

# Ảnh hưởng phụ gia kết hợp nano SiO<sub>2</sub> và tro bay trong bê tông cường độ cao HSC làm mặt đường ô tô

■ TS. TRẦN HỮU BÀNG; ThS. VÕ THANH HÙNG; ThS. LÊ THÀNH TRUNG; ThS. PHÚ THỊ TUYẾT NGÀ

Trường Đại học Thủ Dầu Một

**TÓM TẮT:** Trong bài báo, nhóm tác giả trình bày kết quả cường độ nén, cường độ kéo khi uốn, khả năng chống mài mòn và mô-đun đàn hồi của bê tông xi măng cường độ cao (HSC) 60 MPa sử dụng phụ gia nano SiO<sub>2</sub> (NS) điều chế từ tro trấu (RHA) và tro bay (FA). Các hạt NS được thêm vào HSC với mức thay thế khác nhau 0%, 0,5%, 1,0% và 1,5% với hàm lượng FA cố định 30% theo khối lượng chất kết dính. Ở giá trị 1,0% NS của bê tông HSC cho giá trị về cường độ và khả năng chống mài mòn tốt nhất được đề xuất sử dụng trong thiết kế xây dựng mặt đường cấp cao khu vực miền Nam.

**TỪ KHÓA:** Nano SiO<sub>2</sub> (NS), tro bay (FA), bê tông cường độ cao (HSC), mặt đường bê tông xi măng.

**ABSTRACT:** In this paper, the authors present results of compressive strength, flexural strength, abrasion resistance, and elastic modulus for high strength concrete (HSC) 60 MPa using the combination additive nano SiO<sub>2</sub> (NS) derived from rice husk ash (RHA) and fly ash (FA). NS particles were added to HSC at various replacement of 0%, 0.5%, 1.0% and 1.5% with a fixed FA concentration of 30% by the mass of the binder. The best value of strength and abrasion resistance is found in HSC of 1.0%, with is proposed to be employed in the design of high-grade pavement construction in the South.

**KEYWORDS:** Nano SiO<sub>2</sub> (NS), Fly Ash (FA), High Strength Concrete (HSC), cement concrete pavement.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển nhanh chóng cơ sở hạ tầng, các công trình đường giao thông cấp cao nhu cầu phát triển bê tông cường độ cao (HSC), độ bền cao và thân thiện với môi trường cũng trở nên cấp thiết. Nano SiO<sub>2</sub> (NS) nổi tiếng với nhiều ứng dụng trong hai thập kỷ qua, bao gồm làm vật liệu xúc tác, vật liệu điện môi, chất hấp phụ khí, hấp phụ ion kim loại nặng và chất mang vô cơ [1]. Bên cạnh đó, người ta cũng lưu ý rằng, hầu hết các vật liệu NS được sử dụng trong công trình xây dựng đều được cung cấp bởi các công ty thương mại, chủ yếu từ Trung Quốc và các nước châu Âu [2]. NS được sản xuất trong nhà máy, các phẩm chất chính của NS thương mại là độ tinh khiết cao và tính đồng nhất,

tuy nhiên nó đắt tiền và gây khó khăn trong việc sử dụng rộng rãi trong xây dựng. Do đó, xu hướng tìm kiếm nguồn nguyên liệu sẵn có, chi phí thấp, giàu silic để sử dụng làm chất phụ gia cụ thể đang được xem xét và thu hút sự chú ý của các nhà khoa học và các cấp chính quyền.

Từ các tính năng của phụ gia khoáng NS mang lại, nhóm tác giả bước đầu đã sử dụng NS và FA như một chất phụ gia khoáng thay thế xi măng trong thành phần hỗn hợp bê tông HSC 60MPa, mức tỉ lệ NS thay thế là 0%, 0,5%, 1,0% và 1,5% với hàm lượng FA cố định 30% cho tất cả hỗn hợp. Các chỉ tiêu cơ lý đã được triển khai thực nghiệm như: cường độ nén, cường độ kéo uốn, khả năng chống mài mòn, mô-đun đàn hồi và thiết lập mối tương quan giữa chúng có thể cho phép chúng ta lựa chọn tỉ lệ NS và FA hợp lý, với mong muốn tìm ra tỉ lệ NS và FA hợp lý tạo ra sản phẩm bê tông HSC mang lại hiệu quả kinh tế - kỹ thuật đáp ứng yêu cầu mặt đường ô tô cấp cao.

## 2. VẬT LIỆU CHẾ TẠO VÀ KẾ HOẠCH THỰC NGHIỆM

### 2.1. Vật liệu chế tạo

**2.1.1. Xi măng PC40L:** Các đặc tính vật lý và thành phần hóa học của PC40 được sử dụng trong nghiên cứu này, được sản xuất tại Việt Nam thương hiệu Bút Sơn, phù hợp theo Tiêu chuẩn TCVN 2682:2009 và Quyết định số 1951/BGTVT/2012, khối lượng riêng của PC40 là 3,1 g/cm<sup>3</sup> [3].

**2.1.2. Tro bay FA:** Tro bay có nguồn gốc từ Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3 được sử dụng để thay thế xi măng, khối lượng riêng của FA là 2.12 g/cm<sup>3</sup>. Tro bay được thí nghiệm theo Tiêu chuẩn ASTM C311-16 tại Trung tâm Kỹ thuật chuẩn đo lường chất lượng 3 (Quatest 3) mã KT3-01164BXD8 [3].

**2.1.3. Nano SiO<sub>2</sub> được điều chế từ RHA:** Nhóm tác giả sử dụng sản phẩm đã được điều chế từ RHA, kết quả nghiên cứu các hạt NS có kích thước trung bình 15 nm, cấu trúc tinh thể và vô định hình có khả năng phản ứng puzolan. Những tính chất vật lý chung của hạt NS điều chế từ tro trấu sử dụng được thể hiện trong trình bày [3].

**2.1.4. Cốt liệu nhỏ (cát) dùng trong bê tông HSC:** Cát sông Đồng Nai sử dụng làm thí nghiệm được tổng hợp các đặc tính vật lý và phân tích tương ứng theo Tiêu chuẩn ASTM C33, ASTM C29 đáp ứng theo yêu cầu kỹ thuật TCVN 7570:06; TCVN 7572:06 và Quyết định số 1951/BGTVT/2012 [10].

**2.1.5. Cốt liệu lớn (đá) dùng trong bê tông HSC:** Đá dăm Bazan D<sub>max</sub> = 9,5 mm ở mỏ đá Tân Đông Hiệp - Bình Dương. Kết quả thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ, lý và phân tích thành phần hạt của đá dăm theo ASTM C33, ASTM C29 đáp



theo yêu cầu kỹ thuật TCVN 7570:06, TCVN 7572:06 và Quyết định số 1951/BGTVT/2012 [3].

2.1.6. Phụ gia hóa học siêu dẻo (PGSD): Sika Viscocrete 3000-20M là phụ gia siêu dẻo được cung cấp bởi Sika Group. Khả năng giảm nước cao của nó cho phép tạo ra tính lưu động tốt trong khi vẫn giữ được độ cô đọng tối ưu của hỗn hợp. Theo TCVN 8826: 2011, phụ gia này phù hợp với các tiêu chuẩn đã được thiết lập để bổ sung hóa học vào bê tông. Sika Viscocrete 3000-20, phụ gia siêu dẻo công nghệ cao gốc polyme thế hệ thứ 3 với độ xốp tuyệt vời và khả năng thấm đơn giản của bê tông, đã được sử dụng trong thiết kế cấp phối thành phần bê tông HSC 60MPa [3].

2.1.7. Nước: Nước sử dụng cho bê tông HSC là nước sạch, đạt Tiêu chuẩn TCVN 4506:2012 [3].

2.1.8. Thành phần cấp phối cho bê tông HSC: Nghiên cứu sử dụng phương pháp ACI 211.4R-08 và tham khảo TCVN 10306:2014 để thiết kế thành phần HSC. Phương pháp ACI: NS được sử dụng với nhiều tỷ lệ khác nhau trong các thành phần cấp phối, bao gồm 0,5%, 1,0% và 1,5%, với hàm lượng FA cố định 30% theo tổng số lượng chất kết dính. Tỷ lệ nước trên chất kết dính được giữ ở mức 0,32 cho tất cả các hỗn hợp. Tỷ lệ cấp phối của 4 hỗn hợp được trình bày trong Bảng 2.1. Có thể thấy rằng, PGSD được tăng dần để kiểm soát giá trị độ sụt của các hỗn hợp ở mức  $5 \pm 1$  cm [3].

**Bảng 2.1. Kết quả tính toán thành phần HSC 60MPa sử dụng NS và FA**

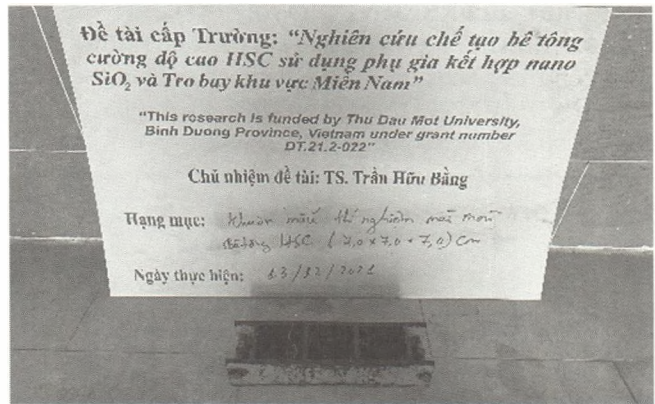
Cấp phối	Vật liệu thành phần cho 1 m <sup>3</sup> bê tông HSC							
	Cement (kg)	Cát (kg)	Đá (kg)	FA (kg)	NS (kg)	PGSD (lít)	Nước (lít)	N/CKD
NS0	338,53	697,64	1046,5	145,08	-	4,06	154,67	0,32
NS0.5	336,12	696,78	1046,5	145,08	2,41	4,54	154,67	0,32
NS1.0	333,29	696,30	1046,5	145,08	4,83	5,10	154,67	0,32
NS1.5	331,28	695,11	1046,5	145,08	7,25	5,63	154,67	0,32

**2.2. Kế hoạch thực hiện**

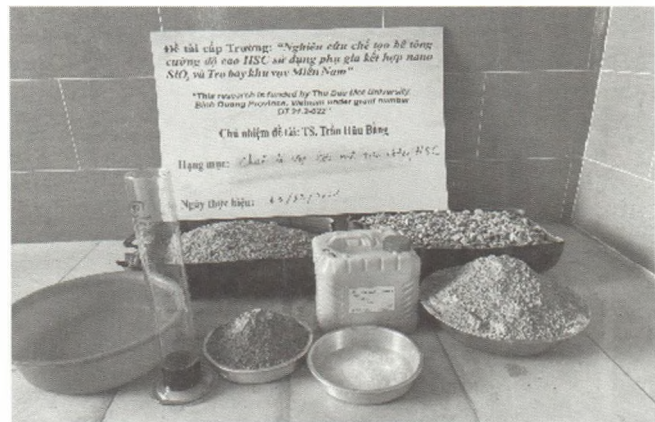
Tổ hợp lấy giá trị trung bình của 3 mẫu để xác định một số chỉ tiêu của bê tông HSC cho mỗi ngày tuổi. Mỗi cấp phối có 30 mẫu bao gồm: Xác định giá trị cường độ nén ( $R_n$ ) có 12 mẫu hình trụ (15x30)cm, giá trị cường độ kéo uốn ( $R_{ku}$ ) có 12 mẫu dầm (15x15x60)cm ở tuổi 3, 7, 28 và 56 ngày, 3 mẫu hình trụ (15x30)cm để xác định mô-đun đàn hồi nén tĩnh ( $E_{st}$ ) ở tuổi 28 ngày (Hình 2.1), 3 mẫu hình lập phương (7,07x7,07x7,07)mm để xác định độ mài mòn ở tuổi 28 ngày (Hình 2.2). Tổng cộng 4 tổ hợp cho tất cả 120 mẫu bê tông HSC các loại được chế tạo, bảo dưỡng trong điều kiện và được thử nghiệm tại Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh - Phòng Thí nghiệm Vật liệu xây dựng LAS-XD 238 (Hình 2.3).



**Hình 2.1: Chuẩn bị mẫu  $R_n$ ,  $R_{ku}$  và  $E_{st}$**



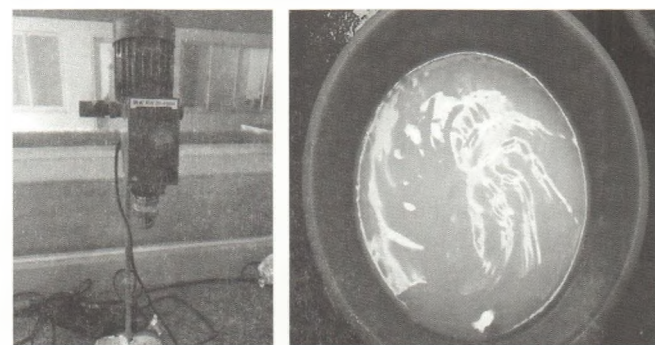
**Hình 2.2: Chuẩn bị mẫu mài mòn**



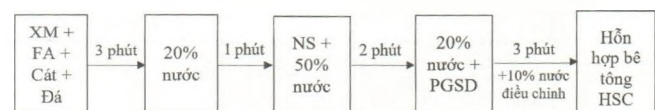
**Hình 2.3: Chuẩn bị mẻ trộn**

**2.3. Trình tự trộn hỗn hợp bê tông HSC sử dụng phụ gia nano SiO<sub>2</sub> và tro bay**

Diện tích bề mặt đặc trưng của các hạt NS rất cao cùng với các tính chất đặc biệt của các hạt silica ở kích thước nanomet làm cho việc phân tán NS trở nên khó khăn hơn. Để đảm bảo các mẻ trộn có thành phần vật liệu đồng nhất của các hạt NS phân tán trong bê tông HSC với mức độ ổn định cao, nhóm tác giả nghiên cứu và đề xuất trình tự trộn trên cơ sở tham khảo các nghiên cứu trước và kinh nghiệm đúc kết từ quá trình trộn thử trình tự như Hình 2.4 và Hình 2.5.



**Hình 2.4: Thiết bị khuấy trộn NS**



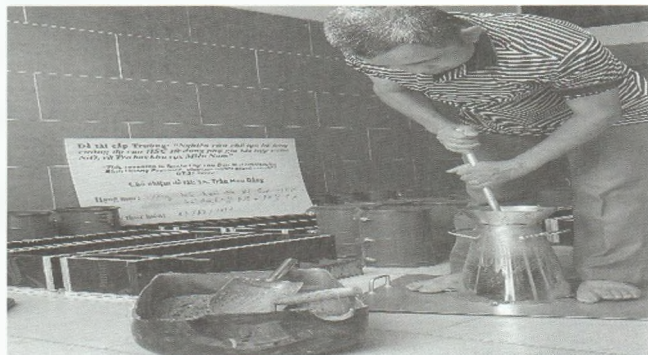
**Hình 2.5: Sơ đồ trộn hỗn hợp bê tông HSC sử dụng NS và tro bay**



**3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN**

**3.1. Ảnh hưởng NS đến độ sụt bê tông HSC**

Công tác kiểm tra độ sụt được thực hiện theo Tiêu chuẩn ASTM C143 và tham khảo TCVN 3016:1993 được thể hiện Hình 3.1 và Hình 3.2.

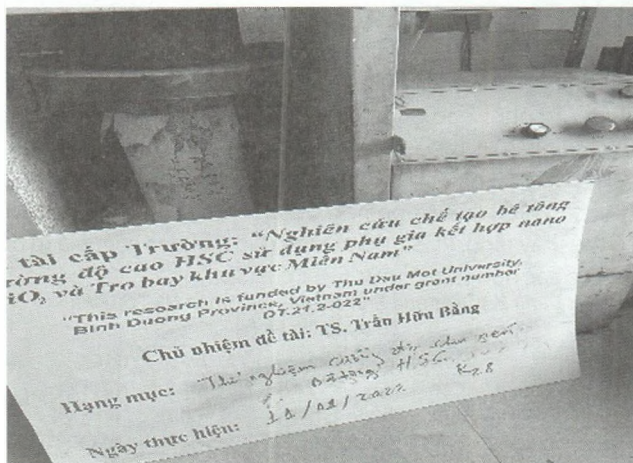
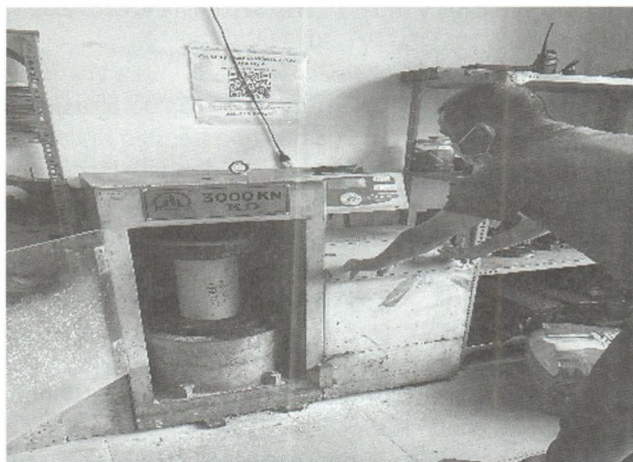
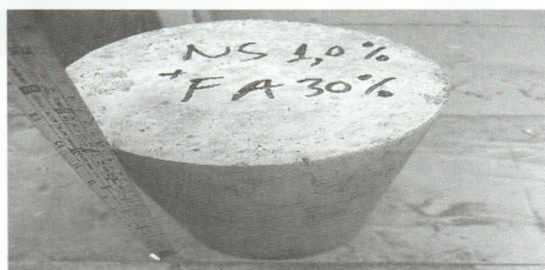


Hình 3.1: Xác định độ sụt của hỗn hợp bê tông HSC sử dụng NS và FA

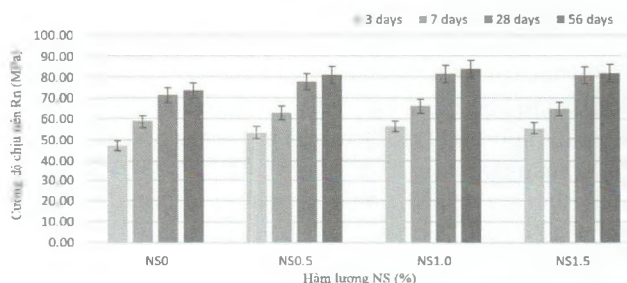
\* Nhận xét: Hỗn hợp bê tông HSC giảm giá trị độ sụt khi khối lượng của các hạt NS tăng. Sự gia tăng khối lượng các hạt nano SiO<sub>2</sub> có ảnh hưởng trực tiếp đến lượng nước cần thiết trong hỗn hợp bê tông tươi, do đó kích thước cực mịn của NS [4]. Phản ứng này nói lên một thực tế rằng, việc bổ sung những hạt có tỉ diện tích bề mặt cao vào hỗn hợp bê tông sẽ cần giảm lượng nước nhiều hơn để duy trì độ sụt mong muốn của hỗn hợp. Đối với bê tông HSC có giá trị độ sụt thấp hơn so với yêu cầu thiết kế trong phạm vi của nghiên cứu đã bổ sung thêm PGSD (theo mục 2.1, Bảng 2.1). Do đó, tăng độ dẻo của hỗn hợp bê tông HSC có chứa NS và tro bay thì việc sử dụng PGSD là cần thiết.

**3.2. Cường độ chịu nén R<sub>n</sub> bê tông HSC sử dụng NS và FA**

Kết quả thí nghiệm cường độ nén thực hiện theo Tiêu chuẩn ASTM C39 và tham khảo TCVN 3118:1993 được thể hiện Hình 3.2 và Hình 3.3.



Hình 3.2: Thí nghiệm cường độ chịu nén R<sub>n</sub> của bê tông HSC sử dụng NS và FA



Hình 3.3: Ảnh hưởng của NS đến cường độ chịu nén bê tông HSC

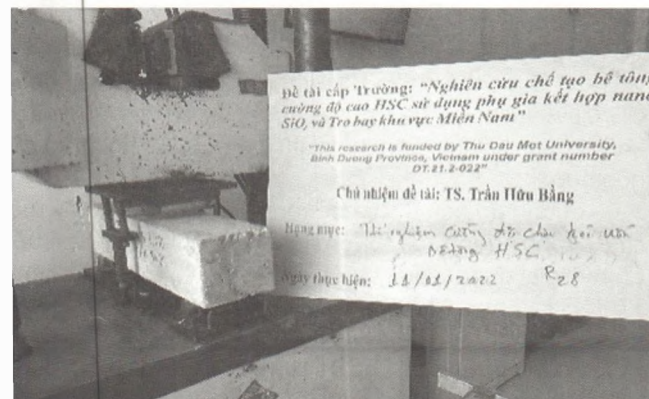
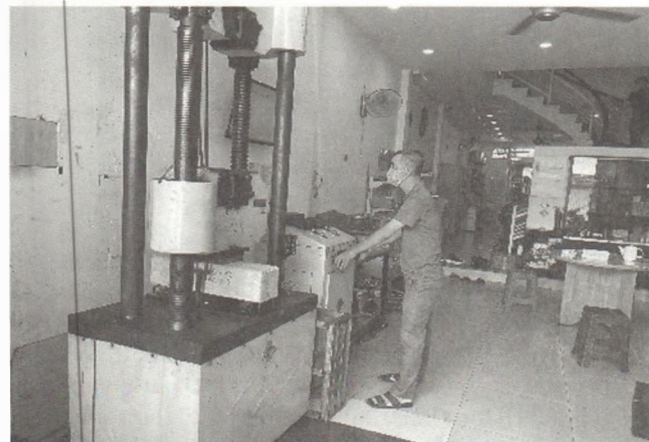
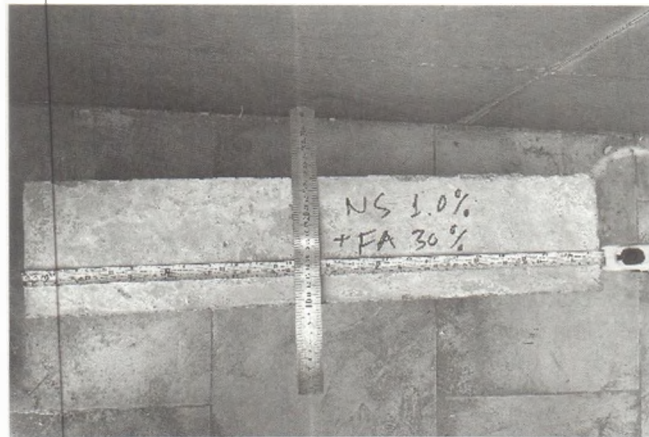
\* Nhận xét: Đối với mức ngày tuổi khác nhau, cường độ chịu nén tăng dần khi tỷ lệ NS sử dụng ≤ 1,0%. Tuy nhiên khi tỉ lệ NS tăng lên 1,5% thì cường độ tăng lên không đáng kể và có xu hướng giảm so với tỉ lệ 1,0%. Nguyên nhân có thể kể đến là do các hạt NS phân tán không đều khi tỷ lệ NS vượt quá ngưỡng 1,0%. Nguyên nhân này khó tránh khỏi khi hỗn hợp bê tông HSC được trộn bằng máy trộn cưỡng bức thông thường. Các hạt NS dư thừa không được phân tán đều và tạo thành vùng yếu trong cấu trúc bê tông, nhận định này xảy ra tương tự như các nhà nghiên cứu trước đây [5, 6]. Mặc khác, cường độ chịu nén của bê tông HSC ở 3 và 7 ngày tuổi chịu sự ảnh hưởng của NS lớn hơn so với 28 và 56 ngày tuổi. Điều này có thể quan sát qua biểu đồ Hình 3.3. Cụ thể, giai đoạn 3 ngày tuổi cường độ



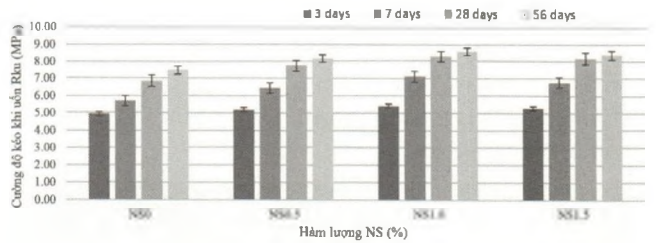
chịu nén sử dụng 1,0%NS cao hơn 0%NS là 15,85%, ở giai đoạn 7, 28 và 56 ngày tuổi mức tăng là 11,11%, 12,43% và 12,07%. Kết quả này cho thấy, khi sử dụng NS và FA trong bê tông HSC, NS giúp phát triển cường độ ở giai đoạn tuổi sớm và FA giúp phát triển cường độ ở tuổi 28 và 56 ngày. Sự phát triển cường độ nén có thể do khả năng kích hoạt các phản ứng pozzolan của các hạt NS tăng tốc sự hình thành các gel C-S-H.

**3.3. Cường độ chịu kéo khi uốn  $R_{ku}$  bê tông HSC sử dụng NS và FA**

Kết quả thí nghiệm cường độ nén thực hiện theo Tiêu chuẩn ASTM C79 và tham khảo TCVN 3119:1993 được thể hiện Hình 3.4 và Hình 3.5.



Hình 3.4: Thí nghiệm cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông HSC sử dụng NS và FA

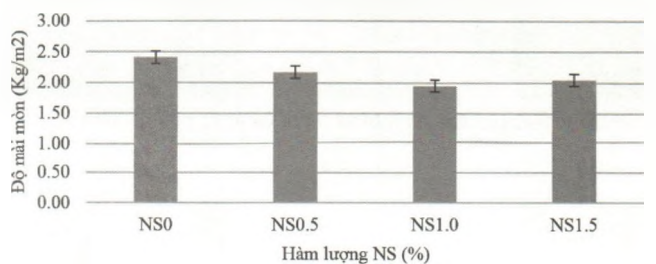


Hình 3.5: Ảnh hưởng của NS đến cường độ chịu kéo khi uốn  $R_{ku}$  bê tông HSC

\* Nhận xét: Cường độ kéo khi uốn của bê tông HSC khi sử dụng NS cải thiện đáng kể khi thêm mức tỷ lệ NS 0,5 - 1,5% và đạt giá trị cao nhất ở tỷ lệ 1,0%NS. Cụ thể, cường độ kéo khi uốn của bê tông HSC sử dụng 1,0%NS tăng lên so với mẫu đối chứng 0%NS và thay đổi theo các ngày tuổi: 9,23%, 20,08%, 17,29% và 13,17% tương tự như cường độ nén ở giai đoạn 7 ngày và 28 ngày thì giá trị tăng lên nhiều khi sử dụng NS so với mẫu đối chứng. Kết quả nghiên cứu đã minh chứng hiệu quả mang lại đối với cường độ kéo khi uốn từ việc sử dụng NS và tro bay trong bê tông HSC tương tự như các nghiên cứu trước [5, 7]. Những ảnh hưởng làm giảm giá trị cường độ khi sử dụng tỉ lệ NS vượt quá mức tối ưu cũng được các tác giả đề cập trong nghiên cứu.

**3.4. Khả năng chống mài mòn của bê tông HSC sử dụng NS và FA**

Khả năng chống mài mòn của bê tông xi măng khi làm lớp mặt đường ô tô là một trong các yếu tố quan trọng, là khả năng của vật liệu chịu tác dụng của lực ma sát. Khả năng chịu mài mòn của bê tông phụ thuộc vào hai yếu tố là cường độ chịu nén và độ cứng của cốt liệu. Độ mài mòn là tổn thất khối lượng khi bị mài mòn trên diện tích bề mặt mẫu, được thí nghiệm theo TCVN 3114:1993 và tham khảo Tiêu chuẩn ASTM C944 thể hiện trên Hình 3.6.



Hình 3.6: Biểu đồ độ mài mòn của bê tông HSC ở 28 ngày tuổi

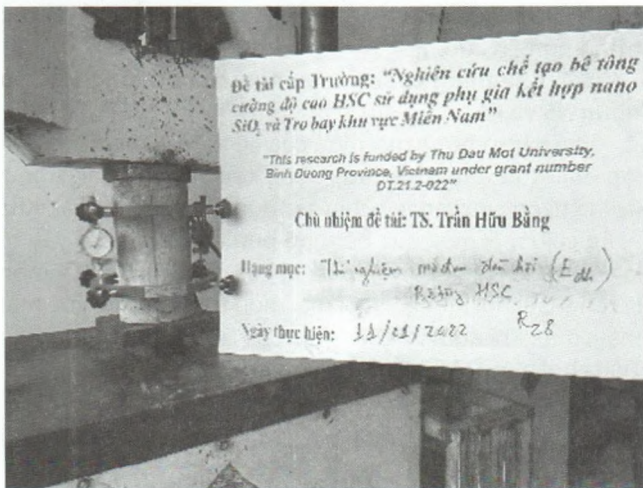
\* Nhận xét: Thí nghiệm độ mài mòn Hình 3.6. Cho thấy, khi sử dụng NS mức tỷ lệ NS 0,5 - 1,5% thì khả năng chống mài mòn cao hơn và độ mài mòn thấp hơn so với bê tông HSC 0%NS. Kết quả thí nghiệm khả năng chống mài mòn của bê tông HSC sử dụng 1,0%NS có khả năng mài mòn thấp nhất hơn so với 0%NS, 0,5%NS và 1,5%NS ở tuổi 28 ngày lần lượt là: 19,08%, 10,14% và 4,88%.

**3.5. Dụng cụ và kết quả thí nghiệm mô-đun đàn của bê tông HSC sử dụng NS và FA**

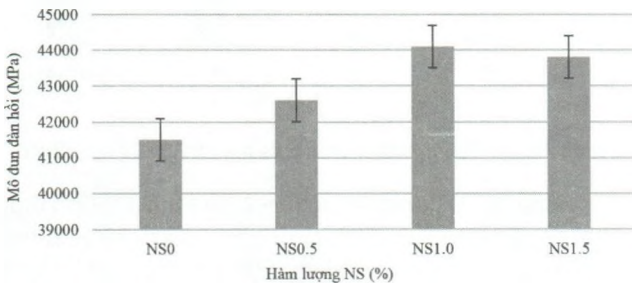
Mô-đun đàn hồi ( $E_{dh}$ ) sử dụng phụ gia nano  $SiO_2$  và tro bay là một trị số quan trọng trong tính toán biến dạng của bê tông xi măng.  $E_{dh}$  phụ thuộc chủ yếu và tính chất đàn hồi



của cốt liệu, của đá xi măng và các thành phần khác trong bê tông xi măng, tỷ lệ N/X giảm (độ đặc chắc của bê tông xi măng tăng lên). Thí nghiệm  $E_{dh}$  sử dụng phụ gia NS và FA ở tuổi 28 ngày được thí nghiệm theo ASTM C469 thể hiện Hình 3.7 và Hình 3.8.



Hình 3.7: Lắp đặt thiết bị và thí nghiệm  $E_{dh}$  của bê tông HSC



Hình 3.8: Biểu đồ  $E_{dh}$  của bê tông HSC ở 28 ngày tuổi

\* Nhận xét: Kết quả thí nghiệm  $E_{dh}$  Hình 3.8 cho thấy, khi sử dụng NS mức tỷ lệ NS 0,5 - 1,5% thì giá trị cường độ cao hơn so với bê tông HSC 0%NS. Theo một số tác giả Quercia [7], Sobolev và cộng sự [8], nguyên nhân làm gia tăng giá trị  $E_{dh}$  của bê tông sử dụng NS chủ yếu là do chất lượng vùng chuyển tiếp và các sản phẩm gel C-S-H được cải thiện. Tỷ lệ  $E_{dh}$  sử dụng 1,0%NS giúp bê tông HSC cải thiện mô-đun

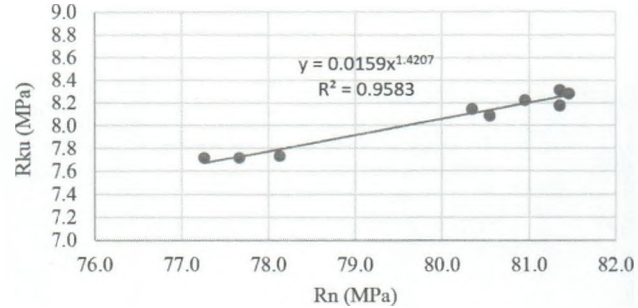
đàn hồi tốt nhất so với 0%NS, 0,5%NS và 1,5%NS ở tuổi 28 ngày lần lượt là: 5,90%, 3,40% và 0,68%.

### 3.6. Thiết lập mối tương quan từ tính chất cơ học của bê tông HSC sử dụng NS

Từ các kết quả nghiên cứu các tính chất của bê tông HSC khi sử dụng phụ gia NS thiết lập các mối quan hệ như sau:

Quan hệ giữa cường độ chịu nén  $R_n$  và kéo khi uốn  $R_{ku}$  (Hình 3.9):

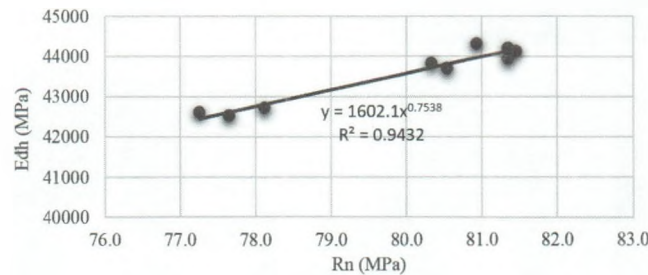
$$R_{ku} = 0,0159R_n^{1,4207}, R^2 = 0,9592 \quad (1)$$



Hình 3.9: Biểu đồ quan hệ  $R_{ku}$  và  $R_n$

Quan hệ giữa cường độ chịu nén  $R_n$  và mô-đun đàn hồi  $E_{dh}$  (Hình 3.10):

$$E_{dh} = 1602,1R_n^{0,7538}, R^2 = 0,9442 \quad (2)$$



Hình 3.10: Biểu đồ quan hệ  $E_{dh}$  và  $R_n$

\* Nhận xét: Từ các phương trình tương quan (1) và (2) cho thấy, việc sử dụng phụ gia NS tỷ lệ thuận với các tính chất  $R_n, R_{ku}, E_{dh}$  của bê tông HSC (các phương trình tương quan có độ tin cậy cao  $R^2$  lớn). Nghĩa là, khi sử dụng phụ gia NS thì tính chất cơ học của bê tông HSC tốt hơn khi không có sử dụng phụ gia NS.

## 4. KẾT LUẬN

- NS được thêm vào HSC với mức thay thế khác nhau 0%, 0,5%, 1,0% và 1,5% với hàm lượng FA cố định 30% theo khối lượng chất kết dính được giữ ở mức 0,32 cho tất cả các hỗn hợp.

- Cường độ nén  $R_n$  của bê tông HSC ở 3 và 7 ngày tuổi chịu sự ảnh hưởng của NS lớn hơn so với 28 và 56 ngày tuổi. Cụ thể, giai đoạn 3 ngày tuổi, cường độ chịu nén sử dụng 1,0%NS cao hơn 0%NS là 15,85%, ở giai đoạn 7, 28 và 56 ngày tuổi mức tăng là 11,11%, 12,43% và 12,07%.

- Cường độ kéo khi uốn  $R_{ku}$  của bê tông HSC khi sử dụng NS cải thiện đáng kể khi thêm mức tỷ lệ NS 0,5 - 1,5% và đạt giá trị cao nhất ở tỷ lệ 1,0%NS. Cụ thể, cường độ kéo khi uốn của bê tông HSC sử dụng 1,0%NS tăng lên so với mẫu đối

chứng 0%NS và thay đổi theo các ngày tuổi: 9,23%, 20,08%, 17,29% và 13,17% tương tự như cường độ nén ở giai đoạn 7 ngày và 28 ngày thì giá trị tăng lên nhiều khi sử dụng NS so với mẫu đối chứng.

- Kết quả này cho thấy, khi sử dụng NS và FA trong bê tông HSC giúp phát triển cường độ. Cụ thể, NS giúp phát triển ở giai đoạn tuổi sớm và FA giúp cải thiện sự phát triển ở giai đoạn 28 và 56 ngày tuổi. Sự phát triển cường độ có thể do khả năng kích hoạt các phản ứng pozzolan của các hạt NS tăng tốc sự hình thành các gel C-S-H.

- Trong công trình nghiên cứu này, nhóm tác giả đề xuất mức tỉ lệ phụ gia kết hợp 1,0%NS + 30%FA đáp ứng các thông số yêu cầu về vật liệu trong việc thiết kế kết cấu mặt đường ô tô cấp cao khu vực miền Nam.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Thủ Dầu Một trong Đề tài mã số DT.21.2-022.

#### Tài liệu tham khảo

- [1]. Chen, J.-F.; Ding, H.-M.; Wang, J.-X.; Shao, L. (2004), *Preparation and characterization of porous hollow silica nanoparticles for drug delivery application*, *Biomaterials*, vol.25, pp.723-727.
- [2]. Wu, L.; Lu, Z.; Zhuang, C.; Chen, Y.; Hu, R. (2019), *Mechanical Properties of Nano SiO<sub>2</sub> and Carbon Fiber Reinforced Concrete after Exposure to High Temperatures*, *Materials*, vol.12, p.3773.
- [3]. Trần Hữu Bằng, Võ Thanh Hùng, Lê Thành Trung và Phú Thị Tuyết Nga (2022), *Sử dụng phụ gia kết hợp nano SiO<sub>2</sub> và tro bay trong thiết kế thành phần bê tông xi măng cường độ cao HSC*, *Tạp chí GTVT*, số 3, tr.42-45.
- [4]. Senff L, Labrincha JA, Ferreira VM, Hotza D, Repette WL (2009), *Effect of nanosilica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars*, *Constr Build Mater*, vol.23, no.7, pp.2487-91.
- [5]. A. Khaloo, M. H. Mobini, P. Hosseini (2016), *Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete*, *Construction and Building Material*, vol.113, pp.188-201.
- [6]. P. Zhang, J. Wan, K. Wang, Q. Li (2017), *Influence of nano-SiO<sub>2</sub> on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review*, *Construction and Building Materials*, vol.148, pp.648-658.
- [7]. G. Quercia (2014), *Application of nano-silica in concrete*, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- [8]. K. Sobolev, I. Flores, R. Hermosillo (2016), *Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites*, Denver: American Concrete Institute.

**Ngày nhận bài: 29/5/2022**

**Ngày chấp nhận đăng: 27/6/2022**

**Người phản biện: TS. Vũ Việt Hưng**

**TS. Trần Thị Trúc Liễu**