

Nghiên cứu thiết lập quy trình kiểm soát chất lượng bê tông thi công bơm tại hiện trường cho công trình siêu cao tầng

Research on quality control procedure for pumped concrete for supertall buildings in field conditions

> CÙ THỊ HỒNG YẾN

Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM
Đại học Quốc gia TP.HCM; Email: hongyenxd@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Đối với việc thi công bơm bê tông cho công trình siêu cao tầng, việc kiểm soát chất lượng bê tông để đảm bảo tính ổn định và đồng nhất của hỗn hợp bê tông bơm là điều cần thiết. Từ đó, thiết lập quy trình kiểm soát chất lượng hỗn hợp bê tông bơm, có tính công tác trong vùng lưu biến đã được nghiên cứu trước đó. Quy trình này cần bắt đầu từ bài toán thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông bơm, được kiểm tra tại Phòng thí nghiệm về tính công tác, tính cơ lý và các thông số về đặc trưng lưu biến đạt yêu cầu, khi cấp phối đạt yêu cầu sẽ tiến hành bơm ngang thực tế. Bài báo đưa ra đề xuất quy trình kiểm soát chất lượng hỗn hợp bê tông bơm được thể hiện thông qua các thí nghiệm SF, T_v , T_{500} , τ_0 , μ được thực hiện trong phòng thí nghiệm, kiểm tra chất lượng hỗn hợp bê tông trước và sau khi bơm ngang thực nghiệm, từ đó đánh giá khả năng bơm đứng.

Từ khóa: Bê tông tự lèn; vùng lưu biến; áp lực bơm; bơm đứng; bơm ngang.

ABSTRACT

When pumping concrete for supertall buildings, it is necessary to control the concrete quality to ensure the stability and uniformity of fresh concrete. Then, establishing a quality control process for pumping concrete, which has workability within the rheological range has been studied beforehand. The study process began with mix design for pumping concrete, and laboratory experiments on workability, rheological properties, and mechanical performance. Subsequently, the approved mix design is implemented in actual horizontal pumping tests. This research proposes a quality control process for pumping concrete through laboratory experiments, and performance tests in field conditions when conducting horizontal pumping. The test results can be utilized to evaluate the ability of vertical pumping.

Keywords: Self-compacting concrete; rheology; concrete pressure; vertical pumping; horizontal pumping.

1. GIỚI THIỆU

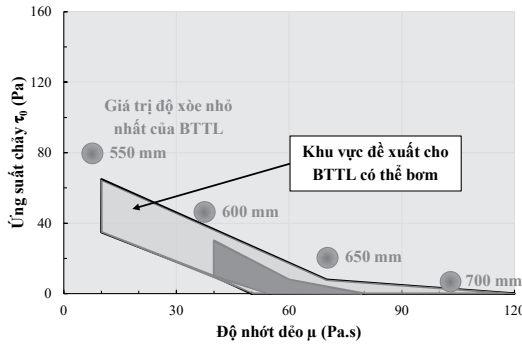
Trong thực tế thi công cho công trình siêu cao tầng (có chiều cao từ 300m đến 600m), khi bơm bê tông thẳng đứng thì cần áp lực bơm rất lớn. Để đảm bảo tính ổn định và đồng nhất của hỗn hợp bê tông bơm, cần thực nghiệm bơm ngang trước khi bơm đứng với các thông số quy đổi về chiều dài đường ống và áp lực bơm tương ứng theo ACI 304-2R.17 [1]. Trong quá trình nghiên cứu, khi tính toán áp lực bơm và lưu lượng đã có các nghiên cứu lý thuyết, nhưng chưa đề cập vấn đề ảnh hưởng chiều cao bơm đến áp lực bơm. Để đảm bảo việc thi công bơm bê tông cho công trình siêu cao tầng, cần có bài toán thiết kế thành phần hỗn hợp bê tông bơm, được kiểm tra tại Phòng thí nghiệm về tính chất độ dẻo, tính cơ lý và các thông số mở rộng cho bê tông bơm là thử độ dẻo, tính chất cơ học đạt yêu cầu bơm ngang, sau đó mới được tiến hành bơm đứng.

1.1 Tình hình nghiên cứu về tính công tác và đặc trưng lưu biến của hỗn hợp bê tông tự lèn

Hiện tại trên thế giới đã có nhiều công trình nghiên cứu về các thông số kỹ thuật về tính công tác cũng như đặc trưng lưu biến và ảnh hưởng của các thông số này đến khả năng bơm của hỗn hợp bê tông nói chung cũng như bê tông tự lèn (BTTL) nói riêng.

Năm 2002, Bartos và các đồng nghiệp [2] đã đưa ra một số phương pháp thí nghiệm để xác định các thông số kỹ thuật về tính công tác và tính lưu biến của hỗn hợp bê tông và BTTL. Các thí nghiệm xác định các thông số kỹ thuật về tính công tác như thí nghiệm đo độ chảy xòe (SF), thời gian chảy qua phễu V (T_v), thời gian chảy xuyên qua vòng J-ring, L-box, thí nghiệm K-slump cũng đã được đưa vào các tiêu chuẩn châu Âu. Về các thông số đặc trưng lưu biến, sử dụng các thiết bị thí nghiệm như lưu biến kế, nhớt kế để xác định ứng suất chảy và độ nhớt dẻo của hỗn hợp bê tông và BTTL.

Năm 2003, Wallewik [3] đã đưa ra giá trị độ chảy xòe thấp nhất để hỗn hợp bê tông được gọi là BTTL, đồng thời ứng với từng khoảng độ chảy xòe sẽ có từng khoảng độ nhớt dẻo và ứng suất chảy riêng. Nếu độ nhớt dẻo có giá trị nhỏ hơn 40 Pa.s, BTTL sẽ có ứng suất chảy đáng kể tùy thuộc vào độ nhớt. Mặt khác, nếu BTTL quá nhớt với độ nhớt dẻo lớn hơn 70 Pa.s, ứng suất chảy của hỗn hợp BTTL coi như gần bằng 0 (Hình 1). Tác giả cũng đề xuất rằng với hỗn hợp bê tông có ứng suất chảy lớn hơn 40 Pa và độ nhớt dẻo nhỏ hơn 50 Pa.s là hoàn toàn có thể bơm ngang được.



Hình 1. Khu vực đề xuất ứng suất chảy và độ nhớt dẻo cho BTTL [3]

Koehler và các đồng nghiệp, năm 2007 trình bày cách xác định ứng suất chảy tĩnh và ứng suất chảy động của hỗn hợp BTTL bằng lưu biến kế ICAR [4]. Tác giả nêu rõ tính lưu biến của hỗn hợp BTTL là công cụ hữu ích để đánh giá, thiết kế và quản lý chất lượng BTTL, trong đó, ứng suất chảy tĩnh được xác định ở trạng thái tĩnh, còn ứng suất chảy động xác định cho dòng chảy. Độ nhớt dẻo đặc trưng cho độ dính và độ đồng nhất, còn độ xúc biến xác định cho trạng thái nghỉ. Ngoài ra, tính lưu biến có thể được tối ưu để đảm bảo tính công tác của BTTL (Hình 2). Khi BTTL có ứng suất chảy động thấp, độ nhớt dẻo và độ xúc biến không bị ảnh hưởng. Trong quá trình thi công, muốn giảm áp lực lên ván khuôn thì giảm ứng suất chảy tĩnh là ứng suất gây ra bởi tính xúc biến của hỗn hợp BTTL. Khi bơm hỗn hợp BTTL, cần tăng ứng suất chảy tĩnh và độ nhớt dẻo để tăng khả năng chống phân tầng.



Hình 2. Sự thay đổi ứng suất chảy của hỗn hợp BTTL trong quá trình vận chuyển và thi công. [4]

1.2 Tình hình về nghiên cứu hỗn hợp BTTL thi công bơm cho công trình siêu cao tầng

Chiều cao của các công trình cao tầng trên Thế giới được chia làm ba nhóm: cao tầng (tall) là những công trình có chiều cao dưới 300m, siêu cao tầng (supertall) là những công trình có chiều cao từ 300m đến 600m, cực cao tầng (megatall) là những công trình có chiều cao từ 600m trở lên [5]. Do chiều cao công trình ảnh hưởng đến việc thi công bơm thẳng đứng lên cao, nên trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu về các thông số kỹ thuật của hỗn hợp bê tông sử dụng cho những công trình siêu cao tầng.

Năm 2013, Nehdi [6] và Bester [7] tổng hợp nghiên cứu hiệu quả sử dụng hỗn hợp BTTL bơm cho các công trình siêu cao tầng của Aldred [8] khi thi công tòa nhà Burj Khalifa với 166 tầng và chiều cao 828m. Trong bài báo, tác giả đã giới thiệu về cấp phối C80-20 và

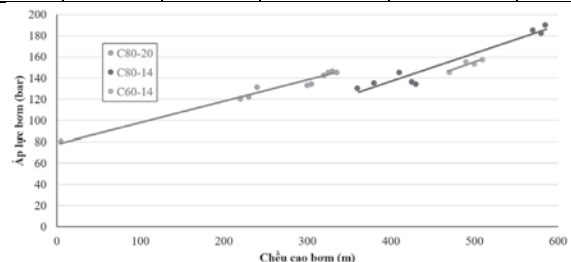
C80-14 của hỗn hợp BTTL được sử dụng có khoảng 50% là cốt liệu nhỏ, tro bay thay thế 13-20% và silica fume thay thế 5-10% (Bảng 1). Càng lên cao, sử dụng cốt liệu lớn có D_{max} nhỏ nhằm tăng sự ổn định và chống phân tầng của hỗn hợp bê tông dưới áp lực bơm lớn. Ngoài ra, bài báo cũng đề cập đến các cấu kiện ở vị trí cao hơn tầng 127 thì D_{max} của cốt liệu lớn (CLL) phải nhỏ hơn 10mm, lúc này áp lực bơm vào khoảng 200 bar như trên Hình 3. Trong quá trình bơm, độ nhớt dẻo của hỗn hợp bị giảm một nửa và ứng suất chảy động tăng gấp đôi. Điều này được cho là do sự gia tăng nhiệt độ của bê tông trong quá trình bơm và nên được đưa vào tính toán khi thiết kế hỗn hợp BTTL.

Ferraris và các đồng nghiệp năm 2017 [9] đã đánh giá vai trò của lưu biến học đối với sự phát triển của bê tông chất lượng cao, bao gồm cả BTTL. Ứng suất chảy và độ nhớt dẻo ảnh hưởng đến nguy cơ phân tầng và áp lực bơm của hỗn hợp bê tông. Khi ứng suất chảy và độ nhớt dẻo càng tăng cao thì hỗn hợp BTTL ít phân tầng nhưng cần áp lực bơm lớn. Ngược lại, khi ứng suất chảy và độ nhớt dẻo thấp thì hỗn hợp BTTL cần áp lực bơm nhỏ nhưng dễ bị phân tầng.

Hơn nữa, tiêu chuẩn ACI 237R của Mỹ năm 2007[10], tài liệu hướng dẫn thí nghiệm về BTTL và EN 12350-2010 của châu Âu [11], [12], tiêu chuẩn về bê tông và BTTL của Nhật [13] đều có những quy định cụ thể về trình tự thí nghiệm, phân loại và cách đánh giá hỗn hợp bê tông nói chung và của BTTL có thể bơm được cho các công trình nhà cao tầng nói riêng.

Bảng 1-Một số đặc trưng trong cấp phối hỗn hợp bê tông cho công trình Burj Khalifa [7]

Tro bay [%]	Silica fume [%]	D_{max} CLL [mm]	Độ chảy xòe [mm]	Chiều cao bơm [m]	f'_c [MPa]
13	10	20	~600	<440	80

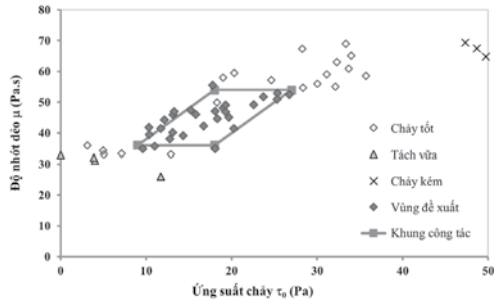


Hình 3. Biểu đồ quan hệ giữa áp lực bơm (bar) với chiều cao bơm (m) phụ thuộc vào D_{max} của các hạt CLL với các hỗn hợp bê tông sử dụng cho Burj Khalifa [8]

Theo ACI 238.1R-08 [14] một số mô hình đã được đề xuất và sử dụng nhằm đánh giá được khả năng lưu biến của hỗn hợp bê tông. Bên cạnh đó, tiêu chuẩn cũng trình bày các thí nghiệm xác định lưu biến của hỗn hợp bê tông, bao gồm các thí nghiệm xác định một thông số lưu biến (thí nghiệm độ sụt, độ chảy xòe, K-slump) các thí nghiệm xác định nhiều thông số lưu biến (nhớt kế BML, nhớt kế BTRHEOM, IIB, ICAR).

Vào năm 2020, Yen Cu và các đồng nghiệp [15] đã nghiên cứu lựa chọn hệ nguyên vật liệu để thiết kế hỗn hợp BTTL đạt yêu cầu về các thông số kỹ thuật về tính công tác (độ chảy xòe từ 680 đến 750 mm, T_{500} từ 1 đến 2 s và T_v từ 3 đến 6 s.) có thể bơm cho các công trình siêu cao tầng. Các tác giả xây dựng được quan hệ giữa các thông số kỹ thuật với đặc trưng lưu biến của hỗn hợp BTTL này, từ đó, đưa ra vùng lưu biến phù hợp cho BTTL dùng bơm cho công trình siêu cao tầng thể hiện trên Hình 4. Vùng tính công tác trong hình bình hành có ứng suất chảy dao động từ 9 đến 18 Pa, độ nhớt dẻo thay đổi từ 36 đến 54 Pa.s, là khu vực lưu biến thích hợp thể hiện các cấp phối BTTL có tính công tác tốt phù hợp bơm đúng cho công trình siêu cao tầng. Việc thiết lập được vùng lưu biến này giúp giảm

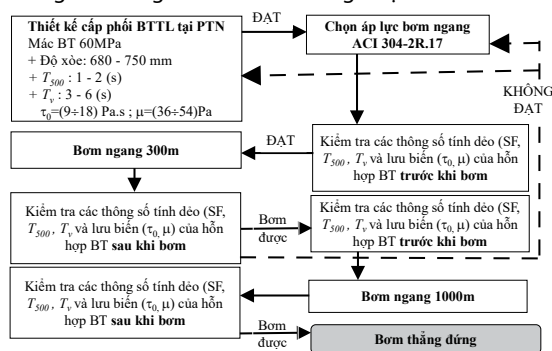
số lượng thí nghiệm cũng như thời gian và chi phí cho công tác thiết kế hỗn hợp BTTL bơm đứng cho công trình siêu cao tầng.



Hình 4. Vùng ứng suất chảy và độ nhớt dẻo để xuất cho BTTL bơm cho công trình siêu cao tầng

2. PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

Theo tài liệu hướng dẫn về bơm bê tông của Nhật, để đảm bảo bơm thẳng đứng trên 300m thì cần kiểm chứng bơm ngang 1000m đến 1200m [13]. Hơn nữa, theo ACI 304-2R.17 [1], để tính toán áp lực bơm, có các hệ số quy đổi cụ thể về chiều cao bơm, loại và chiều dài đường ống sử dụng, hằng số nhớt của hỗn hợp bê tông sử dụng thi công bơm. Quy trình kiểm soát chất lượng bê tông thi công bơm tại hiện trường cho công trình siêu cao tầng được đề xuất trên Hình 5.



Hình 5. Quy trình kiểm soát chất lượng bê tông thi công bơm tại hiện trường

2.1 Tính toán áp lực bơm ngang kiểm chứng

Tham khảo biểu đồ quan hệ giữa áp lực bơm và chiều cao công trình khi thi công tòa nhà Buji Khalifa trên Hình 3, với chiều cao từ 300m trở lên, áp lực bơm từ 130 bar.

Giả sử để bơm được chiều cao 300m, theo ACI 304-2R.17 [1] thì tổng chiều dài đường ống bơm ngang và đứng là 400m, chọn theo đường (1) trên Hình 6. Nếu chọn lưu lượng bơm tại điểm A là 30 m³/h và đường kính ống bơm là 125 mm. Từ điểm A kẻ đường thẳng nằm ngang cắt đường của đường kính ống bơm tại điểm B. Với loại BTTL có độ chảy xòe hơn 500mm, giá trị hằng số nhớt b, được xác định bằng lưu biến kế ống trượt tương ứng là 425 Pa.s/m [16]. Từ B, kẻ đường thẳng đứng cắt đường hằng số nhớt tại C. Sau đó, kẻ đường nằm ngang cắt đường chiều dài ống bơm 400 m tại điểm D. Từ điểm D ta gióng đường thẳng đến trục áp lực bơm được điểm E cỡ 35 bar. Với mỗi 4m bơm cao, theo lưu ý trên Hình 6, thêm 1 bar nên 300 m sẽ cộng thêm 75 bar [16] và thêm 10% tổn thất áp suất, để xác định được áp lực bơm cần thiết tại điểm F. Tổng áp lực bơm tính toán cỡ 120 bar. Cuối cùng, từ điểm A kẻ đường gióng ngang, cắt đường gióng đứng từ F, để xác định công suất máy bơm cần thiết là 132 kW.

Để bơm ngang 1200m, chọn áp lực bơm dựa vào Hình 6 là 105 bar, thêm 10% tổn thất thì áp lực bơm cần thiết cỡ 115 bar.

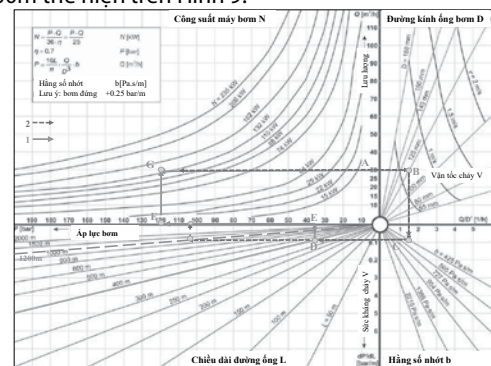
2.2 Thiết lập các thí nghiệm bơm ngang kiểm chứng

Từ việc tham khảo áp lực bơm của các công trình trên 300m đã thi công và tính toán áp lực bơm cần thiết như trình bày ở mục 2.1,

thay vì kiểm chứng bơm ngang 1200m, mục tiêu của việc kiểm chứng bơm ngang là cần áp lực bơm là 120 bar. Mặt bằng bố trí sẽ thêm các co 90° để giảm chiều dài đường ống. Để đạt áp lực bơm 130 bar, với chiều dài đường ống bơm ngang là 1000 m chịu áp lực bơm theo đường (2) trên Hình 6, mỗi co 90° thêm 1 bar, nên bố trí 20 co 90° như Hình 7 và Hình 9.

Thí nghiệm bơm ngang kiểm chứng được thực hiện tại trạm trộn bằng máy bơm Putzmeister BSA 2109 HD [17] có áp lực tối đa là 152 bar. Trình tự thực hiện bơm ngang kiểm chứng lần lượt nối thêm đường ống qua ba giai đoạn: 350m, 600m và 1000m để kiểm tra áp lực bơm không gây hư hỏng đường ống. Mặt bằng bố trí đường ống bơm ngang kiểm chứng lần đầu là 350m thể hiện trên Hình 7 và Hình 8.

Thí nghiệm bơm ngang kiểm chứng được thực hiện tại trạm trộn bằng máy bơm Putzmeister BSA 2109 HD [17] có áp lực tối đa là 152 bar. Trình tự thực hiện bơm ngang kiểm chứng lần lượt qua ba giai đoạn: 350m, 650m và 1000m để kiểm tra áp lực bơm không gây hư hỏng đường ống. Mặt bằng bố trí đường ống bơm ngang kiểm chứng 1000m thể hiện trên Hình 9.



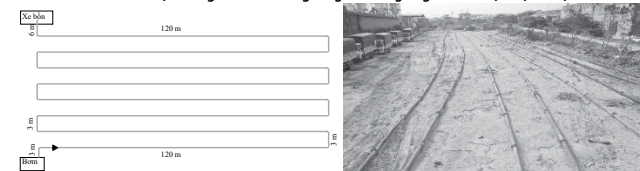
Hình 6. Chọn áp lực bơm theo ACI 304-2R.17



Hình 7. Sơ đồ bố trí đường ống bơm ngang 350 m



Hình 8. Mặt bằng bố trí đường ống bơm ngang 350 m tại trạm trộn



Hình 9. Sơ đồ và mặt bằng bố trí đường ống bơm ngang 1000 m tại trạm trộn

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Để đánh giá khả năng bơm ngang với các cấp phối nghiên cứu, tác giả kiểm chứng với cấp phối bất kỳ có ứng suất chảy và độ nhớt dẻo trong vùng tính công tác để xuất trên Hình 4.

Đối với cấp phối SCC-Trial, thành phần nguyên vật liệu thay đổi loại silica fume, tỉ lệ phối trộn giữa cát sông và cát nghiền, tỉ lệ N/CKD và phụ gia hóa học như Bảng 2 và Bảng 3.

Bảng 2-Thành phần nguyên vật liệu của hỗn hợp BTTL bất kì bơm ngang

Vật liệu	Nguồn cung cấp	Khối lượng riêng (g/cm ³)
Cát sông	Cát vàng sông Đồng Tháp	2,67
Cát nghiền	Mỏ đá Tân Cang, Đồng Nai	2,75
Đá dăm $D_{max}=12.5\text{mm}$	Mỏ đá Tân Cang, Đồng Nai	2,75
Xi măng PC50	Xi măng Nghi Sơn PC50	3,1
Tro bay loại F	Duyên Hải, Trà Vinh	
Silicafume	ICCI	
Phụ gia hóa học	Kao(MVN300-LSC)	

Bảng 3-Cấp phối của hỗn hợp BTTL bất kì bơm ngang 350m và 1000m

Tên mẫu	XM	Nước	FA	Silicafume	N/CKD	SP+VMA	Cát sông	Cát nghiền	Đá
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)		(l/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
SCC-Trial-350	400	195	108	32	0,361	7,02	552	297	752
SCC-Trial-1000	400	195	108	32	0,361	8,10	573	312	729

Kết quả tính công tác và các thông số lưu biến khi khảo sát tại phòng thí nghiệm (PTN) so với kết quả kiểm tra trước và sau khi bơm ngang thực tế được thể hiện trên Bảng 4. Quan sát kết quả sau khi bơm ngang, các giá trị này có thay đổi, nhưng vẫn đảm bảo các thông số kỹ thuật về tính công tác yêu cầu đối với mẫu trộn tại phòng thí nghiệm (PTN).

Bảng 4-Kết quả tính công tác và tính lưu biến của hỗn hợp SCC-Trial

	Độ chảy xòe (mm)	T ₅₀₀ (s)	T _v (s)	τ_0 (Pa)	μ (Pa.s)	Quan sát định tính BTTL
Mẫu PTN	730	2,08	7	13,07	34,07	Chảy tốt
Trước bơm 350m	670	1,85	4,13	12,8	17,8	Chảy tốt
Sau bơm 350m	630	1,66	2,51	16,8	5,52	Chảy tốt
Trước bơm 1000m	780	1,02	2,02	15,3	13,08	Chảy tốt
Sau bơm 1000m	800	0,55	1,89	16,05	7,03	Chảy tốt

Hỗn hợp BTTL sau bơm có độ chảy xòe thay đổi tăng hoặc giảm nhưng khả năng kháng phân tầng vẫn nhỏ hơn 15%. Sau bơm ngang 1000m, độ chảy xòe có tăng, do ảnh hưởng của áp lực bơm và chiều dài đường ống bơm, nhưng hỗn hợp sau bơm vẫn đồng nhất. Các hỗn hợp này không bị phân tầng và tách nước như quan sát trên Hình 10 và không xảy ra hiện tượng nghẽn đường ống trong khi bơm ngang 350m và 1000m. Thí nghiệm bơm ngang với chiều dài đường ống tối đa 1000m đã kiểm chứng vùng tính công tác trên biểu đồ lưu biến được đề xuất cho BTTL sử dụng bơm thẳng đứng lên cao.

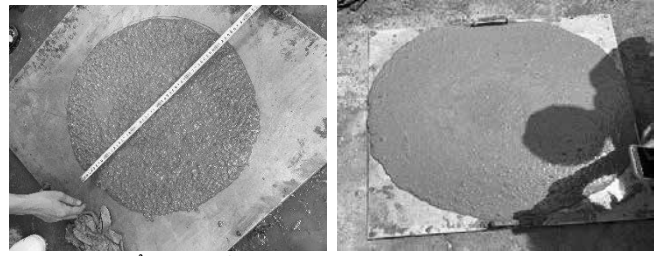
4. KẾT LUẬN

Việc tính toán lựa chọn công suất máy bơm và đặc trưng lưu biến có thể tham khảo theo ACI 304-2R.17. Quá trình thực nghiệm cho thấy hạn chế khi áp dụng bảng tra trên Hình 6 đối với BTTL có khả năng chảy xòe, vì hằng số nhớt b trên đồ thị chọn công suất bơm theo giá trị độ sụt. Do đó, việc bơm ngang kiểm chứng lại kết quả nghiên cứu là cần thiết.

Kết quả bơm ngang kiểm chứng khẳng định vùng đặc trưng lưu biến có ứng suất chảy dao động từ 10 đến 26 Pa, độ nhớt dẻo dao động từ 41 đến 52 Pa.s trên Hình 4 ứng với giá trị độ chảy xòe từ 680 đến 750 mm, T₅₀₀ từ 1 đến 2 s và T_v từ 3 đến 6 s, có khả năng kháng phân tầng tốt, có thể áp dụng được để chế tạo BTTL bơm đứng cho công trình siêu cao tầng. Quy trình kiểm soát chất lượng bê tông thi công bơm tại hiện trường cho công trình siêu cao tầng thực hiện theo Hình 5.

Lời cảm ơn

Tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM, Công ty Xây dựng LÊ PHAN (TNHH) đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

**Hình 10.** Kiểm tra độ chảy xòe và T₅₀₀ trước khi bơm 350m và 1000m

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] ACI (American Concrete Institute), "Guide to Placing Concrete by Pumping Methods," USA, 304.2R-17, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2017.
- [2] P. J. . Bartos, M. Sonebi, and A. Tamimi, *Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Test*, no. November. 2002.
- [3] O. H. Wallevik, "Rheology - A scientific approach to develop self-compacting concrete," in *Proceedings of the 3rd International Symposium on SCC*, Rilem, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 23-31.
- [4] E. P. Koehler and D. W. Fowler, "ICAR Mixture Proportioning Procedure for Self-Consolidating Concrete," 2007.
- [5] CTBUH Height Committee, "CTBUH Height Criteria," 2015. [Online]. Available: <http://www.ctbuh.org/HighRiseInfo/TallestDatabase/Criteria/tabid/446/language/en-US/Default.aspx>
- [6] M. L. Nehdi, "Only tall things cast shadows: Opportunities, challenges and research needs of self-consolidating concrete in super-tall buildings," *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, no. March, pp. 80–90, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.051.
- [7] B. Nicholas, "Concrete for high-rise buildings : Performance requirements , mix design and construction considerations design and construction considerations," *Struct. Concr. Prop. Pract.*, no. September, pp. 1-4, 2013.
- [8] J. Aldred, "Burj Khalifa - a new high for high-performance concrete," *Proc. Inst. Civ. Eng. Eng.*, vol. 163, no. 2, pp. 66-73, 2010, doi: <https://doi.org/10.1680/cien.2010.163.2.66>.
- [9] C. F. Ferraris, P. Billberg, E. P. Koehler, and E. Al, "Role of Rheology in Achieving Successful Concrete Performance," *Concr. Int. A Contrib. from ACI Comm. 238, Work. Fresh Concr.*, vol. 6, pp. 43-51, 2017.
- [10] ACI (American Concrete Institute), "Self-Consolidating Concrete," USA, ACI 237R-07, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2007.
- [11] SCC European Project Group, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete : Specification, Production and Use," 2005.
- [12] European Norms, "Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump-flow test," *En 12350-8:2010*. 2010.
- [13] JSCE (Japan Society of Civil Engineers), "English Version of Standard Specifications for Concrete Structures-2007-Materials and Construction," Tokyo, Japan, 2010.
- [14] ACI (American Concrete Institute), "Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete," USA, ACI 238.1R-08, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2008.
- [15] Y. T. H. Cu, M. V. Tran, C. H. Ho, and P. H. Nguyen, "Relationship between workability and rheological parameters of self-compacting concrete used for vertical pump up to supertall buildings," *J. Build. Eng.*, vol. 32, no. 11, pp. 1-12, 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101786.
- [16] Putzmeister Concrete Pumps GmbH, "Concrete Technology for Concrete Pumps," 2011.
- [17] Putzmeister, "Concrete pump BSA 2109 H -D BSA 2109 H -E," 2015.