

CÁC PHƯƠNG PHÁP THIẾT KẾ CẤP PHỐI CỦA BÊ TÔNG IN 3D

Nguyễn Thị Hoài Thu, Phạm Thị Loan,

Nguyễn Quang Tuấn, Nguyễn Phan Anh

Khoa Xây dựng

Email: thunth@dhhp.edu.vn

Ngày nhận bài: 06/12/2021

Ngày PB đánh giá: 04/01/2022

Ngày duyệt đăng: 10/01/2022

TÓM TẮT: Bài báo đề xuất một số phương pháp thiết kế cấp phối và các đặc tính mới của bê tông được đề xuất cho in 3D. Đặc tính quan trọng nhất liên quan tới cấp phối của bê tông là khả năng in được thể hiện qua khả năng đùn và khả năng xây dựng. Do đó, nghiên cứu này tập trung vào các phương pháp thiết kế cấp phối và thí nghiệm trong phòng để đánh giá tính có thể in được của bê tông dùng cho máy in 3D. Các vật liệu sử dụng trong nghiên cứu bao gồm xi măng, tro bay, cát tự nhiên và phụ gia siêu dẻo. Để đánh giá khả năng in được của bê tông, các thí nghiệm kiểm tra độ loãng, thí nghiệm kiểm tra độ nhớt bằng phễu chữ V, thí nghiệm kiểm tra độ sụt và kiểm tra khả năng đùn đã được sử dụng để tiến hành nghiên cứu. Những phân tích đầu tiên về phương pháp thiết kế cấp phối và phương pháp thí nghiệm để đánh giá tính in được của bê tông có thể được coi là tài liệu tham khảo và đóng góp để phát triển công nghệ in 3D tại Việt Nam.

Từ khóa: khả năng in được, thiết kế cấp phối bê tông, công nghệ in 3D, thí nghiệm độ loãng, thí nghiệm độ nhớt, thí nghiệm độ sụt, thí nghiệm đùn.

AGGREGATED DESIGN METHODS IN 3D PRINTABLE CONCRETE

ABSTRACT: This paper suggests some methods of aggregated design and fresh properties of the proposed concrete for 3D printing. The most critical properties related to aggregated concrete are printability through extrudability and buildability. Therefore, this study focuses on the approaches of aggregated design and laboratory assessment methods to evaluate printable properties of the fresh concrete used for 3D printing-machine. Materials used for the study include: cement, fly ash, natural sand, and superplasticizer. In order to assess the printability of the concrete, the slump-flow tests, V-funnel tests, buildability tests, and extrudability tests were employed in this study. The first analysis on the aggregated design approach and laboratory test methods to evaluate printable properties of 3D printing concrete can be considered a reference and contribute to develop 3D printing technology in Vietnam.

Keywords: printable properties, design aggregated concrete, 3D printing technology, slump-flow test, V-funnel test, buildability test, extrudability test.

1. GIỚI THIỆU

In 3D đã thu hút sự chú ý của các nhà nghiên cứu từ khắp nơi trên thế giới trong vài thập kỷ gần đây. Từ một bản vẽ thành một vật thể, ý tưởng về in 3D cũng đã thu hút được sự quan tâm của các kỹ sư, kiến trúc sư cũng như các nhà đầu tư. Xây dựng

áp dụng công nghệ in tạo ra các nguyên mẫu nhanh chóng và không kèm theo rác thải. Kể từ năm 2014, nhiều tòa nhà, cây cầu nổi tiếng cũng như các biểu tượng kiến trúc đã được xây dựng tại chỗ bằng công nghệ máy in 3D [1]–[5]. Những thành tựu này cho thấy tiềm năng mà công nghệ in

3D có thể mang lại cho ngành xây dựng. Mặc dù phát triển nhanh chóng nhưng đến nay chỉ có một số hiểu biết hạn chế về các yêu cầu vật liệu cho in 3D. Để có một quy trình in thành công, vật liệu phải đủ chảy để có thể đùn qua đầu in. Một khi lớp bê tông in được ép đùn, nó phải có đủ độ bền cốt để chống lại sự biến dạng do trọng lượng bản thân và trọng lượng của các lớp in bên trên nó. Từ quan điểm lưu biến, vật liệu phải ở dạng lỏng với độ nhớt thấp khi ở bên trong máy bơm và đầu in, nhưng sau khi được ép ra, nó phải trải qua quá trình chuyển đổi sang trạng thái giống như chất rắn với đủ độ bền để chống lại sự biến dạng. Do đó thiết kế cấp phối bê tông phù hợp và thí nghiệm kiểm tra khả năng in là cần thiết. Bài báo với phân tích đầu tiên về phương pháp thiết kế hỗn hợp và phương pháp thí nghiệm trong phòng để đánh giá tính chất có thể in được của bê tông in 3D có thể được coi là tài liệu tham khảo và định hướng để phát triển công nghệ in 3D tại Việt Nam.

2. TỔNG QUAN

Các phương pháp in phù hợp dựa trên vật liệu gốc xi măng đã được phát triển như chế tạo đường viên (CC) và phun chất kết dính [6], [7]. Hơn nữa, việc thiết kế các phương pháp in phù hợp cho vật liệu làm từ xi măng cũng đã có nhiều nhà nghiên cứu thành công [8]–[13]. Trong nghiên cứu nói trên, các tác giả đã sử dụng phương pháp thiết kế hỗn hợp của Junho Jo và các cộng sự [14] và Zhang và các cộng sự [15] như các hướng cơ bản để thiết kế tỷ lệ cấp phối của bê tông được thí nghiệm. Các thành phần chính của hỗn hợp được đề cập ở đây là xi măng, cát và tro bay, cũng đã được các tác giả khác lựa chọn. Sau đó, các thí nghiệm phễu chữ V, kiểm tra khả năng xây

dựng và kiểm tra khả năng đùn được thực hiện cho thấy khả năng in của bê tông. Thí nghiệm phễu V và thí nghiệm khả năng xây dựng là những thí nghiệm đơn giản và tương đối đáng tin cậy được sử dụng rộng rãi [16].

Dựa trên nghiên cứu trước đây của các tác giả, trong nghiên cứu này tham khảo tài liệu [17]. Để tiện theo dõi, nội dung được giới thiệu lại ngắn gọn như bên dưới.

Xi măng Portland của Chinfon (OPC) và tro bay (FA) của Nhà máy nhiệt điện Hải Phòng được sử dụng để tạo thành thành phần kết dính.

Cát được sản xuất bán sẵn trên thị trường với kích thước cốt liệu tối đa danh nghĩa là 1,25 mm đã được sử dụng. Phụ gia siêu dẻo SikaPlast-398 (SP) được sử dụng để điều chỉnh khả năng làm việc của hỗn hợp bê tông. Các thành phần của bê tông gồm: xi măng, tro bay, cát, nước và phụ gia siêu dẻo.

Thiết kế cấp phối của bê tông là cần thiết để đáp ứng các yêu cầu về tính năng của hỗn hợp bê tông và tạo hình được. So với xây dựng truyền thống, các đặc tính của hỗn hợp bê tông đóng một vai trò quan trọng. Vì vậy, khả năng in của bê tông trước hết được nghiên cứu trong công nghệ in 3D. Khả năng in liên quan đến khả năng kết hợp giữa vật liệu và đầu in để tạo ra một lớp bê tông được kiểm soát tốt [18]. Trong nghiên cứu này, khả năng in được coi là khả năng của hỗn hợp bê tông (1) được ép đùn liên tục, không bị đứt gãy bề mặt; (2) không gây kẹt hoặc tắc đầu in và (3) có thể tạo hình với biến dạng chấp nhận được, điều này cũng được các tác giả khác giải thích như [18]–[21].

Tóm lại, nghiên cứu này đề xuất một phương pháp thiết kế cấp phối và các thí

nghiệm trong phòng nhằm tiếp cận các đặc tính có thể in được của hỗn hợp bê tông với các ứng dụng thực tế cao.

3. THIẾT KẾ CẤP PHỐI BÊ TÔNG

Nhiều tác giả đã thực hiện các nghiên cứu về ảnh hưởng của vật liệu thành phần đối với tính chất của bê tông dùng cho máy in 3D [10], [11], [19], [20], [22]–[25]. Tuy nhiên, các nghiên cứu về phương pháp thiết kế cấp phối còn hạn chế với không nhiều kết quả đáng chú ý [9], [14], [15], [26]. Trong số đó, Zhang và các cộng sự [15] và Junho và cộng sự [14] đề xuất cấp phối như sau:

Theo nghiên cứu của Junho Jo, cấp phối bê tông in 3D gồm xi măng và cát (không sử dụng phụ gia siêu dẻo) với hàm lượng cát được xác định theo tỉ lệ với tổng chất kết dính theo công thức (1). Tránh hỗn hợp bê tông không bị loãng và cũng không bị tắc nghẽn khi in, cát dùng pha trộn cần có đường kính nhỏ hơn 0.7mm.

$$S = 0,4B \quad (1)$$

Trong đó:

B là tổng chất kết dính (gam)

S là lượng cát (gam) với đường kính nhỏ hơn 0,7mm.

Theo nhóm tác giả Zhang, hàm lượng cát được xác định theo giá trị độ loãng của chất kết dính như sau:

$$S = 4.22F + 351 \quad (2)$$

Lưu ý: cát tự nhiên lọt sàng lỗ vuông 1,00 mm.

F là độ loãng của chất kết dính (mm)

S là lượng cát (gam / lít)

Công thức (1) và công thức (2) giúp định lượng tỷ lệ chất kết dính và cốt liệu mịn (cát). Các yếu tố khác bao gồm tro bay, tỷ lệ phụ gia siêu dẻo, tỷ lệ nước và

đường kính cát được sử dụng trong nghiên cứu này khác với nghiên cứu của hai tác giả trên. Vì vậy, các cấp phối bê tông được thiết kế trong nghiên cứu này dùng nghiên cứu để đánh giá khả năng in của bê tông bằng các phương pháp thí nghiệm sẽ được trình bày trong phần sau.

Để tính toán lượng cát, cần kiểm tra độ loãng của chất kết dính đối với các cấp phối bê tông in. Độ loãng của chất kết dính đã được xác định theo [27]. Với mục đích thay thế lượng tro bay tối đa thành xi măng nhưng ảnh hưởng tối thiểu đến cường độ nén của bê tông, tỷ lệ giữa tro bay với xi măng là 4: 6. Tỷ lệ nước trên tổng lượng chất kết dính là 0,3 và khả năng làm việc của bê tông cũng được điều chỉnh bằng phụ gia siêu dẻo. Cát mịn được sử dụng trong nghiên cứu này là cát tự nhiên có sàng lỗ vuông 1,25 mm, lớn hơn nhiều so với cát của Junho và lớn hơn một chút so với sàng của Zhang. Tỷ lệ giữa cát và chất kết dính của Zhang và Junho có một khoảng cách lớn, vì vậy các tác giả đề xuất các giá trị của nó trong khoảng từ 0,4 đến 2,4. Sau đó, năm cấp phối sơ bộ với các tỷ lệ cát/chất kết dính khác nhau được thiết kế như trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Cấp phối bê tông

Cấp phối bê tông	Cát	SP
Z_2.4	2.4	1.2
J_0.4	0.4	0.2
M1_1.1	1.1	0.6
M2_0.8	0.8	0.4
M3_0.5	0.5	0.2

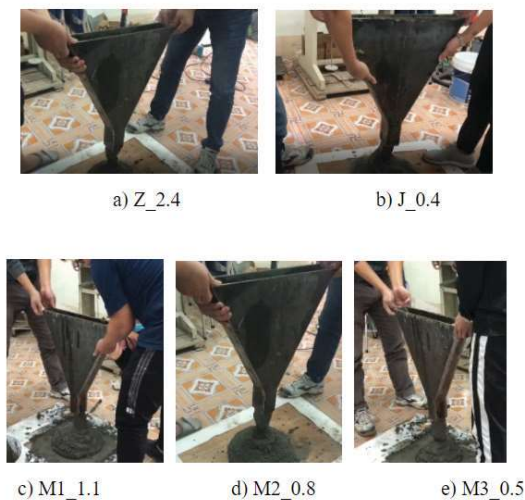
Ghi chú: tỷ lệ khối lượng trên chất kết dính.

4. CÁC PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

4.1. Phương pháp kiểm tra phễu V

Thí nghiệm phễu chữ V (Hình 1) được

sử dụng để đánh giá độ nhớt của bê tông và khả năng lưu động theo thời gian chảy qua phễu chữ V. Bê tông đổ in 3D phải hoạt động tốt mà không có sự phân tách và kết cứng đáng kể khi đi qua khe hở hẹp. Sau khi đổ đầy bê tông vào phễu hình chữ V, tính thời gian chảy (V_t) bằng thời gian trôi qua từ khi mở cửa xả dưới cùng đến khi bê tông chảy hoàn toàn ra khỏi phễu. Giá trị của V_t liên quan đến độ nhớt, ma sát giữa các hạt hoặc sự tắc nghẽn của dòng chảy. Theo một số nghiên cứu trước đây, giá trị của V_t từ 9 đến 25 [16]. Kết quả thí nghiệm của các cấp phối bê tông được thể hiện trong bảng 2.



Hình 1. Thí nghiệm kiểm tra phễu V.

Bảng 2. Thời gian (V_t) của thí nghiệm kiểm tra phễu V

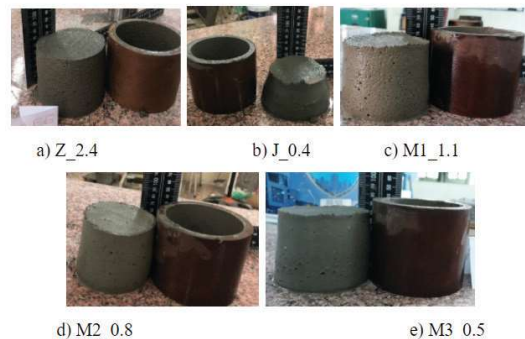
Cấp phối	V_t (s)	Mô tả
Z_2.4	9	Liên tục / nhớt
J_0.4	25	Không liên tục / không nhớt
M1_1.1	11	Liên tục nhưng không nhớt
M2_0.8	14	Liên tục nhưng không nhớt
M3_0.5	24	Không liên tục / không nhớt

Từ kết quả ở bảng 2 cho thấy, thời gian

V_t bằng 9, 11, 14 giây ứng với bê tông của 3 cấp phối theo Z_2.4, M1_1.1, M2_0.8 là liên tục. Các cấp phối J_0.4 và M3_0.5 có bê tông chảy không liên tục. Trong thí nghiệm kiểm tra phễu V, chỉ có bê tông theo cấp phối Z_2.4 là nhớt.

4.2. Kiểm tra khả năng xây dựng

Chiều cao còn lại của trụ bê tông bị sụt dưới tác dụng của trọng lực có thể được sử dụng để đánh giá ứng suất chảy và khả năng xây dựng của bê tông được thí nghiệm. Chiều cao và đường kính của khuôn hình trụ là 80 mm theo kinh nghiệm thực nghiệm trước đây của các tác giả [15]. Khả năng xây dựng được đánh giá bằng hình dạng và chiều cao còn lại của mẫu hình trụ.



Hình 2. Thí nghiệm kiểm tra khả năng xây dựng

Độ sụt của hỗn hợp như trong Bảng 3. Độ sụt của trụ bê tông vẫn nằm trong khoảng từ 8 mm đến 22 mm và mẫu thí không bị biến dạng sau khi nhấc khuôn ra như trong hình 2. Điều này có nghĩa là bê tông đã đủ khả năng vững chắc.

Bảng 3. Độ sụt của mẫu khi kiểm tra khả năng xây dựng

Mẫu	S (mm)	Mô tả
Z_2.4	8	Không có biến dạng/ khả năng xây dựng thích hợp

J_0.4	22	Biến dạng đáng kể/ không thích hợp để xây dựng
M1_1.1	11	Biến dạng nhỏ/ khả năng xây dựng thích hợp
M2_0.8	12	Có chút biến dạng / khả năng xây dựng thích hợp
M3_0.5	13	Biến dạng rất nhỏ/ khả năng xây dựng thích hợp

Trụ bê tông cấp phối theo J_0.4 cho thấy không có khả năng xây dựng với độ sụt 22mm và rõ ràng là bị biến dạng. Mặt khác, bốn cấp phối khác được chứng minh là phù hợp với khả năng xây dựng. Cấp phối Z_2.4 đã cho thấy độ sụt của trụ bê tông ở mức 8mm mà hầu như không có biến dạng. Ba cấp phối, M1_1.1, M2_0.8 và M3_0.5 có biến dạng nhỏ, với độ sụt

tương ứng là 11, 12 và 13 mm.

4.3. Kiểm tra khả năng đùn

Hệ thống in được sử dụng trong nghiên cứu này được thiết kế và tạo ra dựa trên nguyên lý trục vít như được trình bày trong hình 3. Khả năng đùn ở đây liên quan đến khả năng vận chuyển hỗn hợp bê tông qua phễu và hệ thống trục vít tới đầu in nơi nó phải được đùn ra dưới dạng lớp liên tục. Trong nghiên cứu này, khả năng đùn được đánh giá với các lớp rộng 25 mm (được in từ đầu in 25 mm). Các lớp phải đồng nhất và được đùn liên tục mà không bị tắc nghẽn, nứt vỡ hoặc tách rời trong suốt quá trình đùn. Hơn nữa, một mẫu in phải được định hình tốt để giữ được hình dạng của nó.



a) Trục vít (Jo và các tác giả. 2020)



b) Hệ thống đầu in

Hình 3. Trục vít và đầu in



a) Z_2.4



b) J_0.4



c) M1_1.1



d) M2_0.8



e) M3_0.5

Hình 4. Các mẫu in

Bảng 4. Đặc tính của bê tông in

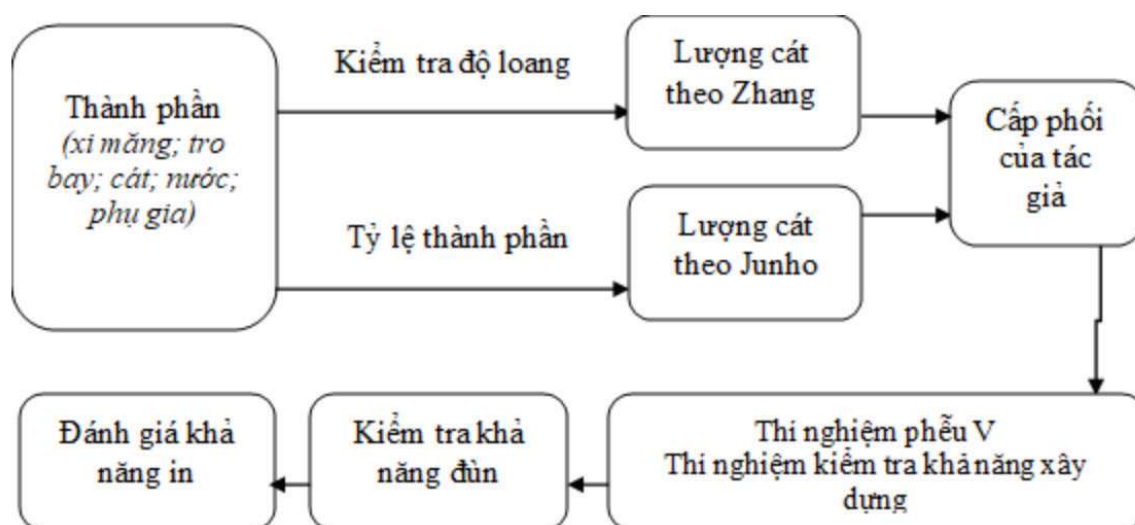
Mẫu	Liên tục khi đùn	Tắc nghẽn	Nứt/phân tách	Duy trì hình dạng
Z_2.4	không	không	rõ rệt	không tốt
J_0.4	có	không	không	không tốt
M1_1.1	có	không	có	có thể chấp nhận
M2_0.8	có	không	có	bình thường
M3_0.5	có	không	có	tốt

Với cấp phối bê tông Z 2.4, quá trình đùn ép không liên tục, có nứt nẻ và phân tách trong lớp bê tông nhưng không có sự tắc nghẽn, dẫn đến khả năng duy trì hình thức kém. Bê tông cấp phối J_0.4 không duy trì được hình dạng tốt mặc dù quá trình ép đùn liên tục, không bị tắc nghẽn, đứt gãy hoặc tách rời. Ba cấp phối bê tông khác, M1 1.1, M2 0.8 và M3 0.5 liên tục được ép

đùn với khả năng giữ nguyên hình dạng và không bị tắc nghẽn, vỡ hoặc tách rời.

Nhận xét sau các bảng trên đã cho thấy 3 mẫu M1, M2, M3 đều đáp ứng được yêu cầu về khả năng xây dựng và khả năng in.

Dựa trên nghiên cứu đã trình bày, quy trình thiết kế cấp phối hợp lý bê tông in đã được các tác giả phát triển trình bày trong hình 5.



Hình 5. Quy trình thiết kế cấp phối bê tông in

5. KẾT LUẬN

Dựa trên kết quả thiết kế cấp phối và thí nghiệm được sử dụng để đánh giá tính chất lưu biến của bê tông in 3D (thể hiện ở cả 3 mẫu M1, M2, M3 đều có khả năng in được) tại Việt Nam, một số kết luận và đề xuất được đưa ra:

(1) Quy trình thiết kế tỷ lệ cấp phối bê tông được đề xuất trong nghiên cứu này là đáng tin cậy và khả thi.

(2) Phương pháp thiết kế tỷ lệ cấp phối bê tông được trình bày ở đây là phù hợp và đáng tin cậy.

(3) Thí nghiệm phễu chữ V và thí nghiệm kiểm tra khả năng xây dựng được sử dụng trong nghiên cứu này có tính thực tiễn cao để thiết kế và đánh giá ban đầu bê tông trước khi in.

(4) Tỷ lệ giữa cát và chất kết dính không nên vượt quá 1,2 và liều lượng phụ gia siêu dẻo cần được kiểm soát chặt chẽ.

(5) Đánh giá về khả năng in thông qua kiểm tra khả năng đùn có thể khác nhau trong trường hợp sử dụng các đầu in khác nhau.

(6) Cần bổ sung số lượng thí nghiệm đùn để đề xuất cấp phối bê tông tối ưu cho đầu in trực vít như được thực hiện trong nghiên cứu này.

(7) Cần bổ sung thí nghiệm nén, uốn để đánh giá về thời gian đông kết và tính chất cơ học của bê tông in 3D.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. L. Stinson (2019), “World’s largest 3D-printed building completed in Dubai,” [Online]. Available: <https://archive.curbed.com/2019/12/30/21035765/world-largest-3d-printed-building-dubai-apis-cor>.
2. L. Alter (2018), “3D printed house

displayed at Milan Design Week” .

3. 3dsourced (2021), “ICON & New Story 3D Printed House in Austin, Texas USA,”
4. S. Saunders (2018), “Robotic 3D Printed YHNOVA House Officially Inaugurated, Tenants to Move In Soon”.
5. A. Frearson (2014), “Chinese company 3D prints 10 buildings in a day using construction waste”.
6. H. Lee, C. H. J. Lim, M. J. Low, N. Tham, V. M. Murukeshan, and Y.-J. Kim (2017), “Lasers in additive manufacturing: A review,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 307–322.
7. R. Dou, T. Wang, Y. Guo, and B. Derby (2011), “Ink-Jet Printing of Zirconia: Coffee Staining and Line Stability,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 94, no. 11, pp. 3787–3792.
8. B. Zhu, J. Pan, B. Nematollahi, Z. Zhou, Y. Zhang, and J. Sanjayan (2019), “Development of 3D printable engineered cementitious composites with ultra-high tensile ductility for digital construction,” *Mater. Des.*, vol. 181, p. 108088.
9. Y. Weng, M. Li, M. J. Tan, and S. Qian (2018), “Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marston-Percy model,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 163, pp. 600–610.
10. K. Manikandan, K. Wi, X. Zhang, K. Wang, and H. Qin (2020), “Characterizing cement mixtures for concrete 3D printing,” *Manuf. Lett.*, vol. 24, pp. 33–37.
11. 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.
12. F. Hamidi and F. Aslani (2019), “Additive manufacturing of cementitious composites : Materials , methods , potentials , and challenges,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 218, pp. 582–609.
13. B. Lu *et al.* (2019), “A systematical review of 3D printable cementitious materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 207, pp. 477–490.
14. J. H. Jo, B. W. Jo, W. Cho, and J. H. Kim (2020), “Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious

Materials,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 14, no. 1.

15. C. Zhang, Z. Hou, C. Chen, Y. Zhang, V. Mechtcherine, and Z. Sun (2019), “Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 104, no. September, p. 10340.

16. G. Ma and L. Wang (2018), “A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing,” *Front. Struct. Civ. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 382–400.

17. P. T. Loan, X. J. Zhuang, N. T. H. Thu, guyen P. Anh, and T. D. Thanh (2021), “Experimental investigations on the rheological properties of the proposed 3D printing concrete,” (*in Press*).

18. T. Wangler, N. Roussel, F. P. Bos, T. A. M. Salet, and R. J. Flatt (2019), “Digital Concrete: A Review,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 123, p. 105780.

19. Y. Chen, S. C. Figueiredo, Ç. Yalçinkaya, O. Çopuroğlu, F. Veer, and E. Schlangen (2019), “The effect of viscosity-modifying admixture on the extrudability of limestone and calcined clay-based cementitious material for extrusion-based 3D concrete printing,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 9, pp. 9–12.

20. B. Panda and M. J. Tan (2018), “Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing,” *Ceram. Int.*, vol. 44, no. 9, pp. 10258–10265.

21. R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z.

Jones, and J. Dirrenberger (2018), “3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 112, no. June, pp. 37–49.

22. Y. Wei, D. Tay, Y. Qian, and M. J. Tan (2019), “Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test,” *Compos. Part B*, vol. 174, no. May, p. 106968.

23. S. A. O. Nair, S. Panda, M. Santhanam, G. Sant, and N. Neithalath (2020), “A critical examination of the influence of material characteristics and extruder geometry on 3D printing of cementitious binders,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 112, p. 103671.

24. S. Hou, Z. Duan, J. Xiao, and J. Ye (2020), “A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design,” *Constr. Build. Mater.*, no. xxxx, p. 121745.

25. 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.*, vol. 45, no. 8, pp. 1221–1232.

26. Z. Liu, M. Li, Y. Weng, T. N. Wong, and M. J. Tan (2019), “Mixture Design Approach to optimize the rheological properties of the material used in 3D cementitious material printing,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 198, pp. 245–255.

27. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration of the People’s Republic of China (2012), *GB/T 8077-2012 Methods for testing uniformity of concrete admixture*.