếu tố; yếu tố có Delta lớn hơn được xếp hạng có ảnh hưởng cao hơn. Toàn bộ phân tích được thực hiện bằng phần mềm Minitab.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của các yếu tố đến độ sụt

Hình 5 trình bày độ sụt trung bình và độ lệch chuẩn tại ba mức của từng yếu tố. Nhìn chung, độ phân tán tương đối nhỏ. Chênh lệch độ sụt giữa các mức N/CKD và PG lớn hơn rõ

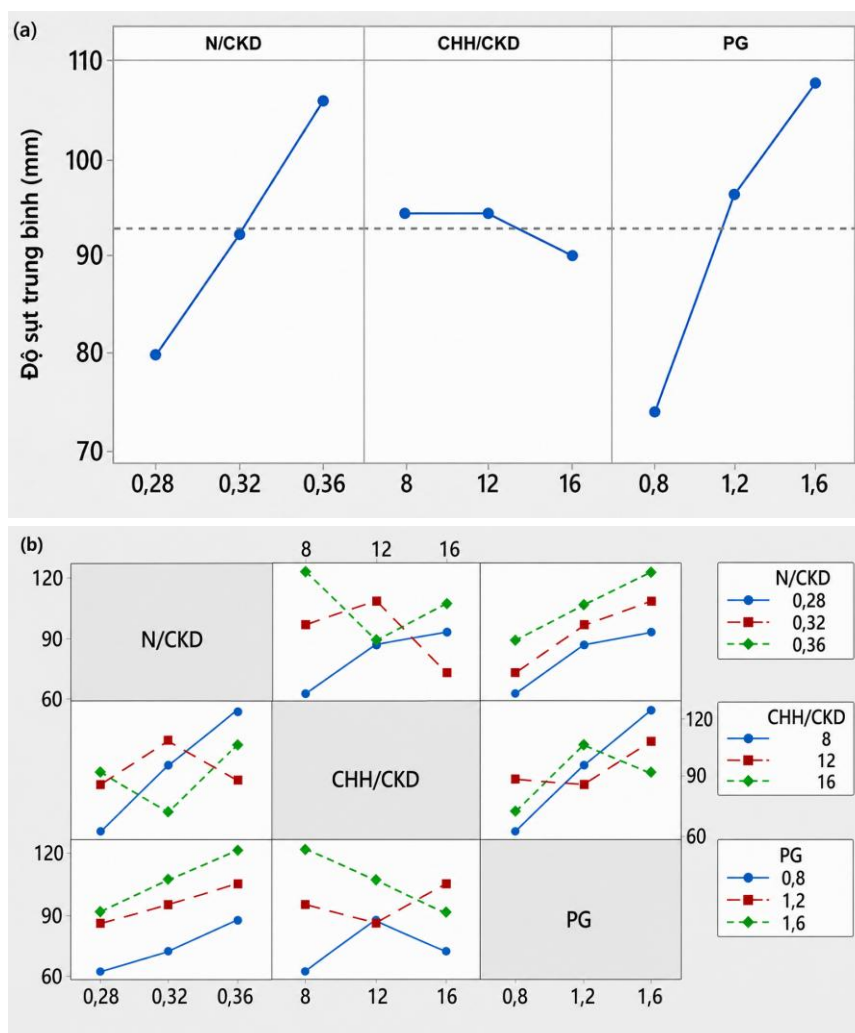
rệt so với độ lớn của các thanh sai số, cho thấy xu hướng ảnh hưởng của hai yếu tố này được duy trì tương đối ổn định giữa các lần lặp. Ngược lại, độ sụt tại ba mức CHH/CKD khá gần nhau, phản ánh ảnh hưởng hạn chế của yếu tố này trong phạm vi khảo sát.



Hình 5. Độ sụt trung bình tại các mức của các yếu tố khảo sát.

Theo Hình 5a, khi N/CKD tăng từ 0,28 lên 0,36, độ sụt trung bình tăng từ 80 mm lên 106 mm, tương ứng mức tăng 26 mm, hay 32,5%. Kết quả này phản ánh vai trò trực tiếp của lượng nước đối với khả năng dịch chuyển tương đối giữa các hạt trong hỗn hợp bê tông tươi. Tác động rõ ràng của tỷ lệ N/CKD đến tính công tác của các hệ geopolimer một thành phần FA–GGBS cũng đã được ghi nhận trong các nghiên cứu trước [5, 6]. Ảnh hưởng của PG đến độ sụt rõ rệt hơn so với N/CKD. Hình 5c cho thấy khi PG tăng từ 0,8% lên 1,6%, độ sụt trung bình tăng từ 74 mm lên 108 mm, tương ứng mức tăng 34 mm, hay 45,9%. Trong hệ bê tông geopolimer hạt nhỏ sử dụng cát nghiền và có hàm lượng hạt mịn tương đối lớn, phụ gia siêu dẻo góp phần cải thiện khả năng phân tán của hệ hạt và tính công tác của hỗn hợp. Hiệu quả của phụ gia có thể phụ thuộc vào hàm lượng nước, loại phụ gia và dạng chất hoạt hóa sử dụng [5, 6]. Trong khi đó, Hình 5b cho thấy CHH/CKD chỉ làm thay đổi nhẹ độ sụt. Giá trị trung bình đạt 94 mm tại cả hai mức 8% và 12%, sau đó giảm xuống 90 mm tại mức 16%. Biên độ thay đổi giữa ba mức chỉ là 4 mm, nhỏ hơn đáng kể so với N/CKD và PG. Kết quả này cho thấy trong miền 8–16%, việc thay đổi hàm lượng chất hoạt hóa khô không phải là yếu tố quyết định tính công tác của hỗn hợp. Mặt khác, cát nghiền dùng trong thí nghiệm này có 8,20% hạt nhỏ hơn 0,075 mm. Thành phần hạt mịn này có thể làm tăng diện tích bề mặt riêng, nhu cầu nước và ảnh hưởng đến tính công tác chung của hỗn hợp [3, 7]. Tuy nhiên, do cát nghiền và tỉ lệ hạt nhỏ hơn 0,075 mm được giữ cố định trong toàn bộ các cấp phối, chúng không phải là nguyên nhân tạo ra sự khác biệt độ sụt giữa các mức N/CKD, CHH/CKD và PG. Kết quả cho thấy lượng nước và phụ gia siêu dẻo là hai thông số cần được xem xét đặc biệt khi kiểm soát tính công tác của hệ bê tông geopolimer hạt nhỏ này.

Hình 6a thể hiện xu hướng hiệu ứng chính tương đồng với kết quả ở Hình 5, trong đó độ sụt tăng theo N/CKD và PG nhưng chỉ biến đổi nhẹ theo CHH/CKD. Hình 6b cho thấy cặp N/CKD–PG có xu hướng nhất quán hơn các cặp yếu tố còn lại. Khi N/CKD tăng từ 0,28 lên 0,36, độ sụt tăng từ 62 lên 88 mm tại PG = 0,8%, từ 86 lên 106 mm tại PG = 1,2% và từ 92 lên 124 mm tại PG = 1,6%, tương ứng mức tăng 26, 20 và 32 mm. Như vậy, chiều ảnh hưởng của N/CKD được duy trì tại cả ba mức PG, nhưng biên độ thay đổi phụ thuộc vào mức PG. Ngược lại, các cặp có CHH/CKD xuất hiện nhiều đường giao cắt và không thể hiện xu hướng ổn định; chẳng hạn, tại PG = 1,6%, độ sụt giảm từ 124 xuống 92 mm khi CHH/CKD tăng từ 8% lên 16%, trong khi tại hai mức PG còn lại xu hướng không đơn điệu.



Hình 6. Phân tích độ sệt theo các thông số khảo sát: (a) hiệu ứng chính của giá trị trung bình; (b) tương tác giữa các yếu tố.

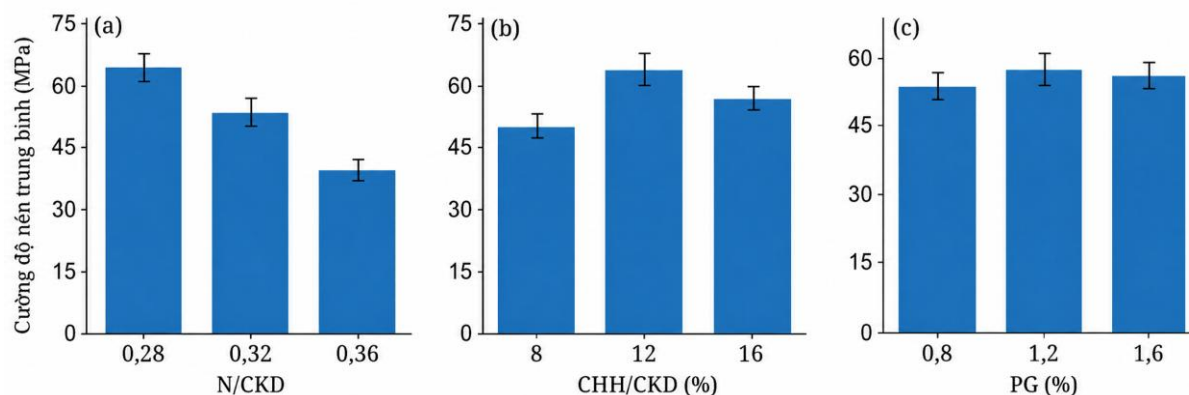
Kết quả trong Bảng 5 cho thấy PG có Delta S/N lớn nhất, đạt 3,31, tiếp theo là N/CKD với 2,48 và CHH/CKD với 0,44. Thứ tự này thống nhất với Delta của giá trị trung bình, tương ứng 34, 26 và 4 mm. Do đó, thứ tự ảnh hưởng của các yếu tố khảo sát đến độ sệt được xác định là: PG > N/CKD > CHH/CKD. Theo tiêu chí “lớn hơn là tốt hơn”, tổ hợp mức thuận lợi cho việc tăng độ sệt trong phạm vi khảo sát là N/CKD = 0,36, CHH/CKD = 12% và PG = 1,6%. Tuy nhiên, tổ hợp này chỉ phản ánh các mức có khả năng làm tăng tính công tác dựa trên hiệu ứng chính của từng yếu tố. Cách xếp hạng này chỉ phản ánh khả năng làm tăng tính công tác trong miền khảo sát, nhưng không hàm ý rằng độ sệt càng lớn càng tối ưu hoặc đây là cấp phối tối ưu chung.

Bảng 5. Tỷ số S/N của độ sệt theo mức yếu tố.

Mức	N/CKD	CHH/CKD	PG
1	37,92	39,10	37,28
2	39,14	39,40	39,60
3	40,41	38,96	40,59
Delta	2,48	0,44	3,31
Thứ hạng	2	3	1

3.2. Ảnh hưởng của các yếu tố khảo sát đến cường độ nén 28 ngày

Hình 7 trình bày cường độ nén trung bình và độ lệch chuẩn tại ba mức của từng yếu tố. Độ phân tán nhìn chung nhỏ so với sự thay đổi cường độ do N/CKD và CHH/CKD. Các mức N/CKD thể hiện sự phân tách rõ rệt, trong khi cường độ tại ba mức PG khá gần nhau. Kết quả này bước đầu cho thấy N/CKD tạo biến đổi cường độ rõ nhất, trong khi sự thay đổi do PG tương đối nhỏ trong miền thí nghiệm.

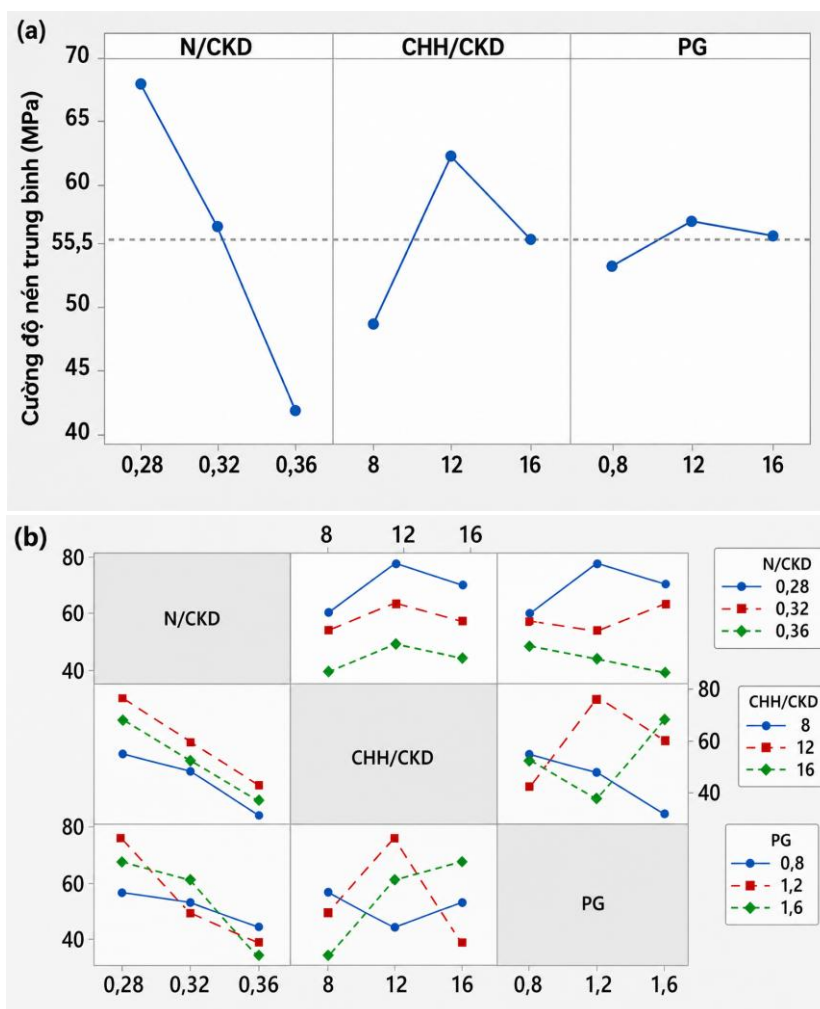


Hình 7. Cường độ nén trung bình tại các mức của các yếu tố khảo sát.

Theo Hình 7a, khi N/CKD tăng từ 0,28 lên 0,36, cường độ nén trung bình giảm từ 68,28 MPa xuống 42,41 MPa, tương ứng mức giảm 25,87 MPa, hay 37,9%. Xu hướng giảm cường độ khi lượng pha lỏng hoặc lượng nước so với chất kết dính tăng đã được ghi nhận đối với cả hệ geopolymer hoạt hóa lỏng và geopolymer một thành phần [3, 5, 9]. Các cơ chế khả dĩ được đề cập trong những nghiên cứu trước gồm sự pha loãng môi trường hoạt hóa và sự gia tăng lượng lỗ rỗng còn lại sau quá trình đóng rắn [2, 5]. Tuy nhiên, nghiên cứu hiện tại không thực hiện phân tích độ rỗng hoặc vi cấu trúc; do đó, các cơ chế trên chỉ được sử dụng để giải thích xu hướng. Đối với CHH/CKD, Hình 7b cho thấy cường độ trung bình tăng từ 49,39 MPa tại mức 8% lên 62,40 MPa tại mức 12%, sau đó giảm xuống 55,72 MPa tại mức 16%. Như vậy, mức CHH/CKD trung gian có lợi hơn cho sự phát triển cường độ trong miền khảo sát. Xu hướng tồn tại một hàm lượng chất hoạt hóa khô trung gian thuận lợi cũng đã được ghi nhận trong các hệ geopolymer một thành phần [15]. Hàm lượng chất hoạt hóa quá thấp có thể chưa tạo đủ điều kiện cho quá trình hoạt hóa, trong khi việc tiếp tục tăng lên 16% không đem lại mức cải thiện cường độ tương ứng. Mặt khác, ảnh hưởng của PG nhỏ hơn đáng kể so với N/CKD và CHH/CKD. Theo Hình 7c, cường độ trung bình tăng từ 53,89 MPa tại PG = 0,8% lên 57,36 MPa tại PG = 1,2%, sau đó giảm nhẹ xuống 56,27 MPa tại PG = 1,6%. Kết quả này cho thấy vai trò chính của phụ gia siêu dẻo trong hệ vật liệu khảo sát là cải thiện tính công tác, thay vì trực tiếp làm tăng đáng kể cường độ nén.

Hình 8a thể hiện xu hướng hiệu ứng chính tương đồng với Hình 7, trong đó cường độ giảm rõ khi N/CKD tăng, đạt giá trị cao nhất tại CHH/CKD = 12% và chỉ thay đổi nhẹ theo PG. Hình 8b cho thấy xu hướng giảm cường độ nén khi N/CKD tăng được duy trì tại cả ba mức CHH/CKD và PG. Khi N/CKD tăng từ 0,28 lên 0,36, cường độ giảm lần lượt 21,20; 30,07 và 26,34 MPa tại CHH/CKD = 8%; 12% và 16%. Tương ứng, tại PG = 0,8%; 1,2% và 1,6%, mức giảm lần lượt là 11,30; 34,84 và 31,47 MPa. Như vậy, chiều ảnh hưởng của N/CKD tương đối nhất quán, nhưng biên độ thay đổi phụ thuộc vào mức của yếu tố còn lại. Ngược lại, cặp CHH/CKD–PG xuất hiện nhiều đường giao cắt và không thể hiện xu hướng đồng nhất; chẳng hạn, tại PG = 1,2%, cường độ đạt cao nhất ở CHH/CKD = 12% với 77,37

MPa, trong khi tại PG = 1,6%, cường độ tăng từ 37,40 lên 68,87 MPa khi CHH/CKD tăng từ 8% lên 16%.



Hình 8. Phân tích cường độ nén 28 ngày theo các thông số khảo sát: (a) hiệu ứng chính của giá trị trung bình; (b) tương tác giữa các yếu tố.

Bảng 6. Tỷ số S/N của cường độ nén 28 ngày theo mức yếu tố.

Mức	N/CKD	CHH/CKD	PG
1	36,61	33,69	34,57
2	35,04	35,70	34,87
3	32,48	34,73	34,69
Delta	4,13	2,01	0,30
Thứ hạng	1	2	3

Kết quả trong Bảng 6 cho thấy N/CKD có Delta S/N lớn nhất, đạt 4,13, tiếp theo là CHH/CKD với 2,01 và PG với 0,30. Thứ tự này thống nhất với Delta của giá trị trung bình, tương ứng 25,87; 13,01 và 3,47 MPa. Do đó, thứ tự ảnh hưởng của các yếu tố đến cường độ nén 28 ngày được xác định là: N/CKD > CHH/CKD > PG. Theo tiêu chí “lớn hơn là tốt hơn”, tổ hợp mức thuận lợi cho việc tăng cường độ nén trong miền khảo sát là N/CKD = 0,28, CHH/CKD = 12% và PG = 1,2%. Đây là tổ hợp được suy ra từ hiệu ứng chính của từng yếu tố.

tổ tại các mức thí nghiệm, không phải một điểm tối ưu liên tục và cũng không đại diện cho một cấp phối tối ưu chung khi xét đồng thời tính công tác và cường độ.

3.3. Thảo luận

Kết quả của hai đáp ứng cho thấy sự đánh đổi rõ nhất liên quan đến N/CKD. Mức N/CKD = 0,36 làm tăng độ sụt trung bình lên 106 mm nhưng làm giảm cường độ nén còn 42,41 MPa; ngược lại, N/CKD = 0,28 cho cường độ trung bình 68,28 MPa nhưng độ sụt thấp hơn, đạt 80 mm. PG tạo ra xu hướng khác: tăng PG làm độ sụt tăng mạnh, trong khi ảnh hưởng đến cường độ nhỏ và không có ý nghĩa thống kê. CHH/CKD = 12% cho cường độ trung bình cao nhất trong ba mức, đồng thời không làm giảm độ sụt so với mức 8%. Sự thống nhất giữa xu hướng của giá trị trung bình, thứ hạng Delta S/N và kết quả ANOVA cho thấy PG là yếu tố quan trọng đối với tính công tác, trong khi N/CKD và CHH/CKD là các yếu tố có ý nghĩa đối với cường độ nén 28 ngày. Kết quả này phù hợp về xu hướng với nghiên cứu của Nagajothi và Elavenil [3], khi tăng lượng dung dịch hoạt hóa làm tăng tính công tác nhưng giảm cường độ của bê tông geopolymer chứa cát nghiền. Nghiên cứu đó sử dụng chất hoạt hóa lỏng và có cốt liệu lớn, trong khi nghiên cứu hiện tại sử dụng chất hoạt hóa khô một thành phần và cát nghiền là cốt liệu duy nhất; vì vậy, sự đối chiếu chủ yếu được xem xét về xu hướng thay vì giá trị tuyệt đối. Trong nghiên cứu trong nước của Nguyễn Thị Thu Nga và Trần Việt Hưng [9], phương pháp Taguchi được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của thời gian dưỡng hộ nhiệt, nồng độ NaOH, tỷ lệ AAS/FA và tuổi thí nghiệm đến cường độ vữa geopolymer tro bay. Các tác giả ghi nhận cường độ giảm khi tỷ lệ AAS/FA tăng từ 0,45 lên 0,55. Xu hướng này tương đồng với ảnh hưởng bất lợi của việc tăng N/CKD trong nghiên cứu hiện tại, mặc dù hai hệ vật liệu khác nhau về hệ chất kết dính (tro bay thuần túy và tro-xỉ kết hợp) dạng chất hoạt hóa (lỏng – hai thành phần và khô – một thành phần) và điều kiện dưỡng hộ (điều kiện nhiệt và điều kiện thường).

Có thể thấy, trong phạm vi nghiên cứu này, việc tăng PG là giải pháp phù hợp hơn tăng N/CKD khi cần cải thiện độ sụt mà vẫn hạn chế được suy giảm cường độ. Tuy nhiên, nghiên cứu không thực hiện tối ưu hóa đa đáp ứng và không đề xuất một cấp phối tối ưu duy nhất. Các kết quả chỉ có giá trị đối với nguồn tro bay, GGBS, chất hoạt hóa khô, phụ gia và cát nghiền đã dùng, thỏa mãn trong miền N/CKD = 0,28–0,36, CHH/CKD = 8–16% và PG = 0,8–1,6%. Nghiên cứu mới đánh giá độ sụt và cường độ nén 28 ngày, chưa xem xét đặc tính lưu biến, co ngót, độ bền lâu, cấu trúc lỗ rỗng và vi cấu trúc. Do đó, không nên ngoại suy kết luận ra ngoài phạm vi vật liệu và thông số khảo sát.

4. KẾT LUẬN

Từ các kết quả trên, một số kết luận được rút ra như sau:

Đối với độ sụt, thứ tự ảnh hưởng là PG > N/CKD > CHH/CKD. Khi PG tăng từ 0,8% lên 1,6%, độ sụt trung bình tăng từ 74 mm lên 108 mm; khi N/CKD tăng từ 0,28 lên 0,36, độ sụt tăng từ 80 mm lên 106 mm.

Đối với cường độ nén 28 ngày, thứ tự ảnh hưởng là N/CKD > CHH/CKD > PG. Khi N/CKD tăng từ 0,28 lên 0,36, cường độ trung bình giảm từ 68,28 MPa xuống 42,41 MPa. CHH/CKD = 12% cho cường độ trung bình cao nhất trong ba mức khảo sát.

Kết quả cho thấy, trong phạm vi nghiên cứu việc tăng PG phù hợp hơn tăng N/CKD khi cần nâng độ sụt mà vẫn hạn chế được suy giảm cường độ nén.

Do các hạn chế về phạm vi của nghiên cứu này, cần tiếp tục mở rộng số tổ hợp thí nghiệm, đồng thời đánh giá đặc tính lưu biến, co ngót, độ bền lâu, cấu trúc lỗ rỗng và vi cấu trúc của vật liệu.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghệ giao thông vận tải trong Đề tài nghiên cứu khoa học trọng điểm cấp Trường mã số ĐTTĐ2425-02.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J. Davidovits, Geopolymer Chemistry and Applications, fifth ed., Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2020.
- [2]. J.L. Provis, Alkali-activated materials, Cement and Concrete Research, 114 (2018) 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- [3]. S. Nagajothi, S. Elavenil, Parametric studies on the workability and compressive strength properties of geopolymer concrete, Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 27 (2018) 20180019. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2018-0019>
- [4]. T. Luukkonen, Z. Abdollahnejad, J. Yliniemi, P. Kinnunen, M. Ilkainen, One-part alkali-activated materials: A review, Cement and Concrete Research, 103 (2018) 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001>
- [5]. T.T. Pham, N.L. Nguyen, T.T. Nguyen, T.H. Pham, Effects of superplasticizer and water–binder ratio on mechanical properties of one-part alkali-activated geopolymer concrete, Buildings, 13 (2023) 1835. <https://doi.org/10.3390/buildings13071835>
- [6]. S.H. Bong, B. Nematollahi, A. Nazari, M. Xia, J. Sanjayan, Efficiency of different superplasticizers and retarders on properties of ‘one-part’ fly ash–slag blended geopolymers with different activators, Materials, 12 (2019) 3410. <https://doi.org/10.3390/ma12203410>
- [7]. S. Saravanan, S. Nagajothi, S. Elavenil, Investigation on compressive strength development of geopolymer concrete using manufactured sand, Materials Today: Proceedings, 18 (2019) 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.284>
- [8]. G. Taguchi, Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes, Asian Productivity Organization, Tokyo, 1986.
- [9]. Nguyễn Thị Thu Nga, Trần Việt Hưng, Phương pháp Taguchi đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố chính đến cường độ của vữa geopolymer tro bay, Tạp chí Giao thông vận tải, 8 (2021) 53–56.
- [10]. TCVN 10302:2014, Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng.
- [11]. TCVN 11586:2016, Xi hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa.
- [12]. TCVN 4506:2012, Nước trộn bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật.
- [13]. TCVN 7572-2:2006, Cốt liệu cho bê tông và vữa – Phương pháp thử – Phần 2: Xác định thành phần hạt.
- [14]. TCVN 9205:2012, Cát nghiền cho bê tông và vữa.
- [15]. S. Haruna, B.S. Mohammed, M.M.A. Wahab, M.U. Kankia, M. Amran, A.M. Gora, Long-term strength development of fly ash-based one-part alkali-activated binders, Materials, 14 (2021) 4160. <https://doi.org/10.3390/ma14154160>
- [16]. M.T. Bhayat, A.J. Babafemi, W. De Villiers, Performance and sustainability of ambient-cured one-part fly ash and slag-based geopolymer concrete masonry units incorporating expanded vermiculite, Advances in Civil Engineering, 2025 (2025) 7440021. <https://doi.org/10.1155/adce/7440021>
- [17]. TCVN 3106:2022, Hỗn hợp bê tông – Phương pháp xác định độ sụt.
- [18]. TCVN 3118:2022, Bê tông – Phương pháp xác định cường độ chịu nén.