

BỘ XÂY DỰNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC XÂY DỰNG MIỀN TRUNG



Ngô Thành Tây

**PHÂN TÍCH ỨNG XỬ CỦA TƯỜNG XÂY
ĐƯỢC GIA CƯỜNG LƯỚI SỢI PHI KIM (FRP)
BẰNG PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM**

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

Ngành Kỹ thuật Xây dựng

BỘ XÂY DỰNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC XÂY DỰNG MIỀN TRUNG



Ngô Thành Tây

**PHÂN TÍCH ỨNG XỬ CỦA TƯỜNG XÂY
ĐƯỢC GIA CƯỜNG LƯỚI SỢI PHI KIM (FRP)
BẰNG PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM**

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

Ngành Kỹ thuật Xây dựng

Mã số: 22Q85802011001

Cán bộ hướng dẫn: TS. Võ Văn Nam

Đắk Lắk – 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi tên Ngô Thành Tây

Học viên xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của bản thân học viên. Các kết quả nghiên cứu và các kết luận trong luận văn là trung thực, không sao chép từ bất kỳ một nguồn nào và dưới bất kỳ hình thức nào. Việc tham khảo các nguồn tài liệu đã được thực hiện trích dẫn và ghi nguồn tài liệu tham khảo đúng quy định.

Tác giả đề án

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'T' followed by 'N.T' and a long horizontal stroke.

Ngô Thành Tây

LỜI CẢM ƠN

Để có thể hoàn thành được luận văn thạc sĩ, bên cạnh sự nỗ lực của bản thân tác giả, cùng với sự giúp đỡ nhiệt tình của khoa Xây dựng, các thầy cô giáo Trường Đại học Xây dựng Miền Trung, đã tạo điều kiện và động viên giúp đỡ về mọi mặt để tôi hoàn thành luận văn này.

Điều đầu tiên, tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới **TS. Võ Văn Nam**, đã trực tiếp hướng dẫn, trợ giúp những phương pháp, những đề xuất hướng nghiên cứu cũng như các giải pháp rất có giá trị quan trọng và chỉ bảo cho tôi trong quá trình thực hiện và hoàn thành đề tài luận văn tốt nghiệp.

Tôi xin chân thành cảm ơn Ban Giám hiệu, quý thầy cô khoa Xây dựng Trường Đại học Xây dựng Miền Trung đã tận tình giúp đỡ tôi trong quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận văn.

Trong thời gian làm luận văn tốt nghiệp, do điều kiện có hạn về thời gian và kiến thức bản thân còn nhiều hạn chế nên luận văn không thể tránh khỏi những khiếm khuyết, thiếu sót, tôi mong nhận được sự góp ý của các thầy, cô giáo, các nhà khoa học, bạn bè và đồng nghiệp để luận văn được hoàn thiện hơn.

Xin chân thành cảm ơn.

Đắk Lắk, ngày 05 tháng 8 năm 2025

Tác giả đề án

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'T' followed by 'N.T' and a horizontal line underneath.

Ngô Thành Tây

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	1
1. Tính cấp thiết của đề tài.....	1
2. Mục tiêu nghiên cứu của đề tài.....	2
3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu	2
4. Phương pháp nghiên cứu	2
5. Nội dung nghiên cứu.....	2
6. Ý nghĩa khoa học và tính thực tiễn của đề tài.....	3
CHƯƠNG I. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU GIA CƯỜNG FRP.....	4
1.1. Vật liệu FRP ứng xử gia tải và tính thực tế hiện nay	4
1.1.1. Các nghiên cứu trong nước.....	5
1.1.2. Các nghiên cứu ngoài nước	6
1.2. Nội dung nghiên cứu	10
1.3. Kết luận chương 1	11
CHƯƠNG 2. CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM.....	12
2.1. Xác định thông tin vật liệu	12
2.1.1. Xác cường độ mẫu vữa	12
2.1.2. Xác định cường độ chịu nén của gạch.....	15
2.1.3. Xác định thông tin lưới sợi GFRP	16
2.2. Thí nghiệm khả năng chịu cắt trực tiếp của vữa	17
2.2.1. Chế tạo mẫu cắt	17
2.2.2. Thí nghiệm cắt vữa	19
2.3. Thí nghiệm nén chéo góc	20
2.3.1. Chế tạo mẫu nén	20
2.3.2. Thí nghiệm nén chéo góc.....	22

2.4. Kết luận chương 2.	24
CHƯƠNG 3. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM.....	25
3.1. Cường độ vật liệu	25
3.2. Phân tích khả năng chống cắt của mẫu tường.....	26
3.3. Phân tích kết quả nén chéo góc	29
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	34
1. Kết luận.....	34
2. Kiến nghị.....	34
TÀI LIỆU THAM KHẢO	1

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1. Gia cường lưới sợi thủy tinh trên khối tường [4].	7
Hình 2. Gia cố tường xây gạch bằng GFRP [7].	8
Hình 3. Biểu đồ khả năng chịu tải tăng đáng kể khi được gia cường [6].	9
Hình 4. Vữa khô trộn sẵn Vĩ Đạt.	12
Hình 5. Dùng cân để tính khối lượng vữa khô trước khi trộn với nước.	13
Hình 6. Quét lớp dầu nhớt để chống dính vữa vào khuôn đúc.	13
Hình 7. Dùng máy đầm để đảm bảo mẫu vữa đặc chắc.	14
Hình 8. Mẫu sau khi đúc và bảo dưỡng.	14
Hình 9. Kích thước mẫu gạch.	15
Hình 10. Kích thước mẫu nén xác định cường độ gạch.	16
Hình 11. Vật liệu lưới GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer).	17
Hình 12. Mẫu tường tường gạch xây 200x200x230.	17
Hình 13. Chế tạo mẫu 200×200×230.	18
Hình 14. Mô hình thí nghiệm theo RILEM TC-127 MS [40].	19
Hình 15. Quy trình chế tạo và kích thước mẫu nén góc.	20
Hình 16. Quy trình bảo dưỡng mẫu.	21
Hình 17. Quy trình thi công gia cường lưới GFRP.	21
Hình 18. Sơ đồ bố trí thí nghiệm nén chéo góc.	23
Hình 19. Các trường hợp phá hoại cắt của mẫu.	29
Hình 20. Quan hệ lực-chuyển vị mẫu M100.	30
Hình 21. Quan hệ lực-chuyển vị mẫu M100.	30
Hình 22. Hình ảnh bề mặt vết nứt.	31
Hình 23. Phá hoại các mẫu sử dụng vữa M100.	32
Hình 24. Phá hoại các mẫu sử dụng vữa M75.	33

BẢNG BIỂU

Bảng 1. Tổng số mẫu vữa cần thực hiện	15
Bảng 2. Số lượng mẫu thí nghiệm cắt vữa	19
Bảng 3. Số lượng mẫu thí nghiệm nén góc	21
Bảng 4. Cường độ vữa xây và tô	25
Bảng 5. Cường độ chịu nén của gạch không nung	26
Bảng 6. So sánh cường độ vữa và gạch	26
Bảng 7. Ứng suất cắt của thí nghiệm cắt trực tiếp	26
Bảng 8. So sánh hiệu quả gia cường giữa hai mác vữa	31

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Hiện nay, tường xây gạch vẫn là giải pháp phổ biến trong xây dựng tại Việt Nam do tính kinh tế và thi công đơn giản. Tuy nhiên, tường xây thường có những hạn chế về khả năng chịu lực, đặc biệt là khả năng chống chịu tải trọng ngang như gió bão, động đất; tường xây thường xuất hiện các dạng hư hỏng điển hình như nứt chéo, nứt ngang, bong tách hoặc phá hoại do mất ổn định. Điều này xuất phát từ bản chất vật liệu xây là giòn, có cường độ chịu kéo và khả năng biến dạng thấp. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và các hiện tượng thời tiết cực đoan ngày càng gia tăng, việc gia cường cho các kết cấu tường xây hiện hữu trở nên cần thiết. Vật liệu composite sợi phi kim (FRP) với những ưu điểm vượt trội như cường độ cao, trọng lượng nhẹ, khả năng chống ăn mòn tốt và thi công dễ dàng đã và đang được ứng dụng rộng rãi trong việc gia cường kết cấu. Việc sử dụng lưới sợi FRP để gia cường tường xây là một giải pháp kỹ thuật tiên tiến, có nhiều tiềm năng áp dụng trong thực tế. Tuy nhiên, các nghiên cứu trong nước về lĩnh vực này còn khá hạn chế, đặc biệt là các nghiên cứu thực nghiệm để đánh giá hiệu quả gia cường và cơ chế phá hoại của tường xây được gia cường FRP. Các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành của Việt Nam như TCVN 5573:2011 về kết cấu gạch đá và gạch đá cốt thép chưa có những quy định cụ thể về việc tính toán, thiết kế gia cường tường xây bằng vật liệu FRP. Các tiêu chuẩn quốc tế như ACI 440.7R-10 của Mỹ về thiết kế gia cường kết cấu xây bằng FRP đã có những hướng dẫn ban đầu, nhưng vẫn cần được nghiên cứu, kiểm chứng và điều chỉnh cho phù hợp với điều kiện Việt Nam. Bên cạnh đó, các nghiên cứu hiện có chủ yếu tập trung vào ứng xử của tường xây gia cường FRP dưới tác dụng của tải trọng tĩnh. Việc nghiên cứu ứng xử của tường xây gia cường FRP dưới tác dụng của tải trọng động, tải trọng chu kỳ còn chưa được đề cập nhiều. Ngoài ra, còn các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả gia cường như: tỷ lệ vật liệu gia cường, phương pháp gắn kết, điều kiện môi trường... cũng cần được nghiên cứu kỹ lưỡng hơn. Một trong những vấn đề lớn nhất của kết cấu tường, đặc biệt là tường xây sử dụng gạch không nung, là hiện tượng nứt tường sau thi công gây mất mỹ quan và chất lượng công trình. Xuất phát từ lý do trên, việc thực hiện đề tài **“Phân tích ứng xử của tường xây được gia cường lưới sợi phi kim (FRP) bằng phương pháp thực nghiệm”** là cần thiết, nhằm cung cấp cơ sở khoa học cho việc áp dụng giải pháp gia cường này trong thực tế xây dựng tại Việt Nam. Kết quả nghiên cứu sẽ góp phần hoàn thiện các quy trình về thiết kế, thi công gia cường tường xây bằng vật liệu FRP, đồng thời đóng góp vào các nghiên cứu của lĩnh vực gia cường kết cấu tường gạch.

2. Mục tiêu nghiên cứu của đề tài

So sánh khả năng chịu lực của tường trong các trường hợp trước và sau khi gia cường lưới FRP trong điều kiện chịu cắt. Từ đó, nghiên cứu sẽ đưa ra đánh giá sự hiệu quả của việc gia cường bề mặt tường sử dụng lưới sợi phi kim. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng tập trung xem ứng xử của tường, sự phát triển vết nứt khi mẫu được gia cường.

3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu

Đối tượng: Tường xây bằng gạch không nung được gia cường lưới sợi phi kim (FRP).
Thời gian thí nghiệm: sau khi trát tường đủ 28 ngày.

Phạm vi nghiên cứu: Loại tường 200 sử dụng gạch không nung Mác 75 và hai loại vữa Mác 75 và 100 gồm khối xây 200x200 (cho thí nghiệm cắt) và khối xây 600x600 (cho thí nghiệm nén chéo góc).

4. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng phương pháp thực nghiệm. Gồm có 2 giai đoạn:

- Giai đoạn 1: Thử nghiệm mẫu vữa và mẫu gạch để tìm ra thông số vật liệu.
- Giai đoạn 2: Chế tạo và thí nghiệm các mẫu khối xây.

Phân tích dữ liệu thí nghiệm, so sánh với những nghiên cứu trước đây. Đánh giá ưu và nhược điểm của việc sử dụng tấm GFRP trong nghiên cứu này và các nghiên cứu đã thực hiện.

5. Nội dung nghiên cứu

Nghiên cứu về tường xây gạch gia cường lưới sợi phi kim FRP tập trung vào việc tìm hiểu và ứng dụng lưới sợi phi kim FRP (Fiber-Reinforced Polymer) đang có sẵn trên thị trường trong việc gia cường tường xây bằng gạch. Trong nghiên cứu này tác giả sử dụng sợi thủy tinh GFRP vì giá thành rẻ nên có khả năng ứng dụng cao. Nghiên cứu thực nghiệm tập trung vào ứng xử của mẫu 200x200 để xem khả năng khả năng chịu cắt của mạch vữa, và mẫu 600x600 để xem khả năng chịu lực của tường khi nằm trong khung chịu tác động của ứng suất nén chính chéo góc.

Phân tích hiệu quả của việc gia cường của FRP đối với tường gạch, tác động của các yếu tố như độ bền, khả năng chịu lực, cũng như ảnh hưởng của lưới GFRP đối với sự ổn định và độ bền lâu dài của công trình.

6. Ý nghĩa khoa học và tính thực tiễn của đề tài

- Về khoa học: đề tài đóng góp vào việc phát triển phương pháp gia cường tường xây gạch, nâng cao hiệu quả và độ bền của công trình, đồng thời mở ra hướng nghiên cứu mới về ứng dụng vật liệu FRP trong xây dựng.

- Về thực tiễn: việc áp dụng lưới sợi phi kim GFRP giúp cải thiện khả năng chịu lực, độ bền và ổn định của công trình, giảm chi phí bảo trì.

CHƯƠNG I. TỔNG QUAN VỀ VẬT LIỆU GIA CƯỜNG FRP

1.1. Vật liệu FRP ứng xử gia tải và tính thực tế hiện nay

Việc ứng dụng FRP (Fiber Reinforced Polymer) gia cố tường gạch không nung tại Việt Nam là một lĩnh vực đang ngày càng thu hút sự chú ý trong ngành xây dựng. FRP là vật liệu composite cấu tạo từ các sợi vải như sợi thủy tinh, sợi carbon hoặc sợi aramid kết hợp với nhựa polymer, mang lại những ưu điểm vượt trội như độ bền cao, trọng lượng nhẹ, khả năng chịu lực chống ăn mòn tốt. Tuy nhiên, trong lĩnh vực gia cố tường gạch không nung, FRP mới chỉ được áp dụng rộng rãi trong những năm gần đây, với các nghiên cứu, ứng dụng thực tế được thực hiện, đặc biệt là sau năm 2000 khi nhu cầu sử dụng vật liệu xây dựng nhẹ, thân thiện với môi trường và tiết kiệm năng lượng ngày càng gia tăng.

Gạch không nung, được sản xuất mà không cần trải qua quá trình nung ở nhiệt độ cao, lần đầu tiên xuất hiện tại Nhật Bản vào những năm 1980 và sau đó dần được áp dụng rộng rãi tại nhiều quốc gia trên thế giới. Tại Việt Nam, gạch không nung bắt đầu được sử dụng phổ biến từ những năm 2000. Mặc dù gạch không nung có những ưu điểm vượt trội về mặt thân thiện với môi trường và tiết kiệm năng lượng, nhưng do đặc tính vật lý của nó, việc đảm bảo độ bền, khả năng chịu lực và độ ổn định lâu dài của các kết cấu gạch vẫn là một thách thức lớn, thường xuyên xảy ra sự cố nứt của khối xây. Chính vì vậy, việc ứng dụng FRP để gia cố tường gạch không nung đã trở thành một giải pháp hiệu quả, giúp nâng cao độ bền, khả năng chịu lực và kéo dài tuổi thọ cho các kết cấu này.

Các nghiên cứu về ứng dụng FRP trong gia cố tường gạch không nung đã được thực hiện bởi nhiều nhà khoa học trong và ngoài nước. Một số nghiên cứu điển hình có thể kể đến là nghiên cứu của Ngô Văn Thuyết [1] về việc ứng dụng FRP gia cố cho các kết cấu tường gạch, trong đó chỉ ra rằng việc sử dụng vữa sợi dệt (CFRP) trong lớp gia cố giúp tăng cường độ bền chịu nén và chịu uốn của tường gạch bằng vật phương pháp mô phỏng số. Babatunde [2] đã tổng hợp các nghiên cứu đã được thực hiện nhằm tìm ra giải pháp gia cường tường bằng vật liệu FRP. Nghiên cứu chỉ ra ba kỹ thuật gia cường cơ bản: dán bên ngoài, cắt rãnh và gắn vào bề mặt, và quán quanh các cấu kiện như cột, vòm, tường. FRP cho thấy hiệu quả đáng kể trong việc tăng cường khả năng chịu cắt, độ bền uốn hoặc khả năng chịu lực ngoài mặt phẳng. Tuy nhiên, nghiên cứu [2] cũng cho thấy nhiều yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả gia cố như chất lượng và loại FRP, hoặc vật liệu kết dính. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra hiện tượng tách lớp, thiếu tính dẻo.

Sử dụng FRP giúp tăng cường độ bền và khả năng chịu lực của tường gạch không nung mà không làm tăng trọng lượng công trình, điều này rất quan trọng trong các công trình yêu cầu tiết kiệm vật liệu và giảm trọng lượng. Thứ hai, vật liệu FRP có tính chất chống ăn mòn, chịu tác động của môi trường tốt, giúp bảo vệ các kết cấu dưới tác động của môi trường độ ẩm cao và ăn mòn, giúp kéo dài tuổi thọ công trình. Thứ ba, việc sử dụng FRP trong gia cố giúp cải thiện khả năng chống nứt khi chấn động, điều này đặc biệt quan trọng trong các công trình xây dựng ở khu vực có động đất hoặc chịu tải trọng động mạnh. Tuy nhiên, việc áp dụng FRP trong gia cố tường gạch không nung cũng gặp phải một số khó khăn. Thứ nhất, chi phí đầu tư ban đầu cho việc sử dụng FRP để gia cố, điều này có thể làm tăng tổng chi phí của công trình, đặc biệt là trong các dự án có quy mô nhỏ hoặc nguồn vốn hạn chế. Thứ hai, việc thi công và lắp đặt lưới FRP đòi hỏi kỹ thuật và đội ngũ kỹ sư, công nhân phải có chuyên môn và kinh nghiệm. Điều này cũng làm tăng yêu cầu về đào tạo và giám sát chất lượng trong quá trình thi công. Thứ ba, mặc dù FRP có tính linh hoạt và khả năng ứng dụng cao, nhưng việc ứng dụng vật liệu này đòi hỏi phải có các nghiên cứu và thử nghiệm chi tiết để tối ưu hóa thiết kế và phương pháp thi công, điều này có thể làm kéo dài thời gian triển khai dự án. Vấn đề lớn nhất là chưa có tiêu chuẩn hướng dẫn về kỹ thuật gia cường.

Một yếu tố đặc biệt quan trọng hiện nay là các công trình xây dựng nhà nước tại Việt Nam đang bắt buộc sử dụng gạch không nung. Quy định này nhằm đáp ứng yêu cầu bảo vệ môi trường và tiết kiệm năng lượng, đồng thời thúc đẩy phát triển công nghệ xây dựng bền vững. Tuy nhiên, như đã đề cập ở trên, gạch không nung có một số hạn chế về độ bền và khả năng chịu lực. Do đó, việc gia cố bằng FRP sẽ giúp tăng cường chất lượng công trình, đảm bảo đáp ứng các yêu cầu khắt khe về độ bền và khả năng chịu tải. Tóm lại, ứng dụng FRP trong gia cố tường gạch không nung tại Việt Nam là một giải pháp kỹ thuật có tiềm năng lớn, góp phần nâng cao chất lượng công trình xây dựng, bảo vệ môi trường và giảm chi phí bảo trì. Tuy nhiên, để áp dụng hiệu quả, cần có sự đầu tư nghiên cứu và phát triển công nghệ thi công, đồng thời giải quyết các vấn đề về chi phí và đào tạo nhân lực để đảm bảo chất lượng công trình khi sử dụng vật liệu này.

1.1.1. Các nghiên cứu trong nước

Sự kết hợp giữa tường xây gạch truyền thống và vật liệu FRP sẽ tạo ra một hệ kết cấu tường có khả năng chống chịu lực và độ bền cao hơn. Trong những năm gần đây, ở trong nước không có nhiều các nghiên cứu về ứng xử của tường xây gạch gia cường FRP. Nguyễn

Hữu Thế [3] nghiên cứu tính chất cơ lý của vật liệu sơn polyurea và sợi FRP để gia cường cho kết cấu công trình chịu tải trọng đặc biệt. Tác giả đã tiến hành thí nghiệm xác định tính chất cơ lý của vật liệu sơn polyurea và sợi FRP được sử dụng để gia cường kết cấu công trình. Từ kết quả thí nghiệm, tác giả đưa ra đề xuất sử dụng vật liệu FRP cho gia cường kết cấu tường xây gạch cũng như áp dụng để gia cường kết cấu khác khi chịu tải trọng đặc biệt.

PSG. TS Ngô Văn Thuyết [1] đánh giá hiệu quả của giải pháp gia cường kết cấu tường gạch bằng lớp vữa cốt lưới sợi dệt (CFRP). Tuy nhiên, nghiên cứu này chỉ sử dụng các tính chất cơ lý của của tường gạch được gia cường trong các nghiên cứu trước đây và áp dụng vào phân tích số công trình để đánh giá tác động của tường đến kết cấu chịu lực chính của tòa nhà. Tác giả tiến hành so sánh hai trường hợp gia cường và không gia cường nhưng không có thực nghiệm kiểm chứng.

1.1.2. Các nghiên cứu ngoài nước

Trên thế giới, việc nghiên cứu ứng xử của tường xây gạch gia cường FRP đã được thực hiện từ những năm 1990 và đạt được nhiều kết quả quan trọng. Các nghiên cứu tập trung vào nhiều khía cạnh khác nhau như khả năng chịu lực, biến dạng, phá hoại và các cơ chế phá hoại của tường xây gia cường FRP dưới các dạng tải trọng khác nhau. Nhiều phương pháp gia cường đã được đề xuất và kiểm chứng qua các thí nghiệm trong phòng với các mẫu thí nghiệm ở các tỉ lệ khác nhau. Các nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của việc gia cường FRP trong việc tăng cường khả năng chịu lực, độ dẻo và khả năng hấp thụ năng lượng của tường xây. Đặc biệt, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào ứng xử của tường dưới tác dụng của tải trọng động đất và đề xuất các giải pháp gia cường phù hợp cho các công trình trong vùng có nguy cơ động đất.

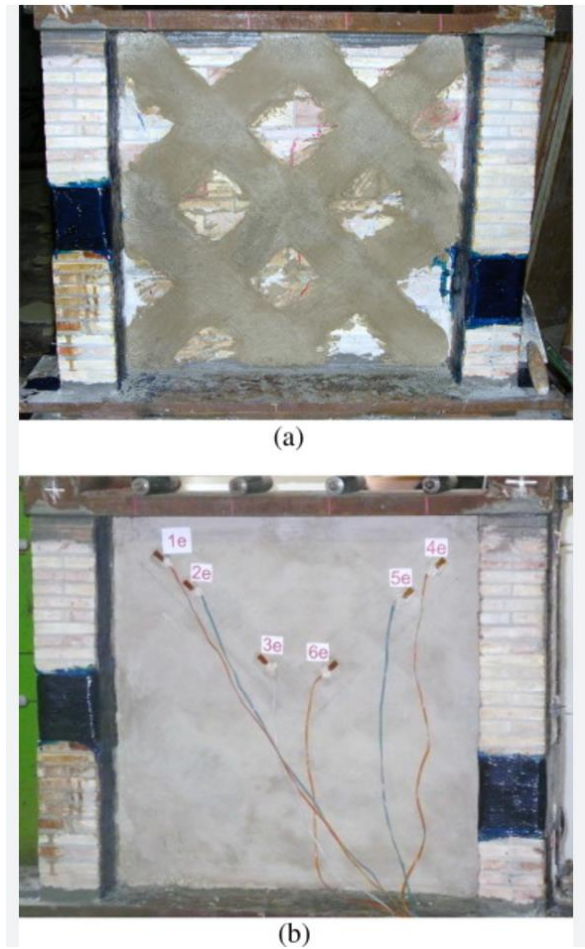
Hamid Mahmood và Ingham [4] nghiên cứu thực nghiệm về khả năng chịu lực của tường xây gạch không có và có gia cường FRP. Để giải quyết những lo ngại về tính dễ bị ảnh hưởng do động đất của các tòa nhà xây bằng khối xây không cốt thép (URM) của New Zealand, một chương trình nghiên cứu đã được thực hiện để khảo sát tính hiệu quả của các hệ thống FRP như một biện pháp gia cường cải tạo chống động đất cho các bức tường URM chịu tải trong mặt phẳng dễ bị hư hỏng khi chịu cắt trong động đất. Mười bảy tấm tường URM đã được cải tạo bằng vải sợi thủy tinh FRP liên kết mặt ngoài. Các tấm tường đã được thử nghiệm bằng cách tác dụng lực nén chéo và dữ liệu đã được ghi lại về lực tác dụng và độ nứt của tường tương ứng. Kết quả đã được so sánh với năm tấm tường không được cải tạo gần giống hệt nhau về mọi mặt. Kết quả xác định rằng vật liệu FRP đã làm

tăng sức chịu cắt của tường lên khoảng 30% và độ dẻo dai tăng khoảng 25% so với tường không gia cường. Từ những điều trên, vật liệu cốt sợi (FRP) được coi là một trong những vật liệu gia cường hiệu quả trong biện pháp cải tạo chống động đất.



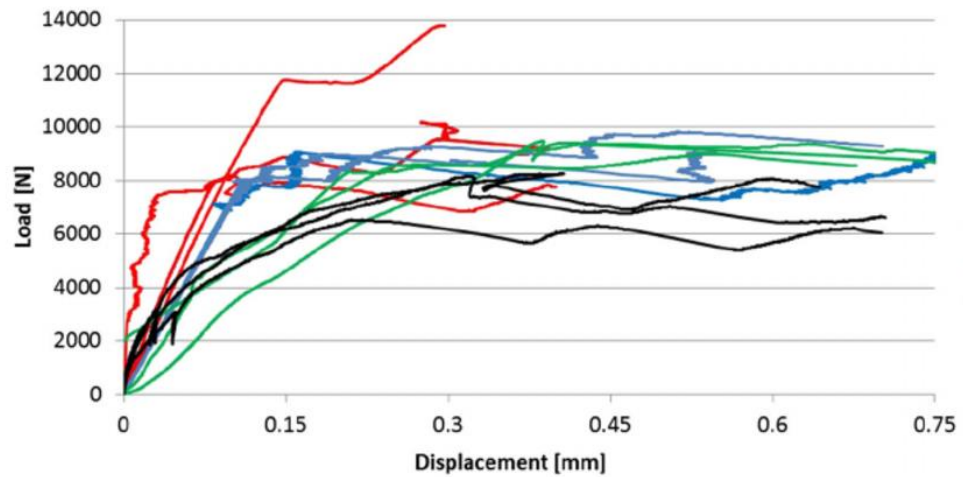
Hình 1. Gia cường lưới sợi thủy tinh trên khối tường [4].

Babaeidarabad và cộng sự [5] thực nghiệm gia cố tường gạch bằng vật liệu vữa trộn sợi composite (FRP) dưới tác dụng tải trọng nén chéo góc. Trong nghiên cứu này sẽ thí nghiệm vữa trộn xi măng với cốt vải (FRCM) được áp dụng cho tường URM để xác định tính khả thi của nó cho việc gia cố bên ngoài. Chương trình thí nghiệm trực tiếp lên chín bức tường gạch chịu nén chéo. Hai mẫu gia cố FRCM được áp dụng, cụ thể là một và bốn lớp vải gia cố. Kết quả được so sánh với tường URM cho thấy hiệu quả của phương pháp gia cường bằng FRCM và phương pháp này tương đương với gia cường bằng vật liệu FRP. Capozucca (2016) [7] nghiên cứu vật liệu composite (GFRP/SRG) gia cường tường xây hai lớp chịu tải trọng trong mặt phẳng. Tác giả tiến hành thí nghiệm về các mô hình tường xây gạch hai lớp không có gia cố chịu tải nén và cắt kết hợp. Sau khi bị hư hỏng, tường sẽ được gia cố bằng hai kỹ thuật tương ứng vật liệu composite liên kết bên ngoài bằng dải GFRP chéo và vữa xi măng cốt sợi thép (SRG) và sau đó tiếp tục thí nghiệm. Tác dụng tải cho đến khi phá hủy. Kết quả thì khả năng chịu lực của tường xây được gia tăng đáng kể. Tuy nhiên SRG cho thấy hiện tượng bong tách liên kết với tường.



Hình 2. Gia cố tường xây gạch bằng GFRP [7].

Felice và cộng sự [6] nghiên cứu thực nghiệm đặc tính của liên kết giữa khối gạch xây và vật liệu composite. Nhóm tác giả đã trình bày một thử nghiệm cho việc mô tả hiệu suất liên kết cắt của các hệ thống gia cường cốt sợi liên kết với nhựa epoxy vào khối xây bằng gạch. Nghiên cứu được thực hiện bởi sáu phòng thí nghiệm tham gia vào RILEM TC 250-CSM, gồm 2 mẫu được thử nghiệm, trong đó mẫu không được gia cường (RRT1) trước đó được thực hiện trong RILEM TC 223-MS. Trong cuộc thử nghiệm thứ hai mẫu được gia cường (RRT2) bao gồm kết hợp với vật liệu FRP (vải bazan, carbon và thủy tinh) và SRP (bao gồm lưới thép) đã được thử nghiệm. Các thiết lập thử nghiệm với một lớp và hai lớp gia cường đã được sử dụng và việc so sánh giữa các kết quả của chúng. Kết quả thử nghiệm cho thấy khả năng phân tán lực của các khối xây được gia cường các loại vật liệu có gia tăng đáng kể so với khối xây không được gia cường.



Hình 3. Biểu đồ khả năng chịu tải tăng đáng kể khi được gia cường [6].

Almeida và cộng sự [7] đánh giá sự làm việc của hệ thống gia cường dưới tác động của lực nén chéo gia tải điều hòa. Kết quả cho thấy hệ thống gia cường tăng tính dẻo dai cho tường. Estevan và cộng sự [8] đánh giá sự làm việc của tường chịu hỏa hoạn sau đó gia cường lưới sợi dệt. Mẫu được thí nghiệm dưới tác động tải trọng xô ngang điều hòa. Bên cạnh đó, thông qua thí nghiệm dưới tác động của tải trọng động ElGawady và cộng sự [9] chỉ ra rằng FRP được sử dụng chưa hiệu quả vì chưa đạt đến giới hạn chịu lực. Một số nghiên cứu cũng tiến hành thực nghiệm mô hình tường chịu đồng thời tải trọng nén đứng và đẩy ngang [10].

Basili và cộng sự [11] tiến hành nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng sử dụng mẫu gia cường lưới sợi bazan cho thấy hiệu quả của hệ gia cường khi tăng khả năng chịu cắt lên từ 30 đến 60% so với tường không được gia cường. Sự hiệu quả của việc gia cường cũng được cho thấy trong các nghiên cứu của Ramonda và cộng sự [12], Rahman và cộng sự [13] cũng như các nghiên cứu khác [14–18].

Wang và cộng sự [19] so sánh ba phương án gia cường đó là dung dây thép, vải sợi carbon, và lưới bazan. Nghiên cứu cho thấy mặc dù không có neo và chỉ dán bề mặt nhưng không thấy sự bóc tách lớp trong ba phương án gia cường. Nghiên cứu [19] cho thấy hiệu quả nhưng chi phí vật tư và kỹ thuật thi công triển khai chậm. Nghiên cứu [20] áp dụng dải CFRP để gia cường gạch block. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu cho thấy sự lãng phí trong sử dụng vật liệu vì dải CFRP chưa sử dụng hết khả năng chịu lực và sự phá hoại xảy ra ngoài vùng được gia cường. Nghiên cứu tương tự cũng được thực hiện bởi Mahmood và cộng sự [4]. Trong khi đó, Valluzzi và cộng sự [21] tiến hành nhiều phương án gia cường với các tấm FRP nhiều lớp và kết luận rằng hầu hết các trường hợp, vật liệu FRP có độ

cứng thấp tỏ ra hiệu quả hơn về cả cường độ cực hạn và độ cứng của tấm tường. Bởi vì vật liệu cứng hơn dễ bị bóc tách, đặc biệt khi số lớp gia cường tăng lên. Hiện tượng bong tách liên kết cũng được trình bày trong nghiên cứu của Faella và cộng sự [22]

Gattesco [23] tiến hành nghiên cứu thực nghiệm các phương án gia cường bằng lưới GFRP có trát vữa trên bề mặt và so sánh với trường hợp tường không trát. Sự so sánh này chưa hợp lý vì lớp vữa trát có tham gia vào khả năng chịu lực của tường. Vì vậy, khi so sánh tường có trát gia cường và tường không trát thì diện tích chịu lực đã khác nhau. Các nghiên cứu [24–31] cũng đặt ra những so sánh tương tự như nghiên cứu [23].

D'Antino [32] thực hiện gia cường trên kết cấu tường xây cũ với dưới GFRP. Tuy nhiên nguyên cứu này sử dụng hàm lượng sợi gia cường lớn dẫn đến kết cấu gạch phá hoại trước vật liệu gia cường. Bên cạnh đó, liên kết giữa lớp gia cường và tường gạch khá yếu gây ra hiện tượng bong tách bề mặt. Việc gia cường các kết cấu gạch cũ cũng được thực hiện bởi các nghiên cứu [33].

1.2. Nội dung nghiên cứu

Theo nghiên cứu của Valluzzi và cộng sự [34], ứng xử làm việc giữa FRP và gạch không nung thông qua vữa giúp tăng cường khả năng chịu nén và chống uốn của tường, đặc biệt trong các công trình chịu tải trọng động hoặc các khu vực có nguy cơ sụp đổ do sự phân phối ứng suất không đều. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng FRP giúp cải thiện khả năng chống nứt của tường gạch không nung khi được gia cố, trong khi vữa có vai trò quan trọng trong việc duy trì độ bám dính và ổn định của FRP.

Cơ chế phá hoại của tường xây gạch không nung gia cường lưới sợi FRP là một quá trình phức tạp, liên quan đến sự tương tác giữa ba yếu tố chính: gạch không nung, lưới sợi FRP và vữa kết dính. Khi tường chịu tải trọng, ứng suất sẽ được phân phối lên bề mặt, và các vết nứt có thể hình thành tại những điểm yếu của cấu trúc, như các khe hở giữa gạch hoặc ở các vị trí chịu lực lớn. Lưới sợi FRP, nhờ vào tính chất chịu kéo cao và độ bền tốt, có tác dụng phân phối lực đều lên toàn bộ bề mặt tường, giúp giảm thiểu sự phát triển của nứt và tăng khả năng chịu lực. Tuy nhiên, nếu tải trọng vượt quá giới hạn chịu đựng của hệ thống, lớp FRP có thể bị kéo giãn quá mức, gây ra hiện tượng đứt gãy hoặc tách rời khỏi bề mặt tường.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu được tiến hành về khả năng áp dụng FRP trong việc gia cường kết cấu tường xây gạch [14–18]. Tuy nhiên, các nghiên cứu trước đây tập trung vào so sánh khả năng chịu tải của kết cấu tường gạch trước và sau khi gia cường nên chưa

đề cập đến kích thước thay đổi của kết cấu sau gia cường. Bên cạnh đó, các vật liệu gia cường như tấm FRP khá đắt tiền và hầu hết các nghiên cứu chỉ ra sự phá hoại đến từ kết cấu tường chứ không phải FRP. Ngoài ra, tương tác liên kết giữa FRP và kết cấu rất yếu và dễ xảy ra hiện tượng bong tróc bề mặt. Do đó, việc sử dụng vật liệu gia cường chưa hiệu quả nếu xét tính kinh tế. Dựa vào tất cả các nghiên cứu đã trình bày trên có thể thấy rằng quá trình thi công tương đối phức tạp và chỉ phù hợp gia cường kết cấu gạch đã cũ hoặc quy mô nhỏ. Các nghiên cứu đã thực hiện trước đây chưa so sánh sự ảnh hưởng của cường độ khối xây tương ứng với một biện pháp gia cường. Đối với kết cấu tường xây gạch không nung hiện nay tại Việt Nam, hiện tượng nứt xảy ra khá nhiều và tác động lên việc sử dụng công trình. Từ những vấn đề trên, nghiên cứu này đề xuất sử dụng lưới GFRP có mặt lưới 5x5mm để gia cường cho tường vì đây là vật liệu rẻ, có thể phù hợp quá trình thi công với khối lượng lớn và không cần quá nhiều kỹ thuật phức tạp. Bên cạnh đó, lưới FRP có khả năng chịu lực phù hợp với sự làm việc chung giữa vữa và vật liệu tính phi kim GFRP.

1.3. Kết luận chương 1

Chương 1 đã trình bày tổng quan về tường xây gạch không nung gia cường bằng lưới sợi FRP, một giải pháp gia cố đang được áp dụng rộng rãi trong ngành xây dựng nhằm tăng cường độ bền và khả năng chịu lực của các kết cấu gạch không nung. Tường gạch không nung, mặc dù có nhiều ưu điểm như tiết kiệm năng lượng và bảo vệ môi trường, nhưng lại gặp phải một số vấn đề về độ bền và khả năng chịu tải trọng. Để giải quyết vấn đề này, việc sử dụng lưới sợi FRP đã trở thành một giải pháp hiệu quả giúp gia cố kết cấu tường, mang lại sự cải thiện đáng kể trong khả năng chịu lực và chống nứt. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, cơ chế phá hoại của tường gạch không nung gia cường FRP thường xảy ra do sự tách lớp giữa FRP và vữa kết dính, đặc biệt khi chịu tải trọng lớn hoặc trong môi trường ẩm ướt.

Chương 1 cũng đã nêu ra những điểm mạnh và yếu của các nghiên cứu trước, giúp xác định những khoảng trống cần được giải quyết trong các nghiên cứu tiếp theo, đặc biệt là việc khảo sát ứng xử bám dính giữa FRP và tường gạch không nung trong các điều kiện thực tế, chịu tải trọng thay đổi và tác động môi trường. Các kết quả này sẽ là nền tảng cho việc phát triển mô hình thí nghiệm và phương pháp gia cố hiệu quả hơn trong các chương tiếp theo của nghiên cứu.

CHƯƠNG 2. CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

Trong chương này, một chương trình thực nghiệm gồm hai phần được thực hiện, bao gồm thí nghiệm xác định hiệu quả thi công tường xây gạch gia cường và không gia cường FRP trên các mẫu vữa M75 và M100. Các thử nghiệm này nhằm đánh giá sự khác biệt trong khả năng chịu lực và độ bền của tường xây khi sử dụng phương pháp gia cường FRP so với các tường không gia cường, đồng thời nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố vật liệu và kỹ thuật thi công đến chất lượng công trình.

2.1. Xác định thông tin vật liệu

2.1.1. Xác cường độ mẫu vữa

Nghiên cứu này sử dụng vữa trộn sẵn đảm bảo theo yêu cầu tiêu chuẩn TCVN 4314-2022 [35]. Vữa khô trộn sẵn là một sản phẩm xây dựng được chế tạo từ các thành phần cơ bản như xi măng, cát sạch được trộn sẵn trong môi trường kiểm soát chất lượng. Vữa khô trộn sẵn Vĩ Đạt [36] được sản xuất với cát sạch có kích thước từ 0,2 - 2 mm, lấy từ sông Ba Phú Yên và được trộn với xi măng PCB40, đảm bảo các thành phần đều đạt tiêu chuẩn chất lượng cao. Với các tỷ lệ phối trộn chính xác, sản phẩm vữa này có độ đồng nhất cao, giúp tạo ra một chất liệu thi công ổn định, dễ dàng và hiệu quả.



Hình 4. Vữa khô trộn sẵn Vĩ Đạt.

Đầu tiên, công tác chuẩn bị bao gồm việc cân khối lượng vữa khô trộn sẵn theo tỷ lệ quy định. Mỗi loại vữa cần được trộn với một lượng nước sạch nhất định, thường từ 5.5 -

9 lít nước cho mỗi bao 50 kg vữa, nhằm đạt được độ sệt phù hợp. Sau khi cân xong, vữa được trộn đều với nước trong một thùng trộn để tạo thành hỗn hợp đồng nhất.



Hình 5. Dùng cân để tính khối lượng vữa khô trước khi trộn với nước.

Tiếp theo, chuẩn bị khuôn mẫu là bước quan trọng để đảm bảo kích thước và hình dáng mẫu thử chính xác. Khuôn mẫu thường được làm bằng kim loại, có kích thước chuẩn để kiểm tra các chỉ số cường độ chịu nén. Khuôn mẫu cần được làm sạch và bôi một lớp dầu nhót mỏng để tránh vữa bám dính vào khuôn khi đúc. Mẫu vữa sau khi trộn ướt được đúc và bỏ vào máy đầm để đảm bảo mẫu đặc chắc.



Hình 6. Quét lớp dầu nhót để chống dính vữa vào khuôn đúc.

Sau khi khuôn đã sẵn sàng, vữa trộn xong được đổ vào khuôn mẫu. Trong quá trình đúc, vữa cần được đầm chặt bằng máy đầm để loại bỏ bọt khí và đảm bảo mẫu đồng nhất. Sau khi đúc đầy khuôn, vữa được làm phẳng bề mặt và để khô ráo.



Hình 7. Dụng máy đầm để đảm bảo mẫu vữa đặc chắc.

Sau khi vữa đã đạt độ kết dính cần thiết và bề mặt khô, mẫu sẽ được ngâm vào nước để bảo dưỡng. Quá trình ngâm bảo dưỡng này giúp duy trì độ ẩm cần thiết cho mẫu vữa, đảm bảo quá trình hydrat hóa xi măng diễn ra hoàn chỉnh, từ đó giúp mẫu đạt được cường độ tối ưu. Quá trình bảo dưỡng này rất quan trọng để đảm bảo tính chính xác của các kết quả thí nghiệm về cường độ và độ bền của vữa.



Hình 8. Mẫu sau khi đúc và bảo dưỡng.

Xác định cường độ chịu nén của vữa bao gồm vữa tô và xây theo TCVN 3121-11:2022 [37]. Mỗi mác vữa cần thử tối thiểu 6 mẫu và nếu kết quả mẫu nào lệch trên 15%

so với giá trị trung bình thì cần loại kết quả của mẫu đó. Tổng số mẫu cần thực hiện 24 mẫu theo **Bảng 1**.

Bảng 1. Tổng số mẫu vữa cần thực hiện

Loại vữa	M75	M100	Tổng mẫu
Vữa xây	6	6	24
Vữa tô	6	6	

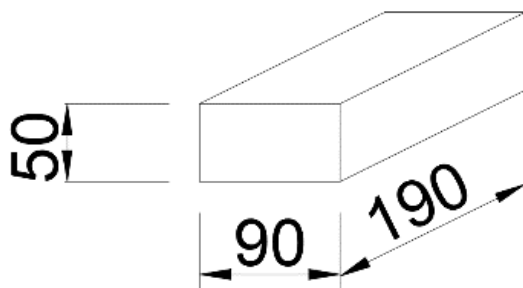
Cường độ chịu nén của mẫu thử (MPa) được xác định theo công thức (2):

$$R = \frac{P_n}{A} \quad (1)$$

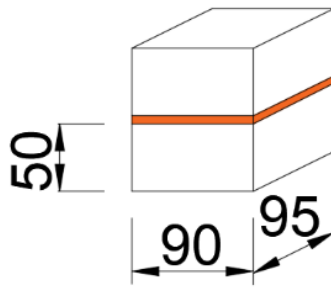
trong đó: P_n là lực nén khi mẫu bị phá hủy (N), A là diện tích tiết diện nén của mẫu (mm^2).

2.1.2. Xác định cường độ chịu nén của gạch

Viên gạch được sử dụng được sản xuất bởi thương hiệu Vĩ Đạt [36] có kích thước $50 \times 90 \times 190$, Mác 75 như trong **Hình 9**. Gạch được đúc bằng cát trộn với xi măng và nén chặt. Để xác định cường độ chịu nén của gạch, mẫu nén được chế tạo theo tiêu chuẩn TCVN 6477:2016 [38]. Gạch nguyên được cắt làm đôi thành 2 nửa xếp chồng lên nhau, ở giữa là lớp hồ xi măng dẻo có chiều dày nhỏ hơn 3mm. Mẫu sau khi hoàn thành cần để trong phòng thí nghiệm dưới điều kiện khô tự nhiên đủ 72 giờ. Tốc độ gia tải phải đều và bằng $0.6 \pm 0.2 \text{ MPa/s}$.



Hình 9. Kích thước mẫu gạch.



Hình 10. Kích thước mẫu nén xác định cường độ gạch.

Cường độ chịu nén của mẫu thử được xác định theo công thức (2):

$$R = \frac{P_{max} \times K}{S} \quad (2)$$

trong đó: P_{max} là lực nén khi mẫu bị phá hủy (N), S là giá trị trung bình của diện tích mặt chịu nén (mm^2), K là hệ số hình dạng phụ thuộc kích thước mẫu tra theo Bảng 4 [38].

2.1.3. Xác định thông tin lưới sợi GFRP

Đặc tính kỹ thuật của lưới sợi thủy tinh có khả năng chịu kéo cao và bền với môi trường ẩm và có tính oxy hóa cao. Loại lưới phi kim được sử dụng trong nghiên cứu này là lưới sợi thủy tinh đang được cung cấp trên thị trường bởi Công ty TNHH thương mại và dịch vụ xây dựng BURO [39] với thông số như sau:

- Tên sản phẩm: Lưới thủy tinh gia cường chống nứt BURO 5×5
- Thành phần chính: Sợi thủy tinh.
- Kích thước mắt lưới: 5mm×5mm.
- Kích thước cuộn: Rộng 1m, dài 50m.
- Elastic modulus: 71 GPa, Tensile strength: 2500 MPa, Elongation: 3.5%, diện tích tiết diện ngang 16 mm^2/m [24].

Trong nghiên cứu này tác giả không xác định cường độ của sợi thủy tinh do thiếu các thiết bị cần thiết cho nghiên cứu thực nghiệm. Nghiên cứu hiện tại tập trung đánh giá khả năng chịu lực của tường khi có gia cường lưới sợi thủy tinh khi không được gia cường.

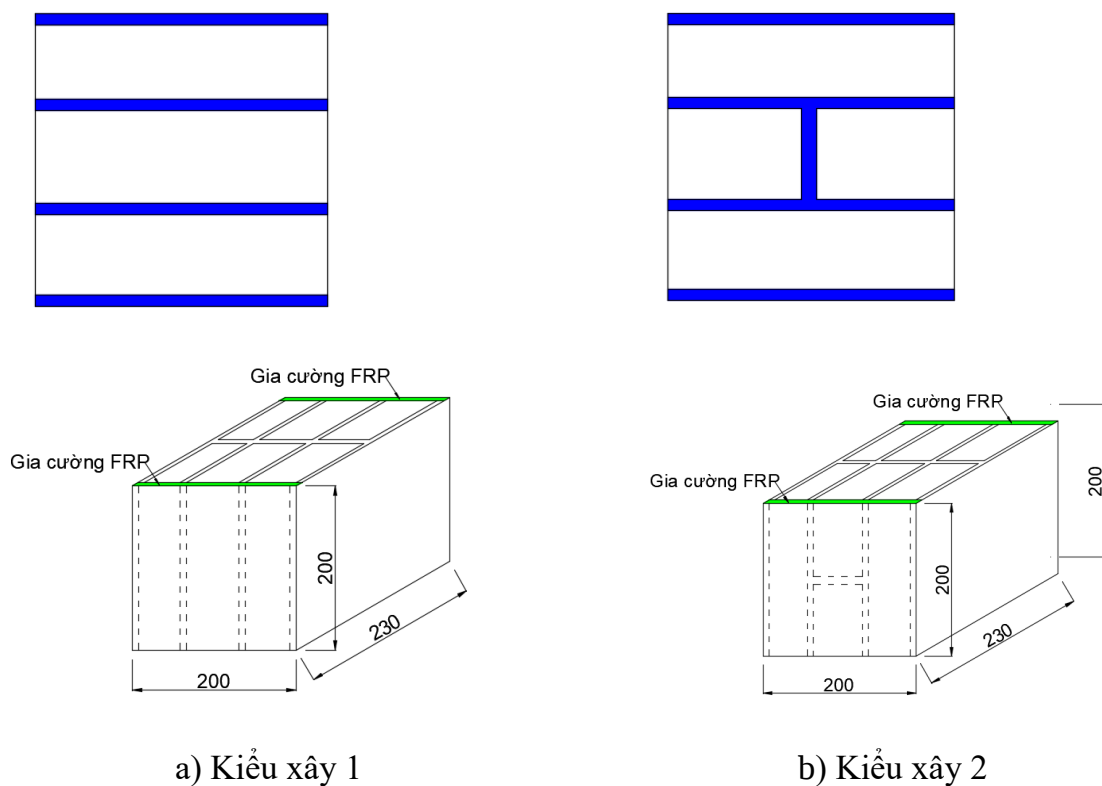


Hình 11. Vật liệu lưới GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer).

2.2. Thí nghiệm khả năng chịu cắt trực tiếp của vữa

2.2.1. Chế tạo mẫu cắt

Mẫu tường thí nghiệm có kích thước $200 \times 200 \times 230$ với hai kiểu khối xây như **Hình 12**. Quá trình chế tạo và bảo dưỡng mẫu như **Hình 13**.



Hình 12. Mẫu tường tường gạch xây $200 \times 200 \times 230$.



a) Thi công xây



b) Thi công lưới



c) Bảo dưỡng mẫu

Hình 13. Chế tạo mẫu $200 \times 200 \times 230$.

Quá trình xây dựng mẫu tường gạch được thực hiện theo các bước cụ thể nhằm đảm bảo chất lượng và độ bền kết cấu. Vữa xây sử dụng trong thí nghiệm là vữa khô trộn sẵn, được phối trộn theo tỷ lệ tiêu chuẩn. Trước khi tiến hành xây dựng, vữa khô được trộn lại trong trạng thái khô trong khoảng 3 phút để đảm bảo các thành phần phối trộn đồng đều. Sau đó, nước sạch được bổ sung từng phần nhỏ, kết hợp với quá trình trộn liên tục để đạt được hỗn hợp vữa đồng nhất, có độ dẻo và khả năng kết dính tốt theo yêu cầu kỹ thuật. Gạch sử dụng có kích thước tiêu chuẩn $50 \times 90 \times 195$ mm. Trước khi xây, gạch được ngâm trong nước sạch tối thiểu 5 phút hoặc cho đến khi hết bọt khí để đảm bảo độ ẩm, giúp hạn chế sự hút nước từ vữa, qua đó tăng khả năng bám dính giữa vữa và gạch. Sau khi chuẩn bị xong, quá trình xây dựng mẫu được tiến hành. Các viên gạch được đặt ngay ngắn theo hàng, lớp vữa trải đều với độ dày khoảng 12 mm được trải lên bề mặt viên gạch đồng nhất, khoảng khe hở giữa các viên gạch được trám vữa kín đảm bảo bề mặt tiếp xúc tốt nhất giữa các viên gạch. Việc căn chỉnh được thực hiện cẩn thận để đảm bảo tính chính xác về kích thước và độ phẳng của mẫu tường xây.

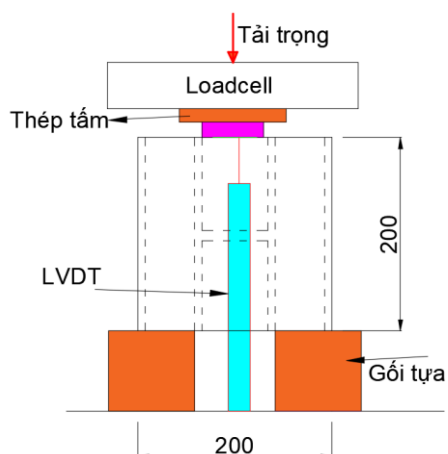
Sau khi xây xong, mẫu tường được bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn nhằm đảm bảo sự phát triển cường độ của vữa và độ liên kết giữa các viên gạch. Thông tin về loại gạch, loại vữa, ngày xây dựng và các điều kiện bảo dưỡng đều được ghi chép đầy đủ để phục vụ quá trình đánh giá và phân tích sau này. Khi tường xây đủ cứng 14 ngày thì tiến hành thi công lớp trát và lớp gia cường GFRP có chiều dày 15 mm hai bên của khối xây như **Hình 13** (b). Để kết dính lưới GFRP với tường gạch, một lớp hồ dầu được sử dụng như chất keo kết dính. Sau đó, lớp vữa sẽ được trát lên lớp lưới GFRP để hoàn thiện. Số lượng mẫu để thí nghiệm khả năng chịu cắt của vữa được trình bày trong Bảng 2. Nghiên cứu tiến hành

Bảng 2. Số lượng mẫu thí nghiệm cắt vữa

Tường xây gạch không nung kích thước 200×200×230		M75	M100	Tổng mẫu
Gia cường	Kiểu xây 1	3	3	12
	Kiểu xây 2	3	3	
Không gia cường	Kiểu xây 1	3	3	12
	Kiểu xây 2	3	3	

2.2.2. Thí nghiệm cắt vữa

Thí nghiệm khả năng chịu cắt của vữa trong nghiên cứu này là cách kiểm tra trực tiếp khả năng chịu cắt của khối xây trong mặt phẳng. Hiện nay, các tiêu chuẩn Việt Nam chỉ đề cập đến khả năng chịu lực của vật liệu như vữa và gạch chứ chưa có tiêu chuẩn trực tiếp thí nghiệm kiểm tra sự làm việc chung của hai vật liệu trong khối xây. Việc thí nghiệm kiểm tra khả năng chịu cắt trực tiếp tuân theo tiêu chuẩn RILEM TC-127 MS [40]. Mô hình thí nghiệm như hình **Hình 14** với hai tấm thép hai bên có bu lông giữ nhằm ngăn biến dạng uốn của mẫu. Kết quả bao gồm lực gây cắt thu được qua cảm biến lực Loadcell và chuyển vị đứng thông qua thiết bị đo chuyển vị LVDT. Bên cạnh đó, bề mặt của mẫu được đánh dấu chấm nhằm phân tích ứng suất biến dạng thông qua phần mềm phân tích ảnh DIC (Digital Image Correlation). Kết quả thu được sau mỗi 5 giây.



a)



b)

Hình 14. Mô hình thí nghiệm theo RILEM TC-127 MS [40].

Cường độ bám dính hay cường độ chịu cắt dựa trên thí nghiệm cắt trực tiếp được xác định

$$\tau = \frac{F}{(A_1 + A_2)} = \frac{F}{(2A_1)} \quad (3)$$

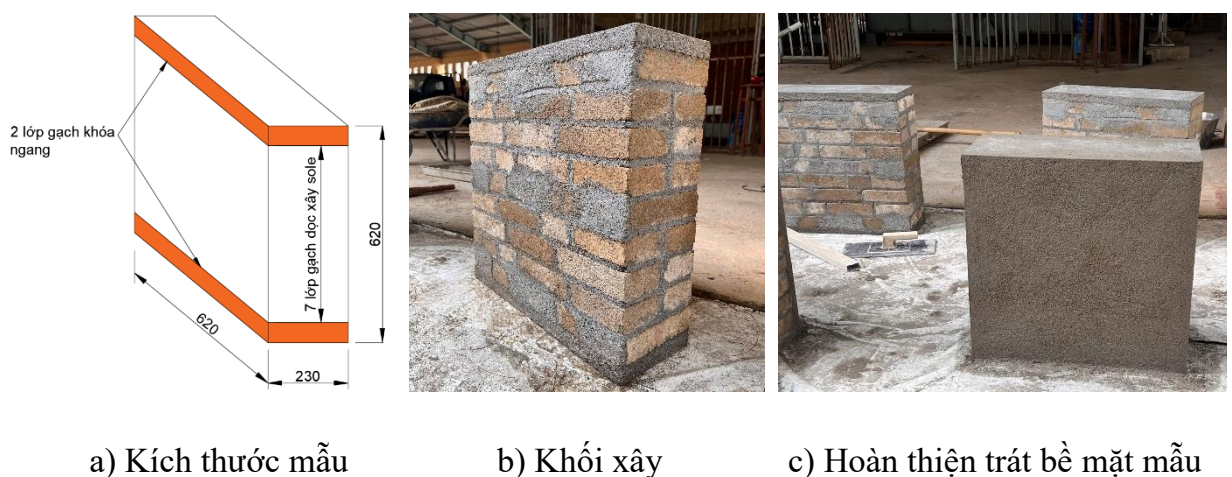
trong đó: F là lực lớn nhất gây phá hoại cắt, $A_{1,2}$ là diện tích mặt tiếp xúc giữa lớp vữa và gạch ở bên trái và phải.

2.3. Thí nghiệm nén chéo góc

Thí nghiệm nén chéo góc (Diagonal compression test) hay còn gọi là thí nghiệm cắt của khối xây thông qua thí nghiệm nén chéo góc. Quy trình thí nghiệm tuân theo tiêu chuẩn ASTM E 519–07 [41].

2.3.1. Chế tạo mẫu nén

Mẫu thí nghiệm theo dự kiến là $600 \times 600 \times 200$ nhưng quá trình thi công kích thước thực của mẫu $620 \times 620 \times 230$. Kích thước mẫu được lựa chọn bị giới hạn bởi kích thước của hệ thống gia tải và các thiết bị phục vụ thí nghiệm. Bên cạnh đó, theo TCVN 4085:2011 [42] không chế khối xây 5-7 lớp có một lớp gạch ngang để khóa, chiều dày lớp vữa liên kết từ 8-12mm. Trong nghiên cứu này sử dụng mẫu với bề dày lớp trát 15mm như mẫu thí nghiệm cắt trực tiếp. Kích thước mẫu, cấu tạo khối xây và quy trình hoàn thiện mẫu như **Hình 15**. Mẫu sau khi hoàn thành từng giai đoạn cần được bảo dưỡng bằng cách giữ ẩm và tưới nước hai lần một ngày như **Hình 16**.



Hình 15. Quy trình chế tạo và kích thước mẫu nén góc.



Hình 16. Quy trình bảo dưỡng mẫu.

Đối với mẫu được gia cường lưới GFRP thì quy trình thi công cần sử dụng hồ dầu có độ dẻo cao làm chất kết dính như Hình 17 (a). Sau đó, lớp vữa tô sẽ được trát lên bề mặt và hoàn thiện như Hình 17 (b). Nghiên cứu được thực hiện với hai trường hợp mẫu Mác M75 và M100 tương ứng hai trường hợp gia cường và không gia cường. Số lượng mẫu chi tiết được trình bày trong Bảng 3.



a) Thi công lưới GFRP



b) Hoàn thiện lớp trát 15mm

Hình 17. Quy trình thi công gia cường lưới GFRP.

Bảng 3. Số lượng mẫu thí nghiệm nén góc

Kích thước 620×620×230	M75	M100	Tổng mẫu
Gia cường	3	3	12
Không gia cường	3	3	

2.3.2. Thí nghiệm nén chéo góc

Quy trình thí nghiệm được thực hiện theo Tiêu chuẩn ASTM E 519–07 [41]. Sơ đồ bố trí thiết bị được thể hiện như trong Hình 18. Bàn nén được bố trí hai đầu của mẫu, tiêu chuẩn ASTM E 519–07 [41] quy định phần tiếp xúc giữa bàn nén và cạnh mẫu không quá $1/8$ chiều dài cạnh của mẫu. Trong nghiên cứu này phần tiếp xúc đề xuất là 75mm. Các LVDT được bố trí với một cặp đối diện theo phương đứng nhằm đo biến dạng theo phương thẳng đứng dựa vào sự chênh lệch chuyển vị giữa hai điểm đo. Cặp LVDT còn lại bố trí theo phương ngang đối xứng nhau nhằm vừa giúp hiệu chỉnh kết quả và phòng rủi ro khi mất tín hiệu đo, biến dạng thu được theo phương ngang là tổng chuyển vị của hai điểm đo. Bên cạnh đó, 1 LVDT được bố trí tại bàn nén bên dưới nhằm đo biến dạng dọc. Kích thủy lực 300 tấn được bố trí bên dưới và cảm biến lực Loadcell được đặt bên trên. Trên Hình 18 (b) cho thấy bố trí thực tế có thêm khung thép, đây là thiết bị nhằm cố định mẫu và cũng là thiết bị an toàn nhằm ngăn ngừa tình trạng văng mẫu sau khi phá hoại để bảo vệ thiết bị. Để hạn chế ảnh hưởng của khung thép đến kết quả, sau khi cố định mẫu vào khung gia tải, thì các đai ốc của khung bảo vệ sẽ được nới lỏng. Tải trọng được gia tải sau mỗi 5 giây, các kết quả về tải trọng và chuyển vị tại các điểm đo được thu lại bằng hệ thống BDI STS-Wifi và lưu trữ trên máy tính. Mẫu sau khi phá hoại sẽ được chụp hình vết nứt và phân tích kết quả.

Từ kết quả thí nghiệm ứng suất cắt của tường được xác định công thức (4) trong Tiêu chuẩn ASTM E519-02 [41]:

$$S_s = \frac{0.707P}{(A_n)} \quad (4)$$

trong đó: - S_s là ứng suất cắt (MPa);

- P là lực gây phá hoại mẫu;

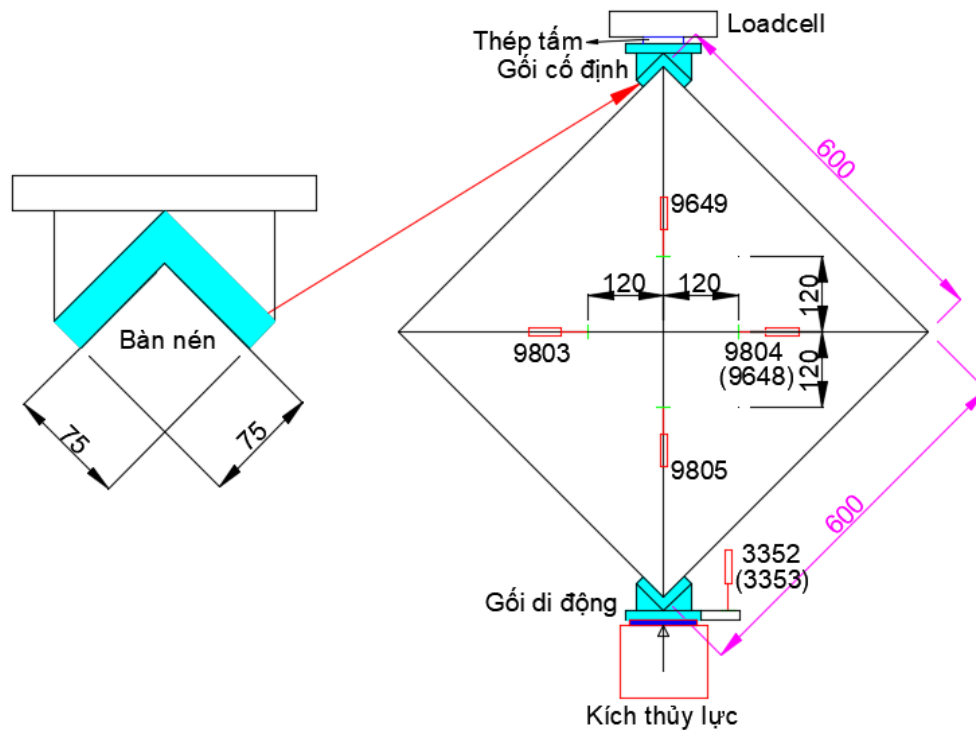
- A_n là diện tích chịu lực thực sau khi trừ lỗ rỗng $A_n = \left(\frac{W+h}{2}\right)tn$;

- W là bề rộng mẫu;

- h là chiều cao mẫu;

- t là tổng chiều dày của mẫu;

- n là tỉ lệ phần trăm phần đặc của mẫu.



a) Sơ đồ bố trí thiết bị thí nghiệm



Khung thép
bảo vệ

b) Bố trí thí nghiệm thực tế

Hình 18. Sơ đồ bố trí thí nghiệm nén chéo góc.

2.4. Kết luận chương 2.

Trong chương này học viên đã thực hiện các nội dung như sau:

- Kiểm tra cường độ của vật liệu bao gồm vữa xây, tô và gạch.
- Chế tạo mẫu thí nghiệm khối gạch không nung có kích thước lần lượt là 200x200x230 (24 mẫu) và 620x620x230 (12 mẫu), được bảo dưỡng 28 ngày cho đến ngày thí nghiệm. Lập sơ đồ thí nghiệm và tiến hành thí nghiệm cho hai trường hợp kiểm tra khả năng chống cắt của vữa và khả năng chịu nén chéo góc. Các kết quả thí nghiệm, xử lý số liệu và bàn luận được thực hiện trong **CHƯƠNG 3**.

CHƯƠNG 3. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

3.1. Cường độ vật liệu

Cường độ chịu nén của vữa xây và tô tương ứng thể hiện trong Bảng 4. Có thể thấy rằng, cường độ vữa có sự sai lệch so với cấp phối khá nhiều, hầu hết cao hơn so với giá trị của nhà cung cấp. Vữa xây M75 và M100 thực tế có cường độ cao hơn so với thiết kế tương ứng xấp xỉ 120% và 56%. Vữa xây M75 và M100 cho kết quả tương đương nhau. Trong khi đó vữa tô M75 cao hơn thiết kế khoảng 45%, vữa tô M100 cao hơn thiết kế khoảng 80%. Khác với vữa xây, vữa tô cho kết quả M100 cao hơn M75 khoảng 60%.

Bảng 4. Cường độ vữa xây và tô

STT	Ngày lấy mẫu	Diện tích mẫu (mm ²)	Tuổi mẫu (ngày)	Lực nén P (N)	R ^{tt} _n (MPa)	R ^{tt} ₂₈ (MPa)	R ^{tb} ₂₈ (MPa)
Mẫu 1	Vữa xây M75	1,600	28	21,400	13.38	13.38	15.67
Mẫu 2		1,600	28	24,750	15.47	15.47	
Mẫu 3		1,600	28	26,510	16.57	16.57	
Mẫu 4		1,600	28	25,450	15.91	15.91	
Mẫu 5		1,600	28	26,680	16.68	16.68	
Mẫu 6		1,600	28	25,630	16.02	16.02	
Mẫu 1	Vữa xây M100	1,600	28	25,400	15.88	15.88	16.65
Mẫu 2		1,600	28	28,200	17.63	17.63	
Mẫu 3		1,600	28	23,100	14.44	14.44	
Mẫu 4		1,600	28	27,200	17.00	17.00	
Mẫu 5		1,600	28	29,600	18.50	18.50	
Mẫu 6		1,600	28	26,300	16.44	16.44	
Mẫu 1	Vữa tô M75	1,600	28	16,440	10.28	10.28	10.92
Mẫu 2		1,600	28	19,680	12.30	12.30	
Mẫu 3		1,600	28	18,580	11.61	11.61	
Mẫu 4		1,600	28	16,400	10.25	10.25	
Mẫu 5		1,600	28	15,190	9.49	9.49	
Mẫu 6		1,600	28	18,520	11.58	11.58	
Mẫu 1	Vữa tô M100	1,600	28	28,980	18.11	18.11	17.59
Mẫu 2		1,600	28	28,380	17.74	17.74	
Mẫu 3		1,600	28	25,690	16.06	16.06	
Mẫu 4		1,600	28	30,600	19.13	19.13	
Mẫu 5		1,600	28	29,320	18.33	18.33	
Mẫu 6		1,600	28	25,840	16.15	16.15	

Bảng 5. Cường độ chịu nén của gạch không nung

Mẫu	Diện tích mẫu	Tuổi mẫu	K	Lực nén P	R^{tt}_n	R^{th}_{28}
	(mm ²)	(ngày)		(kN)	(MPa)	(MPa)
1	8,930	28	1.04	84.95	11.42	13.91
2	9,072	28	1.04	226.96	18.02	
3	8,978	28	1.04	142.56	19.05	
4	8,835	28	1.04	74.78	10.16	
5	9,024	28	1.04	92.58	12.31	
6	9,139	28	1.04	142.82	18.75	
7	9137	28	1.04	57.96	13.61	
8	9,097	28	1.04	76.86	10.14	
9	9,135	28	1.04	49.28	14.47	
10	9,093	28	1.04	84.58	11.16	

Dựa trên kết quả thu được từ thí nghiệm mẫu gạch trong Bảng 5 có thể thấy rằng cường độ chịu nén trung bình của mẫu cao hơn so với thiết kế 7,5 MPa. Như vậy, kết quả cường độ mẫu gạch thu được có thể chấp nhận.

Bảng 6. So sánh cường độ vữa và gạch

Vật liệu	R^{th}_{28}	Độ lệch so với gạch	Kết luận
	(MPa)	(%)	
Vữa xây M75	15.67	21	Cao hơn
Vữa xây M100	16.65	14	Cao hơn
Vữa tô M75	10.92	-20	Thấp hơn
Vữa tô M100	17.59	28	Cao hơn
Gạch	13.91		

Bảng 1 cho thấy cường độ của vữa hầu hết cao hơn so với gạch từ 14 đến 28%. Trong đó, vữa tô M75 cho kết quả thấp hơn. Dựa trên cường độ của gạch và vữa là cơ sở để phân tích ứng xử của thí nghiệm cắt và nén chéo góc.

3.2. Phân tích khả năng chống cắt của mẫu tường

Mẫu chịu cắt trực tiếp có hai kiểu xây nhằm đánh giá ảnh hưởng của kiểu xây đến khả năng chống cắt. Các mẫu được tiến hành lần lượt theo nhóm mẫu và ghi lại kết quả. Từ đó ứng suất cắt được tính toán dựa trên giá trị lực thu được từ cảm biến lực Loadcell. Các kết quả được tập hợp vào Bảng 7.

Bảng 7. Ứng suất cắt của thí nghiệm cắt trực tiếp

Mẫu*	A (mm ²)		F	Ứng suất cắt	τ_b	Tăng
	b(mm)	h(mm)	(kN)	(MPa)	(MPa)	(%)
SH-M75F-K1-1	230	200	46.2	0.35	0.34	53.2
SH-M75F-K1-2	230	200	47.2	0.35		
SH-M75F-K1-3	230	200	41.7	0.31		
SH-M75-K1-1	230	200	36.7	0.28	0.22	
SH-M75-K1-2	230	200	21.7	0.16		
SH-M75-K1-3	230	200	29.8	0.22		
SH-M75F-K2-1	230	200	38.6	0.29	0.36	25.5
SH-M75F-K2-2	230	200	53.9	0.40		
SH-M75F-K2-3	230	200	50.3	0.38		
SH-M75-K2-1	230	200	43.8	0.33	0.28	
SH-M75-K2-2	230	200	28.7	0.22		
SH-M75-K2-3	230	200	41.3	0.31		
SH-M100F-K1-1	230	200	53.9	0.40	0.40	9.7
SH-M100F-K1-2	230	200	66.8	0.50		
SH-M100F-K1-3	230	200	40	0.30		
SH-M100-K1-1	230	200	44.6	0.33	0.37	
SH-M100-K1-2	230	200	48.2	0.36		
SH-M100-K1-3	230	200	53.7	0.40		
SH-M100F-K2-1	230	200	60.5	0.45	0.40	16.3
SH-M100F-K2-2	230	200	48	0.36		
SH-M100F-K2-3	230	200	52.5	0.39		
SH-M100-K2-1	230	200	42.3	0.32	0.35	
SH-M100-K2-2	230	200	43.5	0.33		
SH-M100-K2-3	230	200	52.6	0.39		

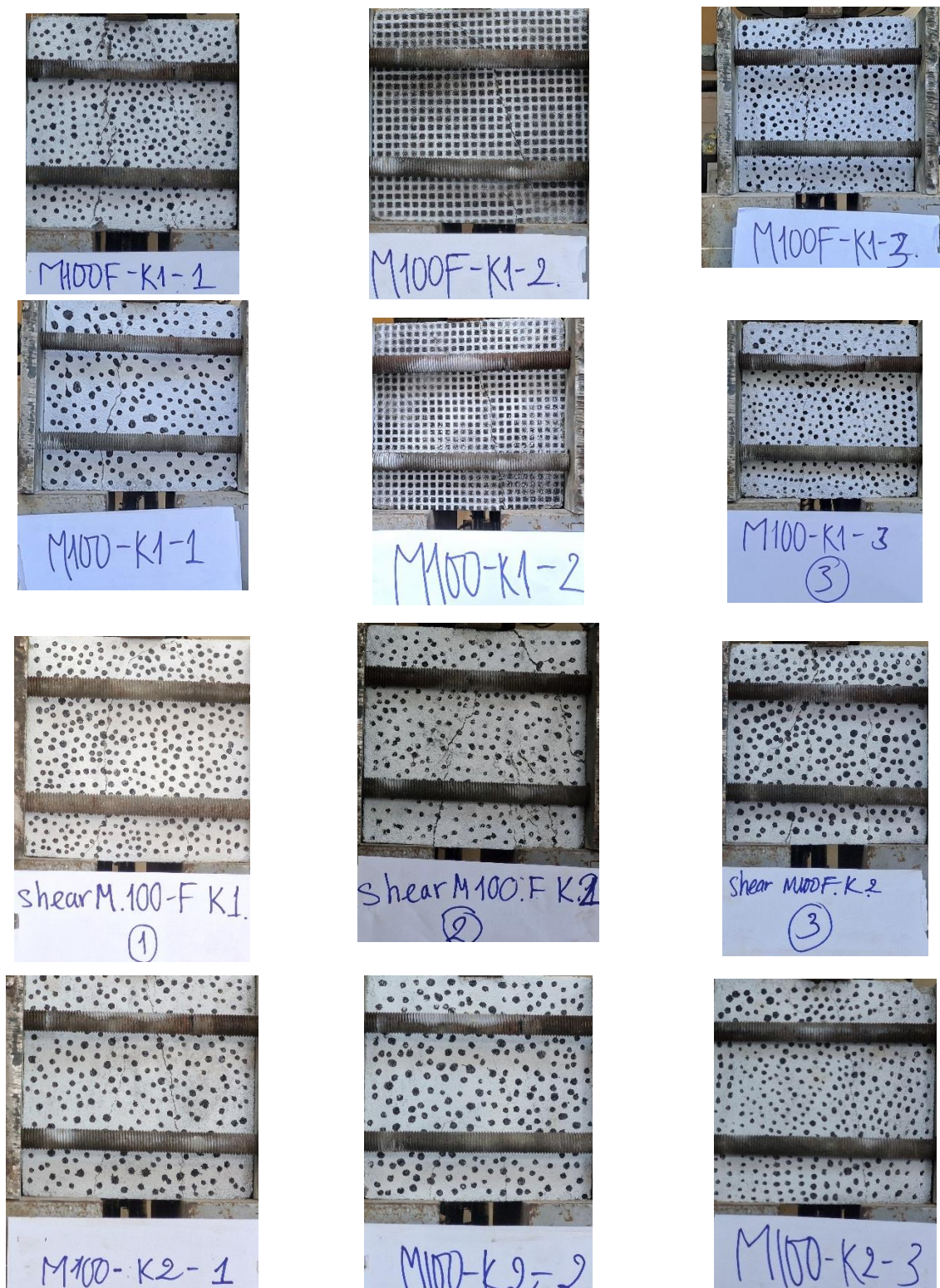
*SH-M75F-K1-1: SH-shear, M75-mác vữa, K1-kiểu xây 1, 1-mẫu số 1.

Bảng 7 cho thấy hiệu quả của việc gia cường tăng từ khoảng 10% đến 50% khi kết cấu chịu cắt trực tiếp điều này chứng tỏ lưới GFRP hiệu quả trong trường hợp tăng khả năng chịu cắt trong mặt phẳng của tường, tương tự như các nghiên cứu trước đây [30,43]. Bên cạnh đó, Hình 19 cho thấy hình ảnh phá hoại của mẫu có 3 trường hợp của vết nứt: vết nứt thẳng khi sự bám dính giữa vữa và gạch không tốt (nhóm vữa M75), vết nứt xiên cắt qua mạch vữa (nhóm vữa M75 và M100), và vết nứt xuyên qua vữa và gạch (SH-M100F-K1-2, SH-M100F-K2-1, SH-M100F-K2-2). Trường hợp 3: có thể có một số sai số do quá trình thí nghiệm khi các đai ốc chưa được thả lỏng đúng theo yêu cầu dẫn đến sự ép mặt và tăng độ cứng của mẫu làm cho lực cắt tăng đáng kể. Lực cắt lúc này tạo ra áp lực xiên

lên mẫu gây nén xiên, và mẫu không còn thuần bị cắt. Điều này cho thấy áp lực ngang có thể giúp khả năng chịu cắt của tường cao hơn.

Không có

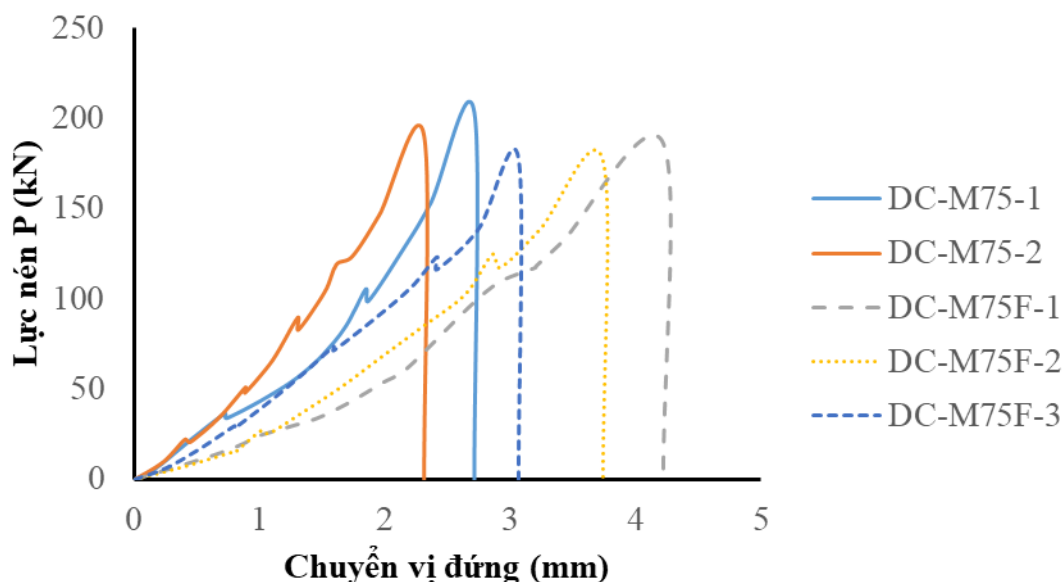




Hình 19. Các trường hợp phá hoại cắt của mẫu.

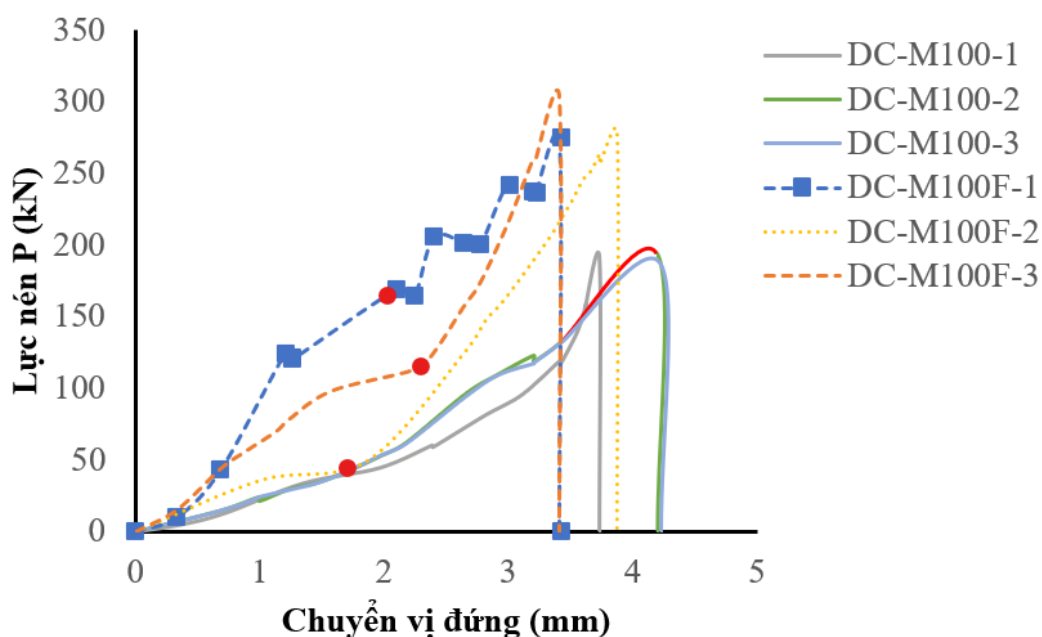
3.3. Phân tích kết quả nén chéo góc

Chương trình thí nghiệm thiết kế mẫu tương ứng cho hai loại mác là M75 và M100 trên mẫu có kích thước $620 \times 620 \times 230$ với hai trường hợp có gia cường và không gia cường lưới GFRP. Các kết quả thu được ở các Hình 20, Hình 21 Hình 23 và Hình 24; và Bảng 8.



Hình 20. Quan hệ lực-chuyển vị mẫu M75.

Hình 20 cho thấy kết quả khá đồng đều giữa các nhóm mẫu, tuy nhiên mẫu DC-M75-3 không thu được chuyển vị mà chỉ chu được giá trị lực nén như trong Bảng 8. Từ kết quả cho thấy, đối với mẫu sử dụng vữa xây, tô M75 kết quả cho thấy việc gia cường không hiệu quả, thậm chí kết quả thấp hơn khoảng 7% so với mẫu không được gia cường. Hiện tượng này cũng được xác nhận trong nghiên cứu của Valluzzi [21]. Tuy nhiên, mẫu được gia cường DC-M75F cho thấy biến dạng lớn hơn so với mẫu không gia cường chứng tỏ tường khi được gia cường có độ dẻo tốt hơn.



Hình 21. Quan hệ lực-chuyển vị mẫu M100.

Nhóm mẫu mác M100 cho thấy ứng xử khác so với nhóm mẫu M75. Hình 21 cho thấy các nhóm mẫu có ứng xử tương đương nhau. Nhóm mẫu được gia cường DC-M100F cho kết quả tốt hơn về khả năng chịu lực khi so sánh với nhóm không được gia cường DC-M100, tăng xấp xỉ 50% lực nén. Điều này chứng tỏ rằng, GFRP cho thấy hiệu quả gia cường tương ứng với vữa mác cao. Hình 21 cho thấy mẫu gia cường DC-M100F có độ cứng tốt hơn khi xét độ dốc của biểu đồ lực chuyển vị. Vị trí thay đổi đột ngột của biểu đồ có thể tại thời điểm lưới GFRP tham gia vào chịu lực giúp tăng độ cứng của khối xây. Hiệu quả gia cường trong nghiên cứu này cũng tương đồng với các nghiên cứu đã được thực hiện trước đây [11–18].

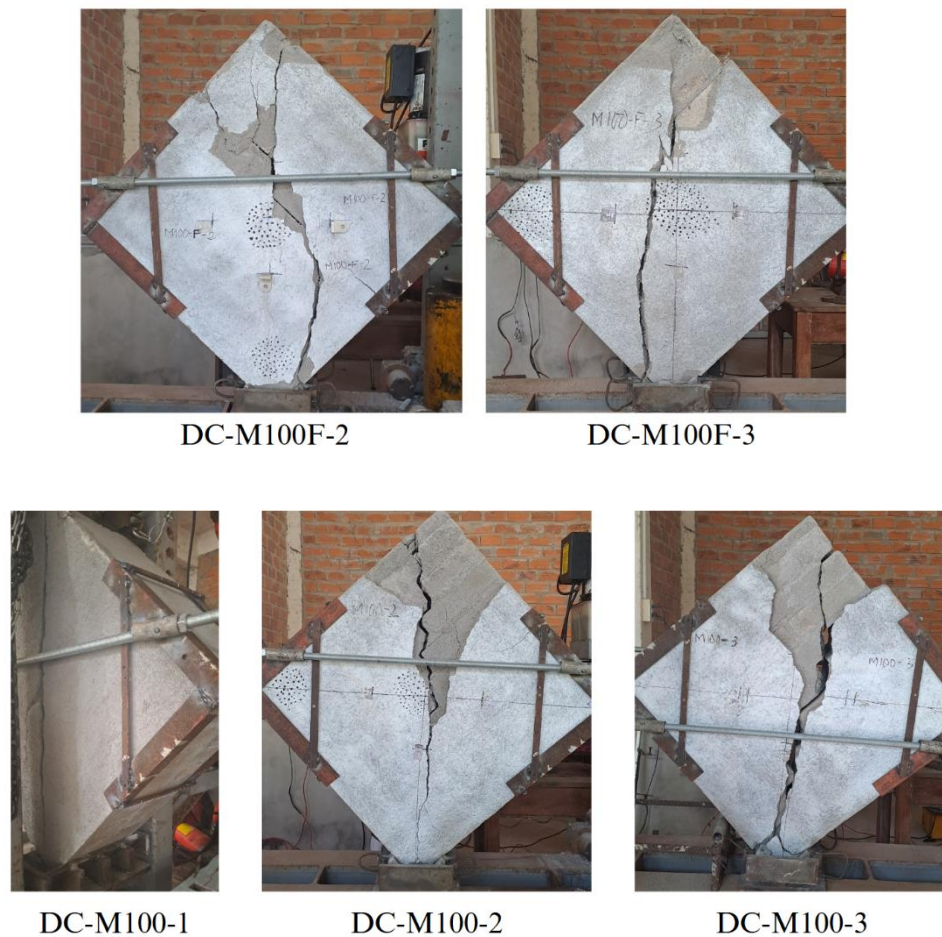
Bảng 8. So sánh hiệu quả gia cường giữa hai mác vữa

Mẫu	P	S _s	P _{tb}	Độ lệch	Hiệu quả gia cường
	(kN)	(MPa)	(kN)	(%)	
DC-M75-1	203.18	1.4	194.10	-7.26	Không hiệu quả
DC-M75-2	189.86	1.3			
DC-M75-3	189.27	1.3			
DC-M75-F-1	186.14	1.3	180.00		
DC-M75-F-2	176.21	1.2			
DC-M75-F-3	177.65	1.2			
DC-M100-1	190.93	1.3	190.05	50.16	Hiệu quả
DC-M100-2	193.07	1.4			
DC-M100-3	186.14	1.3			
DC-M100F-1	274.73	1.9	285.38		
DC-M100F-2	278.82	2			
DC-M100F-3	302.59	2.1			



Hình 22. Hình ảnh bề mặt vết nứt.

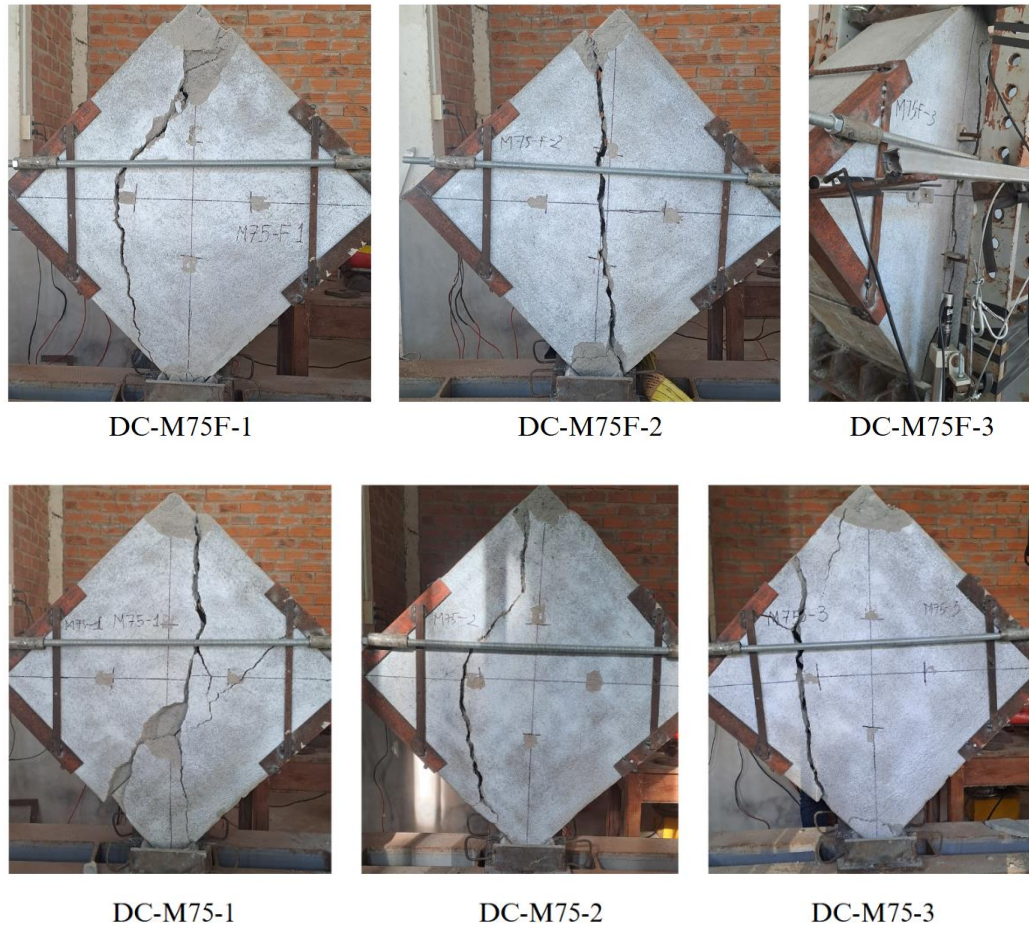
Hình 23 và Hình 24 cho thấy sự phá hoại của các mẫu sau khi chịu nén chéo góc với nhiều dạng phá hoại khác nhau. Nhóm mẫu M100 kết quả chủ yếu vết nứt theo đường chéo góc giữa hai gối tựa, còn nhóm M75 vết nứt theo nhiều đường khác nhau. Hình 22 (a) cho thấy bề mặt vết nứt cơ bản có thể cắt qua gạch và vữa hoặc phá hoại bề mặt liên kết giữa hai vật liệu. Kết quả thí nghiệm cho thấy, gần khu vực gối tựa vết nứt chủ yếu cắt qua gạch và vữa do lực nén chệch tập trung, còn khu vực giữa mẫu thì xảy ra hiện tượng phá hoại liên kết bám dính giữa gạch và vữa. Đối với mẫu được gia cường lưới GFRP, tại vị trí vết nứt cho thấy lưới cũng bị phá hoại chứng tỏ việc sử dụng lưới GFRP hiệu quả. Điều này giải quyết các vấn đề đã chỉ ra trong nghiên cứu [9] khi sử dụng FRP gia cường quá dư thừa.



Hình 23. Phá hoại các mẫu sử dụng vữa M100.

Khi so sánh các mẫu nhóm M100 trong Hình 24 có thể thấy nhóm mẫu DC-M100 không được gia cường có hiện tượng tách lớp vữa bảo vệ bề mặt trong khi nhóm được gia cường DC-M100F không có hiện tượng này. Điều này mâu thuẫn với nghiên cứu Almeida và cộng sự [7], có thể giải thích cho hiện tượng này do nghiên cứu [7] chiều dày lớp trát quá dày và lớp lưới gia cường lớn nên độ cứng lớp vữa trát khá lớn và cứng hơn lực dính bám giữa lớp trát và kết cấu gạch nên sự phá hoại tách lớp dễ xảy ra. Nghiên cứu hiện tại

chỉ sử dụng lớp GFRP mỏng và thừa nên khả năng làm việc của lớp GFRP vừa đủ cho liên kết, giúp lớp trát và kết cấu gạch làm việc đồng thời và hiệu quả về mặt sử dụng vật liệu.



Hình 24. Phá hoại các mẫu sử dụng vữa M75.

Ở nhóm mẫu M75 không xảy ra hiện tượng tách lớp và hình ảnh phá hoại trên Hình 24 cho thấy vết nứt không hoàn toàn theo đường chéo của mẫu. Khi kết hợp phân tích với cường độ của vật liệu Bảng 4 và Bảng 6, ta có thể thấy rằng vữa tô M75 có cường độ thấp hơn gạch khoảng 20%, và thấp hơn vữa xây M75 60%, điều này cho thấy dưới tác động của tải trọng lớp vữa tô sẽ phá hoại trước nên khó có thể kết hợp với lưới GFRP gia cường cho mẫu, điều này làm cho việc gia cường không hiệu quả. Vữa tô M100 ngược lại có cường độ cao hơn gạch và vữa xây nên khó phá hoại trước nên khi kết hợp với lưới GFRP cho hiệu quả gia cường rõ rệt, tăng khoảng 50%.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Nghiên cứu thực nghiệm ứng xử của tường xây được gia cường lưới sợi thủy tinh (GFRP) đã tiến hành trên 24 mẫu cắt trực tiếp kích thước $200 \times 200 \times 230\text{mm}$ và 12 mẫu nén chéo góc $620 \times 620 \times 230\text{mm}$. Các mẫu được chia thành hai nhóm dựa trên cường độ vữa M75 và M100. Các kết quả thu được dẫn đến một số kết luận như sau:

- Việc gia cường bề mặt tường hiệu quả trong một trạng thái chịu lực nào đó chứ không phải tất cả các trường hợp. Nhóm mẫu M75 cho thấy hiệu quả gia cường cắt trực tiếp nhưng không hiệu quả khi chịu nén chéo góc. Nhóm mẫu M100 cho thấy xu hướng ngược lại, hiệu quả hơn khi được gia cường dưới tải trọng nén chéo góc.

- Cường độ của lớp vữa gia cường có khả năng tác động đến hiệu quả gia cường. Lớp gia cường mặt chỉ hiệu quả khi cường độ của nó lớn hơn hoặc bằng so với cường độ của kết cấu gạch.

2. Kiến nghị

Để chứng minh cường độ lớp vữa bề mặt tác động đến hiệu quả gia cường cần tiến hành thí nghiệm trường hợp gia cường mẫu M75 với vữa tô M100 để khẳng định hiệu quả của việc gia cường mẫu.

- Cần tính toán ảnh hưởng của áp lực ngang lên thí nghiệm cắt trực tiếp mẫu và áp dụng thêm xử lý ảnh DIC để phân tích biến dạng và sự làm việc của mẫu cắt trực tiếp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ngô Văn Thuyết, Đánh giá hiệu quả của giải pháp gia cường kết cấu tường gạch bằng lớp vữa cốt lưới sợi dệt, *Tạp Chí VL Và XD* 14 (2024) Trang 125-131.
- [2] S.A. Babatunde, Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers, *Compos. Struct.* 161 (2017) 246–255. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.132>.
- [3] Nguyễn Hữu Thế, Nghiên cứu tính chất cơ lý của vật liệu sơn polyurea và sợi FRP để dùng làm vật liệu gia cường cho kết cấu công trình chịu tải trọng đặc biệt, *Tạp Chí Xây Dựng* (2021). <https://vjol.info.vn/index.php/tcxd/article/view/57362> (accessed July 19, 2025).
- [4] H. Mahmood, J.M. Ingham, Diagonal Compression Testing of FRP-Retrofitted Unreinforced Clay Brick Masonry Wall Joints, *J. Compos. Constr.* 15 (2011) 810–820. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000209](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000209).
- [5] S. Babaeidarabad, F. De Caso, A. Nanni, URM Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite Subjected to Diagonal Compression, *J. Compos. Constr.* 18 (2014) 04013045. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000441](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000441).
- [6] G. de Felice, M.A. Aiello, A. Bellini, F. Ceroni, S. De Santis, E. Garbin, M. Leone, G.P. Lignola, M. Malena, C. Mazzotti, Structures, Experimental characterization of composite-to-brick masonry shear bond, *Mater. Struct.* 49 (2016) 2581–2596.
- [7] J.A.P.P. Almeida, E.B. Pereira, J.A.O. Barros, Assessment of overlay masonry strengthening system under in-plane monotonic and cyclic loading using the diagonal tensile test, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 851–865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.040>.
- [8] L. Estevan, B. Torres, F.J. Baeza, F.B. Varona, S. Ivorra, Masonry walls strengthened with Textile Reinforced Mortars (TRM) and subjected to in-plane cyclic loads after real fire exposure, *Eng. Struct.* 296 (2023) 116922. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116922>.
- [9] M.A. ElGawady, P. Lestuzzi, M. Badoux, Shear strength of URM walls retrofitted using FRP, *Eng. Struct.* 28 (2006) 1658–1670. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.03.005>.
- [10] R. Capozucca, E. Magagnini, Brickwork wall models strengthened with diagonal and horizontal GFRP strips, *Compos. Struct.* 271 (2021) 114062. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114062>.
- [11] M. Basili, F. Vestroni, G. Marcari, Brick masonry panels strengthened with textile reinforced mortar: experimentation and numerical analysis, *Constr. Build. Mater.* 227 (2019) 117061. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117061>.
- [12] L. Garcia-Ramonda, L. Pelá, P. Roca, G. Camata, In-plane shear behaviour by diagonal compression testing of brick masonry walls strengthened with basalt and steel textile reinforced mortars, *Constr. Build. Mater.* 240 (2020) 117905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117905>.

- [13] A. Rahman, T. Ueda, In-Plane Shear Performance of Masonry Walls after Strengthening by Two Different FRPs, *J. Compos. Constr.* 20 (2016). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000661](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000661).
- [14] B. Behera, R.P. Nanda, In-plane shear strengthening of brick masonry panel with geogrid reinforcement embedded in bed and bed-head joints mortar, *Eng. Struct.* 227 (2021) 111411. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111411>.
- [15] H.A. Khan, R.P. Nanda, D. Das, In-plane strength of masonry panel strengthened with geosynthetic, *Constr. Build. Mater.* 156 (2017) 351–361. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.169>.
- [16] Y.-W. Lin, L. Wotherspoon, A. Scott, J.M. Ingham, In-plane strengthening of clay brick unreinforced masonry wallettes using ECC shotcrete, *Eng. Struct.* 66 (2014) 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.043>.
- [17] G.C. Manos, L. Melidis, K. Katakalos, L. Kotoulas, A. Anastasiadis, C. Chatziastrou, Masonry panels with external thermal insulation subjected to in-plane diagonal compression, *Case Stud. Constr. Mater.* 14 (2021) e00538. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00538>.
- [18] A. Borri, G. Castori, M. Corradi, R. Sisti, Masonry wall panels with GFRP and steel-cord strengthening subjected to cyclic shear: An experimental study, *Constr. Build. Mater.* 56 (2014) 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.056>.
- [19] X. Wang, C.C. Lam, V.P. Iu, Comparison of different types of TRM composites for strengthening masonry panels, *Constr. Build. Mater.* 219 (2019) 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.179>.
- [20] J. Kubica, I. Galman, Comparison of Two Ways of AAC Block Masonry Strengthening Using CFRP Strips - Diagonal Compression Test, *Procedia Eng.* 193 (2017) 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.184>.
- [21] M.R. Valluzzi, D. Tinazzi, C. Modena, Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates, *Constr. Build. Mater.* 16 (2002) 409–416. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00043-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00043-0).
- [22] C. Faella, E. Martinelli, E. Nigro, S. Paciello, Shear capacity of masonry walls externally strengthened by a cement-based composite material: An experimental campaign, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.019>.
- [23] N. Gattesco, I. Boem, A. Dudine, Diagonal compression tests on masonry walls strengthened with a GFRP mesh reinforced mortar coating, *Bull. Earthq. Eng.* 13 (2015) 1703–1726. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9684-z>.
- [24] Z. Dong, M. Deng, J. Dai, P. Ma, Diagonal compressive behavior of unreinforced masonry walls strengthened with textile reinforced mortar added with short PVA fibers, *Eng. Struct.* 246 (2021) 113034. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113034>.
- [25] M. Shabdin, M. Zargar, N.K.A. Attari, Experimental diagonal tension (shear) test of Un-Reinforced Masonry (URM) walls strengthened with textile reinforced mortar (TRM), *Constr. Build. Mater.* 164 (2018) 704–715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.234>.

- [26] A. Kalali, M.Z. Kabir, Experimental response of double-wythe masonry panels strengthened with glass fiber reinforced polymers subjected to diagonal compression tests, *Eng. Struct.* 39 (2012) 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.01.018>.
- [27] V. Alecci, M. Fagone, S. Galassi, T. Rotunno, G. Stipo, M. De Stefano, Experimental shear behaviour of masonry walls reinforced with FRCM, *Eng. Struct.* 315 (2024) 118425. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118425>.
- [28] P. Yang, W. Tian, L. Qing, In-plane shear behavior of brick masonry walls strengthened with basalt textile-reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.* 401 (2023) 132732. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132732>.
- [29] Y. Yardim, O. Lalaj, Shear strengthening of unreinforced masonry wall with different fiber reinforced mortar jacketing, *Constr. Build. Mater.* 102 (2016) 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.095>.
- [30] A. Dehghani, G. Fischer, F. Nateghi Alahi, Strengthening masonry infill panels using engineered cementitious composites, *Mater. Struct.* 48 (2015) 185–204. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0176-4>.
- [31] J. Donnini, G. Maracchini, S. Lenci, V. Corinaldesi, E. Quagliarini, TRM reinforced tuff and fired clay brick masonry: Experimental and analytical investigation on their in-plane and out-of-plane behavior, *Constr. Build. Mater.* 272 (2021) 121643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121643>.
- [32] T. D’Antino, F.G. Carozzi, C. Poggi, Diagonal shear behavior of historic walls strengthened with composite reinforced mortar (CRM), *Mater. Struct.* 52 (2019) 114. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1414-1>.
- [33] P.E. Mezrea, M. Ispir, I.A. Balci, I.E. Bal, A. Ilki, Diagonal tensile tests on historical brick masonry wallets strengthened with fabric reinforced cementitious mortar, *Structures* 33 (2021) 935–946. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.076>.
- [34] M.R. Valluzzi, Behavior of Brick Masonry Vaults Strengthened by FRP Laminates, *J. Compos. Constr.* 5 (2001) 163–170.
- [35] TCVN 4314:2022, *Vữa xây dựng - Yêu cầu kỹ thuật*, (2022).
- [36] Vữa Vĩ Đạt, (n.d.). <https://vuavidat.vn/> (accessed July 20, 2025).
- [37] TCVN 3121-11:2022, *Vữa xây dựng – Phương pháp thử – Phần 11: Xác định cường độ uốn và nén của vữa đóng rắn*, (n.d.).
- [38] TCVN 6477:2016, *Gạch bê tông*, (2016).
- [39] CÔNG TY TNHH THƯƠNG MẠI VÀ DỊCH VỤ XÂY DỰNG BURO, (n.d.). <https://buro.com.vn/vn/> (accessed July 19, 2025).
- [40] RILEM, RILEM TC 127-MS-tests for masonry materials and structures, (n.d.).
- [41] ASTM E519-07, Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages, (n.d.). <https://store.astm.org/e0519-07.html> (accessed July 20, 2025).
- [42] TCVN 4085:2011, *Kết cấu gạch đá - Tiêu chuẩn thi công và nghiệm thu*, (n.d.).
- [43] N.H. Cuong, J. Shin, J.H. Kim, N.-V. Luat, K. Lee, Compressive and shear behavior of brick masonry assemblages strengthened with polyurea coating: Experiment and DEM investigations, *Constr. Build. Mater.* 348 (2022) 128534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128534>.

