

# Công nghệ in bê tông cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ tư về công nghệ xây dựng

Ngày nhận bài: 23/12/2016

Ngày sửa bài: 15/01/2017

Ngày chấp nhận đăng: 2/02/2017

Lê Trung Thành

## TÓM TẮT:

Bài báo này trình bày các kết quả nghiên cứu về công nghệ in bê tông bao gồm quy trình công nghệ in, vật liệu bê tông in có các đặc tính về khả năng bơm, in, tạo hình và đảm bảo thời gian chờ rắn chắc. Một số sản phẩm kết cấu bê tông in đã được hoàn thành bao gồm một bức tường dị hình có hình thoi đứng dài/rộng/cao = 2/0,9/0,8 m, nặng khoảng 1 tấn, có cốt thép căng sau để khẳng định công nghệ in bê tông là hoàn toàn khả thi để áp dụng chế tạo các sản phẩm bê tông cỡ lớn. Công nghệ in bê tông có thể chế tạo các cấu kiện có hình dáng bất kỳ và không cần ván khuôn như các công nghệ chế tạo bê tông truyền thống, sẽ tạo ra bước đột phá lớn trong ngành xây dựng. Vì vậy, công nghệ in bê tông có thể xem như là một đại diện của ngành xây dựng trong cách mạng công nghiệp lần thứ tư.

*Từ khóa: công nghệ, bê tông in, bức tường dị hình.*

## ABSTRACT:

This paper presents overall research results about a concrete printing technology that comprises technology process, printing concrete material. The material has main characteristics including pumpability, printability, buildability and open time. A number of concrete components have been printed. One of the components is an abnormal-shape wall that has dimensions of length/width/height = 2/0.9/0.8 m, weight of approximately 1 tonne and post-tensioned steel reinforcement. This is to confirm that the concrete printing technology is completely feasible to manufacture large-size concrete structures. Concrete printing technology can manufacture freeform components and no-need of formwork as traditional methodology of concrete manufacture, so it probably creates a big change in construction industry. Therefore, the concrete printing technology can be considered as one of representatives of construction field in fourth industrial revolution.

*Key words: technology, printing concrete, abnormal-shape wall.*

TS. Lê Trung Thành  
Bộ Xây dựng

**1. Cách mạng công nghiệp lần thứ tư – cuộc viễn trình của con người vào kỷ nguyên mới của khoa học và công nghệ**

Tối ưu hóa các lợi ích trong hoạt động sản xuất luôn là động lực thúc đẩy phát triển của xã hội con người. Các cuộc cách mạng công nghiệp đã tạo ra của cải, vật chất hơn nhiều lần cho con người so với trước đó và đồng thời cũng đã tác động, làm thay đổi lối mòn đến chính trị, kinh tế, văn hóa, xã hội của thế giới.

Cách mạng công nghiệp lần thứ nhất diễn ra vào khoảng nửa cuối thế kỷ XVIII, sử dụng năng lượng nước và hơi nước để cơ giới hóa sản xuất, đánh dấu bằng phát minh ra động cơ hơi nước của James Watt ở Anh, rồi lan rộng ra châu Âu và Mỹ. Cách mạng công nghiệp lần thứ nhất đã dịch chuyển các hoạt động sản xuất của con người từ lao động chân tay, quy mô nhỏ kéo dài qua nhiều thế kỷ, sang phương thức sử dụng máy móc, quy mô công nghiệp [1-3].

Cách mạng công nghiệp lần thứ hai bắt đầu vào những năm 1850 kết thúc khoảng năm 1914 khi bắt đầu Chiến tranh thế giới thứ hai. Cách mạng công nghiệp lần thứ hai sử dụng năng lượng điện để tạo nên nền sản xuất quy mô lớn, đã thúc đẩy mạnh mẽ sự phát triển của ngành điện, vận tải, hóa học, sản xuất thép [1-3].

Cách mạng Công nghiệp lần thứ ba bắt đầu khoảng năm 1969 và kết thúc năm 1997 khi cuộc khủng hoảng tài chính châu Á nổ ra, sử dụng điện tử và công nghệ thông tin để tự động hóa sản xuất. Cách mạng Công nghiệp lần thứ ba diễn ra nhanh chóng khi có các tiến bộ về hạ tầng điện tử, máy tính và số hóa vì nó được xúc tác bởi sự phát triển của chất bán dẫn, siêu máy tính (thập niên 1960), máy tính cá nhân (thập niên 1970 và 1980) và Internet (thập niên 1990). So với các cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ nhất và thứ hai trước đây chỉ thay thế một phần chức năng lao động chân tay của con người bằng máy móc cơ khí, hoặc tự động hóa một phần thì cách mạng công nghiệp lần thứ ba đã thay thế phần lớn chức năng lao động của con người bao gồm cả chân tay và trí óc [1-3].

Cách mạng Công nghiệp lần thứ tư bắt đầu vào đầu thế kỷ XXI, được hình thành trên nền tảng của cách mạng công nghiệp lần thứ ba, là cuộc cách mạng số, đặc trưng bởi internet ngày càng phổ biến và di động, bởi các cảm biến nhỏ và mạnh hơn với giá thành rẻ hơn và trí tuệ nhân tạo. Cách mạng công nghiệp lần thứ tư phát triển mạnh mẽ cả công nghệ mới như in 3D, người máy, trí tuệ nhân tạo, kết nối Internet vạn vật, công nghệ nano, sinh học, vật liệu mới... Trong cuộc cách mạng này, các thành tựu và ứng dụng của khoa học và công nghệ được khuếch tán nhanh hơn và rộng hơn so với các cuộc cách mạng công nghiệp trước đây. Hiện tại cả thế giới đang ở trong giai đoạn đầu của cuộc cách mạng này và đây được coi là chiến lược bản lề cho các nước đang phát triển tiến đến để theo kịp với xu hướng thế giới và mở ra bước ngoặt mới cho sự phát triển của con người [1-3].

**2. Công nghệ in bê tông – cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ tư về công nghệ xây dựng**

Trong những năm cuối thế kỷ XX và đầu thế kỷ XXI, phát triển kinh tế xã hội trong thực tiễn đòi hỏi gia tăng áp lực và thúc đẩy ngành xây dựng theo hướng tự động hóa, đó là: cần phải giảm nhân lực, giảm thời gian xây dựng trên công trường để tránh các rủi ro về mất an toàn lao động, giảm chi phí sản xuất và tăng tính tự do trong sáng tác thiết kế kiến trúc, mỹ thuật. Một số công nghệ xây dựng tự động hóa đã bắt đầu thâm nhập vào thị trường, có thể kể đến là tự động hóa xây gạch [4], bê tông phun

bản [5], các công nghệ đúc sẵn [6], công nghệ robot đúc tạo khuôn để chế tạo các tấm panel kiến trúc mặt ngoài công trình xây dựng [7]. Sự phát triển của công nghệ mô hình thông tin xây dựng BIM [8] không nghi ngờ sẽ gia tăng việc sử dụng thông tin số và áp dụng quy trình sản xuất tự động hóa trong ngành xây dựng ngày càng mạnh mẽ.

Công nghệ in bê tông về cơ bản được phát triển trên cơ sở công nghệ sản xuất các vật thể từ dữ liệu mô hình 3 chiều (3D) (thiết kế bằng các phần mềm máy tính phân tích). Quy trình công nghệ in bê tông bao gồm một số bước cơ bản: Thiết kế cấu kiện 3D, chia thành các lớp, mã hóa vị trí chuyển động của đầu máy in để phun vật liệu bê tông (đều nhớt) ra liên tục; Chuẩn bị vật liệu bê tông in có độ dẻo, nhất phù hợp với áp lực phun vật liệu ra khỏi đầu máy in và tốc độ di chuyển đầu máy in, và Điều khiển máy in tự động để chuyển động đầu máy in và phun vật liệu bê tông ra kịp thời, liên tục, chính xác tại các vị trí hình thành lên vật thể.

Trong công nghệ in bê tông, cấu kiện được hình thành theo các lớp vật liệu in ra từ máy in tự động, các lớp vật liệu này liên kết với nhau theo chiều thẳng đứng. Vật liệu được phun ra từng lớp một và xong lớp dưới thì mới đến lớp trên. Lớp vật liệu trên liên kết với lớp vật liệu dưới bằng liên kết cơ lý hóa chặt chẽ tùy thuộc vào độ nhớt / độ dẻo của vật liệu sử dụng [9], xem Hình 1. Công nghệ chế tạo in 3D đặc biệt hiệu quả về chi phí đối với các sản phẩm chế tạo có yêu cầu cao về kỹ thuật và thẩm mỹ.



Hình 1. Mẫu thử nghiệm in bê tông 3D



Hình 2. Các bộ phận chính của máy in bê tông

Trong ngành xây dựng, các sản phẩm bê tông như kết cấu đường, sàn, tấm chắn nắng, trang trí bề mặt công trình, ... thường có kích thước không hoàn toàn giống nhau vì vậy công nghệ chế tạo truyền thống là làm khuôn, vữa khuôn và sau đó thi đổ bê tông tươi vào, đợi đến lúc bê tông đông rắn và đạt cường độ chịu lực thiết kế thì mới được tháo khuôn ra. Thiết kế và chế tạo các cấu kiện bê tông đúc sẵn đồng loạt, giống nhau cũng đã được triển khai để nâng cao chất lượng cấu kiện và giảm chi phí thi công công trình. Tuy nhiên, các cấu kiện giống nhau, lắp đi lắp lại, làm cho kiến trúc công trình trở nên đơn điệu.

Công nghệ in bê tông sẽ khắc phục được các hạn chế về phương pháp chế tạo cấu kiện bê tông của ngành xây dựng truyền thống, nó sẽ tạo điều kiện để các cấu kiện, thậm chí là các ngôi nhà có hình dạng kiến trúc khác nhau sẽ được tạo ra vì máy in có thể in bất cứ hình dạng nào của cấu kiện miễn là vật liệu bê tông dùng để in có các tính chất cơ lý phù hợp. Từ đó, các ý tưởng thiết kế của các kiến trúc sư sẽ ngày càng được



Hình 3. Quý dao chuyển động của đầu máy in bê tông khi chế tạo

= 5,4m/4,4m/5,4m để có thể in các cấu kiện bê tông kích thước lớn. Các bộ phận chính của máy in bê tông, Hình 2, bao gồm: thùng chứa vật liệu bê tông, ống truyền dẫn vật liệu, bơm hút – đẩy bê tông, ống dẫn bê tông tới đầu in và đầu in bê tông (các loại có đường kính khác nhau trong khoảng 6 – 22 mm).

### 3.1 Chuẩn bị dữ liệu cho máy in

Cấu kiện được thiết kế ở dạng mô hình 3D, sau đó được cắt thành các lớp với độ dày phù hợp (lớp càng dày thì in càng nhanh nhưng vật liệu bê tông phải đủ chắc để không bị biến hình khi mới in ra). Tiếp theo đó, quỹ đạo đường di chuyển đầu in được phần mềm máy tính phân tích và tạo ra một cách tối ưu sao cho thời gian in hết mỗi lớp vật liệu là ít nhất, không bị rơi vãi vật liệu thừa khi đóng/mở đầu in khi di chuyển qua các vị trí không liên tục. Hình 3 cho thấy một ví dụ về quỹ đạo di chuyển đầu in bê tông chế tạo một lớp của cấu kiện.

### 3.2 Chuẩn bị vật liệu bê tông in

Vật liệu bê tông in đã được thiết kế thành phần bao gồm xi măng, cát, nước, phụ gia để chỉnh thời gian rắn chắc, sợi polypropylene và đáp ứng đầy đủ các tiêu chí cơ lý sau [9]:

1. Khả năng bơm được – hỗn hợp bê tông phải chuyển động được dễ dàng qua hệ thống truyền-dẫn
2. Khả năng in được – hỗn hợp bê tông có thể chui dễ dàng qua đầu in
3. Khả năng tạo hình được – hỗn hợp bê tông sau khi phun ra khỏi đầu in phải đủ khả năng chịu được trọng lượng của các lớp in tiếp theo để lên mà không bị biến hình hoặc sụp đổ.
4. Thời gian chờ rắn chắc – khoảng thời gian đảm bảo cho độ dẻo, nhờ có hỗn hợp bê tông ổn định để duy trì tốc độ dòng chảy hỗn hợp bê tông không thay đổi và chống tác động trong các ống truyền-dẫn và đầu in.

Thêm vào đó, cường độ chịu kéo dính, chịu nén và chịu uốn cao cũng là các tiêu chí cần đạt được với vật liệu bê tông in do cấu trúc của sản phẩm kết cấu in ra thường có lỗ rỗng giữa các dòng vật liệu bê tông in dẫn đến cường độ của kết cấu thấp hơn so với kết cấu có cùng kích thước được chế tạo bằng phương pháp đổ khuôn truyền thống [10].

Cơ sở sản phẩm thò mà cần thiết với vật chất cơ lý kỹ ở trạng thái dẻo/nhớt và trạng thái rắn chắc, một vật liệu bê tông in đã được thiết kế thử nghiệm với thành phần cấp phối tối ưu cho thể tích 1 m<sup>3</sup> đạt được như sau: 1244 kg cát, 581 kg xi măng, 166 kg tro bay, 83 kg silica fume, 212 lít nước, 8,4 kg phụ gia siêu dẻo (1% khối lượng chất kết dính), 4,2 kg phụ gia chậm đông rắn (0,5% khối lượng chất kết dính) và 1,2 kg sợi polypropylene.

tự do, mở rộng không gian sáng tạo không quá bị hạn chế vào các phương pháp xây dựng, chế tạo cấu kiện truyền thống. Đồng thời, các lợi ích mà công nghệ in bê tông đem lại còn là khả năng tiết kiệm thời gian và vật liệu chế tạo do chi phí rất ít vật liệu thừa (vì máy in chỉ in đúng cấu kiện đã thiết kế và bề mặt vật liệu sử dụng đã được tính toán cẩn thận trước khi in). Đặc biệt là công nghệ in bê tông sẽ loại bỏ được khuôn và ván khuôn trong quá trình chế tạo. Tuy nhiên, công nghệ in bê tông nhìn chung cũng phải đối mặt với các thách thức về tốc độ in, độ chính xác, chất lượng các vật liệu sử dụng, mức độ hoàn thiện bề mặt kết cấu.

### 3. Kết quả nghiên cứu về công nghệ in bê tông

Trong nghiên cứu này, mô hình "máy in bê tông" đã được thiết kế và lắp đặt có kích thước dài/rộng/cao

với đường kính / chiều dài sợi = 12 / 0,18 mm. Khối lượng thể tích của bê tông in khi rắn chắc khoảng 2300 kg/m<sup>3</sup>. Cường độ chịu nén 28 ngày tuổi của mẫu bê tông khi đổ khuôn đạt 100 – 110 MPa. Cường độ chịu nén 28 ngày tuổi của mẫu bê tông khi in ra đạt 80 – 88 MPa. Như vậy, cường độ của mẫu bê tông in đã bị suy giảm khoảng 20% so với cường độ của mẫu bê tông đổ khuôn (chế tạo bằng cách đổ khuôn bình thường).

### 3.3. Vật chuyên và in cấu kiện

Vật liệu bê tông in được trộn kỹ từ máy trộn bê tông và chuyển tới thùng hũa, tiếp tục hỗn hợp bê tông in được truyền dẫn đến bơm chân không và bơm sẽ làm nhiệm vụ hút – đẩy hỗn hợp bê tông in đến đầu in có đường kính khoảng 6 – 22 mm (tùy thuộc vào thiết kế in sản phẩm với độ dày lớp vật liệu khác nhau). Hỗn hợp vật liệu bê tông được in / phun ra khỏi đầu in có hình dạng như các sợi. Các sợi bê tông tươi này sẽ liên kết với nhau theo chiều ngang trên cùng một lớp và liên kết với nhau theo chiều đứng đối với các lớp kế tiếp nhau.

### 4. Một số sản phẩm bê tông in 3D

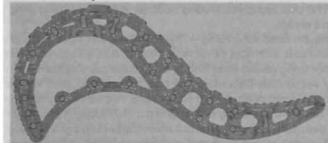
Một số mẫu cấu kiện bê tông in đã được thử nghiệm từ đơn giản đến phức tạp để khảo sát khả năng tạo hình độc đáo mà không thể chế tạo theo phương pháp ghép ván khuôn thông thường. Hình 4 thể hiện một số sản phẩm ghép-giường nằm, từ thiết kế 3D (Hình 4.a) cho đến sản phẩm đã in ra từ máy in (Hình 4.b).



a/ Mô hình 3D ghế-giường nằm 3D b/ Sản phẩm in thử nghiệm  
Hình 4. Cấu kiện Type equation here: ghế-giường nằm



a/ Mô hình in 3D mặt sàn bê tông b/ Sản phẩm in thử nghiệm



a/ Mô hình in 3D một lớp bê tông thể hiện mặt bằng của bức tường đã in b/ Bức tường đã in xong c/ Các cốt thép được căng sau

Hình 6. Bức tường đã in

tiếp theo đó, để trình diễn khả năng của máy in bê tông này, một vật thể có hình dáng kiến trúc / mỹ thuật như một bức tường đã in được thiết kế để in ra. Cấu kiện này có kích thước chiều dài 2 m, chiều rộng 0,9 m và chiều cao 0,8 m. (Hình 6b). Trọng lượng của cấu kiện khoảng 1 tấn. Cấu kiện được tạo hình bằng 130 lớp với độ dày mỗi lớp bê tông là 6 mm. Thời gian in trung bình một lớp bê tông hết 20 phút. (Hình 6a).

Bức tường in hình này có bề mặt một bên với rất nhiều gài cấp, bề mặt còn lại thì trơn với 1 chỗ ngồi dành riêng để thể hiện độ bao gồm, đồng thời của vật liệu bê tông in ra. Bức tường còn được thiết kế bao gồm 12 hồ trống thẳng đứng để giảm tải vật liệu sử dụng, đồng thời còn thể hiện chức năng cách

âm, cách nhiệt. Các hồ trống có các kính thước và hình dáng hoàn toàn khác nhau để thể hiện sự ưu việt của công nghệ in bê tông so với công nghệ đổ bê tông tạo hình truyền thống.

Kết cấu bức tường cũng thể hiện khả năng sử dụng cốt thép đôi với công nghệ in bê tông. Tổng cộng có 23 hồ trống chờ cốt thép đã được thiết kế để tạo khe cho cốt thép căng sau. Sau khi luôn cốt thép vào căng tạo ứng suất xong, với không có đã được bơm đẩy phần còn lại trong các hồ chờ (Hình 6c).

### 5. Kết luận

Công nghệ in bê tông là một khái niệm còn mới, đã được hiện thực hóa bằng sự kết nối của công nghệ thông tin, số hóa và công nghệ thiết kế nhằm đáp ứng nhu cầu tinh xảo, tối ưu hóa lợi ích trong hoạt động sản xuất, chế tạo cấu kiện bê tông của con người. Đây là loại công nghệ được xem là một trong những đại diện của ngành xây dựng trong cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ tư. Nghiên cứu này có nhiều triển vọng để có thể ra một phương pháp cải tiến đột biến về phương pháp chế tạo các cấu kiện bê tông sau hàng nghìn năm truyền thống ngành xây dựng vẫn sử dụng phương pháp chế tạo / đúc cấu kiện bê tông bằng cách đổ bê tông vào khuôn hoặc ghép ván khuôn.

Công nghệ in bê tông đã thể hiện khả năng có thể thúc đẩy tư duy sáng tạo trong thiết kế, độ chính xác khi sản xuất các kết cấu có các lỗ rỗng chức năng với hình dáng, kích thước bất kỳ, không giống nhau, đồng thời loại bỏ công việc nặng nhọc ghép ván khuôn trong thi công chế tạo các cấu kiện bê tông. Đây là những quy trình chế tạo cấu kiện bê tông cốt thép mà không thể thực hiện được với phương pháp đổ bê tông cốt thép truyền thống.

Vật liệu bê tông in rất quan trọng đối với tương lai phát triển loại công nghệ này. Các tính chất cơ lý của bê tông in khi ở trạng thái dẻo/nhớt và trạng thái rắn chắc cần phải thỏa mãn các yêu cầu chức năng như là khả năng bơm, khả năng in, khả năng tạo hình, thời gian chờ rắn chắc và có cường độ cao.

Tốc độ của bơm và chuyển động của máy in, kích thước đầu in và các đặc tính của vật liệu có mối quan hệ tương tác chặt chẽ với nhau, quyết định kích thước, hình dạng và độ đồng nhất của sợi bê tông in ra.

Các kết cấu bê tông chế tạo bằng công nghệ in này hoàn toàn có thể được tăng cường khả năng chịu lực bằng việc gia cường cốt thép căng sau như thử nghiệm trong nghiên cứu này.

### Lời cảm ơn

Các kết quả nghiên cứu và thử nghiệm về công nghệ in bê tông đã được tác giả thực hiện tại Đại học tổng hợp Loughborough, Vương quốc Anh cùng với các nhà nghiên cứu Richard Buswell, Simon Austin, Sungwoo Lim, John Webster, Alistair Gibb và Tony Thorpe. Tác giả chân thành cảm ơn các đồng nghiệp nghiên cứu đã góp ý và trao đổi hữu ích về các kết quả thử nghiệm công nghệ in bê tông. Tác giả đồng thời cảm ơn sự hỗ trợ về nguyên vật liệu, mô hình thiết kế và các công ty BASF, BPB plc, Buro Happold, Foster and Partners, Putzmeister UK, Shotcrete và Weber.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ 4, Tạp chí Khoa học công nghệ kinh tế, số 8 – 2016
- [2] Fourth Industrial Revolution, Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Fourth\\_Industrial\\_Revolution](https://en.wikipedia.org/wiki/Fourth_Industrial_Revolution), truy cập tháng 1/2016
- [3] The Fourth Industrial Revolution, Klaus Schwab, 2016.
- [4] Digitally Fabricating Non-Standardised Brick Walls, T. Bonwetsch, F. Gramazio, M. Kohler, ManuBuild conference proceedings, Rotterdam, 2007.
- [5] Shotcrete, <http://www.shotcrete.co.uk>.
- [6] Buildoffsite, <http://buildoffsite.org>.
- [7] Formtex, <http://www.formtex.com>.
- [8] BIM, <http://www.autodesk.com/solutions/bim/overview>.
- [9] Mixed design and fresh properties for high-performance printing concrete, Lê Trung Thành và các đồng nghiệp, Tạp chí RILEM Materials & Structures Journal, số 45, 2012.
- [10] Hardened properties of high-performance printing concrete, Lê Trung Thành và các đồng nghiệp, Tạp chí Cement and Concrete Research Journal, số 42, 2012.