NGHIÊN CỨU CÁC TÍNH CHẤT CỦA BÊ TÔNG CỐT SỢI POLYPROPYLENE DÙNG CHO CÔNG NGHỆ IN 3D

Trần Văn Miền[1,2*], Đặng Thị Thúy Hằng[3], Nguyễn Thị Hồng Nhung[1,2], Nguyễn Thành Đạt[1,2]

[1] Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh

[2] Đại Học Quốc Gia TP.HCM

[3] Khoa xây dựng, Trường Cao đẳng Giao thông Vận tải Trung ương 6

Nhận ngày 21/04/2021, thẩm định ngày 29/4/2021, chỉnh sửa ngày 29/05/2021, chấp nhận đăng 24/06/2021

Tóm tắt

In bê tông 3D là một sự phát triển công nghệ cao trong công nghệ xây dựng. Ưu điểm chính của kỹ thuật này là xây dựng với tốc độ nhanh, không cần ván khuôn. Nguyên vật liệu chế tạo hỗn hợp bê tông in 3D gồm: Xi măng, cát, nước, phụ gia siêu dẻo, phụ gia khoáng hoạt tính gồm silicafume và tro bay. Ngoài ra, còn sử dụng sợi polypropylen (Sợi PP) giúp cải thiện các tính chất của hỗn hợp bê tông, cải thiện đáng kể khả năng liên kết các phần tử trong quá trình đùn, làm cho hỗn hợp bê tông in 3D khi đùn không bị gãy, không bị đứt đoạn. Hỗn hợp bê tông có sử dụng 1 % sợi PP; tỷ lệ cát so với chất kết dính bằng 1:1; tỷ lệ nước so với hỗn hợp chất kết dính từ 0,32 đến 0,34 phù hợp để chế tạo bê tông in 3D.

Từ khóa: *Bê tông in 3D, khả năng làm việc, lưu biến, khả năng in, ổn định hình dạng, sợi polypropylen.*

Abstract

3D concrete printing technology is a high-tech development in concrete construction. The main advantage of this technique is the faster construction because of the formwork unnecessity. Materials for 3D concrete printing included: cement, sand, water, chemical additives, activated mineral additives, including silica fume and fly ash. In addition, the use of polypropylene fiber (PP fiber) improved the properties of the concrete, especially in the bonding ability of the elements during extrusion, resulting in continuous 3D filament without any break or interruption. Concrete mixtures using 1 % PP fiber, 1:1 sand to binder ratio, and the water to binder ratio from 0.32 to 0.34 were found to be suitable for making 3D concrete printing.

Keywords: *3D concrete printing, workability, rheology, printability, shape stability, polypropylene fiber.*

1. Giới thiệu

Bê tông được sử dụng trên toàn thế giới như là một trong những vật liệu xây dựng chính, cả tại chỗ và đúc sẵn. Thông thường, trong xây dựng bằng bê tông cốt thép có thể được chia thành ba thành phần: bê tông, ván khuôn và cốt thép. Ván khuôn có thể chiếm từ 35 % đến 54 % tổng chi phí xây dựng và tiêu tốn từ 50 % đến 75 % tổng thời gian thi công. Ngoài ra ngành công nghiệp xây dựng tạo ra một lượng lớn chất thải xây dựng. Bằng việc áp dụng công nghệ in bê tông 3D sẽ có thể giảm chất thải xây dựng, vì lượng bê tông trộn được kiểm soát cẩn thận trong hệ thống tự động, các cấu trúc bê tông in 3D có khả năng tiết kiệm chi phí xây dựng, cải thiện năng suất và trên hết, có thể hạn chế tác động môi trường bằng cách sử dụng ít vật liệu hơn và tạo ra ít chất thải hơn. In ba chiều (3D Printing – 3DP) lần đầu tiên được giới thiệu vào năm 1987 như là một phương tiện tạo mẫu nhanh, nguyên tắc cơ bản là sản xuất bồi đắp (additive manufacturing - AM), là một phương thức chế tạo sản phẩm bằng cách "đắp" từng lớp vật liệu lên nhau, mô phỏng theo thiết kế đã được vẽ sẵn trên phần mềm CAD (Computer-Aided Design)[1]. In bê tông 3D là một sự phát triển công nghệ cao mới nổi trong công nghệ xây dựng. Ưu điểm chính của kỹ thuật này là xây dựng với tốc độ nhanh chóng, không có ván khuôn, ít lao động và quan trọng là tăng sự tự do để thiết kế hình học và hình dạng phức tạp, chất thải vật liệu có thể được loại bỏ hoặc giảm đáng kể (Hình 1).

Hình 1. Một sản phẩm được tạo thành bằng công nghệ in 3D [1].

Trên Thế giới đã nghiên cứu về lĩnh vực in 3D, tòa nhà được công nghệ in 3D đầu tiên ở Châu Âu là một dự án do 3Dprinthuset xây dựng từ năm 2017[2]. Hoặc tại Tây Ban Nha, cầu đi bộ tại công viên Castilla-La Mancha ở Alcobendas, Madrid được đưa vào sử dụng năm 2016. Các nhà nghiên cứu trên thế giới đã từng bước nghiên cứu về cấp phối bê tông in 3D cũng như công nghệ in 3D. Nguyên vật liệt chế tạo hỗn hợp bê tông in 3D gồm có xi măng, cốt liệu nhỏ (cát có kích thước hạt 2 mm), phụ gia siêu dẻo, phụ gia khoáng hoạt tính là tro bay và silicafume. Ngoài ra còn sử dụng sợi polypropylen có chiều dài sợi 12 mm đường kính 0,18 mm[3]. Nguyên vật liệu được phối

trộn theo các tỷ lệ khác nhau, khảo sát các tính chất của hỗn hợp bê tông , từ đó xác định cấp phối tối ưu với mục tiêu thiết thực cho việc in, khả năng đùn thành sợi 1 lớp và nhiều lớp của hỗn hợp bê tông in 3D. Tác giả đã đưa ra kết luận sử dụng tỷ lệ N/CKD là 0,26; cát/CKD là 60/40; hàm lượng sợi polypropylen 1,2 kg/m^3; phụ gia siêu dẻo 1 %, phù hợp để chế tạo hỗn hợp bê tông in 3D[7]. Một hỗn hợp bê tông khác có sử dụng cát với c hạt 2,36 mm, sợi polypropylen chiều dài 6 mm, tỷ lệ N/CKD là 0,43 thì hỗn hợp bê tông có chứa sợi có độ ổn định hình dạng hơn so với hỗn hợp bê tông không có sợi[4].

Sợi tổng hợp polypropylene có tên khoa học là polypropylene hay còn gọi là sợi PP. Polypropylene có lợi thế của quá trình sản xuất đơn giản, độ bền cao nên được áp dụng rộng rãi nhất là trong ngành công nghiệp sản xuất bê tông. Bê tông được sản xuất với cốt sợi PP có chất lượng cao, độ bền vượt trội và giá cả cũng rất hợp lý. Sợi PP có tính bền cơ học cao, độ giãn dài thấp dễ được kéo thành sợi mảnh. Sợi không màu không mùi không vị và không độc, có độ bóng bề mặt cao, chống chịu được nhiệt độ cao hơn 100 ^{0}C. Khi trộn vào vữa bê tông, sợi này cho ra sản phẩm bê tông có chất lượng vượt trội như phân tán tốt, khả năng liên kết mạnh. Nó rất thích hợp để gia cường và tăng khả năng kháng nứt cho bê tông, đặc biệt sử dụng cho kỹ thuật bề mặt công trình, sàn, đường [5].

2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm

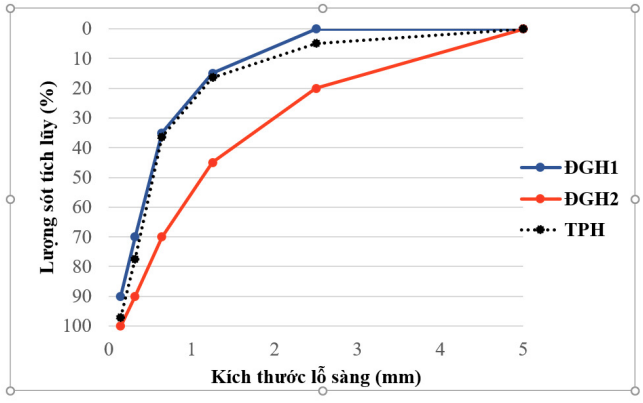
2.1. Vật liệu thí nghiệm

Hệ nguyên vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm: xi măng PC40, cát vàng, nước, phụ gia khoáng Tro bay và Silicafume, Phụ gia siêu dẻo Sikament R7N. Xi măng PC40 (Hình 4) có chỉ tiêu kỹ thuật theo Bảng 2. Cát tự nhiên sử dụng (Hình 2) với các chỉ tiêu kỹ thuật theo tiêu chuẩn TCVN 7572 – 2006, được thể hiện trong Bảng 1 Thành phần hạt của cát theo Hình 3.

Bảng 1. Chỉ tiêu kỹ thuật của cát.

Chỉ tiêu kỹ thuật (TCVN 7572:2006)	Kết quả
Khối lượng riêng (g/cm^3)	2,6
Khối lượng thể tích (g/cm^3)	1,5
Module độ lớn	2,3
Hàm lượng bụi bùn sét (%)	0,1

Hình 2. Cát tự nhiên sử dụng trong nghiên cứu.



Hình 3. Thành phần hạt của cát.

Bảng 2. Chỉ tiêu kỹ thuật của xi măng PC40.

Chỉ tiêu kỹ thuật	Kết quả
Khối lượng riêng (g/cm^3)	3,1
Khối lượng thể tích (g/cm^3)	1,05
Cường độ chịu nén R_{28} (MPa)	45,5

Hình 4. Phụ gia khoáng sử dụng cho nghiên cứu.

Phụ gia khoáng hoạt tính: silicafume và tro bay sử dụng trong nghiên cứu có chỉ tiêu cơ lý theo Bảng 3, (Hình 5).

Bảng 3. Chỉ tiêu cơ lý của phụ gia khoáng [6].

STT	Chỉ tiêu cơ lý	Kết quả
1	Khối lượng riêng (g/cm^3)	2,25
2	Chỉ số hoạt tính cường độ (%) - 7 ngày - 28 ngày	 88 105

Bảng 4. Thông số kỹ thuật của sợi polypropylene.

Thông số kỹ thuật	Kết quả
Đường kính (mm)	0,03
Chiều dài (mm)	6
Khối lượng riêng (g/cm^3)	0,91
Nhiệt độ nóng chảy (^{o}C)	160 – 170 [7]
Độ bền dẻo (MPa)	> 500 [7]

Sợi được sử dụng trong nghiên cứu là sợi polypropylene (Hình 5) nhằm giúp cải thiện một số tính chất cơ học của bê tông như cường độ chịu kéo trực tiếp, chịu kéo khi uốn, khả năng chịu va đập, giảm co ngót.

Hình 5. Sợi polypropylene.

Sợi polypropylene là có khả năng chịu được nhiệt độ cao hơn 100 ^{o}C, khả năng chống ăn mòn hóa học rất tốt, chi phí sản xuất rẻ, khả năng dẻo dai, chống va đập tốt. Thông số kỹ thuật của sợi thể hiện ở Bảng 4.

Nước sử dụng trong bê tông là nước sạch, phù hợp theo tiêu chuẩn TCVN 4506:2012, với các yêu cầu không chứa váng dầu hoặc váng mỡ, không màu, không mùi.

2.2. Phương pháp thí nghiệm

Hệ nguyên vật liệu sử dụng bao gồm cát, chất kết dính (xi măng, phụ gia khoáng), sợi polyproylene, phụ gia Sikament R7N, được tính toán dựa trên thể tích tuyệt đối của 1 m^3 hỗn hợp bê tông. Phụ gia khoáng hoạt tính sử dụng thay thế 30 % khối lượng xi măng, khối lượng phụ gia siêu dẻo là 0,5 % so với khối lượng xi măng. Sợi Polyproylene sử dụng 1 % theo khối lượng chất kết dính. Tỷ lệ nước và chất kết dính thay đổi từ 0,3 đến 0,4.

2.2.1. Đo lưu biến của hỗn hợp bê tông

Theo thuật ngữ lưu biến, sức cản của dòng chảy được gọi là ứng suất chảy, τ_0 (Pa) và hành vi kiểm soát đặc tính trong quá trình chảy được gọi là độ nhớt dẻo, μ_{pl} (Pa.s). Các thông số này có thể thu được từ các thử nghiệm lưu biến, thông qua thử nghiệm tăng trưởng căng thẳng và đường cong dòng chảy từ máy đo lưu biến ICAR Plus.

Hình 6. Thiết bị đo lưu biến.

Lắp ráp bộ máy đo lưu biến trước khi đo. Lắp cánh vào lưu lượng kế siết chặt lại bằng tay sao cho trục của cánh và máy ở vị trí thẳng đứng, chèn tấm đáy của lưu lượng kế vào khung đảm bảo rằng tấm đáy vừa vặn vào khung sau đó trượt chốt cho máy cố định, bật máy tính chạy phần mềm ICAR+ sau đó cắm cổng sạc USB từ máy đo lưu biến đến máy tính, cuối cùng cắm dây nguồn vào máy và kết nối với nguồn điện.

Thực hiện kiểm tra lưu biến: (1) trộn 15 lít hỗn hợp bê tông, sau đó đổ vào thùng chứa, (2) đặt khung máy lưu biến sau khi lắp ráp vào thùng chứa sao cho vừa các khớp, (3) điền các thông số vào máy, sau đó ấn RESET cho máy trở về trạng thái ban đầu, (4) Thực hiện bài kiểm tra độ tăng của ứng suất bằng cách ấn START, khi moment xoắn đạt giá trị cực đại ta ấn FINISH, (5) Thực hiện kiểm tra đường cong dòng chảy, nhập dữ liệu vào bảng sau đó ấn START phần mềm sẽ chạy bảng tính toán giữa moment xoắn với thời gian và bảng moment xoắn với tốc độ, sau đó phần mềm sẽ tự xuất ra số liệu ứng suất chảy và độ nhớt.

Hình 7. Đo lưu biến hỗn hợp bê tông.

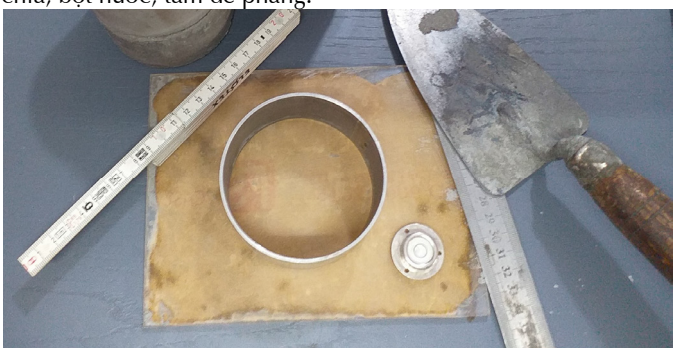
2.2.2. Độ lưu động của hỗn hợp bê tông

Kiểm tra độ lưu động của hỗn hợp bê tông theo tiêu chuẩn TCVN 3121-3: 2003.

Hình 8. Đo độ lưu động của hỗ hợp bê tông.

2.2.3. Độ bền ướt

Xác định độ bền ướt nhằm đánh giá sự ổn định hình dạng của hỗn hợp giữa các lớp in. Tính ổn định hình dạng dựa trên khả năng giữ được trọng lượng bản thân của nó, trọng lượng các lớp bên trên nó và áp suất đùn. Thiết bị gồm Khuôn hình trụ kích thước chiều cao 50 mm, đường kính đáy 85 mm; Thước có vạch chia, bọt nước, tấm đế phẳng.



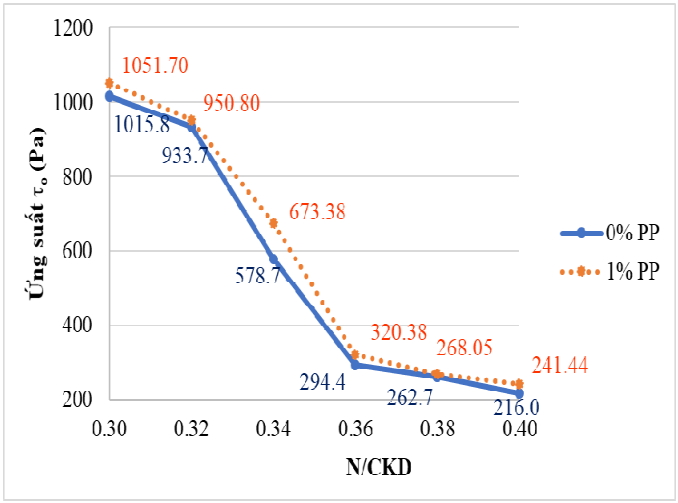
Hình 9. Dụng cụ đo độ bền ướt.

Đặt tấm đế trên nền phẳng, Cho hỗn hợp vào khuôn thành 2 lớp, mỗi lớp đầm 15 cái theo chiều xoắn ốc, và gõ nhẹ thành khuôn cho hỗn hợp lèn chặt, gạt phẳng mặt khuôn. Sau đó Rút khuôn, dùng thước đo kích thước sụt xuống của mẫu và ghi nhận số liệu độ giảm chiều cao do trọng lượng bản thân gây ra. Gia tải từng cấp với ứng suất 1057 Pa trong 60 giây cho đến ghi mẫu bị phá hoại. Ghi nhận lại độ giảm chiều cao so với khuôn của mỗi cấp tải và thời gian gia tải từng cấp.

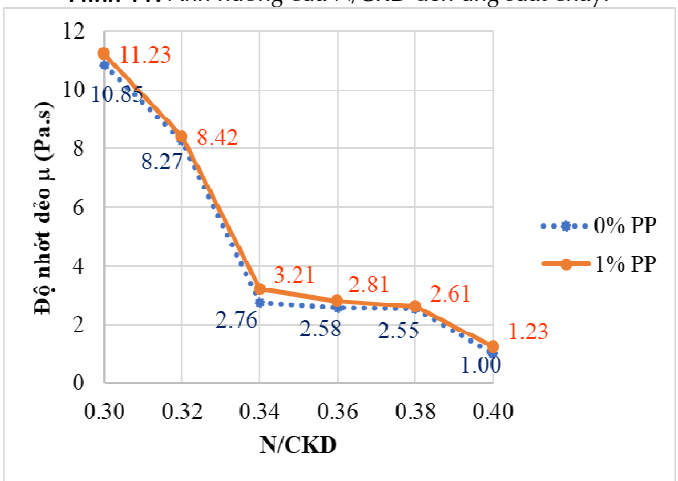
Hình 10. Quá trình đo độ bền ướt.

3. Kết quả nghiên cứu

Tỷ lệ N/CKD ảnh hưởng đến các tính chất và khả năng in của hỗn hợp bê tông không sử dụng sợi và có sử dụng sợi PP trong nguyên liệu. Độ lưu biến của hỗn hợp bê tông ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như hàm lượng phụ gia khoáng, hàm lượng nước nhào trộn, hàm lượng xi măng, hàm lượng N/CKD … trong đó hàm lượng N/CKD là yếu tố chủ đạo. Độ lưu biến hỗn hợp bê tông thể hiện qua thông số độ nhớt dẻo μ và ứng suất chảy τo. Độ nhớt dẻo μ và ứng suất chảy τo được đo qua thiết bị lưu biến kế Icar Plus, thể hiện Hình 11 và Hình 12.



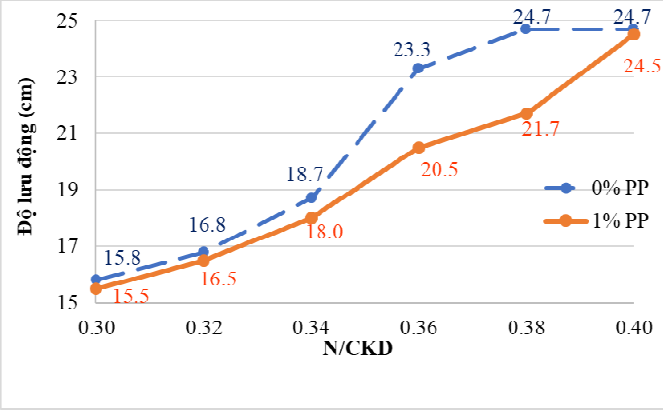
Hình 11. Ảnh hưởng của N/CKD đến ứng suất chảy.



Hình 12. Ảnh hưởng của N/CKD đến độ nhớt dẻo.

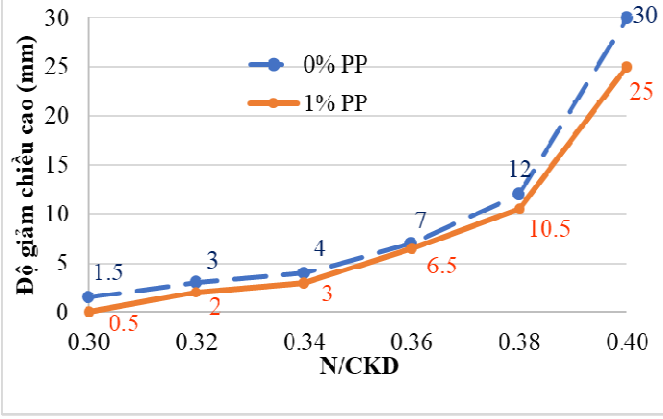
Giá trị ứng suất chảy và độ nhớt dẻo của hỗn hợp bê tông không sợi PP thấp hơn so với hỗn hợp bê tông có sử dụng 1 % sợi PP. Cụ thể tại mẫu 1 % PP, khi tăng hàm lượng N/CKD từ 0,3; 0,32; 0,34; 0,36 ứng suất chảy tăng tương ứng 3,5 %; 1,8 %; 16,4 %; 8,8 % so với ứng suất chảy của mẫu 0 % PP. Khi tăng tỷ lệ N/CKD thì ứng suất chảy và độ nhớt dẻo của cả bê tông không sợi PP và bê tông có sử dụng sợi PP đều giảm, đặc biệt tăng tỷ lệ N/CKD từ 0,3 lên 0,36, thì ứng suất chảy giảm từ khoảng 1051 Pa xuống khoảng 294 Pa, độ nhớt dẻo giảm từ khoảng 11 Pa.s xuống khoảng 2,6 Pa.s. Lượng nước nhào trộn có nhiệm vụ đó là hydrat hóa và bôi trơn bề mặt các hạt xi măng, cốt liệu. Các hạt cốt liệu trơn trượt lên nhau không phải là do trực tiếp tiếp xúc với nhau mà là do có màng nước bao bọc quanh các hạt, màng nước càng dày các hạt trơn trượt lên nhau càng dễ dàng. Lượng nước tăng lên càng nhiều, hỗn hợp bê tông có tính dẻo, lượng nước nước dư ở dạng tự do sẽ làm ứng suất chảy của hỗn hợp bê tông giảm. Tuy nhiên khi tăng hàm lượng N/CKD từ 0,36 đến 0,4 thì ứng suất chảy không thay đổi nhiều gần như là như nhau giữa mẫu có 1 % PP và 0 % PP. Nguyên nhân cũng do khi tăng lượng nước đến một giới hạn, lượng nước tự do sẽ làm độ nhớt dẻo của hỗn hợp giảm.

Độ lưu động của hỗn hợp bê tông không sử dụng sợi PP tốt hơn so với độ lưu động của hỗn hợp bê tông có sử dụng 1 % sợi PP. Với hàm lượng N/CKD tăng từ 0,3 đến 0,4, hỗn hợp 0 % PP có độ lưu động lớn hơn hỗn hợp 1 % PP. Điều này do khi hàm lượng N/CKD càng tăng, hàm lượng hồ xi măng càng lớn, các lỗ rỗng dễ dàng được lấp đầy, độ sệt hỗn hợp bê tông càng lỏng hơn dẫn đến độ lưu động càng tăng. Sợi PP không hút nước, bề mặt trơn nhẵn, kích thước mỏng nhẹ. Do đó, sợi PP tạo thành mạng liên kết giữa các phần tử trong hỗn hợp bê tông làm cho độ linh động hỗn hợp bê tông giảm.



Hình 13. Ảnh hưởng của tỷ lệ N/CKD đến độ lưu động của hỗn hợp bê tông.

Khi tăng hàm lượng N/CKD từ 0,3 đến 0,4 hỗn hợp 0 % PP và 1 % PP đều tăng độ lưu động. Hỗn hợp bê tông 0 % PP, hàm lượng N/CKD 0,3 có độ lưu động thấp nhất là 15,8 cm, hàm lượng N/CKD 0,4 có độ lưu động cao nhất 24,7 cm. Hỗn hợp 1 % PP, hàm lượng N/CKD 0,3 có độ lưu động thấp nhất là 15,5 cm, hàm lượng N/CKD 0,4 có độ lưu động cao nhất 24,5 cm. Đối với hỗn hợp 0 % PP và 1 % PP ở hàm lượng N/CKD là 0,3; 0,32; 0,34 hỗn hợp tương đối dính, ít nhão. Đây là phù hợp để sử dụng trong công nghệ in 3D. Đối với hỗn hợp 0 % PP và 1 % PP ở hàm lượng N/CKD là 0,36; 0,38; 0,4 hỗn hợp bê tông quá nhão, chảy lỏng, ít dính, không phù hợp để sử dụng trong công nghệ in 3D.



Hình 14. Ảnh hưởng của N/CKD đến độ bền ướt của hỗn hợp bê tông 0 % PP và 1 % PP.

Độ bền ướt là phương pháp thử nghiệm nhằm đánh giá sự ổn định hình dạng giữa các lớp in của bê tông in 3D. Tính ổn định hình dạng dựa trên khả năng giữ được trọng bản thân và trọng lượng các lớp bên trên nó. Phương pháp này sử dụng khuôn kích thước chiều cao 50 mm, đường kính đáy 85 mm được đánh giá qua độ giảm chiều cao do trọng lượng bản thân của mẫu gây ra và độ giảm chiều cao do cùng ứng suất tác dụng lên mà mẫu và ứng suất tối đa tác dụng mà mẫu không còn khả năng chịu tải, gây phá hoại mẫu.

Khi tăng hàm lượng N/CKD từ 0,3 đến 0,4 hỗn hợp 0 % PP và 1 % PP đều tăng độ giảm chiều cao do trọng lượng bản thân mẫu gây ra, từ đó tăng độ giảm chiều cao do cùng ứng suất 1057 Pa tác dụng và giảm ứng suất tối da tác dụng lên mẫu. Trong đó, hỗn hợp 1% PP khả năng giữ được hình dạng tốt hơn hỗn hợp 0 % PP. Điều này do hàm lượng N/CKD càng tăng hỗn hợp bê tông càng nhão, độ nhớt dẻo và ứng suất cắt càng giảm, độ lưu động hỗn hợp càng tăng, khả năng chịu tải trọng của hỗn hợp bê tông càng kém. Sử dụng sợi PP giúp mạng liên kết trong hỗn hợp bê tông tốt hơn, cải thiện được khả năng giữ được hình dạng cho hỗn hợp. Với hàm lượng N/CKD từ 0,3 đến 0,34, thì độ giảm chiều cao do trọng lượng bản thân gây ra ít (Hình 15), chịu được ứng suất tối đa lớn. Trong đó bê tông có sử dụng 1 % sợi PP được cải thiện hơn, khả năng giữ hình dạng tốt, phù hợp công nghệ in 3D. Khi tăng tỷ lệ N/CKD từ 0,36 đến 0,4, cả bê tông có sử dụng 1 % sợi PP và bê tông không sử dụng sợi đều có độ giảm chiều cao do trọng lượng bản thân gây ra rất lớn, tỷ lệ N/CKD = 0,4 thì độ giảm chiều cao đến 30 mm đối với mẫu bê tông không sử dụng sợi và 25 mm đối với mẫu bê tông có sử dụng 1 % sợi PP. Mặc dù sử dụng 1 %PP được cải thiện hơn so với khi không sử dụng sợi, tuy nhiên khả năng giữ hình dạng kém, không phù hợp công nghệ in từng lớp trong công nghệ in 3D.

Khả năng in của bê tông in 3D được đánh giá qua nhiều chỉ tiêu. Đầu tiên là độ liên tục của các sợi in, các sợi in phải đảm bảo được đùn liên tục không bị ngắt quãng đứt đoạn trong quá trình đùn. Kích thước bề rộng các sợi in, các sợi in đảm bảo được đùn với bề rộng như vòi in, không bị biến dạng. Bề mặt các sợi có bề mặt khô hay ướt, có lỗ rỗng hay không, và khả năng giữ vững hình dạng thiết kế các lớp in đùn với trường hợp đùn 3 lớp chồng lên nhau.

Hình 15. In 3 lớp chồng lên nhau (a. 0 % sợi PP; b. 1 % sợi PP).

Với tỷ lệ N/CKD từ 0,32 đến 0,34, các sợi in đảm bảo tính liên tục, có bề mặt nhẵn bóng. Hỗn hợp bê tông có 1 % sợi PP thì bề mặt khô hơn, các lớp in giữ vững hình dạng thiết kế ban

đầu, khả năng liên kết giữa các phần tử sợi in tốt hơn, độ biến dạng kích thước so với vòi in nhỏ, khi in các lớp chồng lên nhau khả năng giữ vững hình dạng thiết kế ban đầu tốt hơn hỗn hợp bê tông không sợi. Đặc biệt, sau khi các sợi in đóng rắn xuất hiện một số vết nứt, các sợi bê tông in có sợi PP vẫn còn giữ được mối liên kết giữa các phần tử sợi in, các sợi in không gãy vụn và giữ được liên kết với nhau (Hình 15).

4. Kết luận

Trong nghiên cứu đã khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ N/CKD đến các tính chất của hỗn hợp bê tông không sử dụng sợi PP và có sử dụng 1 % sợi PP dùng trong công nghệ in 3D , từ kết quả thí nghiệm có thể rút ra một số kết luận sau:

Khi hàm lượng N/CKD tăng từ 0,3 đến 0,4 thì độ nhớt và ứng suất chảy giảm, đặc biệt tăng tỷ lệ N/CKD từ 0,3 lên 0,36 thì ứng suất chảy giảm từ khoảng 1051 Pa xuống khoảng 294 Pa, độ nhớt dẻo giảm từ khoảng 11 Pa.s xuống khoảng 2,6 Pa.s.

Khi hàm lượng N/CKD tăng từ 0,3 đến 0,4 độ lưu động hỗn hợp bê tông tăng, khả năng chịu tái trọng bản thân và ứng suất tác dụng lên mẫu càng giảm. Đối với hỗn hợp 0 PP và 1 % PP ở hàm lượng N/CKD là 0,3; 0,32; 0,34 hỗn hợp tương đối dính, ít nhão. Đây là phù hợp để sử dụng trong công nghệ in 3D. Đối với hỗn hợp 0 % PP và 1 % PP ở hàm lượng N/CKD là 0,36; 0,38; 0,4 hỗn hợp bê tông quá nhão, chảy lỏng, ít dính, không phù hợp đế sử dụng trong công nghệ in 3D.

Sử dụng sợi PP giúp bê tông cải thiện tính chất cơ học, cải thiện đáng kể khả năng liên kết các phần tử trong quá trình đùn, làm cho hỗn hợp bê tông in 3D khi dùn không bị gãy, bị đứt đoạn, tăng độ cố kết, độ ổn định hình dạng hỗn hợp bê tông tốt hơn, khả năng phá triển cường độ ban đầu cao.

Với hàm lượng N/CKD từ 0,32 đến 0,34 phù hợp nhất để chế tạo bê tông in 3D.

Tài liệu tham khảo

[1] B. Severson (2015), Shanghai-based WinSun 3D Prints 6-Story Apartment Building and an Incredible Home.

[2] M. Moon (2017), A San Francisco startup 3D printed a whole house in 24 hours.

[3] T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim, R. A. Buswell, A. G. F. Gibb, and T. Thorpe (2012), Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, *Mater. Struct. Constr.*, vol.45, no.8, pp.1221–1232.

[4] A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, and B. Khoshnevis (2017), Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture, *Constr. Build. Mater.*, vol. 145, pp. 639–647.

[5] J. T. Kuchem (2019), Development of test methods for characterizing extrudability of cement-based materials for use in 3D printing, p. 191.

[6] Memphis (1996), Fly ash, Slag, silica fume, and natural Pozzolans, *Des. Control Concr. Mix.*, no. 54048, pp. 57–72.

[7] Y. Ding, D. Li, Y. Zhang, and C. Azevedo (2017), Experimental investigation on the composite effect of steel rebars and macro fibers on the impact behavior of high performance self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.*, vol. 136, pp. 495–505.