

**TẠP CHÍ**

ISSN 1859-1566

# **KHOA HỌC CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG**

**JOURNAL OF BUILDING SCIENCE AND TECHNOLOGY**



BỘ XÂY DỰNG

**VIỆN KHOA HỌC CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG**

Vietnam Institute for Building Science and Technology - IBST

**3**

**2022**

**BỘ XÂY DỰNG - VIỆN KHOA HỌC CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG**

*Vietnam Institute for Building Science and Technology - IBST*

**Hội đồng Khoa học**

**Chủ tịch**

Trần Chung

**Phó Chủ tịch**

Nguyễn Hồng Hải

**Các ủy viên**

Vũ Ngọc Anh  
Nguyễn Ngọc Bá  
Nguyễn Đăng Bích  
Nguyễn Thanh Bình  
Nguyễn Xuân Chính  
Nguyễn Thái Chung  
Nguyễn Tiến Chương  
Nguyễn Cao Dương  
Hoàng Minh Đức  
Phạm Minh Hà  
Ngô Văn Hợi  
Lê Quang Hùng  
Nguyễn Bá Kế  
Phạm Văn Khoan  
Nguyễn Sơn Lâm  
Trần Văn Liên  
Trần Mạnh Liễu  
Lê Minh Long  
Nguyễn Đại Minh  
Phan Quang Minh  
Nguyễn Ngọc Quang  
Nguyễn Võ Thông  
Nguyễn Thị Bích Thủy  
Cao Duy Tiến  
Nguyễn Hoàng Tuấn  
Đoàn Thế Tường  
Đỗ Như Tráng  
Vũ Thành Trung  
Trần Bá Việt

**Trưởng ban Biên tập**

Nguyễn Nam Thắng

**Trụ sở tòa soạn**

Viện KHCN Xây dựng  
81 Trần Cung-Nghĩa Tân-  
Cầu Giấy-Hà Nội  
Điện thoại: 024.37556098;  
Fax: 84.24.38361197

**Email:** tapchi@ibst.vn  
**website:** <http://www.ibst.vn>

Giấy phép số: 442/GP-BTTTT  
Ngày 27/9/2016

**MỤC LỤC**

**KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG**

*Phan Văn Tiến*

*Nguyễn Sĩ Minh*

*Nguyễn Trọng Hà*

*Trần Văn Bình*

*Nguyễn Duy Duẩn*

- Đánh giá các công thức tính toán cường độ chịu cắt của cột bê tông cốt thép tiết diện chữ nhật 3

*Nguyễn Hoàng Anh*

- Phương pháp xác định tuổi thọ còn lại của công trình bê tông cốt thép theo độ tin cậy của cấu kiện 12

*Lê Thị Hà*

- Dao động tự do của dầm Sandwich Nano có cơ tính biến thiên hai chiều 21

*Phạm Ngọc Hiếu*

*Nguyễn Lệ Thủy*

- Khảo sát khả năng chịu uốn của tiết diện thép hộp chữ nhật tạo hình nguội theo phương pháp cường độ liên tục 28

*Lê Đăng Dũng*

*Nguyễn Quang Sĩ*

*Nguyễn Huy Cường*

*Nguyễn Thành Tâm*

- Nghiên cứu ứng xử chịu xoắn của dầm bê tông cốt thanh Composit Polyme sợi thủy tinh 35

**VẬT LIỆU XÂY DỰNG - MÔI TRƯỜNG**

*Nguyễn Nam Thắng*

*Phan Văn Chương*

- Nghiên cứu giải pháp sơn phủ bảo vệ cốt thép trong bê tông cát nhiễm mặn 43

*Tăng Văn Lâm*

- Nghiên cứu khả năng sử dụng bê tông hạt mịn cường độ cao cho công nghệ in bê tông 3D 50

**ĐỊA KỸ THUẬT - TRẮC ĐỊA**

*Nguyễn Quang Phú*

- Nghiên cứu cứng hóa đất bùn nạo vét bằng xi măng và phụ gia khoáng 60

**QUY CHUẨN - TIÊU CHUẨN**

*Võ Minh Quang*

*Võ Mạnh Tùng*

- Tính toán khung bê tông cốt thép có dầm chuyển bằng phương pháp tính phi tuyến theo TCVN 9386:2012 68

**THÔNG TIN KHCN**

76

**Editor-in-Chief**

Dinh Quoc Dan

**Deputy Editor-in-Chief**

Nguyen Nam Thang

**Science Council**

**Chairman**

Tran Chung

**Vice Chairman**

Nguyen Hong Hai

**Members**

Vu Ngoc Anh  
 Nguyen Ngoc Ba  
 Nguyen Dang Bich  
 Nguyen Thanh Binh  
 Nguyen Xuan Chinh  
 Nguyen Thai Chung  
 Nguyen Tien Chuong  
 Nguyen Cao Duong  
 Hoang Minh Duc  
 Pham Minh Ha  
 Ngo Van Hoi  
 Le Quang Hung  
 Nguyen Ba Ke  
 Pham Van Khoan  
 Nguyen Son Lam  
 Tran Van Lien  
 Tran Manh Lieu  
 Le Minh Long  
 Nguyen Dai Minh  
 Phan Quang Minh  
 Nguyen Ngoc Quang  
 Nguyen Vo Thong  
 Cao Duy Tien  
 Nguyen Hoang Tuan  
 Doan The Tuong  
 Do Nhu Trang  
 Vu Thanh Trung  
 Tran Ba Viet

**Head of management board**

Nguyen Nam Thang

**Editorial Office**

Vietnam Institute for Building  
 Science and Technology - IBST  
 81 Tran Cung-Nghia Tan-  
 Cau Giay-Ha Noi  
 Phones: 024.37556 098;  
 Fax: 84.24.38361197

**Email:** tapchi@ibst.vn

**Website:** <http://www.ibst.vn>

Publication permit:

Nr.442/GP-BTTTT

Dated Sep 27<sup>th</sup>, 2016

**CONTENTS**

**STRUCTURAL - CONSTRUCTION TECHNOLOGY**

*Phan Van Tien*

*Nguyen Si Minh*

*Nguyen Trong Ha*

*Tran Van Binh*

*Nguyen Duy Duan*

- Evaluation of shear strength formulas of rectangular RC columns 3

*Nguyen Hoang Anh*

- Method for determining the remaining service life of building structures basing on the reliability of elements and structures 12

*Le Thi Ha*

- Free vibration of two-dimensional functionally graded sandwich nano beams 21

*Pham Ngoc Hieu*

*Nguyen Le Thuy*

- Investigation of flexural capacities of cold-formed steel rectangular hollow sections according to the continuous strength method 28

*Le Dang Dung*

*Nguyen Quang Si*

*Nguyen Huy Cuong*

*Nguyen Thanh Tam*

- Torsional behavior of glass fiber reinforced polymer concrete beams 35

**BUILDING METEIRALS - ENVIRONMENT**

*Nguyen Nam Thang*

*Phan Van Chuong*

- Study on solution of protective coating for reinforcement in concrete salt-contaminated sand 43

*Tang Van Lam*

- Research on the possibility of using high-strength fine aggregate concrete for 3D concrete printing technology 50

**GEOTECHNICAL - SURVEYING**

*Nguyen Quang Phu*

- Research to hard the dredging soil using the cement and mineral additives 60

**REGULATIONS - STANDARD**

*Vo Minh Quang*

*Vo Manh Tung*

- Pushover analysis of reinforced concrete frame with transfer beam according to TCVN 9386:2012 68

**INFORMATION ON SCIENCE AND TECHNOLOGY**

76

# NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG SỬ DỤNG BÊ TÔNG HẠT MỊN CƯỜNG ĐỘ CAO CHO CÔNG NGHỆ IN BÊ TÔNG 3D

## RESEARCH ON THE POSSIBILITY OF USING HIGH-STRENGTH FINE AGGREGATE CONCRETE FOR 3D CONCRETE PRINTING TECHNOLOGY

### TẶNG VĂN LÂM

Đại học Mở - Địa chất

Email: tangvanlam@humg.edu.vn

*Tóm tắt: Bê tông in 3D với tính năng cao đã và đang được nghiên cứu và phát triển ở nhiều nước trên thế giới. Mục đích chế tạo các loại bê tông in cường độ cao là để áp dụng trong công nghệ thi công không cốp pha theo quy trình in bê tông tiên tiến. Bài báo này trình bày một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm về thành phần và tính chất của bê tông in 3D hạt mịn sử dụng các vật liệu sẵn có ở Việt Nam. Vật liệu sử dụng gồm xi măng, tro bay, silica fume, cốt liệu mịn, phụ gia siêu dẻo và nước. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy tiềm năng chế tạo được loại bê tông in 3D có chất lượng tốt, với độ chảy trên bàn dẫn từ 155 đến 195mm, cường độ nén tuổi 28 ngày dao động trong khoảng 62,6 – 73,5 MPa. Với hàm lượng phụ gia siêu dẻo là 0,22% và tỷ lệ nước/chất kết dính và cát/chất kết dính tương ứng là 0,35 và 0,7 đã thu được hỗn hợp bê tông in 3D có khả năng in tốt nhất.*

*Từ khoá: Bê tông hạt mịn cường độ cao, cường độ nén, khả năng đùn, khả năng xây dựng.*

*Abstract: 3D printed concrete with high performance has been researched and developed in many countries around the world. This paper presents some experimental results on the composition and properties of fine-grained 3D-printed concrete using materials available in Vietnam. Materials used include Portland cement, fly ash, silica fume, fine aggregates, superplasticizers, and water. The experimental outcomes confirm that a type of 3D printing concrete can be produced and it has flowability in the range of 155 to 195 mm by the ballast table, 28-day compressive strength in the range of 62.6 – 73.5 MPa. The 3D printing concrete mix with the superplasticizer content of 0.22%, a water-to-binder ratio of 0.35, and a sand to binder ratio of 0.67 had the best extrudability in this experimental research.*

*Key words: high-strength fine-grained concrete, compressive strength, extrudability, buildability*

### 1. Đặt vấn đề

Công nghệ in 3D đã thu hút sự quan tâm của rất nhiều nhà khoa học ở khắp nơi trên thế giới trong những năm gần đây [1, 2, 3]. Ý tưởng về công nghệ in công trình cũng đã thu hút được sự quan tâm của hội kỹ sư, kiến trúc sư cũng như các nhà đầu tư nhằm mục đích triển khai từ một bản vẽ thành một vật thể hoàn chỉnh [4, 5]. Công nghiệp hóa ngành xây dựng bằng việc áp dụng công nghệ in 3D sẽ tạo ra các nguyên mẫu nhanh chóng, giảm thiểu nhân công và hạn chế được rác thải [6, 7]. Tiêu biểu nhất là 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 in 3D trên các thiết bị cơ khí hiện đại [4, 7]. Những thành tựu này cho thấy tiềm năng mà công nghệ in 3D có thể mang lại cho ngành công nghiệp xây dựng. Mặc dù công nghệ in phát triển nhanh chóng nhưng đến nay các yêu cầu vật liệu cho in 3D vẫn chưa được đáp ứng một cách tốt nhất.

Mặt khác, để có một quy trình in 3D thành công, vật liệu in phải đủ chảy để có thể đùn liên tục qua đầu in. Khi lớp vật liệu được đùn ép qua vòi in thì 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 truyền xuống. Từ kết quả của nhiều nghiên cứu [8, 9] cho thấy, hỗn hợp vật liệu phải ở dạng lỏng với độ nhớt hợp lý khi ở bên trong máy bơm và đầu in, nhưng sau khi được ép ra khỏi đầu in 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 yêu cầu đối với hỗn hợp vật liệu dùng trong công nghệ in 3D tiên tiến ngày càng được nâng cao hơn.

Hơn nữa, bê tông là một trong những vật liệu xây dựng quan trọng, được sử dụng rộng rãi trong xây dựng các công trình hạ tầng trên khắp thế giới. Nhiều nước trên thế giới đã nghiên cứu chế tạo các loại bê tông tính năng cao sử dụng trong công nghệ in 3D [10, 11, 12]. Với những thành tựu to lớn, công nghệ in 3D bê tông là đại diện điển hình của ngành xây

## VẬT LIỆU XÂY DỰNG - MÔI TRƯỜNG

dựng về việc áp dụng khoa học kỹ thuật của cách mạng công nghiệp lần thứ 4.0. Để hiện thực quy trình in 3D, hỗn hợp bê tông sử dụng trong chế tạo các cấu kiện và công trình xây dựng vừa có khả năng chịu lực tốt, vừa có tính thẩm mỹ cao, vừa có khả năng in (đùn) và khả năng xây dựng tốt, cần nghiên cứu phát triển loại vật liệu bê tông phù hợp với công nghệ in 3D trong điều kiện Việt Nam là cần thiết và có ý nghĩa thực tiễn to lớn.

Bài viết này trình bày một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm về tính chất của bê tông hạt mịn cường độ cao từ các nguồn vật liệu sẵn có ở Việt Nam sử dụng cho công nghệ in bê tông 3D.

### 2. Vật liệu sử dụng và phương pháp nghiên cứu

#### 2.1. Vật liệu nghiên cứu

Cũng như vữa và bê tông xi măng truyền thống, bê tông in 3D cũng được chế tạo từ các nguồn vật liệu sẵn có trong nước. Nguyên vật liệu được dùng trong nghiên cứu này bao gồm (Hình 1):

- Xi măng Poóc lăng PC40 Bút Sơn;
- Phụ gia khoáng hoạt tính gồm: Tro bay nhiệt điện "Phả Lại" và Silica fume SF-90 Vina Pacific;
- Cốt liệu nhỏ là cát vàng sông Lô, kích thước hạt từ 0,14-2,5mm, được sàng qua sàng có kích thước mắt sàng là 2,5mm;
- Phụ gia siêu dẻo giảm nước Sung Shin Vina SR3000S của Sika.



Hình 1. Các loại nguyên vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

#### a) Xi măng

Xi măng Poóc lăng PC40 Bút Sơn (X) thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của tiêu chuẩn TCVN

2682:2009. Các tính chất cơ lý của xi măng Poóc lăng PC 40 Bút Sơn được giới thiệu trong Bảng 1.

Bảng 1. Tính chất cơ lý của xi măng Poóc lăng PC40 Bút Sơn

| Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> ) | Lượng sót trên sàng N0,09 | Tỷ diện bề mặt (cm <sup>2</sup> /g) | Thời gian đông kết (phút) |                   | Cường độ nén (MPa) |        |         | Độ dẻo tiêu chuẩn (%) |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------|--------|---------|-----------------------|
|                                       |                           |                                     | Bắt đầu đông kết          | Kết thúc đông kết | 3 ngày             | 7 ngày | 28 ngày |                       |
| 3,15                                  | 5,5                       | 3640                                | 115±5                     | 360±5             | 28,5               | 41,3   | 50,8    | 30,5                  |

#### b) Phụ gia khoáng mịn

Trong nghiên cứu này phụ gia khoáng được sử dụng là hỗn hợp tro bay nhiệt điện Phả Lại và silica fume SF-90:

+ Tro bay nhiệt điện Phả Lại:

Tro bay (TB) của nhà máy nhiệt điện Phả Lại thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật trong TCVN 10302:2014,

với tỷ diện bề mặt riêng là 5820 cm<sup>2</sup>/g và khối lượng riêng là 2,35 g/cm<sup>3</sup>.

+ Silica fume SF-90 của Vina Pacific:

Silica fume SF-90 (SF90) của Vina Pacific với kích thước hạt nano, chứa 91,6% SiO<sub>2</sub> hoạt tính, tỷ diện bề mặt riêng là 15450 cm<sup>2</sup>/g và khối lượng riêng là 2,15 g/cm<sup>3</sup>. Silica fume SF-90 sử dụng trong

## VẬT LIỆU XÂY DỰNG - MÔI TRƯỜNG

ngiên cứu thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật trong TCVN 8827:2011.

Thành phần hóa học của xi măng, tro bay nhiệt điện và silica fume được thể hiện trong Bảng 2.

**Bảng 2.** Thành phần hóa học của tro bay nhiệt điện Phả Lại, silica fume SF-90 và xi măng Poóc lăng PC40 Bút Sơn

| Loại vật liệu                  | Tro bay nhiệt điện | Silica Fume SF-90 | Xi măng Poóc lăng |
|--------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Ký hiệu                        | FA                 | SF90              | X                 |
| SiO <sub>2</sub>               | 54,2               | 91,6              | 20,4              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 23,3               | 2,2               | 4,4               |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9,8                | 2,5               | 5,4               |
| SO <sub>3</sub>                | 2,5                | -                 | 3,4               |
| K <sub>2</sub> O               | 1,4                | -                 | 1,2               |
| Na <sub>2</sub> O              | 1,1                | 0,5               | 0,3               |
| MgO                            | 0,6                | -                 | 2,5               |
| CaO                            | 1,2                | 0,7               | 60,2              |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 1,4                | 0                 | -                 |
| Lượng mất khi nung             | 4,5                | 2,5               | 2,2               |

### c) Cát

Cốt liệu nhỏ sử dụng là cát vàng sông Lô (C), cát tự nhiên, chất lượng tốt, thỏa mãn yêu cầu của

tiêu chuẩn TCVN 7570:2006, các tính chất vật lý của cốt liệu nhỏ sử dụng đã được thể hiện trong Bảng 3.

**Bảng 3.** Tính chất vật lý của cát vàng sông Lô

| STT | Chỉ tiêu                     | Đơn vị tính       | Kết quả thí nghiệm |
|-----|------------------------------|-------------------|--------------------|
| 1   | Kích thước hạt               | mm                | 0,14 ÷ 5,0         |
| 2   | Khối lượng riêng             | g/cm <sup>3</sup> | 2,65               |
| 3   | Khối lượng thể tích đầm chặt | kg/m <sup>3</sup> | 1650               |
| 4   | Khối lượng thể tích xốp      | kg/m <sup>3</sup> | 1550               |
| 5   | Độ rỗng                      | %                 | 39,1               |
| 6   | Độ ẩm                        | %                 | 3,5                |
| 7   | Hàm lượng bụi, bùn, sét      | %                 | 0,9                |
| 8   | Mô đun độ lớn (Mk)           | -                 | 3,0                |
| 9   | Tạp chất hữu cơ              | -                 | Đạt                |

Tuy nhiên, do trong điều kiện thí nghiệm trên thiết bị in 3D thủ công với thành phần hạt cát thô là rất khó khăn, hỗn hợp bê tông bị tắc trong ống bơm. Vì vậy, trong nghiên cứu này cát vàng đã được sàng qua sàng có kích thước mắt sàng là 2,5mm để loại bỏ hạt cát có đường kính lớn. Cát thu được sau khi sàng có kích thước từ 0,14mm đến 2,5mm với  $D_{max} = 2,5$  mm.

### d) Phụ gia siêu dẻo

Nghiên cứu sử dụng loại phụ gia siêu dẻo (PGSD) cho bê tông có tên thương mại là Sung Shin Vina SR3000S của công ty Silka, gốc Polycarboxylate ether, có khối lượng riêng 1,12 ±0,2g/cm<sup>3</sup> và độ giảm nước khoảng 20÷30%. Phụ gia siêu dẻo Sung Shin Vina SR3000S thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của TCVN 8826:2011.

### e) Nước

Trong nghiên cứu này, nước sử dụng trong nghiên cứu là nước máy sinh hoạt. Các chỉ tiêu chất

lượng của nước phù hợp với nước trộn bê tông theo TCVN 4506 : 2012.

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu

Sử dụng các phương pháp nghiên cứu sau:

- Thành phần hạt của cát vàng sông Lô được xác định trên bộ sàng tiêu chuẩn có kích thước mắt sàng lần lượt là: 0,14 mm; 0,315 mm; 0,63 mm; 1,25 mm; 2,5 mm; 5 mm theo TCVN 7572-2:2006;

- Thành phần cấp phối hỗn hợp bê tông được tính toán, xác định theo phương pháp thể tích tuyệt đối và kết hợp với điều chỉnh bằng thực nghiệm trên cơ sở tính chất của vật liệu sử dụng;

- Tính công tác của hỗn hợp bê tông thí nghiệm được xác định bằng độ chảy của côn vữa hình nón cụt tiêu chuẩn trên bàn dần theo phương pháp xác định độ lưu động của vữa tươi, phù hợp với TCVN 3121-3:2003 (Hình 2).



Hình 2. Bàn dẫn để xác định độ lưu động của hỗn hợp bê tông in 3D



- Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông sau khi nhào được xác định bằng phương pháp cân khối lượng và đo thể tích trong thùng đong tiêu chuẩn (thùng đong có thể tích 1 lít), phù hợp với TCVN 3108:1993 và TCVN 3105:1993. Bên cạnh đó, khối lượng thể tích của mẫu thí nghiệm sau khi đã đóng rắn ở tuổi 28 ngày được xác định bằng phương pháp cân khối lượng mẫu và đo thể tích trực tiếp trên mẫu thí nghiệm, phù hợp với TCVN 3115 : 1993;

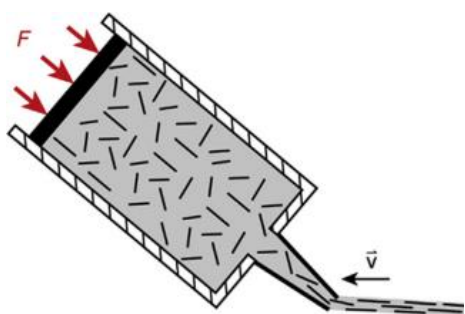
- Do trong thành phần của loại bê tông này không chứa cốt liệu lớn, nên cường độ kéo khi uốn và cường độ nén của bê tông được xác định trên mẫu vừa có kích thước 40x40x160 mm theo tiêu chuẩn TCVN 3121-11:2003 ở các tuổi 3 ngày, 7 ngày, 14 ngày và 28 ngày. Việc sử dụng mẫu hình dầm 40x40x160 mm có hai mục đích:

(i) Có thể xác định được cường độ kéo khi uốn của mẫu thí nghiệm tại các tuổi khác nhau. Tốc độ gia tải là 50 N/s.

(ii) Có thể xác định được cường độ nén của bê tông dựa vào các nửa viên mẫu đã bị uốn gãy ở trên. Tốc độ gia tải là 500 N/s.

- Phương pháp xác định khả năng in của hỗn hợp bê tông.

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 pít tông với thể tích 100 ml. Đầu ra là vòi in có chiều dài 150 mm, đường kính 10 mm (Hình 3).



Pít tông đơn giản để in-đùn hỗn hợp bê tông



Hình 3. Thiết bị kiểm tra khả năng in của hỗn hợp bê tông

Trong đó, khả năng in đánh giá qua việc hỗn hợp bê tông phải được đùn ra từ vòi in và duy trì hình dạng dưới tải trọng bản thân và tải trọng do các lớp tiếp theo xếp chồng lên nhau [13, 14]. 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, được đánh giá thông qua một đoạn vừa in liên tục có độ dài 120 cm.

(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 120 cm với chiều cao hai hoặc ba lớp vật liệu in.

**2.3. Thành phần cấp phối của bê tông in 3D**

**2.3.1. Tính toán cấp phối hỗn hợp bê tông in 3D theo phương pháp thể tích tuyệt đối**

Trên thế giới hiện nay cấp phối hỗn hợp bê tông in 3D đã được xác định theo một số phương pháp thực nghiệm kết hợp với hiệu chỉnh bằng thực nghiệm.

Ở Việt Nam, Lê Trung Thành và các cộng sự ở Viện Vật liệu xây dựng (Bộ Xây dựng) đã đề xuất các tỷ lệ thành phần bê tông tính năng cao áp dụng cho

công nghệ in 3D [7, 11, 15]. Hỗn hợp bê tông đáp ứng các yêu cầu của vữa in có tính công tác tốt, thời gian in trong 1 giờ, cường độ nén ở tuổi 28 ngày đạt từ 50 MPa đến 78 MPa.

Bên cạnh đó, thiết kế cấp phối bê tông theo phương pháp thể tích tuyệt đối đã được áp dụng trong nhiều nghiên cứu về bê tông chất lượng cao, bê tông chất lượng siêu cao, bê tông in 3D ở Việt Nam cũng như trên thế giới. Theo phương pháp thể tích tuyệt đối, thể tích 1m<sup>3</sup> bê tông đã lèn chặt coi như là tổng thể tích của nước, cốt liệu, xi măng, phụ gia khoáng, phụ gia siêu dẻo và thể tích không khí cuốn vào trong quá trình nhào trộn hỗn hợp bê tông.

Do đó:

$$\frac{X}{\gamma_X} + \frac{TB}{\gamma_{TB}} + \frac{SF90}{\gamma_{SF90}} + \frac{C}{\gamma_C} + \frac{N}{\gamma_N} + \frac{PGSD}{\gamma_{PGSD}} + A = 1000 \tag{1}$$

trong đó:

X, TB, SF90, C, N, PGSD: là khối lượng của xi măng, tro bay nhiệt điện, silica fume, cát, nước và phụ gia siêu dẻo;

$\gamma_X, \gamma_{TB}, \gamma_{SF90}, \gamma_C, \gamma_N, \gamma_{SR5000}$ : là khối lượng riêng của xi măng, tro bay nhiệt điện, silica fume, cát, nước và phụ gia siêu dẻo;

A là thể tích rỗng do không khí cuốn vào trong hỗn hợp bê tông khi nhào trộn.

Các giá trị khối lượng riêng của vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này đã được xác định và trình bày trong Bảng 4.

**Bảng 4. Khối lượng riêng của các vật liệu sử dụng**

| Loại vật liệu                       | X    | TB   | SF90 | C    | N   | PGSD |
|-------------------------------------|------|------|------|------|-----|------|
| Khối lượng riêng, g/cm <sup>3</sup> | 3,15 | 2,35 | 2,15 | 2,65 | 1,0 | 1,12 |

Theo tiêu chuẩn TCVN 10306:2014, bê tông cường độ cao là bê tông có cường độ chịu nén đặc trưng 55 MPa hoặc lớn hơn ở tuổi 28 ngày được thí nghiệm trên mẫu thí nghiệm tiêu chuẩn. Từ cơ sở đó, trong nghiên cứu này đã khảo sát và tính toán thiết kế thành phần cấp phối của bê tông hạt mịn có cường độ nén trung bình ở tuổi 28 ngày trên 60 MPa, tính công tác tốt với độ chảy 150 ÷ 200 mm trên bàn dần, được sử dụng làm hỗn hợp bê tông theo công nghệ in 3D.

**2.3.2. Lựa chọn các tỷ lệ của nguyên vật liệu sử dụng**

Các tỷ lệ nguyên vật liệu đã được lựa chọn trong nghiên cứu này dựa trên kết quả của nhiều nghiên cứu về bê tông hạt mịn (không có cốt liệu thô) và bê tông in 3D ở nhiều nước trên thế giới [2, 3, 4] và ở Việt Nam [7, 8, 10].

- Hỗn hợp chất kết dính (CKD) gồm 70% xi măng Poóc lăng PC40 Bút Sơn, 20% tro bay nhiệt điện Phả Lại, 10% Silica fume SF-90 (CKD = X + TB + SF90);

- Về lượng nước nhào trộn, tỷ lệ nước/chất kết dính ( $\frac{N}{CKD}$ ) trong nghiên cứu này được lựa chọn là 0,35 và 0,40 theo kết quả nghiên cứu bê tông in 3D đã thực hiện [8, 15];

- Về hàm lượng cốt liệu, trong nghiên cứu này đã lựa chọn tỷ lệ cát/chất kết dính ( $\frac{C}{CKD}$ ) là 0,67 và 1,0 theo kết quả nghiên cứu của nhiều nghiên cứu đã thực hiện [7, 11];

- Lượng phụ gia siêu dẻo lấy bằng 0.22% tổng lượng chất kết dính [15]. Trong nghiên cứu này, phụ gia siêu dẻo giảm nước được dùng với hàm lượng khá nhỏ, nhằm mục đích điều chỉnh độ chảy của hỗn hợp bê tông trên bàn dần;



## VẬT LIỆU XÂY DỰNG - MÔI TRƯỜNG

- Hàm lượng không khí cuốn vào trong hỗn hợp bê tông là 2% tổng thể tích hỗn hợp bê tông.

### 2.3.3. Xác định thành phần cấp phối hỗn hợp bê tông in 3D

Từ những cơ sở trên kết hợp với các kết quả khảo sát thực nghiệm sơ bộ, nghiên cứu này đã chọn gốc các hệ số tỷ lệ vật liệu như trong Bảng 5.

**Bảng 5.** Các tỷ lệ vật liệu sử dụng trong thực nghiệm

| Tỷ lệ   | $\frac{C}{CKD}$ | $\frac{N}{CKD}$ | $\frac{X}{CKD}$ | $\frac{TB}{CKD}$ | $\frac{SF90}{CKD}$ | $\frac{PGSD}{CKD}$ | A  |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------------|--------------------|----|
| Giá trị | 0,67 và 1,0     | 0,35 và 0,40    | 0,7             | 0,2              | 0,1                | 0,0022             | 2% |

trong đó: Chất kết dính - CKD = X + TB + SF90.

Tính toán theo phương pháp thể tích tuyệt đối dựa trên các giá trị tỷ lệ vật liệu lựa chọn

(trong Bảng 5), đã thu được 04 cấp phối của hỗn hợp bê tông in 3D có thành phần như trong Bảng 6.

**Bảng 6.** Cấp phối của hỗn hợp bê tông in 3D

| STT    | $\frac{N}{CKD}$ | $\frac{C}{CKD}$ | Thành phần cấp phối vật liệu (kg) cho 1 m <sup>3</sup> bê tông |     |      |     |     |      |
|--------|-----------------|-----------------|--|-----|------|-----|-----|------|
|        |                 |                 | X  | TB  | SF90 | N   | C   | PGSD |
| I3D-01 | 0,35            | 0,67            | 716  | 204 | 102  | 358 | 685 | 2,25 |
| I3D-02 | 0,35            | 1,0             | 633  | 181 | 90   | 317 | 905 | 1,99 |
| I3D-03 | 0,40            | 0,67            | 680  | 194 | 97   | 389 | 651 | 2,14 |
| I3D-04 | 0,40            | 1,0             | 605  | 173 | 86   | 346 | 865 | 1,90 |

### 2.3.4. Quy trình trộn hỗn hợp bê tông in 3D

Dựa vào điều kiện thiết bị thí nghiệm hiện có, đề tài đã xây dựng quy trình trộn hỗn hợp bê tông in 3D như sau:

- Bước 1: Hỗn hợp vật liệu ở trạng thái khô (xi măng, cát, tro bay và Silica fume) được cho vào cối trộn của máy trộn vữa xi măng 5 lít (máy Hobart) và trộn khô với tốc độ chậm trong khoảng 2 phút;

- Bước 2: Pha khoảng 70% nước với PGSD và khuấy đều. Sau đó, đổ từ từ hỗn hợp nước-PGSD vào hỗn hợp vật liệu khô và tiếp tục trộn, tăng dần tốc độ trộn và trộn trong khoảng 1-2 phút;

- Bước 3: Thêm 30% nước còn lại vào hỗn hợp phối liệu và tiếp tục cho máy trộn nhanh trong khoảng 1 đến 1,5 phút. Khi hỗn hợp bê tông đồng nhất và

chảy dẻo thì dừng máy và thu được hỗn hợp bê tông để đi thử nghiệm những tính chất tiếp theo.

### 2.3.5. Quy trình thử nghiệm khả năng in

Hỗn hợp bê tông sau khi đạt yêu cầu về độ chảy trên bàn dẫn được sử dụng để thí nghiệm khả năng in của hỗn hợp này (Hình 4). Quy trình thử nghiệm để đánh giá khả năng in của hỗn hợp bê tông như sau:

+ Điền đầy hỗn hợp bê tông vào pít tông của thiết bị in;

+ Lắp đặt pít tông vào vị trí và lắp vòi in vào pít tông;

+ Tiến hành thí nghiệm khả năng in của hỗn hợp bê tông với tốc độ di chuyển của đầu in khoảng 40 mm/s.



**Hình 4.** Quy trình trộn hỗn hợp bê tông và thí nghiệm khả năng in của bê tông in 3D

**3. Kết quả và thảo luận**

**3.1. Tính công tác và khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông in 3D sau khi nhào trộn**

Thực nghiệm đã xác định được độ chảy trên bàn dần và khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông in 3D, kết quả thu được thể hiện trong Bảng 7.

**Bảng 7. Khối lượng thể tích và độ chảy của hỗn hợp bê tông in 3D**

| STT    | N<br>CKD | C<br>CKD | Tính chất của hỗn hợp bê tông in 3D      |                  |
|--------|----------|----------|--|------------------|
|        |          |          | Khối lượng thể tích (kg/m <sup>3</sup> ) | Độ chảy xòe (mm) |
| I3D-01 | 0,35     | 0,67     | 2073                                     | 165              |
| I3D-02 | 0,35     | 1,0      | 2145                                     | 155              |
| I3D-03 | 0,40     | 0,67     | 2054                                     | 195              |
| I3D-04 | 0,40     | 1,0      | 2098                                     | 175              |

Từ kết quả thực nghiệm thu được cho thấy:

- Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông in 3D khá thấp so với hỗn hợp bê tông xi măng. Khối lượng thể tích trung bình của các hỗn hợp bê tông này khoảng 2092 kg/m<sup>3</sup>. Điều này được giải thích là do trong thành phần của hỗn hợp bê tông này không có cốt liệu lớn, các thành phần vật liệu sử dụng có khối lượng riêng và khối lượng thể tích nhỏ;

- Bên cạnh đó, độ chảy của hỗn hợp bê tông được xác định ngay sau khi nhào trộn xong trên bàn dần (Hình 5). Từ kết quả thực nghiệm có thể thấy, giá trị độ chảy thay đổi lớn theo tỷ lệ  $\frac{N}{CKD}$  và tỷ lệ  $\frac{C}{CKD}$ .

Với hỗn hợp bê tông có  $\frac{C}{CKD} = 0,67$  độ chảy trung bình đã tăng từ 165mm lên 195mm khi tỷ lệ  $\frac{N}{CKD}$  tăng từ 0,35 lên 0,40. Trong khi đó, với hỗn hợp bê tông có  $\frac{C}{CKD} = 1,0$  độ chảy trung bình đã tăng từ 155mm lên 175mm khi tỷ lệ  $\frac{N}{CKD}$  tăng từ 0,35 lên 0,40. Tuy giá trị độ chảy đã giảm đáng kể, nhưng dưới tương tác tương hỗ của phụ gia siêu dẻo nên hỗn hợp bê tông sau khi nhào trộn vẫn có tính công tác, độ đồng nhất tốt, không có hiện tượng phân tầng tách lớp.



**Hình 5. Xác định độ chảy của hỗn hợp bê tông in 3D trên bàn dần**

**3.2. Tính chất cơ-lý của bê tông sau khi rắn chắc**

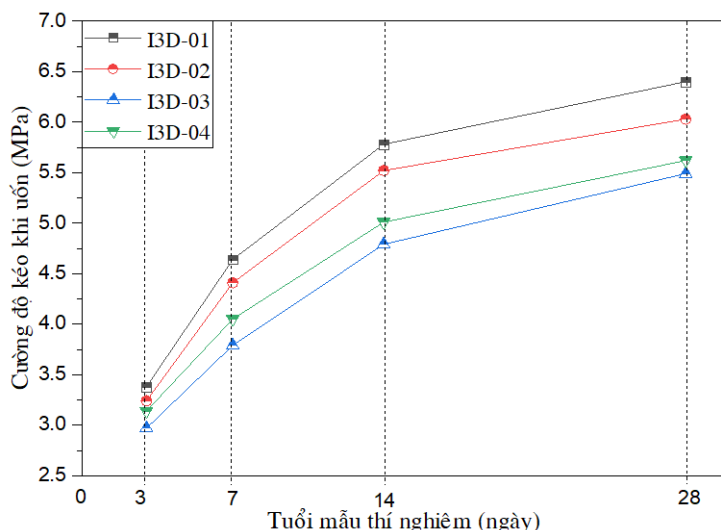
Trong nghiên cứu này, các tính chất cơ lý của mẫu bê tông được khảo sát gồm khối lượng thể tích

của chất kết dính được xác định ở tuổi 28 ngày; cường độ kéo khi uốn và cường độ nén của mẫu được xác định ở các tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày. Kết quả được trình bày trên Bảng 8.

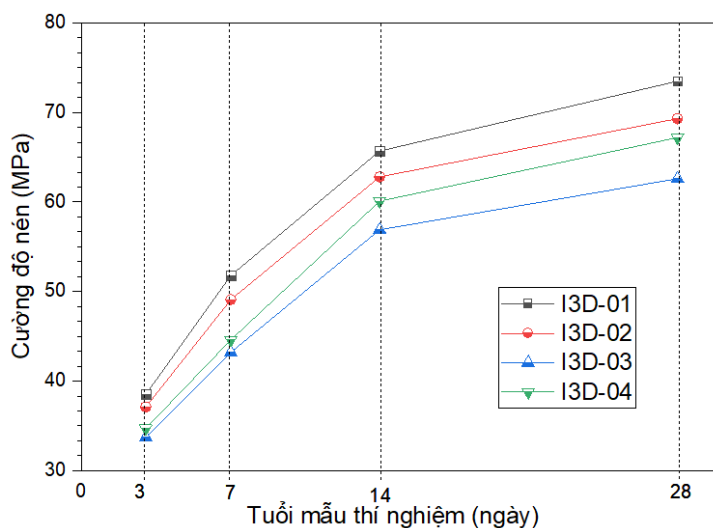
**Bảng 8. Tính chất cơ lý của mẫu bê tông sau khi rắn chắc**

| STT    | N<br>CKD | Khối lượng thể tích (kg/m <sup>3</sup> ) | Cường độ kéo khi uốn của mẫu (MPa) ở |        |         |         | Cường độ nén trung bình của mẫu (MPa) ở |        |         |         |
|--------|----------|--|--------------------------------------|--------|---------|---------|---|--------|---------|---------|
|        |          |  | 3 ngày                               | 7 ngày | 14 ngày | 28 ngày | 3 ngày                                  | 7 ngày | 14 ngày | 28 ngày |
| I3D-01 | 0,35     | 2025                                     | 3,38                                 | 4,64   | 5,78    | 6,40    | 38,5                                    | 51,8   | 65,7    | 73,5    |
| I3D-02 | 0,35     | 2137                                     | 3,24                                 | 4,41   | 5,52    | 6,03    | 37,1                                    | 49,1   | 62,8    | 69,3    |
| I3D-03 | 0,40     | 2011                                     | 2,97                                 | 3,79   | 4,79    | 5,49    | 33,7                                    | 43,2   | 56,9    | 62,6    |
| I3D-04 | 0,40     | 2057                                     | 3,14                                 | 4,05   | 5,01    | 5,62    | 34,7                                    | 44,6   | 60,1    | 67,2    |

Tốc độ phát triển cường độ kéo khi uốn và cường độ nén của các mẫu bê tông theo thời gian được thể hiện trên Hình 6 và Hình 7.



Hình 6. Tốc độ phát triển cường độ kéo khi uốn của mẫu theo thời gian



Hình 7. Tốc độ phát triển cường độ nén của mẫu theo thời gian

Từ số liệu trong Bảng 8 cho thấy, khi tỷ lệ  $\frac{N}{CKD}$  tăng từ 0,35 lên 0,40 thì cường độ của mẫu bê tông in 3D đã thay đổi đáng kể. Cường độ nén của cấp phối I3D-01 đạt giá trị lớn nhất là 73,5 MPa và thấp nhất là cấp phối I3D-03 đạt giá trị 62,6 MPa. Tuy nhiên, cả 04 cấp phối bê tông in 3D đều đạt trên 60 MPa – cấp cường độ nén yêu cầu đặt ra.

- Khi tỷ lệ  $\frac{C}{CKD}$  tăng từ 0,67 đến 1,0 thì cường độ của mẫu có xu hướng giảm xuống. Điều này được giải thích do hàm lượng cát tăng đã kéo theo hàm lượng chất kết dính giảm xuống, điều này đã làm cho giảm hàm lượng các khoáng  $xCaO.ySiO_2.zH_2O$  trong bê tông. Và kết quả là cường độ của mẫu thí nghiệm đã giảm xuống thấp hơn;

- Tỷ lệ  $\frac{N}{CKD}$  ảnh hưởng mạnh tới giá trị cường độ kéo khi uốn và cường độ nén của các mẫu thí nghiệm. Từ kết quả trong Bảng 8 thấy rõ quy luật: tỷ lệ  $\frac{N}{CKD}$  càng nhỏ cho bê tông có cường độ càng cao.

Ngoài ra, tỷ lệ  $\frac{C}{CKD}$  cũng ảnh hưởng đến cường độ

của mẫu thí nghiệm, nhưng ảnh hưởng này là không lớn;

- Cường độ của bê tông in 3D thu được là khá cao. Điều này giải thích là hàm lượng tro bay và silica fume kết hợp với phụ gia siêu dẻo giảm nước đã tạo ra hỗn hợp phụ gia khoáng - hóa biến đổi tính chất của bê tông, vừa làm tăng hàm lượng các khoáng hidro-silicat- canxi ( $xCaO.ySiO_2.zH_2O$ ) vừa điền đầy lỗ rỗng trong vi cấu trúc, tức là làm đặc cấu trúc của bê tông.

Mặt khác, từ Hình 6 và Hình 7 cho thấy tốc độ phát triển cường độ của hỗn hợp bê tông in 3D trong nghiên cứu này là khá nhanh. Cường độ nén trung bình ở tuổi 3 ngày, 7 ngày và 14 ngày đạt lần lượt 52%, 69% và 89% cường độ ở tuổi 28 ngày. Điều này được giải thích là do hàm lượng nước nhào trộn khá nhỏ, hỗn hợp bê tông có độ chảy hợp lý, lượng phụ gia siêu dẻo và rắn nhanh được sử dụng là 0,22%

hàm lượng chất kết dính. Kết quả là mẫu bê tông in 3D có tốc độ phát triển cường độ nhanh hơn mẫu bê tông xi măng thông thường.

Hơn nữa, khối lượng thể tích trung bình của các mẫu thí nghiệm sau khi rắn chắc 28 ngày được xác định ở trạng thái tự nhiên và dao động trong khoảng 2,06 tấn/m<sup>3</sup>. Kết quả nghiên cứu về khối lượng thể tích này có thể khẳng định bê tông in 3D được xếp vào loại đá nhân tạo không nung tương đối nặng.

**3.3. Đánh giá khả năng in của hỗn hợp bê tông in 3D**

Trong giới hạn của nghiên cứu này, khả năng in đánh giá qua việc hỗn hợp bê tông phải được đùn ra từ vòi in và duy trì hình dạng dưới tải trọng bản thân và tải trọng do các lớp tiếp theo xếp chồng lên nhau. Khả năng in của hỗn hợp bê tông chỉ được xác định thông qua thiết bị in đơn giản, tự chế tạo trong phòng thí nghiệm (Hình 8).



**Hình 8.** Quá trình in thử nghiệm để đánh giá khả năng in của hỗn hợp bê tông

Kết quả thu được cho thấy, nhìn chung khả năng in của tất cả các cấp phối đều là tốt, hỗn hợp bê tông in 3D đều được thiết bị mô phỏng đùn một cách dễ dàng, không bị tắc nghẽn. Sợi in khá liên tục, bề mặt nhẵn (Hình 9). Tuy nhiên, vì là thiết bị tự chế nên đường in chưa đáp ứng được yêu cầu về tính thẩm mỹ.



**Hình 9.** Sợi bê tông in ra liên tục, bề mặt bê tông không nhẵn mịn, giữ được hình dạng dưới trọng lượng bản thân và các lớp in chồng lên nhau

Kết quả thực nghiệm về khả năng in của hỗn hợp bê tông đã được trình bày trong Bảng 9.

**Bảng 9.** Đánh giá khả năng in của hỗn hợp bê tông

| Tên mẫu | $\frac{N}{CKD}$ | $\frac{C}{CKD}$ | Đánh giá khả năng in  |
|---------|-----------------|-----------------|---|
| I3D-01  | 0,35            | 0,67            | Sợi bê tông in ra đảm bảo liên tục. Tuy nhiên, bề mặt bê tông nhiều lỗ rỗng, nhưng khá mịn.<br>Giữ được hình dạng dưới trọng lượng bản thân và các lớp in chồng lên nhau.   |
| I3D-02  | 0,35            | 1,0             | Sợi bê tông in ra đảm bảo tính liên tục, có bề mặt nhẵn mịn, nhưng khó đùn hơn, hay bị kẹt trong thiết bị in vì đã tăng lượng dùng cát lên trong hỗn hợp.<br>Giữ được hình dạng dưới trọng lượng bản thân và các lớp in chồng lên nhau. |
| I3D-03  | 0,40            | 0,67            | Sợi bê tông in ra đảm bảo tính liên tục, bề mặt bê tông ướt, vì hàm lượng dùng nước đã tăng lên.<br>Không chịu được trọng lượng của các lớp in chồng lên nhau. Các lớp in có hiện tượng xô lệch, biến dạng sau khi in.                  |
| I3D-04  | 0,40            | 1,0             | Sợi bê tông in ra không liên tục, bị biến dạng 1 mm đến 2 mm so với kích thước vòi phun. Quá trình in trên thiết bị khó khăn hơn vì tỷ lệ cát/chất kết dính đã tăng từ 0,67 lên 1,0.  |

## 4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu trong phòng thí nghiệm đã rút ra được một số kết luận như sau:

- Hỗn hợp bê tông in 3D có thể được chế tạo trên cơ sở các loại vật liệu sẵn có ở Việt Nam như cát vàng ( $D_{max} = 2,5 \text{ mm}$ ), xi măng Poóc lăng PC40 Bút Sơn, tro bay nhiệt điện Phả Lại, silica fume SF-90, phụ gia siêu dẻo và nước;

- Khả năng in bị ảnh hưởng lớn bởi các tỷ lệ  $\frac{N}{CKD}$  và  $\frac{C}{CKD}$ , trong đó cấp phối tốt nhất đối với khả năng in trong nghiên cứu này là hỗn hợp bê tông có các tỷ lệ  $\frac{N}{CKD} = 0,35$  và  $\frac{C}{CKD} = 0,67$ ; với hàm lượng phụ gia khoáng sử dụng là 10% SF-90 kết hợp 20% TB;

- Trong giới hạn nghiên cứu, tính công tác của hỗn hợp bê tông in 3D được xác định thông qua độ chảy trong khoảng từ 155 mm đến 195 mm, cường độ nén tuổi 28 ngày dao động trong khoảng 62,6÷73,5 MPa, trong khi đó, cường độ kéo khi uốn ở tuổi 28 ngày trong khoảng 5,49÷6,40 MPa;

- Cường độ nén trung bình ở tuổi 3 ngày, 7 ngày và 14 ngày đạt lần lượt 52%, 69% và 89% cường độ ở tuổi 28 ngày;

- Khối lượng thể tích trung bình của các mẫu thí nghiệm sau khi rắn chắc 28 ngày được xác định ở trạng thái tự nhiên khoảng 2,06 tấn/m<sup>3</sup>;

- Khả năng in của tất cả các cấp phối đều tốt, hỗn hợp bê tông in 3D đều được thiết bị mô phỏng đùn một cách dễ dàng, không bị tắc nghẽn. Với tỷ lệ nước/chất kết dính và cát/chất kết dính tương ứng là 0,35 và 0,7 sợi in khá liên tục, bề mặt nhẵn. Tuy nhiên, vì là thiết bị tự chế nên đường in chưa đáp ứng được yêu cầu về tính thẩm mỹ.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lưu Văn Thực, Trần Quang Dũng, Nguyễn Thị Diệu Thùy (2018), "Công nghệ in bê tông 3D – Định hướng phát triển và áp dụng ở Việt Nam", Tạp chí khoa học Công nghệ Xây dựng NUCE, 12, 6, p. 49-56.
- [2] Sanjayan, J. G., Nazari, A., & Nematollahi, B. (2019). "3D Concrete Printing Technology: Construction and Building Applications". Butterworth-Heinemann. 404 p.
- [3] Li Z., Hojati M., Wu Z., Piasente J., Ashrafi N., Duarte J.P., Nazarian S., Bilén S.G., Memari A.M. Radlińska A., (2020). "Fresh and hardened properties of extrusion-based 3D-printed cementitious materials: a review". Sustainability, 12(14), p.5628.
- [4] Kearney A. T. (2015). "3D printing: A manufacturing

revolution". Korea.

- [5] Roussel N. (2018). "Rheological requirements for printable concretes". Cement and Concrete Research, 112 (2018), p. 76-85.
- [6] Sanjayan J.G., Nematollahi B., Xia M., Marchment T. (2018). "Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete". Construction and Building Materials, vol. 172. pp. 468–475, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.03.232.
- [7] Lê Trung Thành (2021), "Nghiên cứu phát triển công nghệ in 3D bê tông tại Viện Vật liệu xây dựng". Hội thảo khoa học "Công nghệ in 3D bê tông – Cơ hội và thách thức". Viện Vật liệu xây dựng (Bộ Xây dựng) tháng 01.
- [8] Trần Văn Miên (2021), "Nghiên cứu phát triển vật liệu in 3D bê tông tại ĐH Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh". Hội thảo khoa học "Công nghệ in 3D bê tông – Cơ hội và thách thức". Viện Vật liệu xây dựng (Bộ Xây dựng) tháng 01/2021.
- [9] Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, G., Yang, Y., Wu, M., Pang, B. (2018). "Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink". Construction and building materials, 174, 263-271.
- [10] Trần Văn Miên, Huỳnh Công Tâm, Lê Hoàng Giang, Nguyễn Quốc Cường (2021), *Cải thiện bám dính giữa các lớp in bê tông 3D bằng hồ xi măng biến tính*, Tạp chí Vật liệu & Xây dựng - Bộ Xây dựng: T. 11 S. 6: Tạp chí Vật liệu & Xây dựng.
- [11] Nguyễn Văn Tuấn, Lê Việt Hùng (2021), "Nghiên cứu phát triển vật liệu in 3D bê tông". Hội thảo khoa học "Công nghệ in 3D bê tông – Cơ hội và thách thức". Viện Vật liệu xây dựng (Bộ Xây dựng) tháng 01.
- [12] Jo J. H., Jo B. W., Cho W., Kim J. H. (2020). "Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials," Int. J. Concr. Struct. Mater., vol. 14, no. 1, doi: 10.1186/s40069-019-0388-2.
- [13] Trần Văn Miên, Nguyễn Hoàng Phước, Nguyễn Thành Thái, Nguyễn Tiến Dũng (2021), "Ảnh hưởng của độ dẻo hỗn hợp bê tông đến khả năng in 3D", Tạp chí Vật liệu & Xây dựng - Bộ Xây dựng: S. 04 (2021): 21-25. Tạp chí Vật liệu & xây dựng.
- [14] Phạm Thị Loan, Nguyễn Thái Học, Lưu Thế Toàn, Đỗ Thị Kim Oanh (2021), "Ứng dụng công nghệ in 3D trong xây dựng". Trường Đại học Hải Phòng, 23 trang.
- [15] Vũ Văn Linh, Lê Việt Hùng, Lê Trung Thành, Nguyễn Công Hậu, Tạ Minh Phương Bảo, Nguyễn Văn Tuấn (2021), "Một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm về bê tông in 3D", Tạp chí Vật liệu & Xây dựng - Bộ Xây dựng: T. 11 S. 6 (2021): Tạp chí Vật liệu & Xây dựng.

Ngày nhận bài: 28/10/2022.

Ngày nhận bài sửa: 10/11/2022.

Ngày chấp nhận đăng: 14/11/2022.