

Công nghệ và quy trình in bê tông 3D dùng cho xây dựng công trình nhà ở

Technology and process of 3D concrete printing used to construct full scaled houses

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

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

²Đại học Quốc gia TP.HCM; *Email: tvmien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Với những ưu điểm về tiết kiệm nhân công, thời gian - chi phí thi công và đa dạng kiến trúc, công nghệ in 3D bê tông được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực xây dựng dân dụng và giao thông, đặc biệt phát triển mạnh từ năm 2015 cho đến nay. Tuy nhiên, đến nay chỉ tiêu kỹ thuật để đánh giá hỗn hợp bê tông dùng in 3D như các thông số lưu biến, chỉ tiêu kỹ thuật để đánh giá khả năng in, độ bền của cấu kiện bê tông in 3D và quy trình in 3D vẫn còn thiếu nhiều thông tin và chưa có tiêu chuẩn. Do đây là lĩnh vực nghiên cứu mới. Bài báo này trình bày các công nghệ in bê tông 3D, so sánh, phạm vi sử dụng, ưu và nhược điểm của từng loại công nghệ in bê tông 3D khi áp dụng để thi công công trình thực. Đặc biệt là, bài báo trình bày chi tiết quy trình in bê tông 3D đã áp dụng thành công để thi công xây dựng công trình nhà ở thấp tầng có diện tích xây dựng từ 60 đến 120 m², trong đó, vật liệu bê tông dùng để in 3D được chế tạo dựa trên nguyên vật liệu địa phương.

Từ khóa: Bê tông in 3D; công nghệ in 3D; quy trình in 3D.

ABSTRACT

Due to advantages as saving labour, time, fee of construction and art design, application of 3D concrete printing to civil and infrastructure construction has become popularly, especially since 2015. However, up to now, there are no standards or technical guideline issued to cover specifications of 3D printed concrete in terms of rheology, printability, durability and printing process. This paper presents technologies of 3D concrete printing, makes comparison and evaluation to recommend a suitable technology of 3D concrete printing used in Viet Nam currently. Especially, the paper describes detailed process of 3D concrete printing applied successfully to print full scaled houses in Viet Nam with slab areas from 60 to 120 m².

Key words: 3D printed concrete; 3D printing technology, 3D printing process.

1. GIỚI THIỆU

In bê tông 3D trong xây dựng là quá trình tạo hình các đối tượng (vật thể công trình) ba chiều bằng cách đắp chồng các lớp vật liệu bê tông lên nhau và được định dạng dưới sự kiểm soát của máy tính để tạo ra vật thể đã được vẽ sẵn trên phần mềm CAD (Computer-Aided Design). Quá trình tạo hình vật thể bằng công nghệ in 3D có nét độc đáo là có thể tạo ra vật thể với bất kỳ hình dáng nào, và quá trình tạo hình được thực hiện nhanh mà không cần khuôn. Quá trình tạo hình này đã được sử dụng rất nhiều cho thiết kế sử dụng các vật liệu polymer, kim loại, gốm sứ, giấy và một số loại thực phẩm [1, 2, 3]. Có thể nói, trong lĩnh vực xây dựng, 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.

Trong nhiều năm qua, do có các ưu điểm như có thể tạo thành nhiều hình dạng khác nhau (chỉ phụ thuộc vào ván khuôn tạo hình), khả năng chịu nhiệt cao và độ bền xâm thực tương đối cao khi làm việc trong các môi trường, cho nên bê tông đã và đang được sử dụng phổ biến trên toàn thế giới với vai trò là một trong những vật liệu xây dựng chính, cả tại chỗ và đúc sẵn. Thông thường, trong xây dựng công trình 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 35-54% tổng chi phí xây dựng và tiêu tốn 50-75% tổng thời gian thi công [4, 5, 6]. Ngoài ra ngành công nghiệp xây dựng tạo ra một lượng lớn đáng kể chất thải xây dựng như bê tông, vữa, sắt thép dư thừa, và đặc biệt là ván khuôn thải loại ra sau khi tạo hình cấu kiện xây dựng. Bằng việc áp dụng công nghệ in bê tông 3D sẽ có thể giảm đáng kể chất thải xây dựng khi không cần ván khuôn để tạo hình cấu kiện xây dựng, lượng bê tông trộn được kiểm soát cẩn thận trong hệ thống tự động và nguyên liệu chế tạo mục in bê tông có thể tận dụng các chất thải rắn (tro xỉ nhiệt điện, xỉ bauxit, xỉ thép, xỉ nhôm, xỉ v.v.), các cấu trúc bê tông in 3D có khả năng tiết kiệm đáng kể chi phí xây dựng, cải thiện năng suất và trên hết, có thể hạn chế đáng kể tác động môi trường bằng cách sử dụng ít vật liệu hơn và tạo ra ít chất thải hơn. Ngành xây dựng dân dụng chiếm tỷ trọng đáng kể trong tổng GDP của cả nước. Ý tưởng áp dụng in 3D vào ngành Xây dựng đã được nghiên cứu và đưa vào ứng dụng ở các nước tiên tiến trên thế giới từ năm 2015 và đã có những thành quả đầu tiên. Ở Trung Quốc có công ty Winsun đã nghiên cứu và triển khai ứng dụng công nghệ in bê tông 3D để xây dựng nhà ở đến 5 tầng, và xây dựng cầu có nhịp đến 24m tại Thượng Hải [7]. Ở Nga có công ty Abis Cor đã tiến hành xây dựng nhà 3 tầng bằng công nghệ in 3D bê tông, máy in

sử dụng cánh tay robot. Ngoài ra, tại Đan Mạch, Công ty COBOD sử dụng công nghệ in 3D bê tông với hệ cần trục để in nhà 2 tầng. Đặc biệt là tại Mỹ, các công ty như ICON và Total Kustom đã triển khai các dự án nhà ở cho người vô gia cư lên đến 100 căn, diện tích của từng căn nhà là 60m². Toàn bộ các căn nhà đều được xây dựng 100% bằng công nghệ in bê tông 3D. Mỗi căn nhà được hoàn thành xây dựng phần thô trong 24 tiếng nhờ vào công nghệ in bê tông 3D. Kết quả nghiên cứu và triển khai ứng dụng ở các nước đã cho thấy in 3D bê tông là một giải pháp giúp đẩy nhanh tiến độ và cắt giảm chi phí xây dựng công trình.

Tuy nhiên, cho đến nay, chỉ tiêu kỹ thuật để đánh giá hỗn hợp bê tông dùng in 3D như các thông số lưu biến, chỉ tiêu kỹ thuật để đánh giá khả năng in, độ bền của cấu kiện bê tông in 3D và quy trình in 3D vẫn còn thiếu nhiều thông tin và chưa có tiêu chuẩn do đây là lĩnh vực nghiên cứu mới [8].

Bài báo trình bày các công nghệ in bê tông 3D, so sánh, phạm vi sử dụng, ưu và nhược điểm của từng loại công nghệ in bê tông 3D khi áp dụng để thi công công trình thực. Đặc biệt là, bài báo trình bày chi tiết quy trình in bê tông 3D đã áp dụng thành công để thi công xây dựng công trình nhà ở thấp tầng có diện tích xây dựng từ 60 đến 120 m², trong đó, vật liệu bê tông dùng để in 3D được chế tạo dựa trên nguyên vật liệu địa phương.



Hình 1. Ngôi nhà nổi trên sông được chế tạo bằng công nghệ in bê tông 3D chỉ trong 48 giờ [9]

2. LỰA CHỌN CÔNG NGHỆ IN BÊ TÔNG 3D

Công nghệ in 3D bê tông bao gồm 2 nhánh công nghệ chính:

- Máy in bê tông 3D theo nguyên lý giàn (gantry);
- Máy in bê tông 3D theo nguyên lý cánh tay robot.

Trong 2 nhánh công nghệ trên, nguyên liệu sử dụng cho in 3D được chia thành 2 nhóm:

- Nhóm nguyên liệu được trộn đều, đồng nhất rồi đưa vào cùng 1 vòi in - VL1;
- Nhóm nguyên liệu gồm bột mịn và dung dịch chất kết dính đưa vào 2 vòi in khác nhau để in cấu kiện - VL2.

Nhóm VL1 sử dụng với bê tông có cốt liệu lên đến 10mm, sản phẩm in lớn, thành dày và hình thù không phức tạp, và được lựa chọn chủ yếu trong xây dựng nhà ở. Trong khi đó, nhóm VL2 sử dụng cốt liệu mịn có kích thước hạt không quá 1mm, dung dịch chất kết dính có gốc epoxy đóng rắn nhanh, nhóm này dùng in sản phẩm có thành mỏng và hình thù phức tạp (uốn lượn).

Nhóm VL1 bao gồm 2 nhánh công nghệ in như sau:

- Nhóm vật liệu được trộn đồng nhất và bơm trực tiếp vào vòi in, tốc độ in phụ thuộc vào sự dịch chuyển của vòi in, còn kích thước của dải bê tông in 3D (bề rộng, chiều cao) phụ thuộc vào áp

lực bơm bê tông từ bồn trộn đến vòi in. Công nghệ này đòi hỏi hỗn hợp bê tông phải có độ nhớt thấp, bê tông chảy dẻo và bê tông có thể sử dụng cốt liệu có kích thước hạt lớn, chiều cao khối in không quá lớn và cần sử dụng phụ gia tăng tốc độ ninh kết của bê tông để ổn định khối in;

- Nhóm vật liệu được trộn đồng nhất và bơm vào bồn tiếp liệu, trong bồn tiếp liệu có vít xoắn và cánh gạt với tốc độ quay điều chỉnh bằng mô tơ bước để điều chỉnh tốc độ đùn bê tông ra khỏi vòi in. Tốc độ in phụ thuộc vào sự dịch chuyển của vòi in, còn kích thước của dải bê tông in 3D (bề rộng, chiều cao) thì phụ thuộc vào tốc độ quay của vít xoắn và cánh gạt trong bồn tiếp liệu. Công nghệ này in được với hỗn hợp bê tông phải có khoảng độ nhớt rộng (từ độ nhớt thấp 3 Pa.s đến độ nhớt cao 40 Pa.s), bê tông có tính dẻo kém, khối in có thể in liên tục đến chiều cao 1 m, tuy nhiên bê tông sử dụng để in theo công nghệ nào hạn chế kích thước hạt lớn nhất của cốt liệu (không quá 10 mm).

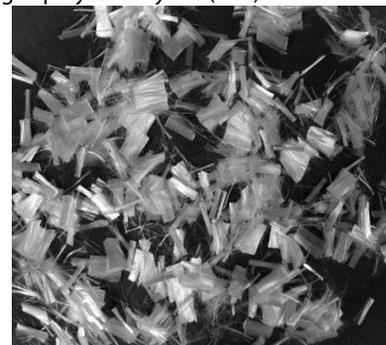
Máy in 3D bê tông theo nguyên lý giàn và cánh tay robot đều có thể sử dụng trong thi công xây dựng in 3D công trình. Tuy nhiên, công nghệ máy in 3D bê tông theo nguyên lý giàn có những đặc điểm nổi trội hơn công nghệ in 3D theo nguyên lý cánh tay robot như sau:

- Công nghệ chế tạo máy in 3D đơn giản hơn;
- In được công trình xây dựng có kích thước lớn hơn.

Từ những phân tích, so sánh công nghệ in 3D bê tông dùng trong xây dựng nêu trên, trong điều kiện vật liệu và công nghệ của Việt Nam hiện nay, nên lựa chọn in 3D bê tông dùng cho thi công xây dựng sử dụng công nghệ in 3D theo nguyên lý giàn, dùng nhóm VL1 kết hợp vít xoắn và cánh gạt trong bồn tiếp liệu để điều khiển quá trình in 3D bê tông.

3. VẬT LIỆU BÊ TÔNG DÙNG CHO IN 3D THI CÔNG CÔNG TRÌNH XÂY DỰNG

Những nguyên liệu chính được sử dụng để chế tạo hỗn hợp bê tông dùng cho thi công công trình xây dựng bằng công nghệ in 3D theo nguyên lý giàn gồm có: xi măng PC50, tro bay loại F (FA), sợi Polypropylene (PP) phân tán ngẫu nhiên với chiều dài và đường kính sợi lần lượt là 6 mm và 0,03 mm, cát sông (C) có môđun độ lớn $M_{dl} = 2,1$, nước sạch, phụ gia điều chỉnh độ nhớt (VMA) và phụ gia siêu hóa dẻo gốc polycarboxylate (PCE).



Hình 2. Sợi PP được sử dụng để chế tạo bê tông in 3D

Nguyên liệu sử dụng để chế tạo bê tông in 3D có đặc trưng là cốt liệu nhỏ (kích thước hạt cốt liệu lớn nhất phổ biến sử dụng là không quá 5mm) và hàm lượng chất kết dính cao, vì vậy tốc độ co ngót và ứng suất kéo do co ngót sinh ra trong giai đoạn đầu (1 đến 3 ngày sau khi in tạo hình cấu kiện) là lớn hơn đáng kể so với bê tông nặng truyền thống, do đó hầu hết bê tông in 3D sẽ có khả năng xuất hiện nứt trên cấu kiện ở tuổi sớm. Ngoài ra, kết cấu tường bê tông in 3D chịu tác động bất lợi khi toàn bộ mặt hở của kết cấu tiếp xúc với môi trường, từ đó làm gia tăng tốc độ co ngót,

đặc biệt là co ngót dẻo tại thời điểm sớm sau khi in 3D, tốc độ co ngót nhanh có thể dẫn đến hình thành nứt và phá hoại kết cấu in 3D [10]. Vì vậy, nguyên vật liệu cùng với tỉ lệ thành phần nguyên vật liệu lựa chọn sử dụng để chế tạo bê tông in 3D vừa phải đảm bảo khả năng in 3D được, đồng thời bê tông cũng phải có tốc độ co ngót thấp. Trong nghiên cứu này, giải pháp hạn chế nứt do co ngót của bê tông in 3D là sử dụng tro bay loại F để thay thế hàm lượng lớn xi măng PC50; kết hợp với sợi PP mảnh, phân tán ngẫu nhiên trong hỗn hợp bê tông.

Cấp phối bê tông sử dụng để chế tạo hỗn hợp bê tông dùng in 3D thi công công trình nhà ở được thể hiện ở bảng 1 bên dưới.

Bảng 1: Cấp phối bê tông in 3D sử dụng trong nghiên cứu

Cấp phối	XM (kg)	PP (kg)	PCE (Lit)	VMA (Lit)	N/CKD	CL/CKD	SF (kg)	FA (kg)
MW-1	500	1,79	8,9	1,8	0,36	2	50	200

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, FA là tro bay loại F và PCE là phụ gia siêu dẻo gốc polycarboxylate.

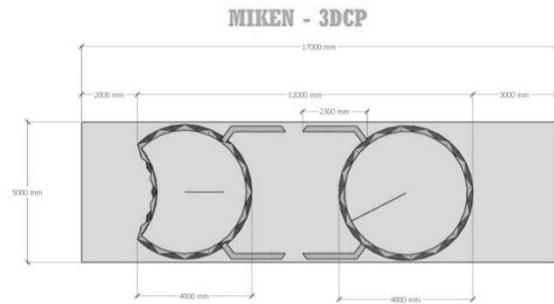
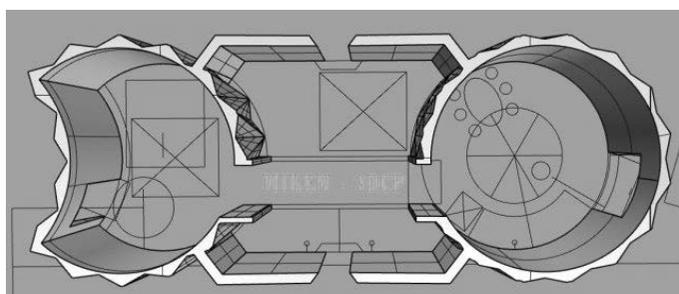
4. THI CÔNG XÂY DỰNG NHÀ Ở BẰNG CÔNG NGHỆ IN BÊ TÔNG 3D

Nghiên cứu này để cập thi công thử nghiệm công trình nhà ở bằng công nghệ in bê tông 3D. Công trình có quy mô rộng 5 m, dài 12 m và cao 4 m.

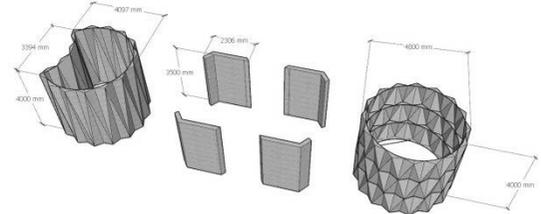
Trước khi tiến hành in 3D công trình theo thiết kế, kết cấu của công trình được kiểm tra để đảm bảo công trình có kết cấu an toàn và đáp ứng yêu cầu sử dụng. Nguyên lý kiểm tra kết cấu công trình in 3D bê tông được thực hiện như sau:

- Thiết lập mô hình để kiểm tra kết cấu bằng các phần mềm tính toán hỗ trợ như Etab, Sap, Midas... Trong quá trình thiết lập mô hình kết cấu, nhập các thông số đầu vào cho mô hình như kích thước hình học của cấu kiện (chiều dày, bề rộng, chiều cao tường...), và tính tải cùng với hoạt tải tác dụng lên công trình;
- Trích xuất giá trị nội lực xuất hiện trên kết cấu tường bê tông in 3D như ứng suất nén, kéo và cắt;
- Kiểm tra, so sánh nội lực tác dụng lên tường với đặc trưng cường độ chịu nén, chịu kéo uốn và bám dính giữa các lớp bê tông in 3D.

Công trình thiết kế bao gồm 2 khối nhà: khối phía trước có hiệu ứng vãn tường vát kim cương, khối phía sau có hiệu ứng vãn tường vát chéo. Công trình này có 3 phòng: phòng khách, phòng ăn - bếp và phòng ngủ. Phòng khách bố trí nằm ở khối phía trước nhà, phòng ngủ bố trí nằm ở phía sau nhà và phòng ăn - bếp nằm ở vị trí liên kết khối trước với khối sau nhà. Tường nhà dày 200 mm bao gồm 2 lớp tường, mỗi lớp thiết kế dày 50 mm, tường rỗng ở giữa với khoảng trống 50 mm. Mặt bằng thiết kế kiến trúc của công trình được thể hiện ở hình 3 và kiến trúc của 2 khối nhà - khối trước và sau được thể hiện ở hình 4 như bên dưới.



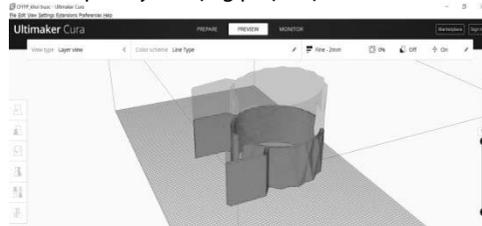
Hình 3. Mặt bằng bố trí kiến trúc của công trình nhà ở



Hình 4. Kích thước và kiến trúc của 2 khối nhà trong công trình

Quy trình thực hiện thi công in bê tông 3D công trình xây dựng như sau:

- Bước 1: thiết kế kiến trúc mô hình 3D của công trình bằng các phần mềm chuyên dụng như Rhino, Autocad 3D hoặc Revit.
 - Bước 2: Dùng phần mềm cắt lớp (Slicer program) để tạo file kết nối điều khiển máy in 3D. Các phần mềm mở có thể sử dụng bao gồm: Cura, Slice... Thông số khai báo cơ bản bao gồm:
 - + Chiều dày lớp in: 20 mm
 - + Bề rộng lớp in: 50 mm
 - + Tốc độ in: 60-80 mm/s
 - Bước 3: tiến hành cho máy in 3D chạy file in không tải để kiểm tra các trục trực có thể có như: lỗi kích thước, va chạm giữa đầu in với hệ thống MEP đặt sẵn, cách thức chuyển hướng trong quá trình in, chuyển cao độ tạo các vị trí lỗ mở.
 - Bước 4: trộn hỗn hợp bê tông, kiểm tra các thông số lưu biến của hỗn hợp bê tông, kiểm tra thời gian mở để thi công, kiểm tra thời gian ninh kết, lấy mẫu kiểm tra cường độ nén và uốn.
 - Bước 5: tiến hành bơm bê tông vào máy in bê tông 3D, kiểm tra trạng thái của dải bê tông đùn ra từ đầu vòi in trước khi tiến hành in.
 - Bước 6: tiến hành in công trình theo file in 3D đã khai báo và kiểm tra ở bước 3 và 4.
 - Bước 7: kiểm tra sự đồng đồng về kích thước của dải bê tông in 3D ở từng lớp so với thiết kế, kiểm tra chiều dày của lớp in.
 - Bước 8: kiểm tra các khuyết tật (có thể có như: nứt và rỗ) trên từng lớp in và tại vị trí tiếp giáp giữa 2 lớp bê tông in 3D.
- File đã khai báo cắt lớp ở bước 3 dùng để kết nối với máy in 3D có thể in thành công hoặc không thành công, để phát hiện ra những lỗi trong quá trình in cần xem kỹ đường in mô phỏng của các lớp bê tông, việc này được thực hiện ở bước 3 khi sử dụng phần mềm cắt lớp chuyên dụng phục vụ cho in 3D.



Hình 5. Kiểm tra mô phỏng cắt lớp in thứ 98 của khối nhà phía trước bằng phần mềm cắt lớp Cura



Hình 6. Lắp đặt máy in 3D, tiến hành cho máy in 3D chạy file in không tải để kiểm tra các va chạm với hệ thống MEP đặt sẵn

Bê tông được lựa chọn để in 3D công trình là nhóm cấp phối MW-1. Các tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông dùng cho in 3D thi công công trình được thể hiện ở bảng 2.

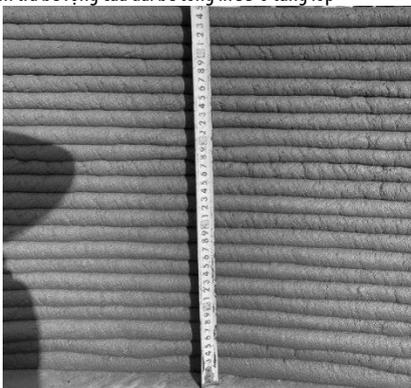
Bảng 2: Tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông dùng cho in 3D thi công công trình nhà ở

CP	Độ xòe	Thời gian mở	Cường độ nén (MPa)			Cường độ uốn (MPa)	
	(cm)	(phút)	1 ngày	3 ngày	28 ngày	3 ngày	28 ngày
MW-1	19,0	40	16,2	39,1	48,0	4,1	8,4

Trong quá trình in, tiến hành kiểm tra sự đồng đều về kích thước của các lớp bê tông in và kiểm tra chiều dày của các lớp bê tông in (hình 7, 8). Kết quả cho thấy, trong quá trình in thử nghiệm công trình, chiều dày của từng lớp bê tông sai số rất ít (± 2 mm) so với chiều dày thiết kế là 20 mm. Điều này là do cao độ của vòi in do máy in 3D điều khiển chính xác, sai số nằm trong phạm vi của hệ thống máy in. Tuy nhiên, chiều rộng của từng lớp in thay đổi trong khoảng rộng (+10÷20 mm), phụ thuộc vào độ dẻo của bê tông và phụ thuộc vào việc điều chỉnh mức độ đùn bê tông ra khỏi vòi in (flow).



Hình 7. Kiểm tra bề rộng của dải bê tông in 3D ở từng lớp



Hình 8. Kiểm tra chiều dày của từng lớp bê tông in 3D

Công trình nhà ở được tiến hành in 3D ngoài trời, việc thi công in bê tông 3D ngoài trời phụ thuộc nhiều vào điều kiện thời tiết (hình 9). Ngoài ra, thi công ngoài trời cũng gây ảnh hưởng lớn đến sự co ngót và khả năng gây nứt của khối tường bê tông in 3D. Qua quá trình thi công in bê tông công trình cho thấy, nếu tiến hành in liên tục và tưới ẩm bảo dưỡng đầy đủ cho bê tông ngay sau khi kết thúc quá trình in thì khối tường bê tông in 3D hầu như không xuất hiện nứt, ngược lại, nếu trong quá trình đang in và gặp sự cố phải ngừng in thì khoảng 30 đến 40 phút sau đẩy khối tường bê tông in 3D sẽ xuất hiện các vết nứt theo phương đứng cắt từ lớp in trên cùng và hướng xuống 4-5 lớp in cận kề bên dưới, điều này là do bê tông kết thúc thời gian mở thi công, co dãn nhanh trong điều kiện môi trường thi công nắng nóng ngoài trời từ đó dẫn đến hình thành các vết nứt (hình 10 và 11).



Hình 9. Thi công ngoài trời công trình bằng công nghệ in bê tông 3D



Hình 10. Vết nứt hình thành cắt qua các lớp bê tông in 3D khi dừng in trong khoảng thời gian 40 phút



Hình 11. Hiện trạng công trình nhà ở sau khi hoàn thành in 3D

Công trình thi công bằng công nghệ in 3D được đánh giá thông qua các thông số kỹ thuật như: tốc độ thi công, sự đồng đều về kích thước của khối in, khuyết tật (rỗ, nứt) trên khối in, và khả năng thấm nước của tường bê tông in 3D [10]. Các thông số nêu trên khi thi công in 3D công trình 1 được thể hiện ở bảng 3.

Bảng 3: Tổng hợp đánh giá việc in 3D công trình nhà ở

Thời gian in hoàn thành (giờ)	Khuyết tật	Đồng đều kích thước	Hệ số thấm nước (ml/cm ² .s)
68	Có xuất hiện nứt cắt qua các lớp in khi ngừng in do sự cố	- Đồng đều về chiều dày lớp in. - Bề rộng của dải bê tông in thay đổi do điều chỉnh mức độ đùn bê tông trong chương trình của máy in 3D.	53,6*10 ⁻¹⁰

Công trình sau khi hoàn thành in 3D được sơn chống thấm trang trí cho tường lớp ngoài của công trình, tường lớp trong sơn trang trí - không chống thấm. Công trình này có kết cấu mái tole, xà gỗ thép gác trực tiếp lên tường bê tông in 3D, sau khi lợp mái xong thì tiến hành đóng trần trang trí. Nền bê tông hiện hữu được mài bóng và phủ sơn epoxy để phù hợp với hiện trạng mặt tự nhiên của tường bê tông in 3D.

**Hình 12.** Mặt ngoài phía trước công trình nhà ở sau khi hoàn thiện**Hình 13.** Mặt ngoài phía sau công trình nhà ở sau khi hoàn thiện**Hình 14.** Bên trong công trình nhà ở sau khi hoàn thiện

5. KẾT LUẬN

Từ kết quả thực nghiệm triển khai thi công nhà ở bằng công nghệ in bê tông 3D, tác giả rút ra những kết luận như sau:

- Với máy in 3D bê tông hiện có, bê tông với thành phần nguyên vật liệu có sử dụng kết hợp FA hàm lượng lớn để thay thế xi măng PC50 và sợi PP phân tán ngẫu nhiên mang lại hiệu quả tổng thể về khả năng in 3D, cường độ và khả năng kháng nứt do co ngót của bê tông.

- Các cấp phối bê tông in 3D thành công, phù hợp ứng dụng thi công công trình nhà ở như sau:

Cấp phối	XM (kg)	PP (kg)	PCE (Lit)	VMA (Lit)	N/CKD	CL/CKD	SF (kg)	FA (kg)
MW-1	500	1,79	8,9	1,8	0,36	2	50	200

- Tốc độ in và quy trình in bê tông 3D đã được thiết lập chi tiết và áp dụng thành công để thi công công trình nhà ở có diện tích 60 m² với tường bê tông in cao 4 m.

- Công trình thi công bằng công nghệ in bê tông 3D ngoài trời rất dễ bị nứt, cần có biện pháp bảo dưỡng khối bê tông in 3D phù hợp để hạn chế hiện tượng nứt trong quá trình thi công công trình in bê tông 3D ngoài trời.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG TP.HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] <https://3dprinting.com/what-is3d-printing/>
- [2] <https://blogin3d.com/cong-nghe-in-3d-be-tong-ky-nguyen-xay-nha-voi-may-in-3d.html>.
- [3] T. Wangler, Lloret, L. Reiter, N Hack, F. Gramazi, MKohler, "Digital concrete opportunities and challenges", *RILEM Tech. Lett.* 1 (2016) 67-75.
- [4] 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.
- [5] Ali Kazemian, Xiao Yuan, Ryan Meier và Behrokh Khoshnevis, "3D Concrete Printing Technology: Construction and Building Applications", McGraw-Hill, page 18.
- [6] <http://www.master-builders-solutions.basf.us/en-us/products/masterfiber/1649>.
- [7] <https://www.designboom.com/architecture/shanghai-3d-printed-concrete-bridge-jcda-01-21-19/>.
- [8] Trần Văn Miên và cộng sự "Nghiên cứu công nghệ bê tông in 3D dùng cho công trình xây dựng". Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp Thành phố, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM, 2022.
- [9] https://baomoi.com/nha-noi-in-3d-hoan-thanh-trong-48-gio-ton-tai-mot-theky/c/35301980.epi?fbclid=IwAR2KHDRxug5YPIHDaUmAg41WD2zxEM_d9pWi9asBM8Zh-toG58V-is5_nU.
- [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.jobte.2021.103400>.