



Tạp chí điện tử
Khoa học và Công nghệ Giao thông
Trang website: <https://jstt.vn/index.php/vn>



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.5.1-14>

Corresponding author:

Email address:

sonth@utt.edu.vn

Received: 12/05/2026

Received in Revised Form:
23/06/2026

Accepted: 09/07/2026

Optimization of compressive strength of high-strength geopolymer concrete incorporating ground granulated blast furnace slag and steel fiber by response surface methodology

Trinh Hoang Son

Department of Structure and Construction Material, Faculty of Civil Engineering, University of Transport Technology, 54 Trieu Khuc Street, Thanh Liet Ward, Hanoi City, Vietnam

Abstract: This study optimized the compressive strength of high-strength geopolymer concrete incorporating ground granulated blast furnace slag (GGBS), steel fiber, and NaOH solution using response surface methodology with a Box-Behnken design. The results showed that the developed quadratic regression model was statistically significant and adequately described the relationship between the input variables and compressive strength. GGBS was the most influential factor, followed by NaOH molarity, whereas steel fiber had a smaller effect. A significant interaction between GGBS and NaOH was identified, while interactions involving steel fiber were negligible. The model predicted a maximum compressive strength of 80.35 MPa at GGBS = 70%, steel fiber = 1.0 vol.%, and NaOH molarity = 13.7 M.

Keywords: High-strength geopolymer concrete; ground granulated blast furnace slag; steel fiber; NaOH molarity; compressive strength; response surface methodology; Box-Behnken.



Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo nghiên cứu

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.5.1-14>

Tác giả liên hệ:
Địa chỉ Email:
sonth@utt.edu.vn

Ngày nộp bài: 12/05/2026
Ngày nộp bài sửa: 23/06/2026
Ngày chấp nhận: 09/07/2026

Tối ưu hóa cường độ nén của bê tông geopolimer cường độ cao sử dụng xỉ lò cao nghiền mịn và sợi thép bằng phương pháp bề mặt đáp ứng

Trịnh Hoàng Sơn

Bộ môn Kết cấu - Vật liệu, Khoa Công trình, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, 54 Triều Khúc, phường Thanh Liệt, thành phố Hà Nội, Việt Nam

Tóm tắt: Nghiên cứu này tối ưu hóa cường độ nén của bê tông geopolimer cường độ cao sử dụng xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS), sợi thép và dung dịch NaOH bằng phương pháp bề mặt đáp ứng với thiết kế Box-Behnken. Kết quả cho thấy mô hình hồi quy bậc hai có ý nghĩa thống kê cao và mô tả tốt quan hệ giữa các biến đầu vào với cường độ nén. GGBS là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất, tiếp theo là nồng độ mol NaOH, trong khi sợi thép có ảnh hưởng nhỏ hơn. Tương tác giữa GGBS và NaOH có ý nghĩa rõ rệt, còn các tương tác liên quan đến sợi thép không đáng kể. Mô hình dự đoán cường độ nén lớn nhất đạt 80.35 MPa tại GGBS = 70%, sợi thép = 1.0% thể tích và NaOH = 13.7 M.

Từ khóa: Bê tông geopolimer cường độ cao; xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS); sợi thép; nồng độ NaOH; cường độ nén; bề mặt đáp ứng; Box-Behnken.

1. Giới thiệu

Bê tông geopolimer đang được quan tâm như một hướng vật liệu thay thế bê tông xi măng truyền thống, nhờ khả năng tận dụng phế thải công nghiệp và tiềm năng phát triển cường độ cao [1]. Trong hệ vật liệu này, cường độ nén chịu ảnh hưởng đồng thời của thành phần tiền chất, dung dịch hoạt hóa kiềm và vật liệu gia cường. Trong đó, xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS) được xem là tiền chất có hoạt tính cao do chứa hàm lượng lớn CaO, SiO₂ và Al₂O₃ ở trạng thái vô định hình, góp phần thúc đẩy phản ứng và tăng độ đặc chắc của cấu trúc, từ đó cải thiện cường độ cơ học [2-5]. Tuy nhiên, ảnh hưởng của GGBS không hoàn toàn tuyến tính mà phụ thuộc vào sự tương thích với dung dịch kiềm và cấp phối tổng thể. Nồng độ dung dịch NaOH cũng là yếu tố quan trọng, chi phối khả năng hòa tan và tái cấu trúc các pha aluminosilicat. Nồng độ

quá thấp làm giảm hiệu quả phản ứng, trong khi nồng độ quá cao có thể không tiếp tục làm tăng cường độ tương ứng [1, 6, 7].

Bên cạnh đó, việc bổ sung sợi thép có thể cải thiện khả năng khống chế vi khe nứt và hỗ trợ tăng cường độ, tuy nhiên hiệu quả phụ thuộc vào hàm lượng, hình dạng, tỷ lệ chiều dài trên đường kính và khả năng phân tán trong hỗn hợp [8-12]. Trong các hệ bê tông sử dụng cát nghiền, đặc điểm hình dạng hạt, hàm lượng bột đá và cấp phối cốt liệu mịn cũng có thể ảnh hưởng đến tính công tác, cấu trúc đặc chắc và cường độ của bê tông [13-15]. Vì vậy, việc sử dụng cát nghiền trong bê tông geopolimer cần được xem xét đồng thời với thành phần tiền chất, dung dịch hoạt hóa và vật liệu gia cường, thay vì chỉ đánh giá như một thành phần cốt liệu thay thế đơn lẻ.

Tổng quan các nghiên cứu trước đây cho

thấy nhiều công trình đã khảo sát ảnh hưởng của từng yếu tố như loại tiền chất, nồng độ dung dịch kiềm, hàm lượng sợi hoặc đặc điểm cốt liệu mịn đến tính chất cơ học của bê tông geopolimer [3, 4, 9, 10]. Tuy nhiên, số lượng nghiên cứu phân tích đồng thời ảnh hưởng riêng rẽ, ảnh hưởng bậc hai và tương tác giữa các yếu tố thành phần trong cùng một khung quy hoạch thực nghiệm vẫn còn tương đối hạn chế. Trong khi đó, đối với một hệ vật liệu đa biến như bê tông geopolimer cường độ cao, sự thay đổi của cường độ nén thường là kết quả của tác động tổng hợp giữa nhiều tham số, chứ không chỉ phụ thuộc vào một yếu tố đơn lẻ. Do đó, nếu chỉ khảo sát theo cách thay đổi từng biến một, kết quả thu được có thể chưa phản ánh đầy đủ xu hướng biến thiên thực sự của vật liệu, đồng thời khó xác định được miền thành phần phù hợp cho thiết kế cấp phối. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm bề mặt đáp ứng là một công cụ có hiệu quả trong các bài toán tối ưu vật liệu đa biến vì cho phép xây dựng mô hình hồi quy thực nghiệm, đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố, nhận diện các tương tác có ý nghĩa thống kê và

dự đoán xu hướng biến thiên của chỉ tiêu đầu ra trong phạm vi khảo sát [6, 15, 16]. Cách tiếp cận này đặc biệt phù hợp khi cần giảm số lượng thí nghiệm nhưng vẫn bảo đảm khả năng phân tích định lượng đối với hệ vật liệu có nhiều biến đầu vào. Vì vậy, nghiên cứu này sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng với thiết kế Box-Behnken để đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng GGBS, sợi thép và nồng độ NaOH đến cường độ nén của bê tông geopolimer cường độ cao, từ đó tối ưu hóa miền thành phần phù hợp trong phạm vi khảo sát.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu sử dụng

Bê tông geopolimer cường độ cao trong nghiên cứu này được chế tạo từ tro bay Phả Lại thuộc loại F theo ASTM C618, xỉ lò cao nghiền mịn Hòa Phát, dung dịch hoạt hóa kiềm NaOH và Na_2SiO_3 , cát nghiền, đá dăm và sợi thép. Thành phần hóa học chính của tro bay và xỉ lò cao nghiền mịn và một số đặc trưng của sợi thép được trình bày trong Bảng 1 và Bảng 2 thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 10302: 2014 [17].

Bảng 1. Thành phần hóa học chính của tro bay và xỉ hạt lò cao nghiền mịn

Vật liệu	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)
Tro bay	52.8	27.1	9.5	5.7	1.2
Xỉ lò cao	33.6	13.2	0.8	41.2	7.3

Dung dịch hoạt hóa gồm NaOH và Na_2SiO_3 . NaOH được pha từ viên tinh khiết 98% để đạt nồng độ mol yêu cầu; Na_2SiO_3 thương phẩm có modul silicat $M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2.5$ và hàm lượng chất

rắn khoảng 40%. Cốt liệu mịn là cát nghiền có mô đun độ lớn là 2.75. Cốt liệu thô là đá dăm có nguồn gốc từ đá bazan có $D_{\max} = 12.5$ mm. Cốt liệu lớn và nhỏ thỏa mãn tiêu chuẩn ASTM C33 [18].

Bảng 2. Một số đặc trưng của sợi thép

Chỉ tiêu	Giá trị
Dạng sợi	Thẳng
Chiều dài, mm	13
Đường kính, mm	0.2
Cường độ kéo, MPa	1100
Hàm lượng khảo sát	0-1.0% thể tích

2.2. Thiết kế thí nghiệm theo phương pháp bề mặt đáp ứng

Nghiên cứu sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng với thiết kế Box-Behnken nhằm đánh giá

ảnh hưởng đồng thời của ba biến đầu vào đến cường độ nén của bê tông geopolimer cường độ cao. Ba biến khảo sát gồm hàm lượng xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS), hàm lượng sợi thép và nồng

độ mol NaOH (Bảng 3). Thông số đầu ra là cường độ nén ở tuổi 28 ngày, ký hiệu là Rn. Với ba biến đầu vào, thiết kế Box–Behnken gồm 12 điểm biên và điểm tâm được lặp lại 5 lần, tạo thành 17 điểm thí nghiệm theo ma trận thiết kế. Do các lần lặp tại điểm tâm có cùng thành phần cấp phối, số cấp phối

trong nghiên cứu là 13. Đối với mỗi điểm thí nghiệm, nghiên cứu chế tạo và thí nghiệm 3 mẫu lặp để xác định cường độ nén và đánh giá sai số thực nghiệm. Vì vậy, tổng số mẫu nén được sử dụng trong phân tích thống kê là 51 mẫu, tương ứng với tổng bậc tự do là 50 trong bảng ANOVA.

Bảng 3. Mức khảo sát của các biến độc lập

Ký hiệu	Yếu tố	Mức thấp (-1)	Mức trung tâm (0)	Mức cao (+1)
X1	GGBS (% chất kết dính)	40	55	70
X2	Sợi thép (% thể tích)	0.0	0.5	1.0
X3	Nồng độ mol NaOH (M)	10	12	14

Bảng 4. Thành phần 13 cấp phối và cường độ nén trung bình theo thiết kế Box–Behnken

Mã cấp phối	GGBS (% CKD)	Sợi thép (% thể tích)	NaOH (M)	Tro bay (kg/m ³)	GGBS (kg/m ³)	Dung dịch NaOH (kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³)	Cát nghiền (kg/m ³)	Đá dăm (kg/m ³)	Sợi thép Rn (kg/m ³)	Rn (MPa)
M1	40	0.0	12	312.0	208.0	52.0	130.0	712.6	1002.7	0.0	59.4 ± 1.5
M2	70	0.0	12	156.0	364.0	52.0	130.0	728.3	1024.7	0.0	75.5 ± 1.7
M3	40	1.0	12	312.0	208.0	52.0	130.0	712.6	1002.7	78.5	62.1 ± 1.6
M4	70	1.0	12	156.0	364.0	52.0	130.0	728.3	1024.7	78.5	77.9 ± 1.8
M5	40	0.5	10	312.0	208.0	52.0	130.0	711.1	1000.5	39.2	54.9 ± 1.4
M6	70	0.5	10	156.0	364.0	52.0	130.0	726.8	1022.5	39.2	71.3 ± 1.6
M7	40	0.5	14	312.0	208.0	52.0	130.0	714.2	1004.8	39.2	60.5 ± 1.4
M8	70	0.5	14	156.0	364.0	52.0	130.0	729.9	1026.8	39.2	80.4 ± 1.9
M9	55	0.0	10	234.0	286.0	52.0	130.0	724.4	1019.4	0.0	62.8 ± 1.5
M10	55	1.0	10	234.0	286.0	52.0	130.0	713.3	1003.7	78.5	65.4 ± 1.4
M11	55	0.0	14	234.0	286.0	52.0	130.0	727.5	1023.6	0.0	69.2 ± 1.6

Bảng 4. (tiếp)

Mã cấp phối	GGBS (%) (CKD)	Sợi thép (%) thể tích	NaOH (M)	Tro bay (kg/m ³)	GGBS (kg/m ³)	Dung dịch NaOH (kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³)	Cát nghiền (kg/m ³)	Đá dăm (kg/m ³)	Sợi thép (kg/m ³)	Rn (MPa)
M12	55	1.0	14	234.0	286.0	52.0	130.0	716.4	1007.9	78.5	71.9 ± 1.6
M13	55	0.5	12	234.0	286.0	52.0	130.0	720.4	1013.7	39.2	70.6 ± 1.4

Bảng 4 trình bày 13 cấp phối của nghiên cứu. Trong đó, M1–M12 tương ứng với các điểm biên (với 3 lần lặp) tương ứng với 36 mẫu, còn M13 là cấp phối tại điểm tâm (với 5 lần lặp), tương ứng với 15 mẫu nén. Các mẫu được phân nhóm theo khối thí nghiệm nhằm xét đến sai khác có thể phát sinh giữa các đợt chế tạo hoặc thí nghiệm. Giá trị Rn được trình bày dưới dạng trung bình ± độ lệch chuẩn. Các yếu tố khác trong cấp phối được giữ cố định nhằm tập trung đánh giá ảnh hưởng của ba biến khảo sát. Cụ thể, tỷ lệ Na₂SiO₃/NaOH được giữ ở mức 2.5 theo khối lượng và tỷ lệ dung dịch kiềm/chất kết dính được giữ ở mức 0.35 theo khối lượng.

2.3. Chế tạo mẫu và phương pháp thí nghiệm

Mẫu bê tông geopolimer được chế tạo tuân thủ quy trình được quy định trong ASTM C192/C192M. Trước khi trộn, dung dịch NaOH và Na₂SiO₃ được chuẩn bị trong vòng 24 giờ trước khảo sát. Bên cạnh đó, đồ thị phần dư theo thứ tự

thí nghiệm không cho thấy sự lệch có quy luật theo trình tự thực hiện, chứng tỏ sai số ngẫu nhiên không bị chi phối rõ rệt bởi thứ tự thí nghiệm hoặc điều kiện vận hành theo thời gian.

Kết quả phân tích phương sai ở Bảng 5 cho thấy mô hình có ý nghĩa thống kê cao với $p < 0.001$. Điều này chứng tỏ các biến khảo sát có khả năng giải thích đáng kể sự biến thiên của tro bay, xỉ lò cao nghiền mịn và vật liệu mịn được trộn khô trong 2 phút, sau đó cho dung dịch hoạt hóa vào và trộn thêm 3 phút đến khi đạt độ đồng nhất. Tiếp theo, cốt liệu được bổ sung, sau đó sợi thép được đưa vào từ từ và tiếp tục trộn thêm 2 phút. Hỗn hợp được đúc vào khuôn trụ thép kích thước 150 × 300 mm theo hai lớp, mỗi lớp được đầm trên bàn rung trong khoảng 15 ± 5 s. Mẫu được dưỡng hộ trong điều kiện môi trường ở 27 ± 2 °C đến tuổi 28 ngày. Cường độ nén được xác định theo ASTM C39/C39M [19]. Một số hình ảnh thí nghiệm được thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Hình ảnh mẫu bê tông geopolimer sau khi đúc và thí nghiệm nén mẫu

Bảng 5. Kết quả phân tích phương sai ANOVA

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	Giá trị F	Giá trị P
Mô hình	9	2246.79	249.64	219.56	<0.001
Khối	2	50.66	25.33	22.28	<0.001
Tuyến tính	3	2070.44	690.15	606.97	<0.001
GGBS	1	1744.22	1744.22	1534.00	<0.001
Sợi thép	1	40.56	40.56	35.67	<0.001
NaOH	1	285.66	285.66	251.23	<0.001
Bậc hai	3	116.51	38.84	34.16	<0.001
GGBS × GGBS	1	17.96	17.96	15.80	<0.001
Sợi thép × Sợi thép	1	5.21	5.21	4.59	0.038
NaOH × NaOH	1	84.90	84.90	74.67	<0.001
Tương tác 2 chiều	1	9.19	9.19	8.08	0.007
GGBS × NaOH	1	9.19	9.19	8.08	0.007
Sai số	41	46.62	1.14		
Không phù hợp mô hình	29	21.39	0.74	0.35	0.990
Sai số thuần	12	25.23	2.10		
Tổng	50	2293.41			

3. Kết quả và thảo luận

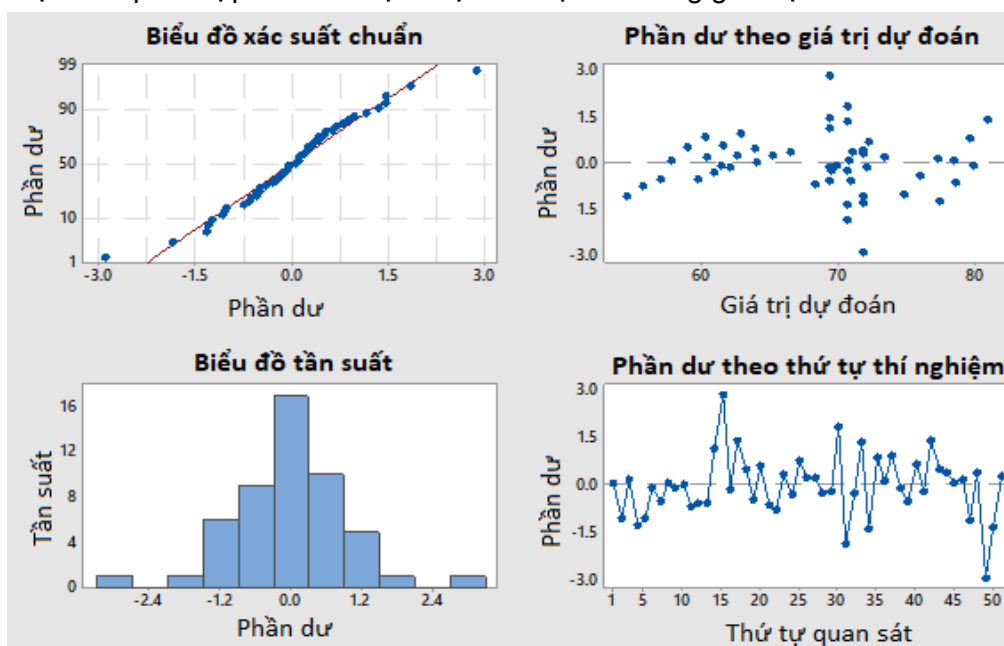
3.1. Phân tích phương sai và mô hình hồi quy

Hình 2 trình bày các đồ thị về phần dư của mô hình hồi quy bậc hai. Trên đồ thị xác suất chuẩn, các điểm dữ liệu phân bố tương đối gần đường tham chiếu, cho thấy giả thiết phân bố chuẩn của phần dư về cơ bản được thỏa mãn. Đồ thị phần dư theo giá trị dự đoán không thể hiện dạng phân bố hình phễu hoặc xu hướng hệ thống rõ rệt, qua đó cho thấy phương sai sai số có thể được xem là tương đối ổn định trong phạm vi cường độ nén trong phạm vi nghiên cứu. Trong các thành phần tuyến tính, GGBS có ảnh hưởng lớn nhất đến cường độ nén, tiếp theo là nồng độ NaOH và hàm lượng sợi thép. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước về hệ geopolymer tro bay-xỉ lò cao, trong đó việc tăng hàm lượng GGBS thường làm tăng cường độ nhờ sự tham gia của CaO hoạt tính vào quá trình hình thành các sản phẩm gel có mật độ cao hơn, đặc biệt là các pha dạng C-A-S-H hoặc N-C-A-S-H kết hợp với gel aluminosilicat [3-5]. Nath và Sarker [3] cũng cho

thấy GGBS có thể cải thiện đáng kể cường độ sớm và cường độ ở điều kiện dưỡng hộ thường của geopolymer nền tro bay. Tương tự, Deb và cộng sự [4] nhận thấy sự phối hợp giữa tro bay, GGBS và hàm lượng chất hoạt hóa có ảnh hưởng rõ rệt đến cường độ và tính công tác của bê tông geopolymer. Do đó, việc GGBS là yếu tố chi phối trong mô hình hồi quy của nghiên cứu này là phù hợp về mặt cơ chế vật liệu, không chỉ là kết quả thống kê đơn thuần. Các thành phần bậc hai, đặc biệt là GGBS x GGBS và NaOH x NaOH, có ý nghĩa thống kê rõ rệt, cho thấy quan hệ giữa các biến đầu vào và cường độ nén không hoàn toàn tuyến tính. Thành phần bậc hai của sợi thép cũng có ý nghĩa ở mức $p < 0.05$, nhưng mức ảnh hưởng nhỏ hơn so với GGBS và NaOH. Đặc biệt, tương tác GGBS x NaOH có ý nghĩa với $p < 0.05$, phản ánh vai trò cộng hưởng giữa hàm lượng tiền chất hoạt tính và mức độ hoạt hóa kiềm. Trong khi đó, các tương tác hai chiều liên quan đến sợi thép không được giữ lại trong mô hình cuối cùng do không có ý nghĩa thống kê rõ rệt. Kết quả kiểm định

Lack-of-Fit không có ý nghĩa thống kê, cho thấy mô hình hồi quy bậc hai phù hợp với dữ liệu thực

nghiệm và có thể được sử dụng để dự đoán cường độ nén trong giới hạn của miền khảo sát.



Hình 2. Đồ thị kiểm tra phần dư của mô hình

Bảng 6. Các chỉ tiêu đánh giá mô hình và hệ số hồi quy

Hạng tử	Ảnh hưởng	Hệ số	Hệ số SE	Giá trị T	Giá trị P
Hằng số		70.560	0.275	256.28	<0.001
GGBS	17.050	8.525	0.218	39.17	<0.001
Sợi thép	2.600	1.300	0.218	5.97	<0.001
NaOH	6.900	3.450	0.218	15.85	<0.001
GGBS × GGBS	-2.385	-1.193	0.300	-3.97	<0.001
Sợi thép × Sợi thép	-1.285	-0.643	0.300	-2.14	0.038
NaOH × NaOH	-5.185	-2.593	0.300	-8.64	<0.001
GGBS × NaOH	1.750	0.875	0.308	2.84	0.007

Tóm tắt mô hình

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.066	97.97%	97.52%	97.17%

Phương trình hồi quy theo biến thực:

$$R_n = -73.5 + 0.801 \text{ GGBS} + 5.17 \text{ Sợi thép} + 15.68 \text{ NaOH} - 0.00530 \text{ GGBS} \times \text{GGBS} - 2.57 \text{ Sợi thép} \times \text{Sợi thép} - 0.6481 \text{ NaOH} \times \text{NaOH} + 0.0292 \text{ GGBS} \times \text{NaOH}$$

Các chỉ tiêu đánh giá mô hình trong Bảng 6 cho thấy mô hình hồi quy có độ phù hợp cao, với $R^2 = 97.97\%$, R^2 hiệu chỉnh = 97.52% và R^2 dự đoán = 97.17% . Sự chênh lệch nhỏ giữa R^2 hiệu

chỉnh áp dụng trong phạm vi GGBS 40-70%, sợi thép 0-1% thể tích và NaOH 10-14 M.

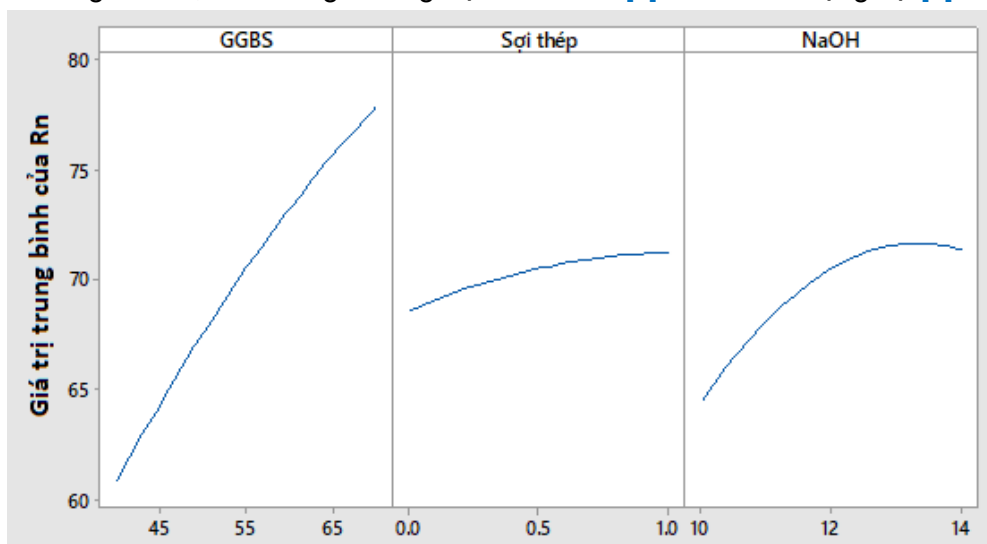
3.2. Ảnh hưởng của các yếu tố đến cường độ nén

Đồ thị ảnh hưởng chính ở Hình 3 làm rõ mức độ ảnh hưởng riêng rẽ của từng biến đến cường độ nén trong phạm vi khảo sát. Trong ba biến đầu vào, GGBS thể hiện độ dốc lớn nhất, với cường độ nén tăng khoảng 17–18 MPa khi hàm lượng GGBS

tăng từ 40% lên 70%, tương đương khoảng 0.55–0.60 MPa cho mỗi 1% GGBS. Đối với NaOH, cường độ nén tăng khi nồng độ dung dịch tăng từ 10 M lên khoảng 13–14 M, sau đó có xu hướng tiến tới trạng thái bão hòa; điều này cho thấy mô hình không chỉ mô tả tốt dữ liệu đã dùng để xây dựng hồi quy mà còn có khả năng dự báo tương đối ổn định trong phạm vi thiết kế thí nghiệm.

Các hệ số tuyến tính của GGBS, sợi thép và NaOH đều có ý nghĩa thống kê, trong đó GGBS là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất đến cường độ nén. Các thành phần bậc hai của GGBS và NaOH thể hiện rõ xu hướng phi tuyến, trong khi ảnh hưởng bậc hai của sợi thép yếu hơn. Tương tác GGBS x NaOH cho thấy sự kết hợp giữa hàm lượng GGBS và nồng độ NaOH có ảnh hưởng đáng kể đến cường độ nén. Trong khi đó, mức tăng cường độ

dự đoán do sợi thép chỉ khoảng 2–3 MPa khi hàm lượng sợi tăng từ 0 lên 1.0% thể tích, cho thấy ảnh hưởng của sợi thép đến cường độ nén nhỏ hơn rõ rệt so với GGBS và NaOH. Xu hướng này phù hợp với kết quả phân tích phương sai ở Bảng 5. Về mặt cơ chế, ảnh hưởng mạnh của GGBS có thể được giải thích bởi vai trò của xỉ lò cao nghiền mịn như một tiền chất giàu Ca, có khả năng thúc đẩy quá trình tạo gel và làm đặc chắc nền chất kết dính geopolimer [3-5]. Khi hàm lượng GGBS tăng, lượng pha phản ứng có khả năng đóng góp trực tiếp vào quá trình hình thành cấu trúc gel cũng tăng, từ đó làm cường độ nén phát triển rõ rệt. Xu hướng này tương đồng với kết quả của Vũ Đức Anh và Phan Đức Hùng [2], cũng như các nghiên cứu về hệ geopolimer tro bay–xỉ của Nath và Sarker [3] và Deb và cộng sự [4].



Hình 3. Ảnh hưởng của GGBS, sợi thép và NaOH đến cường độ nén

Đối với NaOH, sự gia tăng cường độ khi nồng độ tăng từ 10 M lên khoảng 13–14 M phản ánh vai trò của dung dịch kiềm trong việc hòa tan các pha aluminosilicat và thúc đẩy phản ứng geopolimer hóa. Tuy nhiên, xu hướng bão hòa ở vùng nồng độ cao cũng phù hợp với nhận định của Rangan [1] và các nghiên cứu tối ưu hóa bằng phương pháp bề mặt đáp ứng [6, 7], theo đó việc tăng nồng độ kiềm quá mức không nhất thiết tiếp tục cải thiện cường độ do sự cân bằng giữa khả năng hòa tan tiền chất, độ nhớt của dung dịch hoạt hóa và cấu trúc sản phẩm phản ứng.

Ảnh hưởng của sợi thép đến cường độ nén

nhỏ hơn so với GGBS và NaOH. Điều này có thể được giải thích bởi sợi thép chủ yếu phát huy hiệu quả trong việc khống chế vi khe nứt, cải thiện tính dẻo, khả năng chịu kéo uốn và khả năng sau nứt, trong khi cường độ nén vẫn phụ thuộc chủ yếu vào chất lượng nền geopolimer và mức độ đặc chắc của cấu trúc chất kết dính [8-12]. Vì vậy, trong phạm vi hàm lượng 0–1% thể tích, sợi thép đóng vai trò hỗ trợ thay vì là yếu tố kiểm soát chính đối với cường độ nén.

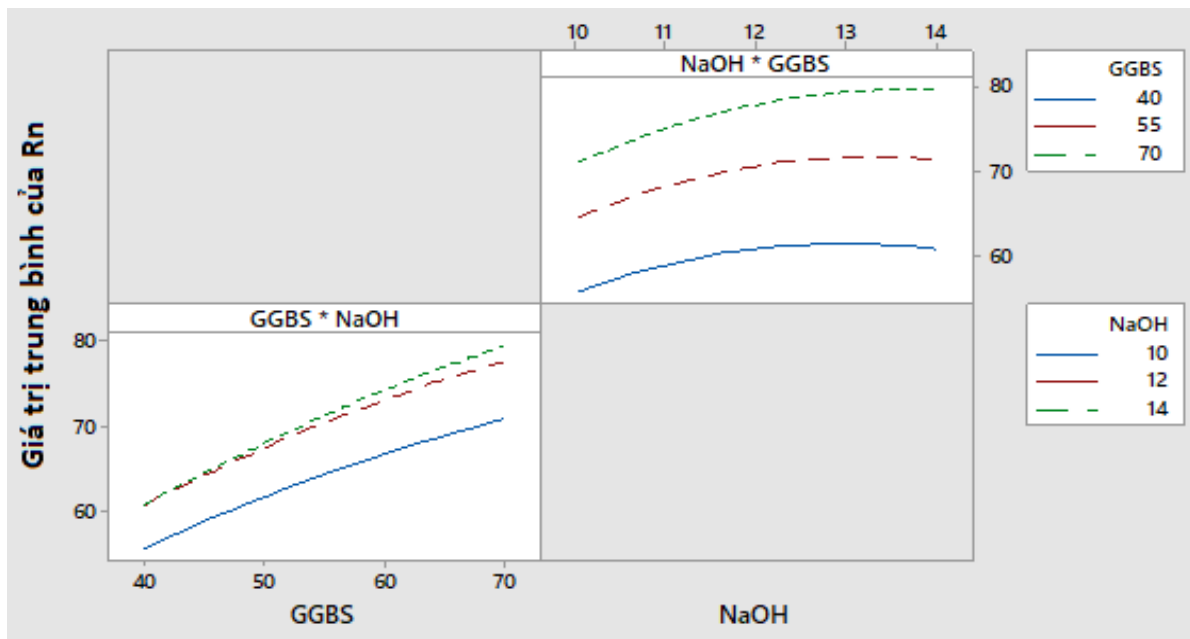
3.3. Phân tích tương tác giữa các yếu tố

Đồ thị tương tác ở Hình 4 cho thấy tương tác GGBS x NaOH là rõ rệt, thể hiện qua các đường

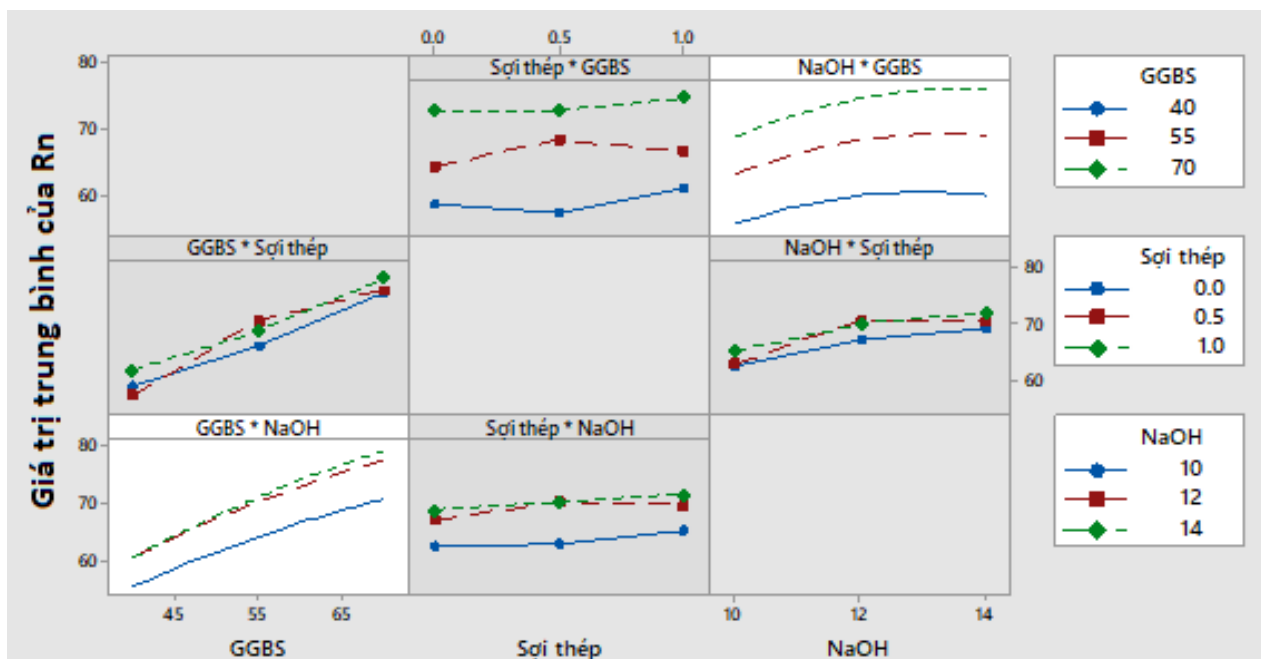
xu hướng không song song. Khi hàm lượng GGBS tăng từ 40% lên 70%, cường độ nén tăng khoảng 15–20 MPa; mức tăng này rõ hơn ở vùng nồng độ NaOH cao. Ngược lại, khi nồng độ NaOH tăng từ 10 M lên 14 M, cường độ nén tăng khoảng 6–10 MPa và mức tăng này mạnh hơn tại hàm lượng GGBS lớn. Kết quả này cho thấy GGBS và NaOH có tác động cộng hưởng đến cường độ nén, thay vì chỉ ảnh hưởng độc lập.

Các đồ thị tương tác tổng hợp ở Hình 5 tiếp

tục xác nhận rằng GGBS x NaOH là tương tác chi phối trong mô hình, phù hợp với kết quả ANOVA. Trong khi đó, các đường tương tác liên quan đến sợi thép có xu hướng gần song song hơn, cho thấy tương tác giữa sợi thép với GGBS hoặc NaOH không rõ rệt trong phạm vi khảo sát. Điều này phù hợp với nhận định rằng sợi thép có ảnh hưởng trực tiếp đến cường độ nén nhưng không phải là yếu tố kiểm soát chính của cơ chế phát triển cường độ trong hệ vật liệu này.



Hình 4. Đồ thị tương tác giữa GGBS và NaOH đối với cường độ nén

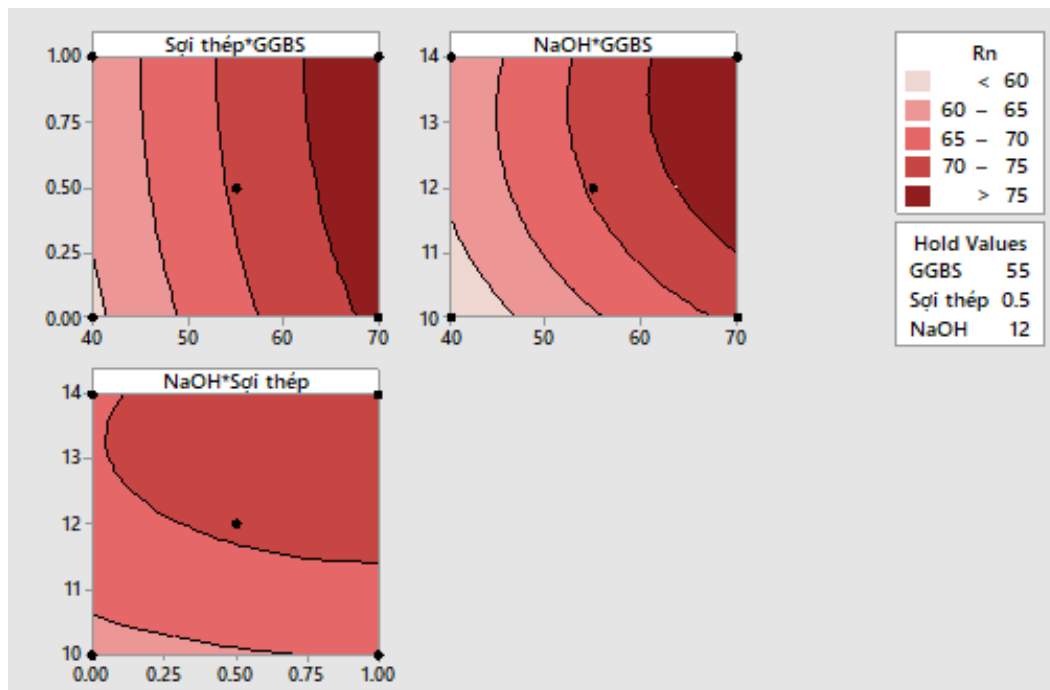


Hình 5. Đồ thị tương tác giữa các yếu tố (GGBS, sợi thép và NaOH)

3.4. Phân tích bề mặt đáp ứng và đường đồng mức

Các đường đồng mức ở Hình 6 cho thấy sự biến thiên cường độ nén phụ thuộc rõ rệt vào tổ hợp giữa các biến đầu vào. Trong các cặp biến khảo sát, cặp GGBS–NaOH thể hiện ảnh hưởng mạnh nhất, với các đường đồng mức có dạng cong và không song song. Đặc điểm này cho thấy quan hệ giữa cường độ nén, hàm lượng GGBS và nồng độ NaOH không hoàn toàn tuyến tính, đồng thời xác nhận sự tồn tại của tương tác giữa hai yếu tố này. Vùng cường độ cao, với $R_n > 75$ MPa, tập trung chủ yếu tại miền GGBS $\geq 65\%$ và NaOH ≥ 13 M. Ngược lại, các đường đồng mức của những cặp biến liên quan đến sợi thép có xu hướng ít cong hơn, cho thấy ảnh hưởng tương tác của sợi thép

đến cường độ nén là tương đối hạn chế. Hình 7 thể hiện bề mặt đáp ứng của cường độ nén theo từng cặp biến. Ở Hình 7a, bề mặt đáp ứng tăng mạnh theo phương GGBS, trong khi sự thay đổi theo hàm lượng sợi thép nhỏ hơn. Điều này cho thấy GGBS là biến có ảnh hưởng trực tiếp lớn hơn đến cường độ nén so với sợi thép. Ở Hình 7b, bề mặt đáp ứng cong theo phương NaOH, phản ánh xu hướng tăng cường độ khi nồng độ NaOH tăng đến vùng 12–13 M, sau đó tiến dần đến trạng thái bão hòa. Ở Hình 7c, bề mặt GGBS–NaOH có độ cong rõ hơn so với các bề mặt còn lại, cho thấy sự phối hợp giữa tiền chất giàu Ca và dung dịch hoạt hóa kiềm là cơ chế quan trọng quyết định vùng cường độ cao. Các kết quả này phù hợp với phân tích ANOVA, đồ thị tương tác và đường đồng mức.



Hình 6. Đường đồng mức biểu diễn ảnh hưởng của các cặp biến đến cường độ nén

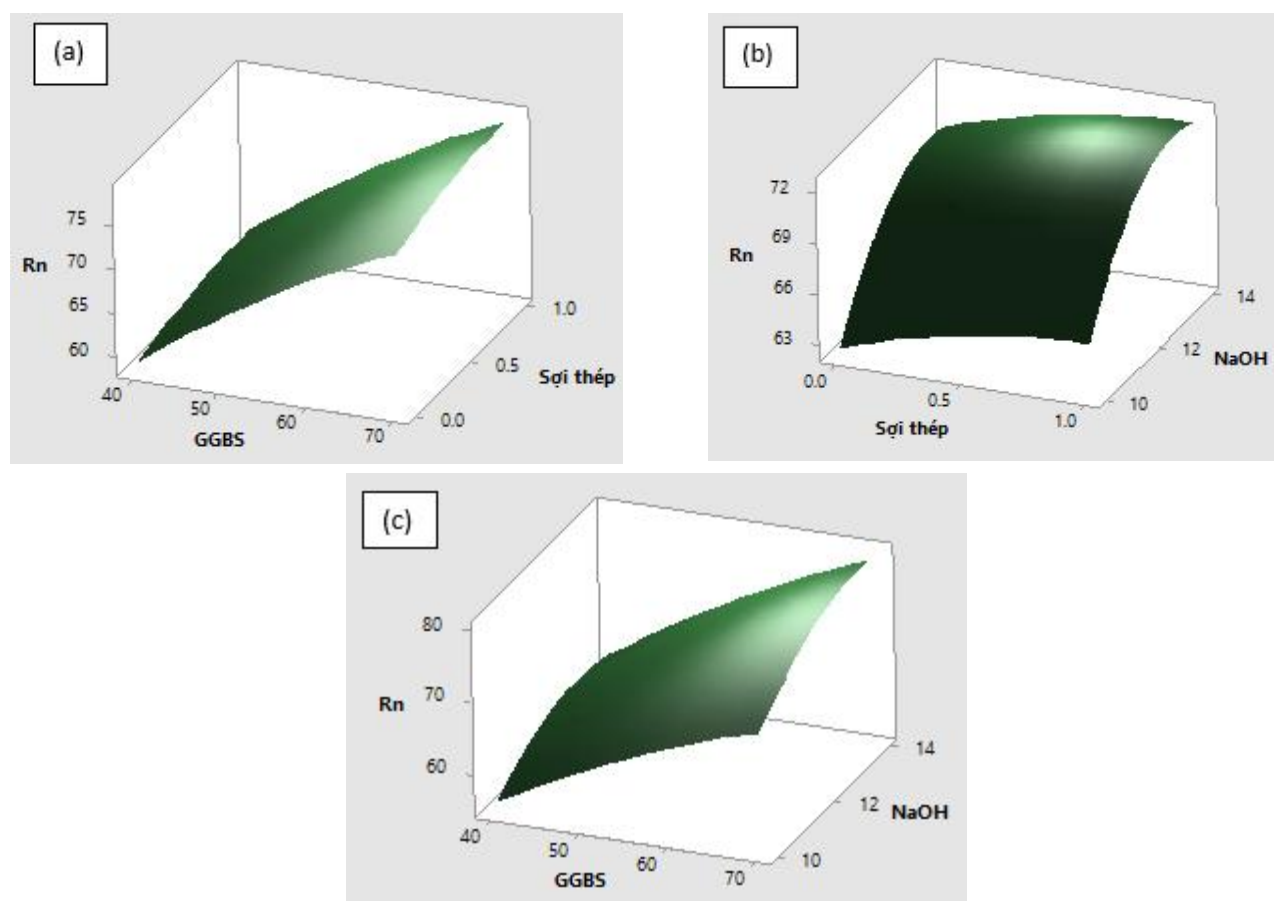
Từ các kết quả ở Hình 4–7, có thể thảo luận tổng hợp rằng cường độ cao không đạt được chỉ bằng cách tăng riêng lẻ một yếu tố, mà phụ thuộc vào sự phối hợp giữa hàm lượng GGBS và nồng độ NaOH. Sự không song song của các đường tương tác và dạng cong của bề mặt GGBS–NaOH phản ánh bản chất phi tuyến của hệ geopolimer, trong đó hiệu quả hoạt hóa kiềm phụ thuộc vào lượng tiền chất phản ứng có sẵn. Khi hàm lượng GGBS cao nhưng nồng độ NaOH thấp, khả năng

hòa tan và hoạt hóa các pha phản ứng có thể chưa đạt mức tối ưu. Ngược lại, khi nồng độ NaOH cao nhưng lượng GGBS không đủ lớn, việc tăng kiềm cũng khó tạo ra mức tăng cường độ tương ứng. Nhận định này phù hợp với các nghiên cứu sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng cho vật liệu geopolimer, trong đó các tương tác giữa tiền chất và chất hoạt hóa thường đóng vai trò quan trọng trong việc xác định miền tối ưu [6, 7, 16].

Đối với các cặp biến có sợi thép, đường đồng

mức gần song song và bề mặt đáp ứng ít cong cho thấy tương tác của sợi thép với GGBS hoặc NaOH không phải là cơ chế chi phối cường độ nén. Kết quả này không phủ nhận vai trò của sợi thép trong bê tông geopolymer, mà cho thấy trong chỉ tiêu cường độ nén, đóng góp của sợi thép nhỏ hơn so với nền chất kết dính. Các nghiên cứu về bê tông hoặc composite geopolymer gia cường sợi thép

thường nhấn mạnh hiệu quả của sợi đối với khả năng kháng nứt, ứng xử uốn và độ bền sau nứt hơn là mức tăng cường độ nén thuần túy [8-12]. Vì vậy, miền tối ưu dự đoán trong nghiên cứu này cần được hiểu là miền tối ưu theo mục tiêu cường độ nén, không nhất thiết đồng thời là miền tối ưu cho các chỉ tiêu cơ học khác như cường độ kéo uốn, tính dẻo hoặc khả năng kháng nứt.



Hình 7. Bề mặt đáp ứng của cường độ nén theo (a) GGBS và sợi thép (NaOH = 12 M), (b) NaOH và sợi thép (GGBS = 55%), (c) NaOH và GGBS (sợi thép = 0.5%)

3.5. Xác định miền thành phần tối ưu

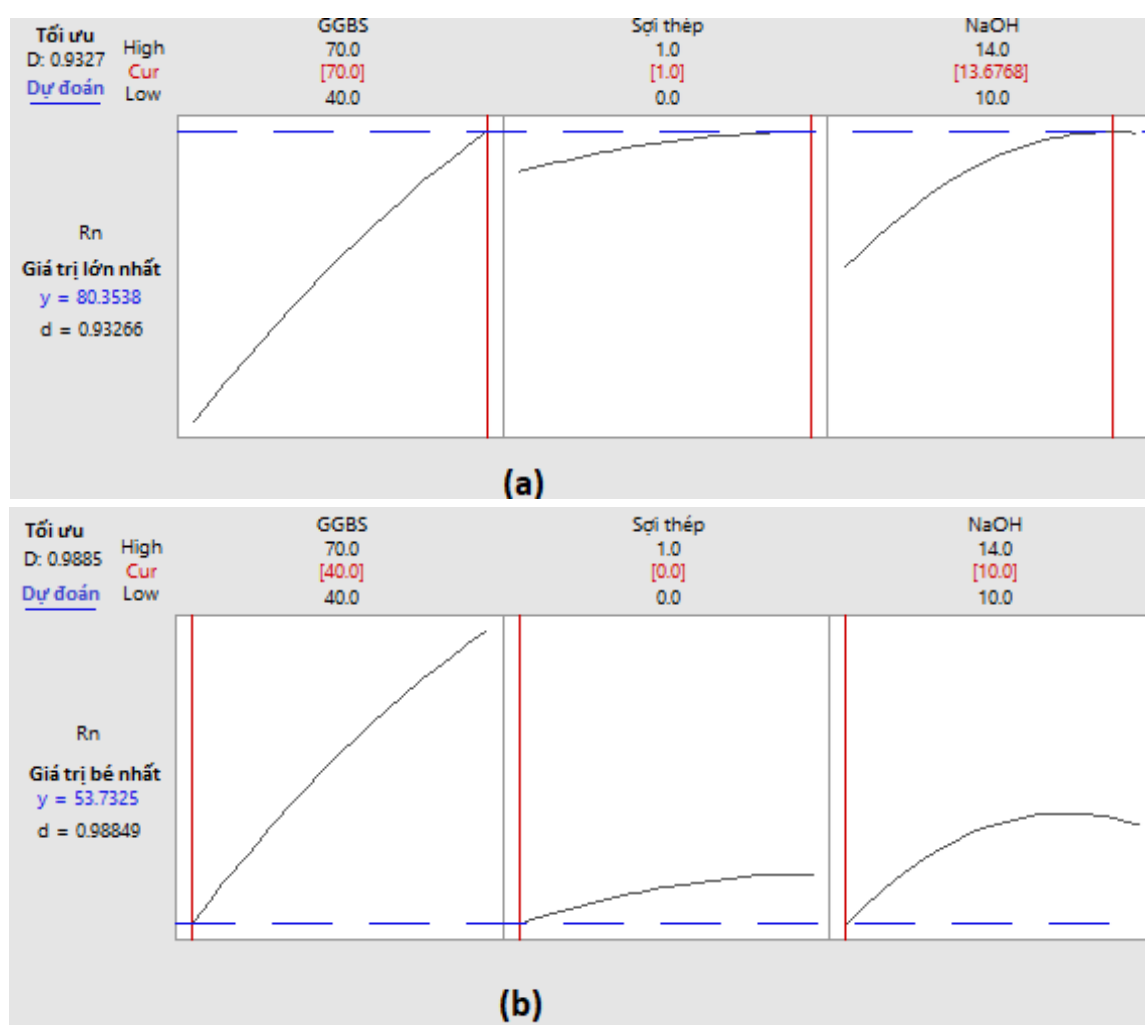
Kết quả tối ưu hóa ở Hình 8a cho thấy mô hình hồi quy dự đoán giá trị cường độ nén lớn nhất là 80.35 MPa tại tổ hợp GGBS = 70%, sợi thép = 1.0% thể tích và NaOH từ 13.7 M, với độ mong muốn $d = 0.93$. Ngoài ra, với kết quả tối ưu cho thấy giá trị cường độ nén dự đoán khoảng 80.35 MPa nằm trong khoảng cường độ cao đối với bê tông geopolymer nền tro bay-xỉ được hoạt hóa kiềm. Xu hướng đạt cường độ cao tại hàm lượng GGBS lớn và nồng độ NaOH cao phù hợp với các nghiên cứu trước, trong đó GGBS được ghi nhận có khả năng

cải thiện cường độ của geopolymer dưỡng hộ ở điều kiện thường nhờ thúc đẩy hình thành các sản phẩm gel giàu Ca [3-4]. Đồng thời, các nghiên cứu tối ưu hóa bằng phương pháp bề mặt đáp ứng cũng cho thấy miền tối ưu của hệ geopolymer thường phụ thuộc vào sự phối hợp giữa hàm lượng tiền chất hoạt tính và nồng độ dung dịch hoạt hóa [6, 7, 16]. Tuy nhiên, giá trị 80.35 MPa này là kết quả dự đoán trong phạm vi mô hình bề mặt đáp ứng, không phải là giá trị cường độ nén thực nghiệm độc lập. Do đó, tổ hợp cấp phối tối ưu cần được hiểu là miền thành phần có tiềm năng đạt

cường độ cao theo mô hình hồi quy. Để khẳng định giá trị tối ưu này, cần thực hiện thêm thí nghiệm xác nhận tại tổ hợp thành phần được dự đoán GGBS = 70%, sợi thép = 1.0% và NaOH = 13.7 M trước khi sử dụng như cấp phối thiết kế.

Tương tự, Hình 8b cho thấy giá trị cường độ nén nhỏ nhất là 53.73 MPa, tương ứng với GGBS = 40%, sợi thép = 0% và NaOH = 10 M, với độ mong muốn $d = 0.99$. Ở miền này, cả ba yếu tố đều ở mức thấp, dẫn đến khả năng phát triển cường độ kém. Đặc biệt, việc giảm hàm lượng GGBS và nồng độ NaOH làm suy giảm rõ rệt cường độ nén, trong khi ảnh hưởng của sợi thép vẫn nhỏ. Kết quả

tối ưu cũng cho thấy nghiệm cực đại nằm gần biên trên của miền khảo sát đối với GGBS và NaOH, trong khi nghiệm cực tiểu nằm tại biên dưới của các biến chính. Điều này phản ánh xu hướng tăng cường độ rõ rệt khi tăng hàm lượng tiền chất hoạt tính và mức độ hoạt hóa kiềm trong phạm vi đã xét. Tuy nhiên, do nghiệm tối ưu nằm sát biên thiết kế, không nên ngoại suy kết quả ra ngoài miền GGBS 40–70%, sợi thép 0–1.0% thể tích và NaOH 10–14 M. Việc mở rộng miền khảo sát hoặc tăng thêm nồng độ kiềm cần được kiểm chứng bằng thí nghiệm độc lập, vì cường độ có thể không tiếp tục tăng khi các yếu tố vượt quá vùng tối ưu dự đoán.



Hình 8. Kết quả tối ưu hóa cường độ nén (a) giá trị lớn nhất, (b) giá trị nhỏ nhất

4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng mô hình hồi quy bề mặt đáp ứng theo thiết kế Box–Behnken để dự báo cường độ nén 28 ngày của bê tông geopolymere cường độ cao sử dụng GGBS, sợi thép, cát nghiền

và dung dịch hoạt hóa kiềm. Mô hình có độ phù hợp cao, với $R^2 = 97.97\%$, R^2 hiệu chỉnh = 97.52% và R^2 dự đoán = 97.17%, cho thấy khả năng mô tả tốt quan hệ giữa các biến đầu vào và cường độ nén trong phạm vi khảo sát. Kết quả phân tích cho

thấy GGBS là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất, tiếp theo là nồng độ NaOH, trong khi sợi thép có ảnh hưởng nhỏ hơn. Tương tác GGBS x NaOH có ý nghĩa thống kê, phản ánh vai trò phối hợp giữa tiền chất giàu Ca và dung dịch hoạt hóa kiềm trong quá trình phát triển cường độ.

Mô hình dự đoán giá trị cường độ nén lớn nhất khoảng 80.35 MPa tại GGBS = 70%, sợi thép = 1.0% thể tích và NaOH = 13.7 M. Đây là giá trị tối ưu dự đoán từ mô hình hồi quy. Do đó, kết quả nghiên cứu nên xem là cơ sở tham khảo ban đầu cho lựa chọn miền thành phần cấp phối bê tông geopolimer cường độ cao và cần có thí nghiệm kiểm chứng độc lập trước khi sử dụng. Ngoài ra, nghiên cứu chỉ tập trung vào ba biến đầu vào và mục tiêu tối ưu mới xét đến cường độ nén 28 ngày. Các nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng đánh giá các chỉ tiêu như cường độ kéo uốn, độ bền lâu, tính công tác và đặc trưng vi cấu trúc.

Tài liệu tham khảo

- [1] B.V. Rangan. (2010). Fly ash-based geopolimer concrete. *In Proceedings of the International Workshop on Geopolymer Cement and Concrete*, Allied Publishers Private Limited, Mumbai, India, pp.68-106.
- [2] V.Đ. Anh, P.Đ. Hùng. (2024). Ảnh hưởng hàm lượng xỉ lò cao thay thế cho tro bay đến cường độ nén của bê tông geopolimer. *Tạp chí Xây dựng*, 11, 156-160.
- [3] P. Nath, P.K. Sarker. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolimer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>
- [4] P.S. Deb, P. Nath, P.K. Sarker. (2014). The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolimer concrete cured at ambient temperature. *Materials & Design (1980-2015)*, 62, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.001>
- [5] S.A. Bernal, J.L. Provis, V. Rose, R. Mejía de Gutiérrez. (2011). Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.004>
- [6] K. Chen, D. Wu, Z. Zhang, C. Pan, X. Shen, L. Xia, J. Zang. (2022). Modeling and optimization of fly ash-slag-based geopolimer using response surface methodology and its application in soft soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 315, 125723. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125723>
- [7] S. Ekmen, K. Mermerdaş, Z. Algin, Y. Işiker. (2022). Response surface optimization of geopolimer mix parameters in terms of key engineering properties. *Revista de la Construcción*, 21(3), 631-645. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.21.3.631>
- [8] D.-Y. Yoo, S. Kim, G.-J. Park, S.-W. Kim. (2017). Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. *Composite Structures*, 174, 375-388. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.069>
- [9] N. Ganesan, P.V. Indira, A. Santhakumar. (2013). Engineering properties of steel fibre reinforced geopolimer concrete. *Advances in Concrete Construction*, 1(4), 305-318. <https://renewal.techno-press.org/papers/383>
- [10] L. Qin, J. Yan, M. Zhou, H. Liu, A. Wang, W. Zhang, P. Duan, Z. Zhang. (2023). Mechanical properties and durability of fiber reinforced geopolimer composites: A review on recent progress. *Engineering Reports*, 5(12), e12708. <https://doi.org/10.1002/eng2.12708>
- [11] Y. Zheng, W. Zhang, L. Zheng, J. Zheng. (2024). Mechanical properties of steel fiber-reinforced geopolimer concrete after high

- temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 439, 137394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137394>
- [12] R. Adam, H. Zuaiter, D. ElMaoued, A. Tamimi, M. AlHamaydeh (2025). Mechanical properties quantification of steel fiber-reinforced geopolymer concrete incorporating with slag and fly ash. *Buildings*, 15(19), 3533. <https://doi.org/10.3390/buildings15193533>
- [13] C. Sashidhar, J.G. Jawahar, C. Neelima, D.P. Kumar. (2015). Fresh and strength properties of self-compacting geopolymer concrete using manufactured sand. *International Journal of ChemTech Research*, 8(7), 183-190.
- [14] H. Yang, Y. Jiao, J. Xing, Z. Liu. (2024). Statistical model and fracture behavior of manufactured sand concrete with varying replacement rates and stone powder contents. *Journal of Building Engineering*, 95, 110102. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110102>
- [15] K. Gao, Z. Sun, H. Ma, G. Ma. (2024). Research on compressive strength of manufactured sand concrete based on response surface methodology. *Materials*, 17(1), 195. <https://doi.org/10.3390/ma17010195>
- [16] X. Shi, C. Zhang, X. Wang, T. Zhang, Q. Wang. (2022). Response surface methodology for multi-objective optimization of fly ash-GGBS based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 315, 125644. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125644>
- [17] TCVN 10302. (2014). Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng.
- [18] ASTM C33/C33M. (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates. *ASTM International*.
- [19] ASTM C39/C39M. (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM International*.