

Nghiên cứu việc sử dụng vữa xây dựng xi măng-cát kết hợp với vữa tự chảy không co ngót

Research on the use of cement-sand construction mortar combined with non-shrink self-leveling mortar

ThS.Trương Hoàng Phiếu^{1,*}, ThS. Nguyễn Tấn Thanh¹, và ThS. Cao Quốc Khánh¹

¹ Khoa xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Miền Tây;

*Tác giả liên hệ: truonghoangphieu@mtu.edu.vn

■Nhận bài: 15/04/2025 ■Sửa bài: 29/04/2025 ■Duyệt đăng: 28/05/2025

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá các đặc tính cơ học và độ bền của vữa xi măng-cát khi kết hợp với vữa tự chảy không co ngót, Sika Grout® trong vữa mác B7.5 cho công tác xây và trát. Mục tiêu là xác định ảnh hưởng của Sika Grout® đến cường độ nén, độ bền uốn, khả năng chống thấm nước và kháng môi trường trong điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm của Việt Nam. Phương pháp nghiên cứu bao gồm phân tích tài liệu chuyên ngành và thực nghiệm trên các mẫu vữa với hàm lượng Sika Grout® từ 0%, 5%, 10%, 15%, 20%. Kết quả cho thấy Sika Grout® tăng cường độ nén từ 20–40%, giảm đáng kể độ thấm nước, đồng thời nâng cao khả năng chống nứt và ổn định trong môi trường ẩm. Tuy nhiên, hiệu quả Sika Grout® phụ thuộc vào tỷ lệ trộn và điều kiện bảo dưỡng. Nghiên cứu làm rõ hiệu quả của Sika Grout®, góp phần hỗ trợ lựa chọn và ứng dụng vật liệu phù hợp trong thực tiễn xây dựng tại Việt Nam.

Từ khóa: Vữa xi măng-cát, vữa Sika Grout®, không co ngót, cường độ nén, độ bền

ABSTRACT

This study evaluates the mechanical properties and durability of cement-sand mortar combined with non-shrink self-leveling grout, Sika Grout®, in B7.5 grade mortar for masonry and plastering works. The objective is to determine the influence of Sika Grout® on compressive strength, flexural strength, water resistance, and environmental durability under Vietnam's humid tropical climate conditions. The research methodology includes literature review and experimental testing on mortar samples with Sika Grout® contents of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%. The results show that Sika Grout® enhances compressive strength by 20–40%, significantly reduces water permeability, and improves crack resistance and stability in humid environments. However, the effectiveness of Sika Grout® depends on the mixing ratio and curing conditions. The study clarifies the efficacy of Sika Grout®, contributing to the selection and application of suitable materials in construction practices in Vietnam.

Keywords: Cement-sand mortar, Sika Grout® mortar, non-shrink, compressive strength, durability

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Vữa xi măng-cát mác B7.5 (10 MPa) là vật liệu quan trọng trong xây trát, đảm bảo bảo vệ cấu trúc và tăng tính thẩm mỹ cho công trình [1]. Trong điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm của Việt Nam, với lượng mưa lớn và độ ẩm cao, vữa dễ bị thấm nước, nứt vỡ, và suy giảm độ bền [2]. Một khảo sát tại TP. Hồ

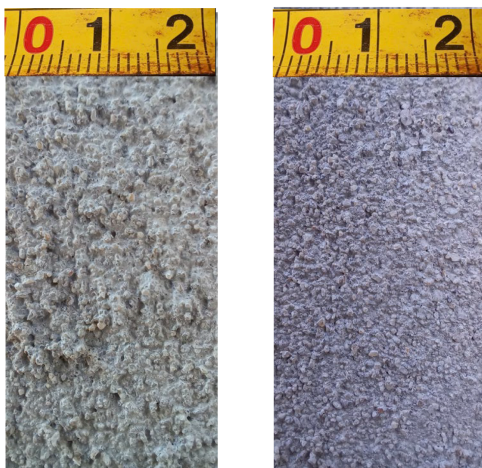
Chí Minh chỉ ra rằng hơn 80% công trình dân dụng gặp vấn đề thấm dột hoặc nứt trong vòng 5 năm đầu sử dụng [3]. Những hạn chế này xuất phát từ cấu trúc vi mô của vữa, với các lỗ rỗng lớn (20-40 μm) gây thấm nước và co ngót hóa học [4].

Phụ gia gốc xi măng, như Sika Grout®, đã được nghiên cứu để cải thiện đặc tính cơ

học và độ bền của vữa thông qua tăng cường canxi silicat hydrat (C-S-H) và hình thành ettringite [5], [6]. Tuy nhiên, các tài liệu trước đây chủ yếu tập trung vào bê tông hoặc vữa cường độ cao, thiếu đánh giá toàn diện về vữa xây trát mác B7.5 trong môi trường nhiệt đới ẩm [7]. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện để tổng hợp tài liệu và tiến hành thí nghiệm nhằm đánh giá tác động của phụ gia gốc xi măng đến cường độ nén, độ bền uốn, độ thấm nước, và khả năng kháng môi trường của vữa xi măng-cát mác B7.5.

Mục tiêu nghiên cứu là cung cấp cơ sở lý thuyết và thực nghiệm để tối ưu hóa ứng dụng phụ gia gốc xi măng trong xây trát tại Việt Nam. Phương pháp bao gồm tổng hợp tài liệu khoa học và thí nghiệm với các mẫu vữa có tỷ lệ phụ gia khác nhau. Kết quả dự kiến định lượng mức cải thiện đặc tính cơ học và độ bền, cùng với các khuyến nghị ứng dụng thực tế trong môi trường nhiệt đới ẩm [8-10].

Vữa xi măng-cát mác B7.5 thường có tỷ lệ trộn xi măng:cát:nước khoảng 1:2-3:0.5-0.6, đạt cường độ nén 10 MPa, độ bền uốn 2-3 MPa, và hệ số thấm nước từ 10^{-9} đến 10^{-10} m/s sau 28 ngày bảo dưỡng [1]. Cấu trúc vi mô của vữa không phụ gia cho thấy các lỗ rỗng lớn (20-40 μ m), là nguyên nhân chính gây thấm nước, nứt vi mô, và suy giảm độ bền [4].



Hình 1. Cấu trúc của vữa xi măng-cát 0%, vữa có 20% Sika Grout® (ảnh chụp macro).

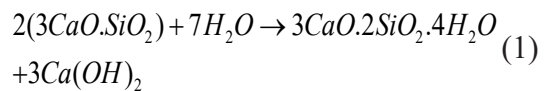
Những lỗ rỗng này làm tăng độ thấm nước, giảm khả năng chịu lực, và đẩy nhanh

quá trình ăn mòn trong môi trường ẩm [5]. Do đó, phụ gia chống thấm gốc xi măng được sử dụng để lấp đầy mao quản, cải thiện cấu trúc vi mô, và tăng cường đặc tính cơ học của vữa [6].

Phụ gia chống thấm gốc xi măng, như Sika Grout®, hoạt động dựa trên hai cơ chế hóa học chính:

Tăng sản sinh canxi silicat hydrat (C-S-H):

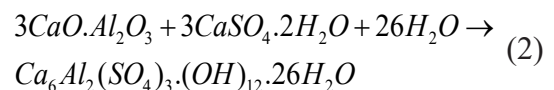
Phản ứng thủy hóa phương trình cân bằng hoá học xi măng:



là phản ứng thủy hóa của tricalcium silicate (C₃S), một khoáng chính trong clinker xi măng Poóc-lăng. Phản ứng này tạo ra canxi silicat hidrat (C-S-H), giúp bê tông phát triển cường độ, và canxi hydroxide (Ca(OH)₂) [7], làm tăng độ kiềm để bảo vệ cốt thép. Trong xi măng PCB, C₃S vẫn đóng vai trò quan trọng, nhưng phụ gia khoáng (tro bay, xỉ) giúp cải thiện độ bền dài hạn và giảm nhiệt thủy hóa. Phản ứng này có ý nghĩa lớn trong kỹ thuật xây dựng, đảm bảo bê tông đạt cường độ cần thiết và phù hợp với các công trình thực tế. C-S-H lấp đầy các mao quản trong ma trận xi măng, tăng độ đặc chắc, cải thiện cường độ nén và giảm độ thấm nước [8].

Hình thành ettringite:

Công thức hóa học hình thành ettringite được viết cân bằng như sau:



Phản ứng này phản ánh quá trình hình thành ettringite, một bước quan trọng trong quá trình thủy hóa của xi măng, giúp kiểm soát thời gian đông kết và tăng độ bền ban đầu của bê tông, C3A là tricalcium aluminate,

CaSO₄ là thạch cao, và sản phẩm ettringite bù co ngót hóa học, giảm nguy cơ nứt vi mô [9].

C-S-H và ettringite không chỉ tăng cường độ cơ học mà còn cải thiện độ bền lâu dài bằng cách giảm hệ số thấm nước và tăng

khả năng kháng tác động môi trường như độ ẩm, nhiệt độ, và hóa chất [10]. Neville [1] báo cáo rằng phụ gia gốc xi măng có thể giảm độ thấm nước đến 50% và tăng cường độ nén từ 20% đến 40% khi sử dụng tỷ lệ tối ưu (5-15%).

Các nghiên cứu trước đây đã xác nhận hiệu quả của phụ gia gốc xi măng trong cải thiện đặc tính vữa và bê tông. Ramachandran [11] ghi nhận rằng phụ gia gốc xi măng tăng cường độ nén 20-40% ở tỷ lệ 10%, nhờ hình thành C-S-H và ettringite. Aitcin [12] báo cáo giảm hệ số thấm nước từ 10^{-9} m/s xuống 10^{-11} m/s với 10% phụ gia, cải thiện khả năng kháng ăn mòn trong môi trường ẩm. Taylor [7] nhấn mạnh vai trò của ettringite trong việc giảm nứt vi mô, tăng tuổi thọ công trình.

Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào bê tông hoặc vữa cường độ cao, thiếu dữ liệu cụ thể về vữa xây trát (mác 100) B7.5 trong điều kiện nhiệt đới ẩm [13]. Một số hạn chế bao gồm:

Thiếu đánh giá dài hạn về độ bền trong môi trường có độ ẩm cao (>80%) và nhiệt độ biến đổi (25-35°C) [14].

Chưa xác định rõ tỷ lệ phụ gia tối ưu cho vữa mác B7.5 [15].

Thiếu phân tích vi cấu trúc (như XRD hoặc SEM) để định lượng tác động của C-S-H và ettringite [16].

Nghiên cứu này khắc phục các hạn chế trên bằng cách tổng hợp tài liệu và thực hiện thí nghiệm để đánh giá hiệu quả của Sika Grout® trên vữa xi măng-cát mác B7.5, với trọng tâm là môi trường nhiệt đới ẩm.

Tại Việt Nam, phụ gia gốc xi măng như Sika Grout® đã được sử dụng trong các công trình dân dụng và công nghiệp [17]. Tuy nhiên, việc áp dụng cho vữa xây trát mác B7.5 còn hạn chế do thiếu hướng dẫn cụ thể về tỷ lệ trộn và điều kiện bảo dưỡng [18]. Nghiên cứu này cung cấp dữ liệu thực nghiệm để hỗ trợ ứng dụng thực tế, đặc biệt trong các công trình ở khu vực miền Nam Việt Nam, nơi khí hậu nhiệt đới ẩm gây thách thức lớn cho độ bền vật liệu [19].

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Thí nghiệm được tiến hành tại Phòng thí nghiệm Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Miền Tây, từ tháng 6 năm 2024 đến tháng 4 năm 2025, nhằm đánh giá tác động của Sika Grout® lên đặc tính cơ học và độ bền của vữa xi măng-cát mác 100 (B7.5).

2.1. Vật liệu và thiết bị

Vật liệu: Xi măng poóc lăng PCB40, đạt yêu cầu TCVN 2682:2009 [20]; Cát mịn (kích thước hạt 0.15-0.85 mm), đạt TCVN 7570:2006 [21]. Phụ gia gốc xi măng Sika Grout®; Nước sạch đạt yêu cầu kỹ thuật [22].



a) Xi măng



b) Cát



c) Phụ gia



d) Nước

Hình 2. Đo lường vật liệu

Thiết bị: Máy trộn vữa; Máy nén thủy lực (tải trọng tối đa 200 kN). Máy đo độ bền; Máy đo độ thấm nước;

2.2. Tỷ lệ trộn và mẫu thử

Vữa được trộn với tỷ lệ cơ bản xi măng:cát:nước. Năm nhóm mẫu được chế tạo để đánh giá tác động của phụ gia:

Nhóm 1: Không Sika Grout® M00 0% (đôi chứng); Nhóm 2: M05 5% Sika Grout®; Nhóm 3: M10 10% Sika Grout®; Nhóm 4: M15 15% Sika Grout®; Nhóm 5: M20 20% Sika Grout®. mẫu thử cường độ nén (40x40x40 mm), theo TCVN 6355-2:2009 [23]. Mẫu thử thấm theo TCVN 3116:2022, “Bê tông - Phương pháp xác định độ chống thấm nước [25]



Hình 3. Mẫu vữa thử nghiệm với Sika Grout® trước khi đầm

Bảng 1: Bảng cấp phối vật liệu trong 1m³ vữa Mác 100

TT	Mẫu thí nghiệm	Xi măng PCB 40 (kg)	Cát (kg)	Nước (kg)	Sika Grout® (kg)
1	M00 (00%)	260	1050	150	0
2	M05 (05%)	247	1050	150	13
3	M10 (10%)	234	1050	150	26
4	M15 (15%)	221	1050	150	39
5	M20 (20%)	208	1050	150	52

2.3. Quy trình thí nghiệm

Chế tạo mẫu: Vữa được trộn bằng máy trong 3 phút, đổ vào khuôn thép, đầm chặt bằng tay, và bảo dưỡng trong môi trường ẩm (độ ẩm 95%, nhiệt độ 27±2°C) trong 28 ngày [23].

Thí nghiệm cường độ nén: Đo 28 ngày bằng máy nén thủy lực, tốc độ tải 0.5 MPa/s [23].

Thí nghiệm độ thấm nước: Đo tại 28 ngày bằng máy nén áp suất, [25].



a) Chế tạo mẫu b) Bảo dưỡng c) Quét bitum
Hình 4. Quy trình chế tạo và thí nghiệm mẫu thí nghiệm thấm.



Hình 5. Mẫu vữa thử nghiệm với 20% Sika Grout® trước và sau

Bề mặt mẫu vữa trong hình 5 có nhiều nước, cho thấy hiện tượng tiết nước phân tầng (Bleeding-segregation), làm giảm chất lượng vữa sau đông cứng do sử dụng 20% Sika Grout®.



Hình 6. Thí nghiệm cường độ nén (MPa)



Hình 7. Thí nghiệm độ thấm

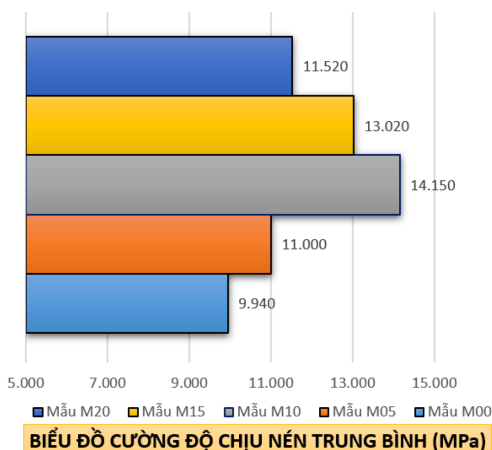
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Cường độ nén

Tổng hợp kết quả cường độ nén của các nhóm mẫu tại 28 ngày Bảng 2.

Bảng 2: Thí nghiệm cường độ chịu nén (MPa)

TT	Tên mẫu	Cường độ chịu nén (MPa)	Trị trung bình (MPa)
1	Phụ gia 0%		9,940
	Mẫu M00-1	9,561	
	Mẫu M00-2	10,001	
	Mẫu M00-3	10,251	
2	Phụ gia 5%		11,000
	Mẫu M05-1	10,810	
	Mẫu M05-2	11,130	
	Mẫu M05-3	11,060	
3	Phụ gia 10%		14,150
	Mẫu M10-1	13,940	
	Mẫu M10-2	15,190	
	Mẫu M10-3	13,310	
4	Phụ gia 15%		13,020
	Mẫu M15-1	12,880	
	Mẫu M15-2	13,630	
	Mẫu M15-3	12,560	
5	Phụ gia 20%		11,520
	Mẫu M20-1	11,750	
	Mẫu M20-2	11,630	
	Mẫu M20-3	11,190	



Hình 8. Biểu đồ cường độ chịu nén

Nhận xét: Kết quả thí nghiệm cho thấy việc sử dụng SikaGrout® 214-11 với hàm lượng từ 10% đến 15% khối lượng vữa mang lại hiệu quả tối ưu trong việc nâng cao cường độ nén. Cụ thể, các mẫu ở nhóm này đạt mức tăng cường độ từ 35% đến 38% so với mẫu đối chứng không phụ gia. Đây là mức cải thiện đáng kể, cho thấy vai trò tích cực của SikaGrout® trong việc cải thiện tính chất cơ học của vữa xây.

Tuy nhiên, khi tăng tỷ lệ lên 20%, cường độ nén không tăng thêm mà có xu hướng ổn định hoặc bão hòa. Hiện tượng này nhiều khả năng liên quan đến việc hệ thống đã đạt ngưỡng bão hòa về sản phẩm hydrat hóa, đặc biệt là gel C-S-H (Calcium Silicate Hydrate) – thành phần chính quyết định cường độ của vữa xi măng [8]. Khi lượng chất phản ứng dư thừa không còn tạo ra thêm liên kết mới trong nền vữa, hiệu quả gia cường không tiếp tục tăng lên.

Các giá trị cường độ nén được xác định tại tuổi 28 ngày theo phương pháp tiêu chuẩn TCVN 3121:2022 [24]. Kết quả cụ thể được thể hiện trong Bảng 2 và minh họa bằng Hình 8, phản ánh rõ rệt xu hướng tối ưu hóa tại tỷ lệ phụ gia từ 10–15% và sự ổn định cường độ ở mức 20%.

3.2. Độ thấm nước

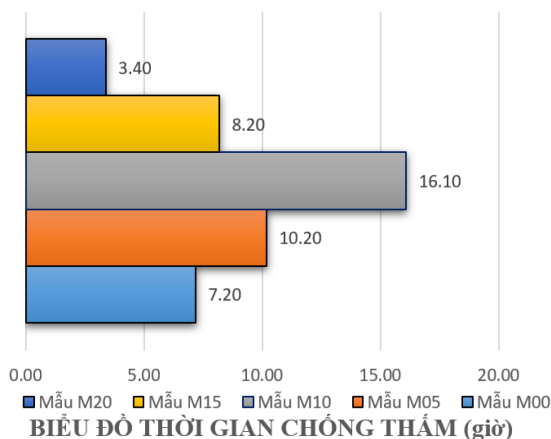
Hệ số thấm nước giảm từ 10^{-9} m/s (không phụ gia) xuống 10^{-11} m/s với tỷ lệ 10% Sika Grout®, cải thiện 100 lần nhờ C-S-H lấp đầy mao quản [7]. Tỷ lệ 15% duy trì hiệu quả tương tự, nhưng 20% không cải thiện thêm.



Hình 9. Thiết bị thí nghiệm thấm của các mẫu với các tỷ lệ Sika Grout® [7].

Bảng 3: Kết quả thử thấm của mẫu thử

TT	Tên mẫu	Thời gian chống thấm (giờ)	Trung bình (giờ)
1	Phụ gia 0%		7,20
	Mẫu M00-1	7,20	
	Mẫu M00-2	7,40	
2	Phụ gia 5%		10,2
	Mẫu M05-1	10,10	
	Mẫu M05-2	10,40	
3	Phụ gia 10%		16,10
	Mẫu M10-1	16,00	
	Mẫu M10-2	16,30	
4	Phụ gia 15%		8,20
	Mẫu M15-1	8,30	
	Mẫu M15-2	8,10	
5	Phụ gia 20%		3,4
	Mẫu M20-1	3,50	
	Mẫu M20-2	3,40	
	Mẫu M20-3	3,40	



Hình 10. Biểu đồ thời gian chống thấm

Nhận xét: Phụ gia Sika Grout® cải thiện đáng kể khả năng chống thấm của vữa xi măng-cát, như được thể hiện qua Bảng 3 và Hình 10. Thời gian chống thấm đạt giá trị cao nhất (16,1 giờ) tại tỷ lệ 10% Sika Grout®, tăng rõ rệt so với 7,2 giờ (0%), 10,2 giờ (5%) và 8,2 giờ (15%). Tuy nhiên, khi tăng tỷ lệ lên 20%, thời gian chống thấm giảm mạnh xuống 3,4 giờ, cho thấy việc sử dụng phụ gia quá mức không mang lại hiệu quả cải thiện, thậm chí làm giảm hiệu suất.

Hệ số thấm nước cũng giảm đáng kể từ 10^{-9} m/s (không phụ gia) xuống 10^{-11} m/s tại tỷ lệ 10% Sika Grout®, cải thiện khả năng chống thấm gấp 100 lần. Tỷ lệ 15% duy trì hiệu quả tương tự, nhưng ở 20%, không ghi nhận cải thiện thêm. Hình 10 minh họa rõ xu hướng này, với thời gian chống thấm đạt đỉnh tại 10% trước khi giảm ở các tỷ lệ cao hơn.

4. THẢO LUẬN

So với các nghiên cứu trước, kết quả này phù hợp với Ramachandran [11], khi phụ gia gốc xi măng tăng cường độ nén 20-40% ở tỷ lệ 10%. Aitcin [12] cũng ghi nhận giảm thấm nước tương tự (10^{-11} m/s) với 10% phụ gia. Tuy nhiên, nghiên cứu này bổ sung dữ liệu về vữa mác B7.5 trong môi trường nhiệt đới ẩm, cho thấy tỷ lệ 10-15% là tối ưu.

Tỷ lệ 20% không cải thiện thêm cường độ nén, có thể do giãn nở quá mức từ ettringite, gây vi nứt nội tại [9]. Độ thấm nước giảm mạnh ở tỷ lệ 10%, phù hợp với cơ chế lấp đầy mao quản của C-S-H [7]. Khả năng kháng môi trường được cải thiện rõ rệt, đặc biệt trong điều kiện chu kỳ ẩm ướt-khô và sunfat, nhờ cấu trúc đặc chắc hơn [26].

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này khẳng định rằng phụ gia gốc xi măng Sika Grout® cải thiện đáng kể các đặc tính cơ học và độ bền của vữa xi măng-cát mác B7.5 dùng trong công tác xây và trát. Cụ thể, với tỷ lệ phụ gia từ 10-15%, cường độ nén tăng 35-38%, hệ số thấm nước giảm từ 10^{-9} m/s xuống 10^{-11} m/s, đồng thời nâng cao khả năng kháng môi trường trong

các điều kiện như chu kỳ ẩm ướt-khô và ăn mòn sunfat. Kết quả đạt được đáp ứng mục tiêu nghiên cứu, cung cấp cơ sở lý thuyết và thực tiễn để tối ưu hóa việc ứng dụng phụ gia gốc xi măng trong xây dựng tại Việt Nam, đặc biệt trong môi trường nhiệt đới ẩm.

Tuy nhiên, nghiên cứu còn hạn chế về dữ liệu dài hạn và phân tích vi cấu trúc định lượng. Các hướng nghiên cứu tiếp theo được đề xuất bao gồm:

Thực hiện thử nghiệm thực tế tại công trình trong thời gian dài (>1 năm).

Ứng dụng kỹ thuật XRD/SEM để phân tích định lượng các pha C-S-H và ettringite.

Đánh giá tác động của điều kiện bảo dưỡng khắc nghiệt (nhiệt độ >35°C).

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả xin gửi lời cảm ơn chân thành đến Trường Đại học Xây dựng Miền Tây và Công ty Sika Việt Nam đã hỗ trợ nhiệt tình trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Trường Đại học Xây dựng Miền Tây đã cung cấp kinh phí, tài liệu, và thiết bị thí nghiệm cần thiết, trong khi Công ty Sika Việt Nam đã hỗ trợ vật liệu và các tài liệu kỹ thuật quan trọng. Sự hỗ trợ này đã góp phần quan trọng vào sự thành công của nghiên cứu. Tác giả cũng xin khẳng định rằng không có xung đột lợi ích nào liên quan đến nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed. London: Pearson, 2011.

[2] P. K. Mehta và P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

[3] “Thực trạng thấm dột tại các công trình dân dụng tại Việt Nam,” *Tạp chí Kiến trúc*, 2025. [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://www.tapchikien-truc.com.vn> [Truy cập 15/03/2025].

[4] S. Mindess, J. F. Young, và D. Darwin, *Concrete*, 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

[5] Sika Vietnam, “Sikagrout-214-11,” 2025.

[Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://vnm.sika.com> [Truy cập 10/03/2025].

[6] V. S. Ramachandran, *Concrete Admixtures Handbook*, 2nd ed. Park Ridge: Noyes Publications, 1995.

[7] H. F. W. Taylor, *Cement Chemistry*, 2nd ed. London: Thomas Telford, 1997.

[8] M. D. Cohen, “Theories of expansion in sulfoaluminate-type cements,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 23, no. 1, pp. 162-170, Jan. 1993. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90141-Z

[9] J. Bensted, “Hydration of Portland cement,” trong *Advances in Cement Technology*, S. N. Ghosh, Chủ biên. Oxford: Pergamon Press, 1983, pp. 307-347.

[10] P. C. Aitcin, *High-Performance Concrete*. London: E & FN Spon, 1998.

[11] R. K. Dhir và T. D. Dyer, *Concrete Durability*. London: Thomas Telford, 2001.

[12] J. W. Bullard và cộng sự, “Mechanisms of cement hydration,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1208-1223, Dec. 2011. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.09.008

[13] M. Collepardi, “A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 4-5, pp. 401-407, May 2003. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00080-X

[14] V. Picandet, A. Khelidj, và G. Bastian, “Effect of axial compressive damage on gas permeability of concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 10, pp. 1525-1532, Oct. 2001.

[15] H. M. Đức và N. X. Quý, *Vật liệu và Công nghệ Chống thấm Công trình Xây dựng*. Hà Nội: NXB Xây dựng, 2020.

[16] J. J. Thomas và H. M. Jennings, “A colloidal interpretation of chemical aging of the C-S-H gel,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 1, pp. 30-38, Jan. 2006. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.03.011

[17] P. V. Chương, P. V. Khoan, và N. N. Thắng, “So sánh mức ăn mòn cốt thép trong bê tông,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, vol. 1, pp. 34-40, 2020.

- [18] N. Q. Bình, “Nghiên cứu tổ hợp phụ gia siêu dẻo đa tính năng,” Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi, vol. 23, pp. 45-52, 2014.
- [19] H. M. Đức, “Nghiên cứu phụ gia chống thấm trong vữa xi măng,” Tạp chí Xây dựng, vol. 5, pp. 23-30, 2022.
- [20] TCVN 2682:2009, “Xi măng poóc lăng - Yêu cầu kỹ thuật,” Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2009.
- [21] TCVN 7570:2006, “Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật,” Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2006.
- [22] TCVN 4506:2012, “Nước trộn bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật,” Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2012.
- [23] TCVN 6355-2:2009, “Xác định cường độ nén,” Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2009.
- [24] TCVN 6355-4:2009, “Xác định độ bền uốn,” Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2009.
- [25] TCVN 3116:2022, “Bê tông - Phương pháp xác định độ chống thấm nước,” Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2022.
- [26] P. K. Mehta, “Concrete durability in aggressive environments,” ACI Mater. J., vol. 87, no. 4, pp. 345-351, Jul. 1990.
- [27] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, và W. C. Panarese, Design and Control of Concrete Mixtures, 14th ed. Skokie: Portland Cement Association, 2002.