

Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng lên đặc tính dẫn điện và một số ứng dụng của bê tông tự cảm biến

Research on factors affecting electrical conductive properties and applications of self-sensing concrete

Võ Minh Chí*, Nguyễn Minh Hải, Nguyễn Lan, Nguyễn Văn Hường

Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng

*Tác giả liên hệ: vmchi@dut.udn.vn

Ngày nhận bài: 19/2/2024; Ngày chấp nhận đăng: 15/3/2024

Tóm tắt:

Bê tông tự cảm biến là vật liệu ứng dụng đặc tính dẫn điện của bê tông nhằm dự đoán ứng suất hoặc biến dạng sinh ra bên trong bản thân vật liệu. Nghiên cứu này nhằm mục đích tổng quan đặc điểm chung cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến đặc tính dẫn điện của bê tông tự cảm biến. Dựa trên phân tích từ các nghiên cứu trước đây, nghiên cứu cho thấy đặc tính dẫn điện, cụ thể là điện trở suất của bê tông thay đổi khi ứng suất hoặc độ biến dạng thay đổi. Tuy nhiên, sự thay đổi này chịu ảnh hưởng phức tạp bởi rất nhiều yếu tố, và có thể được chia thành ba nhóm bao gồm (i) thành phần vật liệu và phương pháp chế tạo, (ii) cấu tạo mẫu và điều kiện dòng điện đo đạc, (iii) điều kiện tải trọng và môi trường. Dựa vào nguyên lý này, các ứng dụng của bê tông tự cảm biến hiện nay đang được triển khai chủ yếu trong công tác quan trắc sức khỏe công trình, quản lý hạ tầng và giám sát giao thông.

Từ khóa: Bê tông tự cảm biến; Đặc tính dẫn điện; Quan trắc sức khỏe công trình; Quản lý hạ tầng; Giám sát giao thông.

Abstract:

Self-sensing concrete utilizes the electrical properties of concrete to predict the stress or deformation occurring within the material itself. This study aims to provide an overview of the general properties as well as the factors influencing the electrical properties of self-sensing concrete. Based on analyses from previous studies, this study indicates that the electrical properties, specifically the electrical resistance, of concrete change with variations in the stress or strain. However, this change is influenced by numerous complex factors and can be categorized into three groups: (i) material composition and fabrication methods, (ii) specimen configuration and measurement conditions, and (iii) loading conditions and environment. Based on these principles, current applications of self-sensing concrete are primarily implemented in structural health monitoring, infrastructure management, and traffic surveillance.

Keywords: Self-sensing concrete; Conductivity properties; Structural health monitoring; Infrastructure management; traffic monitoring.

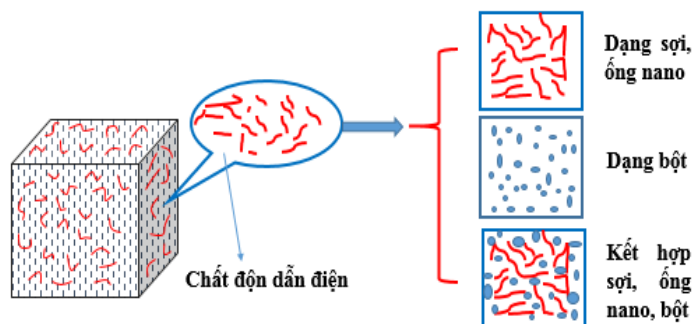
1. Giới thiệu

Công cuộc chuyển đổi số trong ngành xây dựng đang thu hút đông đảo các kỹ sư, nhà nghiên cứu tại Việt Nam và trên thế giới. Việc tự động hóa công tác quan trắc sức khỏe công trình, quản lý giao thông và hạ tầng là khâu cốt yếu để nâng cao hiệu quả trong quá trình khai thác

và vận hành hạ tầng, hướng đến phát triển các đô thị thông minh [1]. Trong quá trình này, việc phát triển các cảm biến đo đạc ứng xử ứng suất, biến dạng của công trình dưới tác động của các loại tải trọng cơ học hoặc tác động môi trường là một trong những nhiệm vụ hàng đầu. Hiện nay, nhiều công nghệ cảm biến [2] được ứng dụng rộng rãi trong ngành xây dựng như: Cảm

biến sợi quang, cảm biến sợi Bragg Grating, cảm biến áp điện, cảm biến điện hóa,... Các thiết bị cảm biến này đang được khai thác sử dụng trong nhiều công trình thực tế, nhưng chúng vẫn còn một số hạn chế nhất định như: Khó khăn trong quá trình thi công chôn gắn vào trong bê tông; các công nghệ cảm biến thường quan trắc các giá trị ứng suất, biến dạng của kết cấu trong phạm vi hẹp (tại một điểm) nên cần một số lượng lớn cảm biến để quan trắc công trình, qua đó, làm tăng đáng kể giá thành của hệ thống quan trắc; khi thay thế các cảm biến bị hư hỏng chôn bên trong kết cấu là công tác hết sức khó khăn và tốn kém. Để khắc phục các nhược điểm trên, việc phát triển song song các giải pháp mới nhằm tối ưu hóa giá thành cũng như đa dạng hóa công nghệ là một nhiệm vụ hết sức cấp thiết.

Trong bối cảnh đó, bê tông tự cảm biến [3] nhận được nhiều quan tâm lớn từ các nhà nghiên cứu trên toàn thế giới. Hình 1 thể hiện cấu trúc cơ bản của bê tông tự cảm biến, trong đó, gồm bê tông nền và các chất độn dẫn điện ở dạng bột, dạng sợi hoặc dạng ống nano được phân tán vào bê tông. Nguyên lý cơ bản để tạo ra tính tự cảm biến của bê tông là đưa vào bê tông những vật liệu có đặc tính dẫn điện một hàm lượng thích hợp để tăng tính dẫn điện của bê tông đến một mức độ phù hợp [4]. Khi đó, giá trị đặc trưng cho tính dẫn điện của vật liệu là điện trở suất của bê tông biến thiên khi vị trí tương đối của các chất độn dẫn điện bị thay đổi dưới tác động của các loại tải trọng như nén, kéo, uốn.



Hình 1. Cấu trúc cơ bản của bê tông tự cảm biến.

Ngoài ra, việc thay đổi độ ẩm hoặc nhiệt độ cũng ảnh hưởng đến sự vận chuyển các ion bên trong vật liệu, nên làm thay đổi đặc tính điện của vật liệu. Do đó, dựa vào việc đo đặc liên tục sự biến thiên giá trị điện trở suất của vật liệu [5], có thể gián tiếp dự đoán sự thay đổi của ứng suất, hoặc biến dạng xuất hiện bên trong bê tông dưới tác dụng của các loại tải trọng hoặc tác động của môi trường lên công trình. Tuy nhiên, nguyên lý trên của bê tông tự cảm biến chịu ảnh hưởng phức tạp của rất nhiều yếu tố khác nhau và vẫn được các nhà khoa học trong và ngoài nước nghiên cứu. Trong nước, nghiên cứu của Liêm và cộng sự [6] sử dụng muội than đen và xỉ lò cao nghiền mịn cải thiện khả năng tự cảm biến của bê tông tính năng cao dưới tác dụng tải trọng kéo. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng, việc dùng muội than đen và xỉ lò cao nghiền mịn giúp cải

thiện khả năng tự cảm ứng của bê tông tính năng cao cả trong giai đoạn biến dạng đàn hồi lẫn trong giai đoạn vật liệu bị phá hoại. Nghiên cứu của Chí và cộng sự [7] đã cho thấy dưới tải trọng nén, ngoài hiệu ứng xích lại gần nhau của các hạt dẫn điện, các lỗ rỗng trong cấu trúc bê tông bị thu nhỏ cũng ảnh hưởng đến sự thay đổi điện trở suất của bê tông. Do đó, thành phần và cấu trúc vật liệu ảnh hưởng đáng kể đến tính dẫn điện của bê tông, mặc dù, chúng sử dụng cùng chủng loại và hàm lượng chất độn dẫn điện dưới tác động của cùng một giá trị tải trọng. Bên cạnh đó, nhiều nghiên cứu trên thế giới cũng đã chỉ ra các yếu tố khác như cường độ dòng điện sử dụng trong quá trình đo đạc [8], cấu tạo các điện cực [9] hoặc điều kiện nhiệt độ, độ ẩm [8] ảnh hưởng đến dòng electron chạy qua vật liệu nên tác động đáng kể đến sự thay

đổi tính dẫn điện của bê tông khi cùng một tải trọng. Vì vậy, việc đánh giá một cách đầy đủ và có hệ thống ảnh hưởng của tất cả các yếu tố đến tính dẫn điện của bê tông tự cảm biến là điều cần thiết, cung cấp hiểu biết toàn diện về ứng xử của loại bê tông này để hướng tới các ứng dụng hợp lý trong tương lai.

Trong bối cảnh trên, nghiên cứu này thực hiện nhằm mục đích cung cấp một cách có hệ thống về ứng xử cảm biến cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến ứng xử này. Một cuộc xem xét toàn diện các công bố khoa học gần đây về vật liệu bê tông tự cảm biến đã được tiến hành tập trung đánh giá các yếu tố ảnh hưởng lên đặc tính dẫn điện của loại bê tông này. Các yếu tố ảnh hưởng được chia thành ba nhóm bao gồm (i) thành phần vật liệu và phương pháp chế tạo, (ii) cấu tạo mẫu và điều kiện dòng điện đo đạc, (iii) điều kiện tải trọng và môi trường. Ngoài ra, một số ứng dụng của bê tông tự cảm biến trong thời gian gần đây cũng được giới thiệu trong nghiên cứu, cung cấp các gợi ý cho những ứng dụng

tiềm năng trong công cuộc phát triển các đô thị thông minh ở tương lai.

2. Các yếu tố ảnh hưởng đến đặc tính dẫn điện của bê tông tự cảm biến

2.1. Thành phần vật liệu và phương pháp chế tạo

Có nhiều loại chất độn dẫn điện khác nhau để chế tạo bê tông tự cảm biến như tại Hình 2, bao gồm muội than đen [10], sợi carbon [11], sợi thép [10], ống carbon nano [11], bột graphene [12], bột niken [13],... nhằm tăng đặc tính dẫn điện của bê tông. Trong số đó, các nghiên cứu phát triển bê tông tự cảm biến sử dụng sợi carbon [14] chiếm một số lượng đáng kể. Với sự phát triển của công nghệ nano, ống carbon nano dần được các nhà nghiên cứu chú ý và được sử dụng nhiều trong các nghiên cứu gần đây [15]. Trong khi các chất độn như bột niken và muội than đen được sử dụng do các ưu điểm về giá thành thấp và dễ dàng trong thi công.



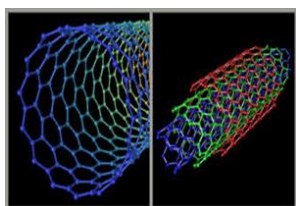
(a) Muội than đen [10].



(b) Sợi carbon [11].



(c) Sợi thép [10].



(d) Ống carbon nano [11].



(e) Bột graphene [12].



(f) Bột niken [13].

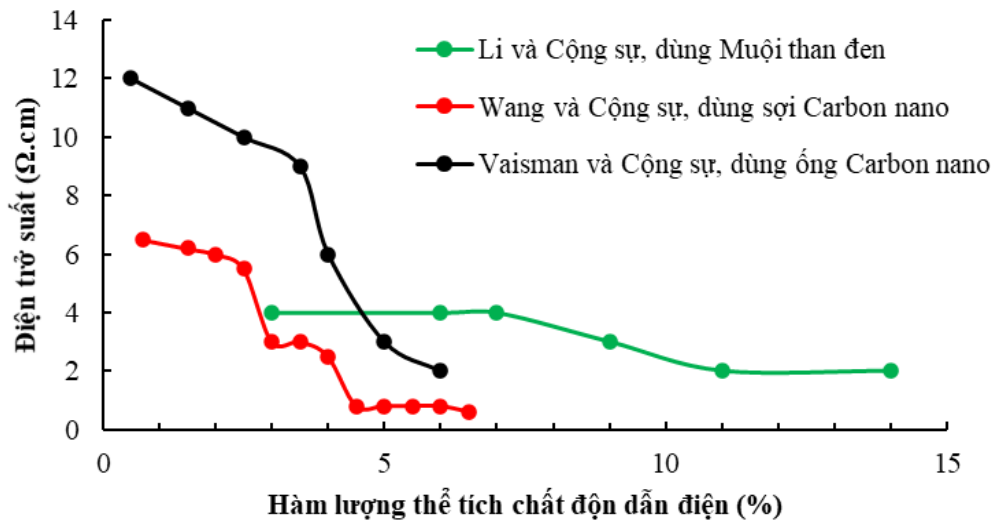
Hình 2. Một số loại chất độn dẫn điện được sử dụng trong bê tông tự cảm biến.

Về hàm lượng của chất độn, nghiên cứu của Li và cộng sự [16], Wang và cộng sự [17], Vaisman và cộng sự [18] cho thấy, hàm lượng chất độn trong bê tông ảnh hưởng đáng kể đến điện trở suất của bê tông. Hình 3 thể hiện mối quan hệ giữa điện trở suất và hàm lượng chất

độn dẫn điện bên trong bê tông sử dụng loại chất độn muội than đen, sợi carbon nano, ống carbon nano ở các nghiên cứu này. Có thể thấy, xu hướng chung là điện trở suất của bê tông giảm, nghĩa là, tính dẫn điện của bê tông tăng lên khi hàm lượng chất độn dẫn điện tăng.

Tuy nhiên, ứng với các chất độn dẫn điện khác nhau, vùng thay đổi điện trở suất đột ngột ứng với hàm lượng chất độn là khác nhau. Ví dụ, khi dùng muội than đen, điện trở suất giảm mạnh ở

vùng sử dụng bột than đen hàm lượng từ 7 đến 10%, nhưng hầu như không thay đổi ở các vùng hàm lượng nhỏ hơn hoặc lớn hơn.



Hình 3. Mối quan hệ giữa điện trở suất và hàm lượng thể tích chất độn dẫn điện trong bê tông tự cảm biến.

Tương tự, đối với trường hợp sử dụng sợi carbon hoặc ống carbon nano thì vùng điện trở suất giảm mạnh ứng với hàm lượng ở mức 3 - 5%, và điện trở suất giảm nhẹ ở mức chất độn có hàm lượng nhỏ hơn. Như vậy, có thể nhận xét rằng, sự thay đổi điện trở suất của vật liệu không chỉ phụ thuộc vào hàm lượng của chất độn, còn phụ thuộc vào sự thay đổi cấu trúc của nền bê tông làm gia tăng các lỗ rỗng và thay đổi điện trở suất của bê tông tự cảm biến. Do đó, việc lựa chọn hàm lượng chất độn dẫn điện kết hợp với tỷ lệ các thành phần khác của hỗn hợp bê tông một cách thích hợp là yếu tố then chốt để tối ưu hóa đặc tính dẫn điện của bê tông tự cảm biến. Liên quan đến vấn đề này, một số nghiên cứu khác cũng đưa ra những khuyến cáo về hàm lượng thể tích tối ưu của chất độn dẫn điện. Chung [19] cho rằng hàm lượng thể tích tối ưu khi sử dụng sợi carbon là 0,2% để chế tạo bê tông tự cảm biến đối với ứng suất kéo hoặc nén. Nghiên cứu của Taheri [20], Shi [21] sử dụng hàm lượng chất độn dẫn điện sợi carbon, ống carbon nano, sợi carbon nano dao động từ 1 đến 2% theo thể tích của hỗn hợp vữa. Trong khi muội than đen cho thấy là một chất độn dẫn điện tiềm năng nhờ hai ưu điểm chính là giá thành thấp và dễ dàng phân tán đồng đều bên

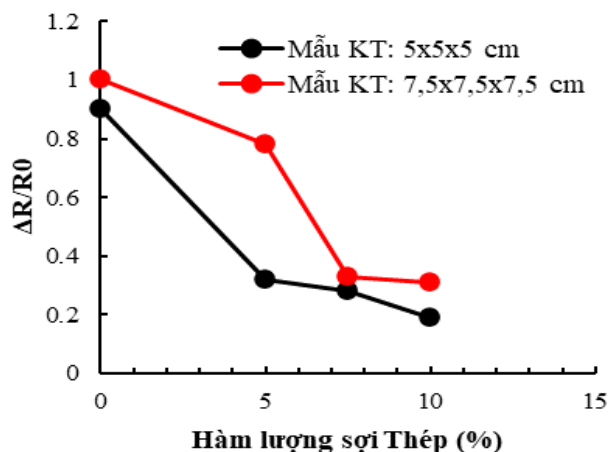
trong bê tông bằng các thao tác trộn thông thường. Theo nghiên cứu của Li và cộng sự [16], để đảm bảo tính dẫn điện bên trong bê tông khi sử dụng chất độn là muội than đen, hàm lượng chất độn cần được thiết kế với giá trị tương đối cao, lên đến 6 - 7%. Ở một khía cạnh khác, khi chế tạo bê tông tự cảm biến, việc sử dụng phụ gia thích hợp hoặc phương pháp xử lý cơ học nhằm phân tán các chất độn dẫn điện bên trong bê tông cũng là yếu tố quan trọng [22]. Khi phân tán các chất độn kích thước nano, quy trình siêu âm dung dịch chất độn được sử dụng rộng rãi. Đối với chất độn như sợi carbon, có thể cải thiện tính phân tán với methyl cellulose và chất khử bọt. Tuy nhiên, đối với sợi thép, có kích thước lớn hơn, giải pháp này dường như không hiệu quả bằng các giải pháp phân tán khi trộn cơ học cưỡng bức kết hợp với phụ gia cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông. Các loại phụ gia siêu dẻo cũng có thể được kết hợp một cách hiệu quả giúp phân tán các loại chất độn bằng một quy trình đơn giản hơn [23]. Han và cộng sự [23] cho rằng phụ gia siêu dẻo có thể được sử dụng độc lập như một chất phân tán và giúp phân tán các ống carbon nano trong nước một cách hiệu quả, thúc đẩy tính đồng nhất của các ống carbon nano trong xi măng. Wang và

cộng sự [17] đã chứng minh rằng điện trở suất của bê tông chứa sợi carbon nano thay đổi đáng kể với hàm lượng chất siêu dẻo khác nhau. Như vậy, các nghiên cứu trên được tổng hợp đã cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của chủng loại, hình dáng, kích thước và hàm lượng chất độn dẫn điện đến tính tự cảm biến của bê tông. Các chất độn dẫn điện như kim loại và các oxit của chúng dễ bị tác động bởi môi trường bên ngoài dẫn đến thay đổi điện trở suất và ảnh hưởng đến độ chính xác của hiệu suất cảm biến theo thời gian sử dụng. Ngược lại, chất độn dẫn điện carbon có độ bền tốt hơn, khả năng kháng kiềm tốt và hiệu suất dẫn điện, do đó, chúng được sử dụng làm chất độn dẫn điện cho bê tông tự cảm biến. Ngoài ra, việc phân tán các chất độn dẫn điện bên trong bê tông đóng vai trò quan trọng. Vì vậy, các giải pháp cơ học và hóa học cần được sử dụng, kết hợp một cách hợp lý trong quá trình chế tạo bê tông tự cảm biến.

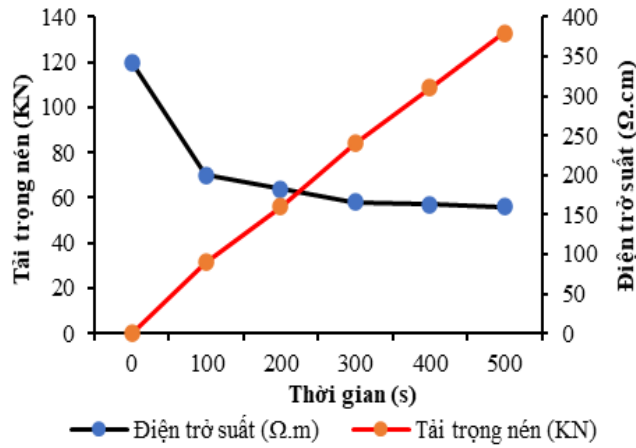
2.2. Cấu tạo mẫu vật liệu và điều kiện dòng điện đo đặc

Biến thiên điện trở của cùng loại vật liệu dưới tác dụng cùng loại tải trọng có thể khác nhau, phụ thuộc vào cấu tạo và hình dạng của mẫu vật liệu được thí nghiệm. Nghiên cứu của Imad và cộng sự [24] sử dụng mẫu lập phương 7.5 x 7.5 x 7.5 cm, 5 x 5 x 5 cm chứa hàm lượng chất độn dẫn điện sợi thép khác nhau. Nghiên cứu thể hiện, sự thay đổi điện trở so với điện trở ban đầu ($\Delta R/R_0$, với ΔR là biến thiên điện trở dưới tác dụng của tải trọng; R_0 là điện trở ban đầu của mẫu) của mẫu có kích thước lớn hơn thì sự thay

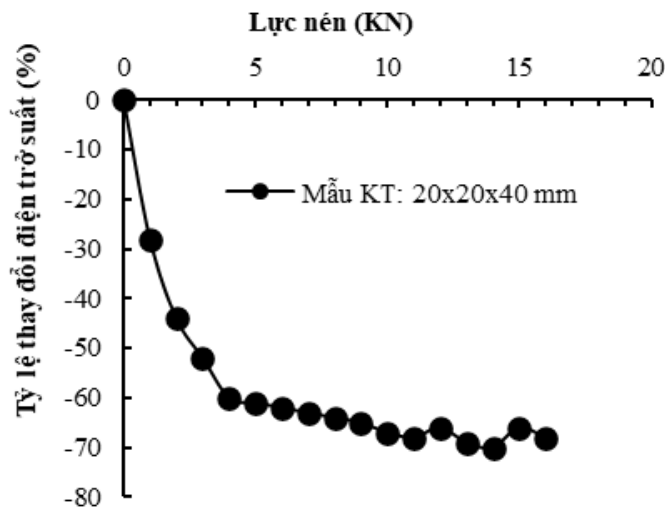
đổi này cao hơn so với mẫu có kích thước nhỏ hơn như thể hiện ở Hình 4(a). Tương tự, nghiên cứu của Azhari và cộng sự [11] sử dụng mẫu có dạng hình trụ, đường kính 50,8 mm và cao 100 mm chứa chất độn dẫn điện sợi carbon nano để nhận thấy sự biến thiên điện trở suất khi xuất hiện vết nứt dưới tác dụng tải trọng nén. Nghiên cứu này chỉ ra các giá trị điện trở suất giảm khi tải tăng với ứng xử là phi tuyến tính, nhưng thay đổi của tải theo thời gian là tuyến tính, như thể hiện tại Hình 4(b). Nghiên cứu của Galao và cộng sự [25] sử dụng mẫu hình lăng trụ kích thước 20 x 20 x 40 mm chứa chất độn là bột niken dưới tác dụng của tải trọng nén. Nghiên cứu này cho thấy tỷ lệ điện trở suất của mẫu giảm nhanh ở giai đoạn gia tải ban đầu và sự thay đổi này chậm lại khi lực nén đạt 4 KN. Sau đó, tỷ lệ điện trở suất tiếp tục thay đổi chậm cho đến khi mẫu bị phá hủy như thể hiện tại Hình 4(c). Các kết quả của những phép đo này được thể hiện tại Hình 4(b) và (c), nhận thấy sự thay đổi rõ rệt của giá trị điện trở suất thuộc mẫu khi thay đổi tải trọng, nhưng nếu so sánh các hình với nhau, thấy rằng các ứng xử này là khác nhau khi kích thước và hình dạng mẫu thử khác nhau. Điều này được lý giải do thay đổi hình dạng và kích thước mẫu làm cho giá trị điện trở ban đầu của mẫu cũng thay đổi, đồng thời, giá trị cường độ dòng điện qua mẫu dưới cùng một điện áp kích thích có sự biến đổi, mặc dù, mẫu còn chịu ảnh hưởng bởi các yếu tố khác. Hiệu ứng này có thể làm thay đổi ứng xử điện trở suất của mẫu dưới cùng một giá trị tải trọng.



(a) Mẫu lập phương kích thước 7.5 x 7.5 x 7.5 cm, 5 x 5 x 5 cm [24].



(b) Mẫu hình trụ, đường kính 50,8 mm và cao 100 mm [11].



(c) Mẫu hình lăng trụ kích thước 20 x 20 x 40 mm [25].

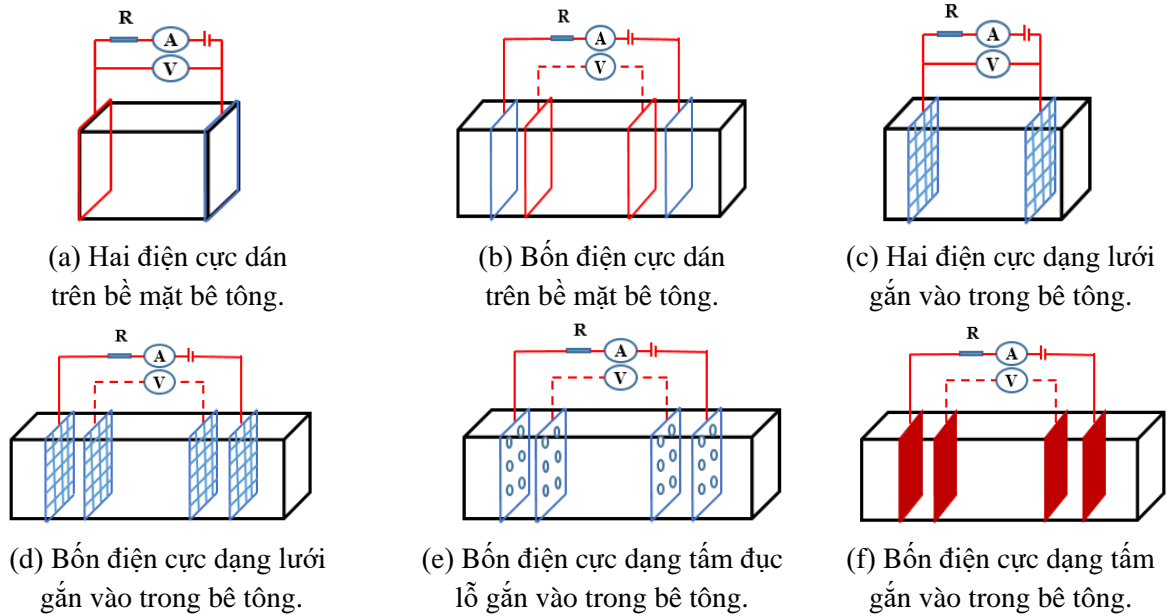
Hình 4. Ảnh hưởng của kích thước và hình dạng mẫu.

Tương tự, cấu tạo và khoảng cách của các điện cực gắn vào mẫu thử để đo điện trở suất của bê tông cũng là một vấn đề đáng chú ý, vì các điện cực có thể ảnh hưởng trực tiếp đến giá trị điện trở và tính dẫn điện của mẫu thử. Theo Han và cộng sự [9], việc chế tạo các điện cực cho bê tông tự cảm biến đáp ứng ba khía cạnh: Lựa chọn vật liệu điện cực, phương pháp cố định điện cực và phương pháp bố trí điện cực. Vật liệu điện cực cần có hai tính năng là điện trở thấp và tính chất dẫn điện ổn định, các vật liệu được sử dụng chủ yếu là kim loại như đồng, bạc, thép không gỉ,... với cấu tạo dạng lưới hoặc dạng tấm có hoặc không có lỗ. Điện cực thường được đặt theo bố cục hai điện cực hoặc bốn điện cực [5]. Hiện tại, có sáu sơ đồ bố trí điện cực thường được sử dụng trong các nghiên cứu như thể hiện trong Hình 5. Các điện cực dán trên bề

mặt của mẫu bê tông theo sơ đồ (a) và (b), thường được dùng cho đo đạc trong phòng thí nghiệm, vì chúng không ảnh hưởng đến cấu trúc bên trong của bê tông. Tuy nhiên, các loại điện cực dán này dễ bị tách khỏi bê tông trong các ứng dụng thực tế. Để khắc phục vấn đề này, bốn phương án như Hình 5(c) - (f) đã được đề xuất. Điện cực dạng lưới, tấm đục lỗ gắn vào trong bê tông có thể giảm thiểu ảnh hưởng điện trở của điện cực và điện cực gắn vào trong bê tông được bảo vệ rất tốt, đồng thời, không làm suy giảm nhiều cường độ cơ học của mẫu bê tông [9]. Mặt khác, khi đo điện trở suất của bê tông tự cảm biến, mặc dù, có chất độ dẫn điện nhưng nhìn chung, bê tông vẫn có thể được xem là vật liệu với độ dẫn điện thấp [26]. Vì vậy, việc cung cấp một dòng điện kích thích có độ lớn nhất định để tạo ra dòng điện ổn định khi

thực hiện đo đặc là điều kiện tiên quyết trong phép đo [7]. Các nghiên cứu thường dùng những sơ đồ mạch điện như Hình 5 để đo đặc điện trở suất tương ứng với việc bố trí điện cực hai đầu dò hay bốn đầu dò. Trong phương pháp bốn đầu dò, bốn tiếp điểm điện được sử dụng, với hai tiếp điểm bên ngoài để truyền dòng điện và hai tiếp điểm bên trong để đo điện áp. Trong

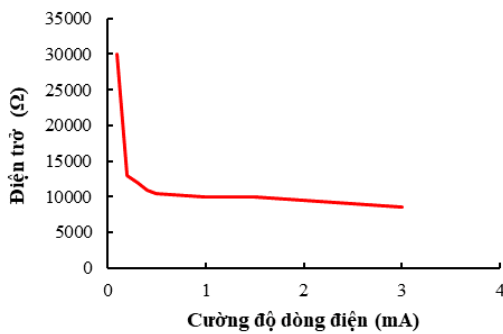
phương pháp hai đầu dò, hai tiếp điểm điện được sử dụng, với mỗi tiếp điểm được dùng cho cả dòng điện đi qua và đo điện áp. Ở hai phương pháp này, cường độ dòng điện ảnh hưởng trực tiếp lên kết quả đo đặc điện trở suất ban đầu cũng như sự biến thiên điện trở suất của bê tông dưới tác động của tải trọng.



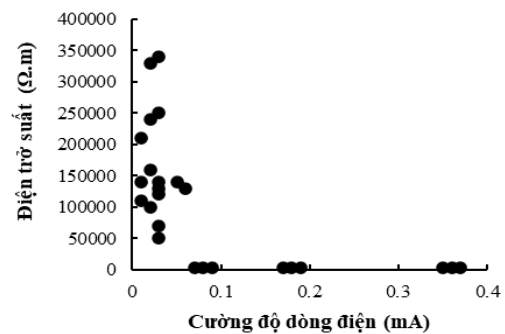
Hình 5. Các dạng sơ đồ bố trí điện cực.

Theo nghiên cứu của Monteiro và cộng sự [27], cường độ dòng điện ảnh hưởng đến điện trở suất của mẫu bê tông tự cảm biến, và khi dòng điện kích thích đạt khoảng 2 mA thì điện trở của mẫu được ổn định như thể hiện ở Hình 6(a). Tương tự, nghiên cứu của Chí và cộng sự [8] cho thấy kết quả tương tự đối với bê tông tự cảm biến sử dụng bột than đen với hàm lượng khối lượng 2%. Điện trở suất ban đầu của vật liệu trở nên ổn định dưới một dòng điện có độ lớn trên 0,1 mA, như Hình 6(b). Mặt khác, một nghiên cứu

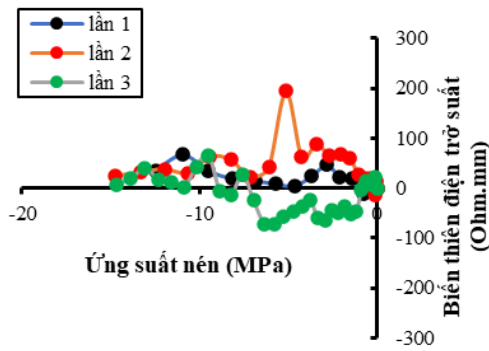
khác của Chi và cộng sự [7] sử dụng điện áp kích thích 12 V và 24 V để đo đặc sự biến thiên điện trở suất của bê tông sử dụng muội than đen dưới tác dụng của tải trọng nén. Kết quả cho thấy là thay đổi điện trở suất bê tông không ổn định như Hình 6(c) khi sử dụng điện áp kích thích 12 V ở cả ba lần đo tái lập, trong khi sự thay đổi điện trở suất này ổn định hơn ở trường hợp sử dụng điện áp kích thích 24 V như thể hiện ở Hình 6(d).



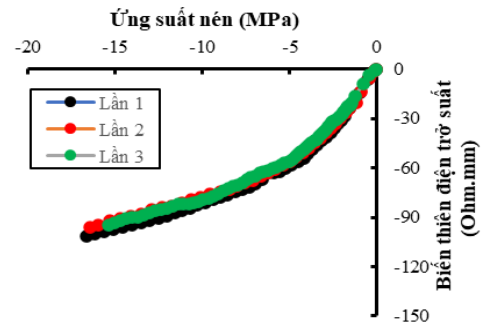
(a) Ảnh hưởng cường độ dòng điện đến thay đổi điện trở.



(b) Ảnh hưởng cường độ dòng điện đến thay đổi điện trở suất.



c) Ảnh hưởng điện áp kích thích 12V.

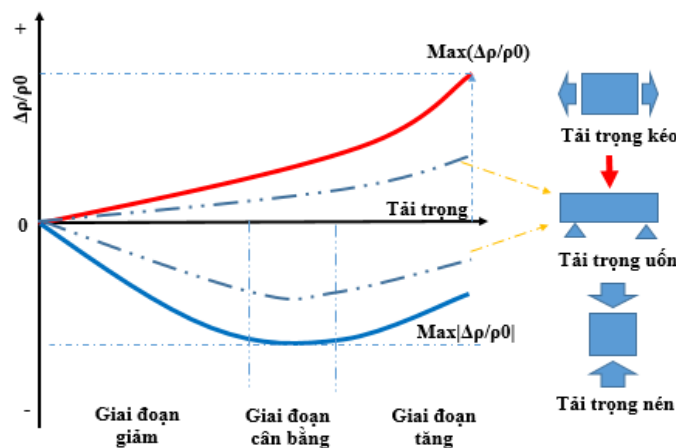


(d) Ảnh hưởng điện áp kích thích 24V.

Hình 6. Ảnh hưởng của dòng điện kích thích.2.3. Điều kiện tải trọng và môi trường

Bê tông tự cảm biến được sử dụng để dự đoán gián tiếp ứng suất và biến dạng sinh ra trong vật liệu dưới tác động của các loại tải trọng cơ học và môi trường. Hình 7 thể hiện sự thay đổi điện trở suất so với giá trị điện trở suất ban đầu của bê tông tự cảm biến (ký hiệu: $\Delta\rho/\rho_0$, với $\Delta\rho$ là biến thiên điện trở suất dưới tác dụng của tải trọng; ρ_0 là điện trở suất ban đầu) dưới tác động của tải trọng cơ học bao gồm nén, uốn và kéo [28]. Dưới tác dụng của tải trọng nén tĩnh, giá trị trực tiếp đầu tiên là giảm, tiếp theo trở nên cân bằng và sau đó đột ngột tăng lên. Điều này nghĩa là, ban đầu điện trở suất của vật liệu giảm khi các chất độn dẫn điện xích lại gần nhau. Tuy nhiên, sau khi xuất hiện các vết nứt vi mô do nén, các lỗ rỗng không khí hình thành làm cho điện trở suất của vật liệu tăng như thể hiện ở

Hình 7. Trong khi đó, dưới tác dụng của lực kéo tĩnh, độ biến thiên điện trở suất $\Delta\rho/\rho_0$ tăng lên do các chất độn bên trong bê tông rời xa nhau và độ biến thiên này càng lớn hơn khi các vết nứt vi mô do lực kéo bắt đầu xuất hiện. Do đó, có thể kết luận rằng, tính cảm biến của bê tông không chỉ phụ thuộc vào sự thay đổi vị trí tương đối giữa các hạt dẫn điện, còn phụ thuộc vào quá trình hình thành các vết nứt bên trong vật liệu dưới tác động của các loại tải trọng khác nhau. Ngoài ra, dưới tác dụng của tải trọng uốn, có thể xảy ra hai trường hợp ứng xử như Hình 7. Điều này được Wen và Chung [29] giải thích bởi phụ thuộc vào tương quan giữa cường độ kéo và nén của bê tông, cũng như kích thước của mẫu đầm chịu uốn.



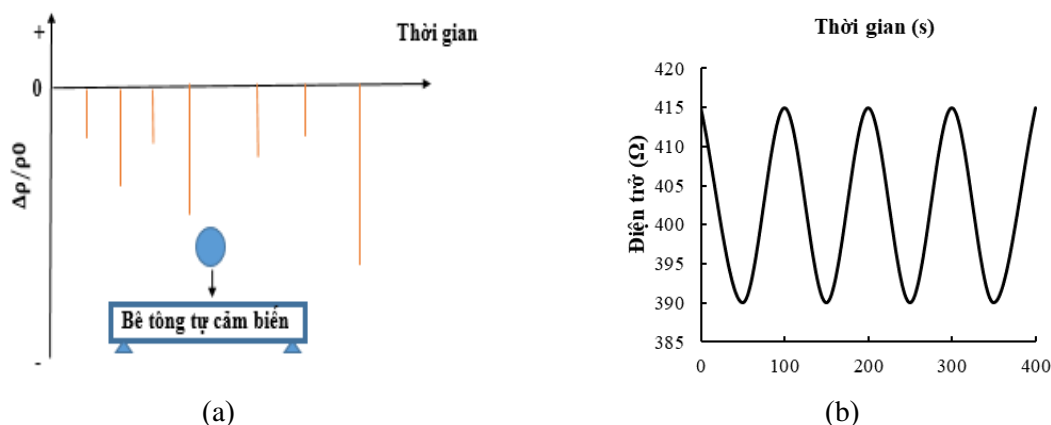
Hình 7. Hành vi tự cảm biến của bê tông dưới tác dụng các loại tải trọng tĩnh [28].

Mặt khác, dưới tác động của tải trọng va đập, ứng xử của $\Delta\rho/\rho_0$ có tính tức thời, như Hình 8(a) [28]. Tác động và đập càng lớn, biến thiên của điện trở suất càng cao. Tuy nhiên, biên độ

này trở nên mất ổn định và độ chính xác khi xuất hiện các vết nứt hoặc hư hại bên trong bê tông tự cảm biến. Bên cạnh đó, ứng xử của bê tông tự cảm biến chứa ống carbon nano khi chịu

tác động của tải trọng nén lặp, được Parvaneh và cộng sự [30] thể hiện như Hình 8(b). Trong giới hạn không phá hủy, ứng xử điện trở suất tương ứng với tải trọng lặp, chứng tỏ tiềm năng của bê tông tự cảm biến trong các ứng dụng cho tải trọng động hoặc có tính chu kỳ như tải trọng giao thông. Bên cạnh đó, nghiên cứu của Duy và cộng sự [31] về bê tông tính năng cao tự cảm biến gia cường cốt sợi thép dưới tác dụng tải

trọng uốn trùng phục. Khả năng tự cảm biến của bê tông được đánh giá thông qua hệ số cảm biến. Kết quả nghiên cứu cho thấy các mẫu đều thể hiện khả năng tự cảm biến rất tốt dưới tác động của tải trọng uốn trùng phục. Khi tăng tỷ lệ ứng suất mỗi từ 0,15 đến 0,50, khả năng tự cảm biến của tất cả loạt mẫu có xu hướng giảm, mặc dù, giá trị tuyệt đối của độ thay đổi điện trở tương đối tại mặt kéo và mặt nén có xu hướng tăng.



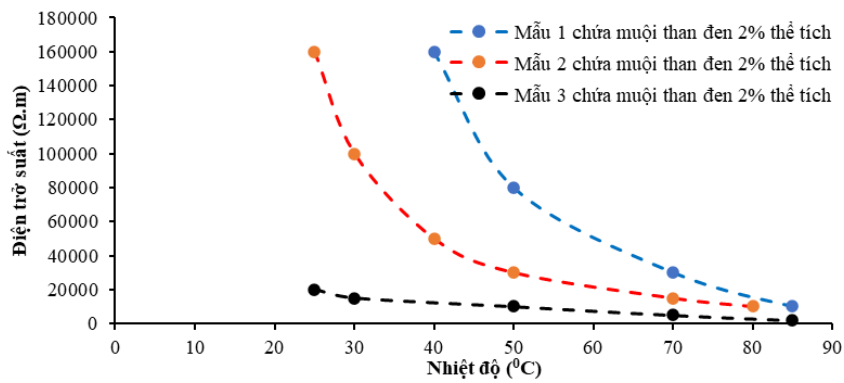
Hình 8. Hành vi tự cảm biến của bê tông tự cảm biến: (a) dưới tác dụng tải trọng va đập [28], (b) dưới tác dụng tải trọng nén động [30].

Bên cạnh các nghiên cứu xem xét ứng xử điện của bê tông dưới tác động của các loại tải trọng cơ học, một số nghiên cứu còn cho thấy ứng xử này dưới tác dụng của các yếu tố môi trường như nhiệt độ và độ ẩm. Han và cộng sự [14] cho rằng ảnh hưởng của nhiệt độ đến hiệu suất cảm biến của bê tông tự cảm biến được phản ánh ở hiệu ứng nhiệt độ điện trở. Vật liệu bị giãn nở khi nóng và co lại do lạnh, sự thay đổi nhiệt độ làm biến đổi khoảng cách giữa các chất dẫn điện và sự phân bố của mạng dẫn điện, ảnh hưởng đến hiệu suất cảm biến. Duy và Cộng sự [32] chỉ ra rằng ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện trở suất của bê tông cốt sợi hiệu suất cao thông qua phương pháp thử nghiệm. Theo đó, điện trở suất của bê tông cốt sợi hiệu suất cao giảm rõ rệt khi tăng nhiệt độ từ 0°C lên 50°C. Mặt khác, Chí và cộng sự [8] chứng minh rằng điện trở suất của bê tông tự cảm biến giảm khi nhiệt độ tăng, do sự dịch chuyển của các hạt mang điện như electron và ion ở nhiệt độ tăng, xu hướng này thể hiện tại Hình 9. Một điểm đáng lưu ý trong nghiên cứu này là, mặc dù được chế tạo

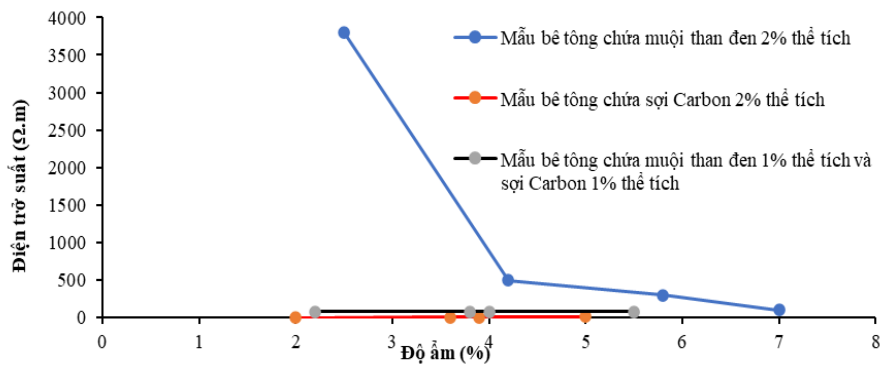
bởi cùng thành phần vật liệu, giá trị điện trở suất ban đầu của các mẫu bê tông có thể rất khác nhau và rất khó đạt được sự đồng nhất hoàn toàn. Do đó, việc đo đạc giá trị điện trở suất ban đầu ở điều kiện môi trường chuẩn là điều kiện tiên quyết trước khi sử dụng, và giá trị này có thể được hiệu chuẩn dựa trên việc đánh giá chính xác ảnh hưởng của các yếu tố môi trường lên giá trị ban đầu này. Tương tự, độ ẩm cũng có ảnh hưởng đến điện trở suất của bê tông do các ion trong nước có thể len lỏi vào các lỗ rỗng bên trong cấu trúc bê tông làm thay đổi đặc tính dẫn điện. Tuy nhiên, ảnh hưởng này cũng khá phức tạp, phụ thuộc vào bản thân cấu trúc của vật liệu và các chất dẫn điện khác nhau. Chí và cộng sự [8] cũng cho rằng đối với mẫu bê tông tự cảm biến chứa muối than đen 2%, khi độ ẩm tăng lên, điện trở suất của mẫu giảm. Đối với mẫu chứa sợi carbon 2% và mẫu kết hợp muối than đen 1% với sợi carbon 1% thì điện trở suất của mẫu tăng nhẹ hoặc ổn định khi độ ẩm tăng (Hình 10). Mặt khác, ảnh hưởng của độ ẩm đến thay đổi điện trở cũng liên quan đến hàm lượng chất độn

dẫn điện (Hình 11) [33]. Nếu bê tông chứa hàm lượng sợi thấp dẫn đến thay đổi điện trở cao, khi

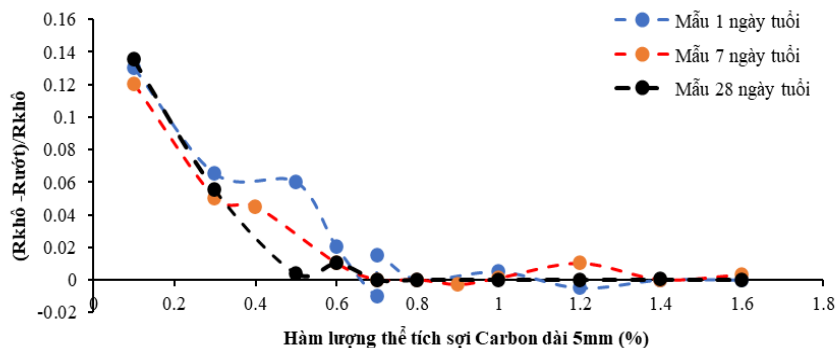
hàm lượng sợi cao, ảnh hưởng thay đổi của điện trở ít và tương đối ổn định.



Hình 9. Mối quan hệ giữa điện trở suất và nhiệt độ [8].



Hình 10. Ảnh hưởng độ ẩm đến thay đổi điện trở suất bê tông [7].



Hình 11. Ảnh hưởng độ ẩm đến tính dẫn điện khi thay đổi hàm lượng sợi carbon [33].

3. Một số ứng dụng của bê tông tự cảm biến

Với nguyên lý và các yếu tố ảnh hưởng như đã trình bày tại Mục 1 và 2, bê tông tự cảm biến được xem là vật liệu tiềm năng trong các ứng dụng ở hai lĩnh vực chính bao gồm: Quan trắc sức khỏe công trình, quản lý hạ tầng và giao thông. Các ứng dụng này và những nghiên cứu có liên quan được thể hiện tổng quát trong Bảng 1. Đối với lĩnh vực quan trắc sức khỏe công trình, bê tông tự cảm biến chứa các loại chất dẫn điện được ứng dụng đo đặc ứng suất, biến dạng, vết nứt của kết cấu công trình dưới tác

động của các loại tải trọng. Chacko và cộng sự [34] sử dụng bê tông tự cảm biến chứa chất dẫn điện sợi carbon dưới tác dụng của tải trọng nén dọc trục áp dụng để theo dõi biến dạng và tình trạng xuất hiện vết nứt của kết cấu trụ. Theo đó, khi chịu tải trọng nén, điện trở suất giảm liên tục trong phạm vi đàn hồi, và tiếp tục cho đến khi hình thành vết nứt được nhìn thấy, khi đó nó tăng đột ngột. Dựa vào nguyên lý này, nhóm tác giả trên đề xuất việc sử dụng bê tông tự cảm biến để theo dõi liên tục độ biến dạng của kết cấu trụ và có giải pháp xử lý khi phát

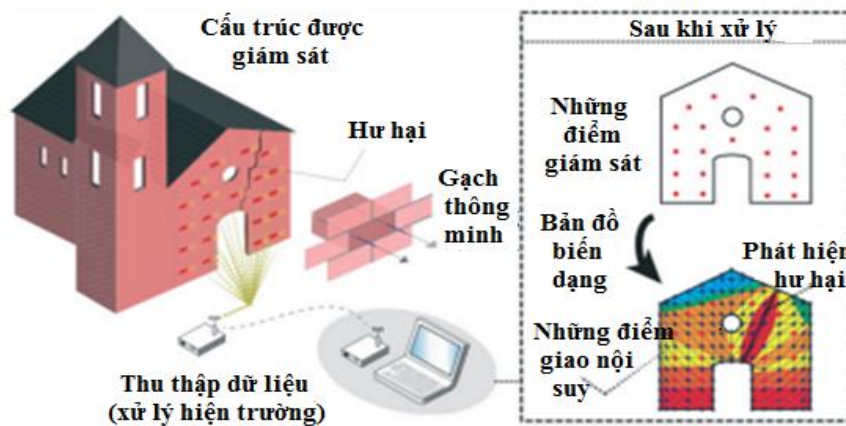
biến bất thường trong ứng xử điện của bê tông. Tương tự, Baeza và cộng sự [35] sử dụng bê tông tự cảm biến chứa chất độn dẫn điện sợi carbon hoặc sợi carbon nano chịu uốn nhằm theo dõi ứng xử biến dạng của dầm. Nghiên cứu đã chứng minh khả năng áp dụng của bê tông tự cảm biến để phát hiện các vết nứt cục bộ do hư hại nén hoặc nứt do kéo uốn xuất hiện trên kết cấu dầm. Sun và cộng sự [36] sử dụng bê tông cường độ siêu cao tự cảm biến chứa sợi thép chịu tác dụng tải trọng nén để theo dõi biến dạng, giám sát hư hỏng của cột bê tông. Nghiên cứu này đã cho thấy tiềm năng của bê tông tự cảm biến không chỉ áp dụng cho cấu kiện với cấp bê tông thường, còn có thể sử dụng đối với các cấu kiện dầm bê tông ở cấp cường độ siêu cao. Ngoài ra, García-Macías và cộng sự [37] hay Alessandro [38] đã đề xuất giải pháp sử dụng bê tông như một loại cảm biến thông minh được nhúng vào các cấu kiện của những tòa nhà dân dụng, hạ tầng để quan trắc liên tục sức khỏe công trình, đặc biệt là phát hiện sự cố sau thiên tai như động đất hoặc sạt lở đất. Giải pháp này được coi là một phương án tiềm năng và đơn giản để áp dụng trong các công trình dân dụng tương lai (Hình 12).

Đối với lĩnh vực quản lý hạ tầng và giám sát giao thông, một số ứng dụng tiềm năng của bê tông tự cảm biến hướng đến xây dựng thành phố thông minh [1]. Sassan và cộng sự [39] đã nghiên cứu bê tông tự cảm biến chứa sợi carbon làm sưởi ấm mặt đường, tan băng, tuyết, thay thế cho những phương pháp truyền thống. Shi và Chung [40] đã thực hiện nghiên cứu trong phòng thí nghiệm về giám sát giao thông và trạm cân động sử dụng bê tông tự cảm biến chứa sợi carbon ngắn. Han và cộng sự [41] thực hiện thí nghiệm bê tông tự cảm biến chứa ống carbon nano đa vách để phát hiện luồng giao thông trên mặt đường. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng bê tông tự cảm biến có thể được sử dụng để phát hiện tải trọng, tốc độ lưu lượng của phương tiện khi đang chuyển động, như thể hiện tại Hình 13. Bên cạnh đó, còn có một số nghiên cứu ứng dụng bê tông tự cảm biến được thực hiện ngoài hiện trường. Han và cộng sự [42] đã sử dụng bê tông tự cảm biến đúc sẵn và đổ tại chỗ chứa ống carbon nano để phát hiện phương tiện giao thông đi qua theo thời gian thực như tốc độ, lưu lượng, mật độ phương tiện giao thông. Han và cộng sự [13] đã triển khai các cảm biến làm từ các hạt niken để phát hiện chuyển động của các phương tiện giao thông.

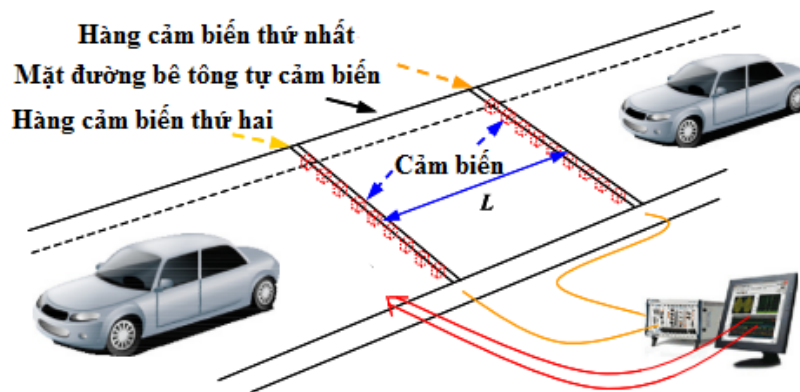
Bảng 1. Một số ứng dụng của bê tông tự cảm biến.

| Lĩnh vực | Khái quát | Tài liệu |
|-------------------------------|---|----------|
| | Theo dõi biến dạng và phát hiện nứt kết cấu trụ khi thay đổi điện trở suất của bê tông tự cảm biến chứa sợi carbon. | [34] |
| | Theo dõi biến dạng và phát hiện nứt cục bộ của kết cấu dầm bằng cách sử dụng bê tông tự cảm biến chứa sợi carbon nano và sợi carbon. | [35] |
| Quan trắc sức khỏe công trình | Theo dõi biến dạng giám sát hư hỏng của cột bê tông cường độ siêu cao chịu ứng suất nén, biến dạng. | [36] |
| | Đề xuất giải pháp sử dụng gạch bê tông tự cảm biến vào các kết cấu tòa nhà dân dụng, hạ tầng để quan trắc liên tục sức khỏe công trình, đặc biệt là phát hiện sự cố sau thiên tai như động đất hoặc sạt lở đất. | [37] |
| | Giám sát biến dạng/ứng suất, phát hiện hư hỏng và giám sát tải trọng của các tòa nhà dân dụng bằng bê tông tự cảm biến với chất độn góc carbon. | [38] |
| Quản lý hạ tầng và giao thông | Sử dụng đặc tính điện của bê tông tự cảm biến chứa sợi carbon để làm tan băng/tuyết trên bề mặt đường. | [39] |

| Lĩnh vực | Khái quát | Tài liệu |
|----------|--|----------|
| | Sử dụng bê tông tự cảm biến chứa sợi carbon để giám sát giao thông và trạm cân động. | [40] |
| | Sử dụng bê tông tự cảm biến chứa carbon nano để giám sát giao thông như phát hiện luồng giao thông, cân động phương tiện và phát hiện tốc độ phương tiện. | [41] |
| | Phát triển bê tông tự cảm biến chứa ống carbon nano từ thí nghiệm trong phòng và thí nghiệm thực tế nhằm phát hiện lưu lượng phương tiện, tốc độ phương tiện và mật độ giao thông. | [42] |
| | Sử dụng bê tông tự cảm biến chứa bột niken nhằm phát hiện lưu lượng giao thông. | [13] |



Hình 12. Ứng dụng bê tông tự cảm biến theo dõi sức khỏe kết cấu bằng gạch thông minh [37].



Hình 13. Ứng dụng bê tông tự cảm biến để đo tải trọng, lưu lượng, tốc độ xe [41].

Mặc dù bê tông tự cảm biến chưa được sử dụng rộng rãi trong các dự án thực tế và ứng dụng thương mại, nhưng những kết quả đạt được về thí nghiệm trong các lĩnh vực như quan trắc sức khỏe công trình xây dựng, quản lý hạ tầng và giám sát giao thông có sử dụng các chất dẫn điện như sợi carbon, vật liệu ống carbon nano và các chất độn gốc carbon khác. Điều này,

chứng tỏ rằng công nghệ này rất tiềm năng để triển khai các dự án thực tế trong tương lai.

4. Kết luận

Bài báo thực hiện nghiên cứu tổng quan về bê tông tự cảm biến, các yếu tố ảnh hưởng đến đặc tính dẫn điện cũng như các hướng ứng dụng tiềm năng của loại bê tông này. Dựa trên phân tích từ các nghiên cứu trước đây, nghiên cứu

cho thấy đặc tính dẫn điện của bê tông tự cảm biến, cụ thể là điện trở suất thay đổi khi ứng suất hoặc độ biến dạng của bê tông thay đổi. Tuy nhiên, sự thay đổi này chịu ảnh hưởng phức tạp bởi rất nhiều yếu tố, và có thể được chia thành ba nhóm, gồm (i) thành phần vật liệu và phương pháp chế tạo, (ii) cấu tạo mẫu và điều kiện dòng điện đo đạc, (iii) điều kiện tải trọng và môi trường. Dựa vào các nguyên lý trên, ứng dụng của bê tông tự cảm biến hiện nay đang được triển khai chủ yếu trong công tác quan trắc sức khỏe công trình, quản lý hạ tầng và giám sát giao thông.

Tuy nhiên, để vật liệu này được sử dụng rộng rãi hơn trong tương lai, các nghiên cứu nhằm làm rõ những ảnh hưởng của tất cả các yếu tố đối với ứng xử điện thuộc bê tông tự cảm biến cần được tiếp tục thực hiện, hướng đến việc xây dựng mô hình ứng xử toàn diện của vật liệu khi chúng được áp dụng trong thực tế. Bên cạnh đó, các nghiên cứu tối ưu thành phần cấp phối và công nghệ sản xuất nhằm phân tán đều các chất độn dẫn điện bên trong bê tông tự cảm biến để giảm thiểu tối đa các sai số trong quá trình đo đạc là một trong những vấn đề quan trọng. Việc này giúp đảm bảo độ tin cậy của công nghệ cảm biến thế hệ mới sử dụng cho bê tông.

Lời cảm ơn

Một phần nghiên cứu được tài trợ bởi Chương trình học bổng Sau Tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VinIF), mã số VINIF.2023.STS.13.

Tài liệu tham khảo

- [1] A. D'Alessandro, F. Ubertini, S. Laflamme, and A. L. Materazzi, "Towards smart concrete for smart cities: Recent results and future application of strain-sensing nanocomposites," *J. Smart Cities*, vol. 1, no. 1, 2016, doi: 10.18063/jsc.2015.01.002.
- [2] S. Taheri, "A review on five key sensors for monitoring of concrete structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 204, pp. 492–509, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.172.
- [3] P. W. Chen and D. D. L. Chung, "Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection," *Smart Mater. Struct.*, vol. 2, no. 1, pp. 22–30, 1993, doi: 10.1088/0964-1726/2/1/004.
- [4] Z. Tian, Y. Li, J. Zheng, and S. Wang, "A state-of-the-art on self-sensing concrete: Materials, fabrication and properties," *Compos. Part B Eng.*, vol. 177, Nov. 2019, Art. no. 107437, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107437.
- [5] B. Han, S. Ding, and X. Yu, "Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 59, pp. 110–128, 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2014.09.048.
- [6] N. D. Liêm, V. T. B. Ngà, Đ. X. Sơn và T. M. Phụng, "Nghiên cứu dùng muội than đen và xỉ lò cao nghiền mịn trong việc cải thiện khả năng tự cảm biến của bê tông tính năng cao," *TC KHCN XD*, tập 13, số 4V, tr. 151–158, 2019, doi: 10.31814/stce.nuce2019-13(4V)-14.
- [7] V. M. Chi, N. M. Hai, N. Lan, and N. Van Huong, "Stress self-sensitivity of carbon black-filled mortar under nondestructive compression and the effects of electric circuit and specimen dimensions," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 21, no. 9, pp. 762–776, 2023, doi: 10.3151/jact.21.762.
- [8] V. M. Chi, N. M. Hai, N. Lan, and N. Van Huong, "An empirical model for electrical resistivity of mortar considering the synergistic effects of carbon fillers, current intensity, and environmental factors," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 19, Dec. 2023, Art. no. e02685, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02685.
- [9] B. Han, X. Guan, and J. Ou, "Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 135, no. 2, pp. 360–369, 2007, doi: 10.1016/j.sna.2006.08.003.
- [10] Y. Ding, G. Liu, A. Hussain, F. Pacheco-Torgal, and Y. Zhang, "Effect of steel fiber and carbon black on the self-sensing ability of concrete cracks under bending," *Constr. Build. Mater.*, vol. 207, pp. 630–639, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.160.

- [11] F. Azhari and N. Banthia, “Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 7, pp. 866–873, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.04.007.
- [12] S. Wang, A. Singh, and Q. Liu, “Experimental study on the piezoresistivity of concrete containing steel fibers, carbon black, and graphene,” *Front. Mater.*, vol. 8, pp. 1–10, 2021, doi: 10.3389/fmats.2021.652614.
- [13] B. Han, K. Zhang, X. Yu, E. Kwon, and J. Ou, “Nickel particle-based self-sensing pavement for vehicle detection,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 44, no. 9, pp. 1645–1650, 2011, doi: 10.1016/j.measurement.2011.06.014.
- [14] J. Han, J. Pan, J. Cai, and X. Li, “A review on carbon-based self-sensing cementitious composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 265, Dec. 2020, Art. no. 120764, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120764.
- [15] M. S. Konsta-Gdoutos and C. A. Aza, “Self sensing carbon nanotube (CNT) and nanofiber (CNF) cementitious composites for real time damage assessment in smart structures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, pp. 162–169, 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.003.
- [16] H. Li, H. Xiao, and J. Ou, “Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement-based composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 9, pp. 824–828, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.05.004.
- [17] H. Wang, X. Gao, and R. Wang, “The influence of rheological parameters of cement paste on the dispersion of carbon nanofibers and self-sensing performance,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 134, pp. 673–683, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.176.
- [18] L. Vaisman, H. D. Wagner, and G. Marom, “The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 128–130, no. 2006, pp. 37–46, 2006, doi: 10.1016/j.cis.2006.11.007.
- [19] D. D. L. Chung, “Cement reinforced with short carbon fibers: A multifunctional material,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 31, no. 6–7, pp. 511–526, 2000, doi: 10.1016/S1359-8368(99)00071-2.
- [20] S. Taheri, J. Georgaklis, M. Ams, S. Patabendigedara, A. Belford, and S. Wu, “Smart self-sensing concrete: the use of multiscale carbon fillers,” *J. Mater. Sci.*, vol. 57, no. 4, pp. 2667–2682, 2022, doi: 10.1007/s10853-021-06732-1.
- [21] T. Shi, Z. Li, J. Guo, H. Gong, and C. Gu, “Research progress on CNTs/CNFs-modified cement-based composites – A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 202, pp. 290–307, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.024.
- [22] A. D’Alessandro, F. Ubertini, A. L. Materazzi, S. Laflamme, and M. Porfiri, “Electromechanical modelling of a new class of nanocomposite cement-based sensors for structural health monitoring,” *Struct. Heal. Monit.*, vol. 14, no. 2, pp. 137–147, 2015, doi: 10.1177/1475921714560071.
- [23] B. Han, K. Zhang, X. Yu, E. Kwon, and J. Ou, “Fabrication of piezoresistive CNT/CNF cementitious composites with superplasticizer as dispersant,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 6, pp. 658–665, 2012, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000435.
- [24] I. S. Abbood, S. S. Weli, and F. L. Hamid, “Cement-based materials for self-sensing and structural damage advance warning alert by electrical resistivity,” *Mater. Today Proc.*, vol. 46, part 1, pp. 615–620, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.381.
- [25] B. G. Han, B. Z. Han, and J. P. Ou, “Experimental study on use of nickel powder-filled Portland cement-based composite for fabrication of piezoresistive sensors with high sensitivity,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 149, no. 1, pp. 51–55, 2009, doi: 10.1016/j.sna.2008.10.001.
- [26] F. Rajabipour and J. Weiss, “Electrical conductivity of drying cement paste,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 40, no. 10, pp. 1143–1160, 2007, doi: 10.1617/s11527-006-9211-z.
- [27] A. O. Monteiro, A. Loredó, P. M. F. J. Costa, M. Oeser, and P. B. Cachim, “A pressure-sensitive carbon black cement composite for traffic monitoring,” *Constr. Build. Mater.*, vol.

- 154, pp. 1079–1086, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.053.
- [28] Z. Bekzhanova, S. A. Memon, and J. R. Kim, “Self-sensing cementitious composites: Review and perspective,” *Nanomaterials*, vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/nano11092355.
- [29] S. Wen and D. D. L. Chung, “Carbon fiber-reinforced cement as a strain-sensing coating,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 4, pp. 665–667, 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00474-4.
- [30] V. Parvaneh and S. H. Khiabani, “Mechanical and piezoresistive properties of self-sensing smart concretes reinforced by carbon nanotubes,” *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 26, no. 11, pp. 993–1000, 2019, doi: 10.1080/15376494.2018.1432789.
- [31] P. T. Duy, L. B. Khánh, N. D. Liêm, N. V. Thuần, và N. H. Nghĩa, “Nghiên cứu ứng xử cơ - điện của bê tông tính năng cao dưới tải trọng uốn trùng phục,” *TC KHCN XD*, tập 17, số 4V, tr. 34–48, 2023, doi: 10.31814/stce.huce2023-17(4V)-04.
- [32] P. T. Duy, L. B. Khanh, N. D. Liem, and N. V. Thuan “Effect of temperature on electrical resistivity of high-performance fiber-reinforced concretes,” *J. Sci. Technol. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 3, pp. 21–32, 2023, doi: 10.31814/stce.huce2023-17(3)-02.
- [33] B. Chen, K. Wu, and W. Yao, “Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 4, pp. 291–297, 2004, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00138-5.
- [34] R. M. Chacko, N. Banthia, and A. A. Mufti, “Carbon-fiber-reinforced cement-based sensors,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 284–290, 2007, doi: 10.1139/L06-092.
- [35] F. J. Baeza, O. Galao, E. Zornoza, and P. Garcés, “Multifunctional cement composites strain and damage sensors applied on reinforced concrete (RC) structural elements,” *Mater. (Basel)*, vol. 6, no. 3, pp. 841–855, 2013, doi: 10.3390/ma6030841.
- [36] M. Q. Sun, R. J. Y. Liew, M. H. Zhang, and W. Li, “Development of cement-based strain sensor for health monitoring of ultra high strength concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, pp. 630–637, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.105.
- [37] E. García-Macías and F. Ubertini, “Earthquake-induced damage detection and localization in masonry structures using smart bricks and Kriging strain reconstruction: A numerical study,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 48, no. 5, pp. 548–569, 2019, doi: 10.1002/eqe.3148.
- [38] A. D’Alessandro, H. B. Birgin, G. Cerni, and F. Ubertini, “Smart infrastructure monitoring through self-sensing composite sensors and systems: A study on smart concrete sensors with varying carbon-based filler,” *Infrastructures*, vol. 7, no. 4, 2022, doi: 10.3390/infrastructures7040048.
- [39] A. Sassani et al., “Carbon fiber-based electrically conductive concrete for salt-free deicing of pavements,” *J. Clean. Prod.*, vol. 203, pp. 799–809, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.315.
- [40] Z. Q. Shi and D. D. L. Chung, “Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 3, pp. 435–439, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00204-X.
- [41] B. Han, X. Yu, and E. Kwon, “A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring,” *Nanotechnology*, vol. 20, no. 44, 2009, doi: 10.1088/0957-4484/20/44/445501.
- [42] B. Han, K. Zhang, T. Burnham, E. Kwon, and X. Yu, “Integration and road tests of a self-sensing CNT concrete pavement system for traffic detection,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 1, 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/1/015020.