

Một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm về bê tông in 3D

Vũ Văn Linh^{1*}, Lê Việt Hùng¹, Lê Trung Thành¹, Nguyễn Công Hậu², Tạ Minh Phương Bảo², Nguyễn Văn Tuấn²

¹ Viện Vật liệu xây dựng, Số 235 Nguyễn Trãi, Q. Thanh Xuân, Hà Nội

² Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Số 55 Đường Giải Phóng, Quận Hai Bà Trưng, Hà Nội

TỪ KHOÁ

Bê tông in 3D
Cường độ nén
Khả năng đùn
Khả năng xây

KEYWORDS

3D printing concrete
Compressive strength
Extrudability
Buildability

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm về thành phần và tính chất của bê tông in 3D sử dụng các vật liệu sẵn có ở Việt Nam bao gồm cát ($D_{max} = 5 \text{ mm}$), xi măng, silica fume, tro bay, phụ gia siêu dẻo và nước. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy hoàn toàn có thể chế tạo được loại bê tông in 3D có độ chảy loang nằm trong khoảng từ 150 đến 200 mm, thời gian thi công 1h, cường độ nén tuổi 28 ngày là 50 đến 70 MPa. Hỗn hợp bê tông in 3D đạt tốc độ đùn hợp lý là 100 đến 140 mm/phút, tương ứng với tốc độ di chuyển của đầu in là 40 mm/s và độ mở đầu in là 20 mm. Hỗn hợp bê tông in 3D có tỷ lệ nước/chất kết dính và cát/chất kết dính tương ứng là 0,35 và 0,67 cho khả năng xây tốt nhất trong phạm vi nghiên cứu thực nghiệm này.

ABSTRACT

This paper presents some experimental results on the mix proportions and properties of a 3D printing concrete using available raw materials in Vietnam that comprise river sand ($D_{max} = 5 \text{ mm}$), cement, silica fume, fly ash, high range water reducing admixture, and water. The experimental outcomes confirm that a type of 3D printing concrete can be produced and it has flowability in the range of 150 to 200 mm, workability of 1 hour, 28-day compressive strength in the range of 50 to 70 MPa. The fresh 3D printing concrete gained an reasonable extrudability speed of 100 to 400 mm per minute with the speed of nozzle of 40 mm per second and the nozzle diameter of 20 mm. The 3D printing concrete mix with a water to binder ratio of 0.35 and a sand to binder ratio of 0.67 had the best buildability in this experimental research.

1. Giới thiệu

Sản xuất bằng kỹ thuật in 3D còn được gọi là sản xuất bồi đắp (Additive manufacturing - AM) là phương pháp chế tạo các kết cấu được thiết kế sẵn bằng các đắp chồng các lớp vật liệu lên nhau. Công nghệ in 3D đã phát triển nhanh chóng và đang trở thành xu thế trong nhiều ngành sản xuất, trong đó có ngành xây dựng. So sánh với các kỹ thuật xây dựng thông thường, việc áp dụng các kỹ thuật in 3D trong chế tạo các kết cấu xây dựng có thể mang lại nhiều lợi thế như tự động hóa, giảm chi phí xây dựng (giảm lao động và cốp pha), thời gian thi công, giảm các lỗi trong thi công, phát thải phế thải, tiết kiệm năng lượng và thuận lợi cho việc thực hiện các thiết kế kết cấu tinh vi, phức tạp, có tính thẩm mỹ cao.

Đối với công nghệ in 3D trong xây dựng, vật liệu sử dụng cho quá trình in chính là vật liệu bê tông sử dụng chất kết dính xi măng. Tuy nhiên, khác với công nghệ thi công bê tông truyền thống, công nghệ in 3D không sử dụng cốp pha để đỡ kết cấu sau khi tạo hình. Các kết cấu được thi công bằng bê tông in 3D được tạo ra trên cơ sở các lớp vật liệu được bồi đắp lên nhau, lớp sau chồng lên lớp trước đã được đùn ép ra trước đó. Kỹ thuật này được lặp lại cho đến khi hoàn thành kết cấu. Chính vì vậy, bê tông in 3D ở trạng thái dẻo phải được

thiết kế để đáp ứng được các yêu cầu về tính năng như: khả năng đùn của máy in, khả năng xây (khả năng chồng lớp) của khối xây, khả năng thi công, khả năng tạo hình[1].

Các yêu cầu kỹ thuật đối với hỗn hợp bê tông sử dụng trong công nghệ in 3D kiểu “phương pháp đắp lớp” thường khác với những yêu cầu cho hỗn hợp bê tông đúc thông thường. Về nguyên tắc, hỗn hợp bê tông thường phải cần một khoảng thời gian khá dài để đóng rắn nên không thể đáp ứng các yêu cầu của việc in 3D. Để tối ưu quy trình in 3D, cần phải có giải pháp kỹ thuật để vượt qua hai hạn chế tồn tại đó là: sự liên kết giữa các lớp bê tông giảm nếu khoảng thời gian in giữa hai lớp tăng; và vật liệu bê tông cần đóng rắn đủ để chịu tải trọng của lớp in tiếp theo mà không bị biến dạng. Việc kiểm soát hai vấn đề trên dẫn đến nghịch lý trong việc tối ưu hóa tốc độ in. Khoảng cách thời gian giữa hai lần in liên tiếp phải đủ dài để đảm bảo cường độ cần thiết, song cũng phải đủ ngắn để đảm bảo sự liên kết giữa các lớp vật liệu bê tông.

Các nghiên cứu về vật liệu bê tông cho công nghệ in 3D đã được nhiều nghiên cứu thực hiện trong những năm gần đây[2]. Nghiên cứu của tác giả Lê Trung Thành năm 2012 có thể coi là một trong những nghiên cứu đầu tiên phát triển về vật liệu bê tông xi măng cho công nghệ in 3D trong xây dựng[3]. Tác giả đã đưa ra các

*Liên hệ tác giả: Vulinh.vl1nuce@gmail.com

Nhận ngày 23/09/2021, sửa xong ngày 21/10/2021, chấp nhận đăng 04/11/2021

chi dẫn về bê tông in tính năng cao cho công nghệ in, làm tiền đề cho phát triển các nghiên cứu về bê tông in sau này. Đối với bê tông in 3D, các tính chất của hỗn hợp bê tông như tính công tác, khả năng đùn, khả năng xây và thời gian thi công là các chỉ tiêu quan trọng, quyết định đến khả năng thi công và tính chất của khối bê tông in 3D. Các tính chất này của hỗn hợp bê tông có thể điều chỉnh bằng thành phần cấp phối và bổ sung phụ gia hóa học. Ngoài ra, khả năng thi công cũng như chất lượng của khối in còn phụ thuộc vào các thông số của thiết bị in như hình dạng, độ mở đầu đùn, tốc độ đùn, tốc độ di chuyển đầu đùn. Hiện nay đã có một số bài báo công bố kết quả nghiên cứu về các tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông đóng rắn với các cốt liệu khác nhau[4-6]. Tuy nhiên, các thông số về tính chất của hỗn hợp bê tông phù hợp cho quá trình in phụ thuộc rất nhiều vào thành phần cấp phối, thành phần vật liệu (chất kết dính, cốt liệu, phụ gia) sử dụng, cũng như các thông số của thiết bị in.

Bài báo này trình bày một số kết quả thực nghiệm về tính chất của bê tông in sử dụng vật liệu sẵn có ở Việt Nam và mối tương quan với các thông số của thiết bị in phù hợp cho quá trình in kết cấu.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu nghiên cứu

2.1.1. Xi măng

Trong nghiên cứu này, xi măng được lựa chọn cho sử dụng là xi măng PC40 Nghi Sơn. Các tính chất cơ lý của xi măng được thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. Các tính chất cơ lý của xi măng.

TT	Chỉ tiêu cơ lý	Đơn vị	Kết quả
1	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,94
2	Lượng sót sàng 0,09 mm	%	1,9
3	Độ dẻo tiêu chuẩn	%	31,5
4	Thời gian đông kết	phút	120
	Bắt đầu		
4	Kết thúc	phút	165
5	Độ ổn định thể tích	mm	1,7
6	Cường độ nén:	MPa	33,49
	3 ngày		
6	28 ngày	MPa	50,40

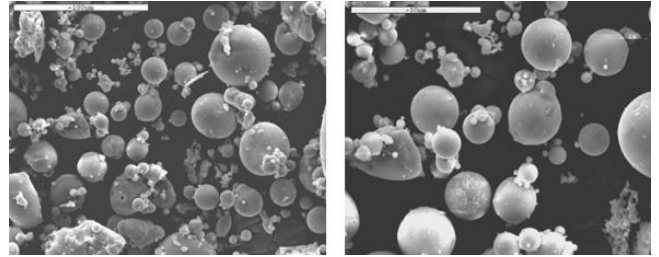
2.1.2. Tro bay

Tro bay được sử dụng trong nghiên cứu là tro bay (FA) của nhà máy nhiệt điện Quảng Ninh. Hình dạng hạt, các tính chất cơ lý và thành phần hóa của tro bay đốt than phun loại F được thể hiện ở Hình 1 và Bảng 2 tương ứng.

2.1.3. Silica fume

Đề tài sử dụng silicafume (SF) dạng hạt rời do Công ty Elkem

cung cấp. Thành phần hạt và tính chất của SF được trình bày trong Bảng 3. SF sử dụng thỏa mãn các yêu cầu trong TCVN 8827:2011.



Hình 1. Hình ảnh chụp SEM các hạt tro bay Quảng Ninh.

Bảng 2. Thành phần hạt và tính chất của FA.

STT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Kết quả		
		10	50	90
1	% Cỡ hạt có kích thước hạt < D	10	50	90
2	Đường kính hạt (µm)	2,40	5,39	10,49
3	Kích thước trung bình (µm)	5,83		
4	Khối lượng riêng (g/cm ³)	2,40		
5	Hàm lượng MKN (%)	6,65		
6	Độ mịn trên sàng 45 µm (%)	23,20		
7	Lượng nước yêu cầu (%)	95		
8	Chỉ số hoạt tính cường độ:			
	7 ngày tuổi (%)	79,2		
	28 ngày tuổi (%)	85,4		

Bảng 3. Thành phần hạt và tính chất của SF.

STT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Kết quả				
		10	25	50	75	90
1	% Cỡ hạt có kích thước hạt < D	10	25	50	75	90
2	Đường kính hạt, µm	0,119	0,129	0,141	0,154	0,167
3	Kích thước hạt trung bình, µm	0,141				
4	Khối lượng riêng, g/cm ³	2,1				
5	Khối lượng thể tích, kg/m ³	250				
6	Diện tích bề mặt riêng, cm ² /g	29900				
7	Chỉ số hoạt tính so với xi măng, %	110				

2.1.4 Cát

Trong nghiên cứu này sử dụng một loại cốt liệu là cát có $D_{max} = 5$ mm. Thành phần hạt của cát cho ở Bảng 4, và tính chất vật lý của cát ở Bảng 5. Thành phần hạt của cát được xác định theo TCVN 7572-2:2006.

2.1.5. Nước

Trong nghiên cứu này, nước sử dụng trong nghiên cứu là nước máy. Các chỉ tiêu chất lượng của nước phù hợp với nước trộn bê tông theo TCVN 4506 :2012.

Bảng 4. Thành phần hạt của cốt liệu.

Phần còn lại trên sàng (%)	Kích thước mắt sàng (mm)					Lượng hạt < 0,14 mm (%)
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Lượng sót riêng biệt trên mỗi sàng	8,7	14,6	20,5	38,8	14,8	2,6
Lượng sót tích lũy trên mỗi sàng	8,7	23,3	43,8	82,6	97,4	100
Mô đun độ lớn	2,558					



Hình 2. Bàn dần và côn đo độ chảy loang.

Bảng 5. Tính chất vật lý của cát.

STT	Tính chất	Đơn vị	Giá trị	Phương pháp thử
1	Khối lượng thể tích độ đông	kg/m ³	1453	TCVN 7572:2006
2	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,62	TCVN 7572:2006

2.1.6. Phụ gia hóa học

Nghiên cứu sử dụng loại phụ gia siêu dẻo (PGSD) cho bê tông có tên thương mại là Sika Viscocrete 3000-20 của Sika. Đây là loại phụ gia siêu dẻo trên cơ sở gốc polycarboxylate ether (PCE), độ giảm nước khoảng 36 %.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Quy trình trộn bê tông

Bước 1: Hỗn hợp vật liệu khô (xi măng, cát, SF, FA) được cho vào cối trộn của máy trộn Hobart vừa xi măng 5 lít và trộn khô với tốc độ chậm trong khoảng 1 phút.

Bước 2: Thêm 70 % nước và PG hóa học vào hỗn hợp khô và tiếp tục trộn. Tăng dần tốc độ trộn và trộn trong khoảng 1 đến 1,5 phút.

Bước 3: Thêm 30 % nước còn lại vào hỗn hợp phối liệu và tiếp tục trộn trong khoảng 1 đến 1,5 phút.

2.2.2. Tính công tác

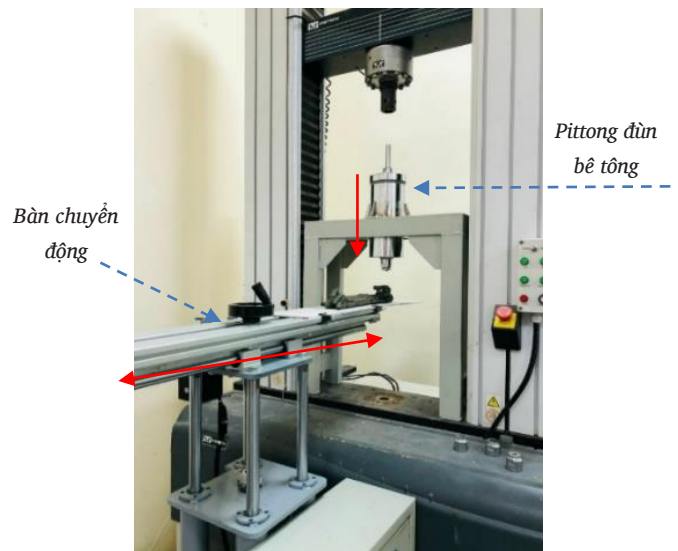
Tính công tác của các cấp phối trong nghiên cứu được đánh giá thông qua độ chảy loang của hỗn hợp bê tông. Độ chảy loang được đo bằng côn nhỏ (Hình 2) theo TCVN 3121-3:2003. Trong nghiên cứu này, độ chảy loang của các hỗn hợp được điều chỉnh bằng PGSD để đạt yêu cầu tối thiểu là 150 mm.

2.2.3. Cường độ nén

Cường độ nén của bê tông trong nghiên cứu được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 3121-11:2003 trên mẫu thử có kích thước 40 × 40 × 160 mm ở các tuổi 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày.

2.2.4. Khả năng đùn và khả năng xây

Sau khi trộn và thử nghiệm tính công tác, các cấp phối được lắp vào hệ thống thí nghiệm máy in để tiến hành thử nghiệm khả năng đùn và khả năng xây (Hình 3). Khả năng đùn được thí nghiệm và đánh giá bằng quan sát và đo hình dạng, kích thước của sợi đùn. Khả năng xây được đánh giá bằng cách chồng các lớp vật liệu đùn ép lên nhau. Hỗn hợp bê tông có khả năng xây tốt là hỗn hợp có số lớp chồng lên nhau nhiều nhất mà khối bê tông không bị biến dạng hoặc đổ sập.



Hình 3. Hệ thống thí nghiệm in bê tông.

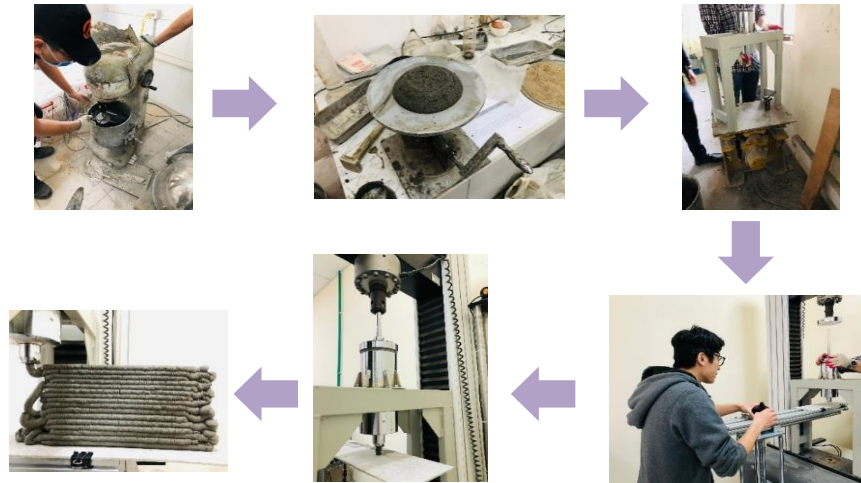
2.2.5. Quy trình thử nghiệm

Hỗn hợp bê tông sau khi đạt yêu cầu về độ chảy loang được sử dụng để thí nghiệm các tính chất của bê tông in.

Bước 1: Điền đầy vật liệu vào pitong.

Bước 2: Lắp đặt pitong vào vị trí.

Bước 3: Tiến hành thí nghiệm tính chất của hỗn hợp bê tông bao gồm khả năng đùn và khả năng xây. Vật liệu được đùn với các vận tốc khác nhau, lần lượt là 60, 80, 100, 120, 140, 160 và 180 mm/phút. Tốc độ di chuyển của đầu in được giữ nguyên là 40 mm/s.



Hình 4. Quy trình trộn hỗn hợp bê tông và thí nghiệm các tính chất của bê tông in thực tế.

2.3. Cấp phối nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, các cấp phối thí nghiệm được lựa chọn dựa trên cơ sở các kết quả nghiên cứu của tác giả Lê Trung Thành [3] với hàm lượng chất kết dính bao gồm 70 % xi măng, 20 % FA, và 10 % SF. Với cường độ nén 28 ngày mục tiêu lớn hơn 50 MPa, hai tỷ lệ N/CKD được lựa chọn là 0,35 và 0,40. Hàm lượng PGSD theo tổng hàm lượng chất kết dính được sử dụng để điều chỉnh độ chảy loang của các hỗn hợp đạt được 150 đến 200 mm. Các cấp phối cụ thể thể hiện trong Bảng 6.

3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

Bảng 6. Các cấp phối bê tông in nghiên cứu.

STT	Cấp phối	N/CKD	Cát/CKD	PGSD (%)	FA (%)	SF (%)	CKD (kg/m ³)
1	w.b0.35c0.67	0,35	0,67	0,22	20	10	1040
2	w.b0.35c1.0	0,35	1,0	0,30	20	10	918
3	w.b0.35c1.5	0,35	1,5	0,35	20	10	781
4	w.b0.40c0.67	0,40	0,67	0,12	20	10	988
5	w.b0.40c1.0	0,40	1,0	0,17	20	10	878
6	w.b0.40c1.5	0,40	1,5	0,25	20	10	752

Bảng 7. Giá trị độ chảy loang của các cấp phối bê tông.

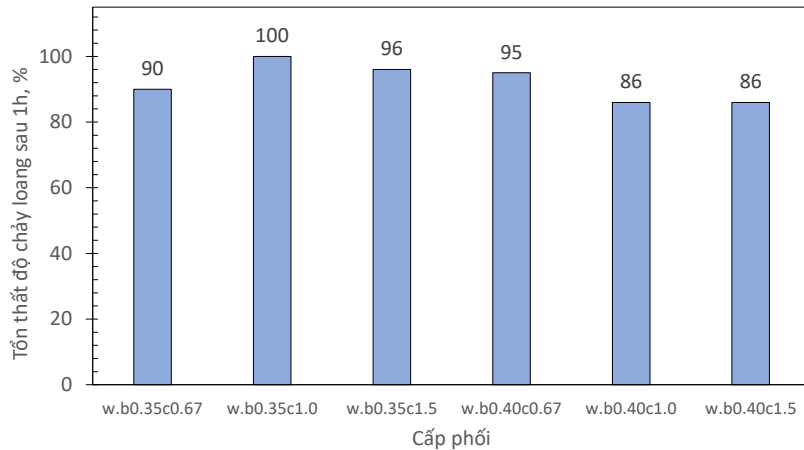
STT	Cấp phối	Độ chảy loang sau trộn (mm)	Độ chảy loang sau 1h (mm)	Tỉ lệ tổn thất độ chảy loang (%)
1	w.b0.35c0.67	150	135	10
2	w.b0.35c1.0	150	150	0
3	w.b0.35c1.5	160	153	4
4	w.b0.40c0.67	153	145	5
5	w.b0.40c1.0	147	127	14
6	w.b0.40c1.5	148	127	14

Ghi chú: ký hiệu w.b0.35 thể hiện cấp phối có tỷ lệ N/CKD bằng 0,35 theo khối lượng; c0.67 thể hiện tỷ lệ C/CKD bằng 0,67 theo khối lượng.

3.1. Tính công tác

Trong nghiên cứu này tính công tác được đánh giá qua độ chảy loang của hỗn hợp bê tông, và được khống chế trong khoảng 150 - 200 mm bằng cách thay đổi lượng dùng phụ gia siêu dẻo. Thời gian thi công (open time) của hỗn hợp bê tông in được hiểu là khoảng thời gian mà hỗn hợp bê tông vẫn duy trì được độ dẻo và đảm bảo tính ổn định của quá trình in.

Trong nghiên cứu này, tổn thất độ chảy của hỗn hợp bê tông in theo thời gian được xác định ngay sau lúc trộn (tính là thời điểm 0), 30 phút và 60 phút. Kết quả thể hiện trong Bảng 7 và Hình 5.



Hình 5. Tổn thất độ chảy loang của các cấp phối thí nghiệm sau 1h.

Thời gian thi công bị ảnh hưởng trực tiếp bởi khả năng duy trì độ chảy loang của hỗn hợp bê tông. Độ chảy loang của các cấp phối nghiên cứu bị sụt giảm trong khoảng 4 % đến 14 % tùy theo từng cấp phối khác nhau. Cấp phối w.b0.35c1.0 có khả năng duy trì độ chảy loang tốt khi giữ nguyên được 100 % độ chảy ban đầu.

3.2. Cường độ nén

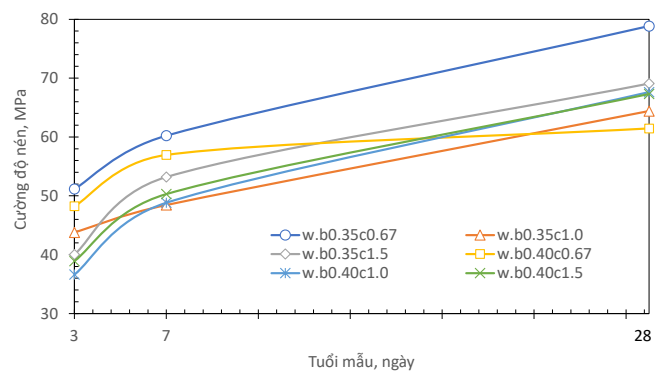
Cường độ nén theo các tuổi của các cấp phối nghiên cứu thể hiện ở Bảng 8 và được biểu diễn trên Hình 6.

Kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ nén của cấp phối w.b0.35c0.67 đạt giá trị lớn nhất là 78,85 MPa và thấp nhất là của cấp phối w.b0.40c0.67 đạt 61,45 MPa. Tuy nhiên, tất cả cường độ nén tuổi 28 ngày của các mẫu đều lớn hơn 50 MPa - cấp cường độ yêu cầu đặt ra. Cường độ của bê tông phát triển mạnh trong 7 ngày đầu tiên và tăng chậm trong khoảng thời gian sau đó.

Tỷ lệ N/CKD ảnh hưởng mạnh tới cường độ chịu nén của bê tông. Tỷ lệ N/CKD càng thấp cho bê tông có cường độ chịu nén càng cao. Ngoài ra tỷ lệ C/CKD cũng ảnh hưởng tới cường độ nén của mẫu và sự ảnh hưởng này cũng khá lớn.

Bảng 8. Cường độ nén của bê tông in trong nghiên cứu.

STT	Cấp phối	Cường độ nén (MPa)		
		3 ngày	7 ngày	28 ngày
1	w.b0.35c0.67	51,16	60,23	78,85
2	w.b0.35c1.0	43,77	48,44	64,4
3	w.b0.35c1.5	40,03	53,19	69,08
4	w.b0.40c0.67	48,23	56,95	61,45
5	w.b0.40c1.0	36,63	48,83	67,62
6	w.b0.40c1.5	38,92	50,30	67,31



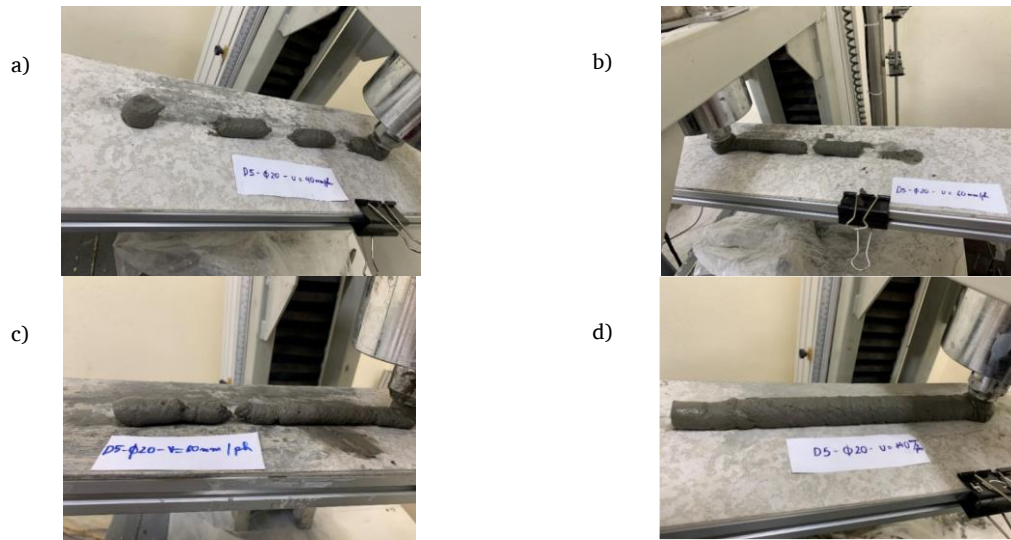
Hình 6. Sự phát triển cường độ nén của các cấp phối nghiên cứu.

3.3. Khả năng đùn

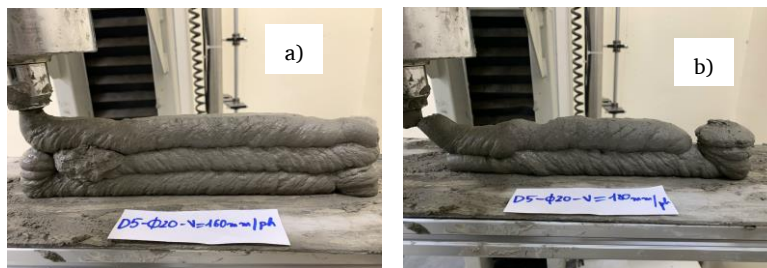
Trong nghiên cứu này, nhìn chung khả năng đùn của các cấp phối là tốt, tất cả các cấp phối đều được máy mô phỏng đùn một cách dễ dàng. Tuy nhiên tốc độ đùn là nhân tố ảnh hưởng lớn đến khả năng đùn của các cấp phối. Chú ý rằng D_{max} của cát = 5 mm, và đường kính lỗ mở của đầu in là 20 mm, tốc độ đùn từ 40-160 mm/ph, tốc độ di chuyển của đầu in là 40 mm/s.

Như trong Hình 7a), b), c), khi tốc độ đùn của máy in thấp (lần lượt là 40, 60, 80 mm/phút) thì các sợi vật liệu được đùn ra không đồng đều, đứt gãy vì lượng vật liệu được đùn ra quá ít. Rõ ràng ở các tốc độ thấp từ 40 đến 80 mm/phút không thể tiến hành chõng lớp để tạo ra các khối bê tông có tính ổn định. Khi tăng tốc độ đùn lên cao hơn, khoảng 100 đến 140 mm/phút, các đường in đều hơn, đẹp hơn, đường in có đường kính đều, bề mặt mịn và lượng vật liệu đủ lớn để có thể chõng lớp. Ở tốc độ cao hơn như 160 và 180 mm/phút thì sợi đùn có bề mặt xấu, vật liệu bị đùn ra nhiều và dễ đứt gãy, mất ổn định (Hình 8).

Kết quả nghiên cứu của các cấp phối khác cho ra kết quả tương tự. Khả năng đùn của các cấp phối chỉ tốt khi tốc độ đùn của máy in là từ 100 đến 140 mm/phút là tốc độ hợp lý cho 6 cấp phối nghiên cứu.



Hình 7. Khả năng đùn của hỗn hợp bê tông in với các tốc độ đùn khác nhau (a) 40, (b) 60, (c) 80, (d) 140 mm/ph.



Hình 8. Đánh giá khả năng đùn của hỗn hợp bê tông in với các tốc độ đùn khác nhau (a) 160 mm/phút, (b) 180 mm/phút.



Hình 9. Đánh giá khả năng xây của hỗn hợp bê tông in với với tỷ lệ N/CKD = 0,35 và các tỷ lệ C/CKD khác nhau: (a) 0,67, (b) 1,0, (c) 1,5.



Hình 10. Đánh giá khả năng xây của hỗn hợp bê tông in với với tỷ lệ N/CKD = 0,40 và các tỷ lệ C/CKD khác nhau: (a) 0,67, (b) 1,0, (c) 1,5.

Bảng 9. Đánh giá khả năng xây của các cấp phối bê tông in nghiên cứu.

STT	Cấp phối	N /CKD	C/CKD	Đánh giá về khả năng xây
1	w.b0.35c0.67	0,35	0,67	Cấp phối này chông được nhiều lớp. Bề mặt đường in mịn, khả năng xây và khả năng liên kết giữa các lớp đều tốt.
2	w.b0.35c1.0	0,35	1,0	Cấp phối chông lớp tốt. Tuy nhiên vì tăng lượng dùng cát nên bề mặt hơi xù xì, xấu. Khả năng xây và liên kết giữa các lớp đều ổn.
3	w.b0.35c1.5	0,35	1,5	Cấp phối chông lớp tốt. Khả năng xây và khả năng liên kết giữa các lớp tạm ổn. Tuy nhiên bề mặt quá xù xì do dùng nhiều cát, không đạt yêu cầu.
4	w.b0.40c0.67	0,40	0,67	Cấp phối có khả năng chông lớp kém, đến lớp thứ 5 thì không chông được. Đường in đều, mịn vì dùng nhiều nước và ít cát, tuy nhiên không đạt yêu cầu về khả năng xây.
5	w.b0.40c1.0	0,40	1,0	Cấp phối có cải thiện hơn cấp phối trước khi tăng lượng cát sử dụng. Tuy nhiên đường in vẫn khó có thể chông được nhiều lớp, chưa đạt yêu cầu về khả năng xây.
6	w.b0.40c1.5	0,40	1,5	Cấp phối tốt nhất trong các cấp phối có tỉ lệ N/CKD = 0,4; bề mặt đường in khá đẹp và mịn. Tuy nhiên đường in liên kết không tốt và rất dễ đổ.

3.4. Khả năng xây

Khả năng xây là yếu tố rất quan trọng với bê tông in 3D. Trong nghiên cứu này, khả năng xây phụ thuộc vào nhiều yếu tố, đặc biệt là các tỉ lệ N/CKD và C/CKD. Nghiên cứu này đánh giá sự ảnh hưởng của 2 tỉ lệ N/CKD (0,35 và 0,40) và 3 tỉ lệ C/CKD (0,67 - 1,0 - 1,5). Kết quả nghiên cứu cụ thể của 6 cấp phối được trình bày ở Hình 9, Hình 10 và đánh giá kết quả ở Bảng 9. Chú ý rằng tốc độ đùn của các thí nghiệm nằm trong khoảng 100 đến 140 mm/phút.

Từ các kết quả trên, một số kết luận về khả năng xây của các cấp phối có thể rút ra như sau:

- Tỉ lệ N/CKD phù hợp là 0,35 cho bê tông in tương ứng với hệ thống thí nghiệm; tỉ lệ 0,40 không phù hợp với bê tông in 3D trong nghiên cứu này.
- Tỉ lệ N/CKD là yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến khả năng xây. Tỉ lệ này phù hợp thì các cấp phối có khả năng xây rất tốt, tỉ lệ này cao sẽ làm các cấp phối không thể chông lớp và dễ đổ.
- Tỉ lệ C/CKD tăng có thể làm cải thiện khả năng xây. Tuy nhiên nếu tỉ lệ N/CKD không phù hợp thì tăng lượng dùng cát cũng không cải thiện được khả năng xây.

Từ các kết quả nghiên cứu trên, nhóm đề tài đưa ra cấp phối tối ưu ở Bảng 10.

Bảng 10. Cấp phối bê tông in tối ưu được lựa chọn.

N/CKD	C/CKD	FA (%)	SF (%)	PGSD (%)	Xi măng (kg/m ³)	Tốc độ đầu in (mm/s)	Tốc độ đùn (mm/ph)
0,35	0,67	20	10	0,22	1040	40	100 - 140

4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu cho phép đưa ra một số kết luận như sau:

- Bê tông in có thể được chế tạo với các vật liệu sẵn có ở Việt Nam như cát ($D_{max} = 5 \text{ mm}$), xi măng, SF, FA, PGSD và nước.
- Khả năng xây bị ảnh hưởng lớn bởi các tỷ lệ N/CKD và C/CKD, trong đó cấp phối tốt nhất đối với khả năng xây trong nghiên cứu này là hỗn hợp bê tông có tỷ lệ N/CKD = 0,35; C/CKD = 0,67; trong đó hàm lượng phụ gia khoáng sử dụng là 10 % SF kết hợp 20 % FA.
- Cấp phối bê tông phù hợp cho quá trình in với tính công tác được xác định thông qua độ chảy loãng trong khoảng 150 đến 200 mm, thời gian thi công kéo dài trên 1 h, cường độ nén tuổi 28 ngày đạt trong khoảng 50 đến 70 MPa.
- Khả năng đùn của các cấp phối phụ thuộc rất nhiều vào tốc độ đùn. Tốc độ đùn hợp lý là 100 đến 140 mm/phút ứng với tốc độ di chuyển của đầu in là 40 mm/s và độ mở đầu in là 20 mm.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Z. Li *et al.*, "Fresh and hardened properties of extrusion-based 3D-printed cementitious materials: a review", *Sustainability*, vol. 12, no. 14, p. 5628, 2020.
- [2]. G. Ma, L. Wang, and Y. J. S. C. T. S. Ju, "State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction", *Science China Technological Sciences*, vol. 61, no. 4, pp. 475-495, 2018.
- [3]. T. T. Le *et al.*, "Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete", *Materials and Structures*, vol. 45, no. 8, pp. 1221-1232, 2012.
- [4]. G. Ma, Z. Li, L. J. C. Wang, and b. materials, "Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing", *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 613-627, 2018.
- [5]. Y. Zhang *et al.*, "Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink", *Construction and Building Materials*, vol. 174, pp. 263-271, 2018.
- [6]. J. Lin, X. Wu, W. Yang, R. Zhao, and L. Qiao, "The influence of fine aggregates on the 3D printing performance," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 292, no. 1, p. 012079: IOP Publishing.