

## Ảnh hưởng của độ dẻo hỗn hợp bê tông đến khả năng in 3D

Trần Văn Miên<sup>1,2\*</sup>, Nguyễn Hoàng Phúc<sup>1,2</sup>, Nguyễn Thành Thái<sup>3</sup>, Nguyễn Tiến Dũng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh, 268 Lý Thường Kiệt, Phường 14, Quận 10, Thành phố Hồ Chí Minh

<sup>2</sup> Đại Học Quốc Gia TP.HCM, Phường Linh Trung, Quận Thủ Đức, Thành phố Hồ Chí Minh

<sup>3</sup> Viện Khoa học công nghệ xây dựng, 81 Trần Cung, Phường Nghĩa Tân, Quận Cầu Giấy, Thành phố Hà Nội.

### TỪ KHOÁ

In bê tông 3D  
 Tính lưu biến  
 Tính lưu động  
 Tính bền ướt  
 Khả năng in

### TÓM TẮT

Ứng dụng công nghệ in 3D trong lĩnh vực xây dựng nhằm mang lại sự tối ưu hóa thời gian thi công, chi phí xây dựng, tính linh hoạt trong thiết kế kiến trúc lẫn kết cấu, điều kiện làm việc an toàn hơn và các khía cạnh môi trường. Quá trình in bê tông 3D được thể hiện qua các đặc tính như khả năng in được, khả năng duy trì hình dạng sau khi lắng đọng và không bị sụp đổ dưới tải trọng của các lớp tiếp theo được xếp chồng lên nhau. Bài báo này trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của độ dẻo hỗn hợp bê tông thông qua tỷ lệ nước trên chất kết dính (N/CKD) đến khả năng in 3D bê tông. Tỷ lệ N/CKD thay đổi lần lượt là 0,3; 0,32; 0,34; 0,36; 0,38 và 0,4. Trong phần thực nghiệm, để kiểm soát ban đầu khả năng in của hỗn hợp bê tông các thí nghiệm như độ lưu biến, khả năng bền ướt và thời gian đông kết được đề xuất. Kết quả cho thấy, hỗn hợp bê tông với tỷ lệ N/CKD từ 0,32 đến 0,34 có độ nhớt cao, ít chảy lỏng, khả năng giữ được hình dạng tốt hơn nên rất phù hợp trong quá trình in bê tông 3D.

### KEYWORDS

3D concrete printing  
 Workability  
 Rheology  
 Cylinder stability  
 Printability

### ABSTRACT

Application of 3D printing technology to be highly advantageous in the construction field about optimizing construction time, cost, flexibility in architectural and structural design, safer working conditions, and environmental aspects. The 3D concrete printing process is significantly affected by the properties of fresh concrete such as printability, the ability to maintain shape after deposition, and not collapse under a load of subsequent layers. This paper presents an investigation on the effects of water-to-binder ratio (W/B) of 0.3, 0.32, 0.34, 0.36, 0.38, and 0.4, respectively on the printability. In the experimental study, printability was measured according to four different tests such as rheology, fluidity, cylinder stability, and the initial setting time. The obtained results show that the concrete mixture with the W/B ratio from 0.32 - 0.34 has a high viscosity, less fluidity, better shape retention that are very suitable in the concrete printing process 3D.

### 1. Giới thiệu

Trong vài thập kỷ qua, ngày càng có nhiều nhà nghiên cứu trên khắp thế giới đã nghiên cứu kỹ thuật in bê tông 3D như một cuộc cách mạng công nghệ trong lĩnh vực xây dựng. Về nguyên tắc, in bê tông 3D có những ưu điểm của cả bê tông tự lèn (tức là tự đầm mà không có sự hỗ trợ của rung động) và bê tông phun (tức là bê tông tươi được đẩy ra khỏi vòi phun để chế tạo các dạng cấu kiện phức tạp) nhằm tạo ra cấu kiện bê tông có hình dạng phức tạp với độ chính xác cao mà không cần dùng ván khuôn [1]. Sản phẩm với cấu trúc phức tạp được thiết kế bằng phần mềm mô hình CAD 3D dưới sự hỗ trợ của máy tính. Dữ liệu sẽ được nhập vào thiết bị in từng lớp để in cấu kiện bằng cách kiểm soát việc đùn ép hỗn hợp bê tông.

Thách thức chính trong việc phát triển hỗn hợp bê tông có thể in 3D cần có khả năng chảy tốt để đảm bảo cho việc bơm và đùn ép thành các sợi bê tông liên tục không có khoảng trống, không bị biến dạng về kích thước thông qua vòi phun. Các sợi bê tông này có khả năng duy trì hình dạng tốt và liên kết với nhau để tạo thành từng lớp. Nhưng khi lớp in đã hoàn thành cần chuyển nhanh thành dạng rắn có tính dính kết cao và khả năng chống đỡ tốt để không bị biến dạng hoặc sụp đổ bởi chính trọng lượng bản thân và trọng lượng của các lớp tiếp theo được xếp chồng lên nhau gây ra [2, 3]. Hiện tại vẫn chưa có hướng dẫn liên quan, phương pháp thí nghiệm hoặc tiêu chuẩn được đề xuất cho thiết kế và đánh giá hỗn hợp bê tông in 3D.

Dựa trên những nghiên cứu và thực nghiệm của tác giả Ali Kazemian và cộng sự [4] đã đề xuất quy trình thí nghiệm trong phòng thí nghiệm. Tính công tác của hỗn hợp bê tông được mô tả và đánh giá về

\*Tác giả liên hệ: tvmien@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 27/04/2021, giải trình ngày 12/06/2021, chấp nhận đăng 15/07/2021

chất lượng in, độ ổn định hình dạng và khả năng in. Trong đó, phương pháp thí nghiệm tính bền ướt được phát triển để đánh giá nhanh độ ổn định hình dạng của hỗn hợp bê tông khác nhau. Bên cạnh đó, phương pháp thí nghiệm tính lưu động và thời gian ninh kết cũng được đưa ra để đánh giá giới hạn khả năng in và giới hạn tác động ảnh hưởng khả năng in. Tác giả đưa ra ba tiêu chí đánh giá chất lượng lớp in: (a) Lớp in phải không có khuyết tật bề mặt, không có bất kỳ sự gián đoạn nào do khô cứng nhanh của hỗn hợp và độ kết dính kém; (b) Các cạnh của lớp in chính xác theo thiết kế ban đầu; (c) sự phù hợp về kích thước, các sợi in đảm bảo đồng nhất, không chênh lệch kích thước các lớp in.

Trong quá trình in bê tông 3D, hỗn hợp bê tông có thể bị biến dạng, không thể chịu được hoặc sụp đổ khi ứng suất cắt tạo ra trong bê tông vượt quá ứng suất chảy [5]. Liên quan đến vấn đề này, một số lượng lớn các nghiên cứu cho thấy ảnh hưởng của các thành phần vật liệu trong hỗn hợp bê tông in 3D đã được nghiên cứu. Theo tác giả Karthick Manikandan và cộng sự [6] chỉ ra rằng một hỗn hợp có ứng suất chảy cao hơn nhưng không thích hợp cho in 3D vì rất khó bơm, đùn ép, có thể gián đoạn trong quá trình đùn và các lớp không thể xếp chồng lên nhau. Mặt khác, hỗn hợp có độ nhớt cao hơn sẽ đóng rắn nhanh hơn nhưng không thể đùn ép được gây tác động vòi phun. Tác giả Yiweil Weng và cộng sự [7] chỉ ra rằng hỗn hợp bê tông có thể in 3D cần có đặc tính lưu biến tối ưu hóa. Trong đó, thành phần vật liệu đóng vai trò như yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến các đặc tính lưu biến của hỗn hợp bê tông. Khi tăng tỷ lệ nước trên chất kết dính thì các thông số lưu biến (lực cản dòng chảy, độ nhớt mô-men xoắn và tính xúc biến) sẽ giảm. Độ nhớt mô-men xoắn tăng lên trong khi lực cản dòng chảy và tính xúc biến giảm khi tăng tỷ lệ tro bay trên xi măng. Ngược lại, ảnh hưởng của tỷ lệ silica fume trên xi măng cho thấy xu hướng ngược lại đối với các đặc tính lưu biến so với tỷ lệ tro bay trên xi măng.

Ở Việt Nam, việc nghiên cứu và ứng dụng công nghệ in bê tông 3D trong xây dựng hiện đang rất mới mẻ và được dự đoán sẽ trở thành xu hướng trong tương lai. Chính vì thế còn nhiều khía cạnh cần được nghiên cứu và phát triển như: tiến hành các thực nghiệm dựa trên hệ nguyên vật liệu địa phương để tìm ra các thành phần cấp phối tối ưu để đảm bảo khả năng in được; giải pháp, lý thuyết tính toán kết cấu in 3D; quy trình thi công bê tông in 3D để tạo ra các sản phẩm có quy mô lớn phù hợp với điều kiện Việt Nam và phát triển trên thị trường [8].

Dựa vào cơ sở trên, bài báo này khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ N/CKD thay đổi lần lượt là 0,3; 0,32; 0,34; 0,36; 0,38; 0,4 đến khả năng in 3D của hỗn hợp bê tông. Thêm vào đó, các thí nghiệm xác định tính lưu động, thời gian ninh kết, tính bền ướt và tính lưu biến được thực hiện để đơn giản hóa quá trình thí nghiệm và giảm các lần chạy thí nghiệm in bê tông 3D.

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

**2.1. Vật liệu thí nghiệm**

Thành phần chất kết dính được sử dụng để thiết kế hỗn hợp bê tông in 3D gồm có: xi măng Vicem Hà Tiên loại PC40 (XM), tro bay loại F của Duyên Hải 1 (FA) và silica fume của Elkem (SF) với khối lượng riêng lần lượt là 3,05 g/cm<sup>3</sup>, 2,3 g/cm<sup>3</sup>, 2,2 g/cm<sup>3</sup>. Kết quả phân tích thành phần hóa của xi măng, tro bay và silica fume được thể hiện ở Bảng 1. Cát sông Đồng Tháp (C) có Mô-đun độ lớn 2,3 và khối lượng riêng 2,6 g/cm<sup>3</sup> được sử dụng để đảm bảo khả năng bơm và đùn ép. Phụ gia Sikament R7N (PG) được sử dụng trong nghiên cứu là loại phụ gia hóa dẻo giảm nước, duy trì được tính linh động của bê tông dài hơn nhưng vẫn đảm bảo sự phát triển cường độ nhanh hơn, ít co ngót và giảm từ biến bê tông.

**Bảng 1.**

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

Thành phần	XM	FA	SF
SiO <sub>2</sub>	21,98	52,86	97,73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,24	34,19	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,79	3,85	0,26
CaO	61,92	2,57	0,05
TiO <sub>2</sub>	-	0,65	0,05
MgO	2,55	2,10	0,30
Na <sub>2</sub> O	0,15	0,14	0,30
K <sub>2</sub> O	0,34	2,59	0,37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,32	0,19
SO <sub>3</sub>	2,32	0,48	0,59
MKN	2,71	0,25	0,15

**2.2. Phương pháp thí nghiệm**

Trong nghiên cứu này, các thành phần hỗn hợp bê tông in 3D được dựa trên các tài liệu tham khảo và hoàn thiện cấp phối dựa trên thực nghiệm. Tất cả cấp phối được tính toán theo thể tích tuyệt đối của 1 m<sup>3</sup> hỗn hợp bê tông. Trong đó, hàm lượng cát bằng hàm lượng chất kết dính là 50 %, tỷ lệ chất xi măng trên chất kết dính 70 %, tỷ lệ tro bay trên chất kết dính 20 % và phần còn lại 10 % là tỷ lệ giữa silicafume trên chất kết dính. Tỷ lệ phụ gia Sikament R7N so với chất kết dính là 0,5 % và tỷ lệ nước trên chất kết dính thay đổi từ 0,3 đến 0,4. Sáu hỗn hợp bê tông in 3D khác nhau được thể hiện trong Bảng 2 đã được dùng trong nghiên cứu.

Khả năng in của hỗn hợp bê tông được thể hiện qua thí nghiệm xác định tính lưu động bằng phương pháp bàn dần theo TCVN 3121-3 (2003) [9] và thí nghiệm xác định thời gian bắt đầu ninh kết theo TCVN 9338 (2012) [10]. Bên cạnh đó, để đánh giá nhanh độ ổn định hình dạng của hỗn hợp bê tông mà không cần phải thực hiện in các lớp bê tông dựa vào thí nghiệm xác định tính bền ướt theo Ali Kazemnia và

**Bảng 3.**

Tổng hợp kết quả thí nghiệm độ lưu động, thời gian ninh kết, tính bền ướt và tính lưu biến.

Tên mẫu	N/CKD	Thời gian bắt đầu ninh kết (giờ)	Độ lưu động (cm)	Tính lưu biến		Độ bền ướt		
				Ứng suất chảy $\tau_0$ (Pa)	Độ nhớt dẻo $\mu_{pl}$ (Pa.s)	Độ giảm chiều cao do trọng lượng bản thân (mm)	Độ giảm chiều cao khi chịu ứng suất 1057 Pa (mm)	Ứng suất phá vỡ mẫu (Pa)
CP1	0,30	4,13	15,8	1015,8	10,85	1,5	6,0	5287
CP2	0,32	5,11	16,8	933,7	8,27	3,0	8,0	3172
CP3	0,34	5,80	18,7	578,7	2,76	4,0	10,0	2115
CP4	0,36	6,10	23,3	294,4	2,58	7,0	32,0	1057
CP5	0,38	6,15	24,7	262,7	2,55	12,0	36,0	1057
CP6	0,40	6,21	24,7	216,0	1,00	30,0	40,0	1057

cộng sự (2019) [4]. 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. Thí nghiệm xác định tính lưu biến (ứng suất chảy  $\tau_0$  và độ nhớt dẻo  $\mu_{pl}$ ) thể hiện qua thí nghiệm đường cong dòng chảy của máy đo lưu biến kế ICAR Plus với bốn cánh quạt theo Nicolas Roussel (2018) [11]. Thiết bị và dụng cụ thí nghiệm sử dụng trong nghiên cứu thể hiện qua Hình 1.

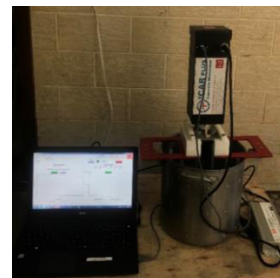
**Bảng 2.**

Thành phần hỗn hợp bê tông in 3D sử dụng trong nghiên cứu.

Tên mẫu	N/CKD	C	XM	FA	SF	N	PG
CP1	0,30	956	669	191	96	287	5
CP2	0,32	938	656	188	94	300	5
CP3	0,34	920	644	184	92	313	5
CP4	0,36	904	633	181	90	325	5
CP5	0,38	888	621	178	89	337	4
CP6	0,40	872	611	174	87	349	4

Một thiết bị in bê tông đơn giản được sử dụng trong phòng thí nghiệm để kiểm tra khả năng in của các hỗn hợp bê tông. Thiết bị được dựa vào cơ chế đùn ép dạng trục vít xoắn và đầu ra vòi phun có kích thước 14 mm x 7 mm. Trong đó, khả năng in đánh giá qua việc hỗn hợp bê tông phải được đùn ra từ vòi phun và duy trì hình dạng dưới tải trọng bản thân, tải trọng do các lớp tiếp theo xếp chồng lên nhau. Trong nghiên cứu này, khả năng in của hỗn hợp bê tông được đánh giá dựa vào hai tiêu chí sau: (1) Sợi bê tông in ra phải đảm bảo đùn liên tục không bị đứt đoạn,

ngắt quãng trong suốt quá trình in thông thí nghiệm in một đoạn liên tục có độ dài 130 cm và (2) Khả năng giữ nguyên hình dạng thiết kế của các lớp in khi đùn chồng lên nhau được kiểm tra qua thí nghiệm in mẫu có chiều dài 130 cm với chiều cao ba lớp.



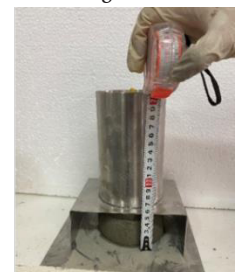
(a) Lưu biến kế ICAR xác định ứng suất chảy, độ nhớt dẻo



(b) Dụng cụ xác định thời gian ninh kết



(c) Dụng cụ xác định tính lưu động



(d) Dụng cụ xác định tính bền ướt

**Hình 1.** Dụng cụ thí nghiệm dùng để xác định tính công tác của hỗn hợp bê tông.

### 3. Kết quả nghiên cứu

#### 3.1. Ảnh hưởng của N/CKD đến tính lưu động, thời gian ninh kết, tính bền ướt và tính lưu biến của hỗn hợp bê tông

Kết quả nghiên cứu về tính lưu động, thời gian ninh kết, tính bền ướt và tính lưu động của hỗn hợp bê tông khi thay đổi tỷ lệ N/CKD từ 0,3 đến 0,4 lần lượt được thể hiện trong Bảng 3. Khi tăng tỷ lệ N/CKD thì tính lưu động, thời gian bắt đầu ninh kết có xu hướng tăng. Ngược lại ứng suất chảy ( $\tau_0$ ), độ nhớt dẻo ( $\mu_{pl}$ ) và khả năng chịu tải trọng bản thân, ứng suất tác dụng lại có xu hướng giảm dần.

Như được thể hiện trong Bảng 3, giá trị của ứng suất chảy và độ nhớt dẻo có xu hướng giảm dần khi tăng tỷ lệ N/CKD. Ứng suất chảy giảm mạnh từ 1015,8 Pa xuống 294,4 Pa và độ nhớt dẻo giảm mạnh từ 10,85 Pa.s xuống 2,58 Pa.s khi tăng tỷ lệ N/CKD từ 0,3 đến 0,36. Trong khi đó, tăng tỷ lệ N/CKD từ 0,34 đến 0,36 độ lưu động tăng nhanh từ 18,7mm lên 23,3 mm hỗn hợp bê tông từ trạng thái tương đối khô, dính nhiều sang trạng thái ướt, nhờn, chảy lỏng. Điều này có thể giải thích rằng, khi lượng nước còn quá ít chỉ đủ để hấp phụ trên bề mặt vật rắn mà chưa tạo ra độ lưu động của hỗn hợp bê tông nhưng tạo ra ứng suất chảy cao cùng với độ nhớt dẻo cao dẫn đến lực dính giữa các phần tử lớn, nội lực ma sát lớn giúp cho sợi bê tông sau khi in ra khỏi vòi có thể giữ vững hình dạng, chịu được trọng lượng của bản thân. Tuy nhiên khi tăng lượng nước đến một giới hạn nào đó sẽ xuất hiện nước tự do, lượng nước sẽ bôi trơn các hạt rời rạc (chất kết dính, cát sông) và giữa các hạt có thể trơn trượt được là do các hạt không tiếp xúc trực tiếp với nhau mà tiếp xúc thông qua màng nước, màng nước càng dày tức lượng nước dùng nhiều thì nội lực ma sát giữa chúng giảm xuống làm hỗn hợp có độ lưu động tăng lên.

Khi tăng tỷ lệ N/CKD từ 0,3; 0,32; 0,34 thì thời gian bắt đầu ninh kết tăng lần lượt là 4, 5 và 6 giờ nhưng khi tăng tỷ lệ N/CKD từ 0,36 đến 0,4 có thời gian ninh kết giữ nguyên khoảng 6 giờ. Thời gian bắt đầu ninh kết ngắn hơn là do tỷ N/CKD thấp hơn dẫn đến thúc đẩy quá trình hydrat hóa của xi măng có thể giúp cho các sợi bê tông sau khi in đạt được cường độ sớm nhưng sẽ ảnh hưởng đến quá trình in gây tắc nghẽn vòi phun. Việc tắc vòi phun có thể gây mất thời gian đáng kể, hư hỏng vòi phun và thêm chi phí trong quá trình xây dựng.

Trong các cấp phối khảo sát, với tỷ lệ N/CKD là 0,3 có khả năng giữ vững hình dạng và chịu tải lớn nhất, trong khi hỗn hợp tỷ lệ N/CKD là 0,4 có biến dạng lớn nhất so với những cấp phối còn lại. Khi tăng tỷ lệ N/CKD từ 0,3 đến 0,34 thì khả năng chịu tải trọng bản thân đều có độ giảm chiều cao dưới 10 %, biến dạng  $\leq 20$  % khi cho một lực tương đương với tải trọng bản thân mẫu tác dụng và chịu được tải trọng lớn hơn tải trọng bản thân gấp 2 đến 3 lần. Còn đối với tỷ lệ N/CKD thay đổi từ 0,36 đến 0,4 hỗn hợp bê tông có độ giảm chiều cao do trọng lượng bản thân, do ứng suất 1075 Pa gây ra rất lớn và dường như bị phá vỡ hoàn toàn. Nguyên nhân là do tăng tỷ lệ N/CKD làm tăng độ lưu động của hỗn hợp bê tông, độ nhớt dẻo và ứng suất cắt càng giảm dẫn đến khả năng chịu tải trọng bản thân của hỗn hợp càng kém. Điều đó cho thấy các cấp phối bê tông với tỷ lệ N/CKD từ 0,36 đến 0,4 không phù hợp dùng cho in 3D.

3.2. Đánh giá khả năng in



(a) Sợi bê tông in ra liên tục, bề mặt nhẵn mịn.



(b) Sợi bê tông in ra liên tục, bề mặt khô, nhiều lỗ rỗng



(c) Giữ được hình dạng dưới trọng lượng bản thân



(d) Không giữ được hình dạng dưới trọng lượng bản thân và lớp in chồng lên nhau.

Hình 2. Kiểm tra khả năng in của các hỗn hợp bê tông trong phòng thí nghiệm.

Bảng 4.

Đánh giá khả năng in của hỗn hợp bê tông.

Tên mẫu	N/CKD	Đánh giá khả năng in
CP1	0,30	- Sợi bê tông in ra đảm bảo tính liên tục. Tuy nhiên bề mặt bê tông khô, nhiều lỗ rỗng.
CP2	0,32	- Sợi bê tông in ra đảm bảo tính liên tục, có bề mặt nhẵn mịn.
CP3	0,34	- Giữ được hình dạng dưới trọng lượng bản thân và các lớp in chồng lên nhau.
CP4	0,36	- Sợi bê tông in ra đảm bảo tính liên tục, có bề mặt nhẵn mịn. - Không chịu được trọng lượng của các lớp in chồng lên nhau. Các lớp in có hiện tượng xô lệch, biến dạng.
CP5	0,38	- Sợi bê tông in ra bị biến dạng 1 mm đến 2 mm so với kích thước vòi phun.
CP6	0,40	- Không giữ được hình dạng dưới trọng lượng của bản thân và các lớp in chồng lên nhau.

Khả năng in được của các hỗn hợp bê tông với tỷ lệ N/CKD thay đổi từ 0,3 đến 0,4 được thực hiện qua việc đùn ép tại phòng thí nghiệm với thiết bị có dạng trục vít xoắn đùn ép vòi phun ra. Để đánh giá hỗn hợp bê tông có khả năng in 3D được dựa vào hai tiêu chí in: (1) sợi bê tông in ra phải đảm bảo đùn liên tục không bị đứt đoạn, ngắt quãng trong suốt quá trình in, (2) khả năng giữ nguyên hình dạng thiết kế của các lớp in khi đùn chồng lên nhau. Các kết quả được thể hiện trong Bảng 4 và Hình 2.

#### 4. Kết luận

Từ những kết quả thực nghiệm, một số kết luận trong bài nghiên cứu được rút ra như sau:

Khi tăng tỷ lệ N/CKD từ 0,3 đến 0,4 nhận thấy tính lưu động, thời gian bắt đầu ninh kết có xu hướng tăng lên nhưng tính bền ướt, tính lưu biến (ứng suất chảy, độ nhớt dẻo) lại có xu hướng giảm dần. Sự thay đổi tăng, giảm thể hiện rõ nhất khi thay đổi tỷ lệ N/CKD từ 0,34 lên 0,36.

Kết quả in bê tông 3D được đề xuất thực hiện trong phòng thí nghiệm nhận thấy rằng với tỷ lệ N/CKD là 0,32; 0,34 cho hỗn hợp bê tông ít chảy lỏng, độ nhớt cao nhưng khả năng giữ hình dạng sau khi in ra tốt nhất. Thông số đánh giá khả năng in đã được kiểm tra bằng bốn phương pháp thí nghiệm khác nhau như sau: tính lưu động đạt được là 16,8 cm đến – 18,7 cm, thời gian bắt đầu ninh kết khoảng 5 giờ, ứng suất chảy là 294,4 Pa đến 578,7 Pa, độ nhớt dẻo là 2,76 Pa.s đến 8,27 Pa.s cùng với độ giảm chiều cao do trọng lượng bản thân là 3 mm đến 4 mm và ứng suất phá vỡ là 2115 Pa đến 3172 Pa.

Sử dụng sợi PP giúp bê tông cải thiện tính chất của hỗn hợp bê tông, cải thiện khả năng liên kết các phần tử trong quá trình đùn, làm cho hỗn hợp bê tông in 3D khi đùn không bị gãy, bị đứt đoạn, tăng độ cố kết, độ ổn định hình dạng hỗn hợp bê tông tốt hơn.

Ngoài ra, thí nghiệm tính bền ướt và tính lưu biến được phát triển như một phương pháp thí nghiệm dùng để đánh giá nhanh khả năng in của hỗn hợp bê tông cho việc lựa chọn cấp phối phù hợp với mô hình thí nghiệm đơn giản, giảm số lượng in bê tông 3D.

#### Tài liệu tham khảo

[1]. T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim, R. A. Buswell, A. G. F. Gibb, and T. Thorpe. "Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete," *Material and Structures*, Vol.45, IS. 8, pp.1221-1232, Aug. 2021, DOI. 10.1617/s11527-012-9828-z

[2]. Y. Zhang, Y. Zhang, W. She, L. Yang, G. Liu, Y. Yang. "Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing Concrete," *Construction and Building Materials*, Vol.201, p.278-285, Mar.2019, DOI. 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061

[3]. M. Papachristoforou, V. Mitsopoulos, M.Stefanidou. "Evaluation of workability parameters in 3D printing concrete," *Procedia Structural Integrity*, Vol.10, p.155-162, Jan. 2018, DOI. 10.1016/j.prostr.2018.09.023.

[4]. A. Kazenmian, X. Yuan, R. Meier, B. Khoshnevis. "Chapter 2 – Performance based testing of Portland cement concrete for construction scale 3D printing," *3D concrete printing technology*, Butterworth-Heinemann, p.13-35, Jan.2019.

[5]. A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre. "Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques," *Materials and Structures*, Vol.49, IS.4, p.1213-1220, 2016. DOI. 10.1617/s11527-015-0571-0

[6]. K. Manikandan, K. Wi, X. Zhang, K. Wang, H. Qin. "Characterizing cement mixtures for concrete 3D printing," *Manufacturing Letters*, Vol.24, p.33-37, Apr.2020, DOI. 10.1016/j.mfglet.2020.03.002.

[7]. Y. Weng, B. Lu, M. Li, Z. Liu, M. Tan, S. Qian. "Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing," *Construction and Building Materials*, Vol.189, p.676-685, Nov. 2018, DOI. 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.039 .

[8]. L.V. Thuc, T.Q.Dung, N.T.D.Thuy. "Công nghệ in bê tông 3D – Định hướng phát triển và áp dụng ở Việt Nam," *Tap chí khoa Công nghệ Xây dựng NUCE*, Số 12, p. 49-56, Tháng 6 ,2018 .

[9]. TCVN 3121-3. "Xác định độ lưu động của vữa tươi - phương pháp bàn đẵn," Tiêu chuẩn Việt Nam, 2003.

[10]. TCVN 9338. "Hỗn hợp bê tông nặng – Phương pháp xác định thời gian đông kết," Tiêu chuẩn Việt Nam, 2012.

[11]. N. Roussel. "Rheological requirements for printable concretes," *Cement and Concrete Research*, Vol.112, p. 76-85, Oct.2018, DOI. 10.1016/j.cemconres.2018.04.005.