

Đánh giá khả năng ứng dụng bê tông geopolimer tro bay sử dụng cát biển cho mặt đường lắp ghép trên đường giao thông nông thôn tại Việt Nam

Assessment of the applicability of sea-sand fly ash geopolimer concrete for precast rural road pavements in Vietnam

> TS TRẦN TRUNG HIẾU

Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

Email: hieutrantrung@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá khả năng ứng dụng bê tông geopolimer tro bay sử dụng cát biển cho tấm mặt đường giao thông nông thôn trong điều kiện Việt Nam. Hai nguồn cát biển tại Hải Hòa (Thanh Hóa) và Nam Ô (Đà Nẵng) được rửa sạch, phơi/sấy khô và sử dụng làm cốt liệu mịn. Các hỗn hợp geopolimer sử dụng tro bay Phả Lại, dung dịch hoạt hóa NaOH - Na₂SiO₃ và được bảo dưỡng ở 60°C trong 24 giờ. Kết quả cho thấy ở tuổi 28 ngày, các hỗn hợp GPT30 và GPT35 đạt cường độ nén đặc trưng 30,87 - 36,45 MPa, cường độ kéo uốn 3,51 - 4,38 MPa, cường độ kéo ép chệch 3,23 - 3,62 MPa và mô-đun đàn hồi 22,51 - 26,00 GPa. Hỗn hợp GPT35 đáp ứng tốt hơn yêu cầu chịu kéo uốn của vật liệu mặt đường. Trên cơ sở các đặc trưng cơ học và mô hình tấm hữu hạn trên nền đàn hồi, nghiên cứu đề xuất tấm chữ nhật (0,5×1,0)m với chiều dày 10 - 24 cm tùy cấp đường, lưu lượng xe và cấp phối bê tông. Kết quả cho thấy vật liệu có tiềm năng áp dụng cho đường giao thông nông thôn và đường cấp thấp tại khu vực ven biển, hải đảo. Tuy nhiên, trước khi áp dụng đại trà cần kiểm chứng thêm bằng thử nghiệm tấm nguyên kích thước, tải trọng lặp và độ bền trong môi trường biển.

Từ khóa: Bê tông geopolimer; tro bay; cát biển; mặt đường lắp ghép; đường giao thông nông thôn; vật liệu bền vững.

ABSTRACT

This study assesses the applicability of sea-sand fly ash geopolimer concrete to precast rural road pavement slabs under Vietnamese conditions. Washed sea sands collected from Hai Hoa (Thanh Hoa) and Nam O (Da Nang) were used as fine aggregates. The geopolimer mixtures incorporated Pha Lai fly ash and a NaOH - Na₂SiO₃ activator and were heat-cured at 60°C for 24h. At 28 days, the GPT30 and GPT35 mixtures achieved characteristic compressive strengths of 30.87 - 36.45 MPa, flexural strengths of 3.51 - 4.38 MPa, splitting tensile strengths of 3.23 - 3.62 MPa and elastic moduli of 22.51 - 26.00 GPa. GPT35 provided the more suitable flexural performance for pavement applications. Based on the measured mechanical properties and a finite-slab-on-elastic-foundation approach, rectangular slabs measuring (0.5×1.0)m and 10 - 24 cm in thickness are proposed for different road classes and traffic levels. The results demonstrate the potential of this material for rural and low-volume roads in coastal and island areas. Full-scale slab tests, repeated loading and marine durability assessments are nevertheless required before widespread implementation.

Keywords: Geopolimer concrete; fly ash; sea sand; precast pavement; rural roads; sustainable materials.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhu cầu cát làm cốt liệu cho bê tông và xây dựng hạ tầng giao thông tại Việt Nam ngày càng tăng, trong khi nguồn cát sông có xu

hướng khan hiếm và việc khai thác quá mức gây nhiều tác động bất lợi đến lòng dẫn và môi trường. Tại các khu vực ven biển và hải đảo, chi phí vận chuyển vật liệu từ đất liền còn làm tăng đáng kể giá

thành xây dựng. Vì vậy, khai thác hợp lý nguồn cát biển địa phương kết hợp sử dụng tro bay là một hướng tiếp cận có ý nghĩa về tài nguyên và môi trường.

Bê tông geopolymer tro bay sử dụng chất kết dính aluminosilicat hoạt hóa kiềm thay cho xi măng Portland. Nhiều nghiên cứu cho thấy loại vật liệu này có thể đạt cường độ cao, phát triển cường độ sớm tốt khi bảo dưỡng nhiệt và có tiềm năng kháng một số tác nhân xâm thực [1-4]. Tuy nhiên, cát biển có thành phần hạt, hàm lượng muối và tạp chất thay đổi theo vị trí khai thác, do đó khả năng sử dụng cần được đánh giá bằng nguồn vật liệu cụ thể.

Bảo dưỡng nhiệt tạo thuận lợi cho quá trình geopolymer hóa nhưng làm hạn chế khả năng thi công đổ tại chỗ. Công nghệ đúc sẵn giải quyết được “điểm nghẽn” này vì hỗn hợp có thể được định lượng, tạo hình và bảo dưỡng trong điều kiện kiểm soát trước khi vận chuyển đến công trường. Đối với đường lưu lượng thấp, tấm lắp ghép còn có ưu điểm thi công nhanh, giảm công việc ướt tại hiện trường và dễ thay thế cục bộ khi hư hỏng.

Mục tiêu của nghiên cứu là: (i) Đánh giá các đặc trưng cơ học của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hai nguồn cát biển Việt Nam; (ii) xác định phạm vi cấp phối phù hợp cho vật liệu mặt đường và

Bảng 1. Một số đặc trưng của cát biển sử dụng trong nghiên cứu

Chỉ tiêu	Đơn vị	Hải Hòa - Thanh Hóa	Nam Ô - Đà Nẵng
Khối lượng riêng	g/cm ³	2,48	2,57
Khối lượng thể tích xốp	g/cm ³	1,30	1,37
Hàm lượng bụi, bùn, sét	%	1,15	0,92
Mô đun độ lớn	-	2,10	2,20
Hàm lượng mica	%	0,55	0,43
Hàm lượng muối	%	0,010	0,008

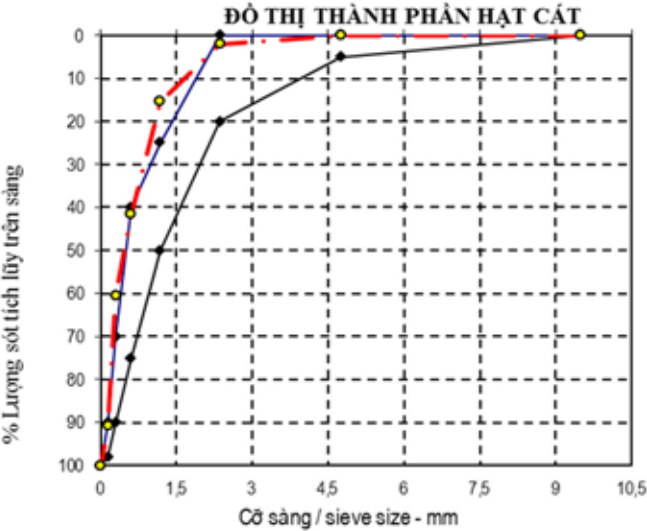
(iii) đề xuất sơ bộ chiều dày tấm mặt đường lắp ghép cho đường cấp thấp và đường giao thông nông thôn. Phạm vi nghiên cứu giới hạn ở thí nghiệm vật liệu trong phòng và tính toán kết cấu; chưa bao gồm thử tải tấm nguyên kích thước và quan trắc đoạn đường thử nghiệm.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

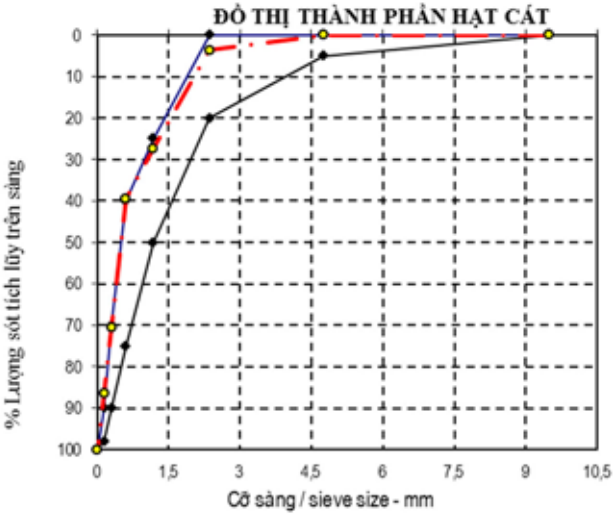
2.1. Vật liệu chế tạo

Chất kết dính sử dụng tro bay Phả Lại. Dung dịch hoạt hóa gồm NaOH và Na₂SiO₃ với tỷ lệ khối lượng Na₂SiO₃/NaOH bằng 2,5. Cốt liệu thô là đá dăm Phú Lý có cỡ hạt lớn nhất danh định 12,5 mm, khối lượng riêng 2,717 g/cm³, độ hút nước 0,76% và độ mài mòn Los Angeles 22,36%.

Cốt liệu mịn gồm cát biển lấy tại Hải Hòa - Thanh Hóa (ký hiệu TH) và Nam Ô - Đà Nẵng (ký hiệu ĐN). Cát được rửa bằng nước sạch, phơi/sấy khô trước khi phối trộn. Một số đặc trưng chính được trình bày ở Bảng 1. Hàm lượng muối của cả hai nguồn sau xử lý đều ở mức thấp. Tuy nhiên, sự khác nhau về cấp phối hạt có thể ảnh hưởng đến độ đặc chắc và tính chất cơ học của hỗn hợp.



a) - Cát biển Hải Hòa - Thanh Hóa



b) - Cát biển Nam Ô - Đà Nẵng

Hình 1. Biểu đồ thành phần hạt của hai nguồn cát biển

2.2. Thành phần hỗn hợp và chế tạo mẫu

Các cấp phối được thiết kế theo phương pháp thể tích - khối lượng tham khảo từ Hardjito và Rangan [2, 3]. Tổng lượng cốt liệu chiếm 77% khối lượng bê tông; cát chiếm 30% tổng lượng cốt liệu. Ba cấp phối mục tiêu 30, 35 và 40 MPa được xây dựng bằng cách thay đổi tỷ lệ dung dịch hoạt hóa/tro bay (AAS/FA) và tỷ lệ nước/chất kết dính. Thành phần cho 1 m³ bê tông được trình bày tại Bảng 2.

Bảng 2. Thành phần vật liệu cho 1 m³ bê tông geopolymere tro bay (GPT)

Cấp phối	Đá (kg)	Cát (kg)	Tro bay (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH (kg)	Nước (kg)	AAS/FA
GPT30	1293,6	554,4	380,69	122,36	48,95	121,44	0,45
GPT35	1293,6	554,4	394,29	112,65	45,06	110,40	0,40
GPT40	1293,6	554,4	408,89	102,22	40,89	99,36	0,35

Tro bay và cốt liệu được trộn khô khoảng 3 phút trong máy trộn cưỡng bức. Dung dịch hoạt hóa và nước được bổ sung, sau đó trộn tiếp 4 phút. Mẫu được đầm kết hợp chọc và rung, phủ kín để hạn chế mất nước, bảo dưỡng ở 60°C trong 24 giờ, để nguội khoảng 6 giờ trước khi tháo khuôn và tiếp tục lưu trong phòng thí nghiệm.

2.3. Chương trình thí nghiệm

Cường độ nén được xác định trên mẫu trụ (150×300)mm theo ASTM C39 [7] tại 7, 14 và 28 ngày; cường độ kéo uốn trên dầm (150×150×600)mm theo ASTM C78 [8]; cường độ kéo ép chèn theo ASTM C496 [9]; mô-đun đàn hồi tính theo ASTM C469 [10]. Mỗi tổ gồm 6 mẫu. Giá trị đặc trưng được quy ước theo biểu thức $R_{dt} = R_{tb} - 1,645s$, trong đó R_{tb} là giá trị trung bình và s là độ lệch chuẩn của tổ mẫu. Do số mẫu của mỗi tổ còn hạn chế, giá trị này được sử dụng để so sánh nội bộ giữa các cấp phối, không thay thế cho đánh giá thống kê trên quy mô sản xuất.

Cả ba cấp phối GPT30, GPT35 và GPT40 được thử cường độ nén ở tuổi 28 ngày. Các chỉ tiêu kéo uốn, kéo ép chèn và mô-đun đàn hồi được phân tích cho GPT30 và GPT35 theo bộ số liệu thí nghiệm hiện có. Vì vậy, các kết luận về khả năng làm mặt đường tập trung vào hai cấp phối này.

2.4. Phương pháp đánh giá tấm mặt đường lắp ghép

Tấm được mô hình hóa như tấm hữu hạn đặt trên nền đàn hồi. Chỉ số độ mềm S phụ thuộc mô-đun đàn hồi của bê tông, mô-đun

đàn hồi chung trên mặt móng, hệ số Poisson, chiều dày và kích thước tấm. Mô-men uốn tổng cộng được xét từ tải trọng bánh xe và ảnh hưởng truyền lực giữa các tấm. Chiều dày được xác định theo điều kiện ứng suất kéo uốn cho phép, có xét hệ số chiết giảm cường độ. Cách tiếp cận tính toán kế thừa phương pháp TCCS 39:2022 [12] đã sử dụng trong đề tài [13]; khi triển khai dự án thực tế cần kiểm tra lại theo hệ thống tiêu chuẩn và tải trọng thiết kế hiện hành.

Phương án khảo sát sử dụng tấm chữ nhật không cốt thép kích thước (0,5×1,0)m trên lớp móng cấp phối đá dăm hoặc cấp phối thiên nhiên dày 10 - 18 cm. Việc lựa chọn tấm không cốt thép nhằm giảm nguy cơ ăn mòn cốt thép trong môi trường biển; giải pháp liên kết và truyền lực tại khe cần được thiết kế riêng cho công trình cụ thể.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

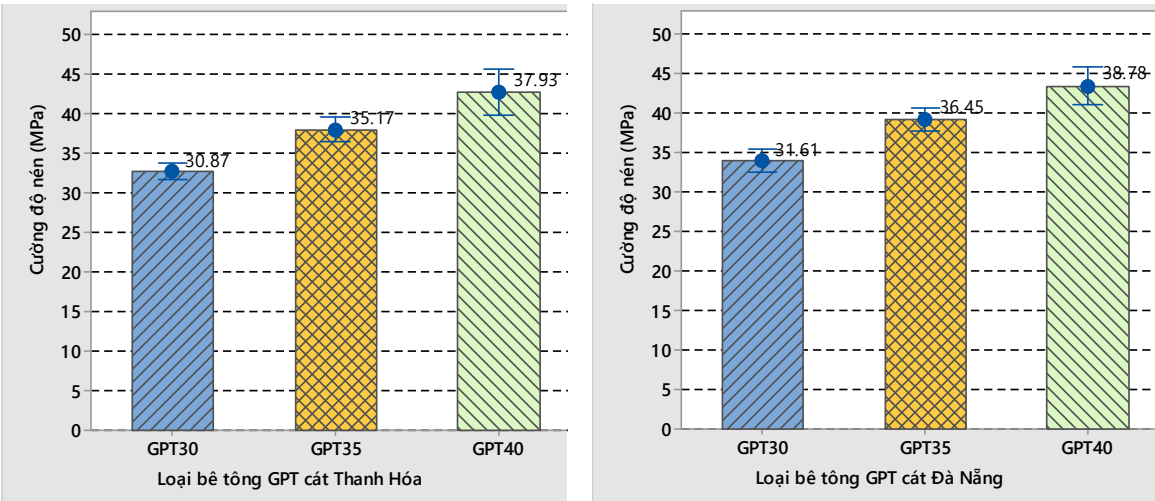
3.1. Cường độ nén và sự phát triển cường độ

Ở tuổi 28 ngày, cường độ nén đặc trưng của GPT30 và GPT35 đạt lần lượt 30,87 - 31,61 MPa và 35,17 - 36,45 MPa. Cát Nam Ô cho kết quả cao hơn cát Hải Hòa từ khoảng 2,4% đến 3,6% đối với hai cấp phối này. Mức chênh lệch không lớn, nhưng nhất quán với mô-đun độ lớn cao hơn và hàm lượng bụi, bùn, sét thấp hơn của cát Nam Ô.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm cường độ nén bê tông ở 28 ngày

TT	Cường độ nén	Cát Thanh Hóa			Cát Đà Nẵng		
		GPT30	GPT35	GPT40	GPT30	GPT35	GPT40
1	Kết quả thí nghiệm, MPa	33,41	35,76	38,91	34,20	40,70	44,17
		33,42	40,02	44,37	31,91	39,40	44,36
		32,67	39,32	40,45	34,61	40,05	42,61
		30,79	37,86	42,00	32,80	39,48	43,55
		32,72	37,61	44,66	34,98	36,50	39,57
		33,63	37,56	46,12	35,48	39,43	46,59
2	Trung bình R_{tb} , MPa	32,77	38,02	42,75	34,00	39,26	43,47
3	Độ lệch chuẩn σ , MPa	1,16	1,74	2,94	1,46	1,71	2,86
4	Giá trị đặc trưng, MPa	30,87	35,17	37,93	31,61	36,45	38,78
5	Cường độ thiết kế, MPa	30,00	35,00	40,00	30,00	35,00	40,00
6	Tỷ số giá trị đặc trưng/cường độ thiết kế	1,03	1,00	0,95	1,05	1,04	0,97

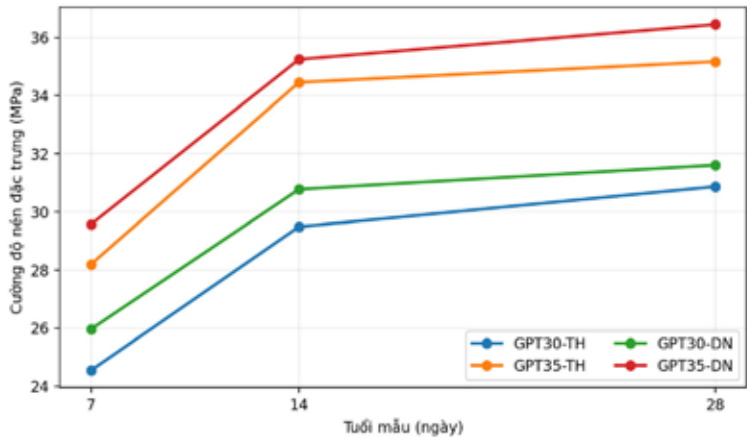
Kết quả cường độ nén trung bình và độ phân tán của các tổ mẫu ở tuổi 28 ngày được thể hiện trên Hình 2.



Hình 2. Kết quả thí nghiệm cường độ nén bê tông geopolimer tro bay ở 28 ngày

Các cấp phối GPT30 và GPT35 đều đạt hoặc vượt cường độ thiết kế. Ngược lại, GPT40 chỉ đạt 37,93 MPa với cát Thanh Hóa và 38,78 MPa với cát Đà Nẵng, tương ứng 95% và 97% giá trị thiết kế. Kết quả cho thấy việc giảm AAS/FA và lượng nước để hướng tới cường độ 40 MPa không tạo ra mức tăng cường độ tương ứng, có thể do tính công tác và khả năng đầm chặt suy giảm. Do đó, phạm vi không lớn hơn 35 MPa là lựa chọn thận trọng cho hệ vật liệu và chế độ chế tạo đang xét.

Mức cường độ thu được tương đương hoặc cao hơn kết quả khoảng 25 MPa của Shinde và Kadam [5] và phạm vi 31,88 - 35,19 MPa trong nghiên cứu tại Việt Nam [14]. Nghiên cứu của Lyu và cộng sự [6] đạt cường độ cao hơn khi sử dụng hệ chất kết dính và điều kiện cấp phối khác, điều này cho thấy không thể tách ảnh hưởng của cát biển khỏi loại tiền chất, chất hoạt hóa và chế độ bảo dưỡng khi so sánh giữa các công bố.



Hình 3. Sự phát triển cường độ nén đặc trưng của các cấp phối GPT30 và GPT35

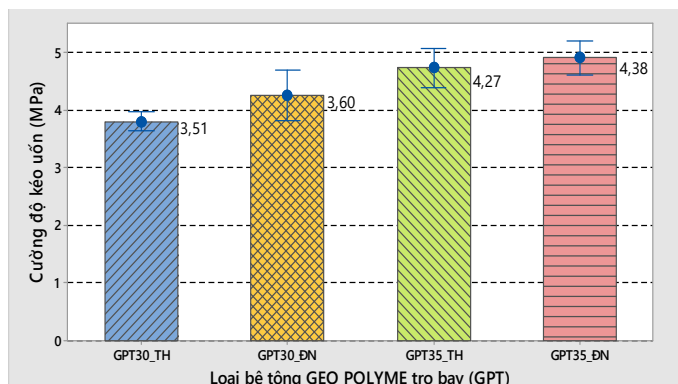
Sau bảo dưỡng nhiệt, cường độ phát triển nhanh: Tại 7 ngày đạt trung bình 80,75% và tại 14 ngày đạt 96,89% cường độ 28 ngày. Đặc điểm này phù hợp với sản xuất đúc sẵn vì cho phép rút ngắn chu kỳ khuôn và thời gian lưu kho. Tuy vậy, cường độ sớm không đồng nghĩa với khả năng chịu tải khai thác sớm của toàn bộ kết cấu; chất lượng khe nối và lớp tiếp xúc tấm - móng vẫn là các yếu tố chi phối.

3.2. Cường độ kéo và mô-đun đàn hồi

Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn và mô-đun đàn hồi ở 28 ngày của các tổ hợp mẫu bê tông thu được như sau:

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn ở 28 ngày

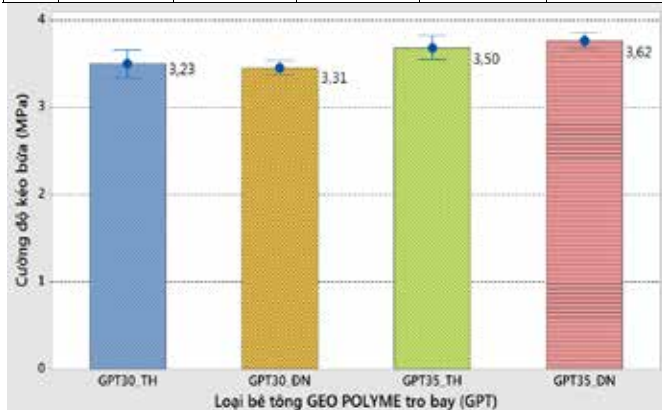
TT	Cường độ	Cát Thanh Hóa		Cát Đà Nẵng	
		GPT30_TH	GPT35_TH	GPT30_ĐN	GPT35_ĐN
1	Kết quả thí nghiệm, MPa	3,90	5,12	3,91	4,47
		3,89	5,13	4,07	4,81
		3,54	4,50	4,72	4,97
		3,79	4,80	4,55	5,13
		3,75	4,49	3,73	5,26
		3,99	4,42	4,61	4,83
2	Trung bình R_{tb} , MPa	3,81	4,74	4,26	4,91
3	Độ lệch chuẩn σ , MPa	0,18	0,29	0,40	0,32
4	Giá trị đặc trưng, MPa	3,51	4,27	3,60	4,38



Hình 4. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn bê tông geopolymer tro bay ở 28 ngày

Bảng 5. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi búa ở 28 ngày

TT	Cường độ	Cát Thanh Hóa		Cát Đà Nẵng	
		GPT30_TH	GPT35_TH	GPT30_DN	GPT35_DN
1	Kết quả thí nghiệm, MPa	3,55	3,83	3,49	3,68
		3,68	3,83	3,39	3,68
		3,27	3,60	3,49	3,87
		3,59	3,71	3,38	3,74
		3,53	3,55	3,39	3,72
		3,37	3,57	3,58	3,89
2	Trung bình R_{tb} , MPa	3,50	3,68	3,45	3,76
3	Độ lệch chuẩn σ , MPa	0,17	0,11	0,08	0,09
4	Giá trị đặc trưng, MPa	3,23	3,50	3,31	3,62

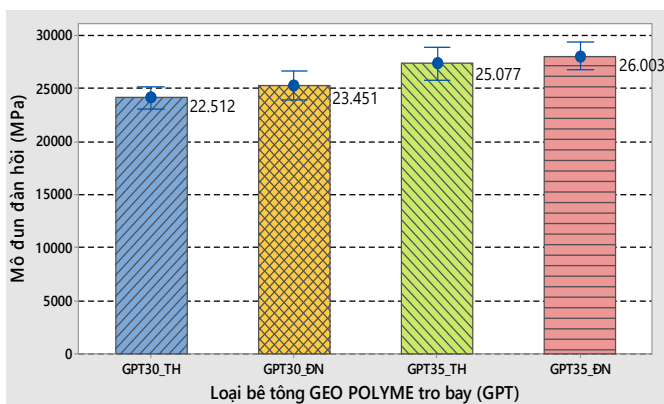


Hình 5. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi búa bê tông GPT ở 28 ngày

Bảng 6. Kết quả thí nghiệm mô-đun đàn hồi ở 28 ngày

TT	Mô-đun đàn hồi	Cát Thanh Hóa		Cát Đà Nẵng	
		GPT30	GPT35	GPT30	GPT35
1	Kết quả thí nghiệm, MPa	23.283	27.711	26.812	26.953
		23.671	29.333	26.831	29.280
		25.289	26.853	24.464	29.494
		24.885	25.897	25.593	27.822
		22.825	25.866	24.043	28.534
		25.017	28.732	24.164	26.393

2	Trung bình R_{tb} , MPa	24.162	27.399	25.318	28.079
3	Độ lệch chuẩn σ , MPa	1.006	1.415	1.138	1.266
4	Giá trị đặc trưng, MPa	22.512	25.077	23.451	26.003



Hình 6. Kết quả thí nghiệm mô-đun đàn hồi

Bảng 7. Tổng hợp các tính chất cơ học đặc trưng ở tuổi 28 ngày

Cấp phối	Cát	Nén (MPa)	Kéo uốn (MPa)	Ép chế (MPa)	Mô-đun (GPa)
GPT30	Thanh Hóa	30,87	3,51	3,23	22,51
GPT35	Thanh Hóa	35,17	4,27	3,50	25,08
GPT30	Đà Nẵng	31,61	3,60	3,31	23,45
GPT35	Đà Nẵng	36,45	4,38	3,62	26,00

Mặt đường cứng chủ yếu được kiểm soát bởi ứng suất kéo uốn. GPT35 đạt cường độ kéo uốn 4,27 - 4,38 MPa, cao hơn GPT30 (3,51 - 3,60 MPa), vì vậy có lợi thế hơn khi sử dụng cho tấm chịu tải trọng xe. Tỷ số kéo uốn/nén ở 28 ngày nằm trong khoảng 0,114 - 0,121. Từ bộ số liệu, quan hệ thực nghiệm được đề tài xác lập dưới dạng $R_{ku} = 0,68(R_n)^{1/2}$ với hệ số xác định hiệu chỉnh $R^2 = 0,750$. Quan hệ này chỉ nên sử dụng trong miền vật liệu và cường độ đã khảo sát.

Mô-đun đàn hồi tăng từ 22,51 - 23,45 GPa đối với GPT30 lên 25,08 - 26,00 GPa đối với GPT35. Giá trị này thấp hơn hoặc tương đương phần dưới của phạm vi thường gặp ở bê tông xi măng cùng cấp cường độ, làm thay đổi độ cứng tương đối tấm - móng và cần được đưa trực tiếp vào tính toán thay vì suy ra từ công thức cho bê tông xi măng Portland.

3.3. Khả năng đáp ứng cho vật liệu mặt đường

Xét theo số liệu của đề tài [13], toàn bộ GPT30 và GPT35 có cường độ nén lớn hơn 30 MPa. Khi tham chiếu ngưỡng cường độ kéo uốn 4,0 MPa đối với mặt đường cấp VI theo TCCS 39:2022 [12], chỉ GPT35 đáp ứng. Đối với đường giao thông nông thôn, các hỗn hợp GPT30 và GPT35 đều có thể được xem xét trên cơ sở yêu cầu cường độ tương ứng của TCVN 10380:2014 [11], nhưng chiều dày tấm vẫn phải được kiểm toán theo tải trọng và điều kiện nền - móng cụ thể. GPT30 thích hợp hơn với đường lưu lượng thấp, sân bãi, vỉa hè; GPT35 được ưu tiên cho tuyến có xe ô tô và yêu cầu chịu uốn cao hơn.

Khả năng chống mài mòn không thể được kết luận chỉ từ cường độ nén. Mặc dù cường độ nén trên 30 MPa là một chỉ dấu thuận lợi, nghiên cứu chưa có kết quả thử mài mòn bề mặt, độ nhám, co ngót và môi, do đó các chỉ tiêu này cần được kiểm chứng trước khi áp dụng thực tế.

3.4. Phương án chiều dày tấm lắp ghép

Bảng 8. Chiều dày tấm (0,5×1,0)m để xuất từ kết quả tính toán của đề tài [13]

Loại đường và lớp móng	Lưu lượng thiết kế	GPT30 (cm)	GPT35 (cm)
Đường cấp VI; móng 18 cm	≥ 200 xe quy đổi/ngày đêm	22 - 24	20 - 22
GTNT cấp A; móng 15 cm	100 - 200 xe quy đổi/ngày đêm	19 - 20	18 - 19
GTNT cấp B; móng 12 cm	50 - 100 xe quy đổi/ngày đêm	17 - 18	16 - 17
GTNT cấp C; móng 10 cm	≤ 50 xe quy đổi/ngày đêm	15 - 16	14 - 15
GTNT cấp D; móng 10 cm	Không có ô tô	12 - 14	10 - 12

Chiều dày giảm dần theo cấp đường và lưu lượng xe; với cùng điều kiện nền móng, GPT35 cho phép giảm khoảng 1 - 2 cm so với GPT30 nhờ cường độ kéo uốn và mô-đun đàn hồi cao hơn. Tuy nhiên, các giá trị trong Bảng 8 là phương án sơ bộ, không phải cấu tạo định hình áp dụng trực tiếp. Khi thiết kế cần cập nhật tải trọng trục, phổ tải, độ tin cậy, mô-đun nền theo mùa, gradient nhiệt, điều kiện thoát nước và hiệu quả truyền lực qua khe.

Kích thước (0,5×1,0)m tạo thuận lợi cho vận chuyển và thay thế tấm, đồng thời giảm mô-men uốn so với tấm lớn. Đối lại, số lượng khe tăng, kéo theo rủi ro nước thâm nhập, chênh cao và giảm độ êm thuận. Vì vậy, chất lượng lớp tạo phẳng, độ đồng đều của móng, vật liệu chèn khe và giải pháp hạn chế chuyển vị tương đối giữa các tấm phải được xem là một bộ phận của hệ kết cấu.

3.5. Đề xuất dây chuyền chế tạo và lắp đặt

Dây chuyền đề xuất gồm: Kiểm soát và xử lý cát biển; định lượng cốt liệu - tro bay - dung dịch hoạt hóa; trộn cưỡng bức; tạo hình và đầm; phủ kín; bảo dưỡng nhiệt 60 - 80°C trong khoảng 24 giờ; làm nguội có kiểm soát; tháo khuôn; kiểm tra chất lượng; lưu kho, vận chuyển và lắp đặt. Dung dịch NaOH cần được chuẩn bị trước, có quy trình an toàn hóa chất và kiểm soát nồng độ.

Tại hiện trường, lớp móng phải đạt độ chặt, cao độ và độ bằng phẳng thiết kế. Tấm được hạ theo đúng vị trí, kiểm tra tiếp xúc đáy tấm móng, hiệu chỉnh các bộ lớp tạo phẳng và hoàn thiện khe nối. Nên tổ chức nghiệm thu theo lô sản xuất, bao gồm kích thước hình học, ngoại quan, cường độ, sai số cao độ sau lắp đặt và độ bằng phẳng dọc/ngang.

3.6. Lợi ích và hướng nghiên cứu tiếp theo

Giải pháp đồng thời tận dụng tro bay và một phần nguồn cát biển sẵn có tại địa phương, giảm phụ thuộc vào cát sông và giảm khối lượng công việc bê tông tại hiện trường. Sản xuất đúc sẵn phù hợp với yêu cầu bảo dưỡng nhiệt, kiểm soát tốt hơn chất lượng và cho phép thi công nhanh tại những khu vực có thời gian tiếp cận hạn chế.

Các hạn chế chính gồm việc sử dụng dung dịch kiềm có tính ăn mòn, quá trình bảo dưỡng nhiệt, biến động chất lượng cát biển, yêu cầu thiết bị nâng tấm bê tông và vấn đề khe nối. Nghiên cứu hiện

tại chưa định lượng độ bền clorua, sunfat, chu kỳ khô - ướt, mài mòn, co ngót và môi. Mặc dù cát đã rửa có hàm lượng muối thấp, nhưng chưa đủ cơ sở để suy rộng về tuổi thọ trong môi trường biển.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

- Bê tông geopolimer tro bay sử dụng cát biển đã rửa tại Hải Hòa và Nam Ô có thể đạt cấp cường độ phù hợp với cấu kiện mặt đường đúc sẵn. GPT30 và GPT35 đạt cường độ nén đặc trưng 30,87 - 36,45 MPa ở 28 ngày; GPT40 không đạt đầy đủ mức cường độ thiết kế 40 MPa.

- Mẫu bê tông GPT35 có cường độ kéo uốn 4,27 - 4,38 MPa và mô-đun đàn hồi 25,08 - 26,00 GPa, là cấp phối phù hợp hơn cho tấm mặt đường có xe ô tô. Cường độ ở 7 và 14 ngày lần lượt đạt khoảng 80,75% và 96,89% cường độ 28 ngày, thuận lợi cho sản xuất đúc sẵn.

- Với tấm chữ nhật (0,5×1,0)m, chiều dày sơ bộ được đề xuất từ 20 - 24 cm cho đường cấp VI và từ 10 - 20 cm cho các cấp đường giao thông nông thôn, tùy cấp phối, lưu lượng xe và chiều dày lớp móng.

- Phạm vi áp dụng phù hợp trước mắt là đường giao thông nông thôn, đường nội bộ, sân bãi và các tuyến lưu lượng thấp tại khu vực ven biển, hải đảo. Các giá trị chiều dày phải được kiểm toán lại theo số liệu nền - móng, tải trọng và tiêu chuẩn hiện hành của từng dự án.

- Trước khi áp dụng đại trà, cần thử tải tấm nguyên kích thước và đoạn đường thử; đánh giá tải trọng lặp, truyền lực qua khe, mài mòn, co ngót, kháng clorua - sunfat và chu kỳ khô - ướt, đồng thời thực hiện phân tích chi phí và vòng đời môi trường.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. Davidovits. Geopolymer Chemistry and Applications. Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2008.
- [2] D. Hardjito, B.V. Rangan. Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Research Report GC1, Curtin University of Technology, Perth, 2005.
- [3] B.V. Rangan. Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Research Report GC4, Curtin University of Technology, Perth, 2008.
- [4] S.E. Wallah, B.V. Rangan, Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties. Research Report GC2, Curtin University of Technology, Perth, 2006.
- [5] B.H. Shinde, K.N. Kadam. Strength properties of fly ash based geopolymer concrete with sea sand. American Journal of Engineering Research, 5(7), 129-132, 2016.
- [6] X. Lyu, N. Robinson, M. Elchalakani, M.L. Johns, M. Dong, S. Nie. Sea sand seawater geopolimer concrete. Journal of Building Engineering, 50, 104141, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104141>.
- [7] ASTM C39/C39M. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International.
- [8] ASTM C78/C78M. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM International.
- [9] ASTM C496/C496M-17. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International.
- [10] ASTM C469/C469M-14. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM International.
- [11] Bộ Giao thông vận tải. TCVN 10380:2014. Đường giao thông nông thôn - Yêu cầu thiết kế.
- [12] Tổng cục Đường bộ Việt Nam. TCCS 39:2022/TCĐBVN. Thiết kế mặt đường bê tông xi măng thông thường có khe nối trong xây dựng công trình giao thông, 2022.
- [13] Bộ Giao thông vận tải. Báo cáo tổng hợp đề tài khoa học và công nghệ cấp Bộ "Nghiên cứu chế tạo bê tông polyme vô cơ sử dụng cát biển và công nghệ thi công trong xây dựng đường giao thông ở khu vực ven biển và hải đảo", 2018.
- [14] Trần Thị Thanh Triết. Nghiên cứu các đặc tính cơ học của bê tông geopolimer sử dụng cát biển. Luận văn Thạc sĩ. Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP Hồ Chí Minh, 2016.