

# Ảnh hưởng của mô đun độ lớn của cát đến tính chất ma sát và lưu biến của bê tông tươi có xét đến yếu tố thời gian

Influence of sand modulus to the frictional and rheological parameters of fresh concrete within time

Vũ Văn Nhân<sup>1</sup>, Nguyễn Thế Dương<sup>2</sup>, Nguyễn Công Hoàng<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Khoa Xây dựng, Trường Đại học Duy Tân, 3, Quang Trung, Đà Nẵng

<sup>3</sup>Học viên Cao học K9 MCE - Trường Đại học Duy Tân

---

## Tóm tắt

Trong bài báo này, các tác giả trình bày kết quả thí nghiệm đo độ sụt và thông số bơm của hỗn hợp bê tông bao gồm ngưỡng trượt tiếp xúc và hằng số nhớt tiếp xúc có xét đến sự thay đổi mô đun độ lớn của cốt liệu cát. Thời gian khảo sát được tiến hành ở ba thời điểm: ngay sau khi trộn bê tông (0 phút), 30 phút và 60 phút sau khi trộn bê tông. Kết quả thí nghiệm cho biết xu hướng biến đổi của các thông số trên giúp việc thiết kế thành phần cấp phối bê tông phục vụ việc bơm bê tông được tốt hơn.

*Từ khóa:* ngưỡng trượt tiếp xúc, hằng số nhớt tiếp xúc, máy đo tribometer, mô đun độ lớn cát

## Abstract

In this paper, the authors present experimental results on slump and pumping parameters of fresh concrete including the frictional shear stress threshold and frictional viscosity constant while considering the variation of sand modulus. Experiments are carried-out at three instants: immediately after mixing, 30 minute and 60 minute after mixing. Obtained results provide the tendency of variation of above parameters serving for a better design of concrete composition with regard to pumping.

*Keywords:* frictional shear stress threshold, frictional viscosity constant, tribometer, sand modulus

© 2017 Bản quyền thuộc Đại học Duy Tân

---

## 1. Đặt vấn đề

Công nghệ bơm bê tông lần đầu tiên được sử dụng tại Mỹ trong những năm đầu 1930 và đến nay, công nghệ này đã được sử dụng rộng rãi cho các công trình xây dựng. Đặc biệt đối với việc thi công các công trình có quy mô lớn như nhà cao tầng hoặc công trình cầu thì việc vận chuyển hỗn

hợp bê tông từ vị trí chân công trình đến vị trí cần đổ bê tông bằng phương pháp bơm gần như là lựa chọn tối ưu nhất, tính đến thời điểm này. Ưu điểm của công nghệ bê tông bơm là bê tông được đổ một cách liên tục, từ đó rút ngắn được thời gian thi công, tiết kiệm được hao phí nhân lực và chi phí xây dựng. Ở nước ta hiện nay, kỹ thuật

về bơm bê tông được quy định trong tiêu chuẩn TCXD 200-1997 [1]. Về vật liệu, tiêu chuẩn này đưa ra một số quy định chung về thiết kế cấp phối, trong đó việc kiểm tra tính thi công được của hỗn hợp bê tông được thực hiện thông qua kiểm soát kích thước của vật liệu và thông số độ sụt. Tuy nhiên, các nghiên cứu gần đây trên thế giới [2, 3, 4, 5] chỉ rõ rằng, thông số độ sụt thực tế không phản ánh hết được tính dễ bơm hay khó bơm của bê tông cũng như không đủ để dự báo áp lực bơm. Thực vậy, mô hình dòng chảy của bê tông trong ống bơm được Kaplan [2] đề xuất và được khẳng định bởi Kwon [6] chỉ rõ rằng, có từ hai đến ba pha khi bê tông chảy trong ống bơm (Hình 1) gồm (i) bê tông chuyển động tịnh tiến ở phần lõi, (ii) lớp trượt ở biên và (iii) lớp cắt là lớp chuyển tiếp giữa lớp trượt và lớp tịnh tiến. Trong trường hợp vận tốc dịch chuyển của bê tông còn nhỏ thì dòng chảy trong ống chỉ có lớp 1 và lớp 3. Khi vận tốc lớn thì có cả 3 lớp. Tùy vào số lớp mà áp lực cần thiết để đẩy bê tông đi là khác nhau. Trong các công thức tính toán áp lực bơm được Kaplan đề xuất và đã được chứng minh bằng thực nghiệm [3, 7] thì áp lực bơm, phụ thuộc vào lưu lượng bơm, sẽ có 3 thành phần tương ứng với 3 pha chuyển động. Trong đó thành phần liên quan đến lớp trượt ở biên phụ thuộc được đặc trưng bằng thông số ma sát tiếp xúc giữa bê tông và thành ống. Thông số ma sát gồm hai thành phần, là ngưỡng trượt tiếp xúc ban đầu  $\tau_0$  và hằng số nhớt tiếp xúc  $\eta$ . Lớp cắt liên quan đến tính chất lưu biến của bê tông, bao gồm ngưỡng cắt ban đầu  $\tau_s$  và thông số nhớt dẻo  $\mu$  mà trong thực tế hay được đặc trưng bằng độ sụt. Như vậy nếu chỉ quan tâm đến duy nhất thông số độ sụt thì sẽ không tính toán và dự báo một cách chính xác được áp lực bơm cũng như đánh giá một cách xác đáng tính dễ hay khó bơm của bê tông tươi. Các thông số ma sát và lưu biến được gọi chung là thông số bơm của bê tông.

Quan tâm đến tính bơm của hỗn hợp bê tông, trong thời gian gần đây, một số tác giả trong [8, 9, 10] và ngoài nước [5, 11, 12, 14] đã quan tâm nghiên cứu tính chất ma sát của hỗn hợp bê tông khi chảy trong ống bơm cứng bằng thép. Các nghiên cứu này chủ yếu thực hiện bằng phương pháp thực nghiệm và chế tạo, chuẩn hoá

thiết bị thực nghiệm [6, 11, 13] và thực nghiệm đo đạc trên hỗn hợp bê tông được làm từ các thành phần khác nhau [5, 8, 9, 10]. Các nghiên cứu thực nghiệm trên chỉ ra rằng, khi thay đổi tỉ lệ cốt liệu thô [8], thay đổi hàm lượng phụ gia [10] với một số cấp phối khác nhau về thành phần thì có thể có cùng một độ sụt nhưng thông số ma sát lại chênh lệch nhau đáng kể. Để bổ sung cho cơ sở dữ liệu thực nghiệm cũng như làm cơ sở cho việc đánh giá xu hướng thay đổi tính dễ bơm của bê tông, trong nghiên cứu này, các tác giả khảo sát ảnh hưởng của mô đun độ lớn của cốt liệu nhỏ đến tính bơm của bê tông có xét thời gian lưu vữa. Thời gian cũng là một yếu tố quan trọng vì hỗn hợp bê tông thương phẩm thông thường sẽ được trộn ở trạm trộn, sau đó dùng xe vận chuyển đến công trường. Việc vận chuyển này nhiều lúc sẽ mất rất nhiều thời gian, đặc biệt là công trình thi công trong khu vực đô thị hoặc tại những khu vực có giao thông khó khăn.

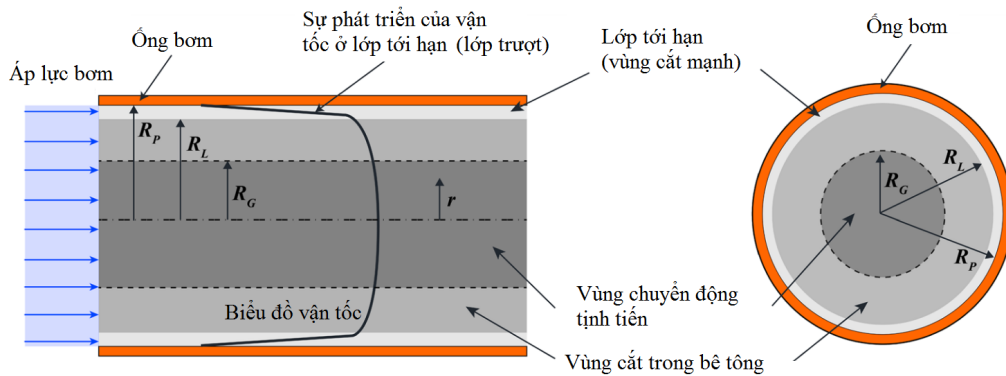
## 2. Thí nghiệm xác định và tính toán thông số bơm

### 2.1. Nguyên lý thí nghiệm

Kaplan (2005) [3] đã phát triển một mô hình dự báo ma sát bằng thực nghiệm thực hiện tại phòng thí nghiệm trung tâm cầu đường (Pháp), trong đó thực hiện phép đo lưu biến bằng máy đo Tribometer, đo ma sát bằng máy đo ma sát quay đồng trục, đồng thời thực hiện phép đo trên hệ đường ống bằng thép, bố trí cố định. Các kết quả đã chứng minh rằng ma sát tiếp xúc bề mặt phụ thuộc tuyến tính vào vận tốc bơm (công thức 1).

$$\tau = \tau_0 + \eta v \quad (1)$$

trong đó:  $\tau$  (Pa) là ứng suất trượt tại mặt tiếp xúc,  $\tau_0$  là giới hạn trượt hay ngưỡng trượt ở mặt tiếp xúc,  $\eta$  (Pa.s/m) là hằng số nhớt,  $v$  (m/s) là vận tốc trượt tương đối. Công thức (1) cho thấy ma sát tiếp xúc là một thông số động, phụ thuộc ngưỡng trượt ban đầu  $\tau_0$  và hằng số nhớt  $\eta$ . Đây là các thông số quan trọng và cần được xác định đối với mỗi loại bê tông, được gọi là các thông số ma sát tiếp xúc hay các *thông số bơm*. Xác định thực nghiệm để kiểm tra tính dễ bơm hay khó bơm chính là việc xác định các thông số ma sát  $\tau_0$  và  $\eta$  của công thức (1).

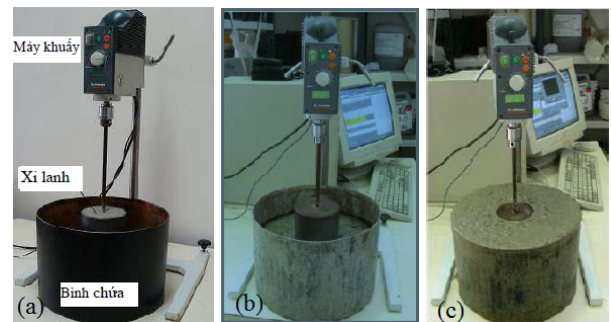


Hình 1. Mô hình dòng bê tông chảy trong ống bơm [6].

## 2.2. Thí nghiệm đo thông số ma sát

Sự tiếp xúc giữa bê tông và thành ống bơm được mô phỏng lại theo sự tiếp xúc của một ống kim loại quay đều trong môi trường bê tông. Sự quay của trục được tạo ra và điều khiển bằng máy khuấy cơ học (Hình 2a). Máy khuấy có thể ghi lại được tốc độ quay và mô men xoắn tương ứng. Tốc độ quay thay đổi theo thời gian được điều khiển bằng phần mềm. Bê tông đựng trong thùng chứa có đường kính 30 cm, xi lanh hình trụ bằng thép có đường kính 106 mm, cao 100 mm (Hình 2a). Các thông số của thiết bị được tham khảo dựa trên cơ sở các nghiên cứu trong tài liệu [11]. Khi thí nghiệm, ta thu được thông tin mô men xoắn  $T$  (N·mm) tương ứng với các tốc độ quay của xi lanh  $V$  (vòng/s). Lần lượt tiến hành thí nghiệm xác định mô men xoắn ở mặt đáy xi lanh  $T_1$  (N·mm) và mô men xoắn  $T_2$  (N·mm) của mặt đáy và mặt xung quanh tương ứng với các tốc độ quay của xi lanh  $V$  (chu kì/s) (Hình 2b,c). Mô men thành  $T$  được tính bằng cách lấy trung bình các trị số mô men  $T_2$  trừ cho trung bình các trị số mô men  $T_1$  tại mỗi tốc độ quay. Từ đó tính được ma sát bề mặt trung bình ở tất cả các khu vực xung quanh của hình trụ, nơi tốc độ quay không đổi với từng giai đoạn tốc độ áp đặt. Kết quả thí nghiệm thô được xử lý nhanh chóng bằng phần mềm «Pumping parameter calculation» [15].

Các mẫu cấp phối bê tông được kiểm tra độ sụt và thí nghiệm đo thông số ma sát tại các thời điểm 0 phút; 30 phút; 60 phút và 90 phút sau khi hoàn thành công tác trộn hỗn hợp bê tông.



Hình 2. Dụng cụ đo ma sát giữa bê tông và thành ống.

## 2.3. Cấp phối bê tông thí nghiệm

Đối tượng nghiên cứu là cấp phối bê tông bơm thương phẩm có cấp độ bền từ B30 đến B35. Vật liệu chế tạo hỗn hợp bê tông thí nghiệm gồm:

- Xi măng Kim Đinh PCB40.
- Cát vàng đảm bảo các yêu cầu theo TCVN 7570-2006, có  $M_{dl} = 2.1-2.9$ .
- Đá dăm  $0.5 \times 1$ ; đá dăm  $1 \times 2$ , đảm bảo các yêu cầu theo TCVN 7570-2006.
- Phụ gia Sika Plast 257.
- Nước sạch.

Mục tiêu của bài báo là khảo sát sự thay đổi của các thông số ma sát khi thay mô đun độ lớn của cốt liệu nhỏ (cát) có xét đến yếu tố thời gian. Do vậy các cấp phối bê tông được chế tạo với cùng một loại cát có mô đun độ lớn thay đổi trong khoảng từ 2.1 đến 2.9. Thời gian thí nghiệm đo các thông số ma sát tại các mốc thời điểm 0 phút, 30 phút, 60 phút sau khi trộn hỗn hợp bê tông. Các cấp phối được chế tạo đáp ứng các yêu cầu theo [16]. Có 4 loại cấp phối, ký hiệu lần lượt là

CP1, CP2, CP3, CP4 lần lượt có mô đun độ lớn của cát là 2.1; 2.4; 2.7; 2.9. Các thành phần khác giống nhau tính cho 1 m<sup>3</sup> hỗn hợp bê tông như sau: 460 kg xi măng (X), 184 lít nước (N) (tỉ lệ N/X = 0,4), 792 kg cát (C), 968 kg đá (Đ).

### 3. Kết quả nghiên cứu

#### 3.1. Tổng quan về kết quả thí nghiệm

Bảng 1 tổng hợp kết quả thí nghiệm theo 3 thông số độ sụt (SN), ngưỡng trượt bề mặt ( $\tau_0$ ) và hằng số nhớt tiếp xúc ( $\eta$ ) ở 3 thời điểm thí nghiệm lần lượt là 0 phút, 30 phút và 60 phút sau khi trộn hỗn hợp bê tông.

Bảng 1. Tổng hợp kết quả thí nghiệm với các cấp phối hỗn hợp bê tông thí nghiệm.

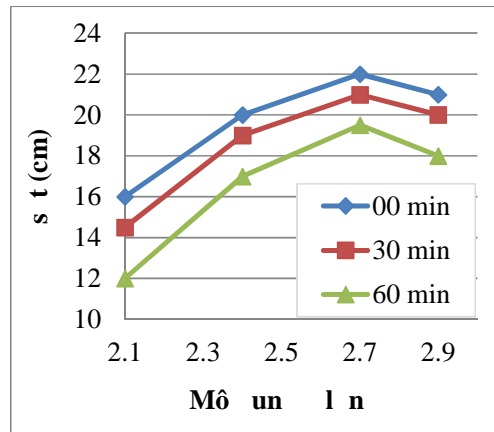
Cấp phối	Thông số bơm	Thời gian lưu vữa bê tông		
		0 phút	30 phút	60 phút
CP1	SN (cm)	16	14.5	12
	$\tau_0$ (Pa)	33.7	46.6	40.6
	$\eta$ (Pa.s/m)	518	664	768
CP2	SN (cm)	20	19	17
	$\tau_0$ (Pa)	19.7	28.2	22
	$\eta$ (Pa.s/m)	435	460	508
CP3	SN (cm)	22	21	19.5
	$\tau_0$ (Pa)	15.7	25.9	19.4
	$\eta$ (Pa.s/m)	203	240	304
CP4	SN (cm)	21	20	18
	$\tau_0$ (Pa)	17.2	26.4	20.9
	$\eta$ (Pa.s/m)	398	429	462

Kết quả thí nghiệm cho thấy quy luật biến đổi của thông số SN,  $\tau_0$  và  $\eta$  theo thời gian lưu vữa bê tông như sau:

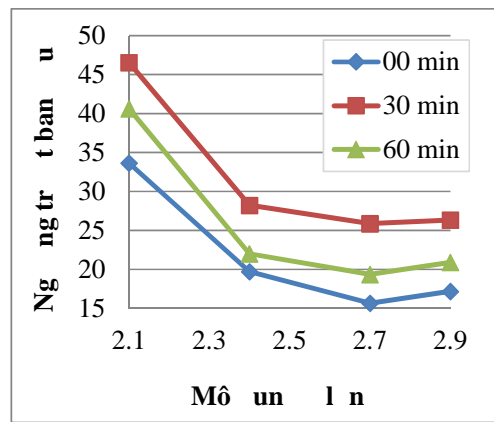
- Độ sụt của hỗn hợp bê tông giảm đi theo thời gian lưu vữa bê tông.
- Thông số  $\tau_0$  tăng dần trong khoảng thời gian lưu vữa bê tông từ 0 đến 30 phút, nhưng có xu hướng giảm xuống ở thời điểm 60 phút.
- Thông số  $\eta$  tăng dần trong khoảng thời gian lưu vữa bê tông từ 0 đến 60 phút.

#### 3.2. Ảnh hưởng của mô đun độ lớn của cát

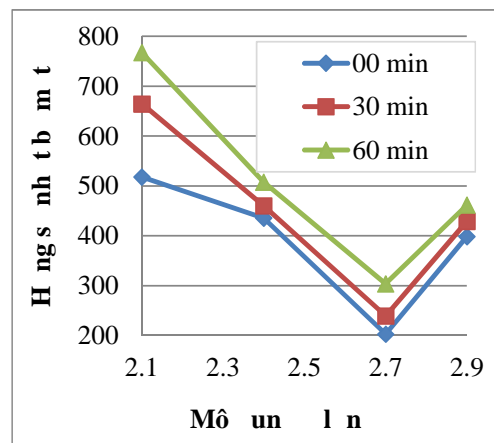
Mô đun độ lớn và thành phần hạt cốt liệu cát thay đổi sẽ dẫn đến sự thay đổi về cấu trúc của hỗn hợp cốt liệu của bê tông.



Hình 3. Quan hệ giữa mô đun độ lớn của cát và độ sụt theo thời gian.



Hình 4. Quan hệ giữa mô đun độ lớn của cát và ngưỡng trượt theo thời gian.



Hình 5. Quan hệ giữa mô đun độ lớn của cát và hằng số nhớt bề mặt theo thời gian.

Các mẫu hỗn hợp bê tông thí nghiệm sử dụng các loại cốt liệu cát có mô đun độ lớn thay đổi

lần lượt là 2.1; 2.4; 2.7; 2.9. Phân tích kết quả các mẫu hỗn hợp bê tông thí nghiệm sẽ cho phép đánh giá được sự ảnh hưởng của kích cỡ hạt của cốt liệu cát đến tính công tác và tính dễ bơm của hỗn hợp bê tông.

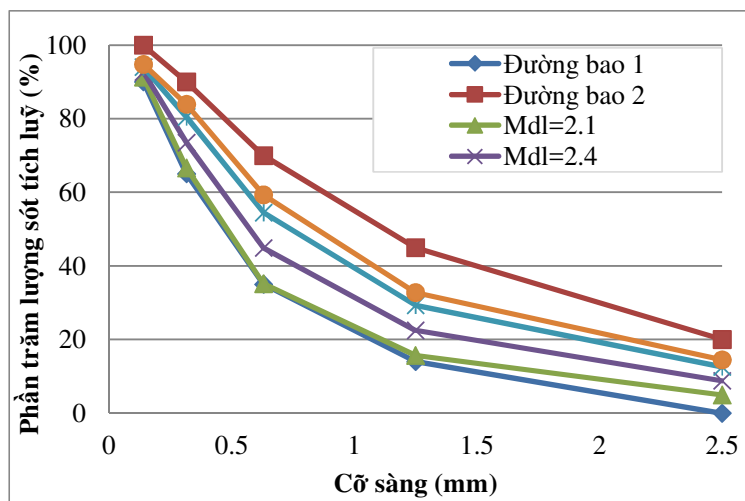
Theo hình 3, khi thay đổi loại cát có  $M_{dl}$  từ 2.1 đến 2.7 thì độ sụt của hỗn hợp bê tông có xu hướng tăng dần. Tuy nhiên khi  $M_{dl}$  của cát tăng thêm đến 2.9 thì độ sụt của hỗn hợp bê tông lại có xu hướng giảm xuống. Quan sát ở các hình 4 và hình 5 thấy rằng, các thông số ma sát  $\tau_0$  và  $\eta$  của hỗn hợp bê tông có xu hướng giảm dần khi sử dụng các loại cát có  $M_{dl}$  tăng dần, tuy nhiên giá trị  $\tau_0$  và  $\eta$  đạt cực tiểu tương ứng với loại cát có  $M_{dl} = 2.7$ . Như vậy có thể thấy khi sử dụng cát có  $M_{dl}$  nhỏ cho cấp phối bê tông sẽ làm cho hỗn hợp bê tông có độ sụt thấp và làm gia tăng thêm sự ma sát giữa bê tông và thành ống bơm, hỗn hợp bê tông kém linh động và khó bơm hơn. Xét biểu đồ thành phần hạt (Hình 6) của các loại cát thí nghiệm ta thấy loại cát có  $M_{dl} = 2.7$  có đường thành phần hạt ở khoảng giữa của đường bao vật liệu cho phép. Đường thành phần hạt của loại cát có  $M_{dl} = 2.1$  nằm sát đường bao giới hạn dưới của phạm vi cho phép thành phần hạt. Khi tăng  $M_{dl}$  của cát thì đường thành phần hạt dịch chuyển dần lên phía đường bao giới hạn trên của phạm vi cho phép thành phần hạt. Theo kết quả ở các hình 3, hình 4 và hình 5 khi đường thành phần hạt của cát dịch chuyển dần từ biên giới hạn dưới vào phạm vi đường bao thành phần hạt thì hỗn hợp có chỉ số độ sụt tăng dần và các thông số ma sát giảm dần. Chỉ số độ sụt lớn nhất và các thông số ma sát đạt giá trị nhỏ nhất tương ứng với hỗn hợp bê tông sử dụng loại cát có đường thành phần hạt nằm ở khoảng giữa của đường bao phạm vi cho phép về thành phần hạt. Khi đường thành phần hạt dịch chuyển về phía biên trên thì chỉ số độ sụt giảm đi và các thông số ma sát của hỗn hợp bê tông lại có xu hướng tăng lên. Hiện tượng này có thể được giải thích như sau: trong hỗn hợp bê tông sử dụng loại cát có  $M_{dl}$  nhỏ, tỉ diện tiếp xúc bề mặt giữa các hạt tăng lên đáng kể sẽ làm giảm màng vữa xi măng bao bọc các hạt cốt liệu, khi này các hạt cốt liệu khó trượt lên nhau hơn, làm cho hỗn hợp bê tông giảm tính lưu động và tăng sự ma sát của hỗn hợp với thành ống bơm. Đối với hỗn hợp

bê tông sử dụng loại cát có  $M_{dl}$  lớn, lúc này hỗn hợp cốt liệu thiếu đi một hàm lượng các hạt nhỏ chiếm chỗ giữa các hạt lớn, dẫn đến sự mất mát một lượng vữa xi măng để lấp đầy các lỗ rỗng này, màng vữa xi măng bao bọc các hạt cốt liệu mỏng đi cũng sẽ làm giảm tính lưu động và tăng sự ma sát của hỗn hợp với thành ống bơm của hỗn hợp bê tông. Qua kết quả các thí nghiệm có thể thấy, sẽ có một giới hạn về độ lớn của cốt liệu cát để hỗn hợp bê tông đạt yêu cầu tối ưu nhất về tính lưu động cũng như tính dễ bơm. Trong phạm vi của nghiên cứu, giới hạn này nằm trong khoảng từ 2.4 đến 2.9, lúc này đường thành phần hạt của cốt liệu cát nằm trong khoảng giữa của đường bao thành phần hạt cho phép.

#### 4. Kết luận và kiến nghị

Cốt liệu là thành phần vật liệu chủ yếu trong cấp phối hỗn hợp bê tông, hình thành cấu trúc của hỗn hợp bê tông. Do vậy ảnh hưởng của cốt liệu đến các tính chất lưu động và khả năng bơm của hỗn hợp bê tông là rất đáng kể. Trong phạm vi của đề tài, bước đầu đã đi đánh giá tác động của kích cỡ hạt cốt liệu cát (thông qua chỉ số  $M_{dl}$ ) đến các đặc tính thi công bơm của hỗn hợp bê tông. Qua các phân tích ở trên, có thể rút ra một số kết luận như sau:

1. Hỗn hợp bê tông có tính linh động và khả năng dễ bơm giảm đi khi sử dụng cốt liệu cát có mô đun độ lớn nhỏ.
2. Độ lưu động và các thông số ma sát với thành ống bơm của hỗn hợp bê tông đạt tối ưu khi sử dụng loại cát có đường thành phần hạt nằm ở khoảng giữa của đường bao phạm vi cho phép về thành phần hạt của cốt liệu cát theo TCVN 7570-2006.
3. Sử dụng cốt liệu cát có  $M_{dl}$  quá nhỏ hoặc quá lớn đều không mang lại hiệu quả về tính linh động và sự suy giảm ma sát của bê tông với thành ống bơm. Tùy theo độ lớn của cốt liệu cát cần phải nghiên cứu một tỉ lệ tối ưu hàm lượng giữa cốt liệu nhỏ (cát) và cốt liệu lớn (đá dăm), để mang lại hiệu quả cao nhất về tính công tác cho hỗn hợp bê tông bơm.
4. Qua kết quả nghiên cứu của bài báo và các nghiên cứu của các tác giả khác gần đây đã



Hình 6. Biểu đồ đường thành phần hạt các loại cát thí nghiệm.

cho thấy tác động lớn của các thông số ma sát giữa hỗn hợp bê tông bơm và thành ống bơm đến khả năng bơm dễ/khó của bê tông. Do đó, việc đưa các chỉ tiêu phản ánh tính chất ma sát giữa hỗn hợp bê tông bơm và thành ống bơm vào công tác thiết kế cấp phối hỗn hợp bê tông bơm là rất cần thiết.

*Lời cảm ơn*

Bài báo này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài NCKH cấp Bộ, theo quyết định số 238/QĐ-BGDĐT ngày 21/01/2016 của Bộ Giáo dục và Đào tạo.

**Tài liệu tham khảo**

[1] TCVN-200:1997, “Nhà cao tầng - Kỹ thuật về bê tông bơm,” 1997.  
 [2] Kaplan Denis. *Pompage des Béton*, ISBN = 2-7208-2010-5, Etudes et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, 2000.  
 [3] Kaplan D., de Larrard F., Sedran T. Design of concrete pumping circuit, *ACI Materials Journal*. 102 (2005) 110–117.  
 [4] S. H. Kwon, P. J. Kyong, J. H. Kim, and P. S. Surendra. State of the Art on Prediction of Concrete Pumping, *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, 2016.  
 [5] C. T. Mai, E. H. Kadri, T. T. Ngo, A. Kaci, and M. Riche. “Estimation of the pumping pressure from concrete composition based on the identified tribological parameters,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2014.  
 [6] S.H. Kwon, C.K. Park, J.H. Jeong, S.D. Jo, H.L. Seung. Prediction of Concrete Pumping: Part I - Development of New Tribometer for Analysis of Lu-

bricating Layer, *ACI Materials Journal*. 110 (2013) 647–656.  
 [7] Kaplan Denis, Francois de Larrard, and Thierry Sedran. “Avoidance of Blockages in Concrete Pumping Process,” *ACI Mater. J.*, vol. 102, no. 3, pp. 183–191, 2005.  
 [8] Nguyễn Thế Dương, Vũ Văn Nhân. “Ảnh hưởng của tỉ lệ cốt liệu đến tính chất ma sát giữa bê tông và thành ống bơm theo thời gian,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Xây dựng (ISSN 1859-1566)*, vol. 171, pp. 48–56, 2015.  
 [9] Nguyễn Thế Dương, Đỗ Vũ Thảo Quyên, Phan Đình Thoại, Huỳnh Quốc Minh Đức. Ảnh hưởng của hồ xi măng và tỉ lệ n/x đến tính chất ma sát giữa bê tông và thành ống bơm bằng thép, *Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng (ISSN 0866-0762)*, pp. 72–76, 2014.  
 [10] Nguyễn Thế Dương, Phạm Quang Nhật, Vũ Văn Nhân, Võ Trung Cường. Ảnh hưởng của thời gian và hàm lượng phụ gia đến các thông số bơm của một số bê tông thương phẩm., *Tạp chí Xây dựng - Bộ Xây dựng (ISSN 0866-0762)*. 171 (2016) 106–109.  
 [11] T. T. Ngo, “Influence de la composition des bétons sur les paramètres de pompage et validation d’un modèle de prévision de la contrainte visqueuse,” *Université de Cergy - Pontoise, France*, 2009.  
 [12] H. D. Le, E. H. Kadri, S. Aggoun, J. Vierendeels, P. Troch, and G. De Schutter, “Effect of lubrication layer on velocity profile of concrete in a pumping pipe,” *Mater. Struct.*, vol. 48, no. 12, pp. 3991-4003, 2015.  
 [13] D. Feys, K. H. Khayat, A. Perez-Schell, and R. Khatib, “Prediction of pumping pressure by means of new tribometer for highly-workable concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 57, pp. 102-115, 2015.  
 [14] Ngô-Tien, T. Kadri, E.H. Bennacer, R. Cussigh, F. Ngo, T.T. Kadri, E.H. Bennacer, and R. Cussigh, F. Use of tribometer to estimate interface friction and

concrete boundary layer composition during the fluid concrete pumping. *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 1253-1261, 2010.

[15] N. Thế Dương, Phần mềm «Pumping Parameters Calculation» tính toán thông số ma sát bê tông tươi -

thành ống thép, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Duy Tân. 15 (2015) 69–75.

[16] TCVN-9340:2012, “Hỗn hợp bê tông trộn sẵn - Yêu cầu cơ bản đánh giá chất lượng và nghiệm thu - Tiêu chuẩn Việt Nam,” 2012.