



PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF AN INDUSTRIAL BY-PRODUCT-BASED WATER-RETAINING GROUT FOR SEMI-FLEXIBLE PAVEMENTS

Nguyen Viet Dat^{1,2}, Bui Tuan Anh^{1*}, Tran Danh Hoi¹, Nguyen Quang Phuc¹

¹University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

²People's Committee of Tung Thien Ward, No. 66 Thanh My Street, Tung Thien Ward, Hanoi City, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 10/08/2026

Revised: 05/10/2026

Accepted: 13/10/2026

Published online: 15/10/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.8.3>

* *Corresponding author*

Email: Tuananh.bui@utc.edu.vn; Tel: +84904127393

Abstract. Semi-flexible pavement (SFP) has been investigated as a water-retaining pavement to mitigate the urban heat island effect. The CJJ/T 206-2013 specification defines water-retaining grouts composed of slag powder, fly ash, hydrated lime and water, but the effect of the water-to-slag powder ratio (W/SP) on grout properties has not been quantified. This study evaluates the physical and mechanical properties of a water-retaining grout composed of ground granulated blast-furnace slag, fly ash and hydrated lime, in which the water-to-slag powder ratio ($W/SP = 0.66-1.00$) was varied as the main design parameter while fly ash and hydrated lime were fixed at 4 % and 8 %, respectively. Flow time and water absorption of four mix ratios (TL1-TL4) were determined according to CJJ/T 206-2013, and flexural and compressive strengths according to TCVN 3121-11:2022 at 7, 14, 21 and 28 days. Increasing W/SP reduced the flow time and increased water absorption almost linearly, while both strengths increased with age but decreased with W/SP. Empirical equations relating water absorption to 7-day strengths are valid only within the tested range. Among the four mixtures, only TL3 ($W/SP = 0.87$) and TL4 ($W/SP = 1.00$) satisfy the flow-time and strength requirements of CJJ/T 206-2013, whereas none reaches the 7-day water absorption of 30 % specified in the code (maximum 27.89 %). TL3 is recommended when mechanical strength is prioritized, while TL4 has the highest water absorption among the mixtures meeting the flow-time requirement. Water retention over time and cooling performance were not evaluated.

Keywords: semi-flexible pavement, water-retaining grout, ground granulated blast-furnace slag, fly ash, water-to-slag powder ratio.



TÍNH CHẤT CƠ - LÝ CỦA VỮA RÓT GIỮ NƯỚC SỬ DỤNG PHỤ PHẨM CÔNG NGHIỆP CHO MẶT ĐƯỜNG BÁN MỀM

Nguyễn Viết Đạt^{1,2}, Bùi Tuấn Anh^{1*}, Trần Danh Hợi¹, Nguyễn Quang Phúc¹

¹Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

²Ủy ban nhân dân phường Tùng Thiện, Số 66 đường Thanh Mỹ, phường Tùng Thiện, thành phố Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 10/08/2026

Ngày nhận bài sửa: 05/10/2026

Ngày chấp nhận đăng: 13/10/2026

Ngày xuất bản Online: 15/10/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.8.3>

* Tác giả liên hệ

Email: Tuananh.bui@utc.edu.vn; Tel: +84904127393

Tóm tắt. Mặt đường bán mềm (SFP) đang được nghiên cứu theo hướng giữ nước nhằm giảm hiệu ứng đảo nhiệt đô thị. Tiêu chuẩn CJJ/T 206-2013 quy định vữa giữ nước gồm bột xi, tro bay, vôi thủy hóa và nước, nhưng chưa lượng hóa ảnh hưởng của tỷ lệ nước/bột xi (N/BX) đến tính chất của vữa. Nghiên cứu này đánh giá các tính chất cơ - lý của vữa giữ nước gồm bột xi lò cao nghiền mịn, tro bay và vôi thủy hóa, trong đó tỷ lệ N/BX (0,66 - 1,00) là thông số thiết kế chính được thay đổi, còn hàm lượng tro bay và vôi thủy hóa được giữ cố định lần lượt ở 4 % và 8 %. Độ chảy và độ hút nước của bốn tỷ lệ phối trộn (TL1 - TL4) được xác định theo CJJ/T 206-2013; cường độ chịu uốn và chịu nén được xác định theo TCVN 3121-11:2022 ở các tuổi 7, 14, 21 và 28 ngày. Khi N/BX tăng, thời gian chảy giảm, độ hút nước tăng gần tuyến tính; cường độ tăng theo tuổi nhưng giảm khi N/BX tăng. Các phương trình thực nghiệm giữa độ hút nước và cường độ ở tuổi 7 ngày chỉ có giá trị trong phạm vi khảo sát. Trong bốn tỷ lệ, chỉ TL3 (N/BX = 0,87) và TL4 (N/BX = 1,00) đáp ứng yêu cầu về độ chảy và cường độ của CJJ/T 206-2013, trong khi không cấp phối nào đạt yêu cầu độ hút nước ở tuổi 7 ngày không nhỏ hơn 30 % (lớn nhất 27,89 %). TL3 được đề xuất khi ưu tiên cường độ, còn TL4 có độ hút nước cao nhất trong các cấp phối đáp ứng yêu cầu về độ chảy. Khả năng duy trì nước theo thời gian và hiệu quả làm mát chưa được đánh giá.

Từ khóa: mặt đường bán mềm, vữa giữ nước, bột xi lò cao nghiền mịn, tro bay, tỷ lệ nước/bột xi.

@2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mặt đường bán mềm (semi-flexible pavement - SFP) là kết cấu kết hợp bộ khung bê tông nhựa có độ rỗng dư lớn với vữa xi măng có độ linh động cao được rót lấp đầy hệ lỗ rỗng liên thông [1]. Nhờ kết hợp tính linh hoạt của mặt đường bê tông nhựa với khả năng chịu tải và ổn định nhiệt của mặt đường bê tông xi măng, SFP được ứng dụng tại các vị trí chịu tải trọng lớn và tốc độ xe thấp như nút giao, bến bãi và sân bay [1, 2]. Tại Việt Nam, kết cấu này đã được thử nghiệm ở một số dự án, điển hình là đoạn gần nút giao cao tốc Trung Lương - Mỹ Thuận [3].

Hiệu quả làm việc của SFP phụ thuộc chủ yếu vào khả năng chịu lực của bộ khung đá - nhựa và các tính chất cơ - lý của vữa rót. Do đó, thành phần và tính chất của vữa rót đã trở thành một trong những hướng nghiên cứu trọng tâm trong những năm gần đây [4]. Nhiều nghiên cứu đã cải thiện cơ tính của vữa bằng cách sử dụng phụ gia siêu dẻo kết hợp chất trương nở [5], latex cao su hoặc latex carboxyl [6, 7], nhũ tương nhựa đường [8] và Sika Latex trong điều kiện Việt Nam [9]. Bên cạnh đó, sức chịu tải của bộ khung đá - nhựa kết hợp với cường độ của vữa được xác định là yếu tố quyết định khả năng chịu lực tổng thể của kết cấu [10], trong khi độ bền của SFP chịu ảnh hưởng đáng kể bởi khả năng kháng nứt môi [11] và khả năng chống suy giảm dưới tác động của chu kỳ đóng băng - tan băng [12].

Ngoài chức năng chịu lực, SFP gần đây còn được phát triển theo hướng tích hợp khả năng giữ nước nhằm giảm nhiệt độ bề mặt và hạn chế hiệu ứng đảo nhiệt đô thị [13]. Hướng nghiên cứu phổ biến là bổ sung polyme siêu hấp thụ nước (super absorbent polymer - SAP) vào vữa xi măng để hấp thụ nước mưa và giải phóng dần thông qua quá trình bay hơi. Giải pháp này có thể làm giảm nhiệt độ bề mặt khoảng 10-12 °C mà vẫn duy trì khả năng chịu tải và kháng hàn lún [14]. Tuy nhiên, SAP hấp thụ một lượng nước lớn ngay từ giai đoạn phối trộn, làm giảm độ linh động của vữa do cạnh tranh nước với quá trình thủy hóa chất kết dính, đồng thời làm chậm sự phát triển cường độ của vữa. Sau khi giải phóng nước, các hạt SAP còn tạo nên hệ vi lỗ rỗng không liên thông, có thể làm giảm khối lượng thể tích và cường độ của vật liệu [14].

Một hướng tiếp cận khác, không sử dụng SAP, đã được quy định trong tiêu chuẩn CJJ/T 206-2013 của Trung Quốc đối với mặt đường giảm hấp thụ nhiệt đô thị. Theo tiêu chuẩn này, khả năng giữ nước được tạo ra nhờ chính cấu trúc lỗ rỗng nội tại của hệ vữa sử dụng bột xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn (sau đây gọi tắt là bột xỉ), tro bay và vôi thủy hóa làm chất hoạt hóa kiềm. Thành phần điển hình của hỗn hợp gồm bột xỉ 47 % ± 7 %, tro bay 4 % ± 1 %, vôi thủy hóa Ca(OH)_2 8 % ± 2 %, phần còn lại là nước [15]. Trong hệ vật liệu này, bột xỉ và tro bay chỉ phát triển cường độ khi được hoạt hóa trong môi trường kiềm và tiếp tục phản ứng trong thời gian dài [16, 17]. Vì vậy, khả năng giữ nước của vữa chủ yếu được hình thành từ hệ mao quản và cấu trúc lỗ rỗng sau quá trình thủy hóa, thay vì từ một pha polyme trương nở riêng biệt.

Mặc dù CJJ/T 206-2013 đã đưa ra thành phần phối trộn và các chỉ tiêu kỹ thuật đối với hệ vữa giữ nước, vẫn còn ba khoảng trống cần được làm rõ. Thứ nhất, tiêu chuẩn chỉ quy định dải tỷ lệ vật liệu và dung sai cho phép, nhưng chưa thiết lập mối quan hệ định lượng giữa tỷ lệ nước/bột xỉ (N/BX) với các chỉ tiêu độ chảy, cường độ và độ hút nước, cũng như giữa cường độ và độ hút nước. Do đó, người thiết kế chưa có đủ cơ sở để lựa chọn cấp phối phù hợp trong phạm vi mà tiêu chuẩn cho phép. Thứ hai, mối quan hệ cân bằng giữa độ hút nước (đại diện gián tiếp cho khả năng giữ nước) và cường độ cơ học của hệ vữa chưa được lượng hóa một cách hệ thống. Thứ ba, theo các tài liệu mà nhóm tác giả tiếp cận được, số công bố đánh giá khả năng áp dụng hệ vữa này với nguồn bột xỉ và tro bay tại Việt Nam còn rất hạn chế. Các nghiên cứu trong nước về vữa cho SFP [3, 9] chủ yếu tập trung vào vữa xi măng cải thiện bằng phụ gia, latex nhằm nâng cao khả năng chịu lực, trong khi thành phần khoáng, độ mịn và hoạt

tính của các phụ phẩm công nghiệp thay đổi đáng kể theo nguồn cung và ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình hoạt hóa cũng như sự phát triển cường độ [16, 18]. Mặc dù phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology - RSM) đã được sử dụng để tối ưu đồng thời nhiều biến phối trộn [19], mục tiêu của nghiên cứu này không phải là tìm thành phần tối ưu trong không gian nhiều biến mà là kiểm chứng khả năng áp dụng của dải cấp phối được quy định trong CJJ/T 206-2013 đối với nguồn vật liệu trong nước. Việc mở rộng nghiên cứu theo hướng tối ưu hóa bằng RSM được đề xuất cho các nghiên cứu tiếp theo.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này nhằm: (i) đối chiếu độ chảy, cường độ và độ hút nước của hệ vữa giữ nước sử dụng bột xi, tro bay và vôi thủy hóa chế tạo từ nguồn vật liệu sẵn có tại Việt Nam với yêu cầu của CJJ/T 206-2013 [15]; và (ii) lượng hóa ảnh hưởng của tỷ lệ N/BX - thông số thiết kế chính được thay đổi trong nghiên cứu - đến độ chảy, cường độ chịu uốn, cường độ chịu nén ở các tuổi 7, 14, 21 và 28 ngày và độ hút nước của vữa, qua đó làm rõ mối quan hệ giữa độ hút nước và tính năng cơ học của vật liệu. Tiêu chí lựa chọn cấp phối được xác lập trước khi thí nghiệm theo thứ tự ưu tiên: trước hết hỗn hợp phải đồng thời đáp ứng các yêu cầu về độ chảy và cường độ theo CJJ/T 206-2013 [15]; trong số các cấp phối đạt yêu cầu, lựa chọn cấp phối có độ hút nước lớn nhất và đối chiếu với yêu cầu về độ hút nước của tiêu chuẩn.

Đóng góp của nghiên cứu là bộ dữ liệu thực nghiệm về hệ vữa bột xi - tro bay - vôi theo CJJ/T 206-2013 với nguồn vật liệu tại Việt Nam, kèm lượng hóa xu hướng giữa độ chảy, độ hút nước và cường độ trong phạm vi $N/BX = 0,66 - 1,00$. Nghiên cứu không đề xuất cơ chế vật liệu hoặc phương pháp thiết kế mới. Các kết quả là cơ sở tham khảo để lựa chọn cấp phối ứng viên cho các nghiên cứu về hệ SFP hoàn chỉnh.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu thành phần

Vữa giữ nước được chế tạo từ bốn vật liệu chính gồm bột xi, tro bay, vôi thủy hóa và nước theo hướng dẫn của CJJ/T 206-2013 [15]. Bột xi sử dụng đạt mức hoạt tính S95 theo TCVN 11586:2016 [20], tro bay thuộc loại F theo TCVN 10302:2014 [21]. Vôi thủy hóa $Ca(OH)_2$ đáp ứng yêu cầu của TCVN 2231:2016 [22] và được sử dụng làm chất hoạt hóa kiềm, thúc đẩy phản ứng của bột xi và tro bay. Nước trộn đáp ứng yêu cầu đối với bê tông không cốt thép theo TCVN 4506:2012 [23]. Các chỉ tiêu cơ lý và thành phần hóa học của các vật liệu sử dụng trong nghiên cứu được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Đặc trưng vật lý và thành phần hóa của vật liệu thành phần.

Vật liệu	$SiO_2 +$ $Al_2O_3 +$ Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Mất khí nung (%)	Khối lượng riêng (g/cm^3)	Diện tích bề mặt riêng Blaine (m^2/kg)	Lượng sốt sàng 45 μm (%)	Chỉ số hoạt tính 28 ngày (%)	Hàm lượng $Ca(OH)_2$ (%)
Bột xi	48,58	39,10	7,76	0,231	0,463	2,88	510,6	-	100,67	-
Tro bay	90,5	0,84	0,70	0,06	5,3	2,22	-	23,3	85,3	-
Vôi thủy hóa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	93,54

2.2. Thiết kế tỷ lệ phối trộn và chế tạo mẫu

Dựa trên tỷ lệ khuyến nghị của CJJ/T 206-2013, hàm lượng vôi thủy hóa và tro bay được giữ cố định ở mức lần lượt là 8 % và 4 % khối lượng hỗn hợp. Phần khối lượng còn lại (88 %) là bột xi.

được phân bố giữa nước và bột xi. Tỷ lệ nước/bột xi (N/BX) được lựa chọn là thông số thiết kế chính và được thay đổi bằng cách tăng dần hàm lượng nước đồng thời giảm tương ứng hàm lượng bột xi. Do tổng hàm lượng nước và bột xi không đổi (88 %), việc tăng N/BX đồng thời làm tăng hàm lượng nước và giảm hàm lượng bột xi (chất kết dính hoạt tính chính). Vì vậy N/BX được sử dụng như một chỉ số tổng hợp mô tả ảnh hưởng đồng thời của hai thay đổi này; thiết kế thí nghiệm không cho phép tách riêng ảnh hưởng của hàm lượng nước và của hàm lượng bột xi. Để đối chiếu, tỷ lệ nước/tổng chất kết dính (N/CKD, CKD = bột xi + tro bay + vôi thủy hóa) cũng được tính và nêu trong Bảng 2.

Bốn tỷ lệ phối trộn được lựa chọn với hàm lượng nước tăng từ 35 % đến 44 % (bước tăng 3 %), tương ứng hàm lượng bột xi giảm từ 53 % xuống 44 %, tỷ lệ N/BX tăng từ 0,66 đến 1,00 và tỷ lệ N/CKD tăng từ 0,54 đến 0,79 (Bảng 2). Các cấp phối nằm trong dải thành phần quy định của CJJ/T 206-2013 nhưng chỉ phủ một phần dải hàm lượng bột xi $47 \% \pm 7 \%$ (40 - 54 %) của tiêu chuẩn.

Bảng 2. Thành phần tỷ lệ phối trộn và số lượng mẫu thí nghiệm.

Biến đầu vào (% khối lượng)					Số lượng mẫu thí nghiệm			
Tỷ lệ	Nước	Bột xi	Vôi	Tro bay	Độ chảy (số lần đo)	R _{ku} (7, 14; 21, 28 ngày tuổi)	R _n (7, 14; 21, 28 ngày tuổi)	Độ hút nước
TL 1 (N/BX = 0,66; N/CKD = 0,54)	35	53	8	4	3	$4 \times 3 = 12$	$4 \times 6 = 24$	3
TL 2 (N/BX = 0,76; N/CKD = 0,61)	38	50	8	4	3	$4 \times 3 = 12$	$4 \times 6 = 24$	3
TL 3 (N/BX = 0,87; N/CKD = 0,69)	41	47	8	4	3	$4 \times 3 = 12$	$4 \times 6 = 24$	3
TL 4 (N/BX = 1,00; N/CKD = 0,79)	44	44	8	4	3	$4 \times 3 = 12$	$4 \times 6 = 24$	3

Vữa được chế tạo theo CJJ/T 206-2013 [15]. Các vật liệu được cân theo đúng thành phần cấp phối, trộn khô bột xi, tro bay và vôi thủy hóa trong 1-2 phút, sau đó bổ sung nước và tiếp tục trộn trong khoảng 3 phút đến khi hỗn hợp đồng nhất. Độ chảy được xác định trong vòng 1 phút sau khi trộn. Phần vữa sử dụng cho phép thử này không được tái sử dụng để chế tạo mẫu. Phần vữa còn lại được đúc và bảo dưỡng theo TCVN 3121-11:2022 [24] ở nhiệt độ phòng đến các tuổi thí nghiệm (Hình 1).



a) Vữa sau khi trộn



b) Đúc các mẫu đầm

Hình 1. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm.

2.3. Phương pháp thí nghiệm

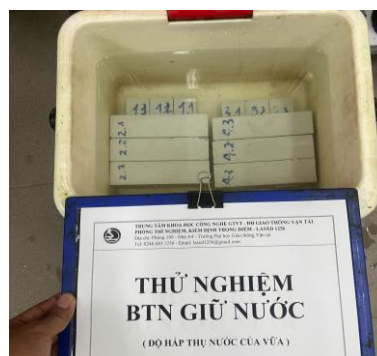
Các thí nghiệm được thực hiện tại Phòng thí nghiệm kiểm định trọng điểm LAS-XD 1256 - Trung tâm Khoa học Công nghệ GTVT - Trường Đại học Giao thông vận tải (Hình 2). Độ chảy của vữa được xác định ngay sau khi trộn theo Phụ lục A của CJJ/T 206-2013 và được biểu thị bằng thời gian chảy (s). Độ hút nước được xác định ở tuổi 7 ngày theo Phụ lục B của CJJ/T 206-2013. Đây là tuổi quy định của phép thử và trùng với tuổi đối chiếu yêu cầu cường độ, cho phép lập quan hệ giữa độ hút nước và cường độ tại cùng một tuổi. Cường độ chịu uốn và cường độ chịu nén được xác định theo TCVN 3121-11:2022 [24] trên mẫu dầm $40 \times 40 \times 160$ mm ở các tuổi 7, 14, 21 và 28 ngày. Các thí nghiệm được thực hiện trên mẫu vữa độc lập; khả năng thâm nhập, lấp đầy khung bê tông nhựa rỗng và tính chất của vật liệu composite SFP không thuộc phạm vi của nghiên cứu này.

Đối với mỗi tỷ lệ phối trộn, phép thử độ chảy được thực hiện trên ba lần đo độc lập. Độ hút nước và cường độ chịu uốn được xác định trên ba mẫu thử. Cường độ chịu nén được xác định trên sáu nửa mẫu thu được sau khi thí nghiệm uốn. Tất cả các kết quả được biểu thị dưới dạng giá trị trung bình và độ lệch chuẩn.

Trong nghiên cứu này, khả năng giữ nước của vữa được đánh giá gián tiếp bằng độ hút nước ở tuổi 7 ngày, phản ánh thể tích lỗ rỗng hở có thể chứa nước. Đây là điều kiện cần nhưng chưa đủ của khả năng giữ nước theo thời gian. Tốc độ giải phóng nước, bay hơi và hiệu quả làm mát chưa được đo và không được suy ra từ kết quả của nghiên cứu này. Thuật ngữ “vữa giữ nước” chỉ được dùng như tên gọi loại vữa theo CJJ/T 206-2013 [15].



a) Độ chảy



b) Độ hút nước



c) Cường độ chịu uốn



d) Cường độ chịu nén

Hình 2. Các thí nghiệm trong phòng.

Độ hút nước (k) theo thể tích được xác định theo công thức (1):

$$k = \frac{(m_2 - m_1)}{\gamma_w V} \times 100 \quad (1)$$

Trong đó: m_1 và m_2 lần lượt là khối lượng mẫu ở trạng thái khô và sau khi ngâm bão hòa (g); γ_w là khối lượng riêng của nước ở 20 °C, $\gamma_w = 0,99822 \text{ g/cm}^3$; V là thể tích mẫu (cm^3).

Thí nghiệm uốn được thực hiện theo phương pháp uốn ba điểm với khoảng cách hai gối tựa 100 mm và tốc độ tăng tải 50 N/s. Sau khi phá hoại do uốn, sáu nửa mẫu thu được được sử dụng để xác định cường độ chịu nén với tốc độ tăng tải 500 N/s. Cường độ chịu uốn (R_{ku}) và cường độ chịu nén (R_n) được tính theo công thức (2) và (3):

$$R_{ku} = \frac{1,5P_{ku}l}{bh^2} \quad (2)$$

$$R_n = \frac{P_n}{A} \quad (3)$$

Trong đó: P_{ku} và P_n lần lượt là lực uốn gãy và lực nén phá hủy mẫu (N); l là khoảng cách hai gối uốn (mm); b và h lần lượt là chiều rộng và chiều cao thực đo của tiết diện dầm (mm); A là diện tích tiết diện chịu nén (mm^2).

Kết quả tính toán cường độ được xử lý theo quy định của TCVN 3121-11:2022 [24]. Không có giá trị nào vượt quá giới hạn sai lệch cho phép nên không có mẫu thử bị loại khỏi quá trình xử lý số liệu. Các giá trị cường độ trung bình được trình bày với độ chính xác đến 0,01 MPa nhằm phục vụ phân tích hồi quy.

Phân tích thống kê. Ảnh hưởng của tỷ lệ phối trộn đến từng chỉ tiêu được đánh giá bằng phân tích phương sai một yếu tố (ANOVA) với mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$, tính từ giá trị trung bình, độ lệch chuẩn và số mẫu của từng cấp phối ($n = 3$ với độ chảy, độ hút nước và cường độ chịu uốn; $n = 6$ với cường độ chịu nén). Với cường độ, do độ lệch chuẩn được báo cáo dưới dạng khoảng (xem Mục 3.2), giá trị lớn nhất của khoảng được dùng cho mọi cấp phối, tức là ước lượng thận trọng. Khác biệt giữa hai cấp phối được kiểm định bằng phép thử t Welch. Các phương trình hồi quy tuyến tính được báo cáo kèm số điểm dữ liệu n , hệ số xác định R^2 và mức ý nghĩa p của hệ số góc. Trong các phương trình (4) - (9), T_c tính bằng s, k tính bằng %, $R_{n,7}$ và $R_{ku,7}$ tính bằng MPa.

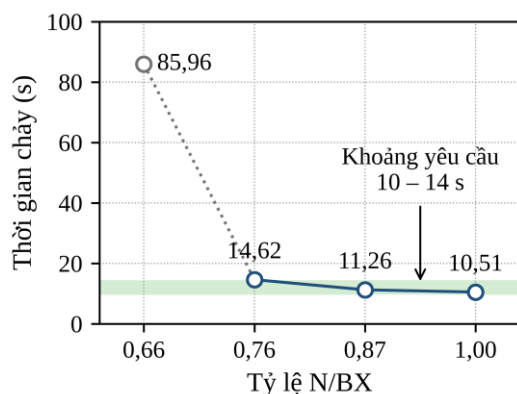
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Độ chảy và độ hút nước

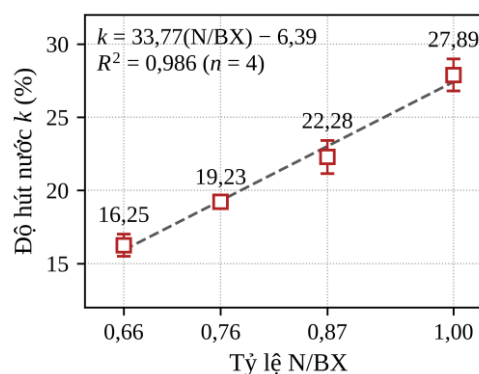
Hai chỉ tiêu công nghệ của vữa gồm độ chảy ở trạng thái tươi và độ hút nước ở tuổi 7 ngày cùng phụ thuộc trực tiếp vào lượng nước trộn, thể hiện qua hàm lượng nước (N) hoặc qua tỷ lệ nước/bột xi (N/BX). Kết quả được tổng hợp trong Bảng 3 và biểu diễn trên Hình 3.

Bảng 3. Độ chảy và độ hút nước của vữa giữ nước theo các tỷ lệ phối trộn.

Tỷ lệ phối trộn	Hàm lượng nước (%)	Thời gian chảy (s)		Độ hút nước k ở tuổi 7 ngày (%)
		Trung bình	Độ lệch chuẩn	
TL 1 (N/BX = 0,66)	35	85,96	0,47	16,25 ± 0,76
TL 2 (N/BX = 0,76)	38	14,62	0,46	19,23 ± 0,36
TL 3 (N/BX = 0,87)	41	11,26	0,38	22,28 ± 1,14
TL 4 (N/BX = 1,00)	44	10,51	0,11	27,89 ± 1,09



a) Thời gian chảy.



b) Độ hút nước ở 7 ngày tuổi.

Hình 3. Ảnh hưởng của tỷ lệ N/BX đến độ chảy và độ hút nước.

Thời gian chảy giảm khi tỷ lệ N/BX tăng, phản ánh sự gia tăng độ linh động của vữa, tuy nhiên mức độ thay đổi không tuyến tính (Hình 3a). Ở TL1 (N/BX = 0,66), hỗn hợp không đạt trạng thái chảy liên tục; giá trị 85,96 s được ghi nhận khi hỗn hợp chảy gián đoạn, nằm ngoài phạm vi làm việc hợp lệ của phép thử phễu, nên chỉ được dùng làm giá trị tham khảo để loại TL1 theo tiêu chí độ chảy và không được đưa vào hồi quy hay phân tích thống kê. Từ TL2 (N/BX = 0,76), hỗn hợp chảy ổn định và phép thử phản ánh đúng tính linh động của vữa. Thời gian chảy giảm từ 14,62 s ở TL2 xuống 11,26 s ở TL3 (N/BX = 0,87) và 10,51 s ở TL4 (N/BX = 1,00); khác biệt giữa ba cấp phối này có ý nghĩa thống kê (ANOVA, $F(2; 6) = 117$, $p < 0,001$). Xu hướng của thời gian chảy T_c (s) theo tỷ lệ N/BX của ba cấp phối này được mô tả bằng đường xu hướng (4):

$$T_c = -16,87(N/BX) + 26,93 \quad (4)$$

Phương trình (4) chỉ là đường xu hướng đi qua ba điểm dữ liệu ($n = 3$; $p \approx 0,25$), không có ý nghĩa thống kê và không được dùng để nội suy hay dự báo. Mức giảm thời gian chảy chậm dần khi N/BX tăng phù hợp với ghi nhận đối với vữa rót cho SFP, trong đó lượng nước trộn là yếu tố chi phối độ linh động của vữa [4]; tuy nhiên, cơ chế này không được đo trực tiếp trong nghiên cứu. Độ lệch chuẩn của phép đo nhỏ (0,11 - 0,47 s, tương ứng hệ số biến sai 0,5 - 3,4 %), cho thấy độ lặp lại tốt của phép thử phễu. Đối chiếu yêu cầu 10 - 14 s của CJJ/T 206-2013 [15], TL1 không đạt, TL2 vượt giới hạn trên 4,4 %, còn TL3 và TL4 đều nằm trong khoảng yêu cầu: TL3 cách giới hạn dưới 1,26 s (hơn ba lần độ lệch chuẩn phép đo) và TL4 cách giới hạn dưới 0,51 s (hơn bốn lần độ lệch chuẩn). Khác biệt về thời gian chảy giữa TL3 và TL4 không có ý nghĩa thống kê (phép thử t Welch, $p \approx 0,07$).

Ngược lại, độ hút nước tăng gần tuyến tính theo tỷ lệ N/BX, từ 16,25 % lên 27,89 % (Hình 3b), theo phương trình (5):

$$k = 33,77(N/BX) - 6,39 \quad (5)$$

với $R^2 = 0,986$ ($n = 4$; $p = 0,007$; khoảng tin cậy 95 % của hệ số góc: 21,8 - 45,8). Khác biệt về độ hút nước giữa các cấp phối có ý nghĩa thống kê (ANOVA, $F(3; 8) = 93$, $p < 0,001$), kể cả giữa TL3 và TL4 (phép thử t Welch, $p = 0,004$). Các phương trình (4) - (9) được xây dựng từ 3 - 4 mức phối trộn nên chỉ là quan hệ mô tả xu hướng trong phạm vi khảo sát ($n = 3 - 4$). R^2 cao không phải bằng chứng về khả năng dự báo và không được dùng để ngoại suy ngoài phạm vi N/BX = 0,66 - 1,00 hoặc $k = 16 - 28$ %.

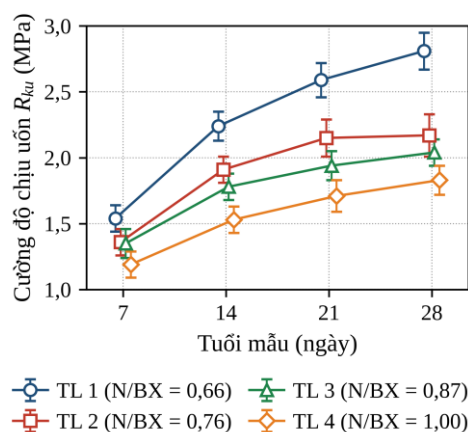
3.2. Cường độ chịu uốn và cường độ chịu nén

Kết quả cường độ trung bình của bốn tỷ lệ tại các tuổi 7, 14, 21 và 28 ngày được tổng hợp trong Bảng 4 và thể hiện trên Hình 4.

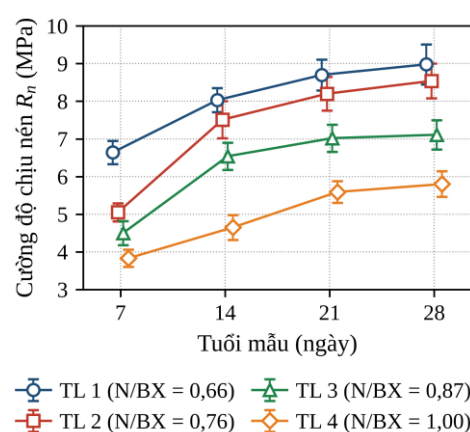
Bảng 4. Cường độ chịu uốn và cường độ chịu nén trung bình theo tuổi mẫu (MPa).

Tỷ lệ	Cường độ chịu uốn R_{ku}				Cường độ chịu nén R_n			
	7 ngày	14 ngày	21 ngày	28 ngày	7 ngày	14 ngày	21 ngày	28 ngày
TL 1	1,54	2,24	2,59	2,81	6,64	8,03	8,70	8,98
TL 2	1,36	1,91	2,15	2,17	5,05	7,51	8,20	8,54
TL 3	1,35	1,78	1,94	2,04	4,50	6,54	7,02	7,11
TL 4	1,19	1,53	1,71	1,83	3,83	4,65	5,59	5,80
Độ lệch chuẩn	0,09 - 0,16				0,22 - 0,53			

Cường độ chịu uốn và cường độ chịu nén của cả bốn cấp phối đều tăng theo tuổi thí nghiệm trong khoảng 7 - 28 ngày (Bảng 4). Ở tuổi 7 ngày, cường độ chịu nén đạt 59,1 - 73,9 % và cường độ chịu uốn đạt 54,8 - 66,2 % so với giá trị ở tuổi 28 ngày; đến tuổi 21 ngày, hai chỉ tiêu này đều đạt trên 92 % giá trị 28 ngày. Kết quả cho thấy phần lớn cường độ được hình thành trong ba tuần đầu, trong khi mức tăng từ 21 đến 28 ngày không đáng kể.



a) Cường độ chịu uốn R_{ku} .



b) Cường độ chịu nén R_n .

Hình 4. Biến đổi cường độ theo tuổi mẫu.

Tại tuổi 7 ngày, cường độ chịu nén và cường độ chịu uốn đều giảm khi tỷ lệ N/BX tăng (Bảng 4). Ảnh hưởng của tỷ lệ phối trộn đến cường độ chịu nén có ý nghĩa thống kê ở cả bốn tuổi (ANOVA, $F(3; 20) = 31 - 47$, $p < 0,001$) và đến cường độ chịu uốn ở các tuổi 14, 21 và 28 ngày ($F(3; 8) = 10,2 - 20,9$, $p \leq 0,004$). Riêng cường độ chịu uốn ở tuổi 7 ngày, khác biệt chưa có ý nghĩa thống kê theo ước lượng thận trọng ($F(3; 8) = 2,4$, $p = 0,14$), nên chỉ được xem là xu hướng giảm. Quan hệ giữa cường độ ở tuổi 7 ngày và tỷ lệ N/BX được mô tả bằng phương trình (6) đối với cường độ chịu nén ($R^2 = 0,910$; $n = 4$; $p = 0,046$) và phương trình (7) đối với cường độ chịu uốn ($R^2 = 0,912$; $n = 4$; $p = 0,045$), với mức ý nghĩa ở mức biên.

$$R_{n,7} = -7,82 (N/BX) + 11,45 \quad (6)$$

$$R_{ku,7} = -0,95(N/BX) + 2,14 \quad (7)$$

Độ lệch chuẩn của cường độ chịu uốn và cường độ chịu nén lần lượt nằm trong khoảng 0,09 - 0,16 MPa và 0,22 - 0,53 MPa, tương ứng hệ số biến sai lớn nhất là 8,7 % và 7,1 %. Không có mẫu thử nào vượt quá giới hạn sai lệch cho phép của TCVN 3121-11:2022 [24], do đó toàn bộ kết quả được sử dụng trong quá trình phân tích.

Do tro bay và vôi thủy hóa được giữ cố định, tỷ lệ N/CKD gần như đồng biến hoàn toàn với N/BX (hệ số tương quan $r = 0,9999$). Khi biểu diễn theo N/CKD, các quan hệ tương ứng là $k = 46,3(N/CKD) - 9,07$ ($R^2 = 0,984$; $p = 0,008$), $R_{n,7} = -10,77(N/CKD) + 12,09$ ($R^2 = 0,915$; $p = 0,043$) và $R_{ku,7} = -1,28(N/CKD) + 2,20$ ($R^2 = 0,911$; $p = 0,046$), tương đương với kết quả theo N/BX. Do đó, xu hướng không phụ thuộc vào chỉ số được chọn, nhưng không tách riêng được ảnh hưởng của hàm lượng nước và hàm lượng bột xi.

Theo yêu cầu của CJJ/T 206-2013 [15], cường độ tối thiểu ở tuổi 7 ngày là ($R_n \geq 2,0$) MPa và ($R_{ku} \geq 0,5$) MPa. Cả bốn tỷ lệ đều đáp ứng yêu cầu này. Giá trị thấp nhất lần lượt là 3,83 MPa đối với cường độ chịu nén và 1,19 MPa đối với cường độ chịu uốn. Do đó, trong phạm vi nghiên cứu, cường độ không phải là chỉ tiêu không chế và việc lựa chọn cấp phối chủ yếu dựa trên yêu cầu về độ chảy và độ hút nước.

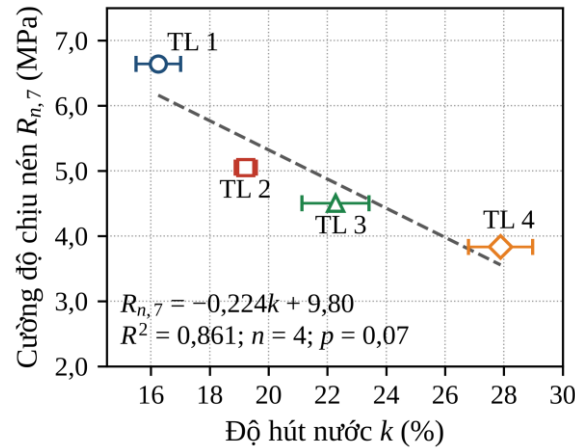
Xu hướng cường độ giảm khi tăng tỷ lệ nước phù hợp với kết quả của vữa xi măng cho SFP [4, 25]. Cường độ chịu nén 7 ngày của vữa nghiên cứu (3,83 - 6,64 MPa) thấp hơn vữa giữ nước xi măng - SAP (trên 10 MPa) [14] và thấp hơn nhiều so với các vữa xi măng có cường độ 19,8 - 40,2 MPa dùng trong nghiên cứu SFP [26], phản ánh hệ không dùng xi măng poocăng, phát triển cường độ chậm và có độ rỗng cao để đạt độ hút nước. Vì vậy, tính năng của vữa khi kết hợp với khung bê tông nhựa rỗng cần được kiểm chứng.

3.3. Quan hệ giữa độ hút nước và cường độ, lựa chọn tỷ lệ phối trộn

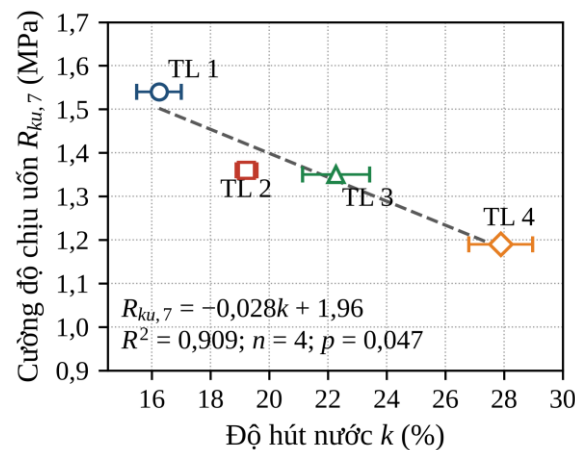
Để làm rõ mối quan hệ giữa độ hút nước và cường độ của vữa, quan hệ giữa độ hút nước với cường độ nén và cường độ uốn ở tuổi 7 ngày lần lượt được thể hiện trên Hình 5 và Hình 6. Biểu đồ Hình 5 và Hình 6 cho thấy cả cường độ uốn và cường độ nén đều giảm khi độ hút nước tăng. Quan hệ giữa cường độ nén ở tuổi 7 ngày và độ hút nước được biểu diễn bằng phương trình (8):

$$R_{n,7} = -0,224k + 9,80 \quad (8)$$

với $R^2 = 0,861$ ($n = 4$; $p = 0,07$). Hệ số góc chưa đạt ý nghĩa thống kê ở mức 5 %, nên phương trình (8) chỉ được xem là xu hướng: cường độ nén giảm khoảng 0,22 MPa khi độ hút nước tăng thêm 1 điểm phần trăm trong phạm vi khảo sát.



Hình 5. Quan hệ giữa độ hút nước và cường độ chịu nén ở tuổi 7 ngày.



Hình 6. Quan hệ giữa độ hút nước và cường độ chịu uốn ở tuổi 7 ngày.

Quan hệ giữa cường độ chịu uốn ở tuổi 7 ngày và độ hút nước được biểu diễn bằng phương trình (9):

$$R_{ku,7} = -0,028k + 1,96 \quad (9)$$

với $R^2 = 0,909$ ($n = 4$; $p = 0,047$). Các phương trình (8) và (9) được xây dựng từ bốn cấp phối thí nghiệm ở tuổi 7 ngày, do đó chỉ áp dụng cho tuổi 7 ngày, trong phạm vi độ hút nước từ 16 % đến 28 % (tương ứng $N/BX = 0,66 - 1,00$) và đối với nguồn vật liệu, điều kiện chế tạo và chế độ bảo dưỡng của nghiên cứu này. Độ hút nước trong nghiên cứu này tính theo thể tích (CJJ/T 206-2013) nên không so sánh trực tiếp về giá trị tuyệt đối với tỷ lệ hút nước theo khối lượng trong [14].

Theo tiêu chí lựa chọn đã đề ra ở Mục 1, TL1 bị loại do hỗn hợp không đạt trạng thái chảy liên tục, còn TL2 không đáp ứng yêu cầu về độ chảy theo CJJ/T 206-2013 [15]. Hai cấp phối còn lại (TL3 và TL4) đều đáp ứng các yêu cầu về độ chảy và cường độ. Tuy nhiên, theo CJJ/T 206-2013, vữa giữ nước còn phải đạt độ hút nước ở 7 ngày không nhỏ hơn 30 %. Giá trị lớn nhất trong nghiên cứu là 27,89 % (TL4), do đó không cấp phối nào đáp ứng đầy đủ yêu cầu của tiêu chuẩn về chỉ tiêu này; TL3 và TL4 chỉ đáp ứng yêu cầu về độ chảy và cường độ và được xem là các cấp phối ứng viên cho nghiên cứu tiếp theo. So với TL3, TL4 có độ hút nước cao hơn 25,2 % (27,89 % so với 22,28 %), nhưng cường độ nén ở tuổi 7 ngày và 28 ngày thấp hơn tương ứng 14,9 % (3,83 MPa so với 4,50 MPa) và 18,4 % (5,80 MPa so với 7,11 MPa). TL3

phù hợp khi ưu tiên cường độ, còn TL4 có độ hút nước cao nhất trong các cấp phối đáp ứng yêu cầu về độ chảy. Khả năng duy trì nước theo thời gian và hiệu quả giảm nhiệt bề mặt của TL4 chưa được đánh giá trong nghiên cứu này và là giả thuyết cần kiểm chứng ở các nghiên cứu tiếp theo.

3.4. Thảo luận về cơ chế

Do nghiên cứu không thực hiện các phân tích vi cấu trúc (SEM, XRD, MIP), nội dung dưới đây là diễn giải dựa trên tài liệu, không phải kết quả đo trực tiếp. Thứ nhất, lượng nước vượt nhu cầu của phản ứng hoạt hóa kiềm của xi - tro bay [16 - 18] tồn tại dưới dạng nước mao quản. Khi nước này bị tiêu thụ hoặc bay hơi trong quá trình bảo dưỡng, nó để lại hệ lỗ rỗng và mao quản có thể tích lớn hơn, tương ứng độ hút nước cao hơn. Thứ hai, hàm lượng bột xi - nguồn tạo sản phẩm thủy hóa lấp đầy lỗ rỗng - giảm khi N/BX tăng, nên lượng sản phẩm phản ứng trên một đơn vị thể tích giảm và cường độ giảm. Cường độ giảm khi lượng nước tăng cũng được ghi nhận ở vữa xi măng cho SFP [4, 25] và ở vữa giữ nước dùng SAP, nơi lượng nước dư vượt nhu cầu thủy hóa tạo thêm lỗ rỗng sau khi bay hơi [14]. Thứ ba, cấu trúc lỗ rỗng của vật liệu nền xi còn phụ thuộc phân bố kích thước lỗ [27], nên cùng độ rỗng nhưng phân bố lỗ khác nhau có thể cho cường độ và độ hút nước khác nhau. Chuỗi cơ chế gồm sự gia tăng hàm lượng nước và giảm hàm lượng xi, dẫn đến gia tăng độ rỗng và hệ thống mao quản, từ đó làm tăng độ hút nước và giảm cường độ, là một giả thuyết phù hợp với các kết quả thực nghiệm và cơ sở tài liệu hiện có. Tuy nhiên, cơ chế này cần được kiểm chứng thêm bằng các phương pháp như MIP, SEM và XRD trong các nghiên cứu tiếp theo.

3.5. Hạn chế của nghiên cứu

Nghiên cứu có các hạn chế sau: (1) chỉ đánh giá vữa độc lập (mẫu vữa đúc theo TCVN 3121-11:2022), chưa nghiên cứu khả năng thâm nhập, lấp đầy khung bê tông nhựa rỗng và tính chất composite SFP, trong khi cường độ vữa ảnh hưởng đáng kể đến tính năng của SFP [26] và vữa nghiên cứu có cường độ thấp hơn đáng kể so với vữa xi măng thông thường; (2) chưa đo nhiệt độ bề mặt, khả năng duy trì nước theo thời gian và tốc độ bay hơi, nên hiệu quả làm mát chỉ là giả thuyết cần kiểm chứng; (3) độ hút nước chỉ được xác định ở tuổi 7 ngày, trong khi cấu trúc lỗ rỗng còn tiếp tục hình thành theo tuổi; (4) thiết kế thí nghiệm không cho phép tách riêng ảnh hưởng của hàm lượng nước và hàm lượng bột xi, các phương trình hồi quy chỉ dựa trên 3 - 4 điểm dữ liệu; (5) không cấp phối nào đạt độ hút nước 30 %: bốn cấp phối chỉ phủ một phần dải bột xi 40 - 54 % của tiêu chuẩn, và do thời gian chảy của TL4 (10,51 s) chỉ cao hơn giới hạn dưới 0,51 s nên việc tăng thêm nước nhiều khả năng làm thời gian chảy xuống dưới 10 s; để đạt 30 % có thể cần điều chỉnh độ mịn bột xi, tỷ lệ vôi/tro bay hoặc phụ gia; (6) chưa phân tích vi cấu trúc, phân bố lỗ rỗng, cơ chế phản ứng, co ngót và độ bền lâu; (7) lợi ích môi trường của việc dùng phụ phẩm công nghiệp, không dùng xi măng poocăng mới được nêu định tính, chưa được lượng hóa bằng đánh giá vòng đời (LCA). Đây là các hướng nghiên cứu tiếp theo.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá thực nghiệm các tính chất cơ - lý của vữa rót giữ nước sử dụng bột xi, tro bay và vôi thủy hóa theo CJJ/T 206-2013 với bốn tỷ lệ phối trộn có tỷ lệ nước/bột xi (N/BX) từ 0,66 đến 1,00. Đóng góp của nghiên cứu là bộ dữ liệu thực nghiệm với nguồn vật liệu tại Việt Nam, không đề xuất cơ chế vật liệu hoặc phương pháp thiết kế mới. Các kết luận sau áp dụng cho vữa độc lập trong phạm vi khảo sát:

1) Khi N/BX tăng, thời gian chảy giảm và độ hút nước tăng; ảnh hưởng của tỷ lệ phối trộn đến hai chỉ tiêu này có ý nghĩa thống kê ($p < 0,001$). Chỉ hai cấp phối TL3 (N/BX = 0,87) và TL4 (N/BX = 1,00) đáp ứng yêu cầu về độ chảy theo CJJ/T 206-2013.

2) Cường độ uốn và cường độ nén của cả bốn cấp phối đều tăng theo tuổi thí nghiệm; ở tuổi 7 ngày, cường độ đạt khoảng 55 - 74 % giá trị ở tuổi 28 ngày. Cường độ giảm khi tỷ lệ N/BX tăng. Riêng cường độ chịu uốn ở tuổi 7 ngày chỉ thể hiện xu hướng giảm. Tất cả các cấp phối đều có cường độ uốn và cường độ nén cao hơn yêu cầu tối thiểu của CJJ/T 206-2013, cho thấy trong phạm vi khảo sát cường độ không phải là chỉ tiêu khống chế.

3) Độ hút nước tăng gần tuyến tính theo tỷ lệ N/BX, từ 16,25 % đến 27,89 %, với hệ số xác định cao ($R^2 = 0,986$). Quan hệ giữa độ hút nước với cường độ nén và cường độ uốn ở tuổi 7 ngày được mô tả bằng các phương trình (8) và (9), với hệ số xác định lần lượt là 0,861 và 0,909. Phương trình (8) chỉ thể hiện xu hướng ($p = 0,07$). Các phương trình này là quan hệ thực nghiệm mô tả trong phạm vi khảo sát ($n = 4$), không dùng để dự báo hoặc ngoại suy.

4) TL3 và TL4 đáp ứng yêu cầu của CJJ/T 206-2013 về độ chảy và cường độ, nhưng không cấp phối nào đạt yêu cầu độ hút nước ở tuổi 7 ngày không nhỏ hơn 30 %. Vì vậy, TL3 và TL4 là các cấp phối ưu tiên cho nghiên cứu tiếp theo. TL3 phù hợp khi ưu tiên cường độ, còn TL4 có độ hút nước cao nhất trong các cấp phối đáp ứng yêu cầu về độ chảy. Khả năng duy trì nước theo thời gian, hiệu quả giảm nhiệt bề mặt và tính năng của hệ SFP hoàn chỉnh cần được kiểm chứng trong các nghiên cứu tiếp theo.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2026-CT-005TD.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Hassani, M. Taghipoor, M.M. Karimi, A state of the art of semi-flexible pavements: Introduction, design, and performance, *Construction and Building Materials*, 253 (2020) 119196. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119196>
- [2]. M. He, Y. Wang, Q. Zheng, C. Yu, Investigation of layer combination of grouted semi-flexible composite pavement, in: *Proceedings of the 4th International Conference on Computational Modeling, Simulation and Data Analysis (CMSDA 2024)*, ACM, New York, 2024, pp. 640-645. <https://doi.org/10.1145/3727993.3728098>
- [3]. T.N. Tran, H.T.T. Nguyen, K.S. Nguyen, N.T.H. Nguyen, Semi-flexible material: The sustainable alternative for the use of conventional road materials in heavy-duty pavement, in: *Proceedings of the 4th Congrès International de Géotechnique - Ouvrages - Structures, Lecture Notes in Civil Engineering*, Vol. 8, Springer, Singapore, 2018, pp. 552-558. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6713-6_54
- [4]. M.I. Khan, M.H. Sutanto, N.I.M. Yusoff, S.E. Zoorob, W. Rafiq, M. Ali, R. Fediuk, N.I. Vatin, Cementitious grouts for semi-flexible pavement surfaces - A review, *Materials*, 15 (2022) 5466. <https://doi.org/10.3390/ma15155466>
- [5]. J. Pei, J. Cai, D. Zou, J. Zhang, R. Li, X. Chen, L. Jin, Design and performance validation of high-performance cement paste as a grouting material for semi-flexible pavement, *Construction and Building Materials*, 126 (2016) 206-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.036>
- [6]. D. Wang, X. Liang, C. Jiang, Y. Pan, Impact analysis of Carboxyl Latex on the performance of semi-flexible pavement using warm-mix technology, *Construction and Building Materials*, 179 (2018) 566-575. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.173>
- [7]. S. Luo, X. Yang, K. Zhong, J. Yin, Open-graded asphalt concrete grouted by latex modified cement mortar, *Road Materials and Pavement Design*, 21 (2020) 1017-1033. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1479290>

- [8]. S. Zarei, J. Ouyang, W. Yang, Y. Zhao, Experimental analysis of semi-flexible pavement by using an appropriate cement asphalt emulsion paste, *Construction and Building Materials*, 230 (2020) 116994. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116994>
- [9]. T.M.C. Do, M.T. Nguyen, Investigating the qualities of grouting material used modifiers in the semi-flexible pavement, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1289 (2023) 012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1289/1/012059>
- [10]. X. Cai, H. Zhang, J. Zhang, W. Huang, Investigation on reinforcing mechanisms of semi-flexible pavement material through micromechanical model, *Construction and Building Materials*, 198 (2019) 732-741. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.243>
- [11]. M. Gong, Z. Xiong, H. Chen, C. Deng, X. Chen, J. Yang, H. Zhu, J. Hong, Evaluation on the cracking resistance of semi-flexible pavement mixture by laboratory research and field validation, *Construction and Building Materials*, 207 (2019) 387-395. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.064>
- [12]. J. Hong, K. Wang, Z. Xiong, M. Gong, C. Deng, G. Peng, H. Zhu, Investigation into the freeze-thaw durability of semi-flexible pavement mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, 21 (2020) 2198-2214. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1599995>
- [13]. Y. Qin, A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52 (2015) 445-459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.177>
- [14]. J. Geng, M. Chen, T. Shang, X. Li, Y.R. Kim, D. Kuang, The performance of super absorbent polymer (SAP) water-retaining asphalt mixture, *Materials*, 12 (2019) 1964. <https://doi.org/10.3390/ma12121964>
- [15]. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, CJJ/T 206-2013 Technical code for lower-heat-absorbing pavement of urban road, China Architecture & Building Press, Beijing, 2013.
- [16]. C. Shi, P.V. Krivenko, D. Roy, *Alkali-Activated Cements and Concretes*, Taylor & Francis, London, 2006.
- [17]. J.L. Provis, J.S.J. van Deventer (Eds.), *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report*, RILEM TC 224-AAM, Springer, Dordrecht, 2014.
- [18]. T. Bakharev, J.G. Sanjayan, Y.-B. Cheng, Alkali activation of Australian slag cements, *Cement and Concrete Research*, 29 (1999) 113-120. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00170-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00170-7)
- [19]. M.I. Khan, M.H. Sutanto, M.B. Napiah, M. Zahid, A. Usman, Optimization of cementitious grouts for semi-flexible pavement surfaces using response surface methodology, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 498 (2020) 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/498/1/012004>
- [20]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 11586:2016 Xi hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa, Hà Nội, 2016.
- [21]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 10302:2014 Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng, Hà Nội, 2014.
- [22]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 2231:2016 Vôi canxi cho xây dựng, Hà Nội, 2016.
- [23]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 4506:2012 Nước cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật, Hà Nội, 2012.
- [24]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 3121-11:2022 Vữa xây dựng - Phương pháp thử - Phần 11: Xác định cường độ uốn và nén của vữa đóng rắn, Hà Nội, 2022.

- [25]. M.I. Khan, N. Khan, S.R.Z. Hashmi, M.R.M. Yazid, N.I.M. Yusoff, R.W. Azfar, M. Ali, R. Fediuk, Prediction of compressive strength of cementitious grouts for semi-flexible pavement application using machine learning approach, *Case Studies in Construction Materials*, 19 (2023) e02370. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02370>
- [26]. Q. Yang, Y. Li, H. Zou, L. Feng, N. Ru, L. Gan, J. Zhang, J. Liu, C. Wang, Study of the effect of grouting material strength on semiflexible pavement material, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022 (2022) 5958896. <https://doi.org/10.1155/2022/5958896>
- [27]. F. Collins, J.G. Sanjayan, Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, 30 (2000) 1401-1406. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00327-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00327-6)