

Nghiên cứu một số tính chất cơ học của bê tông hạt mịn có sử dụng mảnh PET phế thải dưới tác động của nhiệt độ

Nguyễn Đình Hải^{1*}

¹ Bộ môn Vật liệu Xây dựng, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Giao thông Vận tải

TỪ KHOẢ

Bê tông hạt mịn
CWRP
Mảnh PET băm
Nền nhiệt cao

TÓM TẮT

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm xác định ảnh hưởng của nền nhiệt độ cao tới một số tính chất cơ học của bê tông hạt mịn có sử dụng mảnh PET phế thải (CWRP). Các cấp phối bê tông hạt mịn với sự thay thế 10, 15 và 20% mảnh PET băm theo thể tích sẽ được nghiên cứu khả năng chịu nhiệt. Để thực hiện nghiên cứu này, các mẫu đầm lãng trụ và mẫu lập phương đã được đúc để xác định cường độ chịu kéo khi uốn và nén của CWRP trước và sau khi chịu nhiệt đồng thời tinh công tác của hỗn hợp của được xác định. Kết quả nghiên cứu chỉ ra khi hàm lượng PET thay thế tăng lên thì tính công tác của hỗn hợp có xu hướng giảm. Việc tăng hàm lượng PET thay thế làm suy giảm cường độ chịu kéo khi uốn và nén của CWRP ở nhiệt độ phòng thí nghiệm. Dưới nền nhiệt độ cao nghiên cứu cho thấy khi hàm lượng mảnh PET tăng thì tính nhạy cảm nhiệt của CWRP tăng. Thông qua khảo sát hàm lượng PET thay thế khoảng 10 % là phù hợp đảm bảo tinh công tác và các đặc trưng cơ lý của CWRP trong điều kiện nhiệt độ môi trường.

KEYWORDS

Fine Concrete
CWRP
PET flakes
High temperature condition

ABSTRACT

This study aims to determine the effects of high temperature on some mechanical properties of fine aggregate concrete with recycled PET (polyethylene terephthalate) flakes (Concrete with Waste Recycled Plastic – CWRP). Concrete mixtures with 10%, 15%, and 20% volume replacement of PET flakes are investigated for their thermal behavior. For this study, beam and cube specimens were cast to determine the flexural and compressive strength of the CWRP before and after exposure to heat, while simultaneously assessing the workability of the mixtures. The results indicate that as the percentage of substituted PET increases, the workability of the mixtures tends to decrease. Increasing the PET content also leads to reductions in both the flexural and compressive strength of CWRP at room temperature. Under high-temperature conditions, the study shows that the thermal sensitivity of CWRP increases with higher PET content. Based on the investigation, substituting around 10% PET appears to be optimal for maintaining acceptable workability and mechanical properties of CWRP under ambient temperature conditions.

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, ô nhiễm môi trường do rác thải nhựa đang trở thành vấn đề nghiêm trọng và được quan tâm trên toàn cầu. Trước thực trạng đó, nhiều giải pháp đã được đề xuất nhằm xử lý và tái sử dụng nhựa phế thải. Các phương pháp phổ biến bao gồm: đốt để thu hồi nhiệt phục vụ nhà máy nhiệt điện, tái chế thành các sản phẩm nhựa khác nhau [1–5], hoặc sử dụng trực tiếp nhựa phế thải như một thành phần trong bê tông xi măng, hình thành vật liệu bê tông chứa nhựa phế thải (CWRP – Concrete with Recycled Plastic) [6–14].

Trong thực tế, các dạng nhựa phế thải được tích hợp vào bê tông xi măng thường ở các dạng như: (i) dạng sợi được cắt nhỏ từ túi nylon phế thải và sử dụng như cốt sợi [9,10]; (ii) dạng hạt hoặc bột thu được thông qua quá trình gia nhiệt, làm nguội và nghiền nhỏ để thay thế một phần cốt liệu mịn [6,8,13,14]; (iii) dạng tấm mảnh tạo thành từ việc băm nhỏ chai lọ, cốc nhựa đã qua sử dụng [7,11]. Trong

ba dạng trên, nhựa phế thải dạng tấm mảnh được đánh giá cao nhờ khả năng chế tạo đơn giản và hiệu quả khi sử dụng trong thực tiễn.

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra ảnh hưởng của nhựa phế thải đến các tính chất cơ học của bê tông, bao gồm cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi uốn, mô đun đàn hồi, khối lượng thể tích và tính công tác của hỗn hợp [6–14]. Đặc biệt, việc bổ sung nhựa PET dạng tấm mảnh giúp cải thiện cường độ chịu kéo khi uốn và làm giảm khối lượng thể tích của bê tông [6–8]. Tuy nhiên, hạn chế lớn của vật liệu PET là khả năng chịu nhiệt không cao, dẫn đến những nghi vấn về hiệu quả sử dụng loại vật liệu này trong môi trường làm việc có nhiệt độ cao.

Vì vậy, nhằm đánh giá một cách toàn diện hơn về hiệu năng của bê tông sử dụng nhựa PET phế thải trong điều kiện nhiệt độ cao, nghiên cứu này tập trung khảo sát một số tính chất cơ học của bê tông hạt mịn có sử dụng nhựa PET dạng tấm mảnh dưới tác động của nền nhiệt khác nhau. Nghiên cứu được chia thành ba phần chính: (i) giới

*Liên hệ tác giả: nguyendinhai.1986@utc.edu.vn

Nhận ngày 17/10/2025, sửa xong ngày 03/12/2025, chấp nhận đăng ngày 04/12/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2026.1154>

thiệu vật liệu thành phần và thiết kế hỗn hợp CWRP; (ii) trình bày thí nghiệm xác định cường độ chịu nén và chịu kéo khi uốn tại các mức nhiệt độ khác nhau; (iii) đưa ra kết luận và kiến nghị dựa trên kết quả thu được.

2. Vật liệu chế tạo và phương pháp thực nghiệm

2.1. Yêu cầu chung

Trong nghiên cứu này, thành phần CWRP sử dụng mảnh PET được thiết kế nhằm đạt được các mục tiêu: Bê tông sử dụng rác thải nhựa PET dạng tấm mảnh - CWRP đạt cường độ chịu nén trung bình đạt 40 MPa ở 28 ngày tuổi, sử dụng mảnh nhựa PET với các hàm lượng 0, 2, 3, 4 kg/m³.

2.2. Vật liệu chế tạo

Xi măng : Loại xi măng sử dụng: Xi măng POOCLĂNG PC40 VIMCEM Bút Sơn.

Tro bay: Nghiên cứu này sử dụng tro bay của nhà máy nhiệt điện Phả Lại.

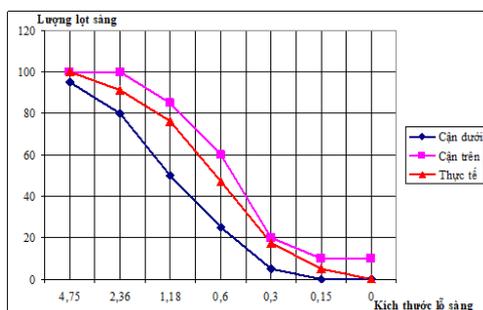


Hình 1. Xi măng POOCLĂNG PC40.



Hình 2. Tro bay Phả Lại.

Cốt liệu nhỏ : Nghiên cứu này sử dụng cát Sông Lô có mô đun độ lớn 2,63 Cát được sàng và phân loại theo các cỡ hạt khác nhau sau đó được phối trộn lại phù hợp với tiêu chuẩn ASTM C33 [15].



Hình 3. Lượng lọt sàng của cát.

Nước : Sử dụng nguồn nước sạch có sẵn tại phòng thí nghiệm phù hợp tiêu chuẩn TCVN 4506 – 2012 [16].

Phụ gia siêu dẻo : Nghiên cứu này sử dụng phụ gia siêu dẻo Sikament NN.



Hình 4. Phụ gia siêu dẻo Sikament NN.

Mảnh nhựa PET : Phế thải nhựa PET được nhóm nghiên cứu thu gom từ các vỏ chai nhựa bỏ đi tại các cơ sở thu mua phế liệu. Sau đó, chúng được chuyển về điểm tái chế nhựa tại Cụm Công nghiệp Khắc Niệm, thành phố Bắc Ninh. Tại đây, nhựa PET được đưa vào máy băm thô, sau đó tiếp tục được băm nhỏ thành các mảnh có kích thước nhỏ hơn. Các mảnh nhựa này được rửa sạch, rồi được sấy khô và đóng gói thành phẩm để phục vụ cho thí nghiệm.



Hình 5. Mảnh nhựa PET băm thô.



Hình 6. Mảnh nhựa PET băm nhỏ.

Vật liệu mảnh PET có kích thước hạt sử dụng trong nghiên cứu này nằm trong khoảng 5 – 10 mm, khối lượng riêng xấp xỉ 1,2 g/cm³ với nhiệt độ chảy dẻo là 260 °C.

2.3. Công thức thành phần

Thành phần của bê tông CWRP được thiết kế dựa trên cơ sở lý thuyết kết hợp với thực nghiệm, và được điều chỉnh thông qua quá trình thử nghiệm tại phòng thí nghiệm của Trường Đại học Giao thông Vận tải. Dựa trên kết quả nghiên cứu, các công thức cấp phối CWRP được đề xuất và trình bày trong Bảng 1 dưới đây.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Thực nghiệm xác định tính công tác của hỗn hợp CWRP

Tính công tác của hỗn hợp bê tông được xác định theo (TCVN 3121 : 2003) [17].

Các kết quả thực nghiệm xác định ảnh hưởng của hàm lượng mảnh PET thay thế đến tính công tác của hỗn hợp CWRP được trình bày ở Bảng 2 và đồ thị Hình 8 dưới đây.

Quan sát đồ thị Hình 8 cho thấy rằng khi hàm lượng PET thay thế trong hỗn hợp tăng lên, độ chảy lan (tính công tác) của bê tông giảm đáng kể. Cụ thể, khi thay thế 5 % PET, độ chảy lan đạt 270 mm; với 10 % PET, độ chảy lan giảm xuống còn 260 mm. Khi tỷ lệ thay thế tăng lên 15 %, độ chảy lan giảm mạnh chỉ còn 180 mm, cho thấy tính công tác bị suy giảm rõ rệt. Ở mức thay thế 20 % PET, hỗn hợp CWRP không còn khả năng tự chảy, phải sử dụng phương pháp bàn dần để xác định độ lưu động, với giá trị đo được là 130 mm. Kết quả này cho thấy rằng hỗn hợp CWRP vẫn duy trì tính công tác tốt khi hàm lượng PET thay thế ở mức tối đa khoảng 10 %.

3.2. Thực nghiệm xác định Rn của CWRP sau khi chịu các nền nhiệt khác nhau

Cường độ chịu nén của bê tông được xác định theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 3118- 1993 [18].

Giá trị các kết quả thực nghiệm xác định cường độ chịu nén (Rn) của CWRP dưới tác động của các nền nhiệt khác nhau được trình bày ở Bảng 3.

Ảnh hưởng của nhiệt độ và hàm lượng PET thay thế đến cường độ chịu nén của CWRP được thể hiện ở các Hình từ 10 đến 14.

Bảng 1. Công thức thành phần của CWRP.

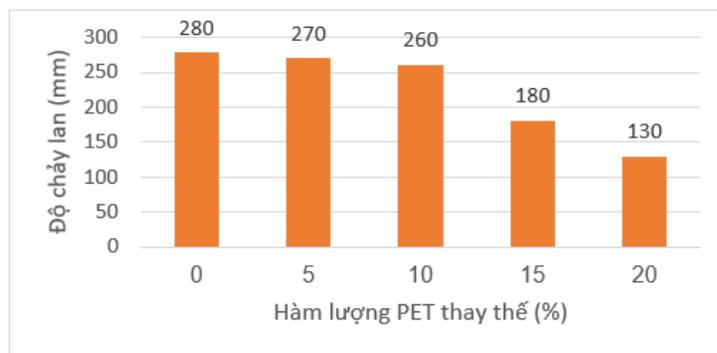
Bê tông CWRP	0 % PET	5 % PET	10 % PET	15 % PET	20 % PET
Xi măng PC40 (kg)	475	475	475	475	475
Cát (kg)	1418	1283	1147	1012	876
Tro bay (kg)	95	95	95	95	95
Mảnh PET (kg)	0	60	120	180	240
Nước (lít)	255	255	255	255	255
PGSD (lít)	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Khối lượng thể tích	2250	2173	2099	2023	1948



Hình 7. Xác định tính công tác của hỗn hợp CWRP.

Bảng 2. Kết quả thực nghiệm tính công tác của hỗn hợp CWRP.

Hàm lượng PET thay thế (%)	0	5	10	15	20
Tính công tác (mm)	280	270	260	180	130
Loại thí nghiệm	Chảy lan	Chảy lan	Chảy lan	Chảy lan	Bàn rần



Hình 8. Ảnh hưởng của hàm lượng PET thay thế đến tính công tác của hỗn hợp CWRP.

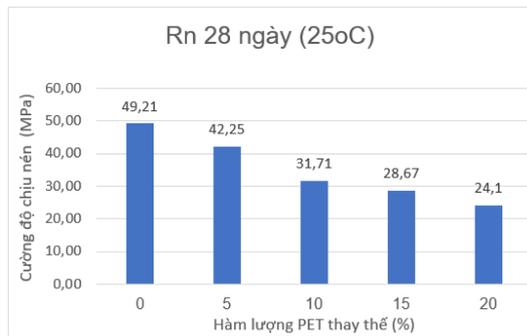


Hình 9. Thí nghiệm cường độ chịu nén của mẫu.

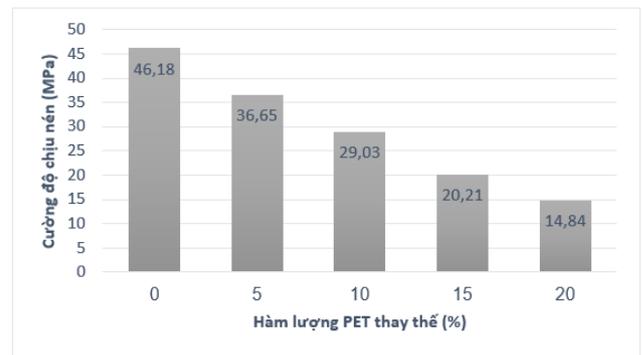
Bảng 3. Kết quả thực nghiệm xác định Rn dưới tác động các nền nhiệt độ khác nhau của CWRP.

Hàm lượng PET (%)	0	5	10	15	20
Rn ở 25 °C	49,21	42,25	31,71	28,67	24,1
Rn ở 100 °C	51,35	40,19	30,65	25,84	20,13
Rn ở 200 °C	46,18	36,65	29,03	20,21	14,84

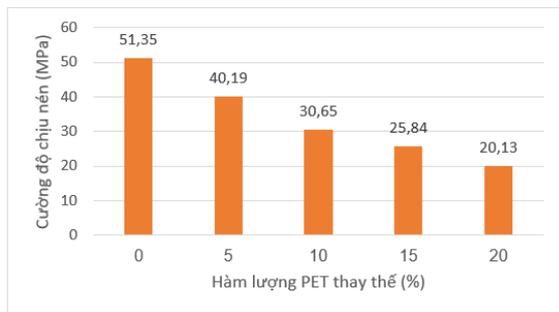
Ảnh hưởng của nhiệt độ và hàm lượng PET thay thế đến cường độ chịu nén của CWRP được thể hiện ở các hình từ 10 đến 14.



Hình 10. Ảnh hưởng của hàm lượng PET thay thế đến cường độ chịu nén của CWRP ở 25 °C.

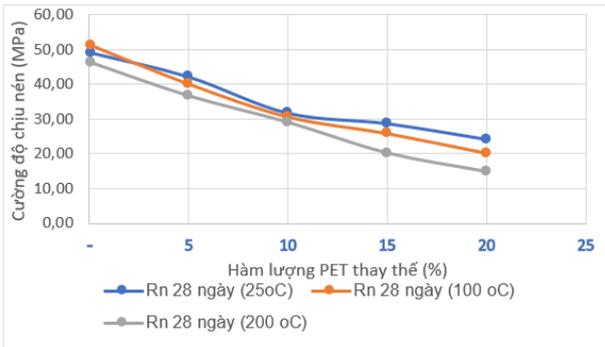


Hình 12. Ảnh hưởng của hàm lượng PET thay thế đến cường độ chịu nén của CWRP ở 200 °C.



Hình 11. Ảnh hưởng của hàm lượng PET thay thế đến cường độ chịu nén của CWRP ở 100 °C.

Quan sát ảnh hưởng của hàm lượng PET thay thế đến cường độ chịu nén (Rn) của bê tông CWRP ở tuổi 28 ngày trong các điều kiện nhiệt độ khác nhau (Hình 10 đến Hình 12), có thể nhận thấy rằng giá trị Rn đều có xu hướng giảm khi hàm lượng PET tăng. Tuy nhiên, mức độ suy giảm này không đồng đều giữa các nền nhiệt độ. Khi nhiệt độ tăng cao, độ dốc suy giảm cường độ cũng tăng lên, cho thấy tác động tiêu cực của nhiệt độ đến cường độ chịu nén của CWRP càng rõ rệt, đặc biệt ở hàm lượng PET thay thế cao – như minh họa trong Hình 13.



Hình 13. Ảnh hưởng của hàm lượng PET thay thế và nhiệt độ đến cường độ chịu nén của CWRP.

Tương quan thay đổi cường độ chịu nén của CWRP sau khi chịu tác động của nền nhiệt độ cao đối với CWRP ở nhiệt độ thường được trình bày ở Hình 14.



Hình 14. Tương quan giá trị cường độ Rn của CWRP sau khi chịu tác động của nền nhiệt độ cao so với CWRP ở nhiệt độ phòng.

Dựa trên kết quả thể hiện trong Hình 14, có thể thấy rằng đối với mẫu bê tông đối chứng, khi được đặt trong điều kiện nhiệt độ 100 °C, cường độ chịu nén có tăng nhẹ so với mẫu ở điều kiện thường. Hiện tượng này có thể được lý giải do quá trình bảo dưỡng nhiệt làm tăng mức độ thủy hóa của xi măng trong bê tông. Tuy nhiên, khi nhiệt độ tăng lên 200 °C, cường độ của mẫu đối chứng lại giảm so với mẫu ở điều kiện nhiệt độ phòng.

Đối với các mẫu CWRP có hàm lượng PET thay thế, kết quả đều cho thấy sự suy giảm cường độ chịu nén khi so sánh với cùng mẫu ở điều kiện nhiệt độ thường. Mức độ suy giảm càng lớn khi hàm lượng PET thay thế tăng. Cụ thể:

Với 5 % PET, cường độ ở 100 °C và 200 °C giảm lần lượt 5 % và 13 % so với mẫu cùng hàm lượng PET ở điều kiện phòng.

Với 10 % PET, mức giảm tương ứng là 3 % và 8 %.

Với 15 % PET, cường độ giảm 10 % ở 100 °C và 30 % ở 200 °C.

Với 20 % PET, độ giảm lên đến 16 % ở 100 °C và 38 % ở 200 °C.

Kết quả này cho thấy rằng CWRP có xu hướng giảm cường độ rõ rệt dưới điều kiện nhiệt độ cao, đặc biệt khi hàm lượng PET thay thế lớn. Điều này phản ánh tính nhạy cảm nhiệt của vật liệu CWRP khi sử dụng nhựa tái chế ở tỷ lệ cao.

3.3. Thực nghiệm xác định Rku của CWRP sau khi chịu các nền nhiệt khác nhau

Cường độ chịu kéo khi uốn của CWRP được thực hiện theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 3119 – 1993 [19].

Giá trị các kết quả thực nghiệm xác định cường độ chịu nén (Rku) của CWRP dưới tác động của các nền nhiệt khác nhau được trình bày ở Bảng 4.

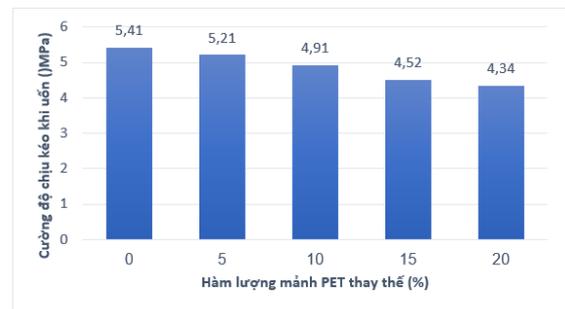
Ảnh hưởng của nhiệt độ và hàm lượng PET thay thế đến các tính năng của CWRP được thể hiện ở Hình 16 đến Hình 20.



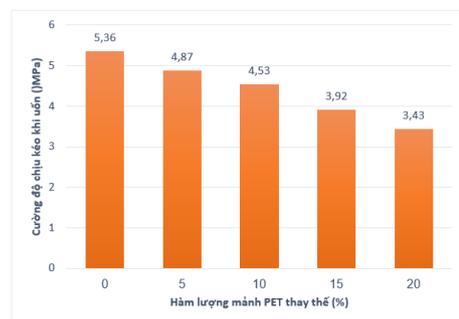
Hình 15. Thí nghiệm cường độ chịu kéo của mẫu.

Bảng 4. Kết quả thực nghiệm xác định Rku dưới tác động các nền nhiệt độ khác nhau của CWRP.

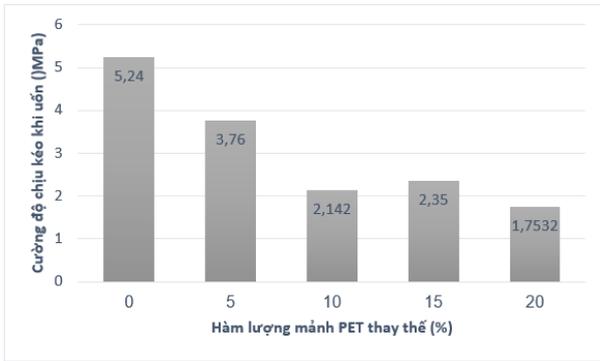
Hàm lượng PET (%)	0	5	10	15	20
Rku ở 25 °C	5,41	5,21	4,91	4,52	4,34
Rku ở 100 °C	5,36	4,87	4,53	3,92	3,43
Rku ở 200 °C	5,24	3,76	2,142	2,35	1,7532



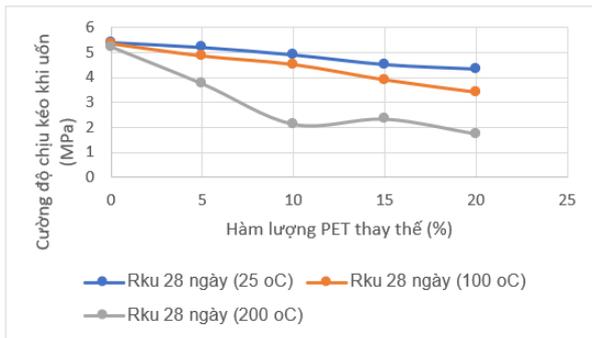
Hình 16. Ảnh hưởng của hàm lượng PET thay thế đến cường độ chịu kéo khi uốn của CWRP ở 25 °C.



Hình 17. Ảnh hưởng của hàm lượng PET thay thế đến cường độ chịu kéo khi uốn của CWRP ở 100 °C.

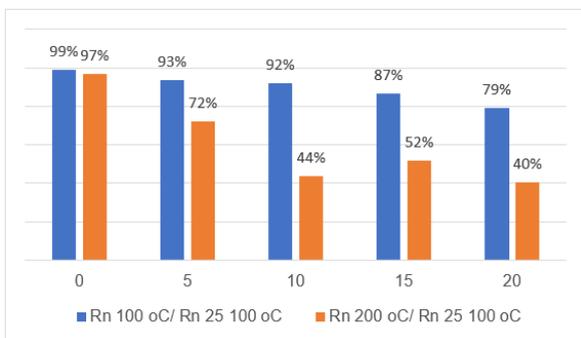


Hình 18. Ảnh hưởng của hàm lượng PET thay thế đến cường độ chịu kéo khi uốn của CWRP ở 200 °C.



Hình 19. Ảnh hưởng của hàm lượng PET thay thế và nhiệt độ đến cường độ chịu kéo khi uốn của CWRP.

Xu hướng suy giảm cường độ chịu kéo khi uốn của CWRP khi hàm lượng PET thay thế gia tăng và nền nhiệt độ cao cũng được ghi nhận khi quan sát các biểu đồ hình từ Hình 16 đến hình 19. Tuy nhiên ta nhận thấy rằng ảnh hưởng của hàm lượng PET đến CWRP ở nhiệt độ thường đến Rku là thấp hơn so với Rn khi quan sát độ dốc suy giảm của của độ kéo uốn so với cường độ chịu nén. Ngược lại ở các nền nhiệt độ cao thì mức độ suy giảm cường độ chịu kéo khi uốn ghi nhận lớn hơn so với cường độ chịu nén. Tương quan thay đổi cường độ chịu uốn của CWRP sau khi chịu tác động của nền nhiệt độ cao đối với CWRP ở nhiệt độ thường được trình bày ở hình 20.



Hình 20. Tương quan giá trị cường độ chịu kéo khi uốn Rku của CWRP sau khi chịu tác động của nền nhiệt độ cao so với CWRP ở nhiệt độ phòng.

Quan sát biểu đồ trong Hình 20 cho thấy rằng, khi hàm lượng PET thay thế là 5 %, cường độ chịu kéo khi uốn của CWRP giảm lần lượt 7 % ở 100 °C và 28 % ở 200 °C so với mẫu cùng hàm lượng ở điều kiện nhiệt độ phòng. Với hàm lượng PET là 10%, mức suy giảm tương ứng là 8 % và 56 %. Khi tỷ lệ PET tăng lên 15 %, cường độ uốn giảm 13 % ở 100 °C và 48 % ở 200 °C. Ở mức 20 % PET, mức giảm lần lượt là 21 % và 60 %. Kết quả này cho thấy rằng cường độ chịu kéo khi uốn của CWRP bị ảnh hưởng nghiêm trọng khi chịu nền nhiệt độ cao, đặc biệt ở các tỷ lệ PET thay thế lớn. Các hình ảnh minh họa thực nghiệm về bề mặt phá hoại của mẫu CWRP sau khi chịu tác động nhiệt độ cao được trình bày trong Hình 21.



Hình 21. Bề mặt mẫu CWRP ở nhiệt độ cao và hình ảnh mẫu sau thí nghiệm nén.

4. Kết luận

Trên cơ sở các kết quả thực nghiệm về tính công tác, cường độ chịu kéo khi uốn và cường độ chịu nén của bê tông hạt mịn sử dụng mảnh PET tái chế (CWRP) dưới các điều kiện nhiệt độ khác nhau, nghiên cứu đã đưa ra một số kết luận chính như sau:

Tính công tác của hỗn hợp CWRP bị ảnh hưởng tiêu cực khi hàm lượng PET thay thế tăng. Cụ thể, độ chảy lan của hỗn hợp giảm dần khi hàm lượng PET tăng từ 5 % đến 10 % (giảm khoảng 10–20 mm so với mẫu đối chứng). Khi hàm lượng đạt 20 %, hỗn hợp không còn khả năng tự chảy và chỉ xác định được độ lưu động thông qua phương pháp bàn dần, cho thấy tính công tác bị suy giảm nghiêm trọng.

Cường độ cơ học của CWRP ở nhiệt độ môi trường cũng suy giảm rõ rệt theo mức tăng hàm lượng PET: Thay thế 5 % PET: Rn giảm 14 % (42,25 MPa), Rku giảm 2 % (5,21 MPa). Thay thế 10 % PET: Rn giảm 35 % (31,71 MPa), Rku giảm 9,2 % (4,91 MPa). Thay thế 20 % PET: Rn giảm 50 % (24,1 MPa), Rku giảm 19,8 % (4,34 MPa).

Dưới điều kiện nhiệt độ cao, CWRP thể hiện độ nhạy nhiệt lớn, đặc biệt khi hàm lượng PET thay thế tăng cao. Hiện tượng này xuất phát từ đặc tính nhiệt dẻo của nhựa PET và sự không tương thích về hệ số giãn nở nhiệt giữa PET và nền xi măng, dẫn đến sự suy giảm mạnh về cường độ cơ học khi chịu nhiệt.

Giá trị thay thế 10 % PET được xác định là mức hợp lý nhất để đảm bảo cân bằng giữa tính công tác và khả năng chịu lực của CWRP

trong điều kiện nhiệt độ thường, phù hợp với yêu cầu kỹ thuật của các công trình xây dựng dân dụng thông thường.

Tài liệu tham khảo

- [1]. C. Albano, N. Camacho, M. Hernández, A. Matheus, A. Gutiérrez. Influence of content and particle size of waste PET bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, 29, 2707–2716, 2009.
- [2]. L. Córdova, J. Rincón, J. Gutiérrez. Effects on mechanical properties of recycled PET in cement-based composites. *International Journal of Polymer Science*, 2013, Article ID 763276.
- [3]. S. Panyakapo, M. Panyakapo. Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete. *Waste Management*, 28, 1581–1588, 2008.
- [4]. A. Foti. Use of recycled waste PET bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures*, 96, 396–404, 2013.
- [5]. M. Frigione. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 30, 1101–1106, 2010.
- [6]. M. Saikia, J. de Brito. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385–401, 2012.
- [7]. M. Rahmani, M. Dehestani, M. Beygi, M. Allahyari, M. Nikbin. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 47, 1302–1308, 2013.
- [8]. M. Frigione. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 30, 1101–1106, 2010.
- [9]. A. Foti. Use of recycled waste PET bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures*, 96, 396–404, 2013.
- [10]. S. Panyakapo, M. Panyakapo. Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete. *Waste Management*, 28, 1581–1588, 2008.
- [11]. L. Córdova, J. Rincón, J. Gutiérrez. Effects on mechanical properties of recycled PET in cement-based composites. *International Journal of Polymer Science*, 2013, Article ID 763276.
- [12]. C. Albano, N. Camacho, M. Hernández, A. Matheus, A. Gutiérrez. Influence of content and particle size of waste PET bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, 29, 2707–2716, 2009.
- [13]. M. Saikia, J. de Brito. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385–401, 2012.
- [14]. M. Rahmani, M. Dehestani, M. Beygi, M. Allahyari, M. Nikbin. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 47, 1302–1308, 2013.
- [15]. ASTM C33. *Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- [16]. Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 4506– *Nước trộn bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật*, Tiêu chuẩn Xây dựng Việt Nam, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2012.
- [17]. Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 3121 - 11. *Xác định cường độ uốn và nén của vữa đã đóng rắn*. Tiêu chuẩn Xây dựng Việt Nam, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2003.
- [18]. Bộ khoa học và công nghệ. TCVN 3118:1993. *Bê tông nặng – Phương pháp xác định cường độ nén*. Ban kỹ thuật tiêu chuẩn TCVN – Bộ Xây dựng, Hà Nội, 1993.
- [19]. Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 3119:1993. *Bê tông nặng – Phương pháp xác định cường độ kéo khi uốn*. Ban kỹ thuật tiêu chuẩn TCVN – Bộ Xây dựng, Hà Nội, 1993.