

# Nghiên cứu cường độ và độ va đập của bê tông phân loại chức năng sử dụng sợi polypropylene và tro bay

Võ Minh Luân<sup>1</sup>, Bùi Phương Trinh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bộ môn Vật liệu Xây dựng, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM (HCMUT)

## TỪ KHOÁ

Bê tông phân loại chức năng  
Tro bay  
Sợi polypropylene  
Cường độ chịu nén  
Cường độ chịu kéo khi uốn  
Độ va đập

## TÓM TẮT

Bài nghiên cứu này khảo sát cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi uốn và độ va đập của bê tông phân loại chức năng (FGC) có hai lớp bê tông (bao gồm lớp trên và lớp dưới với chiều cao mỗi lớp bằng nhau). Các loại bê tông được nghiên cứu bao gồm bê tông thường, bê tông tro bay với hàm lượng tro bay thay thế xi măng là 20 % theo khối lượng và bê tông cốt sợi với 0,3 % hàm lượng sợi polypropylene (PP) theo thể tích bê tông. Kết quả chỉ ra rằng việc sử dụng tro bay kết hợp với sợi PP đã giúp cải thiện đáng kể cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi uốn và độ va đập của FGC tại 28 ngày tuổi. Kết luận rằng FGC có thành phần là sự kết hợp giữa bê tông tro bay (lớp trên) với bê tông tro bay chứa sợi PP (lớp dưới) là FGC tối ưu nhất về mặt kết cấu chịu lực và về mặt kinh tế trong bài nghiên cứu này.

## KEYWORDS

Functionally graded concrete  
Fly ash  
Polypropylene fiber  
Compressive strength  
Flexural strength  
Impact resistance

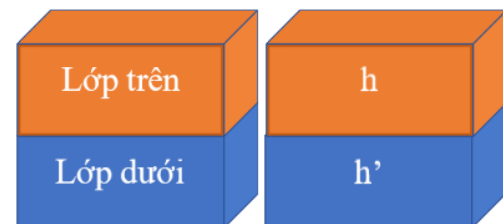
## ABSTRACT

This paper focuses on an evaluation of compressive strength, flexural strength, and impact resistance of functionally graded concrete (FGC) with two concrete layers (including top and bottom layers with a same height). Various types of concrete were normal concrete, fly ash concrete with a replacement of cement by fly ash at 20 % by mass, and fiber-reinforced concrete with an amount of polypropylene (PP) fiber at 0.3 % by volume. The results showed that using fly ash in combination with PP fibers significantly improved the compressive strength, flexural strength, and impact resistance of FGC at 28 days. As a consequence, FGC made from a top layer of fly ash concrete and a bottom layer of fly ash concrete containing PP fibers was the most optimal one which ensures bearing capacity and meets economic aspect in this paper

## 1. Giới thiệu:

Với nhu cầu xây dựng ngày càng tăng cao, bê tông là vật liệu được sử dụng thường xuyên với số lượng lớn vì có ưu điểm về cường độ và độ bền. Với sản lượng ước tính khoảng 25 tỷ tấn mỗi năm [1], bê tông là vật liệu được tiêu thụ nhiều nhất trên thế giới; dự kiến đến năm 2050, nhu cầu sử dụng của bê tông sẽ tăng từ 12 đến 23 % so với năm 2014 [2]. Tuy nhiên, việc sản xuất bê tông gây tác động tiêu cực đến môi trường, cụ thể gây tiêu hao năng lượng, gây hiệu ứng nhà kính, tăng lượng khí cacbon toàn cầu, đặc biệt là gây ô nhiễm không khí và nguồn nước, gây ra việc sử dụng quá tải tài nguyên thiên nhiên như khai thác nguồn cát sông và đá thiên nhiên đến mức cạn kiệt để chế tạo bê tông [3]. Để giải quyết vấn đề này, cần tạo ra một loại bê tông mới vừa có tính bền vững, vừa giúp tiết kiệm nguồn tài nguyên tự nhiên và vừa hạn chế ô nhiễm môi trường. Bê tông có tính bền vững và tiết kiệm hơn so với bê tông thông thường và có một số đặc trưng kỹ thuật như độ đặc chắc được cải thiện, các đặc tính cơ học được nâng cao và đặc biệt là sự đổi mới trong các thành phần và trong vai trò chức năng cụ thể [4]. Từ đó, bê tông phân loại chức năng (Functionally graded concrete - FGC) đã được đề xuất và đang được nghiên cứu.

Có thể hiểu đơn giản FGC là loại bê tông có nhiều hơn một lớp (tối thiểu là 2 lớp) được thể hiện trong Hình 1, và mỗi lớp có một chức năng riêng biệt để đáp ứng một hay nhiều yêu cầu kỹ thuật như độ bền trong kết cấu [4], có khả năng ngăn nước thâm nhập, hay ngăn chặn ảnh hưởng của không khí ô nhiễm trong hầm qua sông [5], vẫn đảm bảo về mặt cường độ kết cấu và tiết kiệm lượng lớn bê tông thông qua việc sử dụng sợi polypropylene (PP) hay việc thay thế xi măng bằng một phần phế thải (như tro bay) trong bê tông; từ đó, giảm thiểu được lượng xi măng sử dụng, hạn chế ô nhiễm môi trường và tiết kiệm chi phí.



Trên thế giới hiện nay, việc phát triển FGC đang được chú trọng như một số nghiên cứu về FGC cốt sợi của Chan R. và cộng sự [3], Liu X. và cộng sự [4], Torelli G. và cộng sự [6], Choudhary S. và cộng sự [7] đã thể hiện rõ tầm quan trọng và ý nghĩa thực tiễn của loại bê tông mới này với thành phần là sự kết hợp nhiều loại bê tông như bê tông cốt sợi thép, bê tông cốt liệu tái chế, bê tông cốt sợi thủy tinh ... Các nghiên cứu trên đã được ứng dụng cho các công trình công cộng như vỉa hè, bến tàu du lịch, khu vui chơi trẻ em ... [7]. Tuy nhiên, mặt hạn chế của các nghiên cứu đi trước chính là việc sử dụng nhiều loại sợi khác nhau; các loại sợi này được sản xuất và đòi hỏi phải có kỹ thuật gia công và khả năng thi công như sợi thép ... [6] và đồng thời cũng làm tiêu tốn tài nguyên, gây ô nhiễm môi trường, cùng với đó là sự khó khăn trong công tác thi công FGC cốt sợi [6]. Vì vậy, cần tìm ra giải pháp thi công cũng như tìm ra loại vật liệu mới dễ dàng chế tạo hơn và giá thành thấp hơn.

Bên cạnh FGC cốt sợi, một loại FGC có thành phần là cốt liệu nhẹ, thay đổi theo chiều dày đã được nghiên cứu và ứng dụng vào việc sản xuất bê tông cho hầm qua sông (ứng dụng cho lớp bê tông đốt hầm) với mục đích là hạn chế tối đa lượng xi măng sử dụng [5]. Río O. và cộng sự [5] đã nghiên cứu sản xuất ra FGC với 3 lớp bê tông kết hợp với nhau (lớp trên là lớp chống nước, lớp dưới là lớp chống lửa và lớp giữa là lớp chịu lực). Do chức năng riêng biệt của từng lớp bê tông trong FGC nên so với bê tông thông thường (tức bê tông một lớp), FGC vẫn đảm bảo về mặt kết cấu nhưng lại tiết kiệm được 20% lượng xi măng sử dụng so với bê tông thông thường [5]. Tuy vậy, việc áp dụng FGC vào sản xuất bê tông cho hầm qua sông còn khá hạn chế do bê tông thông thường được đưa vào sản xuất để đúc hầm đã hình thành và tồn tại hàng trăm năm nên việc áp dụng vật liệu mới để sản xuất bê tông hầm là rất khó khăn. Do đó, cần phải nghiên cứu thêm nhiều loại FGC

**Bảng 2.**

Thành phần hóa (%) của xi măng và tro bay.

Thành phần (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	MKN
Xi măng	24,0	4,0	2,0	63,0	0,65	0,09	2,4	1,5	2,7
Tro bay	45,5	20,5	17,4	5,38	5,7	0,287	0,552	0,563	4,8

MKN: lượng mất khi nung

Cốt liệu nhỏ được sử dụng trong nghiên cứu này là cát sông thiên nhiên. Thành phần hạt của cát sông được thể hiện trong Hình 2. Từ Hình 2, nhận thấy thành phần hạt của cát sông nằm trong vùng phạm vi cho phép theo TCVN 7570:2006 [10]. Mô đun độ lớn (Mdl) của cát sông là 2,55. Trong khi đó, đá sử dụng trong nghiên cứu có  $D_{max} = 20$  mm và  $D_{min} = 5$  mm. Hình 3 thể hiện thành phần hạt của đá và kết quả chỉ ra rằng thành phần hạt của đá nằm vùng phạm vi cho phép, theo TCVN 7570:2006 [10]. Các chỉ tiêu vật lý của cốt liệu bao gồm cát sông và đá dăm, và sợi PP được thể hiện ở Bảng 3.

khác với thành phần vật liệu đơn giản hơn, dễ sản xuất hơn để có thể tìm ra loại FGC có tính ứng dụng cao hơn. Trong khi đó, việc phát triển và nghiên cứu loại FGC ở Việt Nam vẫn còn rất hạn chế.

Vì vậy, mục đích của nghiên cứu này là đánh giá các đặc trưng cơ học của FGC được chế tạo từ hai lớp bê tông sử dụng bê tông tro bay kết hợp sợi PP, đây là những nguồn vật liệu tại địa phương, cùng với đó là đánh giá vai trò phân lớp chức năng hiệu quả nhất của FGC nhằm vừa đảm bảo về mặt kỹ thuật vừa mang lại hiệu quả về mặt kinh tế, tiết kiệm tài nguyên và bảo vệ môi trường.

**2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm:**

**2.1. Vật liệu thí nghiệm:**

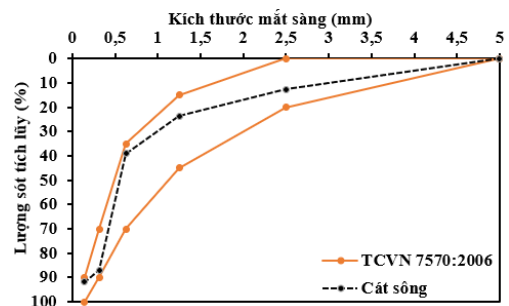
Nghiên cứu này sử dụng xi măng Portland loại I (không chứa phụ gia vô cơ hoạt tính) của công ty Nghi Sơn. Các chỉ tiêu cơ lý và thành phần hóa của loại xi măng này phù hợp với TCVN 2682:2009 [8] và được thể hiện ở Bảng 1 và 2. Tro bay sử dụng trong nghiên cứu là tro bay loại F phù hợp TCVN 10302:2014 [9] và được lấy từ nhà máy nhiệt điện Duyên Hải có khối lượng riêng và thành phần hóa thể hiện ở Bảng 1 và 2.

**Bảng 1.**

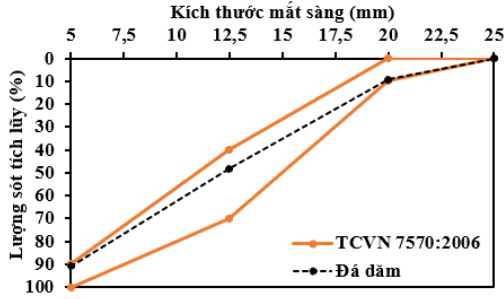
Chỉ tiêu cơ lý của xi măng và tro bay.

Chỉ tiêu	Xi măng	Tro bay
Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	3,1	2,2
Cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi (N/mm <sup>2</sup> )	59,2	-
Độ mịn lọt qua sàng 0,09 mm (%)	0,3	7,0

-: Không thí nghiệm



**Hình 2.** Thành phần hạt của cát sông.



Hình 3. Thành phần hạt của đá dăm.

Bảng 3.

Chỉ tiêu vật lý của cốt liệu và sợi PP.

Chi tiêu	Cỡ hạt / chiều dài (mm)	Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )
Cát sông	0,14-5	2,65
Đá dăm	5-20	2,69
Sợi PP	6-12	0,91

Ngoài ra, nước (W) dùng để trộn hỗn hợp bê tông phù hợp với TCVN 4506:2012 [11]. Phụ gia Sikament R4 gốc lignosulfonat của hãng SIKA được sử dụng nhằm cải thiện độ sụt của hỗn hợp bê tông đối chứng thỏa mãn yêu cầu thiết kế.

2.2. Thiết kế cấp phối:

Cấp phối bê tông đối chứng (bê tông thường) được thiết kế theo ACI 308R-01 [12] với độ sụt thiết kế là  $8 \pm 2$  cm và cường độ bê tông thiết kế là 70 N/mm<sup>2</sup>. Để đánh giá chỉ tiêu cơ học của FGC một cách hiệu quả nhất, tro bay được sử dụng thay thế xi măng với hàm lượng tối ưu nhất là 20 % được tham khảo từ các nghiên cứu trước [13-15], và sợi PP với hàm lượng 0,3 % theo thể tích bê tông, đây là hàm lượng tối ưu dành cho kết cấu và về mặt kinh tế được tham khảo theo các nghiên cứu trước [16, 17]. Bảng 4 thể hiện các cấp phối bê tông trong nghiên cứu này.

Bảng 4.

Cấp phối bê tông.

Cấp phối bê tông	W (lít)	C (kg)	Fa (kg)	CS (kg)	RS (kg)	PP (%V <sub>c</sub> )	PP (kg)	Ad (lít)
N	183	508	0	969	772	0	0	4,06
FA	183	406	102	969	742	0	0	4,06
NP	183	508	0	969	772	0,3	0,008	4,06
FAP	183	406	102	969	742	0,3	0,008	4,06

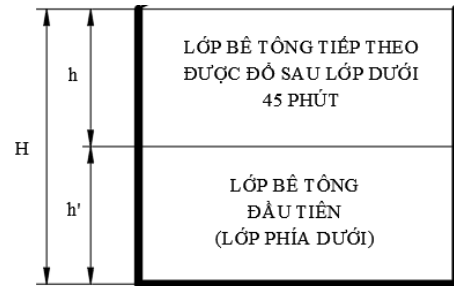
Ghi chú:

W: nước; C: xi măng; Fa: tro bay; CS: đá dăm; RS: cát sông; PP: sợi polypropylene; Ad: phụ gia Sikament R4; V<sub>c</sub>: thể tích bê tông.

N: bê tông thường; FA: bê tông có 20 % tro bay; NP: bê tông thường chứa 0,3 % sợi PP; FAP: bê tông có 20 % tro bay và 0,3 % sợi PP.

2.3. Quy trình nhào trộn, thử độ sụt và đúc mẫu:

Quy trình nhào trộn FGC bao gồm hai giai đoạn, với giai đoạn 1 là giai đoạn tiến hành trộn, thử độ sụt và đổ bê tông cho lớp bên dưới của FGC và giai đoạn 2 là giai đoạn tiến hành trộn, thử độ sụt và đổ bê tông cho lớp bên trên của FGC, được thể hiện trong Hình 4. Quy trình thực hiện theo các bước sau: cát, xi măng và tro bay (nếu là cấp phối bê tông tro bay) được trộn trong 30 giây; tiếp theo, cho 80 % hỗn hợp nước và phụ gia Sikament R4 vào hỗn hợp khô và trộn thêm 30 giây; sau đó, đá dăm được đưa vào máy trộn và nhào trộn trong thời gian 60 giây; và cuối cùng cho đều sợi PP (đối với hỗn hợp sử dụng sợi) cùng với lượng nước và phụ gia còn lại vào máy trộn và nhào trộn thêm 60 giây (lưu ý rằng quá trình nhào trộn hỗn hợp bê tông không quá 180 giây). Sau khi nhào trộn, độ sụt của hỗn hợp bê tông được xác định theo TCVN 3106:1993 [18] và sau đó, hỗn hợp bê tông được cho vào khuôn theo đúng chiều cao đã quy định. Quy trình đúc mẫu bê tông được thực hiện theo TCVN 3105:1993 [19]. Giai đoạn 2 là giai đoạn tiến hành trộn hỗn hợp bê tông cho lớp bê tông phía trên của mẫu FGC, với quá trình nhào trộn tương tự như lớp bê tông phía dưới, và sau khi thí nghiệm độ sụt, hỗn hợp bê tông được đổ vào lớp trên của khuôn (lưu ý: thời gian đổ lớp trên bắt đầu sau khi lớp dưới được cho vào khuôn là 45 phút, đây là khoảng thời gian của bê tông được xác định ở mục 2.4).



Hình 4. Cách thức đổ theo từng lớp cho mẫu FGC (với  $h = h'$ ).

Trong nghiên cứu này, quy trình trên được thực hiện và đổ vào các khuôn thép lập phương có kích thước 100 × 100 × 100 mm đã được làm sạch và bôi dầu khuôn để xác định cường độ chịu nén; được đổ vào khuôn dầm có kích thước 100 × 100 × 400 mm để xác định cường độ chịu kéo khi uốn, và được đổ vào khuôn trụ với đường kính  $d = 150$  mm và chiều cao  $h = 63$  mm để xác định độ va đập của mẫu FGC.

2.4. Thí nghiệm xác định thời gian ninh kết của hỗn hợp bê tông:



Hình 5. Máy HG80s.

Với mục đích để hai lớp của FGC có thể liên kết tốt nhất với nhau khi được đổ vào khuôn tại thời điểm khác nhau, thiết bị HG80s (Hình 5) có đồng hồ đo điện trở được sử dụng để xác định thời gian bắt đầu và kết thúc ninh kết của hỗn hợp bê tông. Quy trình đo được thực hiện theo sự tham khảo tiêu chuẩn TCVN 9338:2012 [20] và tiêu chuẩn TQ GB.T 50080:2016 [21].

**2.5. Quá trình dưỡng hộ:**

Sau khi nhào trộn và đổ vào khuôn, mẫu được phủ bằng các tấm nilon và phủ khăn ẩm trong vòng 24 giờ. Sau đó, mẫu được lấy ra khỏi khuôn thép và được cho vào trong bể dưỡng hộ nước cho đến đủ ngày tuổi thí nghiệm.

**2.6. Thí nghiệm cường độ chịu nén:**

Cường độ chịu nén của ba mẫu bê tông của mỗi cấp phối ở mỗi độ tuổi được tiến hành kiểm tra bằng máy nén gia tải tự động theo TCVN 3118:1993 [22], cụ thể ở các độ tuổi 3, 7 và 28 ngày và giá trị được quy đổi về mẫu bê tông 150 × 150 × 150 mm.

**2.7. Kiểm tra cường độ chịu kéo khi uốn:**

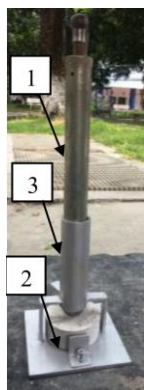
Cường độ chịu kéo khi uốn của các mẫu bê tông đầm (Hình 6) ở 7 và 28 ngày tuổi được tiến hành kiểm tra bằng thiết bị thí nghiệm đa năng INSTRON theo tiêu chuẩn TCVN 3119:1993 [23].



Hình 6. Mẫu đầm FGC.

**2.8. Thí nghiệm độ va đập:**

Độ va đập của mẫu bê tông trụ (với kích thước d = 150 mm và h = 63 mm) ở tuổi 28 ngày được xác định qua thí nghiệm tải trọng tác động theo tiêu chuẩn ACI 544.2R-89 [24] với dụng cụ va đập theo tiêu chuẩn (Hình 7). Dụng cụ bao gồm: (1) búa thép nặng 6,43 kg có chiều cao rơi tối đa 497 mm, (2) bi thép có đường kính 63,5 mm và (3) bộ khung cố định mẫu thí nghiệm có trục dẫn cho búa.



Hình 7. Dụng cụ va đập.

**3. Kết quả nghiên cứu:**

**3.1. Thời gian ninh kết của hỗn hợp bê tông:**

Bảng 5 thể hiện thời gian ninh kết của bê tông thường (N) và bê tông tro bay (FA). Nhận thấy rằng bê tông FA có thời gian bắt đầu và kết thúc ninh kết chậm hơn bê tông N do phản ứng pozzolan của tro bay chậm hơn so với phản ứng hydrat hóa của xi măng [14]. Bên cạnh đó, khoảng thời gian từ 40 đến 45 phút được chọn là thời điểm hỗn hợp bê tông bắt đầu đạt được khả năng chịu lực 0,2 N/mm<sup>2</sup> xác định theo tiêu chuẩn TQ GB.T 50080:2016 [21]. Vì vậy, 45 phút là khoảng thời gian chờ được chọn để tiến hành đổ bê tông lớp trên vào khuôn nhằm đảm bảo cho hai lớp của FGC có sự liên kết tốt với nhau.

**Bảng 5.**

Thời gian ninh kết của bê tông.

	Thời gian bắt đầu ninh kết (phút)	Thời gian kết thúc ninh kết (phút)
Lực kháng xuyên yêu cầu (N/mm <sup>2</sup> )	≥ 3,5	≥ 28
N	240	417
FA	252	445

Ghi chú:

N: Hỗn hợp bê tông thường; FA: Hỗn hợp bê tông tro bay.

**3.2. Độ sụt:**

Bảng 6 thể hiện kết quả thí nghiệm độ sụt của các cấp phối bê tông. Nhận thấy rằng độ sụt của tất cả hỗn hợp bê tông không có tro bay và sợi PP đều có độ sụt nằm trong khoảng từ 6 đến 10 cm, thỏa mãn với độ sụt thiết kế (8 ± 2 cm). Việc thêm sợi PP vào bê tông N có góp phần làm giảm độ sụt, nguyên nhân là do sự phân bố đều và sự dẻo dai của sợi, cũng như sợi PP tạo thành mạng liên kết giữa các phần tử của hỗn hợp bê tông nên làm cho độ sụt (tính công tác) của hỗn hợp bê tông giảm [17]. Trong khi đó, khi thay thế xi măng bằng tro bay, độ sụt của hỗn hợp bê tông FA tăng lên đáng kể. Nguyên nhân là do tro bay có dạng hình cầu nên đã làm tăng ma sát trượt trong hỗn hợp và từ đó, làm độ sụt của hỗn hợp bê tông tăng [13].

**Bảng 6.**

Độ sụt (SN) của các cấp phối.

STT	Ký hiệu mẫu	SN1 (cm)	SN2 (cm)
1	N/N	8,0	8,5
2	NP/NP	6,0	7,0
3	N/NP	8,0	6,0
4	FA/FA	14,0	16,0
5	FAP/FAP	12,0	11,0
6	FA/FAP	14,0	12,0

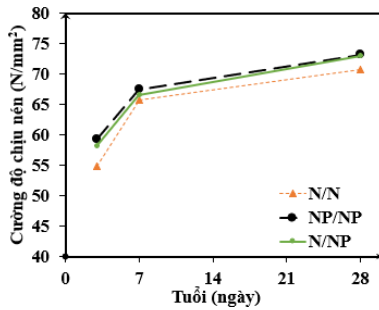
Ghi chú:

N: bê tông thường; FA: bê tông có 20 % tro bay; NP: bê tông thường chứa 0,3 % sợi PP; FAP: bê tông có 20 % tro bay và 0,3 % sợi PP

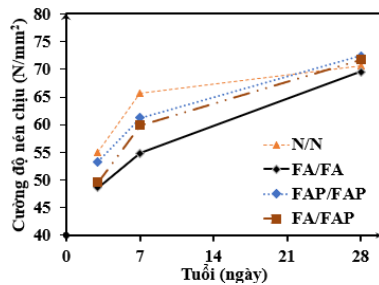
SN1: độ sụt của hỗn hợp bê tông lớp trên; SN2: độ sụt của hỗn hợp bê tông lớp dưới

3.3. Cường độ chịu nén:

Hình 8 thể hiện cường độ chịu nén của FGC sử dụng bê tông thường có và không có sợi PP. Kết quả thu được cường độ chịu nén của FGC sử dụng bê tông thường có sợi PP (tức NP/NP và N/NP) ở 3 ngày tuổi cao hơn lần lượt 8,0 % và 6,0 % so với FGC sử dụng bê tông thường không có sợi PP (N/N), ở 7 ngày tuổi cao hơn lần lượt 2,8 % và 1,3 % so với mẫu N/N, và ở 28 ngày tuổi cao hơn lần lượt 3,5 % và 3,4 % so với mẫu N/N. Điều này chứng tỏ rằng việc sử dụng sợi PP không cải thiện đáng kể cường độ chịu nén của mẫu FGC, tương tự như mẫu bê tông truyền thống được đổ một lớp [24, 25]. Trong khi đó, cường độ chịu nén của mẫu N/NP và NP/NP xấp xỉ nhau, chứng tỏ rằng việc bố trí sợi PP ở lớp dưới của FGC vẫn đảm bảo khả năng chịu nén tương đương khi so với việc bố trí sợi PP trên tổng toàn bộ chiều cao mẫu FGC; từ đó, có thể tiết kiệm hàm lượng sợi PP sử dụng.



Hình 8. Cường độ chịu nén của FGC sử dụng bê tông thường có và không có sợi PP.



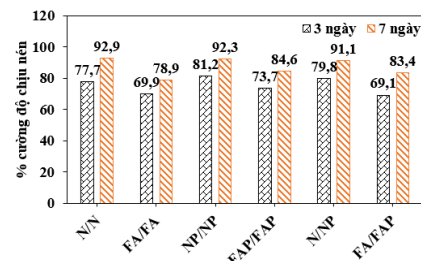
Hình 9. Cường độ chịu nén của FGC sử dụng bê tông tro bay có và không có sợi PP so sánh với FGC sử dụng bê tông thường không sợi PP (N/N).

Hình 9 thể hiện cường độ chịu nén của FGC sử dụng bê tông tro bay có và không có sợi PP được so sánh với FGC sử dụng bê tông thường không sợi PP (N/N). Nhận thấy cường độ chịu nén của FGC sử dụng bê tông tro bay không sợi PP (FA/FA) thấp hơn 13,1 % ở 3 ngày tuổi, 19,6 % ở 7 ngày tuổi và 0,7 % ở 28 ngày tuổi khi so với cường độ chịu nén của FGC sử dụng bê tông thường không sợi PP (N/N). Trong khi đó, FGC sử dụng bê tông tro bay có sợi PP (FAP/FAP) có cường độ chịu nén tại 3, 7 và 28 ngày tuổi được cải thiện với giá trị tăng lần lượt

9,6 %, 11,5 % và 4,1 % so với FGC sử dụng bê tông tro bay không có sợi PP (FA/FA). Mẫu FGC sử dụng tro bay và lớp dưới có sợi PP (FA/FAP) có cường độ chịu nén tại 3, 7 và 28 ngày tuổi được cải thiện nhẹ, với giá trị tăng lần lượt 2,5 %, 8,9 % và 3,2 % so với FGC sử dụng bê tông tro bay không có sợi PP (FA/FA), được thể hiện ở Hình 9.

Nguyên nhân bê tông tro bay có tốc độ phát triển chậm hơn so với bê tông thông thường ở 3 và 7 ngày tuổi là vì ở giai đoạn đầu của quá trình hydrat hóa, phản ứng pozzolan của tro bay chậm hơn so với phản ứng hydrat hóa của xi măng, tức là sự có mặt tro bay trong bê tông đã dẫn đến sự phát nhiệt thủy hóa chậm và thấp hơn nhiều so với mẫu bê tông không sử dụng tro bay, đồng thời đã làm giảm sự chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa tâm mẫu bê tông và nhiệt độ môi trường xung quanh; do đó, làm cường độ phát triển chậm đối với bê tông truyền thống sử dụng tro bay (tức bê tông tro bay được đổ một lớp) [14, 27] và đối với bê tông FGC có thành phần bê tông tro bay trong bài nghiên cứu này. Hơn thế, cường độ chịu nén của mẫu FA/FAP và FAP/FAP xấp xỉ nhau ở 28 ngày tuổi, chứng tỏ rằng việc bố trí sợi PP ở lớp dưới của FGC phù hợp để đảm bảo khả năng chịu nén tương đương với việc bố trí sợi PP trên tổng toàn bộ chiều cao mẫu FGC sử dụng bê tông tro bay; từ đó, có thể tiết kiệm hàm lượng sợi PP sử dụng.

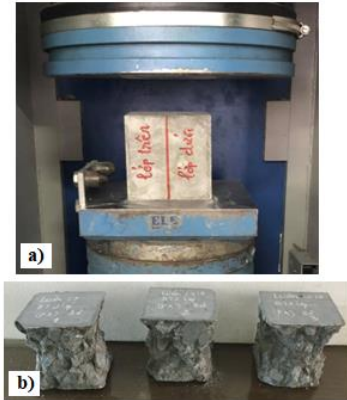
Hình 10 thể hiện phần trăm cường độ chịu nén của FGC ở 3 và 7 ngày tuổi so với 28 ngày tuổi. Nhận thấy rằng hầu hết cường độ chịu nén của FGC sử dụng bê tông thường (N/N, NP/NP và N/NP) ở 3 và 7 ngày tuổi đạt khoảng 77,7 % đến 92,9 % so với 28 ngày tuổi. Khi sử dụng 20 % hàm lượng tro bay thay thế xi măng, cường độ chịu nén của FGC (FA/FA, FAP/FAP và FA/FAP) ở 3 và 7 ngày tuổi đạt khoảng 69,1 % đến 84,6 %. Điều đó chứng tỏ cường độ chịu nén ban đầu của FGC sử dụng bê tông tro bay thấp hơn FGC sử dụng bê tông thường. Đây cũng là mặt hạn chế của việc sử dụng tro bay trong bê tông đã được đề cập trong các nghiên cứu trước đây về bê tông tro bay truyền thống (tức bê tông được đổ một lớp) [13-15]. Kết quả mới trong bài nghiên cứu này là đã chứng minh về hiệu quả của việc bổ sung 0,3 % sợi PP đã góp phần cải thiện nhẹ cường độ chịu nén của FGC tại 3, 7 và 28 ngày tuổi khi so với FGC không sử dụng sợi PP, thể hiện ở Hình 9. Sự gia cường sợi PP đã cải thiện cường độ của bê tông thường một lớp cũng được nhắc đến ở nghiên cứu của Nguyen K.S. [26].



Hình 10. Phần trăm cường độ chịu nén của FGC ở 3 và 7 ngày tuổi so với 28 ngày tuổi.

Để đánh giá sự liên kết giữa hai lớp của FGC, chiều nén của mẫu FGC được lựa chọn là chiều vuông góc với phần liên kết giữa hai lớp của FGC (Hình 11(a)). Kết quả thu được là sau khi bê tông bị nén đến tới hạn thì có sự phá hoại tương tự như bê tông truyền thống (tức bê

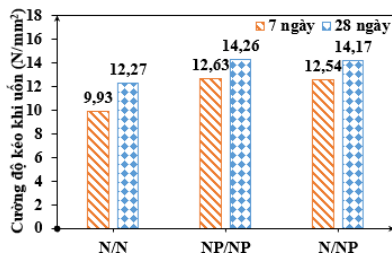
tông được đổ một lớp), và sự liên kết giữa hai lớp của FGC được quan sát không bị phá hủy hay đứt rời (Hình 11(b)). Điều này chứng tỏ rằng việc nhào trộn và quy trình đổ các lớp bê tông dựa trên thời gian của lớp bê tông bên dưới bắt đầu đạt được khả năng chịu lực 0,2 N/mm<sup>2</sup> của FGC được đề xuất trong bài báo này là hiệu quả.



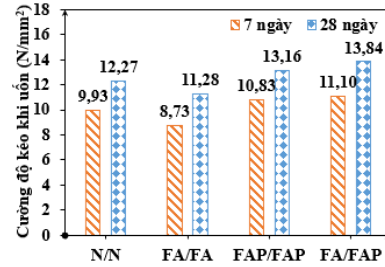
**Hình 11.** (a) Chiếu nén của mẫu FGC; (b) hình dáng mẫu FGC bị phá hủy sau khi nén.

3.4. Cường độ chịu kéo khi uốn:

Hình 12 và 13 thể hiện cường độ chịu kéo khi uốn của FGC. Cường độ chịu kéo khi uốn của FGC sử dụng bê tông thường có sử dụng sợi PP (NP/NP và N/NP) ở 7 ngày tuổi cao hơn lần lượt 27,2 % và 26,3 % so với mẫu FGC sử dụng bê tông thường không sử dụng sợi PP (N/N), và ở 28 ngày tuổi cao hơn lần lượt 16,2 % và 15,5 % so với mẫu N/N, thể hiện ở Hình 12. Trong khi đó, FGC sử dụng bê tông tro bay có kết hợp sợi PP (FAP/FAP và FA/FAP) ở 7 ngày tuổi so với cấp phối sử dụng bê tông tro bay không có sợi PP (FA/FA) đạt cường độ cao hơn lần lượt 24,1 % và 27,1 %, và ở 28 ngày tuổi cao hơn lần lượt 16,7 % và 22,7 % so với mẫu FGC không sợi PP (FA/FA), thể hiện ở Hình 13. Từ kết quả Hình 12 và 13, nhận thấy được khi bổ sung sợi PP, mẫu FGC có cường độ chịu kéo khi uốn cao hơn so với mẫu FGC không có sợi PP. Nguyên nhân chính là sợi phân bố đều vào bên trong bê tông, và khi bê tông chịu lực tác dụng và bắt đầu xuất hiện các vết nứt nhỏ, vai trò của sợi trong hệ nền phát huy khả năng liên kết và cải thiện khả năng chịu lực cho bê tông [16, 28].



**Hình 12.** Cường độ chịu kéo khi uốn của FGC sử dụng bê tông thường có và không có sợi PP.

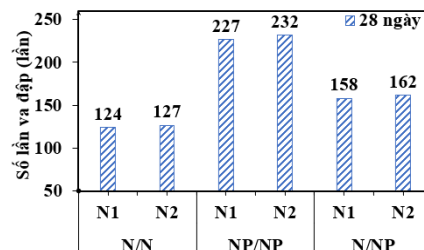


**Hình 13.** Cường độ chịu kéo khi uốn của FGC sử dụng bê tông tro bay có và không có sợi PP so sánh với FGC sử dụng bê tông thường không sợi PP (N/N).

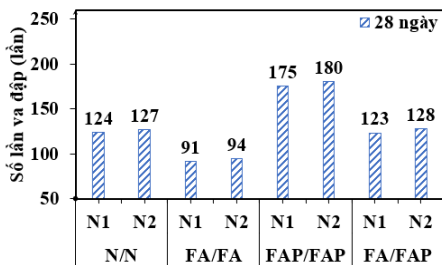
Hơn thế, FGC sử dụng tro bay kết hợp sợi PP (FAP/FAP và FA/FAP) đều có cường độ chịu kéo khi uốn cao hơn FGC sử dụng bê tông thường không có sợi PP (N/N), cụ thể cao hơn lần lượt 9,1 % và 11,8 % ở 7 ngày tuổi, và 7,3 % và 12,8 % ở 28 ngày tuổi, thể hiện ở Hình 13. Bên cạnh đó, mẫu FA/FAP có cường độ chịu kéo khi uốn ở 7 ngày tuổi cao hơn 2,5 % và ở 28 ngày tuổi cao hơn 5,1 % so với mẫu FAP/FAP. Trong khi đó, mẫu N/NP có cường độ chịu kéo khi uốn ở 7 và 28 ngày tuổi xấp xỉ mẫu NP/NP. Kết quả mới của nghiên cứu này cho thấy rằng sợi PP được bố trí hiệu quả khi chỉ bố trí lớp bên dưới của dầm FGC. Nguyên nhân là do kết cấu dầm khi chịu tải trọng tập trung (chịu uốn) thì dầm bị căng thớ dưới; vì thế, sự phá hoại gây ra cũng từ thớ dưới lên thớ trên. Do đó, việc bố trí sợi tập trung vào vùng dầm bị phá hoại đầu tiên đã giúp giảm thiểu được sự xuất hiện vết nứt vi mô nhỏ ban đầu do lực căng khi uốn gây ra và từ đó, làm cải thiện cường độ chịu kéo khi uốn của toàn dầm. Việc sợi PP giúp tăng sự dẻo dai và hạn chế vết nứt cũng được thấy ở nghiên cứu của Luong C.T và cộng sự [17] với mẫu bê tông thông thường 1 lớp.

3.5. Độ va đập:

Hình 14 và 15 thể hiện độ va đập của FGC sử dụng bê tông thường và bê tông tro bay có và không có sợi PP; trong đó: N1 là số lần va đập đến khi bắt đầu xuất hiện vết nứt và N2 là số lần va đập đến khi mẫu bị phá hoại hoàn toàn. Kết quả cho thấy việc bố trí sợi PP trong bê tông đã giúp cải thiện độ va đập của FGC. Cụ thể: mẫu NP/NP và N/NP có độ va đập tăng lần lượt 82,7 % và 27,6 % so với mẫu N/N ở 28 ngày tuổi (Hình 14); trong khi đó, độ va đập của mẫu FAP/FAP và FA/FAP tăng lần lượt 91,5 % và 36,2 % so với mẫu FA/FA ở 28 ngày tuổi, và tăng lần lượt 41,7 % và 0,8 % khi so với cấp phối N/N ở 28 ngày tuổi (Hình 15).



**Hình 14.** Độ va đập của FGC sử dụng bê tông thường có và không có sợi PP.



**Hình 15.** Độ va đập của FGC sử dụng bê tông tro bay có và không có sợi PP so sánh với FGC sử dụng bê tông thường không sợi PP (N/N).

Từ kết quả thí nghiệm cho thấy, việc kiểm tra độ va đập của FGC sử dụng bê tông thường và bê tông tro bay khi được gia cường bằng sợi PP đều được cải thiện đáng kể. Kết quả này cũng giống với các công bố về độ va đập đối với bê tông thông thường 1 lớp được gia cường bằng sợi PP [31] và sợi thép [32].

#### 4. Kết luận:

Dựa trên kết quả thu được từ các thí nghiệm chỉ tiêu cơ học của bê tông phân loại chức năng (FGC), một số kết luận được đưa ra như sau:

Việc nhào trộn và chế tạo FGC có hai lớp tách biệt về thành phần và thời gian đồ giữa hai lớp này dựa vào thời gian của lớp bê tông bên dưới bắt đầu đạt được khả năng chịu lực 0,2 N/mm<sup>2</sup> là hiệu quả do quá trình thí nghiệm nén và kéo uốn cũng như độ va đập, nhận thấy rằng hai lớp này trong các mẫu FGC vẫn luôn liên kết tốt và sự phá hoại vẫn tương tự như bê tông thông thường được đổ đồng nhất một lớp.

Việc sử dụng 20 % hàm lượng tro bay thay thế xi măng kết hợp với 0,3 % hàm lượng sợi PP đã tạo ra loại FGC với lớp trên là bê tông tro bay và lớp dưới là bê tông tro bay có sợi PP (FA/FAP) thân thiện với môi trường, hiệu quả về kết cấu và hoàn toàn có khả năng thay thế FGC với lớp trên và lớp dưới là bê tông thông thường (N/N). Đây được xem là loại vật liệu bê tông mới có khả năng áp dụng cho công trình thực tế như mặt đường bê tông xi măng, bê tông bản mặt cầu, hay các công trình chịu nén và uốn đồng thời như dầm cầu, dầm nhà cao tầng.

#### Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian và phương tiện vật chất cho nghiên cứu này. Chúng tôi cũng xin gửi lời cảm ơn đến Trần Anh Tuấn và Huỳnh Tấn Thiện, sinh viên ngành Công nghệ Kỹ thuật Vật liệu Xây dựng đã cùng thực hiện thí nghiệm này.

#### Tài liệu tham khảo:

[1]. World Business Council for Sustainable Development. *The cement sustainability initiative. Recycling concrete. Executive summary.* 0-8. <http://docs.wbcsd.org/2009/07/CSI-RecyclingConcrete-Summary.pdf>, truy cập ngày 20/05/2021.

[2]. International Energy Agency. *Technology roadmap low-carbon transition in the cement industry.* 0-66. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementInd>

[ustry.pdf](#), truy cập ngày 20/05/2021.

[3]. Chan R., Liu X., Galobardes I. (2020). Parametric study of functionally graded concretes incorporating steel fibres and recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 242:118186. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118186.

[4]. Liu X., Yan M., Galobardes I., Sikora K. (2018). Assessing the potential of functionally graded concrete using fibre reinforced and recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*, 171:793–801. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.202.

[5]. Rfo O., Nguyen V.D., Nguyen K. (2015). Exploring the potential of the functionally graded SCC for developing sustainable concrete solutions. *J. Adv. Concr. Technol.*, 13(3):193–204. doi: 10.3151/jact.13.193.

[6]. Torelli G., Fernández M.G., Lees J.M. (2020). Functionally graded concrete: Design objectives, production techniques and analysis methods for layered and continuously graded elements. *Constr. Build. Mater.*, 242:118040. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118040.

[7]. Choudhary S., Chaudhary S., Jain A., Gupta R. (2020). Assessment of effect of rubber tyre fiber on functionally graded concrete. *Mater. Today Proc.*, 28(3): 1496–1502. doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.830.

[8]. TCVN 2682:2009. *Xi Măng Pooc lãng - Yêu cầu kỹ thuật.* Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[9]. TCVN 10302:2014. *Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng.* Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[10]. TCVN 7570:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật.* Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[11]. TCVN 4506:2012. *Nước cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật.* Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[12]. ACI 308R-01 R08. (2008). *Guide to curing concrete.* American Concrete Institute, American.

[13]. Hoang K. (2018). *Đánh giá chỉ tiêu cơ lý của bê tông tro bay khi kết hợp phụ gia Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.* Trường Đại học Bách Khoa Tp. Hồ Chí Minh.

[14]. Nguyen C.T., Nguyen V.T. (2015). *Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng hỗn hợp phụ gia khoáng silica fume và tro bay sẵn có ở Việt Nam.* Trường Đại học Xây Dựng.

[15]. Tran L.H. (2019). *Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến các tính chất của xi măng và đá xi măng.* Trường Đại học Bách Khoa Tp. Hồ Chí Minh.

[16]. Blazy J., Blazy R. (2021). Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces. *Case Studies in Constr. Mater.*, 14:e00549. doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00549.

[17]. Luong C.T., Nguyen H.A. (2019). *Nghiên cứu ảnh hưởng của sợi polypropylene đến cường độ nén và độ va đập của bê tông làm việc trong môi trường nhiệt độ 250 °C.* Trường Đại học Bách Khoa Tp. Hồ Chí Minh.

[18]. TCVN 3106:1993. *Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp thử độ sụt.* Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[19]. TCVN 3105:1993. *Hỗn hợp bê tông nặng và bê tông nặng - Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử.* Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[20]. TCVN 9338:2012. *Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp xác định thời gian đông kết.* Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[21]. GB.T 50080-2016. *Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete.* China standard, China.

[22]. TCVN 3118:1993. *Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ nén.* Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[23]. TCVN 3119:1993. *Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ kéo khi uốn.* Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[24]. ACI 544.2R-89. (1999). *Measurement of properties of fiber reinforced concrete.* American Concrete Institute, American.

[25]. Tran B.V., Le X.L. (2015). Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến các tính chất của bê tông tính năng siêu cao. *Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng, Bộ Xây dựng*, 2(7): 1-8.

- [26]. Nguyen K.S. (2015). Ảnh hưởng của cốt liệu sợi gia cường đến tính chịu nhiệt cháy của vật liệu bê-tông cường độ cao mác 600. *Trường Đại học Bách Khoa Tp. Hồ Chí Minh*. doi: <https://www.researchgate.net/publication/327069837>.
- [27]. Tran V.M., Cao N.T. (2013). Nghiên cứu đặc trưng nhiệt của bê tông sử dụng hàm lượng tro bay lớn. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 3:1-8.
- [28]. Nguyen V.H., Trinh M.D., Ninh X.T., Nguyen Q.A. (2021). Nghiên cứu sử dụng sợi PVA và sợi bazan trong sản xuất tấm phẳng xi măng-sợi. *Tạp chí Vật liệu & Xây dựng*, 1: 5-9. <https://bom.to/fnqvVExnETv7L>.
- [29]. TCVN 272:2005. *Tiêu chuẩn thiết kế cầu*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [30]. Le V.P. (2018). *Nghiên cứu tính toán thiết kế dầm cầu bê tông cốt thép sử dụng phần mềm SAP2000*. Trường Đại học Xây Dựng.
- [31]. Prasad N., Murali G. (2021). Exploring the impact performance of functionally-graded preplaced aggregate concrete incorporating steel and polypropylene fibres. *J. Build. Eng.*, 35: 102077. doi: 10.1016/j.jobe.2020.102077.
- [32]. Ramadoss P., Nagamani K. (2014). Impact characteristics of high-performance steel fiber reinforced concrete under repeated dynamic loading. *Int. J. Civ. Eng.*, 12(4): 0-8. <http://ijce.iust.ac.ir/article-1-872-en.pdf>.