

ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC PHƯƠNG PHÁP XỬ LÝ BỀ MẶT SỢI TỔNG HỢP TÁI CHẾ ĐẾN SỨC KHÁNG KÉO CỦA BÊ TÔNG GIA CƯỜNG LƯỚI SỢI

Trương Văn Đoàn^{a,*}, Ngô Trí Thường^b, Phạm Ngọc Thịnh^a, Lê Văn Bách^c, Nguyễn Văn Thông^d

^aPhân hiệu Trường Đại học Thủy lợi tại tỉnh Bình Dương,

số 02, đường Trường Sa, phường Gia Định, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bKhoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi, số 175 đường Tây Sơn, phường Kim Liên, Hà Nội, Việt Nam

^cKhoa Công trình, Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải, 450–451 đường Lê Văn Việt, phường Tăng Nhơn Phú, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^dViện Nghiên cứu và Đào tạo Đèo Cả, Trường Đại học Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh, số 2 đường Võ Oanh, phường Thạnh Mỹ Tây, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 29/09/2025, Sửa xong 03/12/2025, Chấp nhận đăng 08/12/2025

Tóm tắt

Nghiên cứu này trình bày kết quả thực nghiệm về sức kháng kéo của bê tông gia cường lưới sợi polyethylene tái chế (PETRCCs) và ảnh hưởng của các phương pháp xử lý bề mặt sợi đến sức kháng kéo của bê tông. Lưới đánh cá polyethylene (PE) tái chế, sau khi được xử lý bề mặt sử dụng keo epoxy và silicafume, được cắt thành các lớp gia cường trong mẫu kéo. Kết quả thí nghiệm kéo trực tiếp mẫu hình xương chó (dog-bone) cho thấy quan hệ ứng suất - biến dạng của PETRCCs là ứng xử giảm cứng cơ học với hai giai đoạn bao gồm giai đoạn đàn hồi và giai đoạn giảm cứng cơ học. Phương pháp xử lý bề mặt sợi bằng keo epoxy làm tăng 8% cường độ kháng kéo, và làm tăng 28% khả năng hấp thụ năng lượng của PETRCCs. Phương pháp xử lý bề mặt bằng silicafume cũng làm tăng 46% khả năng hấp thụ năng lượng, nhưng làm giảm 6% cường độ kháng kéo của bê tông gia cường lưới sợi.

Từ khoá: bê tông cốt lưới sợi polyethylene tái chế; ứng suất kéo; biến dạng; keo epoxy; silicafume.

EFFECTS OF FIBER'S SURFACE TREATMENT METHODS ON THE TENSILE BEHAVIOR OF RECYCLED SYNTHETIC TEXTILE REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES

Abstract

This study experimentally presented the tensile response of recycled polyethylene textile reinforced cementitious composites (PETRCCs) and the effects of fiber's surface treatment methods on the tensile resistance. Recycled polyethylene waste fishing nets was treated by epoxy resin and silicafume, and then cut into the layers for reinforcing the tensile specimens. Experimental results of direct tensile tests illustrated that the stress versus strain curves of PETRCCs exhibited softening behavior with two distinct stages including initial elastic and softening stages. Surface treatment method by epoxy resin improved approximately 8% tensile stress, and increased about 28% toughness of PETRCCs. Surface treatment method by silicafume also enhanced approximately 46% toughness of PETRCCs, but reduced 6% tensile stress of PETRCCs.

Keywords: recycled polyethylene textile reinforced cementitious composites; tensile stress; strain; epoxy resin; silicafume.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20\(1V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(1V)-02) © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Trong xu thế hiện nay, việc loại bỏ rác thải nhựa khỏi biển và đại dương đang trở thành một vấn đề cấp thiết, đóng vai trò quan trọng trong nỗ lực bảo vệ môi trường và ứng phó với biến đổi khí hậu. Hàng năm có khoảng 10% rác thải đổ ra biển, đe dọa môi trường sinh thái biển và đại dương [1–4]. Trong số đó, rác thải nhựa từ hoạt động đánh bắt thủy sản, đặc biệt là các loại lưới sợi tổng hợp, được xem như là một trong những nguồn gây ô nhiễm lớn nhất và khó xử lý nhất, trở thành một trong những yếu tố gây hại cho môi trường. Các tấm lưới khi bị bỏ lại hoặc trôi nổi trong đại dương tồn tại hàng chục, thậm chí hàng trăm năm trở thành những cái bẫy có thể trói buộc, làm tổn thương hoặc đe dọa sự sống của các loại sinh vật biển như cá, rùa biển [5, 6]. Các tấm lưới che phủ tầng mặt, ngăn chặn

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: doantv@tlu.edu.vn (Đoàn, T. V.)

các loại rong, tảo biển tiếp xúc ánh sáng mặt trời, và hạn chế sự phát triển của các loại thực vật trong môi trường biển, ảnh hưởng đến mắt xích quan trọng trong chuỗi thức ăn của sinh vật biển [5, 6]. Sự suy giảm nguồn thực vật biển kéo theo tác động dây chuyền đến các loài sinh vật biển bậc cao, ảnh hưởng đến môi trường sinh thái. Bên cạnh đó, các loài cá và hải sản có thể bị nhiễm độc nhựa khi ăn phải các hạt vi nhựa từ quá trình phân rã lưới thả hoặc các loại chất thải nhựa khác, gián tiếp ảnh hưởng đến sức khỏe của con người [5, 6]. Do vậy, loại bỏ các loại lưới sợi thả ra khỏi môi trường biển là một vấn đề cấp thiết hiện nay [1–4].

Tái chế các loại lưới sợi tổng hợp và chất thải nhựa là một trong các phương pháp giảm thiểu tác hại đến môi trường của chúng, góp phần thúc đẩy nền kinh tế tuần hoàn [1–4]. Về mặt cấu tạo và vật liệu gốc, các loại lưới đa phần được kết nối từ các loại sợi như polyethylene (PE), nylon, polypropylene (PP), hoặc polyvinyl alcohol (PVA), bằng cách tết các sợi lại với nhau thành mạng lưới hoặc xoắn các sợi lại và thắt thành các nút cứng để tạo thành lưới. Nhờ đặc tính cơ học tốt, khả năng chống ăn mòn và độ bền hóa học cao, các loại lưới thả giữ được giá trị sử dụng, trở thành nguồn nguyên liệu tiềm năng cho ngành công nghiệp tái chế [1–3, 7]. Hiện nay, các loại lưới được tái chế làm nguyên liệu trong các ngành công nghiệp sản xuất hàng tiêu dùng, quần áo, giày dép, dụng cụ thể thao, giải trí, thậm chí làm vật liệu cho ngành công nghiệp in 3D [1–3, 7]. Không những vậy, chúng còn được sử dụng làm vật liệu gia cường trong bê tông [1–3, 7]. Các nghiên cứu trước đây [8, 9] cho thấy độ bền cơ học và hóa học của bê tông được gia cường sợi polyethylene terephthalate. Tuy nhiên trong các nghiên cứu này chỉ có độ bền nứt của bê tông được khảo sát, và sợi sử dụng là sợi phân tán đòi hỏi quá trình xử lý, cắt nhỏ sợi, chuẩn bị sợi phức tạp tốn nhiều thời gian và công sức [1, 3]. Truong và cs. [3] đã nghiên cứu sử dụng lưới đánh cá thải như là vật liệu gia cường liên tục trong bê tông hạt mịn (BTHM) dưới tác dụng kéo và uốn. Kết quả cho thấy các loại lưới sợi thả có thể làm chất gia cường dạng lưới liên tục trong bê tông thay thế cho sợi phân tán [3]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này chỉ một số loại lưới được khảo sát và hiệu quả gia cường không cao vì độ cứng của lưới sợi tương đối thấp [3].

Để nâng cao tính chất cơ học của vật liệu bê tông composites, các nghiên cứu trước đây thường tập trung cải thiện tính chất cơ học của vật liệu gia cường, thay đổi thành phần BTHM, cũng như tăng cường khả năng dính bám giữa BTHM và vật liệu gia cường [10, 11]. Các loại vật liệu hạt phụ gia khoáng có kích thước nhỏ như silicafume, silica powder, hoặc tro bay làm tăng độ đặc chắc của bê tông và khu vực chuyển tiếp giữa vật liệu gia cường và bê tông. Bên cạnh đó, vật liệu bê tông composites sử dụng chất gia cường có tính chất cơ học càng cao, bê tông có sức kháng càng tốt. Xử lý bề mặt sợi đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện tính chất cơ học của vật liệu gia cường, góp phần nâng cao sức kháng của bê tông [12, 13]. Phương pháp xử lý thông thường đó là sử dụng các loại vật liệu gốc hữu cơ như keo epoxy, carboxylated styrene butadiene rubber (XSBR) [12, 13] hoặc các vật liệu gốc vô cơ như microsilica, nanosilica, $15\text{CaO}.15\text{BaO}.20\text{SiO}_2.50\text{TiO}_2$, và $\text{SiO}_2.\text{ZrO}_2$ [14–17]. Các chất polymer có khả năng xuyên sâu vào khe hở giữa các sợi nhỏ bên trong bó sợi tổng hợp, dính kết các sợi nhỏ của bó sợi để tạo thành sợi đồng nhất, liên kết chặt chẽ mối nối giữa các bó sợi dọc, bó sợi ngang, góp phần nâng cao lực dính tổng thể của lưới sợi và BTHM, do đó tăng sức kháng cơ học của bê tông gia cường lưới sợi [12, 13, 18, 19]. Tuy nhiên vật liệu gốc hữu cơ chỉ phát huy hiệu quả khi có điểm neo thích hợp bởi vì đặc điểm các hợp chất này là kỵ nước, có thể làm suy giảm khả năng dính kết giữa sợi đơn và BTHM. Khả năng chịu nhiệt kém cũng là một hạn chế đối với các cấu trúc sử dụng sợi, lưới sợi được xử lý bề mặt bằng vật liệu gốc hữu cơ [12, 13]. Xử lý bề mặt sợi bằng các hợp chất vô cơ ảnh hưởng đến tính chất của bê tông gia cường sợi theo hai xu hướng khác nhau. Sức kháng cơ học của bê tông gia cường sợi tăng lên khi sợi được xử lý bề mặt bằng các hợp chất vô cơ như microsilica, $15\text{CaO}.15\text{BaO}.20\text{SiO}_2.50\text{TiO}_2$, và $\text{SiO}_2.\text{ZrO}_2$, trong các nghiên cứu trước đây

[13–16]. Các hạt vô cơ bám trên bề mặt sợi trong BTHM, thông qua phản ứng hóa học hoạt tính với khoáng vật đá xi măng, tạo ra các tinh thể rắn chắc, làm đặc chắc khu vực chuyển tiếp giữa sợi và BTHM, góp phần tăng cường sức kháng cơ học của bê tông gia cường sợi [13–16]. Ngược lại một số hợp chất vô cơ như nano-silica làm giảm sức kháng kéo nhỏ của sợi carbon từ 0,33 xuống 0,24 kN [17], và amorphous silica với đường kính hạt 50 nm làm giảm ứng suất kéo của bê tông gia cường sợi từ 11,6 xuống 5,8 MPa [20], bởi vì sự vón cục của các hạt nano ngăn cản tiếp xúc của sợi và hồ xi măng trong quá trình đúc mẫu.

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của các phương pháp xử lý bề mặt sợi tổng hợp PE đến khả năng kháng kéo của bê tông gia cường lưới sợi. Lưới sợi PE được tái chế từ lưới đánh cá thải, sau đó được xử lý bề mặt bằng keo epoxy và silicafume, và được cắt thành lớp để gia cường BTHM trong các mẫu kéo trực tiếp. Từ kết quả thí nghiệm, quan hệ ứng suất kéo - biến dạng của PETRCCs được xác định và ảnh hưởng của các phương pháp xử lý bề mặt sợi đến sức kháng kéo của PETRCCs được đánh giá chi tiết.

2. Chương trình thí nghiệm

2.1. Tổng quan

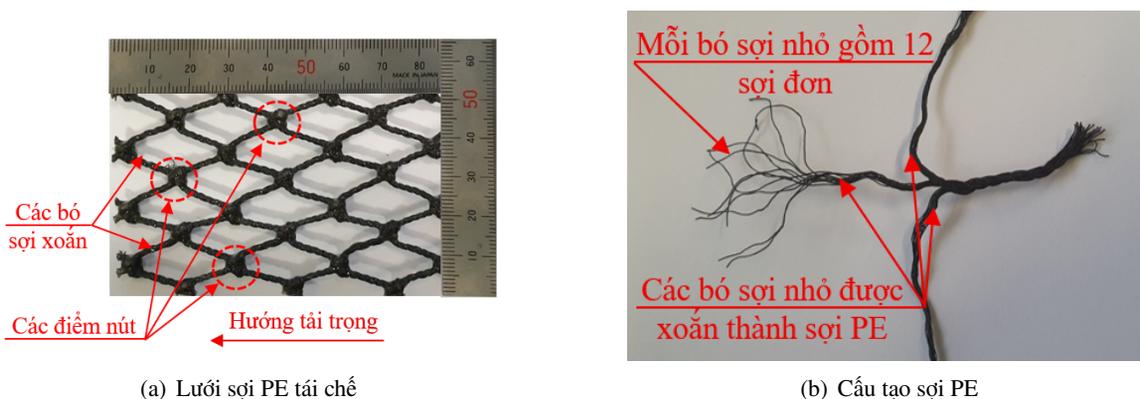
Chương trình thí nghiệm được thực hiện để nghiên cứu sức kháng kéo của bê tông gia cường lưới sợi polyethylene (PETRCCs). Các lớp lưới sợi PE tái chế và BTHM được sử dụng để chế tạo mẫu kéo PETRCCs. Ảnh hưởng của các phương pháp xử lý bề mặt lưới sợi bao gồm phương pháp sử dụng keo epoxy (E) và phương pháp sử dụng silicafume (S) được nghiên cứu đánh giá để lựa chọn phương pháp xử lý tối ưu. Nghiên cứu trước đây của Truong và cs. [19] cho thấy, khi lai kết hợp giữa keo epoxy và microsilica để xử lý bề mặt sợi, microsilica làm giảm độ nhớt, tăng tính giòn của keo epoxy sau khi khô cứng, giảm khả năng kết dính của keo epoxy, do đó giảm liên kết tổng thể lưới sợi và BTHM so với lưới sợi chỉ xử lý bề mặt bằng keo epoxy. Dẫn đến cường độ bê tông gia cường sợi được xử lý kết hợp keo epoxy và microsilica thấp hơn so với bê tông gia cường sợi được xử lý chỉ sử dụng keo epoxy, mặc dù phương pháp lai kết hợp này trải qua nhiều công đoạn, tốn rất nhiều thời gian và vật liệu sử dụng [19]. Do đó nghiên cứu này không sử dụng phương pháp lai kết hợp epoxy và silicafume. Tổng cộng có 3 tổ hợp mẫu được chuẩn bị bao gồm PE, PE_E, và PE_S tương ứng với PETRCCs sử dụng lưới chưa xử lý bề mặt, lưới được xử lý bề mặt bằng keo epoxy, và lưới được xử lý bề mặt bằng silicafume. Sau khi chế tạo mẫu, thí nghiệm kéo trực tiếp được thực hiện để xác định khả năng kháng kéo của PETRCCs.

2.2. Vật liệu

Lưới sợi PE được tái chế từ lưới đánh cá thải vớt từ biển. Sau khi được vớt từ biển, các loại lưới đánh cá được phân loại dựa vào cấu trúc, chất lượng của lưới. Các mảng lưới đánh cá có chất lượng tốt, ít bị ăn mòn, được lựa chọn để tái chế và đúc mẫu thí nghiệm [1–4]. Đầu tiên, máy bơm chuyên dụng được dùng để xịt nước sạch vào các tấm lưới để rửa trôi nước biển, loại bỏ các tạp chất, rong rêu bám trên lưới [1–4]. Sau đó, các tấm lưới được sấy khô trước khi được xử lý bề mặt và cắt thành từng lớp làm chất gia cường trong BTHM. Hình 1 thể hiện lưới sợi PE tái chế và cấu tạo sợi đơn. Nhìn vào Hình 1 có thể thấy, các bó sợi được chế tạo bằng cách xoắn 3 bó sợi lại với nhau, trong đó mỗi bó sợi nhỏ gồm 12 sợi đơn [1, 2]. Sau đó, các bó sợi được kết nối thắt nút để tạo thành lưới sợi [1, 2]. Bảng 1 liệt kê một số tính chất cơ học của sợi và lưới sợi PE tái chế.

Dung dịch keo epoxy và silicafume được chuẩn bị trước khi xử lý bề mặt lưới sợi. Keo epoxy và phụ gia hóa cứng được trộn đều theo kiến nghị của nhà sản xuất với tỷ lệ theo khối lượng keo epoxy/phụ gia hóa cứng là 10/3 để tạo ra dung dịch keo epoxy. Nước và silicafume được trộn đều với tỷ lệ theo khối lượng silicafume/nước là 1/2, để tạo ra dung dịch silicafume có khả năng xuyên sâu

vào khe hở giữa các sợi đơn của bó sợi. Sau khi chuẩn bị các dung dịch xử lý bề mặt, các tấm lưới được nhúng vào dung dịch, trộn đều trong 5 phút, sau đó kéo căng cố định lên khung thép, và để khô hoàn toàn trong phòng thí nghiệm ở nhiệt độ 20 ± 2 °C. Sau khi chất xử lý bề mặt khô hoàn toàn, các tấm lưới được gỡ ra khỏi khung thép, sau đó cắt thành từng lớp có hình dạng theo khuôn đúc mẫu kéo.



Hình 1. Cấu tạo lưới sợi và sợi PE tái chế

Bảng 1. Tính chất cơ học của lưới sợi và sợi PE tái chế

Lực kéo đứt lưới sợi (N)	Cường độ kéo của sợi (MPa)	Tỷ trọng (kg/m^3)	Số sợi đơn trong 1 bó sợi (sợi)
890	172	870	36

Thành phần cấp phối của BTHM bao gồm cát hạt mịn, xi măng, nước, và phụ gia hóa dẻo với tỷ lệ phối trộn được liệt kê trong Bảng 2. Thành phần cấp phối này được thiết kế dựa trên nghiên cứu trước đây về bê tông gia cường sợi tổng hợp [1–4]. Cát hạt mịn có đường kính trung bình của hạt là 0,5 mm (dao động trong khoảng 0,3–0,7 mm). Xi măng loại 1 có độ mịn là $3630 \text{ cm}^2/\text{g}$. Phụ gia hóa dẻo Polycarboxylate, với thành phần gồm 25% thể rắn và 75% thể nước, góp phần cải thiện tính công tác của BTHM. Cường độ chịu nén của BTHM là 71 MPa, được xác định bằng thí nghiệm nén mẫu lập phương kích thước $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$, theo tiêu chuẩn ASTM C109/C109M-2 [21].

Bảng 2. Tỷ lệ khối lượng các thành phần cấp phối của BTHM

Xi măng	Cát	Nước	Phụ gia hóa dẻo
1	1,5	0,45	0,0009

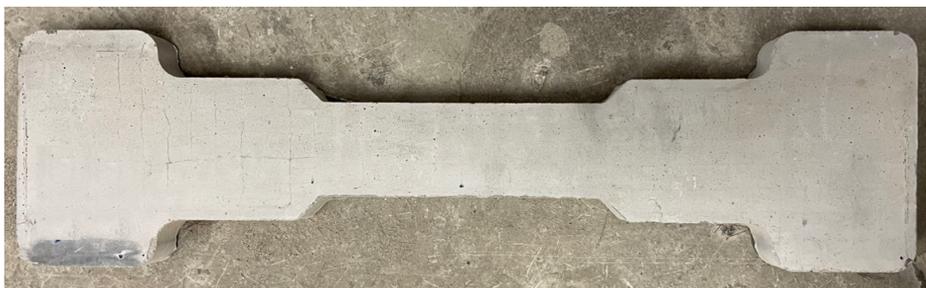
2.3. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Hình 2 miêu tả khuôn đúc và hình dạng kích thước của mẫu thí nghiệm hình xương chó (dog-bone shape). BTHM được trộn bằng thùng trộn có dung tích 20 lít. Đầu tiên, xi măng, cát được trộn khô trong thùng trộn trong vòng 10 phút [1–3]. Sau đó, hỗn hợp nước và phụ gia hóa dẻo được chia làm 3 phần, đổ vào thùng trộn và trộn đều [1–3]. Hỗn hợp vữa tươi được tiếp tục trộn trong vòng 5–10 phút, sau đó lấy vữa ra kiểm tra tính công tác theo tiêu chuẩn ASTM C 1437-20 [22]. Sau khi hỗn hợp đảm bảo tính công tác, quá trình đúc mẫu được thực hiện đổ từng lớp. Trước khi đổ bê tông vào khuôn, các tấm lưới thép được đặt vào khuôn để gia cường hai đầu mẫu nhằm hạn chế các vết nứt xảy ra tại các vị trí này, như thể hiện ở Hình 2(a). Trong nghiên cứu trước đây [3], BTHM gia cường 2 lớp lưới

sợi không thể hiện được đặc tính tăng cứng cơ học như kỳ vọng. Do đó, trong nghiên cứu này, 3 lớp lưới được bố trí gia cường BTHM nhằm cải thiện tính chất cơ học của PETRCCs. Đầu tiên, lớp bê tông thứ nhất được đổ vào khuôn và làm phẳng. Sau đó lưới sợi PE được đặt trên lớp bê tông thứ nhất và ấn nhẹ xuống để làm tăng khả năng dính bám của lưới sợi với BTHM. Các lớp bê tông và lưới sợi tiếp theo lần lượt được đưa vào khuôn tương tự. Sau khi lớp bê tông cuối cùng được đưa vào, bề mặt bê tông được làm phẳng. Trong quá trình đúc mẫu, khuôn chứa hỗn hợp BTHM và lưới được đặt trên bàn rung nhẹ để BTHM có thể xâm nhập vào các khe hở giữa các bó sợi, và làm giảm lỗ rỗng trong bê tông [1–3]. Mặc dù quá trình đúc này có thể đảm bảo khả năng xuyên sâu của vữa xi măng vào khe hở giữa các sợi đơn của bó sợi, tuy nhiên lưới sợi không được kéo căng và neo chặt vào khuôn trước khi đúc, khả năng gia cường của lưới sợi có thể không được phát huy tối đa. Ảnh hưởng của quá trình căng lưới sợi trước khi đổ BTHM vào khuôn nên được xem xét trong các nghiên cứu trong tương lai. Sau khi đúc, mẫu được đặt trong phòng thí nghiệm ở nhiệt độ 20 ± 2 °C trong 24 giờ trước khi tháo mẫu và bảo dưỡng trong nước ở nhiệt độ 20 °C trong 28 ngày [1–3]. Sau thời gian bảo dưỡng, mẫu được vớt ra khỏi thùng bảo dưỡng, để khô hoàn toàn trước khi thí nghiệm. Mẫu trước khi thí nghiệm được thể hiện ở Hình 2(b).



(a) Khuôn đúc mẫu và thép gia cường hai đầu mẫu



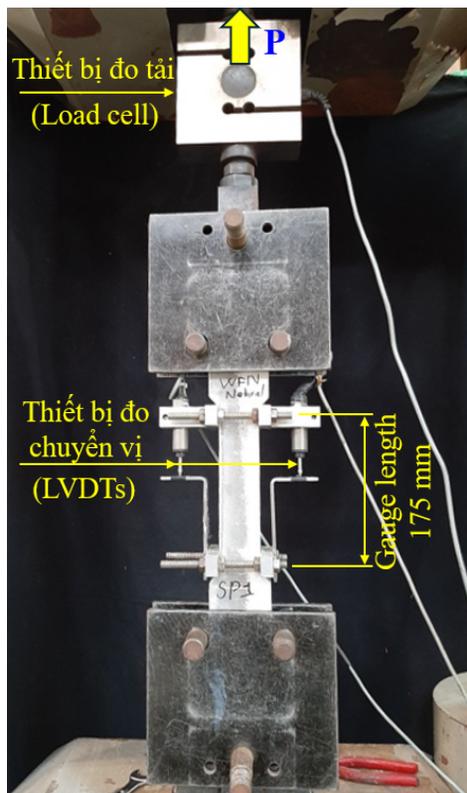
(b) Mẫu hình xương chó trước khi thí nghiệm

Hình 2. Khuôn đúc mẫu và mẫu kéo trước khi thí nghiệm

2.4. Phương pháp thí nghiệm

Hình 3 miêu tả thí nghiệm kéo trực tiếp sử dụng máy kéo thủy lực có công suất tối đa 300 kN [3, 23, 24]. Trước khi thiết lập thí nghiệm, mẫu được gắn vào các chốt xuyên qua các tấm thép, ở phía trên gắn với thiết bị đo tải, ở phía dưới gắn với bộ phận ngàm của đế máy [3, 23, 24]. Hai thiết bị đo chuyển vị (LVDTs) được gắn đối xứng hai bên thành mẫu để đo biến dạng của mẫu trong phạm vi chiều dài đo biến dạng là 175 mm (gauge length) [3, 23, 24]. Trong các phương pháp thí nghiệm trước đây đã thực hiện cho bê tông gia cường lưới sợi dệt, tốc độ gia tải tính thay đổi từ 0,1 mm/min [25] đến 2 mm/min [26]. Trong nghiên cứu này, tốc độ gia tải 1 mm/min được lựa chọn phù hợp với công

năng sử dụng của LVDTs, và chiều dài đo biến dạng 175 mm của mẫu hình xương chó [3, 23, 24]. Tuy nhiên ảnh hưởng của tốc độ gia tải đến khả năng kháng kéo của bê tông gia cường lưới sợi cần được xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo. Sau khi thiết lập thí nghiệm, máy kéo di chuyển lên phía trên kéo căng mẫu thí nghiệm cho đến khi mẫu bị phá hoại hoàn toàn thì dừng lại. Lực kéo được đo bằng thiết bị đo tải (loadcell), trong khi đó hai LVDTs đo biến dạng của mẫu [3, 23, 24].



Hình 3. Thí nghiệm kéo trực tiếp

3. Kết quả thí nghiệm và bàn luận

3.1. Quan hệ ứng suất biến dạng kéo của bê tông cốt lưới sợi polyethylene tái chế PETRCCs

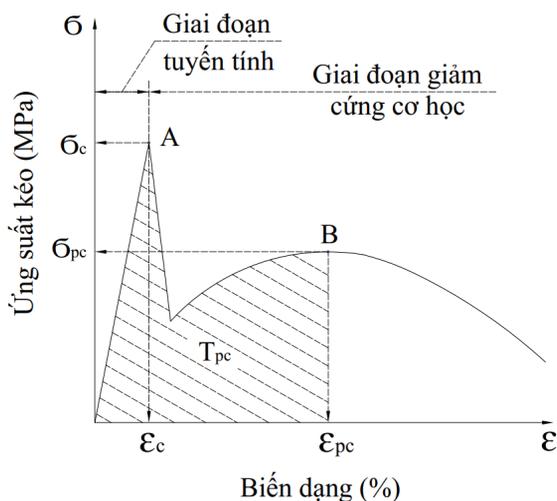
Hình 4 miêu tả đường cong ứng suất - biến dạng điển hình của PETRCCs và các thông số kéo, trong khi đó Bảng 3 liệt kê các thông số kéo của các tổ hợp mẫu. Các thông số kéo của PETRCCs bao gồm ứng suất nứt (σ_c) và biến dạng kéo nứt (ϵ_c) tại vị trí hình thành vết nứt đầu tiên (điểm A), ứng suất kéo sau nứt (σ_{pc}) và khả năng biến dạng tương ứng (ϵ_{pc}) tại điểm cao nhất tới hạn (điểm B) trên đường cong ứng suất biến dạng sau khi hình thành vết nứt đầu tiên. Khả năng hấp thụ năng lượng kéo đến điểm ứng suất tới hạn sau nứt tương ứng (T_{pc}). Giá trị ứng suất kéo được xác định bằng công thức (1) và khả năng biến dạng của mẫu được xác định bằng công thức (2):

$$\sigma = P/F \quad (1)$$

$$\epsilon = \Delta H/GL \quad (2)$$

trong đó P là tải trọng tác dụng, F là diện tích mặt cắt ngang khu vực đo chuyển vị của mẫu kéo, trong đó ΔH là biến dạng tương đối của mẫu trong quá trình kéo, GL (gauge length) là chiều dài khu vực đo biến dạng của mẫu. Trong nghiên cứu này chiều dài đo biến dạng là 175 mm. Khả năng hấp

thụ năng lượng kéo (T_{pc}) được xác định là diện tích dưới đường cong lực - chuyển vị. Bên cạnh đó, số lượng các vết nứt (N_{cr}) xuất hiện tại khu vực đo của mỗi mẫu cũng được quan sát và đếm ở tất cả các bề mặt của mẫu, sau đó tính trung bình. Mỗi thông số của mỗi tổ hợp mẫu được lấy trung bình kết quả thí nghiệm của ít nhất từ 3 mẫu trở lên.



Hình 4. Đường cong ứng suất biến dạng điển hình và các thông số kéo của PETRCCs

Bảng 3. Các thông số sức kháng kéo của PETRCCs

Tổ hợp	Tên mẫu thí nghiệm	σ_c (MPa)	ϵ_c (%)	σ_{pc} (MPa)	ϵ_{pc} (%)	T_{pc} (N·mm)	N_{cr} (vết nứt)
PE	SP1	2,12	0,015	1,62	6,30	17740	4,00
	SP2	2,44	0,009	1,81	3,94	11580	1,00
	SP3	1,73	0,009	1,84	3,45	10115	3,00
	Trung bình	2,10	0,011	1,76	4,56	13145	2,67
	Độ lệch	0,36	0,003	0,12	1,53	4046	1,53
PE_E	SP1	1,57	0,013	1,98	4,73	15650	2,00
	SP2	1,18	0,016	1,84	5,45	18300	1,00
	SP3	1,37	0,013	1,98	5,43	17214	5,00
	SP4	1,87	0,016	1,81	5,13	16103	2,25
	Trung bình	1,50	0,015	1,90	5,18	16817	2,56
Độ lệch	0,29	0,002	0,09	0,33	1187	1,71	
PE_S	SP1	0,71	0,022	1,59	7,27	20169	1,00
	SP2	2,03	0,009	1,48	6,80	17231	2,00
	SP3	2,03	0,028	1,87	6,65	19757	1,00
	SP4	2,25	0,013	1,57	7,58	19765	2,00
	SP5	2,44	0,020	1,65	8,14	22352	1,00
	SP6	2,09	0,009	1,81	5,61	16298	2,00
	Trung bình	1,93	0,017	1,66	7,01	19262	1,00
Độ lệch	0,62	0,008	0,15	0,87	2181	0,00	

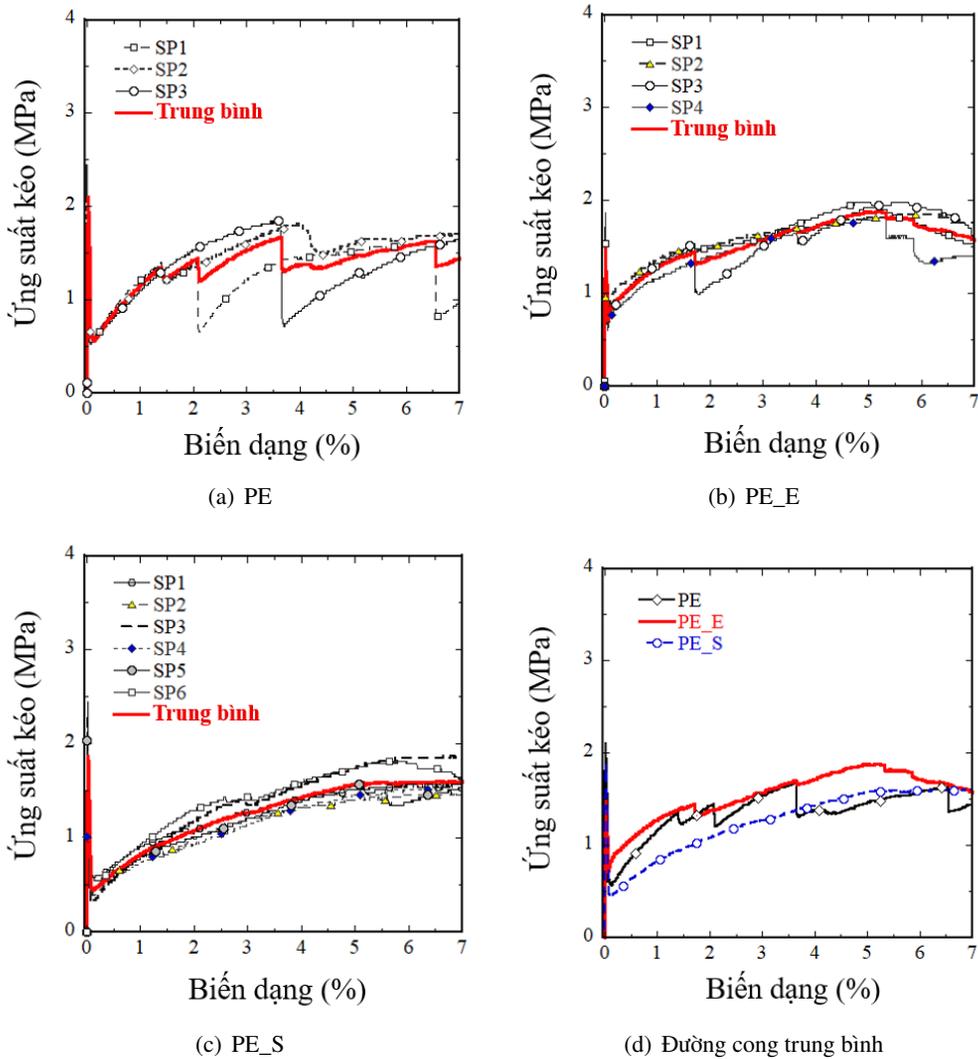
Hình 5 miêu tả quan hệ ứng suất - biến dạng của PETRCCs. Đường cong quan hệ ứng suất -

biến dạng trung bình của mỗi tổ hợp mẫu là trung bình kết quả thí nghiệm tương đồng của ít nhất 3 mẫu trở lên. Kết quả thí nghiệm cho thấy, quan hệ ứng suất biến dạng của các mẫu PETRCCs đều là ứng xử giảm cứng cơ học với hai giai đoạn riêng biệt bao gồm giai đoạn đàn hồi và giai đoạn giảm cứng cơ học [3, 24]. Trong giai đoạn đàn hồi, vật liệu BTHM đang ở trạng thái tuyến tính, chưa phát sinh vết nứt nào, và BTHM chịu toàn bộ tải trọng tác dụng cho đến khi vết nứt đầu tiên xuất hiện [3, 23, 24, 27]. Giai đoạn giảm cứng cơ học bắt đầu từ lúc vết nứt đầu tiên phát sinh tương ứng với điểm giảm ứng suất đột ngột trên đường cong. Sau khi BTHM bị nứt, tải trọng truyền từ BTHM sang lưới sợi làm cho ứng suất dần tăng trở lại đạt đến điểm ứng suất cao nhất khi các bó sợi đạt cường độ chịu kéo, sau đó giảm dần về giá trị 0 và mẫu bị đứt ra hoàn toàn thành hai mảnh [1, 3, 24]. Trong giai đoạn giảm cứng cơ học, các vết nứt khác cũng xuất hiện tương ứng với các điểm giảm ứng suất đột ngột trên đường cong [1, 3, 24]. Ứng xử giảm cứng cơ học của PETRCCs với ứng suất kéo sau nứt σ_{pc} thấp hơn so với ứng suất nứt σ_c cho thấy khả năng gia cường của loại lưới này là chưa cao, do đó phát triển các giải pháp để cải thiện sức kháng kéo của PETRCCs là cần thiết phải được thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo.

Hình 6 thể hiện hình ảnh của các tổ hợp mẫu sau khi thí nghiệm, trong đó có thể quan sát rõ kiểu phá hoại đặc trưng với sự xuất hiện của nhiều vết nứt phân bố dọc theo chiều dài khu vực đo biến dạng của mẫu. Các vết nứt lớn xuất hiện vuông góc với hướng tải trọng, và cắt qua mặt cắt ngang của mẫu thí nghiệm, phản ánh cơ chế phá hoại điển hình dưới tác dụng kéo trực tiếp. Tất cả các vết nứt đều xảy ra trong phạm vi khu vực đo biến dạng. Kiểu biến dạng đa vết nứt cho thấy sự tham gia hiệu quả của lưới trong việc kiểm soát sự phát triển của vết nứt, phân phối ứng suất kéo trên toàn bộ mẫu. Sự phân tán năng lượng phá hoại qua nhiều vết nứt, duy trì khả năng chịu lực sau khi vết nứt đầu tiên hình thành. Kiểu biến dạng đa vết nứt này là kiểu biến dạng phổ biến được quan sát trên bề mặt mẫu bê tông gia cường lưới sợi dệt, trong các nghiên cứu trước đây [3, 23, 24, 27].

3.2. Ảnh hưởng của các phương pháp xử lý bề mặt đến sức kháng kéo của bê tông gia cường lưới PE

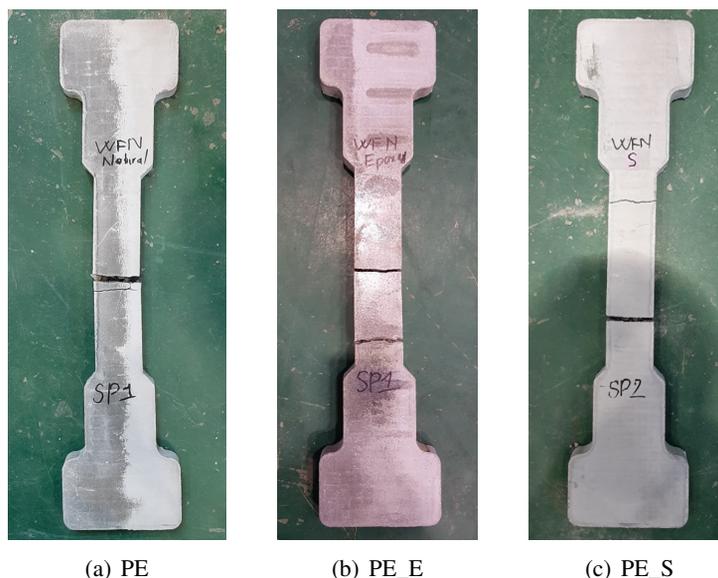
Hình 7 so sánh sức kháng kéo của bê tông gia cường lưới PE được xử lý và không được xử lý bề mặt. Nhìn vào Hình 7 có thể thấy, phương pháp xử lý bề mặt bằng keo epoxy làm tăng khả năng kháng kéo của PETRCCs. Khi lưới sợi được xử lý bề mặt bằng keo epoxy, ứng suất kéo PETRCCs tăng 8% từ 1,76 MPa của PE đến 1,90 MPa của PE_E (Hình 7(b)), khả năng biến dạng tăng 0,62% (từ 4,56% của PE đến 5,18% của PE_E) (Hình 7(d)), trong khi đó khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông gia cường tăng 28% từ 13145 N-mm của PE đến 16817 N-mm của PE_E (Hình 7(e)). Điều thú vị là mặc dù ứng suất của các tổ hợp mẫu đều giảm đột ngột sau khi vết nứt đầu tiên xuất hiện, do lưới sợi không được kéo căng trong quá trình đúc, tuy nhiên mức độ giảm ứng suất của PE_E là nhỏ hơn so với PE. Nhìn vào các Hình 5(a), 5(b) và 5(d) có thể thấy rằng, sau khi phát sinh vết nứt đầu tiên ứng suất của PE_E giảm xuống đến giá trị khoảng 0,9 MPa trong khi đó ứng suất của PE giảm xuống đến giá trị khoảng 0,5 MPa. Hơn nữa, đường cong ứng suất - biến dạng của PE_E có ít vị trí giảm ứng suất đột ngột hơn so với đường cong của PE cho thấy cơ chế bắc cầu qua các vết nứt của lưới sợi PE_E là tốt hơn PE, giữ cho ứng suất ít bị giảm đột ngột. Đặc tính dính kết của keo epoxy là nguyên nhân làm tăng khả năng kháng kéo của PETRCCs. Sau khi sợi PE được nhúng trong dung dịch epoxy, keo epoxy thâm nhập sâu vào các khe hở giữa các sợi nhỏ bên trong bó sợi, kết dính các bó sợi này lại với nhau, tạo thành sợi đồng nhất [18, 19, 28]. Sau khi keo epoxy hóa cứng, sợi PE_E có độ cứng lớn hơn nhiều so với sợi PE thông thường. Sợi có độ cứng càng lớn, vật liệu bê tông gia cường sợi có tính chất cơ lý càng cao [3, 18, 19]. Do vậy PE_E có cường độ kéo, khả năng biến dạng, và khả năng hấp thụ năng lượng tốt hơn so với PE và PE_S. Vì khả năng hấp thụ năng lượng tốt hơn, liên kết giữa BTHM và sợi tốt hơn, ngăn cản hiện tượng kéo tuột sợi ra khỏi BTHM. Do đó sau khi



Hình 5. Đường cong ứng suất - biến dạng của PETRCCs

các vết nứt xuất hiện, lực kéo của PE_E không suy giảm quá nhiều, giữ cho mức độ giảm ứng suất của PE_E là nhỏ hơn.

Phương pháp xử lý bề mặt bằng silicafume làm tăng khả năng hấp thụ năng lượng kéo và khả năng biến dạng nhưng làm giảm khả năng kháng kéo của PETRCCs. Khi lưới sợi được xử lý bề mặt bằng silicafume, khả năng hấp thụ năng lượng của PETRCCs tăng 6117 N-mm (tăng từ 13145 N-mm của PE đến 19262 N-mm của PE_S) (Hình 7(e)), mặc dù ứng suất kéo giảm 0,1 MPa (từ 1,76 MPa của PE đến 1,66 MPa của PE_S) (Hình 7(b)). Sợi PE_S được nhúng trong dung dịch silicafume, các hạt silicafume tạo thành một lớp màng bao phủ bên ngoài sợi, và sau đó để khô hoàn toàn. Trong quá trình chế tạo mẫu, lưới sợi được nhúng vào trong BTHM, các hạt silicafume kết hợp với dung dịch hồ xi măng tạo thành các gel C-S-H, qua đó tăng cường liên kết giữa các bó sợi và BTHM [13, 17, 29]. Butler và cs. [29] cho rằng, lực dính bám chắc chắn của các bó sợi và BTHM là nguyên nhân gây đứt gãy các sợi nhỏ ở bên ngoài, dẫn đến sự phân bố ứng suất không đồng đều trong toàn bộ bó sợi. Đối với PE_S, liên kết chắc chắn giữa sợi và BTHM có thể làm đứt các sợi nhỏ ở bên ngoài bó sợi, khiến mẫu thí nghiệm bị phá hủy sớm hơn mẫu sử dụng sợi PE chưa qua xử lý [29]. Quá trình đứt gãy của



Hình 6. Kiểu phá hoại đa vết nứt của mẫu kéo PETRCCs

các sợi trong bó sợi là không đồng nhất, dẫn đến tăng khả năng biến dạng của PE_S hơn so với các tổ hợp mẫu khác. Khả năng biến dạng cao hơn góp phần làm tăng diện tích dưới đường cong ứng suất biến dạng (hay là khả năng hấp thụ năng lượng) [19]. Mặc dù vậy, việc nghiên cứu về cấu trúc vi mô của sợi trong mẫu thí nghiệm cũng như cơ chế phá hủy vi mô sau khi kéo cần được thực hiện và đánh giá một cách toàn diện hơn trong các nghiên cứu tương lai.

4. Kết luận

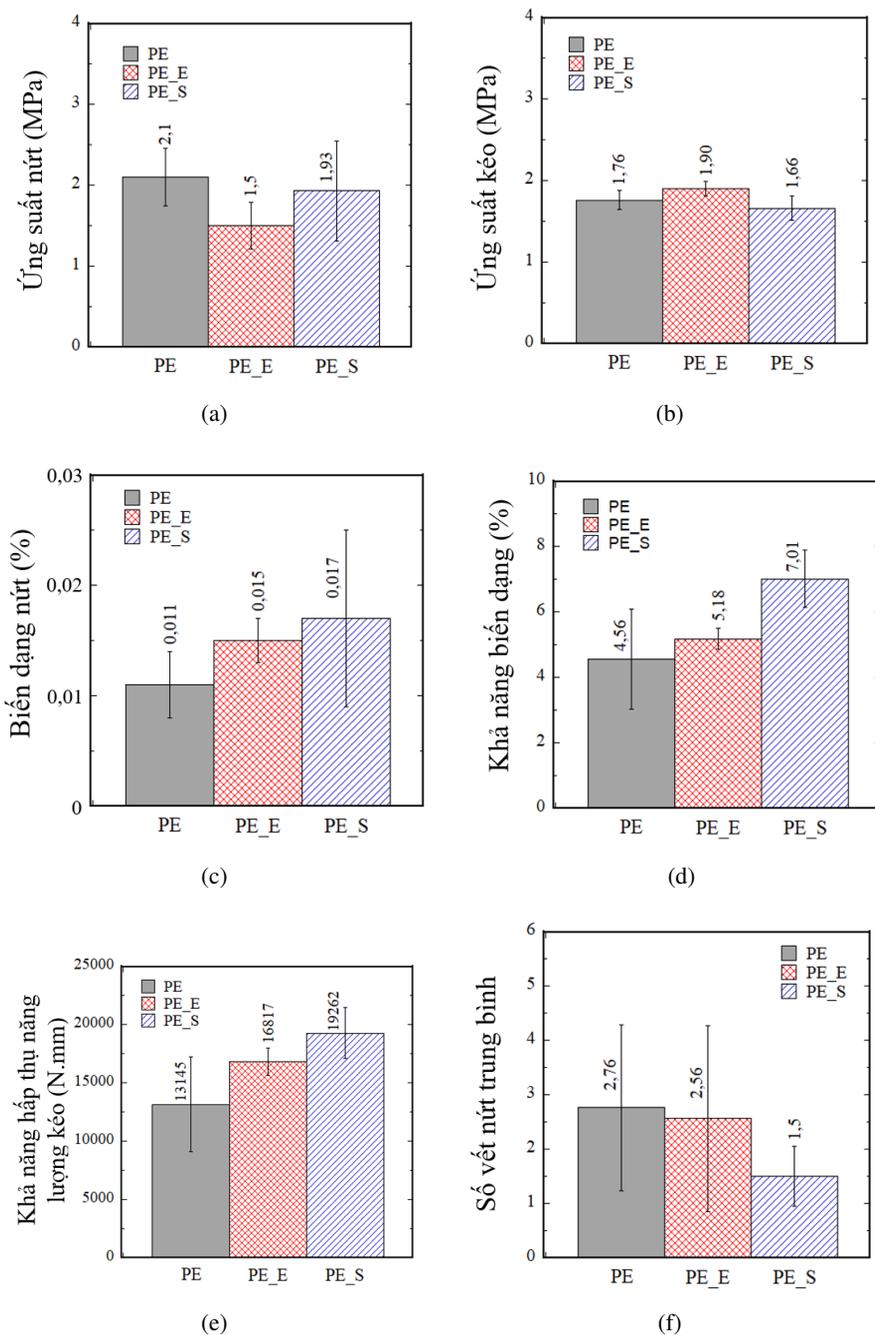
Nghiên cứu này trình bày kết quả thực nghiệm về ứng suất kéo, biến dạng của bê tông gia cường lưới sợi polyethylene tái chế (PETRCCs). Ảnh hưởng của phương pháp xử lý bề mặt bằng keo epoxy và silicafume cũng được nghiên cứu. Một số kết luận được rút ra như sau:

- Đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng kéo của PETRCCs là ứng xử giảm cứng cơ học với hai giai đoạn bao gồm giai đoạn đàn hồi, và giai đoạn giảm cứng cơ học. Hình ảnh mẫu sau thí nghiệm cho thấy kiểu phá hoại đa vết nứt trong khu vực đo biến dạng.

- Nhờ keo epoxy kết dính các sợi nhỏ lại với nhau thành sợi đồng nhất, phương pháp xử lý bề mặt bằng keo epoxy làm tăng độ cứng của lưới sợi, do đó tăng 8% sức kháng kéo cơ học, và tăng 28% khả năng hấp thụ năng lượng của PETRCCs.

- Silicafume làm tăng lực dính kết chặt chẽ giữa BTHM và bó sợi, có thể làm đứt các sợi nhỏ bên ngoài, góp phần phá hủy mẫu sớm hơn và làm giảm 6% sức kháng kéo của bê tông gia cường lưới sợi, tuy nhiên phương pháp xử lý bề mặt lưới sợi bằng silicafume làm tăng 46% khả năng hấp thụ năng lượng của PETRCCs.

Mặc dù nghiên cứu này đã cho thấy khả năng ưu việt của keo epoxy trong việc tăng cường sức kháng kéo và khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông gia cường lưới sợi, quan hệ ứng suất biến dạng thu được là ứng xử giảm cứng cơ học, thể hiện sức kháng cơ học của vật liệu chưa cao. Do đó các giải pháp điều chỉnh thành phần BTHM, bổ sung sợi phân tán, hoặc các phương pháp kéo căng sợi trước khi đổ BTHM, nhằm nâng cao sức kháng kéo của PETRCCs cần được thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo. Bên cạnh đó sức kháng kéo nhỏ của lưới sợi ra khỏi BTHM và các nghiên cứu liên quan đến cấu trúc vi mô của sợi trong BTHM cũng cần được xem xét để đánh giá sâu sắc ảnh hưởng của phương pháp xử lý sợi đến cường độ liên kết giữa lưới sợi và BTHM.



Hình 7. Ảnh hưởng của các phương pháp xử lý bề mặt đến sức kháng kéo của PETRCCs

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Thủy lợi và đề tài nghiên cứu khoa học cấp cơ sở năm 2025. Tên đề tài: “Ảnh hưởng của một số phương pháp xử lý bề mặt sợi tổng hợp đến sức kháng cơ học của bê tông hạt mịn gia cường sợi”.

Tài liệu tham khảo

- [1] Truong, V. D., Park, J. K., Lee, S. Y., Han, T. H., Kim, D. J. (2023). Feasibility of hybrid waste fishing net textile and fiber reinforced cementitious composites in strengthening concrete and retrofitting damaged concrete. *Journal of Building Engineering*, 74:106926.
- [2] Truong, V. D., Noh, H. W., Park, J. K., Han, T. H., Kim, D. J. (2024). Pullout resistance of waste fishing net embedded in the interface between the concrete and fibrous mortar matrix: Test method and experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 418:135397.
- [3] Truong, V. D., Kim, M. O., Kim, D. J. (2021). Feasibility study on use of waste fishing nets as continuous reinforcements in cement-based matrix. *Construction and Building Materials*, 269:121314.
- [4] Park, J. K., Kim, D. J., Kim, M. O. (2021). Mechanical behavior of waste fishing net fiber-reinforced cementitious composites subjected to direct tension. *Journal of Building Engineering*, 33:101622.
- [5] Spadea, S., Farina, I., Carrafiello, A., Fraternali, F. (2015). Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement. *Construction and Building Materials*, 80:200–209.
- [6] Li, W., Tse, H., Fok, L. (2016). Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. *Science of the Total Environment*, 566–567:333–349.
- [7] Charter, M., Carruthers, R., Femmer Jensen, S. (2018). Products from waste fishing nets: accessories, clothing, footwear, home Ware, recreation. *Circular Ocean*.
- [8] Pereira de Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P. (2011). Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, 25(4):1712–1717.
- [9] Borg, R. P., Baldacchino, O., Ferrara, L. (2016). Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 108:29–47.
- [10] Badanoiu, A., Holmgren, J. (2003). Cementitious composites reinforced with continuous carbon fibres for strengthening of concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 25(3):387–394.
- [11] D’Ambrisi, A., Feo, L., Focacci, F. (2012). Bond-slip relations for PBO-FRCM materials externally bonded to concrete. *Composites Part B: Engineering*, 43(8):2938–2949.
- [12] Donnini, J., Corinaldesi, V., Nanni, A. (2016). Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments. *Composites Part B: Engineering*, 88:220–228.
- [13] Quadflieg, T., Leimbrink, S., Gries, T., Stolyarov, O. (2018). Effect of coating type on the mechanical performance of warp-knitted fabrics and cement-based composites. *Journal of Composite Materials*, 52 (19):2563–2576.
- [14] Liang, W., Cheng, J., Hu, Y., Luo, H. (2002). Improved properties of GRC composites using commercial E-glass fibers with new coatings. *Materials Research Bulletin*, 37(4):641–646.
- [15] Wen, L., Jijian, C., Yingjie, H. (2005). Chemical interactions between cement and E-glass fibers with a CaO-BaO-SiO₂-TiO₂ coating. *Journal of the American Ceramic Society*, 88(12):3507–3508.
- [16] Cruz, C., Gohil, U., Quadflieg, T., Raupach, M., Gries, T. (2015). Improving the bond behavior of textile reinforcement and mortar through surface modification. *Proceedings of the 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC*, 215–223.
- [17] Nadiv, R., Peled, A., Mechtcherine, V., Hempel, S., Schroefl, C. (2017). Micro- and nanoparticle mineral coating for enhanced properties of carbon multifilament yarn cement-based composites. *Composites Part B: Engineering*, 111:179–189.
- [18] Truong, V. D., Ngo, T. T., Nguyen, V. T., Pham, N. T., Do, V. Q., Kim, D. J. (2025). Direct tensile characteristics of textile reinforced cementitious composites: Effects of textile types and epoxy resin coating at the joints of textile grid. *Construction and Building Materials*, 481:141545.
- [19] Truong, V. D., Lee, D. H., Kim, D. J. (2021). Effects of different grips and surface treatments of textile on measured direct tensile response of textile reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, 278:114689.
- [20] Cohen, Z., Peled, A. (2012). Effect of nanofillers and production methods to control the interfacial characteristics of glass bundles in textile fabric cement-based composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(6):962–972.
- [21] ASTM C109/ C109M-20 (2020). *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)*. American Society for Testing and Materials.

- [22] ASTM C 1437-20 (2020). *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar*. American Society for Testing and Materials.
- [23] Đoàn, T. V., Hiếu, T. T., Thường, N. T., Anh, V. Q., Phi, Đ. V. (2025). [Ảnh hưởng của cấu trúc và số lớp lưới đến sức kháng kéo của bê tông cốt lưới sợi dệt thủy tinh](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 19(2V):92–103.
- [24] Truong, V. D., Dang, V. P., Dang, H. K., Nguyen, T. A. (2024). Experimental study on strain hardening and deflection hardening conditions of recycled textile reinforced cementitious composites. *Proceedings of the 2nd Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE 2024)*, 1–7.
- [25] Arboleda, D., Carozzi, F. G., Nanni, A., Poggi, C. (2016). [Testing procedures for the uniaxial tensile characterization of fabric-reinforced cementitious matrix composites](#). *Journal of Composites for Construction*, 20(3):1–11.
- [26] D’Anna, J., Amato, G., Chen, J. F., Minafò, G., La Mendola, L. (2021). [Experimental application of digital image correlation for the tensile characterization of basalt FRCM composites](#). *Construction and Building Materials*, 271:121770.
- [27] Tien, T. M., Vu, X. H., Lam, D. P., Tho, P. D. (2021). [A 3-D finite element modeling for the textile-reinforced concrete plates under tensile load using a non-linear behaviour for cementitious matrix](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, 15(1):67–78.
- [28] Signorini, C., Sola, A., Nobili, A. (2023). [Hierarchical composite coating for enhancing the tensile behaviour of textile-reinforced mortar \(TRM\)](#). *Cement and Concrete Composites*, 140:105082.
- [29] Butler, M., Mechtcherine, V., Hempel, S. (2010). [Durability of textile reinforced concrete made with AR glass fibre: effect of the matrix composition](#). *Materials and Structures*, 43(10):1351–1368.