

# Xác định biến dạng từ biến của bê tông Geopolymer chế tạo tại Việt Nam

## Determine the creep deformation of Geopolymer concrete manufactured in Vietnam

> **THS.NCS VŨ THÀNH QUANG<sup>1</sup>, PGS.TS NGUYỄN BÌNH HÀ<sup>1\*</sup>, TS LÊ BÁ DANH<sup>1</sup>, THS NGUYỄN VĂN QUANG<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Bộ môn Cầu và Công trình ngầm, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

<sup>2</sup>Bộ môn Thí nghiệm và KĐCT, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

\*Tác giả liên hệ: Email:ngbinhha@huce.edu.vn

### TÓM TẮT

Bê tông Geopolymer (GPC) được xác định là bê tông thân thiện với môi trường, sử dụng GPC sẽ làm giảm phát thải CO<sub>2</sub>. Trên thế giới và tại Việt Nam đã có những nghiên cứu về thành phần vật liệu của GPC, các tính chất cơ học như cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo, mô đun đàn hồi, ảnh hưởng của môi trường... trên thế giới những nghiên cứu về từ biến của GPC còn ít và cho kết quả khác nhau khi so với bê tông thông thường (OPC) cùng cường độ chịu nén. Tại Việt Nam hiện chưa có nghiên cứu nào về từ biến của GPC. Bài báo này trình bày kết quả thực nghiệm từ biến của GPC được chế tạo tại Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, kết quả cho thấy hệ số từ biến sau 180 ngày bằng 2,9 và lớn hơn kết quả tính toán theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD 2017 với bê tông thông thường cùng cường độ.

**Từ khóa:** Bê tông Geopolymer; GPC; từ biến.

### ABSTRACT

Geopolymer concrete (GPC) is determined to be environmentally friendly concrete, using GPC will reduce CO<sub>2</sub> emissions. In the world and in Vietnam, there have been studies on the material composition of GPC, mechanical properties such as compressive strength, tensile strength, elastic modulus, environmental effects... around the world. Research on creep of GPC is still limited and gives different results when compared to ordinary concrete (OPC) with the same compressive strength. In Vietnam, there is currently no research on creep of GPC. This article presents the experimental results of creep of GPC manufactured at Hanoi University of Civil Engineering. The results show that the coefficient found after 180 days is equal to 2.9 and larger than the calculated results according to the standard. AASHTO LRFD 2017 with conventional concrete of the same strength.

**Key word:** Geopolymer concrete; GPC; creep.

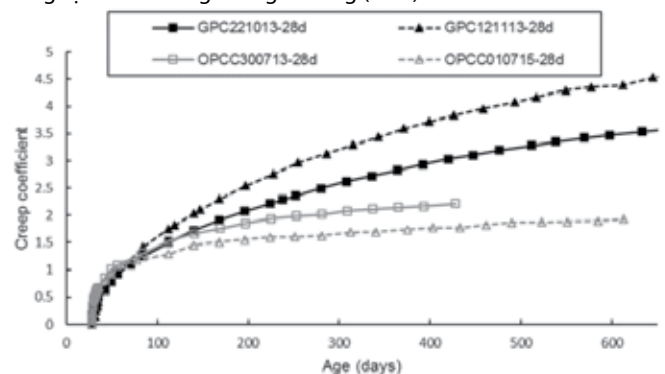
### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Biến đổi khí hậu là vấn đề đang được quan tâm trên thế giới, từ năm 1995 Hội nghị Liên hợp quốc về Biến đổi khí hậu (COP) được tổ chức thường niên, tại COP 26 (năm 2021) Việt Nam đã cam kết đưa mức phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050.

Sản lượng xi măng năm 2022 của Việt Nam là 99,7 triệu tấn, năm 2023 đạt gần 90 triệu tấn [13] do đó lượng phát thải CO<sub>2</sub> trong năm 2022 và 2023 tương ứng gần 67 và hơn 60 triệu tấn (theo Hiệp hội Xi măng Việt Nam hiện nay 1 tấn xi măng sẽ phát thải ra 667,57kg CO<sub>2</sub>).

Theo Joseph Davidovits [19] Bê tông Geopolymer (GPC) là loại bê tông không sử dụng xi măng làm chất kết dính mà sử dụng nguồn vật liệu giàu khoáng Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> và Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (aluminosilicat) có trong nguồn phế thải của quá trình sản xuất công nghiệp như tro bay của nhà máy nhiệt điện, xỉ lò cao của nhà máy luyện gang, thép... và được hoạt hóa trong môi trường kiềm, vì vậy GPC sẽ giảm đáng kể phát thải CO<sub>2</sub>, do đó trên thế giới GPC được coi là loại vật liệu thân thiện với môi trường.

Các nghiên cứu về GPC chủ yếu vẫn tập trung về chế tạo GPC, các nghiên cứu cho thấy rằng GPC có khả năng chịu nhiệt tốt [14, 17], không phát sinh nhiệt độ cao trong quá trình đông cứng, làm việc tốt trong môi trường xâm thực [16]. Cường độ chịu nén có thể đạt tới 80÷90MPa [20], và phát triển cường độ sớm... GPC làm việc tương tự như bê tông thông thường (OPC).



**Hình 1.** Biểu đồ Hệ số từ biến của GPC và OPC trong thời gian 650 ngày tuổi

Các nghiên cứu về từ biến của GPC trên thế giới không nhiều nhưng lại cho kết quả rất khác nhau, nghiên cứu S. E. Wallah and B. V. Rangan (2006) [22]; cho thấy rằng, hệ số từ biến sau 1 năm của GPC với cường độ 40, 47 và 57 Mpa nằm trong khoảng 0,6 đến 0,7. Liu và cộng sự [21] nghiên cứu GPC từ hỗn hợp tro bay và metakaolin cho thấy hệ số từ biến thấp là 0,609 sau 60 ngày... nhỏ hơn hệ số từ biến của bê tông thông thường có cùng cường độ. Kết

quả nghiên cứu của Chi Hou Un năm 2017 [18] cho thấy rằng hệ số từ biến của GPC có sử dụng vật liệu tro bay và xỉ lò cao cao hơn của bê tông thông thường có cùng cường độ (Hình 1). Như vậy cũng tương tự bê tông thông thường biến dạng từ biến phụ thuộc vào tỷ lệ tro bay, xỉ lò cao, chất hoạt hóa, quá trình bảo dưỡng, và giá trị hệ số từ biến của GPC cao hơn hoặc nhỏ hơn bê tông thông thường.

Tại Việt Nam, PGS.TS Nguyễn Văn Dũng chế tạo GPC từ tro bay, cốt liệu cát Túy Loan và đá Phước Tường, đã khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến cường độ của GPC như môđun silicat, nhiệt độ, thời gian dưỡng hộ và lượng nước trộn [1].

Nghiên cứu của PGS.TS Đào Văn Đông đã xác định được thành phần, các tính chất cơ học như cường độ nén, kéo, uốn, các tính chất về độ bền trong môi trường biển và chịu nhiệt độ cao của vữa và GPC tro bay (polymer vô cơ) [3-5].

TS Lê Anh Tuấn khẳng định mô đun đàn hồi của GPC thấp hơn, nhưng cường độ chịu uốn cao hơn so với tính toán theo các công thức thiết kế cho theo tiêu chuẩn dành cho bê tông thông thường [12].

Nghiên cứu các tính chất cơ học của GPC tro bay của ThS Trần Việt Hưng, PGS.TS Nguyễn Ngọc Long, PGS.TS Đào Văn Đông [7]. Mô hình quan hệ ứng suất biến dạng khi nén của GPC tro bay của ThS Trần Việt Hưng, GS.TS Phạm Duy Hữu, PGS.TS Nguyễn Ngọc Long, PGS.TS Đào Văn Đông [8].

“Nghiên cứu ứng dụng bê tông GPC cho kết cấu dầm dự ứng lực công trình cầu hướng tới phát triển bền vững” của nhóm tác giả Lê Bá Danh, Phạm Duy Hoà, Nguyễn Bình Hà và Cao Bắc Đăng đã cho rằng việc sử dụng bê tông GPC cho dầm dự ứng lực trong công trình cầu là rất khả thi và đảm bảo các điều kiện về mặt kỹ thuật [2]. Nguyễn Bình Hà, Nguyễn Quốc Bảo, Vũ Thành Quang kết luận việc sử dụng GPC trong công trình cầu có tính khả thi cao, nhất là đối với các công trình phải chịu ăn mòn cao như các công trình ven biển và trên biển [10].

Luận án tiến sĩ của Trần Việt Hưng (2017) [9] đã tập trung nghiên cứu thành phần, các tính chất cơ học, xây dựng mô hình vật liệu GPC tro bay, phân tích ứng xử uốn của các dầm GPC tro bay cốt thép và khả năng ứng dụng trong xây dựng cầu. Luận án tiến sĩ của Phạm Quang Đạo (2021) [6] đã đề xuất: Xây dựng cấp phối chế tạo bê tông GPC cường độ chịu nén trung bình mẫu trụ đến 50MPa từ hỗn hợp tro bay và xỉ lò cao là nguồn vật liệu sẵn có trong nước và Khảo sát sự làm việc trên tiết diện thẳng góc của dầm GPC cốt thép và đề xuất lý thuyết tính toán phù hợp với Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5574:2018.

Nghiên cứu liên quan đến từ biến của GPC được trình bày trong bài báo. “Ảnh hưởng của từ biến trong dầm thép liên hợp với bản GPC” của nhóm tác giả Nguyễn Bình Hà, Nguyễn Quốc Bảo, Lê Bá Danh, Vũ Thành Quang (2024) [11], tuy nhiên trong bài báo này đã sử dụng hệ số từ biến của các nghiên cứu trên thế giới mà không phải là kết quả nghiên cứu để xuất ở Việt Nam. Do đó việc nghiên cứu thực nghiệm về từ biến của GPC chế tạo tại Việt Nam là rất cần thiết, cấp bách và có ý nghĩa khoa học, thực tiễn.

**2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU**

Đối tượng nghiên cứu trong bài báo là từ biến của GPC chế tạo tại Việt Nam, phương pháp nghiên cứu là tiến hành thực nghiệm đo đặc biến dạng từ biến theo tiêu chuẩn ASTM C512. So sánh các kết quả đo đạc với mô hình từ biến của tiêu chuẩn thiết kế cầu AASHTO LRFD 2017 [15]. Quá trình thí nghiệm được thực hiện tại Phòng thí nghiệm và kiểm định công trình LAS XD125 - Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

**3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU**

Dựa vào các nghiên cứu về cấp phối của GPC tại Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, chúng tôi đã lựa chọn cấp phối đúc mẫu thí

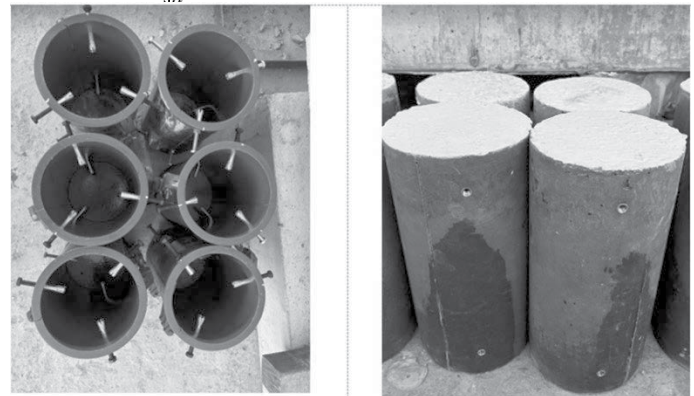
nghiệm chế tạo bê tông GPC M500 (B40) với thành phần cấp phối để trộn 1000 lít như Bảng 1:

Bảng 1. Thành phần cốt liệu bê tông GPC mẫu thí nghiệm

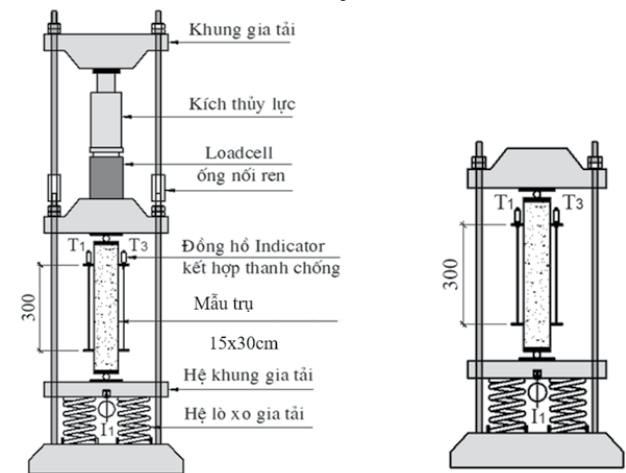
Cát (kg)	Đá (kg)	Xỉ lò cao (kg)	Tro bay (kg)	Chất hoạt hóa (kg)	Nước (kg)	SD (kg)
700	1120	330	110	43,75	175	5.5

Quy trình thí nghiệm:

- Tiến hành chế tạo 01 tổ mẫu trụ kích thước 15x30cm để đo từ biến. Mẫu được chế tạo trong khuôn kín được chôn sẵn chốt gắn dụng cụ đo từ biến (Hình 2);
- Lắp đặt đồng hồ đo biến dạng vào các chốt;
- Gia tải tới 30% tải trọng giới hạn bằng kích thủy lực khung lò so gia tải – đo biến dạng đàn hồi  $\epsilon_e(t_0)$ ;
- Gắn đồng hồ biến của lò so nhằm kiểm soát giá trị lực theo thời gian;
- Tháo bỏ kích gia tải và ghi số đọc ban đầu của mẫu thí nghiệm;
- Đo đặc biến dạng theo thời gian  $\epsilon(t)$ ;
- Đồng thời với thí nghiệm về từ biến, chúng ta sẽ tiến hành thí nghiệm co ngót của GPC để xác định biến dạng co ngót tự do tại thời điểm t là  $\epsilon_{sh}(t)$ .



Hình 2. Khuôn đúc mẫu và mẫu đo biến dạng từ biến



a) Tạo lực nén ban đầu bằng kích thủy lực      b) Duy trì lực nén bằng lò xo

Hình 3. Sơ đồ thiết bị thí nghiệm biến dạng do từ biến

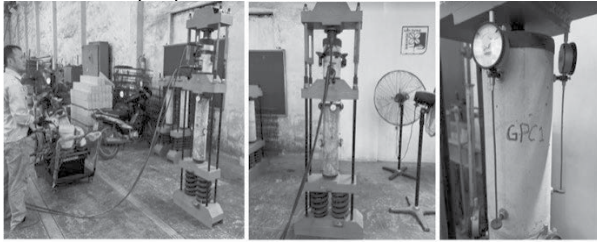
Biến dạng từ biến của từng mẫu bê tông tại thời điểm đo được xác định theo công thức như sau:

$$\epsilon_{cr}(t) = \epsilon(t) - \epsilon_e(t_0) - \epsilon_{sh}(t)$$

Trong đó:  $\epsilon_{cr}(t)$  là biến dạng từ biến,  $\epsilon(t)$  biến dạng tổng,  $\epsilon_e(t_0)$  là biến dạng tức thời ở thời điểm đặt tải,  $\epsilon_{sh}(t)$  là biến dạng co ngót tự do.

Hệ số từ biến  $\varphi(t)$  được xác định theo công thức:

$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon_{cr}(t)}{\varepsilon_e(t_0)}$$



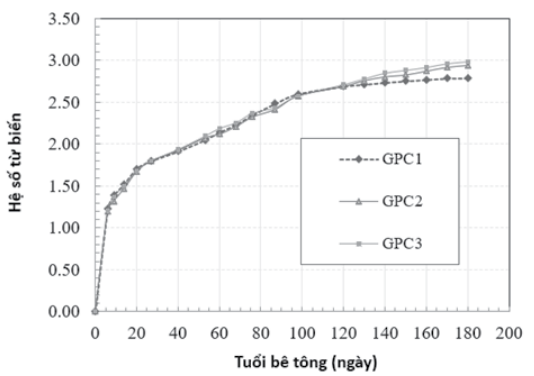
Hình 4. Thí nghiệm từ biến của GPC

Căn cứ vào kết quả đo biến dạng thời điểm đặt tải, biến dạng do co ngót tự do và biến dạng của mẫu thí nghiệm từ biến, áp dụng các công thức trên ta có kết quả hệ số từ biến theo thời gian từ thời điểm đặt tải đến 180 ngày được ghi trong bảng 2:

Bảng 2. Kết quả tính toán hệ số từ biến của mẫu GPC

Ngày	GPC1	GPC2	GPC3
6	1,23	1,20	1,21
9	1,39	1,32	1,37
14	1,53	1,47	1,50
20	1,71	1,67	1,68
27	1,80	1,80	1,80
40	1,91	1,92	1,94
53	2,05	2,07	2,10
60	2,14	2,12	2,19
68	2,23	2,21	2,26
76	2,35	2,32	2,37
87	2,48	2,42	2,44
98	2,60	2,58	2,58
120	2,69	2,69	2,71
130	2,71	2,76	2,78
140	2,74	2,80	2,85
150	2,75	2,83	2,88
160	2,77	2,87	2,92
170	2,79	2,92	2,96
180	2,79	2,94	2,99

Kết quả đo hệ số từ biến của các mẫu trong bảng 2 được thể hiện trên biểu đồ trên hình 5.



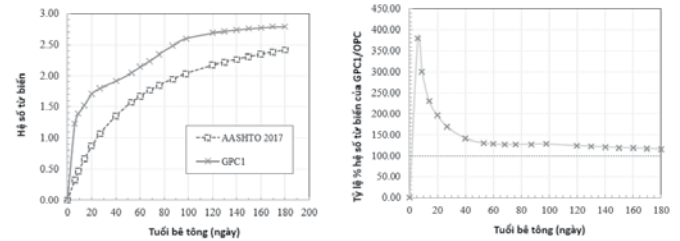
Hình 5. Biểu đồ kết quả thí nghiệm hệ số từ biến của các mẫu GPC

Dựa vào kết quả trong Bảng 2 và Hình 5 ta thấy về tổng thể biến dạng từ biến của 3 mẫu phát triển khá giống nhau, và tốc độ phát triển của từ biến như sau:

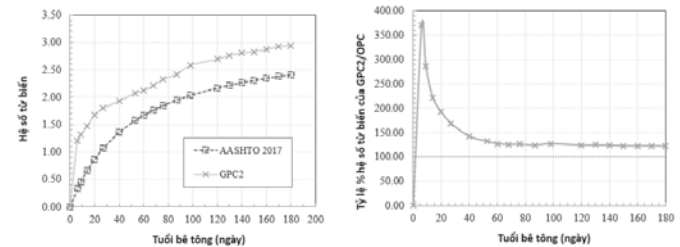
- Trong khoảng thời gian 6 ngày đầu hệ số từ biến phát triển nhanh từ 0 đến 44% tổng số biến dạng của từ biến.
- Từ ngày thứ 6 đến ngày thứ 20, hệ số từ biến tăng khoảng 20%.

- Từ ngày thứ 20 đến ngày thứ 100, hệ số từ biến tăng khoảng 26% đến 28%.
- Từ ngày thứ 100 đến ngày thứ 150, hệ số từ biến tăng khoảng 5.5% đến 8.5%.
- Từ ngày thứ 150 đến ngày thứ 180, hệ số từ biến tăng khoảng 1% đến 4%.

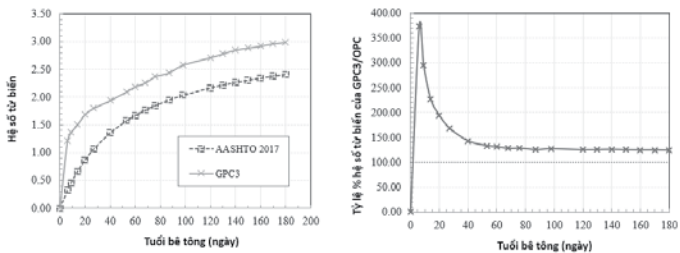
Biểu đồ hệ số từ biến theo thời gian của kết quả thí nghiệm mẫu GPC 1, 2,3 và kết quả tính toán theo tiêu của AASHTO LRFD 2017 cùng với tỷ số giữa chúng được thể hiện trên hình 6 đến hình 8.



Hình 6. Biểu đồ hệ số từ biến theo thời gian của mẫu GPC1 và OPC (trái) và tỷ lệ % giữa mẫu GPC1 và OPC (phải)



Hình 7. Biểu đồ hệ số từ biến theo thời gian của mẫu GPC2 và OPC (trái) và tỷ lệ % giữa mẫu GPC2 và OPC (phải)



Hình 8. Biểu đồ hệ số từ biến theo thời gian của mẫu GPC3 và OPC (trái) và tỷ lệ % giữa mẫu GPC3 và OPC (phải)

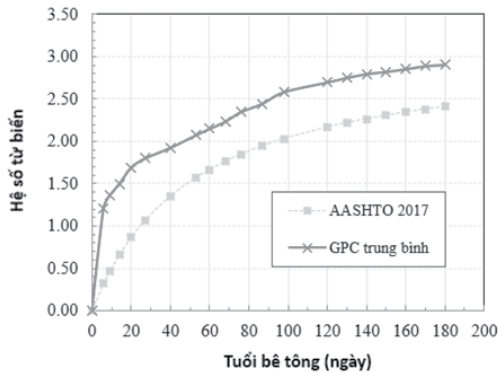
Để đánh giá, so sánh biểu đồ từ biến của GPC với bê tông thông thường (OPC), kết quả đo đạc của ba mẫu thử được lấy trung bình và so sánh với mô hình từ biến theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD 2017 với cùng cường độ chịu nén, các giá trị tính toán so sánh được thể hiện trong bảng 3.

Bảng 3. Kết quả so sánh hệ số từ biến GPC/OPC theo AASHTO LRFD 2017

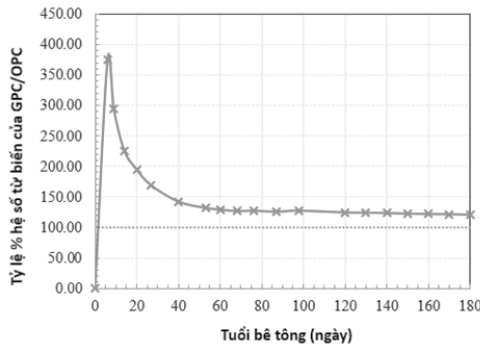
Ngày/ Mẫu	GPC trung bình	AASHTO LRFD 2017	GPC/OPC (%)
6	1,21	0,32	375
9	1,36	0,46	294
14	1,50	0,66	226
20	1,69	0,87	195
27	1,80	1,07	169
40	1,92	1,36	142
53	2,07	1,57	132
60	2,15	1,67	129

Ngày/ Mẫu	GPC trung bình	AASHTO LRFD 2017	GPC/OPC (%)
68	2,23	1,76	127
76	2,35	1,85	127
87	2,45	1,95	126
98	2,58	2,03	127
120	2,70	2,17	124
130	2,75	2,22	124
140	2,80	2,27	123
150	2,82	2,31	122
160	2,85	2,34	122
170	2,89	2,38	122
180	2,90	2,41	121

Hệ số từ biến trung bình theo thời gian của ba mẫu GPC và kết quả tính toán hệ số từ biến theo mô hình của AASHTO LRFD 2017 trong bảng 3 được thể hiện trên hình 6, tỷ lệ phần trăm giữa hệ số từ biến của GPC và OPC được thể hiện trên hình 7.



Hình 9. Biểu đồ so sánh hệ số từ biến của GPC và OPC theo AASHTO LRFD 2017



Hình 10. Biểu đồ tỷ lệ giữa giá trị hệ số từ biến của GPC và OPC theo thời gian

Dựa vào biểu đồ trên hình 9 và hình 10 cho thấy rằng: Hệ số từ biến của GPC luôn lớn hơn OPC; Trong 6 ngày đầu tỷ số giữa hệ số từ biến của GPC và OPC tăng rất nhanh lên đến 3,75 lần và giảm nhanh còn 1,7 lần ở ngày thứ 27, và sau đó tỷ lệ giảm chậm và giai đoạn từ ngày thứ 60 biểu đồ gần như song song với nhau. Hệ số từ biến của GPC ở thời điểm 180 ngày là 2,9.

#### 4. KẾT LUẬN

Với bê tông GPC được chế tạo theo cấp phối của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, có kết luận sau:

Biến dạng từ biến của GPC luôn lớn hơn OPC cùng cường độ được tính theo mô hình của tiêu chuẩn AASHTO LRFD 2017;

Hệ số từ biến của GPC ở thời điểm ngày thứ 180 là 2,9;

Trong 6 ngày đầu biến dạng từ biến của GPC có tốc độ tăng rất nhanh so với OPC, sau đó mức tăng giảm chậm dần và đến ngày 60 tốc độ tăng gần như nhau.

Cần tiếp tục nghiên cứu về ảnh hưởng tỷ lệ của tro bay, xỉ lò cao, chất hoạt hóa đến hệ số từ biến của GPC, những thực nghiệm với thời gian dài hơn nữa, thời gian đặt tải khác nhau trong khoảng thời gian già và thời gian di truyền để có kết luận đầy đủ hơn về từ biến của GPC.

#### LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn đề tài cấp Bộ “Nghiên cứu ứng xử của dầm bê tông cốt thép ứng lực trước nhíp trung bình lớn sử dụng bê tông Geopolymer” mã số: B2020-XDA-07 và Phòng thí nghiệm và kiểm định công trình LAS XD125 - Trường Đại học Xây dựng Hà Nội đã hỗ trợ quá trình nghiên cứu và thí nghiệm này.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Văn Dũng, *Nghiên cứu chế tạo bê tông geopolymer từ tro bay*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng, 2014. **Số 5 (78)**.
- [2]. Lê Bá Danh; Phạm Duy Hoà; Nguyễn Bình Hà; Cao Bắc Đăng, *Nghiên cứu ứng dụng bê tông Geopolymer cho kết cấu dầm dự ứng lực công trình cầu hương tới phát triển bền vững*. Tạp chí Xây dựng Việt Nam, 2021. **10**: p. 148-152.
- [3]. Đông, Đ.V., *Nghiên cứu một số tính chất cơ học của bê tông Polyme vô cơ*. Cầu đường Việt Nam, 2009. **Số 12**: p. 22-26.
- [4]. Đông, Đ.V., *Nghiên cứu ứng xử nén và kéo khi uốn của vữa polyme vô cơ*. Tạp chí Giao thông vận tải, 2010.
- [5]. Đông, Đ.V., *Nghiên cứu một số tính chất của vữa polyme vô cơ trong môi trường ăn mòn nước biển*. Tạp chí Giao thông vận tải, 2011.
- [6]. Phạm Quang Đạo, *Nghiên cứu sự làm việc của dầm bê tông cốt thép sử dụng tro bay và xỉ lò cao làm chất kết dính Geopolymer*. 2021, Trường Đại học Xây dựng.
- [7]. Trần Việt Hưng; Nguyễn Ngọc Long; Đào Văn Đông, *Nghiên cứu các tính chất cơ học của GPC tro bay*. Tạp chí Giao thông vận tải ngày, 2017.
- [8]. Trần Việt Hưng; Phạm Duy Hữu; Nguyễn Ngọc Long; Đào Văn Đông, *Mô hình quan hệ ứng suất biến dạng khi nén của GPC tro bay*. Tạp chí Giao thông vận tải, 2017.
- [9]. Trần Việt Hưng, *Nghiên cứu thành phần, đặc tính cơ lý của bê tông Geopolymer tro bay và các ứng dụng cho kết cấu Cầu Hầm*. 2017, Trường Đại học Giao thông vận tải.
- [10]. Nguyễn Bình Hà; Nguyễn Quốc Bảo; Vũ Thành Quang, *Nghiên cứu ứng dụng bê tông geopolymer cho cấu dầm liên tục bê tông cốt thép dự ứng lực*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, 2023.
- [11]. Nguyễn Bình Hà; Nguyễn Quốc Bảo; Lê Bá Danh; Vũ Thành Quang, *Ảnh hưởng của từ biến trong dầm thép liên hợp với bản GPC*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD), 2024. **ĐHXDN 18(1V)**: p. 1-12.
- [12]. Tuấn, L.A., *Các thách thức và giải pháp cho ngành Xây dựng ở ĐBSCL trong bối cảnh biến đổi khí hậu*. Xây dựng - Tạp chí điện tử của Bộ Xây dựng, 2022.
- [13]. Xi măng Việt Nam. *Sản lượng tiêu thụ xi măng kỳ vọng được phục hồi trong năm 2024*. 2024; Available from: <https://ximang.vn/bien-dong-thi-truong/thi-truong-xi-mang/san-luong-tieu-thu-xi-mang-ky-vong-duoc-phuc-hoi-trong-nam-2024-18999.htm>.
- [14]. James Aldred, J.D. *Is geopolymer concrete a suitable alternative to traditional concrete? in 37th Conference on Our World in Concrete & Structures*. 2012. Singapo.
- [15]. AASHTO, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. Section 6: Steel Structures. 2017, Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [16]. T. Bakharev, *Resistance of geopolymer materials to acid attack*. Cement and Concrete Research, 2005. **35(4)**: p. 658-670.
- [17]. T. Bakharev, *Thermal Behaviour of Geopolymers Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing*. Cement and Concrete Research, 2006. **36(6)**: p. 1134-1147.
- [18]. Chi Hou Un, *Creep Behaviour of Geopolymer Concrete*, in *Faculty of Science, Engineering and Technology*. 2017, Swinburne University of Technology: Melbourne, Australia.
- [19]. Davidovits, J. *Geopolymer chemistry and sustainable development*. in *Geopolymer Green Chemistry and Sustainable Development Solutions, Geopolymer 2005 Conference*. 2005. Saint-Quentin, France. Institut Géopolymère / Geopolymer Institute.
- [20]. D. Hardjito; B. V. Rangan, *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*. 2005: Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia.
- [21]. Liu, H., Lu, Z., and Peng, Z, *Test research on prestressed beam of inorganic polymer concrete*. Materials and Structures, 2014.
- [22]. S. E. Wallah; B. V. Rangan, *Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties*. 2006, Curtin University of Technology: Perth, Australia.