

THỰC NGHIỆM DÙNG LƯU BIẾN KẾ THEO DỠI SỰ BIẾN THIÊN CÁC THÔNG SỐ ĐỘ NHỚT, NGƯỠNG CHẢY CỦA VỮA BÊ-TÔNG TÍNH NĂNG CAO
MEASUREMENT OF VISCOSITY AND YEILD STRESS OF FRESH HIGH PERFORMANCE CONCRETE

LÊ THỊ NHƯ Ý^a, LÊ MINH SƠN^a, NGUYỄN NGỌC TRÍ HUỲNH^a, NGUYỄN KHÁNH SƠN^{a,*}

^aBộ môn Silicát, Khoa Công nghệ Vật liệu – Trường ĐH Bách Khoa, ĐHQG Tp. Hồ Chí Minh

*Tác giả liên hệ: e-mail: ksnguyen@hcmut.edu.vn

Ngày nhận bài: 2/12/2022, Sửa xong: 27/12/2022, Chấp nhận đăng: 30/12/2022

Tóm tắt: Trong bài báo này, tác giả sẽ trình bày nghiên cứu thực nghiệm các đặc tính lưu biến học của vữa bê-tông tính năng cao (HPC). Các đặc tính lưu biến học như độ nhớt, ngưỡng chảy vật liệu bê-tông thường gắn liền với trạng thái thi công của vật liệu sau khi kết thúc quá trình nhào trộn đồng nhất. Nghiên cứu sử dụng thiết bị lưu biến kế đồng trục dạng cánh quay nhằm thực hiện quá trình cốt vữa bê-tông. Kết quả thu được cho thấy mẫu vữa thí nghiệm đạt cường độ R28 khoảng 120 MPa, đồng thời theo thời gian lưu giá trị độ nhớt và ngưỡng chảy tăng dần. Sau mốc thời gian 50 phút (tương đương 70 phút kể từ khi kết thúc nhào trộn) vữa mất tính ổn định với giá trị ngưỡng chảy và độ nhớt tăng nhanh, điều này chứng tỏ tính công tác không còn đảm bảo.

Từ khóa: lưu chất Bingham, lưu biến kế, độ nhớt, ngưỡng chảy, tính công tác

Abstracts: In this paper, authors present the experimental studies of rheological properties of high performance concrete. In general, rheological properties including viscosity and yeild stress report the workability of concrete material after mixing step. Authors used a coaxial with vane type rheometer in laboratory to measure the rotational moment of the prepared HPC material. Obtained results showed the compressive strength of such HPC around 120 MPa after 28 days of curing period. Measured viscosity and yeild stress increases over time in the period of 0-100 minutes. 70 minutes after mixing, the studied mixture of HPC lost the workability considering the large variation of both viscosity and yeild stress values.

Keywords: Bingham fluid, rheometer, viscosity, yeild stress, rheology of HPC

1. Giới thiệu

Trên thế giới cũng như ở nước ta, bê-tông tính năng cao (HPC) đã và đang được nghiên cứu, ứng

dụng thực tế trong các cấu kiện xây dựng dân dụng, giao thông. Với khả năng chịu tải lớn, truyền tải hiệu quả, bê-tông tính năng cao góp phần giảm tổng trọng lượng kết cấu chịu lực, mang lại hiệu quả kinh tế cao trong xây dựng công trình [1]. Nếu đem vật liệu bê-tông tính năng cao so với vật liệu bê-tông thông thường, có thể thấy một vài điểm khác biệt lớn điển hình như sau [2]: (i) cốt liệu lớn được loại bỏ, trong thành phần của bê-tông tính năng cao chỉ có cát là cốt liệu duy nhất và kích thước lớn nhất của cát thường nhỏ hơn 1mm; (ii) tỉ lệ nước/xi-măng rất thấp (thường nhỏ hơn 0,25 tính theo khối lượng); (iii) cốt sợi thép thường được dùng để cải thiện độ co ngót, cường độ uốn, cũng như độ bền dẻo dai của bê-tông tính năng cao; (iv) yêu cầu về năng lượng nhào trộn cao hơn, thiết bị chuyên dùng do trong thành phần có sử dụng lượng lớn chất kết dính xi-măng và phụ gia khoáng mịn và tỉ lệ nước thấp.

Tìm hiểu các nghiên cứu vật liệu bê-tông tính năng cao, các nhà nghiên cứu thường quan tâm đến thành phần cấp phối nguyên liệu, các đặc tính vữa bê-tông, công nghệ sản xuất, bảo dưỡng và các đặc trưng cơ học, độ bền vững vật liệu. Thông thường đối với các đặc tính vữa bê-tông tính năng cao sau khi nhào trộn thường được kiểm soát chất lượng bằng thí nghiệm đo độ sụt dùng côn hoặc độ chảy xòe [2]. Tuy vậy, nếu xét một cách khoa học, các thông số lưu biến học như độ nhớt, ngưỡng chảy (ứng suất kháng cắt) cho phép theo dõi biến thiên một cách định lượng trạng thái sau khi kết thúc quá trình nhào trộn nguyên liệu, đồng thời qua đó ảnh hưởng đến công đoạn đúc cấu kiện, quá trình công nghệ sản xuất tiếp theo. Việc điều chỉnh, kiểm soát tốt các đặc trưng tính chất lưu biến có thể giúp đảm bảo nâng cao chất lượng bê-tông điều chỉnh hỗn hợp thiết kế, cũng như vận dụng biện pháp thi công phù hợp. Trong nghiên cứu tổng quan năm 2019 tác giả Khayat và cộng sự [3], đã trình bày đánh giá về các đặc tính lưu biến của bê-tông tính năng cao. Công bố

đã thống kê các mô hình có thể được sử dụng để mô tả hành vi lưu biến của bê-tông tính năng cao, các phương pháp đo lường có thể dùng để đánh giá các thông số đặc trưng lưu biến và tính công tác của bê-tông tính năng cao, cũng như ảnh hưởng của các vật liệu khác nhau đối với các đặc tính lưu biến của bê-tông tính năng cao. Ngoài ra còn cần kể đến ảnh hưởng của các thông số trộn và nhiệt độ lên các đặc tính lưu biến. Các tác giả cũng nhấn mạnh để nghiên cứu tính chất lưu biến của bê-tông tính năng cao, bước đầu tiên cần phải kể đến sự thay đổi theo mật độ và tốc độ cắt áp cũng như thời gian do quá trình keo tụ và tạo mầm hydrat hóa dạng keo trong vữa theo thời gian. Đối với thiết bị lưu biến kế sử dụng để đo các đặc tính lưu biến UHPC, thiết bị lưu biến kế kiểu hình trụ đồng tâm (Anton Paar MCR) có thể được sử dụng cho hỗn hợp vữa sệt và thiết bị lưu biến kế đồng trục (ConTec hoặc BML) có thể được sử dụng cho huyền phù vữa và bê-tông tính năng cao dùng cốt sợi. Cho đến năm 2022, chúng tôi chưa tìm thấy các công bố nghiên cứu bởi các nhà khoa học trong nước liên quan đến chủ đề này, chủ yếu do yếu tố thiết bị.

Trong phần tiếp theo, trên cơ sở một thiết bị lưu biến kế loại cánh quay từ máy khuấy đũa được phát triển trong công bố năm 2021 [4], chúng tôi sẽ trình bày thí nghiệm đo thông số độ nhớt và ngưỡng chảy của vữa bê-tông tính năng cao. Trên cơ sở kết quả thí nghiệm, chúng tôi sẽ bàn luận về khả năng ứng dụng nghiên cứu lưu biến học vữa bê-tông tính năng cao, đồng thời triển vọng ứng dụng trong điều chỉnh cấp phối, biện pháp phối trộn, thi công bê-tông tính năng cao.

2. Nguyên liệu và cấp phối

2.1. Các nguyên liệu

Các nguyên liệu chất kết dính sử dụng gồm: xi-măng PCB50 (Vicem Hà Tiên 1), tro bay (Nhiệt điện Vĩnh Tân), Silica Fume (nguồn nhập khẩu, Công ty TNHH Vi Khanh) và bột xỉ lò cao (Hòa Phát-Dung Quất). Bảng 1,2,3,4 lần lượt trình bày kết quả phân tích, thí nghiệm các chỉ tiêu nguyên liệu xi-măng PCB50, tro bay, Silica Fume và bột xỉ lò cao. Kết quả cho thấy các nguyên liệu lựa chọn hoàn toàn đáp ứng yêu cầu sử dụng trong thí nghiệm.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm chỉ tiêu tính chất cơ lý xi-măng PCB50 Vicem Hà Tiên 1

Chỉ tiêu	Phương pháp	Yêu cầu	Kết quả PCB50
1. Cường độ chịu nén (MPa) - 3 ngày ± 45 phút - 28 ngày ± 8 giờ	TCVN 6016:2011	≥ 22 ≥ 50	32 53,5
2. Thời gian đông kết (phút) - Bắt đầu - Kết thúc	TCVN 6017:2015	≥ 45 ≤ 420	160 235
3. Độ mịn xác định theo - % còn lại trên sàng 0,09 mm - Bề mặt riêng Blaine, cm ² /g	TCVN 4030:2003	≤ 10 ≥ 2800	0.2 3950
4. Độ ổn định thể tích (mm)	TCVN 6017:2015	≤ 10	0,5

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm chỉ tiêu nguyên liệu tro bay Nhiệt điện Vĩnh Tân

Chỉ tiêu	Phương pháp	Yêu cầu	Kết quả Tro bay
% còn lại trên sàng 0,045 mm	TCVN 8827:2011	< 34%	30,2%
Khối lượng riêng	TCVN 7572-4:2006		2.29 g/cm ³
Khối lượng thể tích	TCVN 7239:2003 TCVN 141:2008		684 kg/m ³
Chỉ số hoạt tính cường độ	TCVN 6882:2016	> 75%	80 %
Hàm lượng SO ₃	TCVN 8262:2009	< 5%	0,4%
Hàm lượng mất khi nung (MKN)	TCVN 8262:2009	< 15%	1,5%
Hàm lượng (Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + Fe ₂ O ₃)	TCVN 8262:2009	> 70%	90,1%
Hàm lượng Na ₂ O	TCVN 141:2008		1,32%
Hàm lượng K ₂ O	TCVN 141:2008		0,66%
Hàm lượng CaO _{td}	TCVN 141:2008		0,02%
Tổng hàm lượng kiềm tương đương (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	TCVN 141:2008	< 1,5%	1,75%
Hàm lượng C	ASTM D 5372 - 16		1,31%

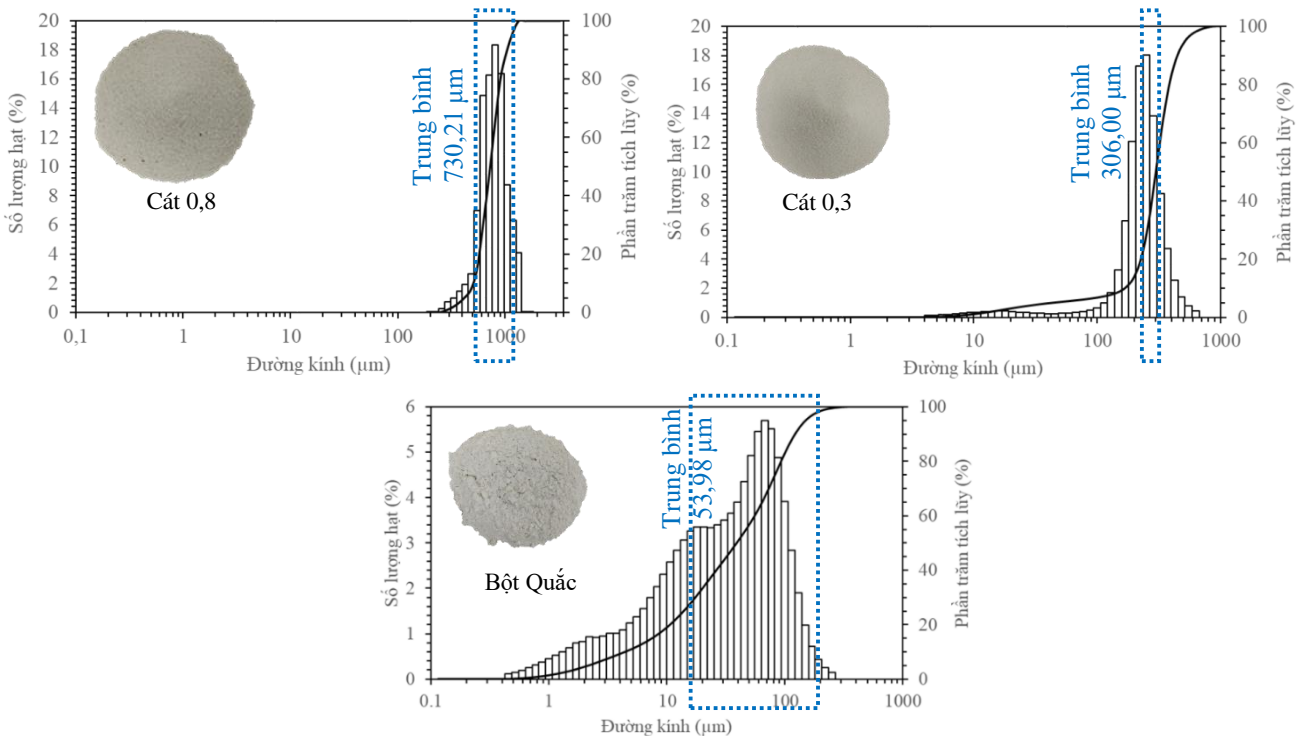
Bảng 3. Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu nguyên liệu Silica Fume

Chỉ tiêu	Yêu cầu theo TCVN 8827-2011	Kết quả Silica Fume
Hàm lượng SiO ₂	≥ 85%	89,27%
Hàm lượng mất khi nung	≤ 6%	3,07%
Lượng sót trên sàng 0,045 mm	≤ 10%	1,61%
Chỉ số hoạt tính cường độ so với mẫu đối chứng ở tuổi 7 ngày	≥ 85%	98,20%
Diện tích bề mặt riêng Blaine	≥ 12 m ² /g	14,30 m ² /g
Khối lượng riêng		2,3 g/cm ³

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu nguyên liệu xỉ lò cao Hòa Phát

Chỉ tiêu	Yêu cầu	Kết quả xỉ Hòa Phát	Phương pháp
Khối lượng riêng		3,15 g/cm ³	TCVN 7572-4:2006
Hàm lượng mất khi nung		0,56	TCVN 8262:2009
Lượng sót trên sàng 0,045 mm		3,4%	TCVN 8827:2011
Chỉ số hoạt tính cường độ so với mẫu đối chứng ở tuổi 28 ngày	≥ 75%	95%	TCVN 8262:2009
Diện tích bề mặt riêng Blaine		4270 cm ² /g	
Độ ẩm	< 1%	0%	TCVN 8262:2009
Hàm lượng (SiO ₂ +CaO+Al ₂ O ₃)		89,76%	

Nghiên cứu sử dụng cốt liệu cát nghiền Fico Cam Ranh – Khánh Hòa để thí nghiệm. Có 3 loại cỡ hạt cát được sử dụng với kết quả phân tích phân bố kích cỡ hạt bằng phương pháp Laser như sau (hình 1).



Hình 1. Kết quả phân tích phân bố cỡ hạt cát bằng phương pháp Laser

Phụ gia siêu dẻo sử dụng là SIKA ViscoCrete 8700M (gốc Polycarboxylate). Thử nghiệm đo lường nước tiêu chuẩn xi-măng dùng phụ gia cho thấy tính tương thích tốt, với liều dùng 2% khối lượng xi-măng

thì mức giảm nước là 49,1%.

2.2. Thành phần cấp phối và phối trộn

Bảng 5 trình bày thành phần cấp phối 1m³ vữa bê-tông tính năng cao qua quá trình thử nghiệm một

VẬT LIỆU XÂY DỰNG - MÔI TRƯỜNG

số cấp phối trong phòng thí nghiệm. Theo đó đáng chú ý tỉ lệ N/CKD=0,165, tỉ lệ Cốt liệu/CKD=0,566 và

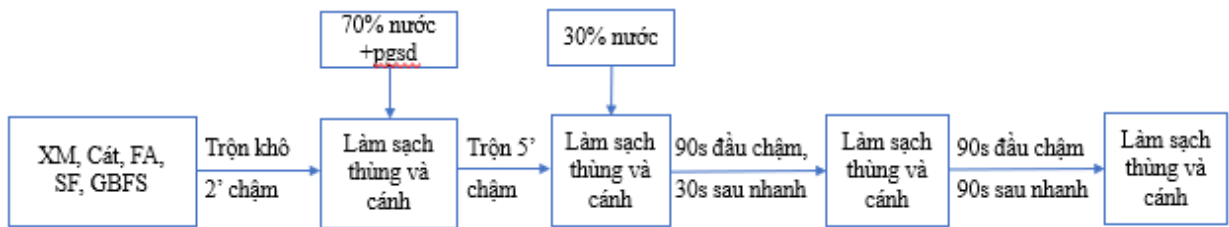
hàm lượng phụ gia siêu dẻo sử dụng tương đương 2% tổng lượng chất kết dính.

Bảng 5. Thành phần cấp phối thí nghiệm bê-tông tính năng cao

CKD				Nước (g)	Cốt liệu			PGSD /CKD	N /CKD
XM (g)	Xi (g)	Tro bay (g)	Silica Fume (g)		Cát 0.3 (g)	Cát 0.8 (g)	Bột Quắc (g)		
850	127,5	85	170	203,3	174,2	349,3	174,2	2%	0,165

Do cấp phối sử dụng lượng lớn chất kết dính, đồng thời lượng nước sử dụng rất ít, do đó quy trình trộn vừa cần tỉ mỉ từng bước đảm bảo tính phân tán, tạo độ linh động cho bê-tông.

Hình 2 trình bày tóm tắt quá trình chúng tôi phối trộn bê-tông trong vòng 10 phút, sử dụng máy trộn kiểu hành tinh (Matest E094) trong phòng thí nghiệm.

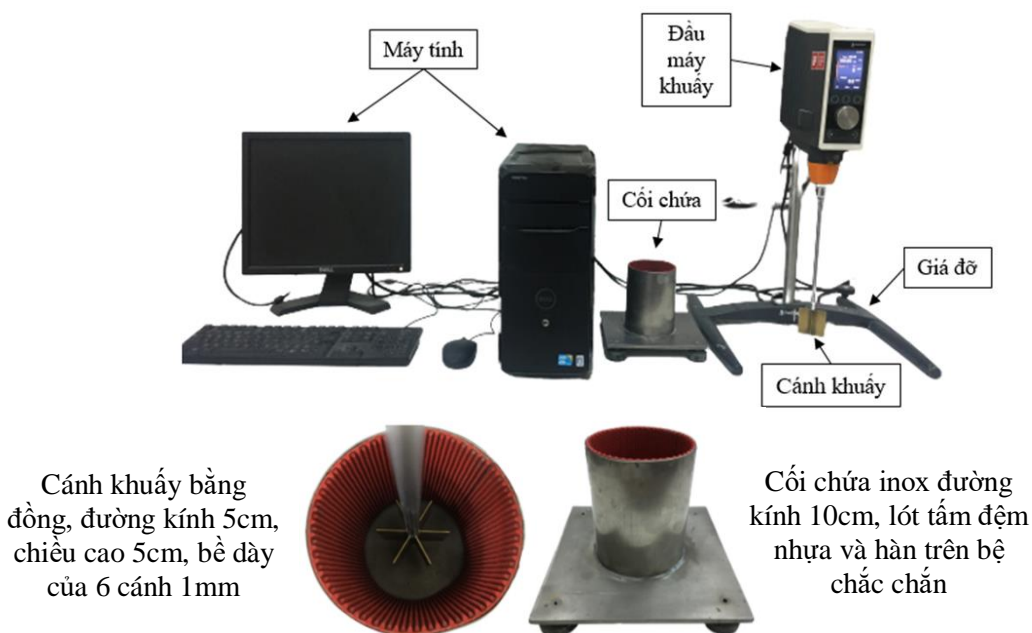


Hình 2. Quy trình phối trộn bê-tông tính năng cao dùng máy trộn kiểu hành tinh trong phòng thí nghiệm

Sau khi kết thúc nhào trộn vữa bê-tông sẽ được tháo ngay vào cối chứa thiết bị lưu biến kế, vừa tiếp tục được lưu để ổn định trong vòng 20 phút trước khi quá trình thí nghiệm đo độ nhớt và ngưỡng chảy. Ngoài ra, các mẫu bê-tông tính năng cao để đo cường độ chịu nén cũng được đúc từ vữa sau khi nhào trộn trong khuôn 40x40x160 mm.

3. Thí nghiệm đo thông số lưu biến

Như trình bày trong [4], thiết bị lưu biến kế đồng trục dạng cánh quay có cấu tạo (hình 4) gồm: máy khuấy đĩa, giá đỡ, đĩa inox, cối chứa inox, cánh khuấy bằng đồng, hệ thống máy tính và chương trình điều khiển chu trình khuấy và ghi nhận kết quả mômen xoắn.



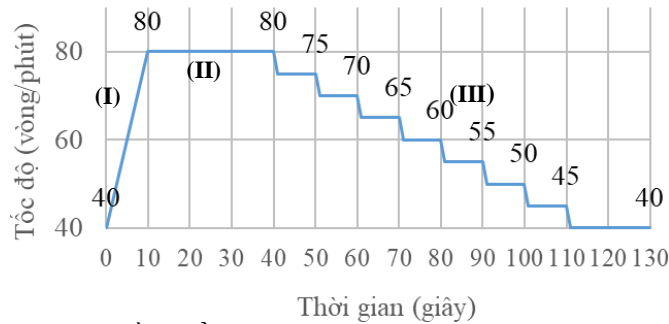
Hình 3. Cấu tạo hệ thống lưu biến kế quay đồng trục dạng cánh

Nguyên lý vận hành thiết bị gồm quá trình vận hành motor quay kéo theo cánh khuấy quay, máy sẽ

đo và hiển thị giá trị mô-men xoắn theo thời gian và vận tốc được cài đặt. Thông thường khi lưu chất vữa

xi-măng bị cắt và chuyển động gây phản lực lên cánh khuấy dưới dạng nội ứng suất và mô-men xoắn chống lại chuyển động trên. Đối với chất lưu vữa bê-tông tính năng cao, thiết lập chương trình điều khiển quay cánh theo thời gian như trên hình 4. Trong đó: (I) quá trình tăng tốc ban đầu để cắt trạng thái tĩnh ban đầu của vữa, (II) sau khi đã mất cấu trúc vữa chuyển sang trạng thái lỏng khi tốc độ quay duy trì không đổi, (III)

cuối cùng là giai đoạn giảm tốc để thực hiện quá trình tái tạo lại trạng thái vữa dẻo. Tổng thời gian mỗi lần đo là 120 giây, các kết quả được lặp lại bằng 5 lần để tính giá trị trung bình. Mỗi cối vữa bê-tông sẽ được đo ở 11 mốc thời gian 0-10-20-30-40-50-60-70-80-90-100 phút nhằm theo dõi sự biến thiên các thông số lưu biến. Nhiệt độ và độ ẩm là điều kiện thường trong phòng thí nghiệm (T=28-32°C, RH=60-80%).



Hình 4. Thiết lập profile chương trình điều khiển quay cánh: (I) từ 40 – 80 vòng/phút trong 10 giây, (II) sau đó giữ tốc độ 80 vòng/phút trong 30 giây, (III) rồi giảm từ 80 – 40 vòng/phút theo hình bậc thang trong 1 phút 30 giây, mỗi bậc cách nhau 5 vòng/phút và giữ trong 10 giây, riêng tốc độ 40 vòng/phút được giữ trong 20 giây.

Phương pháp ước lượng giá trị độ nhớt và ngưỡng chảy tương tự như trong [4], sử dụng công cụ bảng tính Excel xử lý số liệu. Trên cơ sở xem xét sự tương quan kết quả giữa liên hệ mô men xoắn vs. vận tốc quay cánh ghi nhận ở giai đoạn III và phương

trình mô hình Bingham $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$ (liên hệ giá trị ứng suất cắt τ vs. vận tốc biến dạng trượt $\dot{\gamma}$).

4. Kết quả và thảo luận

4.1 Phát triển cường độ chịu nén

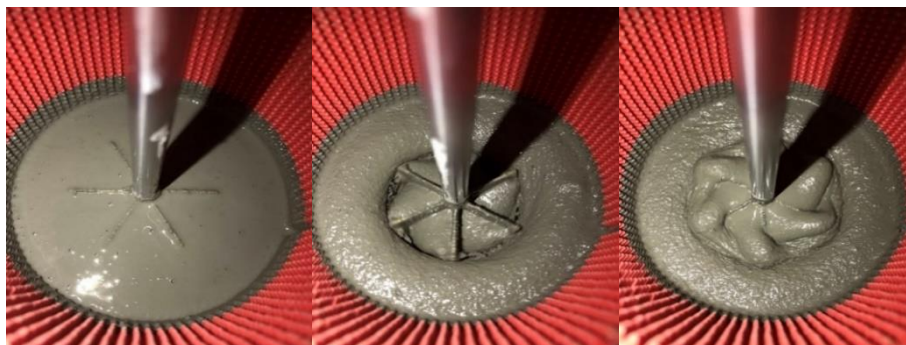
Bảng 6. Phát triển cường độ chịu nén của mẫu bê-tông tính năng cao

R3 (MPa)	TB	R7 (MPa)	TB	R28 (MPa)	TB
95,3	93,7 ± 1,4	100,9	101,9 ± 2,1	125,7	120,6 ± 3,4
91,6		105,1		120,6	
94,2		99,7		115,5	

Bảng 6 trình bày kết quả đo cường độ chịu nén R3, R7 và R28. Kết quả cho thấy mẫu bê-tông tính năng cao có quá trình phát triển cường độ liên tục theo thời gian và đạt cực đại 120 MPa sau 28 ngày tuổi. Đồng thời độ lệch kết quả thấp chứng tỏ có sự đồng nhất thành phần tốt của các mẫu bê-tông.

4.2 Độ nhớt và ngưỡng chảy

Hình 5 là ảnh chụp quá trình quay cánh để cắt khối vữa bê-tông tính năng cao trong cối chứa thiết bị lưu biến ké. Có thể nhận thấy bằng mắt thường vữa bê-tông đặc dần, mất tính công tác so với trạng thái sau khi kết thúc quá trình nhào trộn trong cối.



Hình 5. Quan sát bằng mắt thường quá trình đặc dần mẫu vữa bê-tông tính năng cao trong cối đo thiết bị lưu biến ké lần lượt ở các mốc thời gian 0, 50, 100 phút

VẬT LIỆ XÂY DỰNG - MÔI TRƯỜNG

Bảng 7, 8 lần lượt cho kết quả giá trị độ nhớt và ngưỡng chảy ứng với 11 mốc thời gian đo sau 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 phút (quy ước mốc 0 phút tương ứng lần đo đầu tiên sau khi để mẫu vừa ổn định trong vòng 20 phút sau khi kết thúc nhào

trộn). Cũng cần lưu ý ứng với mỗi mốc thời gian trước khi đo dùng máy trộn cầm tay trộn nhanh trong vòng 1 phút. Sau mốc thời điểm 100 phút, vữa bê-tông tính năng cao gần như đặc và không còn đồng nhất khi cánh cắt thiết bị lưu biến kể quay.

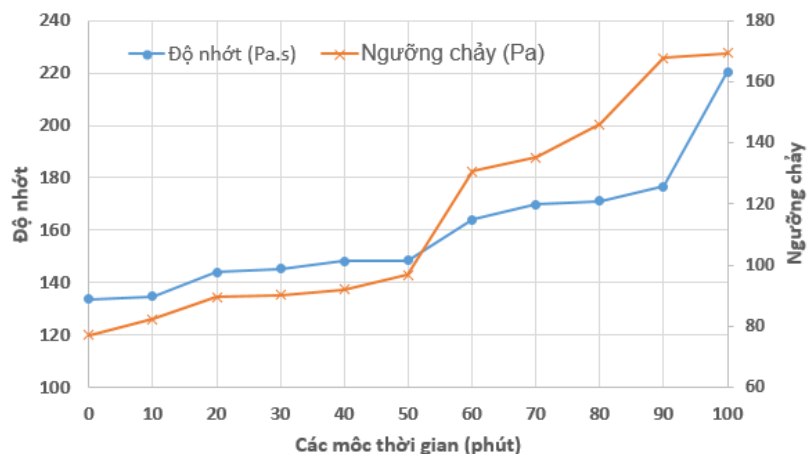
Bảng 7. Kết quả độ nhớt của vữa bê-tông tính năng cao ở các mốc thời gian

Mốc thời gian (phút)	Độ nhớt (Pa.s)					
	Lần 1	Lần 2	Lần 3	Lần 4	Lần 5	Trung bình
0	136,94	133,11	132,78	133,33	132,58	133,75 ± 1,28
10	138,10	134,25	133,86	134,44	133,66	134,86 ± 1,23
20	147,15	143,33	142,97	143,49	142,59	143,91 ± 1,30
30	148,52	144,70	144,37	144,92	144,20	145,34 ± 1,27
40	151,39	147,36	147,19	147,67	146,78	148,08 ± 1,33
50	151,60	147,81	147,22	147,79	147,23	148,33 ± 1,31
60	167,12	163,26	162,92	163,56	162,89	163,95 ± 1,27
70	173,24	169,31	168,83	169,66	168,66	169,94 ± 1,32
80	176,42	170,21	169,74	170,35	169,57	171,26 ± 2,07
90	183,15	178,08	177,59	172,79	171,93	176,71 ± 3,48
100	225,71	221,72	221,47	221,70	211,13	220,35 ± 3,69

Bảng 8. Kết quả ngưỡng chảy của vữa bê-tông tính năng cao ở các mốc thời gian

Mốc thời gian (phút)	Ngưỡng chảy (Pa)					
	Lần 1	Lần 2	Lần 3	Lần 4	Lần 5	Trung bình
0	78,52	77,31	76,61	76,67	76,64	77,15 ± 0,61
10	82,58	82,13	82,66	82,12	81,84	82,27 ± 0,28
20	90,79	89,86	89,25	89,41	88,75	89,61 ± 0,57
30	91,29	89,97	89,79	90,14	89,56	90,15 ± 0,46
40	91,92	90,14	93,84	92,68	92,04	92,12 ± 0,91
50	96,24	98,32	94,82	96,1	98,04	96,70 ± 1,18
60	133,29	131,53	131,53	129,6	128,04	130,68 ± 1,48
70	134,16	135,24	133,86	138,3	134,94	135,30 ± 1,20
80	146,14	144,92	147,09	146,31	145,84	146,06 ± 0,54
90	170,08	167,77	167,23	166,42	167,84	167,87 ± 0,89
100	170,15	168,47	170,02	169,14	168,78	169,31 ± 0,62

Kết quả giá trị độ nhớt và ngưỡng chảy ghi nhận ở các mốc thời gian đều ít chênh lệch giữa các lần đo. Điều này chứng tỏ thiết bị ghi nhận tốt, có tính tin cậy các giá trị thông số lưu biến mẫu bê-tông tính năng cao.



Hình 6. Biểu đồ biến thiên giá trị độ nhớt và ngưỡng chảy theo các mốc thời gian

Hình 6 trình bày biểu đồ biến thiên giá trị trung bình độ nhớt và ngưỡng chảy theo các mốc thời gian đo. Có thể dễ dàng nhận thấy cả giá trị độ nhớt và giá trị ngưỡng chảy đều có xu hướng biến thiên tăng dần theo trạng thái vữa bê-tông tính năng cao đặc dần. Nguyên nhân là do quá trình thủy hóa xi-măng làm cho hỗn hợp bê-tông dần mất tính công tác. Trong đó có thể dễ dàng nhận thấy 2 giai đoạn khác nhau: (1) từ thời điểm 0 - thời điểm 50 phút, ít có sự biến thiên và (2) từ thời điểm 50 phút – thời điểm 100 phút biến thiên tăng nhanh cả giá trị ngưỡng chảy và độ nhớt. Điều này chứng tỏ sau thời điểm 50 phút vữa đã đặc dần và khó chảy để thi công. Hay nói cách khác trước mốc thời gian 50 phút hay tương đương 70 phút sau khi kết thúc nhào trộn trong cối, mẫu vữa bê-tông tính năng cao còn duy trì tốt trạng thái thi công để đúc khuôn.

5. Kết luận

Trên cơ sở nghiên cứu thực nghiệm đo tính chất lưu biến vữa bê-tông tính năng cao sử dụng thiết bị lưu biến kế đồng trục dạng cánh quay, cho phép rút ra một số kết luận sau:

- Cấp phối vữa bê-tông tính năng cao với tỉ lệ N/CKD=0,165. Cốt liệu/CKD=0,566 và 2% phụ gia siêu dẻo được nhào trộn, đúc, bảo dưỡng trong phòng thí nghiệm đạt kết quả cường độ chịu nén $R_{28}=120,6$ MPa;

- Thiết bị lưu biến kế đồng trục, dạng cánh quay với profile chương trình điều khiển quay cánh gồm 3 giai đoạn (tăng tốc tuyến tính để cắt – giữ ổn định – giảm tốc kiểu bậc thang) là phù hợp, cho phép ghi

nhận một cách tin cậy kết quả độ nhớt và ngưỡng chảy vữa bê-tông tính năng cao;

- Theo dõi sự biến thiên tăng dần giá trị độ nhớt và ngưỡng chảy theo thời gian 0-100 phút cho thấy vữa bê-tông dần mất tính ổn định sau mốc 50 phút, do đó có thể kết luận tính thi công mẫu vữa được đảm bảo trước thời điểm này tương đương khoảng sau 70 phút kể từ khi kết thúc quá trình nhào trộn. Từ đó, trong các nghiên cứu tiếp theo chúng tôi sẽ tiếp tục đánh giá ảnh hưởng thành phần cấp phối, thành phần nguyên liệu đến đặc điểm lưu biến này của vật liệu bê-tông tính năng cao.

Lời cảm ơn: Các tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG Tp. Hồ Chí Minh đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trang web: www.uhpc.com.vn (truy cập tháng 12/2022).
- [2] N, V, Tuấn, P, H, Hanh và L, T, Thành (2017), *Bê tông chất lượng siêu cao*, Nhà xuất bản Xây dựng.
- [3] K, H, Khayat, W, Meng, K, Vallurupalli, and L, Teng (2019), "Rheological properties of ultra-high-performance concrete-An overview" *Cement and Concrete Research*, vol, 124, p, 105828.
- [4] N, K, Sơn, V, T, K, Ngọc, L, M, Sơn và N, N, T, Huỳnh, "Sử dụng lưu biến kế qua đồng trục dạng cánh để xác định thông số tính chất lưu biến của hỗn hợp vữa", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, no,3, pp, 42–53, 2021.