

Đánh giá ảnh hưởng của nguyên vật liệu đến tính lưu biến của hỗn hợp bê tông tự lèn bằng phân tích ANOVA

Evaluate the influence of materials on rheology of self-compacting concrete mixtures using analysis of variance

> CÙ THỊ HỒNG YẾN^{1,2}

¹Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM

²Đại học Quốc gia TP.HCM; Email: hongyenxd@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo sử dụng phương pháp phân tích phương sai một yếu tố ANOVA bằng phần mềm SPSS để đánh giá ảnh hưởng của từng thành phần nguyên vật liệu đến các thông số kỹ thuật đặc trưng lưu biến của bê tông tự lèn (BTTL), với mức ý nghĩa 5%. Khi có sự khác biệt thì sử dụng các kiểm định sâu Dunnett's T3 hoặc LSD để so sánh các trị trung bình của các nhóm hàm lượng nguyên vật liệu sử dụng. Kết quả cho thấy tất cả các thành phần nguyên vật liệu đều có ảnh hưởng đến các thông số kỹ thuật về tính công tác, tính lưu biến và khả năng bơm của hỗn hợp BTTL với những mức độ khác nhau, trong đó, sự thay đổi tỉ lệ N/CKD ảnh hưởng đáng kể đến tất cả các thông số (Robust Tests có Sig. Welch <0,0001, Dunnett's T3 có Sig. <0,0001).

Từ khóa: Bê tông tự lèn; tính công tác; tính lưu biến; ANOVA.

ABSTRACT

In this research, analysis of variance (ANOVA) was carried out using the software SPSS to evaluate the influence of each material component on the performance of the self-compacting concrete (SCC) with a significance level of 5%. When there is a difference, Dunnett's T3 or LSD tests are used to compare the average values of these material components. The experimental results indicate that all material components have an impact on the performance of self-compacting concrete mixtures, including workability, rheological properties, and pumpability, to varying degrees, in which, the change in the water-to-binder ratio has a significant influence on all parameters (Robust Tests with Sig. Welch <0,0001, Dunnett's T3 with Sig. <0,0001).

Keywords: Self-compacting concrete; workability; Rheology; ANOVA.

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, các công trình siêu cao tầng trên thế giới thường sử dụng bê tông tự lèn (BTTL) thay thế bê tông bơm cho các tầng trên 300m [1], [2]. BTTL là loại bê tông mà hỗn hợp của nó có khả năng tự lấp đầy góc cạnh ván khuôn hoặc cốt pha kể cả những kết cấu dầy đặc cốt thép, mà vẫn giữ được tính đồng nhất bằng chính trọng lượng bản thân và độ chảy xòe cao, không cần bất kì lực tác động cơ học nào từ bên ngoài [3]. Tính công tác của hỗn hợp BTTL thể hiện khả năng lưu động và độ dẻo của hỗn hợp bê tông [4].

Trong bài toán thiết kế cấp phối BTTL cho công trình siêu cao tầng, nguyên vật liệu thành phần quyết định độ đồng nhất, tính dẻo của hỗn hợp BTTL. Nguyên vật liệu để chế tạo BTTL gồm xi măng, nước, cốt liệu nhỏ, cốt liệu lớn, phụ gia vô cơ hoạt tính và phụ gia siêu dẻo. Chất lượng của BTTL phụ thuộc vào chất lượng của các nguyên vật liệu thành phần.

Trên thế giới, trong lĩnh vực nghiên cứu về bê tông nói chung, BTTL nói riêng, đã có nhiều nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích ANOVA để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu

tố nguyên vật liệu thành phần đến các tính chất đặc trưng của hỗn hợp bê tông. Năm 2011, Ghomari nghiên cứu ảnh hưởng của bột đá vôi ảnh hưởng đến tính chảy của hỗn hợp BTTL thông qua thí nghiệm độ chảy xòe, L box, thời gian chảy qua phễu V và xét ảnh hưởng của tỉ số G/S (sỏi/cát) đến cường độ chịu nén của BTTL [5]. Kết quả thu được được xử lý bằng phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) sử dụng phần mềm SPSS. Phân tích thống kê này để xác định các yếu tố có ý nghĩa thống kê và đưa ra một số mối tương quan chặt chẽ giữa các thông số này.

Năm 2013, Raharjo nghiên cứu tối ưu hóa các cấp phối BTTL sử dụng tro bay, silicafume và xỉ sắt đến cường độ chịu nén của BTTL, tác giả đã sử dụng phân tích ANOVA bằng phần mềm SPSS, với mức ý nghĩa 5%, để xét ảnh hưởng của từng yếu tố đơn đến cường độ chịu nén của BTTL [6]. Cùng năm 2013, Şahmaran và các đồng nghiệp nghiên cứu khảo sát các thông số có thể ảnh hưởng nhiều nhất đến tính công tác và các đặc tính lưu biến khi thiết kế cấp phối chất kết dính gốc xi măng (ECC) [7]. Các tác giả sử dụng phân tích phương sai ANOVA với mức ý nghĩa 5%, đánh giá ảnh hưởng các

biến độc lập W/B (nước/chất kết dính), S/B (cát/chất kết dính), SP/B (phụ gia siêu dẻo/chất kết dính), tỉ lệ và D_{max} của cốt liệu đến các biến phụ thuộc là tính công tác và đặc trưng lưu biến và độ bền cơ học (đường kính chảy xòe, thời gian chảy T_{500} , ứng suất chảy, độ nhớt dẻo, khả năng chống võng giữa nhịp, cường độ uốn và nén).

Chatterjee [8] nghiên cứu về vữa tự đầm (SCM) là một thành phần cấu thành không thể thiếu của bê tông tự lèn (SCC). Phản ứng chảy của vữa tự đầm được đánh giá bằng phương pháp Taguchi và ANOVA. Ảnh hưởng của chất kết dính và phụ gia siêu dẻo đến độ chảy tương đối của SCM tươi được đánh giá bằng thí nghiệm thử vữa được thiết kế theo phương pháp tối ưu hóa Taguchi. Phân tích tương tác ANOVA được thực hiện để hiểu rõ sự tương tác của các yếu tố và ảnh hưởng của chúng đến chất lượng vữa.

Năm 2018, Uysal [9] tối ưu hóa các đặc tính độ bền của bê tông được thực hiện bằng cách sử dụng phương pháp Taguchi và phân tích ANOVA. Hiệu suất độ bền của bê tông được đánh giá bằng cách sử dụng các phép đo tính thấm nhanh của ion clorua, khả năng chống đông lạnh và thử nghiệm biến chất. Phân tích ANOVA chỉ ra rằng liều lượng xi măng có tầm quan trọng lớn nhất đối với mức độ biến tính, tính thấm ion clorua và tổn thất vận tốc xung siêu âm. Phân tích chỉ ra rằng sai số thí nghiệm ở mức thấp (0,1% - 16,7%).

Qua các nghiên cứu về ảnh hưởng của nguyên vật liệu thành phần đến tính chất cơ lý của bê tông và BTTL, cần sử dụng các phương pháp phân tích thống kê kết hợp kết quả thực nghiệm để đánh giá chính xác hơn về mức độ ảnh hưởng này. Việc sử dụng phương pháp phân tích phương sai một yếu tố (one way ANOVA) để đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng thành phần nguyên vật liệu đến các thông số kỹ thuật về tính công tác, đặc trưng lưu biến và cường độ chịu nén của BTTL là phù hợp.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu thực hiện khảo sát 54 cấp phối BTTL với yêu cầu $T_{500} = 1 \div 2s$ (thời gian chảy xòe đạt đường kính 500mm), $SF = 680 \div 800mm$ (độ chảy xòe), $3s < T_v < 6s$ (thời gian chảy qua phễu V), tỉ lệ phân tầng $SR < 15\%$ để có thể bơm cho các công trình siêu cao tầng. Qua việc xem xét ảnh hưởng của hàm lượng phụ gia vô cơ hoạt tính và tham khảo các cấp phối BTTL sử dụng cho công trình siêu cao tầng, hàm lượng tro bay được sử dụng thay thế cho xi măng được chọn với tỉ lệ 15%, 20%, 25% về khối lượng, và silica fume thay thế cho xi măng được chọn là 4%, 6%, 8% về khối lượng, tỉ lệ N/CKD là 33%, 35% và 37%. Các cấp phối được thiết kế theo tiêu chuẩn ACI 237R-07 [10] bằng phương pháp thể tích tuyệt đối. Hàm lượng chất kết dính được chọn là $540 kg/m^3$ kết hợp với phụ gia điều chỉnh độ nhớt (VMA) và phụ gia siêu dẻo để điều chỉnh sự cân bằng giữa độ chảy và khả năng chống phân tầng của hỗn hợp BTTL [11].

Tính công tác của hỗn hợp BTTL được đánh giá theo tiêu chuẩn ACI -237R-07 và EN12350:2005 bằng các thí nghiệm sau: độ chảy xòe (SF); T_{500} ; V-funnel [10], [12], [13].

Tính lưu biến của hỗn hợp BTTL thể hiện qua hai thông số ứng suất chảy (τ_0) và độ nhớt dẻo (μ), được xác định bằng lưu biến kế ICAR [14].

Trong các cấp phối BTTL nghiên cứu, có bốn thành phần nguyên vật liệu được thay đổi để thỏa mãn yêu cầu thiết kế là tro bay, silica fume, tỉ lệ N/CKD và phụ gia hóa học. Vì vậy, cần xét ảnh hưởng của các yếu tố này đến các thông số kỹ thuật về tính công tác (độ chảy xòe, T_{500} và T_v); tính lưu biến (ứng suất chảy τ_0 và độ nhớt dẻo μ) và khả năng bơm (tỉ lệ phân tầng SR và lượng nước tách ra V trong thí nghiệm tách nước).

Việc sử dụng phương pháp thiết kế xét ảnh hưởng toàn bộ các yếu tố đến tính công tác, tính lưu biến và khả năng bơm của BTTL, trong đó ba yếu tố tro bay, silica fume, tỉ lệ N/CKD có ba mức hàm

lượng và phụ gia hóa học có hai mức hàm lượng được mã hóa thể hiện trong Bảng 1. Mức hàm lượng thấp nhất, trung bình, cao nhất được mã hóa tương ứng -1, 0, 1.

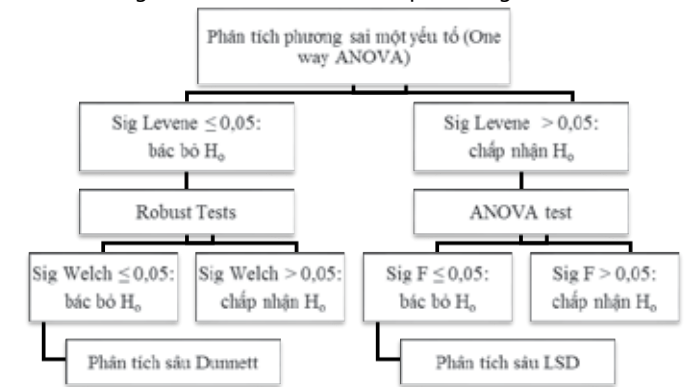
Bảng 1- Ký hiệu các yếu tố nguyên vật liệu

	Tên yếu tố nguyên vật liệu	Ký hiệu	-1	0	1
1	Tro bay	FA	0,15	0,2	0,25
2	Silicafume	S	0,04	0,06	0,08
3	N/CKD	N/CKD	0,33	0,35	0,37
4	Phụ gia hóa học	SP	1,45		1,55

Do đó, chỉ có bốn yếu tố ảnh hưởng đến cấp phối BTTL. Việc này phản ánh định lượng sự kết hợp có thể có của các thành phần và mức hàm lượng nguyên vật liệu. Sử dụng các phương pháp phân tích kiểm định để làm rõ hơn về sự ảnh hưởng và sự tương tác giữa các thành phần nguyên vật liệu đến các kết quả này. Việc mã hóa thành phần nguyên vật liệu trong cấp phối BTTL và giá trị các thông số kỹ thuật về tính công tác, tính lưu biến, khả năng bơm của BTTL được thể hiện trong Bảng 2.

Sự ảnh hưởng của tro bay, silica fume, tỉ lệ N/CKD được đánh giá bởi phương pháp phân tích phương sai một yếu tố với mức ý nghĩa 5%, bằng phần mềm SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) [15] được thể hiện qua các bước theo mô hình trên Hình 1. Một số giả định khi phân tích ANOVA:

- Các nhóm so sánh phải độc lập và được chọn một cách ngẫu nhiên;
- Các nhóm so sánh phải có phân phối chuẩn hoặc cỡ mẫu phải đủ lớn để được xem như tiệm cận phân phối chuẩn;
- Phương sai của các nhóm so sánh phải đồng nhất.



Hình 1. Mô hình phân tích phương sai đánh giá ảnh hưởng của nguyên vật liệu đến các tính chất của BTTL

Kết quả kiểm định gồm ba phần:

- Phần 1: Levene test: dùng kiểm định phương sai bằng nhau hay không giữa các nhóm, với giả định H_0 là "Phương sai bằng nhau".

- Sig Levene $\leq 0,05$: bác bỏ H_0 . Kiểm tra với Robust.

• Sig Levene $> 0,05$: chấp nhận H_0 : đủ điều kiện để phân tích tiếp ANOVA.

- Phần 2: ANOVA test: Kiểm định anova, với giả định H_0 là "Trung bình bằng nhau"

- Sig $F > 0,05$: chấp nhận H_0 : chưa đủ điều kiện để khẳng định có sự khác biệt trung bình về đặc tính của BTTL với sự thay đổi của thành phần nguyên vật liệu.

• Sig $F \leq 0,05$: bác bỏ H_0 : đủ điều kiện để khẳng định có sự khác biệt trung bình về đặc tính của BTTL với sự thay đổi của thành phần nguyên vật liệu.

- Phần 3: Robust test: Kiểm định Robust

• Sig Welch $>0,05$: chấp nhận H_0 : chưa đủ điều kiện để khẳng định có sự khác biệt trung bình có ý nghĩa thống kê về đặc tính của BTTL với sự thay đổi của thành phần nguyên vật liệu.

• Sig Welch $\leq 0,05$: bác bỏ H_0 : đủ điều kiện để khẳng định có sự khác biệt trung bình có ý nghĩa thống kê về đặc tính của BTTL với sự thay đổi của thành phần nguyên vật liệu.

Khi có sự khác biệt thì phân tích sâu hơn để tìm ra sự khác biệt như thế nào giữa các nhóm quan sát bằng các kiểm định sâu Dunnett's T3 hoặc LSD để so sánh các trị trung bình của các nhóm.

Bảng 2- Mã hóa thành phần nguyên vật liệu cho các cấp phối khảo sát và kết quả thí nghiệm

Ký hiệu mẫu cấp phối BTTL	Các yếu tố ảnh hưởng				Kết quả thí nghiệm						
	FA	S	N/CKD	SP	Độ chảy xòe (mm)	T ₅₀₀ (s)	T _v (s)	SR (%)	V (ml)	τ_0 (Pa)	μ (Pa.s)
SCC1	-1	1	-1	1	620	3,58	8,29	4,0	4,9	33,67	60,97
SCC2	-1	0	-1	1	610	3,70	9,66	3,3	3,5	32,32	62,97
SCC3	-1	-1	-1	1	610	3,73	9,75	3,2	3,8	33,34	68,99
SCC4	-1	1	-1	-1	580	4,13	9,41	3,4	3,1	48,67	67,53
SCC5	-1	0	-1	-1	585	3,37	10,14	3,0	3,5	47,34	69,36
SCC6	-1	-1	-1	-1	575	3,79	9,81	3,4	3,2	49,73	64,81
SCC7	0	1	-1	1	665	2,08	7,18	6,2	7,9	24,66	57,11
SCC8	0	0	-1	1	685	1,69	6,17	8,5	8,9	20,31	59,56
SCC9	0	-1	-1	1	635	2,58	7,95	6,0	5,7	31,13	59,08
SCC10	0	1	-1	-1	625	2,75	7,90	4,1	6,1	28,33	54,69
SCC11	0	0	-1	-1	610	3,97	9,31	3,5	5,5	33,99	65,12
SCC12	0	-1	-1	-1	630	2,90	8,22	4,1	6,3	28,26	67,31
SCC13	1	1	-1	1	705	2,54	6,01	7,6	11,9	19,01	58,00
SCC14	1	0	-1	1	700	2,44	5,42	7,5	11,2	18,28	49,94
SCC15	1	-1	-1	1	650	2,90	7,20	6,5	7,8	30,02	56,00
SCC16	1	1	-1	-1	630	2,97	7,55	5,0	6,3	32,12	55,01
SCC17	1	0	-1	-1	660	2,45	7,36	5,3	8,1	35,69	58,55
SCC18	1	-1	-1	-1	700	1,86	5,70	8,0	11,1	25,37	52,99
SCC19	-1	1	0	1	695	1,68	5,29	9,0	13,0	22,57	49,15
SCC20	-1	0	0	1	690	1,65	5,45	7,7	12,1	25,32	50,97
SCC21	-1	-1	0	1	685	1,67	5,94	8,8	11,7	26,76	52,51
SCC22	-1	1	0	-1	700	1,50	4,92	9,2	15,5	18,07	47,09
SCC23	-1	0	0	-1	700	1,77	5,21	9,4	14,9	18,99	48,12
SCC24	-1	-1	0	-1	695	1,75	5,16	8,8	11,3	15,21	47,45
SCC25	0	1	0	1	705	1,39	4,68	8,5	15,6	19,66	45,11
SCC26	0	0	0	1	700	1,45	4,42	7,3	15,2	19,31	46,84
SCC27	0	-1	0	1	695	1,79	5,51	7,9	13,2	23,73	51,81
SCC28	0	1	0	-1	705	1,35	4,30	7,3	15,2	18,33	44,69
SCC29	0	0	0	-1	710	1,51	4,82	8,7	15,4	15,78	46,06
SCC30	0	-1	0	-1	715	1,35	4,15	9,0	17,0	16,71	42,31
SCC31	1	1	0	1	710	1,38	4,33	8,0	16,7	13,13	45,93
SCC32	1	0	0	1	710	1,44	4,37	8,4	15,2	13,28	46,94
SCC33	1	-1	0	1	715	1,95	4,98	8,1	15,9	19,30	49,10
SCC34	1	1	0	-1	715	1,17	3,73	9,5	16,3	12,75	38,06
SCC35	1	0	0	-1	720	1,23	3,90	8,4	16,5	11,71	41,49
SCC36	1	-1	0	-1	720	1,10	3,86	9,2	16,9	10,37	39,45
SCC37	-1	1	1	1	730	1,43	3,29	10,4	17,8	12,13	44,24
SCC38	-1	0	1	1	735	1,29	3,03	10,8	17,4	10,34	41,83
SCC39	-1	-1	1	1	700	1,56	5,94	9,4	16,3	17,76	55,51
SCC40	-1	1	1	-1	705	1,46	4,08	10,0	17,5	20,28	41,46
SCC41	-1	0	1	-1	740	1,36	3,59	9,8	19,7	13,11	40,20
SCC42	-1	-1	1	-1	740	1,43	4,17	10,5	20,1	14,31	39,07
SCC43	0	1	1	1	730	1,34	3,33	9,9	19,6	9,60	34,93
SCC44	0	0	1	1	780	1,22	2,67	12,6	23,2	7,13	33,39

Dunnett là phương pháp so sánh các trị trung bình của hai nhóm nguyên vật liệu còn lại với nhóm mặc định. LSD là kiểm định trung bình lần lượt cho từng cặp trung bình nhóm hàm lượng nguyên vật liệu sử dụng.

Đối với ảnh hưởng của phụ gia hóa học, biến chỉ có hai mức ảnh hưởng, sử dụng phương pháp kiểm định trung bình tổng thể Independent Samples T-Test để đánh giá qua giá trị hệ số Sig. Levene và Sig. (2-tailed) ở mức ý nghĩa 5% [15].

SCC45	0	-1	1	1	770	1,17	2,60	12,5	22,9	5,07	33,20
SCC46	0	1	1	-1	710	1,37	3,72	9,0	18,1	18,07	34,90
SCC47	0	0	1	-1	750	1,36	3,45	9,5	20,3	11,00	35,70
SCC48	0	-1	1	-1	780	1,19	3,02	11,6	22,4	12,88	33,20
SCC49	1	1	1	1	760	1,29	3,50	11,9	21,4	3,13	36,00
SCC50	1	0	1	1	810	1,04	2,33	13,8	24,6	4,00	31,20
SCC51	1	-1	1	1	830	1,03	2,32	14,0	25,8	0,00	32,96
SCC52	1	1	1	-1	790	1,18	2,47	12,0	23,2	3,89	32,10
SCC53	1	0	1	-1	755	1,27	3,35	9,8	20,8	5,00	34,28
SCC54	1	-1	1	-1	810	1,30	2,00	13,5	25,5	11,71	26,00

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Việc phân tích và đánh giá ảnh hưởng của từng thành phần nguyên vật liệu đến các thông số kỹ thuật về tính công tác, tính lưu biến và khả năng bơm bằng các phương pháp phân tích phương sai với mức ý nghĩa 5% được trình bày trong Bảng 4 đến Bảng 9.

3.1 Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị độ chảy xòe

Từ kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị độ chảy xòe trên Bảng 3, giá trị hệ số Sig. Levene của tro bay, silica fume > 0,05 thì phương sai là đồng nhất, có nghĩa là không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về ảnh hưởng của tro bay và silica fume đến độ chảy xòe của BTTL. Tiếp tục phân tích với ANOVA, giá trị hệ số Sig.F đối với tro bay và silica fume lần lượt là 0,579 và 0,640, cho thấy Sig.F > 0,05, là không có sự khác biệt trung bình về độ xòe với các hàm lượng thay đổi của tro bay và silica fume. Khi hàm lượng tro bay càng tăng, độ chảy xòe càng tăng. Việc kết hợp tro bay với silica fume sẽ giúp hỗn hợp BTTL tăng tính công tác nhờ vào hình dạng và sự phân bố kích thước hạt của chúng, kích thước hạt bé sẽ giúp tạo lớp màng bao bọc hạt cốt liệu, với dạng hình cầu sẽ giúp các hạt cốt liệu dễ dàng trượt lên nhau, làm giảm độ nhớt dẻo từ đó hỗn hợp BTTL sẽ tăng khả năng chảy.

Tỉ lệ N/CKD là 0,35 cho độ chảy xòe cao hơn so với tỉ lệ N/CKD là 0,33. Khi N/CKD là 0,37 thì độ chảy xòe quá cao, đôi khi vượt quá mức yêu cầu, làm hỗn hợp BTTL dễ bị lắng, gây phân tầng. Với mục tiêu yêu cầu của các cấp phối nghiên cứu, các cấp phối có N/CKD là 0,35 đều cho giá trị đạt yêu cầu, hầu hết cấp phối với N/CKD là 0,33 thì cho kết quả ngược lại. Với N/CKD là 0,33, hỗn hợp BTTL có độ nhớt dẻo tương đối lớn, chưa đủ lượng nước tự do giúp hỗn hợp bê tông chảy tốt.

3.2 Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị T_{500}

Xét ảnh hưởng đến giá trị T_{500} trên Bảng 4, giá trị hệ số Sig. Levene và Sig.F của silica fume > 0,05, là không có sự khác biệt trung bình về T_{500} với các hàm lượng thay đổi của silica fume. Còn giá trị hệ số Sig. Levene của tro bay là 0,007 < 0,05 thì phương sai là không đồng nhất, có nghĩa là có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về ảnh hưởng của tro bay đến giá trị T_{500} của BTTL. Tiếp tục phân tích kiểm định Robust, giá trị hệ số Sig. Welch là 0,174 > 0,05, là không có sự khác biệt trung bình về giá trị T_{500} với các hàm lượng thay đổi của tro bay.

Khi xét ảnh hưởng của tỉ lệ N/CKD đến giá trị độ chảy xòe và T_{500} , giá trị hệ số Sig. Levene của tỉ lệ N/CKD < 0,05, thì phương sai là không đồng nhất, kiểm tra tiếp với Robust Tests thì Sig. Welch < 0,0001, nên có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về ảnh hưởng của tỉ lệ N/CKD đến giá trị độ chảy xòe và T_{500} của BTTL. Tuy nhiên, để biết mức độ ảnh hưởng này như thế nào, cần tiếp tục phân tích sâu Dunnnett's T3. Kết quả tất cả giá trị Sig. trong phân tích sâu này đều < 0,0001, có nghĩa sự khác biệt đó đến từ tất cả các tỉ lệ N/CKD đang xét khi so sánh với nhau. Điều đó cho thấy khi thay đổi tỉ lệ N/CKD có ảnh hưởng đến độ chảy xòe và giá trị T_{500} của hỗn hợp BTTL.

Xét ảnh hưởng của phụ gia hóa học, giá trị Sig. (2-tailed) là 0,530 và 0,779 đều > 0,05 nên không có sự khác biệt trung bình về độ xòe và T_{500} với các hàm lượng thay đổi của SP.

Hầu hết cấp phối có N/CKD là 0,35 và 0,37 đều cho thời gian chảy T_{500} thấp hơn khi N/CKD là 0,33. Có thể giải thích do lượng nước tự do trong hỗn hợp BTTL cao hơn khi N/CKD là 0,33, nên dễ dàng thâm nhập vào trong các khe nứt của những hạt rắn và làm dày thêm màng nước bao bọc quanh chúng, làm giảm lực hút phân tử, lực mao dẫn mất đi, độ nhớt của hồ xi măng cũng như của hỗn hợp BTTL cũng sẽ giảm đi, khả năng chảy cũng sẽ tốt hơn. Như vậy hàm lượng nước quyết định rất lớn với khả năng chảy nhưng vẫn phải khống chế trong tầm kiểm soát để tránh hiện tượng phân tầng tách nước.

3.3 Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị T_v

Từ kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị T_v trên Bảng 5, giá trị hệ số Sig. Levene và Sig.F của silica fume đều > 0,05 là không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê và không có sự khác biệt trung bình về T_v với các hàm lượng thay đổi của silica fume.

Còn giá trị hệ số Sig. Levene của tro bay là 0,149 > 0,05 thì phương sai là đồng nhất, có nghĩa là không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về ảnh hưởng của tro bay đến giá trị T_v của BTTL. Nhưng giá trị hệ số Sig.F của tro bay là 0,046 < 0,05 nên tiếp tục phân tích sâu LSD, giá trị hệ số Sig. khi thay đổi từ việc thay thế 15% tro bay đến 25% là 0,014 < 0,05, là thực sự có ý nghĩa thống kê, có nghĩa là việc thay đổi hàm lượng của tro bay thay thế cho xi măng theo khối lượng từ 15 đến 25% ảnh hưởng đến giá trị T_v .

Giá trị hệ số Sig. Levene của tỉ lệ N/CKD < 0,05 và Sig. Welch < 0,0001, nên có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về ảnh hưởng của tỉ lệ N/CKD đến giá trị độ T_v của BTTL. Kết quả phân tích sâu Dunnnett's T3 cho thấy tất cả giá trị Sig. trong phân tích sâu này cũng đều < 0,0001. Điều đó cho thấy khi thay đổi tỉ lệ N/CKD có ảnh hưởng đến giá trị T_v của hỗn hợp BTTL.

Xét ảnh hưởng của phụ gia hóa học, giá trị Sig. (2-tailed) là 0,825 > 0,05 nên không có sự khác biệt trung bình về giá trị T_v với các hàm lượng thay đổi của hàm lượng SP.

Hỗn hợp BTTL có N/CKD là 0,33 cho thời gian chảy T_v cao hơn khi N/CKD là 0,35 và 0,37, mặc dù chênh lệch không cao lắm nhưng khi áp dụng vào thi công thời gian chảy càng thấp sẽ giúp tăng tiến độ của công trình, tiết kiệm được khá nhiều chi phí phát sinh trong lúc thi công.

3.4 Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị τ_0 và μ

Từ kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị τ_0 và μ trên Bảng 6 và Bảng 7, giá trị hệ số Sig. Levene và Sig.F của silica fume đều > 0,05 là không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê và không có sự khác biệt trung bình về τ_0 và μ với các hàm lượng thay đổi của silica fume.

Xét ảnh hưởng của tro bay đến giá trị τ_0 và μ , giá trị hệ số Sig. Levene của tro bay đều $> 0,05$ thì phương sai là đồng nhất. Nhưng giá trị hệ số Sig.F của tro bay trên Bảng 6 và Bảng 7 đều $< 0,05$, nên tiếp tục phân tích sâu LSD. Kết quả giá trị hệ số Sig. khi thay đổi từ việc thay thế 15% tro bay đến 25% lần lượt là 0,04 đối với τ_0 và 0,012 đối với μ đều $< 0,05$, là thực sự có ý nghĩa thống kê, có nghĩa là việc thay đổi hàm lượng của tro bay thay thế cho xi măng theo khối lượng từ 15 đến 25% ảnh hưởng đến giá trị τ_0 và μ .

Giá trị hệ số Sig. Levene của tỉ lệ N/CKD $> 0,05$, Sig. F $< 0,0001$ và kết quả phân tích sâu LSD cho thấy tất cả giá trị Sig. trong phân tích sâu này cũng đều $< 0,0001$. Điều đó cho thấy khi thay đổi tỉ lệ N/CKD có ảnh hưởng đến giá trị τ_0 và μ của hỗn hợp BTTL.

Xét ảnh hưởng của phụ gia hóa học, giá trị Sig. (2-tailed) là 0,572 $> 0,05$ nên không có sự khác biệt trung bình về τ_0 và μ với các hàm lượng thay đổi của hàm lượng SP.

Bảng 3- Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị độ chảy xòe

Yếu tố nguyên vật liệu	Sig. Levene	Sig. F	Sig. Welch	Sig. (2-tailed)	Phân tích sâu Dunnett's T3			
FA	0,579	1,99	-	-	-			
S	0,640	0,858	-	-	-			
N/CKD	<0,0001	-	<0,0001	-		N/CKD (I)	N/CKD (J)	Sig.
						0,33	0,35	0,000
							0,37	0,000
						0,35	0,33	0,000
							0,37	0,000
						0,37	0,33	0,000
							0,35	0,000
SP	0,343	-	-	0,530	-			

Bảng 4- Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị T_{500}

Yếu tố nguyên vật liệu	Sig. Levene	Sig. F	Sig. Welch	Sig. (2-tailed)	Phân tích sâu Dunnett T3			
FA	0,007	-	0,174	-	-			
S	0,972	0,988	-	-	-			
N/CKD	<0,0001	-	<0,0001	-	N/CKD (I)	N/CKD (J)	Sig.	
					0,33	0,35	0,000	
						0,37	0,000	
					0,35	0,33	0,000	
						0,37	0,007	
					0,37	0,33	0,000	
						0,35	0,007	
SP	0,343	-	-	0,779	-			

Bảng 5- Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị T_v

Yếu tố nguyên vật liệu	Sig. Levene	Sig. F	Sig. Welch	Sig. (2-tailed)	Phân tích sâu Dunnett's T3/LSD																					
FA	0,149	0,046	-	-	LSD<table><tr><th>FA (I)</th><th>FA (J)</th><th>Sig.</th></tr><tr><td>0,15</td><td>0,20</td><td>0,132</td></tr><tr><td></td><td>0,25</td><td>0,014</td></tr><tr><td>0,20</td><td>0,15</td><td>0,132</td></tr><tr><td></td><td>0,25</td><td>0,317</td></tr><tr><td>0,25</td><td>0,15</td><td>0,014</td></tr><tr><td></td><td>0,20</td><td>0,317</td></tr></table>	FA (I)	FA (J)	Sig.	0,15	0,20	0,132		0,25	0,014	0,20	0,15	0,132		0,25	0,317	0,25	0,15	0,014		0,20	0,317
FA (I)	FA (J)	Sig.																								
0,15	0,20	0,132																								
	0,25	0,014																								
0,20	0,15	0,132																								
	0,25	0,317																								
0,25	0,15	0,014																								
	0,20	0,317																								
S	0,883	0,944	-	-	-																					
N/CKD	0,003	-	<0,0001	-	Dunnett<table><tr><th>N/CKD (I)</th><th>N/CKD (J)</th><th>Sig.</th></tr><tr><td>0,33</td><td>0,35</td><td>0,000</td></tr><tr><td></td><td>0,37</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,35</td><td>0,33</td><td>0,000</td></tr><tr><td></td><td>0,37</td><td>0,000</td></tr><tr><td>0,37</td><td>0,33</td><td>0,000</td></tr><tr><td></td><td>0,35</td><td>0,000</td></tr></table>	N/CKD (I)	N/CKD (J)	Sig.	0,33	0,35	0,000		0,37	0,000	0,35	0,33	0,000		0,37	0,000	0,37	0,33	0,000		0,35	0,000
N/CKD (I)	N/CKD (J)	Sig.																								
0,33	0,35	0,000																								
	0,37	0,000																								
0,35	0,33	0,000																								
	0,37	0,000																								
0,37	0,33	0,000																								
	0,35	0,000																								
SP	0,405	-	-	0,825	-																					

Bảng 6- Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị ứng suất chảy τ_0

Bảng 5. Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị ứng suất chảy %

Yếu tố nguyên vật liệu	Sig. Levene	Sig. F	Sig. Welch	Sig. (2-tailed)	Phân tích sâu LSD		
FA	0,156	0,015	-	-	FA (I)	FA (J)	Sig.
					0,15	0,20	0,075
						0,25	0,004
					0,20	0,15	0,075
						0,25	0,244
					0,25	0,15	0,004
						0,20	0,244
S	0,839	0,917	-	-	-		
N/CKD	0,109	<0,0001	-	-	N/CKD (I)	N/CKD (J)	Sig.
					0,33	0,35	0,000
						0,37	0,000
					0,35	0,33	0,000
						0,37	0,001
					0,37	0,33	0,000
						0,35	0,001
SP	0,206	-	-	0,325	-		

 Bảng 7- Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị độ nhớt dẻo μ

Bảng 7. Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị độ nhớt

Yếu tố nguyên vật liệu	Sig. Levene	Sig. F	Sig. Welch	Sig. (2-tailed)	Phân tích sâu LSD		
FA	0,908	0,038	-	-	FA (I)	FA (J)	Sig.
					0,15	0,20	0,102
						0,25	0,012
					0,20	0,15	0,102
						0,25	0,348
					0,25	0,15	0,012
						0,20	0,348
S	0,555	0,936	-	-	-		
N/CKD	0,2	<0,0001	-	-	N/CKD (I)	N/CKD (J)	Sig.
					0,33	0,35	0,000
						0,37	0,000
					0,35	0,33	0,000
						0,37	0,000
					0,37	0,33	0,000
						0,35	0,000
SP	0,323	-	-	0,572	-		

Bảng 8- Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến tỉ lệ phân tầng SR

Yếu tố nguyên vật liệu	Sig. Levene	Sig. F	Sig. Welch	Sig. (2-tailed)	Phân tích sâu Dunnett's T3		
FA	0,394	0,166	-	-	-		
S	0,887	0,853	-	-	-		
N/CKD	<0,0001	-	<0,0001	-	N/CKD (I)	N/CKD (J)	Sig.
					0,33	0,35	0,000
						0,37	0,000
					0,35	0,33	0,000
						0,37	0,000
					0,37	0,33	0,000
						0,35	0,000
SP	0,540	-	-	0,432	-		

Bảng 9- Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến giá trị lượng nước tách ra V trong thí nghiệm tách nước

Yếu tố nguyên vật liệu	Sig. Levene	Sig. F	Sig. Welch	Sig. (2-tailed)	Phân tích sâu Dunnett's T3		
FA	0,905	0,081	-	-	-		
S	0,598	0,983	-	-	-		
N/CKD	0,086	<0,0001	-	-	N/CKD (I)	N/CKD (J)	Sig.
					0,33	0,35	0,000
						0,37	0,000
					0,35	0,33	0,000
						0,37	0,000
					0,37	0,33	0,000
SP	0,573	-	-	0,944		0,35	0,000
					-		

3.5 Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến tỉ lệ phân tầng SR và lượng nước tách ra V

Kết quả phân tích ảnh hưởng của thành phần nguyên vật liệu đến tỉ lệ phân tầng SR và lượng nước tách ra V trên Bảng 8 và Bảng 9. Các giá trị hệ số Sig. Levene và Sig.F của tro bay và silica fume đều > 0,05 là không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê và không có sự khác biệt trung bình về tỉ lệ SR và giá trị V với các hàm lượng thay đổi của tro bay và silica fume.

Giá trị hệ số Sig. Levene của tỉ lệ N/CKD < 0,05 và Sig. Welch < 0,0001 và kết quả phân tích sâu Dunnett's T3 cho thấy tất cả giá trị Sig. trong phân tích sâu này cũng đều < 0,0001. Điều đó cho thấy khi thay đổi tỉ lệ N/CKD có ảnh hưởng đến tỉ lệ SR và giá trị V của hỗn hợp BTTL.

Xét ảnh hưởng của phụ gia hóa học, giá trị Sig. (2-tailed) là 0,572 > 0,05 nên không có sự khác biệt trung bình về tỉ lệ SR và giá trị V với các hàm lượng thay đổi của hàm lượng SP.

Tỉ lệ phân tầng của các mẫu đều nằm trong vùng cho phép là < 15%, đạt yêu cầu về khả năng kháng phân tầng cao. Ngoài ra, đồ thị này còn cho thấy sự tỉ lệ nghịch giữa giá trị T_v và tỉ lệ phân tầng. Cụ thể nếu như giá trị T_v càng tăng thì tỉ lệ phân tầng SR càng giảm do độ nhớt trong hỗn hợp lớn nên khả năng giữ vữa càng cao, dẫn tới tỉ lệ phân tầng SR càng giảm. Ngược lại, nếu như giá trị T_v càng nhỏ đồng nghĩa độ nhớt của hỗn hợp càng thấp, lực liên kết giữa các phân tử trở nên yếu đi, làm cho hỗn hợp BTTL kém bền vững, dẫn tới khả năng giữ vữa kém và từ đó tỉ lệ phân tầng SR tăng lên tương ứng.

4. KẾT LUẬN

Kết quả phân tích phương sai một yếu tố ANOVA đánh giá chính xác mức độ ảnh hưởng của tro bay, silica fume, tỉ lệ N/CKD và hàm lượng phụ gia hóa học đến tính công tác, tính lưu biến và khả năng bơm của BTTL. Với mức ý nghĩa 5%, kết hợp phân tích sâu Dunnett's T3 hoặc LSD khi có sự khác biệt.

Tất cả các thành phần nguyên vật liệu đều có ảnh hưởng đến các thông số kỹ thuật về tính công tác, tính lưu biến và khả năng bơm của hỗn hợp BTTL. Tuy nhiên, trong các cấp phối nghiên cứu, sự thay đổi tỉ lệ N/CKD ảnh hưởng đáng kể đến các thông số kỹ thuật về tính công tác thông qua giá trị độ chảy xòe, T_{500} , T_v và tính lưu biến thông qua giá trị độ nhớt dẻo (μ) và ứng suất chảy (τ_0). Khi xét mức độ ảnh hưởng của N/CKD thì phương sai là không đồng nhất (Sig. Levene < 0,05), kiểm tra tiếp với Robust Tests (Sig. Welch < 0,0001), tiếp tục phân tích sâu Dunnett's T3 (Sig. < 0,0001), có nghĩa sự khác biệt đó đến từ tất cả các tỉ lệ N/CKD đang xét khi so sánh với nhau.

Vì vậy, cần xét thêm ảnh hưởng của tỉ lệ N/CKD đến các thông số kỹ thuật của hỗn hợp BTTL trong các nghiên cứu tiếp theo.

Lời cảm ơn

Tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG TP.HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Q. Feng *et al.*, "Study on Ultra High Performance-Self Compacting Concrete (UHP-SCC) and Its Ultra High-Rise Pumping Technology," in *Proceedings of the 35th Conference on Our World in Concrete & Structures*, CI-Premier PTE LTD, Singapore, 2010.
- [2] 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>.
- [3] K. H. Khayat, "Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating," *ACI Mater. J.*, vol. 96, no. M43, pp. 346-353, 1999.
- [4] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, vol. Fourth. 2011. doi: 10.4135/9781412975704.n88.
- [5] F. Ghomari, S. M. A. Boukli Hacene, and O. Taleb, "Study of limestone addition on the mechanical and rheological characteristics in the SCC," *Jordan J. Civ. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 412-423, 2011.
- [6] D. Raharjo, A. Subakti, and Tavo, "Mixed concrete optimization using fly ash, silica fume and iron slag on the SCC's compressive strength," *Procedia Eng.*, vol. 54, pp. 827-839, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.03.076.
- [7] M. Şahmaran, Z. Bilici, E. Ozbay, T. K. Erdem, H. E. Yucel, and M. Lachemi, "Improving the workability and rheological properties of Engineered Cementitious Composites using factorial experimental design," *Compos. Part B Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 356-368, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.08.015.
- [8] A. Chatterjee and D. Das, "Assessing flow response of self-compacting mortar by taguchi method and ANOVA interaction," *Mater. Res.*, vol. 16, no. 5, pp. 1084-1091, 2013, doi: 10.1590/S1516-14392013005000083.
- [9] M. Uysal, V. Akyuncu, H. Tanyildizi, M. Sumer, and H. Yildirim, "Optimization of durability properties of concrete containing fly ash using Taguchi's approach and Anova analysis," *Rev. la Constr.*, vol. 17, no. 3, pp. 364-382, 2019, doi: 10.7764/RDLC.17.3.364.
- [10] ACI (American Concrete Institute), "Self-Consolidating Concrete," USA, ACI 237R-07, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2007.
- [11] Tiêu chuẩn Việt Nam, "TCVN 12209-2018-Bê tông tự lèn-Yêu cầu kỹ thuật và Phương pháp thử," 2018.
- [12] European Norms, "Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump-flow test," *En 12350-8:2010*. 2010.
- [13] SCC European Project Group, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete : Specification, Production and Use," 2005.
- [14] E. P. Koehler and D. W. Fowler, "ICAR Mixture Proportioning Procedure for Self-Consolidating Concrete," 2007.
- [15] T. Hoang and N. M. N. Chu, *Phân tích dữ liệu nghiên cứu với SPSS*, ĐH Kinh tế TP.HCM: NXB Hồng Đức, 2008.