

Đặc trưng lưu biến và khả năng in 3D của bê tông

Rheology and 3D printability of concretes

> **TRẦN VĂN MIỄN^{1,2*}, NGUYỄN THỊ HẢI YẾN³, LÊ VĂN HẢI CHÂU^{1,2}**

¹Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM.

²Đại học Quốc gia TP.HCM

³Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Công nghiệp TP.HCM.

*Email :tvmien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Đặc trưng lưu biến của hỗn hợp bê tông thể hiện qua độ nhớt dẻo, ứng suất chảy tĩnh và ứng suất chảy động. Trong công nghệ in bê tông 3D, để đạt khả năng in tốt thì hỗn hợp bê tông này cần phải có độ nhớt thấp nhất có thể nhưng không được phân tầng, và có ứng suất chảy đủ lớn để chịu tải trọng bản thân của các lớp in tiếp theo phía trên đè xuống. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu về đặc trưng lưu biến của hỗn hợp bê tông dùng cho in 3D, đánh giá khả năng in 3D của hỗn hợp bê tông tương ứng với các giá trị lưu biến. Đặc trưng lưu biến của hỗn hợp bê tông được khảo sát bao gồm độ nhớt, ứng suất chảy động và ứng suất chảy tĩnh thông qua lưu biến kế ICAR Plus. Kết quả nghiên cứu cho thấy, silicafume (SF) làm gia tăng các thông số lưu biến của hỗn hợp bê tông, cả độ nhớt dẻo, ứng suất chảy động và chảy tĩnh đều tăng nhiều so với hỗn hợp bê tông không sử dụng SF, trong khi đó, khi tăng hàm lượng phụ gia siêu dẻo thì các thông số lưu biến của hỗn hợp bê tông như độ nhớt dẻo, ứng suất chảy tĩnh và chảy động đều giảm. Đặc biệt là, hỗn hợp bê tông in 3D thành công khi có các đặc trưng lưu biến như sau: ứng suất chảy tĩnh từ 260 đến 1100 Pa và ứng suất chảy động từ 150 đến 700 Pa.

Từ khóa: Bê tông; lưu biến; khả năng in 3D.

ABSTRACT

Rheology characteristics of fresh concrete include plastic viscosity, static yield stress and dynamic yield stress. Regarding to 3D printing, the fresh concrete needs both low plastic viscosity and high enough yield stress for buildability. This paper presents results of the rheology characteristics and printability of fresh concretes. The rheology properties were measured by ICAR Plus rheometer. Results showed that silicafume made the rheological properties of the fresh concrete increase significantly, whereas, an increasing of superplasticizer reduced both viscosity and yield stress of the fresh concrete. Moreover, the fresh concretes were 3D printed successfully with static yield stress in range of 260 to 1100 Pa and dynamic yield stress from 150 to 700 Pa.

Key words: Concrete; rheology; 3D printability

1. GIỚI THIỆU

Các thông số lưu biến của hỗn hợp bê tông bao gồm: độ nhớt dẻo, ứng suất chảy tĩnh và ứng suất chảy động.

Để hỗn hợp bê tông có khả năng đùn và khả năng đắp dần lên cao tốt thì hỗn hợp bê tông này cần phải có độ nhớt thấp nhất có thể nhưng không được phân tầng, và có ứng suất chảy tĩnh cao [1]. Các thông số lưu biến của hỗn hợp bê tông có thể được đo bằng lưu biến kế và sử dụng mô hình Bingham để tính toán các thông số lưu biến [2].

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (1)$$

Trong đó:

τ là ứng suất chảy tĩnh (Pa)

τ_0 là ứng suất chảy động (Pa)

μ là độ nhớt của hỗn hợp bê tông (Pa.s)

$\dot{\gamma}$ là tốc độ cắt (s^{-1})

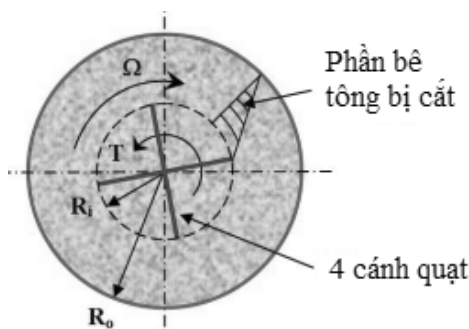
Theo thuật ngữ lưu biến, sức cản của dòng chảy được gọi là ứng suất chảy, τ_0 (Pa) và hành vi kiểm soát đặc tính trong quá trình chảy được gọi là độ nhớt dẻo, μ (Pa.s). Các thông số này có thể thu được từ các thử nghiệm lưu biến, thông qua thử nghiệm gia tăng lưu biến tuyến tính và đường cong dòng chảy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

Trong thí nghiệm lưu biến sử dụng lưu biến kế ICAR Plus, một quạt 4 cánh, với bán kính R_i (m) quay trong khi thùng chứa hình trụ ngoài có bán kính R_o (m) đứng yên. Vòng quay của cánh quạt làm cho bê tông tươi trong khoảng cách giữa thùng chứa và cánh quạt biến dạng dẻo với tốc độ tùy thuộc vào tốc độ quay Ω (rad / s). Tốc độ biến dạng dẻo này được gọi là tốc độ chảy $\dot{\gamma}$ (s^{-1}). Trong quá trình biến dạng dẻo của bê tông, máy đo lưu biến ICAR Plus đồng thời ghi lại tốc độ quay thực (rps) và mô-men xoắn yêu cầu, T (Nm) để duy trì tốc độ quay mục tiêu.

Bảng 1: Cấp phối bê tông sử dụng trong nghiên cứu

STT	Cấp phối	XM (kg)	Sợi PP (kg)	Phụ gia siêu dẻo (Lit)	VMA (Lit)	N/CKD	CL/CKD	SF (kg)
1	M1-1	870	8,7	13,1	5,2	0,30	1	0
2	M1-2	862	8,6	12,9	5,2	0,32	1	0
3	M1-3	855	8,5	12,8	5,1	0,34	1	0
4	M1-4	847	8,4	12,7	5,1	0,36	1	0
5	M2-1	606	6,1	9,1	3,6	0,30	2	0
6	M2-2	602	6,0	9,0	3,6	0,32	2	0
7	M2-3	598	6,0	9,0	3,6	0,34	2	0
8	M2-4	595	6,0	8,9	3,5	0,36	2	0
9	M3-1	465	4,7	7,0	2,8	0,3	3	0
10	M3-2	463	4,6	6,9	2,8	0,32	3	0
11	M3-3	461	4,6	6,9	2,8	0,34	3	0
12	M3-4	459	4,6	6,9	2,8	0,36	3	0
13	M1-4B	847	8,4	6,78	2,54	0,36	1	0
14	M1-4-1	847	2,1	5,08	2,54	0,36	1	0
15	M1-4-0.32	847	2,1	5,08	2,54	0,32	1	0
16	M1-4-2	847	8,5	5,08	2,54	0,36	1	0
17	M1-4-3	847	8,5	5,08	2,54	0,36	1	254
18	M1-4-4	847	8,5	6,78	2,54	0,4	1	254
19	M2-0.42	585	5,9	4,68	1,76	0,42	2	0
20	M2-0.48	585	5,9	7,02	1,76	0,48	2	0
21	M2-0.48SF	585	5,9	7,02	1,76	0,48	2	176
22	M2-0.54SF	585	5,9	7,02	1,76	0,54	2	176
23	M4-1	712	7,12	8,54	2,85	0,30	1,5	0
24	M4-2	712	7,12	8,54	2,85	0,32	1,5	0
25	M4-3	712	7,12	8,54	2,85	0,34	1,5	0
26	M4-4	712	7,12	8,54	2,85	0,36	1,5	0
27	M4-0.44	712	7,12	5,70	2,14	0,44	1,5	0
28	M4-0.48SF	712	7,12	5,70	2,14	0,48	1,5	214

Lưu ý: XM là xi măng, VMA là phụ gia điều chỉnh độ nhớt, N/CKD là tỉ lệ nước/chất kết dính, CL/CKD là tỉ lệ cốt liệu/chất kết dính, SF là silicafume.



Hình 1. Nguyên tắc hoạt động của máy đo lưu biến ICAR Plus [2]

Đặc trưng lưu biến của hỗn hợp bê tông in 3D phụ thuộc vào loại và thành phần nguyên vật liệu sử dụng để chế tạo bê tông. Cả ứng suất chảy động và chảy tĩnh của hỗn hợp bê tông đều gia tăng khi hỗn hợp bê tông sử dụng bột polymer phân tán [3, 4]. Sử dụng tro bay thay thế một phần khối lượng xi măng hoặc tăng tỉ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) làm giảm độ nhớt và ứng suất chảy của hỗn hợp bê tông [5, 6]. Trong khi đó, nhiều nghiên cứu cho thấy silica fume có tác dụng gia tăng xúc biến, ứng suất chảy tĩnh và độ nhớt của hỗn hợp bê tông [7-10].

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu về đặc trưng lưu biến của hỗn hợp bê tông dùng cho in 3D, đánh giá khả năng in 3D của hỗn hợp bê tông tương ứng với các giá trị lưu biến. Đặc trưng lưu biến

của hỗn hợp bê tông được khảo sát bao gồm độ nhớt, ứng suất chảy động và ứng suất chảy tĩnh thông qua lưu biến kế ICAR Plus.

2. NGUYÊN VẬT LIỆU VÀ CẤP PHỐI BÊ TÔNG SỬ DỤNG TRONG NGHIÊN CỨU

Các nguyên liệu chính sử dụng trong nghiên cứu này gồm có: xi măng PC50, silicafume (SF), sợi Polypropylene (PP), cát sông (C), nước, phụ gia điều chỉnh độ nhớt (VMA) và phụ gia siêu dẻo.

Sợi PP mảnh và phân tán ngẫu nhiên có đường kính 0,03mm và dài 6mm. Cát sông sử dụng có kích thước cỡ hạt lớn nhất là 2,5mm.

Cấp phối bê tông sử dụng trong nghiên cứu này được thể hiện ở bảng 1 bên dưới.

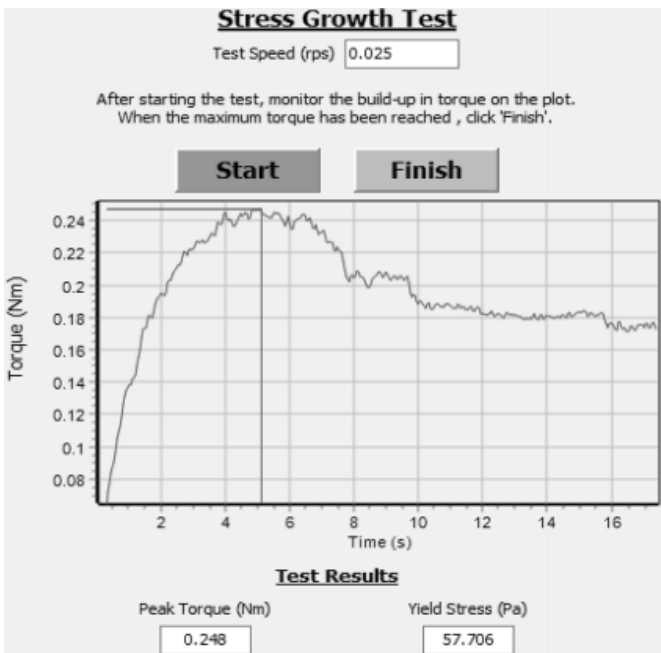
Các nghiên cứu trước khảo sát khả năng in 3D của bê tông với tỉ lệ CL/CKD = 1 ÷ 1,5 [5, 7, 10]. Tuy nhiên, nghiên cứu này mở rộng thêm việc khảo sát các thông số lưu biến và khả năng in 3D cho các cấp phối bê tông có tỉ lệ CL/CKD = 2 ÷ 3 vì bê tông có xu hướng co ngót ít hơn khi tăng hàm lượng cốt liệu trong cấp phối bê tông.

Trong bảng 1, sợi PP đã phân sử dụng với hàm lượng 1% tính theo khối lượng của xi măng và được dùng với vai trò chủ yếu là giảm co ngót dẻo giai đoạn đầu của hỗn hợp bê tông. Sử dụng hàm lượng lớn sợi PP có khả năng ảnh hưởng đến lưu biến của hỗn hợp bê tông [10], vì vậy ảnh hưởng của hàm lượng sợi PP đến lưu biến của hỗn hợp bê tông cũng được khảo sát và đánh giá khi so sánh các thông số lưu biến của hỗn hợp bê tông dùng cấp phối số

13 và 14 với cùng tỉ lệ N/CKD, và tương ứng với hàm lượng sợi PP lần lượt là 1% và 0,25%.



Hình 2. Lưu biến kế ICAR Plus được sử dụng để đo các thông số lưu biến của hỗn hợp bê tông



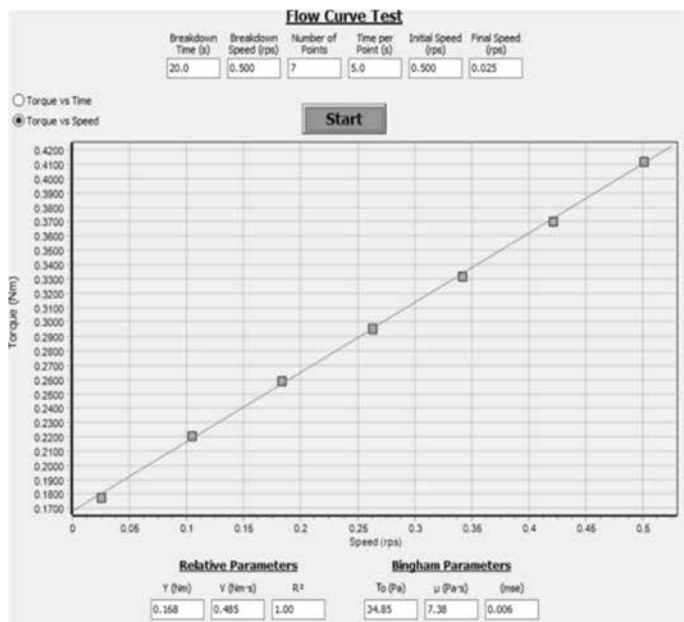
Hình 3. Thí nghiệm thứ 1 - đo phát triển ứng suất cắt trong hỗn hợp bê tông

Trong nghiên cứu này, các thông số lưu biến của hỗn hợp bê tông bao gồm độ nhớt dẻo, ứng suất chảy tĩnh và ứng suất chảy độ được đo bằng lưu biến kế ICAR Plus (Hình 2) và sử dụng mô hình Bingham để tính toán các thông số lưu biến. Bộ thiết bị lưu biến kế ICAR Plus bao gồm các bộ phận: một thùng chứa chứa hỗn hợp bê tông; hộp điều khiển bao gồm motor điện và một đồng hồ quay; cánh quạt bốn cánh được giữ bởi tay cầm ở trên hộp điều khiển; một khung để lắp cánh quạt và cửa nạp liệu; laptop để vận hành hộp điều khiển dùng để ghi nhận moment xoắn trong quá trình thí nghiệm và dùng để tính toán giá trị của các thông số dòng chảy thông qua một phần mềm chuyên dụng đi kèm với thiết bị. Thùng chứa bao gồm các thanh gắn xung quanh chu vi để ngăn ngừa sự trượt của hỗn hợp bê tông so với thành thùng chứa

trong suốt quá trình thí nghiệm. Sự lựa chọn thùng chứa tùy thuộc vào kích thước của các hạt cốt liệu. Cánh quạt có chiều cao và đường kính 127mm. Các hỗn hợp bê tông được thực hiện 2 thí nghiệm liên kế nhau để xác định các thông số lưu biến, 2 thí nghiệm thực hiện liên kế như sau:

- Thí nghiệm thứ 1: đây là thí nghiệm gia tăng ứng suất trượt với tốc độ quay của cánh quạt giữ nguyên ở tốc độ thấp 0,025 rev/s (0,157 rad/s) (Hình 3). Sự tăng moment xoắn của cánh quạt sẽ được đo theo thời gian. Moment lớn nhất trong suốt quá trình thí nghiệm dùng để tính toán ứng suất chảy tĩnh của hỗn hợp bê tông.

- Thí nghiệm thứ 2: đây là thí nghiệm về phương trình dòng chảy dùng để xác định giá trị ứng suất chảy động và độ nhớt dẻo (Hình 4). Khi tốc độ quay của cánh quạt là lớn nhất, bắt đầu phân tích cấu trúc xúc biến (cấu trúc tồn tại và cần phải có một ứng suất thích hợp trước đó để xác định các thông số Bingham). Sau đó, tốc độ của cánh quạt giảm theo từng cấp theo cài đặt ban đầu, có ít nhất là sáu cấp. Ở mỗi cấp, ghi nhận lại giá trị trung bình và tốc độ của moment xoắn.



Hình 4.Thử nghiệm thứ 2 - đo ứng suất chảy động và độ nhớt dẻo của hỗn hợp bê tông

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Hỗn hợp bê tông chế tạo có thể hoặc không thể in 3D được, việc đánh giá này dựa trên đánh giá ngoại quan về khả năng đùn hỗn hợp bê tông ra khỏi vòi in và dựa trên tính liên tục, tính đồng đều kích thước của dải bê tông trong quá trình in 3D. Nghiên cứu này sử dụng máy in 3D theo nguyên lý cần trục, trục vít để đùn hỗn hợp bê tông ra khỏi vòi in. Máy in này có thể sử dụng với nhiều hình dạng, kích thước vòi in khác nhau, tốc độ in của máy có thể vận hành thay đổi từ 30 đến 100 mm/s. Máy in 3D thích hợp in cấu kiện bê tông ở quy mô phòng thí nghiệm với kích thước tối đa là: dài 2000 mm, rộng 1000 mm và cao 600 mm.

Vòi in tiết diện vuông cạnh 20 mm được sử dụng để kiểm tra khả năng in của các hỗn hợp bê tông khác nhau. Chiều dày của từng lớp bê tông in 3D được cố định là 10 mm - tương đương 1/2 bề rộng của dải bê tông in 3D.

Kết quả nghiên cứu về tính chất lưu biến và khả năng in 3D của các hỗn hợp bê tông được thể hiện ở bảng 2.

Bảng 2: Tính chất lưu biến và khả năng in 3D của các hỗn hợp bê tông

STT	CP	Đo lưu biến			Khả năng in 3D
		μ (Pa.s)	τ_0 (Pa)	τ (Pa)	
1	M1-1	33,1	844	514	Được
2	M1-2	11,1	526	390	Được
3	M1-3	6,7	276	182	Được
4	M1-4	6,3	202	143	Hỗn hợp khá dẻo, hình dạng vật thể khi in 3D bị biến dạng.
5	M1-4B	13,1	447	372	Được
6	M1-4-1	2,9	96	49	Hỗn hợp quá dẻo, không tạo hình khi in 3D được
7	M1-4-0.32	2,8	208	134	Được
8	M1-4-2	1,9	630	559	Được
9	M1-4-3	1,6	2098	1383	Không được
10	M1-4-4	1,2	1143	848	Không được, nét in bê tông bị đứt đoạn
11	M2-1	Không đo được do bê tông quá khô cứng			Không được
12	M2-2	Không đo được do bê tông khá khô cứng			Không được
13	M2-3	Không đo được do bê tông khá khô cứng			Không được
14	M2-4	27,6	1143	719	Được
15	M2-0.42	Không đo được do bê tông quá khô cứng			Không được
16	M2-0.48	1,2	655	576	Được
17	M2-0.48SF	Không đo được do bê tông quá khô cứng			Không được
18	M2-0.54SF	295,9	1563	1249	Không được, nét in bê tông bị đứt đoạn
19	M3-1	Không đo được do bê tông quá khô cứng			Không được
20	M3-2	Không đo được do bê tông quá khô cứng			Không được
21	M3-3	Không đo được do bê tông quá khô cứng			Không được
22	M3-4	Không đo được do bê tông quá khô cứng			Không được
23	M4-1	283,5	6409	2801	Không được, nét in bê tông bị đứt đoạn
24	M4-2	51,5	3329	1106	Không được, nét in bê tông bị đứt đoạn
25	M4-3	11,6	696	599	Được
26	M4-4	6,3	460	361	Được
27	M4-0.44	86,2	410	290	Được
28	M4-0.48SF	214,5	1200	1061	Không được, nét in bê tông bị đứt đoạn

Tổng hợp đánh giá kết quả in 3D phân loại khả năng in 3D của bê tông thành 5 nhóm như sau:

- Nhóm bê tông in bị nghẽn tắc vòi in: đánh giá là không in được.
- Nhóm bê tông in thành dải bê tông nhưng không liên tục: đánh giá là không in được.
- Nhóm bê tông in thành dải bê tông liên tục, đều cạnh và kích thước: đánh giá là in được.
- Nhóm bê tông khá chảy dẻo: đánh giá là không in được.
- Nhóm bê tông chảy dẻo: đánh giá là không in được.

Bảng kết quả 2 cho thấy, hỗn hợp bê tông với tỉ lệ CL/CKD = 3 có độ linh động rất kém, hỗn hợp khô và rời rạc không tạo hình được. Ngoài ra, hỗn hợp bê tông với tỉ lệ CL/CKD = 2 và với N/CKD = 0,3 đến 0,34 cũng có độ linh động khá kém, hỗn hợp bê tông tạo hình đúc mẫu kiểm tra tính chất cơ học được nhưng khả năng in 3D không thành công, bê tông có thể in được với những cấp phối sử dụng tỉ lệ N/CKD bằng hoặc lớn hơn 0,36. Đối với những cấp phối bê tông có tỉ lệ CL/CKD = 1 thì quá trình in 3D tạo hình vật thể bê tông thành công với những cấp phối sử dụng tỉ lệ N/CKD từ 0,3 đến 0,34, khi tỉ lệ này tăng lên 0,36 và hơn nữa thì in 3D tạo hình vật thể không thành công do bê tông trở nên khá dẻo và chuyển dần sang trạng thái chảy.

Sử dụng SF với hàm lượng lớn (30% theo khối lượng xi măng) làm gia tăng rất mạnh các thông số lưu biến của hỗn hợp bê tông, cả độ nhớt dẻo, ứng suất chảy động và chảy tĩnh đều tăng nhiều so với hỗn hợp bê tông không sử dụng SF, ví dụ như cấp phối M4-0.44 có độ nhớt dẻo, ứng suất chảy tĩnh và chảy động lần lượt là 86,2 Pa.s, 409,9 và 289,8 Pa, các giá trị này tăng mạnh và đạt tương ứng lần lượt 214,5 Pa.s, 1200,1 và 1060,7 Pa với cấp phối M4-0.44SF có sử dụng 30% SF.

Khi giữ nguyên các yếu tố thành phần khác trong cấp phối bê tông, sử dụng 1% sợi PP tính theo hàm lượng xi măng làm gia tăng đáng kể độ nhớt của hỗn hợp bê tông, ví dụ như cấp phối M2-3 trở nên quá kém dẻo, không đo được các thông số lưu biến vì các giá trị lưu biến cao quá ngưỡng đo của thiết bị lưu biến kế, trong khi đó, cấp phối bê tông M2-4 sử dụng 0,25% sợi PP lại in 3D thành công với độ nhớt dẻo, ứng suất chảy tĩnh và chảy động lần lượt là 27,6 Pa.s, 1143 và 719 Pa.

Ngoài ra, kết quả nghiên cứu cũng cho thấy, bên cạnh việc thay đổi tỉ lệ CL/CKD và N/CKD để điều chỉnh lưu biến cho bê tông in 3D thì một cách khác là thay đổi hàm lượng phụ gia siêu dẻo cùng với hàm lượng phụ gia điều chỉnh độ nhớt (VMA). Khi tăng hàm lượng phụ gia siêu dẻo thì các thông số lưu biến của hỗn hợp bê tông như độ nhớt dẻo, ứng suất chảy tĩnh và chảy động đều giảm. Trong khi đó, tăng hàm lượng phụ gia VMA thì độ nhớt dẻo giảm nhưng không ảnh hưởng đến các giá trị ứng suất chảy của hỗn hợp bê tông, điều này có nghĩa là hỗn hợp bê tông dễ in 3D hơn và vật thể bê tông tạo hình vẫn có khả năng duy trì hình dáng trong suốt quá trình in. Tuy nhiên, sử dụng nhiều phụ gia siêu dẻo cùng với phụ gia VMA cũng có khả năng làm cho hỗn hợp bê tông trở nên quá chảy dẻo và không thành công khi in 3D, ngoài ra bê tông cũng có thể bị kéo dài ninh kết hoặc thậm chí là không ninh kết được. Đặc biệt là, bảng kết quả 2 chỉ ra rằng, với thiết bị in bê tông 3D sử dụng trong nghiên cứu này, hỗn hợp bê tông in 3D thành công với các đặc trưng lưu biến như sau:

- Ứng suất chảy tĩnh: 260 đến 1100 Pa.
- Ứng suất chảy động: 150 đến 700 Pa.



Hình 5. Máy in 3D được sử dụng để tạo hình các cấu kiện bê tông



Hình 6. Thử nghiệm khả năng in 3D của các hỗn hợp bê tông

4. KẾT LUẬN

Từ kết quả thực nghiệm đánh giá đặc trưng lưu biến và khả năng in 3D của các hỗn hợp bê tông, tác giả rút ra những kết luận như sau:

- Máy in bê tông 3D theo nguyên lý cần trục, trực vín để đùn hỗn hợp bê tông ra khỏi vòi in phù hợp sử dụng để đánh giá chất lượng và khả năng in 3D của những hỗn hợp bê tông khác nhau;
- Sử dụng SF với hàm lượng lớn (30% theo khối lượng xi măng) làm gia tăng rất mạnh các thông số lưu biến của hỗn hợp bê tông, cả độ nhớt dẻo, ứng suất chảy động và chảy tĩnh đều tăng nhiều so với hỗn hợp bê tông không sử dụng SF. Khi tăng hàm lượng phụ gia siêu dẻo thì các thông số lưu biến của hỗn hợp bê tông như độ nhớt dẻo, ứng suất chảy tĩnh và chảy động đều giảm. Trong khi đó, tăng hàm lượng phụ gia VMA thì độ nhớt dẻo giảm nhưng không ảnh hưởng đến các giá trị ứng suất chảy của hỗn hợp bê tông;
- Với thiết bị in bê tông 3D sử dụng trong nghiên cứu này, hỗn hợp bê tông in 3D thành công khi có các đặc trưng lưu biến như sau: ứng suất chảy tĩnh từ 260 đến 1100 Pa và ứng suất chảy động từ 150 đến 700 Pa.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ TP.HCM - Sở Khoa học và công nghệ TP.HCM trong khuôn khổ hợp đồng số 07/2021/HĐ-QKHCN. 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.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A Perrot, D. Rangard, A. Pierre, "Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques", *Mater Struct.* 19 (4) (2016) 1213-1220.
- [2] R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, and J. Dirrenberger, "3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research", *Cem. Concr. Res.*, 112, pp. 37-49, 2018.
- [3] Yi Zhang, Zhengwu Jiang, Yanmei Zhu, Jie Zhang, Qiang Ren and Tao Huang, Effects of redispersible polymer powders on the structural build-up of 3D printing cement paste with and without hydroxypropyl methylcellulose, *Constr. Build. Mater.* 267 (2021) 120551.
- [4] D. Jiao, C. Shi, Q. Yuan, X. An, Y. Liu, H. Li, Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete – a review, *Cem. Concr. Compos.* 83 (2017) 146–159.
- [5] C. Park, M. Noh, T. Park, Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, *Cem. Concr. Res.* 35 (5) (2005) 842–849.
- [6] Yen T.H. Cu, Mien V. Tran, Chinh H. Ho, Phuc H. Nguyen, Relationship between workability and rheological parameters of self-compacting concrete used for vertical pump up to supertall buildings, *J. Builg. Eng.* 32 (2020) 786–798. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101786>.
- [7] R.S. Ahari, T.K. Erdem, K. Ramyar, Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials, *Cem. Concr. Compos.* 59 (2015) 26–37.
- [8] Biranchi Panda, Ming Jen Tan, Rheological behavior of high volume fly ash mixtures containing micro silica for digital construction application, *Materials Letters.* 237 (2019) 348-351. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.11.131>.
- [9] M. Rahman, M. Baluch, M. Malik, Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures, *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 710–717.
- [10] Mien V. Tran, Yen T.H. Cu, Chau V.H. Le, Rheology and shrinkage of concrete using polypropylene fiber for 3D concrete printing, *J. Builg. Eng.* 44 (2021) 103400. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103400>.