

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA



NCS. VÕ MINH CHÍ

**NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ ĐIỆN TRỞ CỦA BÊ TÔNG TỰ CẢM BIẾN
DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG TRONG PHẠM VI NÉN ĐÀN HỒI**

Ngành: Kỹ thuật Xây dựng Công trình Giao thông

Mã số ngành: 9580205

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Đà Nẵng, năm 2026

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA



NCS. VÕ MINH CHÍ

**NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ ĐIỆN TRỞ CỦA BÊ TÔNG TỰ CẢM BIẾN
DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG TRONG PHẠM VI NÉN ĐÀN HỒI**

Ngành: Kỹ thuật Xây dựng Công trình Giao thông

Mã số ngành: 9580205

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1. Người đồng hướng dẫn 1: **PGS.TS. Nguyễn Lan**

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

2. Người đồng hướng dẫn 2: **TS. Nguyễn Minh Hải**

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

Đà Nẵng, năm 2026

LỜI CAM ĐOAN

Luận án tiến sĩ “**Nghiên cứu ứng xử điện trở của bê tông tự cảm biến dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi**” là kết quả của quá trình nghiên cứu, học tập nghiêm túc của nghiên cứu sinh, dưới sự đồng hướng dẫn của PGS.TS. Nguyễn Lan và TS. Nguyễn Minh Hải. Tôi xin cam đoan các kết quả nghiên cứu và thảo luận trong luận án hoàn toàn được thu thập từ thực nghiệm, được xử lý trung thực, khách quan. Đồng thời, các thông tin trích dẫn trong Luận án đã được NCS chỉ rõ nguồn gốc và trích dẫn đầy đủ.

Nghiên cứu sinh thực hiện luận án

Võ Minh Chí

LỜI CẢM ƠN

Luận án được nghiên cứu sinh thực hiện tại Khoa Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Đà Nẵng, dưới sự đồng hướng dẫn của PGS.TS. Nguyễn Lan và TS. Nguyễn Minh Hải. Nghiên cứu sinh xin được bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới hai thầy đã tận tình hướng dẫn, hỗ trợ chuyên môn, theo dõi và đôn đốc trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu theo kế hoạch toàn khoá đã được Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng phê duyệt.

Nghiên cứu sinh xin trân trọng cảm ơn Ban Giám hiệu, Phòng Đào tạo và Bảo đảm chất lượng, Phòng Khoa học Công nghệ và Đối ngoại, GS.TS. Hoàng Phương Hoa, PGS.TS. Nguyễn Xuân Toàn, PGS.TS. Phan Hoàng Nam, TS. Cao Văn Lâm, PGS.TS. Phạm Ngọc Phương, PGS.TS. Nguyễn Duy Thảo, PGS.TS. Nguyễn Văn Hường, PGS.TS. Hồ Văn Quân cùng các thầy, cô thuộc Khoa Xây dựng đã quan tâm tạo điều kiện, hỗ trợ và giám sát quá trình học tập, nghiên cứu của nghiên cứu sinh.

Nghiên cứu sinh xin chân thành cảm ơn các Nhà khoa học trong và ngoài Trường đã dành thời gian đọc, nhận xét và đóng góp nhiều ý kiến quý báu cho luận án, giúp nghiên cứu sinh kịp thời bổ sung, chỉnh sửa và hoàn thiện luận án.

Nghiên cứu sinh xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ về cơ sở vật chất và trang thiết bị của Trung tâm KHCN và Tư vấn đầu tư, Viện Khoa học và Công nghệ Bách Khoa Đà Nẵng thuộc Trường Đại học Bách khoa, Nhóm nghiên cứu I-Star, Công ty cổ phần hóa chất Hoa Sen cùng các cá nhân, tổ chức liên quan đã tạo điều kiện thuận lợi trong quá trình thực hiện các thí nghiệm phục vụ nghiên cứu của luận án.

Nghiên cứu sinh xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ về kinh phí từ Trường Đại học Bách khoa thông qua đề tài với mã số T2023-02-07 (2023), Quỹ Murata với đề tài mã số T2024-02-08 MSF (2024) và Quỹ phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) với mã số 107.01-2025.32 (2025).

Cuối cùng, nghiên cứu sinh xin trân trọng cảm ơn gia đình, bạn bè đã luôn bên cạnh động viên, hỗ trợ về mặt tinh thần và chia sẻ những khó khăn trong suốt quá trình nghiên cứu.

NCS. Võ Minh Chí

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	iii
DANH MỤC BẢNG	xii
CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT	xiv
MỞ ĐẦU	1
1. Lý do chọn đề tài.....	1
2. Mục tiêu nghiên cứu.....	1
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....	2
3.1. Đối tượng nghiên cứu.....	2
3.2. Phạm vi nghiên cứu	2
4. Phương pháp nghiên cứu.....	3
4.1. Phương pháp lý thuyết.....	3
4.2. Phương pháp thực nghiệm.....	3
4.3. Phương pháp phân tích thống kê	3
5. Nội dung chính của luận án.....	3
6. Ý nghĩa khoa học hoặc thực tiễn của luận án.....	3
7. Cấu trúc của luận án	5
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN	7
1.1. Giới thiệu chung.....	7
1.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến tính cảm biến của bê tông	11
1.2.1. Ảnh hưởng của thành phần vật liệu và phương pháp chế tạo	11
1.2.1.1. Ảnh hưởng của chủng loại, hàm lượng và hình dạng của chất độn dẫn điện	11
1.2.1.2. Ảnh hưởng của phương pháp phân tán chất độn.....	15
1.2.2. Ảnh hưởng của điều kiện thí nghiệm	18
1.2.2.1. Ảnh hưởng của điện cực và cấu tạo điện cực.....	18
1.2.2.2. Ảnh hưởng của dòng điện kích thích	21

1.2.2.3. Ảnh hưởng các yếu tố liên quan đến hình dạng và kích thước mẫu ...	23
1.2.2.4. Ảnh hưởng của loại tải trọng	25
1.2.3. Ảnh hưởng của các yếu tố môi trường	30
1.2.3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ	30
1.2.3.2. Ảnh hưởng của độ ẩm	32
1.3. Các nghiên cứu ứng dụng của SSC	34
1.4. Phân tích khoảng trống nghiên cứu	38
CHƯƠNG 2. CHƯƠNG TRÌNH THỰC NGHIỆM	41
2.1. Khái quát	41
2.2. Lựa chọn nguyên vật liệu đầu vào	43
2.2.1. Định hướng chung lựa chọn nguyên vật liệu đầu vào	43
2.2.2. Xi măng	44
2.2.3. Phụ gia siêu dẻo	45
2.2.4. Xi hạt lò cao nghiền mịn	45
2.2.5. Muội silic	46
2.2.6. Cát	47
2.2.7. Nước	48
2.2.8. Muội than đen	48
2.2.9. Sợi carbon	48
2.3. Thiết kế thành phần cấp phối	49
2.3.1. Định hướng chung thiết kế thành phần cấp phối	49
2.3.2. Thành phần cấp phối SSC cho giai đoạn thực nghiệm 1	50
2.3.3. Thành phần cấp phối SSC cho giai đoạn thực nghiệm 2	53
2.3.4. Thành phần cấp phối SSC cho giai đoạn thực nghiệm 3	55
2.4. Quy trình trộn hỗn hợp SSC	55
2.5. Quy trình chuẩn bị mẫu và quy hoạch thực nghiệm	57
2.5.1. Giai đoạn thực nghiệm 1	57
2.5.2. Giai đoạn thực nghiệm 2	60
2.5.3. Giai đoạn thực nghiệm 3	66

2.6. Phương pháp thí nghiệm	74
2.6.1. Thí nghiệm xác định điện trở suất ban đầu của mẫu SSC khi không có tải trọng tác dụng.....	74
2.6.2. Thí nghiệm ứng xử điện trở của mẫu SSC hoạt động độc lập dưới tác dụng của tải trọng nén	77
2.6.3. Thí nghiệm ứng xử điện trở của hệ gồm nhiều mẫu SSC dưới tác dụng của tải trọng nén	80
2.6.4. Các hạng mục thí nghiệm khác	81
CHƯƠNG 3. CƠ CHẾ ỨNG XỬ CƠ BẢN CỦA BÊ TÔNG TỰ CẢM BIẾN SỬ DỤNG MUỘI THAN ĐEN DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NÉN	85
3.1. Cường độ chịu nén các mẫu và phân tích vi cấu trúc	85
3.2. Quan hệ điện trở suất - ứng suất nén và cơ chế cơ bản của ứng xử điện trở suất của SSC	88
3.3. Phân tích ảnh hưởng của các thông số thí nghiệm.....	91
3.4. Kết luận chương 3	96
CHƯƠNG 4. ĐIỆN TRỞ SUẤT BAN ĐẦU VÀ ỨNG XỬ ĐIỆN TRỞ CỦA BÊ TÔNG TỰ CẢM BIẾN SỬ DỤNG SỢI CARBON VÀ MUỘI THAN ĐEN CÓ XÉT ĐẾN CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG	98
4.1. Cường độ chịu nén, độ rỗng và phân tích vi cấu trúc	98
4.2. Điện trở suất ban đầu của SSC trong điều kiện không tải	101
4.2.1. Ảnh hưởng của thành phần vật liệu và cường độ dòng điện.....	101
4.2.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm.....	104
4.2.3. Phát triển mô hình dự đoán điện trở suất ban đầu của SSC có xét đến ảnh hưởng đồng thời của thành phần vật liệu và yếu tố môi trường	107
4.3. Ứng xử điện trở và mô hình dự đoán hệ số biến thiên điện trở suất của SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi.....	117
4.3.1. Ứng xử điện trở suất của mẫu ở các cấp nhiệt độ và độ ẩm khác nhau.....	117
4.3.2. Mô hình dự đoán hệ số biến thiên điện trở suất của SSC khi chịu ứng suất trong phạm vi nén đàn hồi.....	124

4.4. Kết luận chương 4	127
CHƯƠNG 5. ỨNG XỬ ĐIỆN TRỞ CỦA HỆ MẪU BÊ TÔNG TỰ CẢM BIẾN DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG TRONG PHẠM VI NÉN ĐÀN HỒI VÀ PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH DỰ ĐOÁN TẢI TRỌNG	129
5.1. Ứng xử điện trở của hệ mẫu SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi	129
5.1.1. Ứng xử điện trở của hệ gồm 02 mẫu kích thước 50×50×250 mm chịu nén đúng tâm	129
5.1.1.1. Ứng xử điện trở của hệ mẫu SSC trong điều kiện không tải	129
5.1.1.2. Ứng xử điện trở của hệ gồm 2 mẫu bê tông chịu tải trọng nén đúng tâm	130
5.1.1.3. Ứng xử điện trở của hệ gồm 2 mẫu SSC khi chịu tải nén với điện áp nguồn kích thích khác nhau	132
5.1.2. Ứng xử điện trở của hệ gồm 4 mẫu SSC kích thước 50×50×250 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau	135
5.1.3. Ứng xử điện trở của hệ gồm 6 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén tại các vị trí khác nhau	140
5.1.4. Tổng hợp các chỉ số thống kê về ứng xử điện cơ tổng thể cho tất cả các trường hợp thí nghiệm	146
5.2. Mô hình dự đoán tải trọng tác dụng lên hệ nhiều mẫu SSC	147
5.3. Kết luận chương 5	154
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	155
1. Những kết quả đạt được của luận án	155
2. Kiến nghị hướng nghiên cứu tiếp theo	156
TÀI LIỆU THAM KHẢO	160
DANH MỤC CÁC SẢN PHẨM KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ	174
1. Các bài báo công bố Quốc tế	174
2. Các bài báo công bố trong nước	174
3. Bằng độc quyền giải pháp hữu ích	175

DANH MỤC HÌNH

Hình 1.1. Hệ thống cân tải trọng cỡ lớn trong quản lý vận tải [3,4]	8
Hình 1.2. Cấu trúc của SSC	9
Hình 1.3. Ứng xử cảm biến điện hình của SSC khi chịu tác dụng tải trọng [10]	9
Hình 1.4. Sơ đồ nghiên cứu tổng quan.....	10
Hình 1.5. Mối quan hệ giữa điện trở suất và hàm lượng thể tích chất độn dẫn điện trong bê tông (%) [23-25]	13
Hình 1.6. Các dạng sơ đồ bố trí điện cực [10]	19
Hình 1.7. Ứng xử điện trở suất của SSC sử dụng điện cực gắn bên trong và dán bên ngoài bê tông dưới tác dụng của tải trọng nén [40]	19
Hình 1.8. Ảnh hưởng khoảng cách giữa 2 điện cực đến điện trở suất của các mẫu SSC chứa sợi carbon có chiều dài khác nhau (a) 4 mm (L04), (b) 6 mm (L06) và (c) 10 mm (L10) [49]	20
Hình 1.9. Sơ đồ mạch điện đo điện trở suất bê tông [40]	21
Hình 1.10. Ảnh hưởng cường độ dòng điện đến ứng xử điện trở và biến dạng đối với mẫu chứa 2% sợi carbon [52]	22
Hình 1.11. Kích thước mẫu ảnh hưởng đến biến thiên điện trở của SSC [53]	23
Hình 1.12. Ảnh hưởng mẫu hình trụ đến ứng xử điện trở [54]	24
Hình 1.13. Mẫu có kích thước 4×4×16 cm [52]	25
Hình 1.14. Ứng xử điện trở suất của mẫu SSC chịu tải trọng nén tĩnh [56]	26
Hình 1.15. Ứng xử điện trở suất của mẫu SSC chịu tải trọng kéo tĩnh [58]	26
Hình 1.16. Ứng xử điện trở suất của mẫu SSC chịu uốn [10]	27
Hình 1.17. Ứng xử của SSC chứa sợi carbon khi chịu tải trọng nén lặp [54]	28
Hình 1.18. SSC dưới tác dụng tải trọng va đập [60]	29
Hình 1.19. Ứng xử cảm biến của SSC chịu tải trọng kéo lặp [65]	30
Hình 1.20. Nhiệt độ ảnh hưởng đến sự thay đổi điện trở suất của SSC [69]	32
Hình 1.21. Độ ẩm ảnh hưởng đến thay đổi điện trở suất của SSC [75]	33
Hình 1.22. Độ ẩm ảnh hưởng đến hiệu suất cảm biến của SSC thông qua sự thay đổi hàm lượng sợi carbon trong mạng dẫn điện [77]	34

Hình 1.23. Ứng dụng gạch SSC theo dõi sức khỏe kết cấu công trình [80]	36
Hình 1.24. Ứng dụng SSC để đo tải trọng, lưu lượng và tốc độ của xe [62].....	37
Hình 2.1. Sơ đồ chương trình thực nghiệm.....	42
Hình 2.2. Các bước trộn hỗn hợp bê tông SSC.....	56
Hình 2.3. Điện cực bằng lưới thép gắn vào các loại mẫu SSC CB7.....	57
Hình 2.4. Hình ảnh một số mẫu CB7 sau khi được chế tạo.....	58
Hình 2.5. Các loại mẫu SSC phục vụ giai đoạn thực nghiệm 1	59
Hình 2.6. Chương trình thí nghiệm giai đoạn thực nghiệm 1	60
Hình 2.7. Điện cực bằng đồng gắn vào mẫu SSC W150L40.....	60
Hình 2.8. Hình ảnh một số mẫu SSC W150L40 sau khi được chế tạo.....	61
Hình 2.9. Các loại mẫu SSC giai đoạn thực nghiệm 2.....	62
Hình 2.10. Các mẫu SSC được sấy trong tủ sấy	62
Hình 2.11. Chương trình thí nghiệm giai đoạn 2A	63
Hình 2.12. Chương trình thí nghiệm giai đoạn 2B	65
Hình 2.13. Khuôn đúc chế tạo các loại mẫu SSC	66
Hình 2.14. Điện cực bằng đồng gắn vào các loại mẫu SSC	67
Hình 2.15. Các loại mẫu SSC phục vụ giai đoạn thực nghiệm 3.....	68
Hình 2.16. Công tác chống ẩm cho mẫu SSC.....	69
Hình 2.17. Mô hình hệ thống cân thu nhỏ trong phòng thí nghiệm.....	70
Hình 2.18. Chương trình thực nghiệm giai đoạn 3	71
Hình 2.19. Mô hình thí nghiệm xác định ứng xử điện trở của hệ gồm 02 mẫu SSC kích thước 50×50×250 mm chịu tải trọng nén đúng tâm.....	72
Hình 2.20. Mô hình thí nghiệm xác định ứng xử điện trở của hệ gồm 04 mẫu SSC kích thước 50×50×250 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau	73
Hình 2.21. Mô hình thí nghiệm xác định ứng xử điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau.....	74
Hình 2.22. Sơ đồ đo điện trở suất ban đầu của mẫu SSC khi chưa chịu tải	75
Hình 2.23. Sơ đồ mạch điện thí nghiệm mẫu đơn chịu tác dụng tải trọng nén.....	77

Hình 2.24. Bố trí thí nghiệm nén và hệ thống đo điện trở đồng thời của các mẫu SSC	80
Hình 2.25. Phân tích vi cấu trúc vật liệu	82
Hình 2.26. Thí nghiệm cường độ chịu nén của mẫu SSC	82
Hình 2.27. Quy trình xác định độ rỗng toàn phần của mẫu SSC	83
Hình 3.1. Cường độ chịu nén trung bình của các mẫu CB7 ở các ngày tuổi.....	85
Hình 3.2. SEM mẫu SSC CB7	86
Hình 3.3. Quan hệ giữa sự biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu W150L40	88
Hình 3.4. Mối quan hệ giữa ứng suất nén và biến dạng của mẫu W150L40.....	90
Hình 3.5. Cơ chế của mối quan hệ giữa sự biến thiên điện trở suất và ứng suất nén mẫu SSC	90
Hình 3.6. Mối quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu SSC trong phạm vi ứng suất nhỏ hơn 6MPa	92
Hình 3.7. Ảnh hưởng của các tham số thí nghiệm đến hệ số biến thiên điện trở suất của SSC	94
Hình 4.1. Cường độ chịu nén các mẫu chứa các chất độn dẫn điện khác nhau	98
Hình 4.2. Độ rỗng các mẫu chứa các chất độn dẫn điện khác nhau	99
Hình 4.3. SEM của mẫu có sợi carbon và muội than đen.....	101
Hình 4.4. Quan hệ giữa cường độ dòng điện và điện trở suất của mẫu SSC.....	102
Hình 4.5. Mối quan hệ giữa nhiệt độ và điện trở suất của mẫu	105
Hình 4.6. Mối quan hệ giữa độ ẩm và điện trở suất của mẫu	106
Hình 4.7. Ảnh hưởng của độ ẩm đến điện trở suất của bê tông	107
Hình 4.8. Phân tích hồi quy xem xét ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm	111
Hình 4.9. Mối quan hệ giữa điện trở suất thực nghiệm và điện trở suất tính toán của các mẫu SSC	113
Hình 4.10. Mối tương quan giữa mô hình đề xuất và dữ liệu thực nghiệm thu được từ tài liệu tham khảo [117]	115
Hình 4.11. Quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu CF2-1 ..	119

Hình 4.12. Quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu CF2-2 ..	120
Hình 4.13. Quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu CB1CF1-1 ...	121
Hình 4.14. Quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu CB1CF1-2 ...	122
Hình 4.15. Tương quan giữa điện trở suất thực nghiệm và tính toán	125
Hình 4.16. Quan hệ giữa hệ số biến thiên điện trở suất và điện trở suất tính toán....	125
Hình 4.17. Tương quan giữa hệ số k tính toán và hệ số k thực nghiệm	126
Hình 5.1. Ứng xử điện trở của hệ gồm 2 mẫu SSC trong điều kiện không tải	129
Hình 5.2. Ứng xử điện trở của hệ gồm 2 mẫu SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi	130
Hình 5.3. Ảnh hưởng khoảng cách giữa 2 mẫu SSC	132
Hình 5.4. Ứng xử điện trở của hệ gồm 2 mẫu SSC khi chịu tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi tương ứng với điện áp kích thích.....	133
Hình 5.5. Dữ liệu đo lường mối quan hệ giữa sự biến thiên điện trở và tải trọng nén tương ứng với điện áp kích thích	135
Hình 5.6. Ứng xử điện trở của hệ gồm 04 mẫu kích thước 50×50×250 mm chịu tải trọng nén đúng tâm.....	136
Hình 5.7. Ứng xử điện trở của hệ gồm 04 mẫu SSC kích thước 50×50×250 mm chịu nén lệch tâm 25 mm	137
Hình 5.8. Ứng xử biến thiên điện trở của hệ gồm 04 mẫu SSC kích thước 50×50×250 mm chịu tải trọng nén lệch tâm 50 mm	138
Hình 5.9. Ứng xử tổng biến thiên điện trở của hệ gồm 4 mẫu SSC kích thước 50×50×250 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau.....	139
Hình 5.10. Dữ liệu tổng hợp tổng biến thiên điện trở của hệ gồm 04 mẫu SSC kích thước 50×50×250 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau	140
Hình 5.11. Ứng xử biến thiên điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu nén đúng tâm	141
Hình 5.12. Ứng xử biến thiên điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu nén lệch tâm 25 mm	142

Hình 5.13. Ứng xử biến thiên điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu nén lệch tâm 50 mm.....	143
Hình 5.14. Ứng xử tổng biến thiên điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau.....	144
Hình 5.15. Dữ liệu tổng hợp tổng biến thiên điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau	145
Hình 5.16. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của hệ gồm 04 mẫu kích thước 50×50×250 mm chịu tải trọng nén đúng tâm.....	148
Hình 5.17. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của hệ gồm 04 mẫu kích thước 50×50×250 mm chịu nén lệch tâm 25 mm	149
Hình 5.18. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của hệ gồm 04 mẫu kích thước 50×50×250 mm chịu tải trọng nén lệch tâm 50 mm.....	149
Hình 5.19. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của hệ gồm 06 mẫu kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén đúng tâm.....	150
Hình 5.20. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán hệ gồm 06 mẫu kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén lệch tâm 25 mm.....	150
Hình 5.21. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán hệ gồm 06 mẫu kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén lệch tâm 50 mm.....	151
Hình 5.22. Định hướng cấu tạo nguyên lý của hệ thống giám sát tải trọng giao thông sử dụng các mẫu SSC.....	158

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1. Một số ứng dụng của SSC	35
Bảng 2.1. Tính chất cơ bản của xi măng PC50	44
Bảng 2.2. Các thông số của phụ gia siêu dẻo loại Lotus-301M.....	45
Bảng 2.3. Tính chất cơ bản của xỉ hạt lò cao nghiền mịn loại S95.....	46
Bảng 2.4. Thành phần muối silic loại Lotus-SP2	46
Bảng 2.5. Tính chất vật lý của cát.....	47
Bảng 2.6. Đặc tính kỹ thuật chính của muội than đen N330	48
Bảng 2.7. Đặc tính kỹ thuật chính của sợi carbon	49
Bảng 2.8. Thành phần vật liệu cho 1m ³ bê tông nền N1 (đơn vị: kg).....	52
Bảng 2.9. Thành phần vật liệu cho 1m ³ CB7 (đơn vị: kg).....	52
Bảng 2.10. Thành phần vật liệu cho 1m ³ bê tông nền N2 (đơn vị: kg).....	54
Bảng 2.11. Thành phần vật liệu cho 1m ³ SSC chứa các chất độn dẫn điện khác nhau (đơn vị: kg).....	54
Bảng 3.1. Kết quả cường độ chịu nén của mẫu ở các ngày tuổi	86
Bảng 3.2. Giá trị hệ số biến thiên điện trở suất của các mẫu SSC và các tham số thống kê theo từng yếu tố ảnh hưởng.....	95
Bảng 4.1. Giá trị cường độ chịu nén của từng mẫu và các tham số thống kê theo nhóm cấp phối	99
Bảng 4.2. Giá trị độ rỗng của từng mẫu và các tham số thống kê theo nhóm cấp phối	100
Bảng 4.3. Hệ số a, b dựa trên phân tích hồi quy dữ liệu của từng loại mẫu	114
Bảng 4.4. Các tham số hồi quy tuyến tính của quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của các mẫu SSC dưới các điều kiện môi trường khác nhau.....	123
Bảng 5.1. Điện trở ban đầu của các mẫu kích thước 50×50×250 mm.....	135
Bảng 5.2. Điện trở ban đầu của các mẫu kích thước 50×50×50 mm.....	140
Bảng 5.3. Các chỉ số thống kê về phản ứng điện cơ tổng thể cho tất cả các trường hợp thí nghiệm.....	146

Bảng 5.4. Các thông số hồi quy tuyến tính quan hệ giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của các mô hình cân khi chịu tác dụng của tải trọng ở các vị trí khác nhau	152
Bảng 5.5. Các chỉ tiêu đánh giá sai số của mô hình dự đoán tải trọng tác dụng lên hệ nhiều mẫu SSC	153

CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

Ký hiệu (Chữ viết tắt)	Giải thích ý nghĩa
SSC	Bê tông tự cảm biến (Self-Sensing Concrete)
CNT	Ống nano cacbon (Carbon Nanotube), là chất độn dẫn điện
CNF	Sợi nano cacbon (Carbon Nanofiber), là chất độn dẫn điện
SWCNT	Ống nano cacbon đơn tường (Single-Walled Carbon Nanotube), là chất độn dẫn điện
CB	Muội than đen (Carbon Black), là chất độn dẫn điện
CF	Sợi cacbon (Carbon Fiber), là chất độn dẫn điện
SEM	Kính hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscopy), sử dụng để quan sát và đánh giá đặc điểm vi cấu trúc, hình thái và sự phân bố của các thành phần trong vật liệu.
A	Diện tích chịu lực của mẫu
a	Diện tích tiếp xúc điện cực với bê tông
ITZ	Vùng chuyển tiếp liên diện (Interfacial Transition Zone), chỉ vùng chuyển tiếp tại khu vực tiếp giáp giữa các pha/thành phần của vật liệu, có đặc điểm vi cấu trúc và tính chất khác với vùng nền lân cận
S95	Xi hạt lò cao nghiền mịn loại S95
SF	Muội silic (Silica Fume)
$I(t)$, $I_s(t)$, $I_r(t)$	Dòng điện chạy qua toàn bộ mạch điện, qua R_s , qua R_r ở bước gia tải trọng nén t
L	Khoảng cách giữa 2 điện cực của mẫu SSC
$P(t)$	Lực nén tác dụng lên mẫu hoặc lên mặt cân ở bước gia tải trọng nén t
R_r	Điện trở trung gian
R_s	Điện trở mẫu SSC
$R_{s(0)}$	Điện trở ban đầu của mẫu SSC khi chưa gia tải

Ký hiệu (Chữ viết tắt)	Giải thích ý nghĩa
$R_s(t)$	Điện trở của mẫu SSC ở bước gia tải trọng nén t
$\Delta R_s(t)$	Biến thiên điện trở của mẫu SSC ở bước gia tải trọng nén t
$\Sigma \Delta R_s(t)$	Tổng biến thiên điện trở của mẫu SSC ở bước gia tải trọng nén t
U_p	Điện áp kích thích tổng
U_s	Điện áp giữa 2 điện cực mẫu SSC
$U_s(t), U_r(t)$	Điện áp trên mẫu SSC (giữa hai điện cực) ($U_s(t)$) và điện áp trên điện trở trung gian (R_r) ($U_r(t)$) tại bước gia tải trọng nén (t).
W	Chiều rộng mẫu SSC
$\sigma_c(t)$	Ứng suất nén của mẫu ứng với tải trọng bước t
$\Delta \rho_s(t)$	Biến thiên điện trở suất của mẫu thử ở bước tải trọng nén t so với ban đầu
$\rho_s(t)$	Điện trở suất của mẫu thử ở bước tải trọng nén t
$\rho_{s(0)}$	Điện trở suất ban đầu của mẫu thử khi chưa chịu tải trọng nén
$\Sigma \Delta \rho_s(t)$	Tổng biến thiên điện trở suất của mẫu thử khi chịu tải trọng nén tại bước t
$\rho_{s0(0)}$	Điện trở suất ở điều kiện chuẩn tham chiếu
R^2	Hệ số xác định
R^2_{tb}	Hệ số xác định trung bình các lần đo
S_{td}	Độ lệch chuẩn
k_{tb}	Giá trị trung bình của hệ số biến thiên điện trở suất
K_{tb}	Giá trị trung bình của hệ số biến thiên điện trở
k	Độ dốc của quan hệ giữa độ biến thiên điện trở suất và ứng suất, tương ứng với quan hệ ($\Delta \rho - \sigma$), phản ánh mức độ thay đổi của điện trở suất theo ứng suất tác dụng đối với SSC đơn mẫu.

Ký hiệu (Chữ viết tắt)	Giải thích ý nghĩa
K	Độ dốc của quan hệ giữa độ biến thiên điện trở và tải trọng, tương ứng với quan hệ ($\Delta R-P$), phản ánh mức độ thay đổi của điện trở theo tải trọng đối với hệ SSC nhiều mẫu.
cv	Hệ số biến thiên (cv được xác định là % tỷ số giữa S_{td} và độ lớn k_{tb})
CV	Hệ số biến thiên (CV được xác định là % tỷ số giữa S_{td} và độ lớn K_{tb})
MAE	Sai số tuyệt đối trung bình (Mean Absolute Error)
RMSE	Sai số căn quân phương (Root Mean Square Error)

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Trong bối cảnh phát triển các công trình xây dựng và hạ tầng hiện đại, bê tông tự cảm biến (Self-Sensing Concrete, viết tắt là SSC) nổi lên như một giải pháp tiềm năng trong việc phát triển các công nghệ cảm biến thế hệ mới trên quy mô rộng. Cơ chế cảm biến của SSC được hình thành thông qua việc bổ sung các vật liệu dẫn điện vào trong bê tông, từ đó tạo ra sự thay đổi điện trở suất khi vật liệu chịu tác dụng của tải trọng và môi trường. Thông qua việc theo dõi sự thay đổi điện trở suất, có thể gián tiếp xác định được trạng thái ứng suất và biến dạng cũng như yếu tố môi trường trong bê tông mà không cần các cảm biến gắn ngoài.

Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào các ứng dụng của SSC ở giai đoạn xuất hiện vết nứt hoặc hư hại, trong khi khả năng cảm biến ở giai đoạn sớm khi vật liệu chưa bị hư hại vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Do đó, luận án này hướng đến việc làm rõ và công thức hóa ứng xử điện trở của SSC trong vùng ứng suất nhỏ, từ đó mở ra khả năng ứng dụng vật liệu này như một giải pháp cảm biến lâu dài, có thể tái sử dụng nhiều lần để nâng cao tính kinh tế của vật liệu này khi ứng dụng cho các công trình hạ tầng thông minh.

Mặt khác, một khoảng trống nghiên cứu quan trọng khác là các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tập trung phân tích ứng xử của SSC khi hoạt động dưới dạng một mẫu độc lập, mà hầu như chưa có nghiên cứu nào làm rõ ứng xử của hệ gồm nhiều mẫu SSC hoạt động đồng thời. Do đó, nghiên cứu này cũng đặt mục tiêu làm rõ ứng xử điện trở của hệ gồm nhiều mẫu SSC hoạt động đồng thời nhằm định hướng đề xuất giải pháp áp dụng SSC trong hệ thống cân tải trọng cỡ lớn, hướng đến mục tiêu phát triển hệ thống quan trắc, giám sát tải trọng và quản lý giao thông – logistics thông minh, quy mô rộng và có giá thành thấp trong tương lai.

Những lý do trên tạo nên tính cấp thiết và ý nghĩa khoa học – thực tiễn rõ rệt cho việc lựa chọn đề tài nghiên cứu này.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu chính của nghiên cứu là làm rõ ứng xử điện trở của SSC khi làm việc

như các phần tử gối đỡ chịu nén trong hệ cân trong các cấu kiện chịu tác dụng của tải trọng nén trong phạm vi ứng suất nhỏ và vật liệu chưa đạt đến trạng thái phá hủy. Kết quả nghiên cứu được định hướng để ứng dụng cho việc phát triển hệ thống cảm biến thể hệ mới được làm bằng chính bản thân bê tông có khả năng cân liên tục theo thời gian thực các tải trọng lớn như phương tiện giao thông và hàng hóa tại các cảng và kho bãi công nghiệp trong tương lai.

Để đạt được mục tiêu cuối cùng nêu trên, trong phạm vi nghiên cứu của luận án, các mục tiêu cụ thể được đặt ra như sau:

- i. Thiết kế, chuẩn bị thành công vật liệu SSC và làm rõ cơ chế ứng xử điện trở cơ bản của vật liệu SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi.
- ii. Làm rõ các yếu tố ảnh hưởng đến ứng xử điện trở của SSC bao gồm loại và hàm lượng chất độn dẫn điện trong thành phần vật liệu bê tông, kích thước mẫu bê tông, điều kiện đo đạc, các ảnh hưởng của môi trường như nhiệt độ và độ ẩm.
- iii. Làm rõ ứng xử điện trở của hệ nhiều mẫu SSC dưới tác dụng của tải trọng nén tĩnh trong các trạng thái khác nhau, bao gồm nén đúng tâm và nén lệch tâm trên hệ nhiều mẫu hoạt động đồng thời, qua đó tạo cơ sở khoa học cho việc đề xuất mô hình cân tải trọng cỡ lớn trong tương lai.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu

Vật liệu SSC sử dụng chất độn dẫn điện là muội than đen hoặc sợi carbon.

3.2. Phạm vi nghiên cứu

Phạm vi của nghiên cứu đặt ra như sau:

- Trong nhiều loại chất độn dẫn điện khác nhau, nghiên cứu tập trung phát triển SSC sử dụng chất độn dẫn điện là muội than đen hoặc sợi carbon.
- Nghiên cứu tập trung khảo sát ứng xử điện trở của SSC dưới tác dụng của tải trọng nén tĩnh trong phạm vi đàn hồi của vật liệu, chưa xét đến các tải trọng động và va đập.
- Nghiên cứu tập trung phân tích ảnh hưởng của nhiệt độ, độ ẩm đến đặc tính điện của SSC trong môi trường phòng thí nghiệm mà chưa mở rộng sang các môi

trường thực tế kết hợp chu kỳ nhiệt - ẩm tuần hoàn.

4. Phương pháp nghiên cứu

4.1. Phương pháp lý thuyết

Dựa vào việc khảo sát các tài liệu nghiên cứu liên quan, nghiên cứu tổng hợp và phân tích các nội dung bao gồm: nguyên lý hoạt động của SSC, phương pháp chế tạo và thành phần vật liệu bê tông, phương pháp thí nghiệm đo độ biến thiên điện trở suất dưới tác dụng của tải trọng và các ứng dụng tiềm năng của SSC.

4.2. Phương pháp thực nghiệm

Để đạt được các mục tiêu nghiên cứu chính đã đề ra, nghiên cứu thực hiện các thí nghiệm liên quan bao gồm:

- Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén, độ rỗng của các mẫu bê tông SSC.
- Thí nghiệm phân tích vi cấu trúc vật liệu bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM).
- Thí nghiệm xác định điện trở suất của các mẫu SSC trong điều kiện không tải.
- Thí nghiệm xác định sự biến thiên điện trở của SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi cho hệ gồm một hoặc nhiều mẫu SSC.

4.3. Phương pháp phân tích thống kê

Dựa vào kết quả thực nghiệm, các phương pháp phân tích thống kê được sử dụng để khảo sát và thiết lập các công thức thực nghiệm nhằm xác định ứng xử cảm biến của bê tông dưới tác dụng của tải trọng nén tĩnh có xét đến các điều kiện thí nghiệm khác nhau.

5. Nội dung chính của luận án

- *Nội dung 1.* Nghiên cứu cơ chế cơ bản của ứng xử điện trở của SSC dưới tác dụng của tải trọng nén.
- *Nội dung 2.* Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng lên ứng xử điện trở của SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi.
- *Nội dung 3.* Nghiên cứu ứng xử điện trở và mô hình dự đoán tải trọng nén tác dụng lên hệ nhiều mẫu SSC trong phạm vi nén đàn hồi.

6. Ý nghĩa khoa học hoặc thực tiễn của luận án

Việc nghiên cứu và phát triển vật liệu bê tông có khả năng tự cảm biến là hướng

ngiên cứu tiên tiến, có ý nghĩa khoa học lớn không chỉ đối với cộng đồng khoa học tại Việt Nam nói riêng mà còn đóng góp vào hiểu biết chung về loại vật liệu mới này trong cộng đồng khoa học quốc tế nói chung. Cụ thể, tính mới và ý nghĩa khoa học của đề tài nghiên cứu có thể được tóm lược như sau:

- *Thứ nhất*, việc tập trung làm rõ vùng ứng xử điện trở tuyến tính của bê tông trong phạm vi nén đàn hồi là hướng tiếp cận mới so với các nghiên cứu trước đây. Điều này giúp SSC có thể được sử dụng nhiều lần và lâu dài với độ chính xác cao thay vì chỉ được sử dụng một lần và cần được thay thế khi hư hại xuất hiện bên trong cấu trúc bê tông.

- *Thứ hai*, việc mô hình hóa ứng xử điện trở của bê tông có xét đến ảnh hưởng đồng thời của nhiều yếu tố mang tính mới và ý nghĩa khoa học lớn trong bối cảnh hầu hết các nghiên cứu trước đây đều tập trung phân tích ảnh hưởng độc lập của từng yếu tố. Nghiên cứu này giúp công thức hóa các giá trị hiệu chuẩn của thiết bị cảm biến bê tông có xét đến ảnh hưởng phức tạp phát sinh trong quá trình sử dụng, qua đó đem giải pháp này tiến gần hơn với việc ứng dụng rộng rãi trong thực tế.

- *Thứ ba*, nghiên cứu làm rõ ứng xử điện trở không chỉ một mẫu bê tông mà còn trên một hệ gồm nhiều mẫu bê tông, đây là cách đặt vấn đề hoàn toàn mới và chưa được thực hiện trong bất cứ nghiên cứu nào trước đây. Khi nhiều mẫu bê tông được lắp đặt trong cùng 1 thiết bị và chịu tác dụng đồng thời của tải trọng, ứng xử điện trở của từng mẫu có thể khác nhau phụ thuộc vào trạng thái tải trọng tác dụng lên mỗi mẫu nhưng ứng xử tổng của cả hệ là ổn định và bảo toàn ứng với giá trị tải trọng tác dụng lên toàn hệ. Việc này có ý nghĩa rất quan trọng trong việc sử dụng linh hoạt SSC theo hệ đa mẫu.

Từ những kết quả đạt được, nghiên cứu có những đóng góp về mặt thực tiễn như sau:

- (1) Ứng dụng SSC làm thiết bị đo đạc dưới dạng cảm biến tải trọng nén. Cảm biến làm việc trong phạm vi ứng suất nén nhỏ, qua đó hạn chế sự xuất hiện và phát triển của các vết nứt vi mô bên trong SSC trong quá trình sử dụng, góp phần nâng cao độ chính xác của phép đo và kéo dài tuổi thọ làm việc của thiết bị.

- (2) Những kết quả và phát hiện của luận án là cơ sở khoa học quan trọng, làm tiền đề cho việc nghiên cứu và phát triển các trạm cân thể hệ mới sử dụng vật liệu SSC với chi phí hợp lý, qua đó góp phần đa dạng hóa công nghệ cảm biến và nâng cao hiệu quả ứng dụng trong các hệ thống hạ tầng giao thông thông minh.

7. Cấu trúc của luận án

Cấu trúc luận án gồm có các phần chính sau đây:

Mở đầu trình bày lý do chọn đề tài, mục tiêu nghiên cứu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu, phương pháp nghiên cứu, nội dung nghiên cứu, ý nghĩa khoa học hoặc thực tiễn của luận án.

Chương 1. Tổng quan

Chương 2. Chương trình thực nghiệm

Chương 3. Cơ chế ứng xử cơ bản của bê tông tự cảm biến sử dụng muội than đen dưới tác dụng của tải trọng nén

Chương 4. Điện trở suất ban đầu và ứng xử điện trở của bê tông tự cảm biến sử dụng sợi carbon và muội than đen có xét đến các yếu tố ảnh hưởng

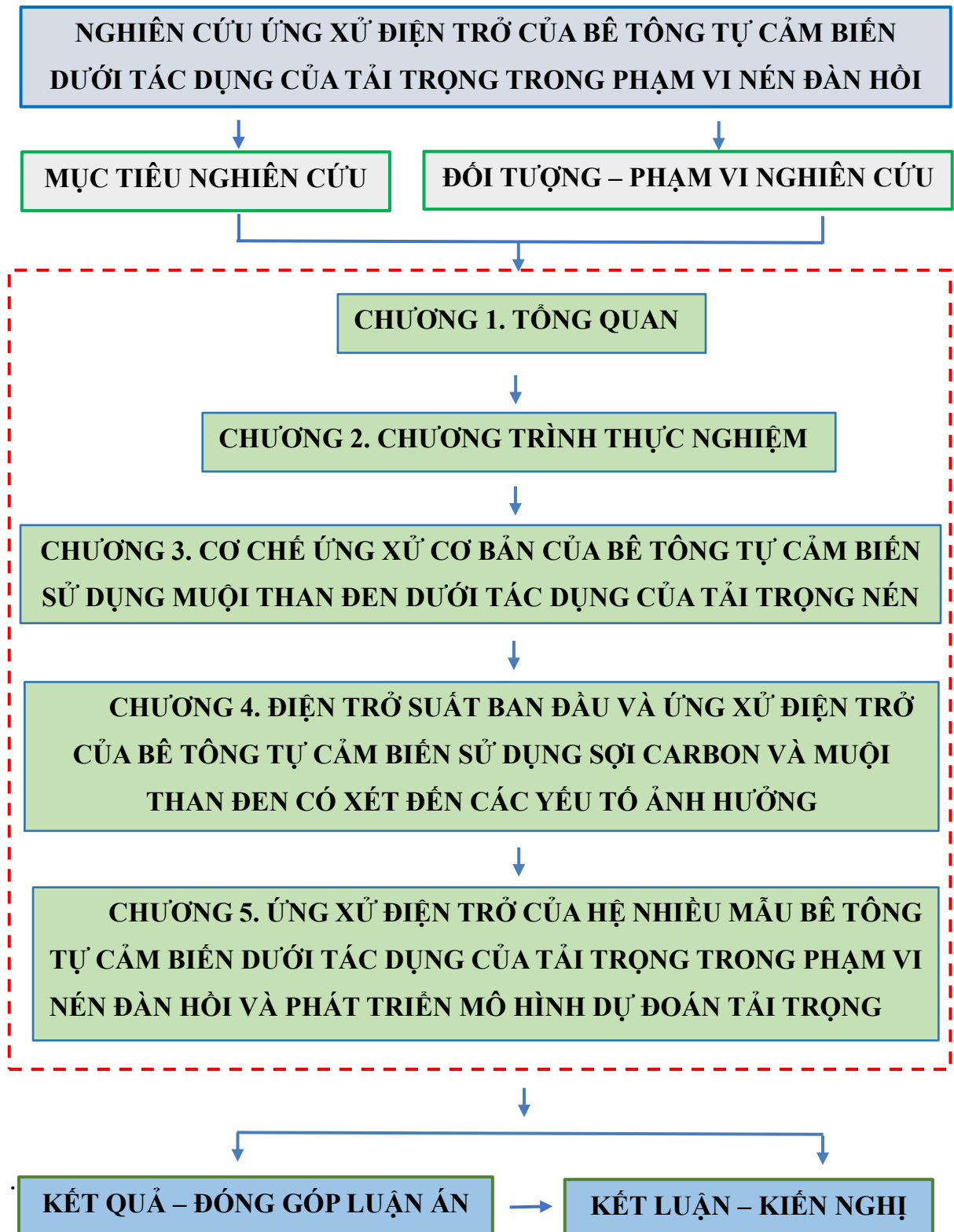
Chương 5. Ứng xử điện trở của hệ nhiều mẫu bê tông tự cảm biến dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi và phát triển mô hình dự đoán tải trọng

Kết luận và kiến nghị bao gồm những phát hiện mới, những kết luận rút ra từ kết quả nghiên cứu; kiến nghị về những nghiên cứu tiếp theo

Tài liệu tham khảo

Danh mục các bài báo/công trình khoa học đã công bố liên quan đến luận án của nghiên cứu sinh kèm theo văn bản đồng ý của các đồng tác giả

Để hệ thống hóa toàn bộ quá trình nghiên cứu một cách trực quan, làm rõ mối quan hệ giữa mục tiêu nghiên cứu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu, nội dung nghiên cứu, các kết quả đạt được, những đóng góp mới của luận án, cũng như các kết luận và định hướng nghiên cứu tiếp theo, NCS đã xây dựng sơ đồ nghiên cứu của luận án. Sơ đồ này nhằm thể hiện logic nghiên cứu, trình tự thực hiện và các nội dung trọng tâm của toàn bộ quá trình nghiên cứu, cụ thể như sau:



CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

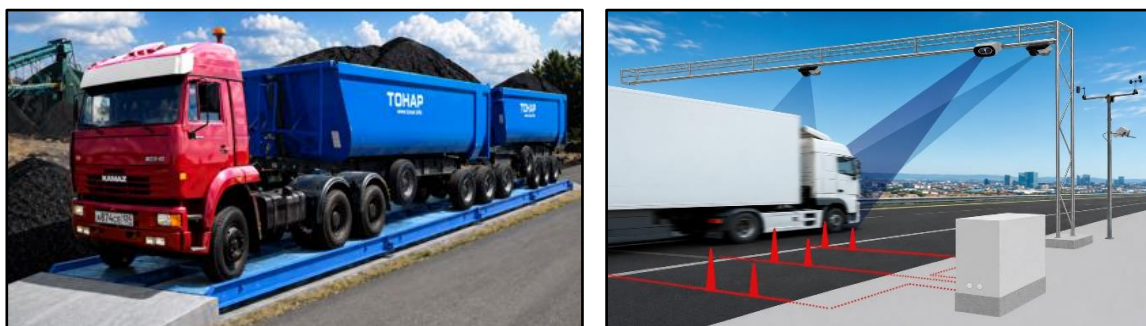
1.1. Giới thiệu chung

Công cuộc chuyển đổi số trong ngành xây dựng đang là một lĩnh vực thu hút đông đảo các kỹ sư và nhà nghiên cứu. Bên cạnh việc dữ liệu hóa trong khâu thiết kế, thi công công trình, việc ứng dụng các công nghệ số trong công tác quan trắc sức khỏe công trình, quản lý giao thông,... là khâu cốt yếu để nâng cao hiệu quả trong quá trình khai thác và vận hành công trình, hướng đến phát triển các đô thị thông minh [1,2]. Trong bối cảnh đó, Việt Nam xác định việc phát triển và xây dựng hệ thống giao thông thông minh, bền vững là một xu hướng tất yếu, phù hợp với sự phát triển mạnh mẽ của Cách mạng công nghiệp lần thứ tư tại Việt Nam hiện nay. Điều này được thể hiện rõ qua Quyết định số 950/QĐ-TTg về “Phê duyệt Đề án phát triển đô thị thông minh bền vững Việt Nam giai đoạn 2018 - 2025 và định hướng đến năm 2030” và Quyết định số 2060/QĐ-TTg về “Phê duyệt Chiến lược quốc gia bảo đảm trật tự, an toàn giao thông đường bộ giai đoạn 2021 - 2030 và tầm nhìn đến năm 2045” trong đó đặt ra mục tiêu “lắp đặt hệ thống điều hành, quản lý giao thông thông minh trên 100% tuyến đường cao tốc và các đoạn tuyến quốc lộ trọng điểm”.

Trước thực trạng hạ tầng giao thông đường bộ bị xuống cấp và hư hỏng nghiêm trọng do tình trạng quá tải phương tiện, yêu cầu cấp thiết đặt ra là cần triển khai một hệ thống giám sát phương tiện giao thông như các trạm cân gồm trạm cân động hoặc các trạm cân tĩnh trên phạm vi rộng, nhằm kiểm soát tải trọng, hạn chế hư hỏng kết cấu hạ tầng và nâng cao hiệu quả công tác quản lý khai thác giao thông. Bên cạnh đó, việc phát triển hệ thống cân tải trọng cỡ lớn nhằm kiểm soát lưu thông hàng hóa cỡ lớn tại các bến cảng hoặc kho bãi công nghiệp là nhiệm vụ hết sức cấp thiết.

Hệ thống cân tải trọng cỡ lớn là hệ thống đo lường tải trọng của các vật thể cỡ lớn, thường được áp dụng để kiểm soát các tải trọng này một cách liên tục theo thời gian thực, giúp quản lý kịp thời và tối ưu được lưu lượng giao thông, hàng hóa cũng như bảo vệ được cơ sở hạ tầng và nâng cao tính an toàn bằng cách phát hiện các trường hợp vi phạm vượt quá tải trọng theo quy định. Bằng việc kết hợp với hệ thống lưu trữ và truyền tải dữ liệu IoT ngày nay, đây là tiền đề quan trọng trong phát triển

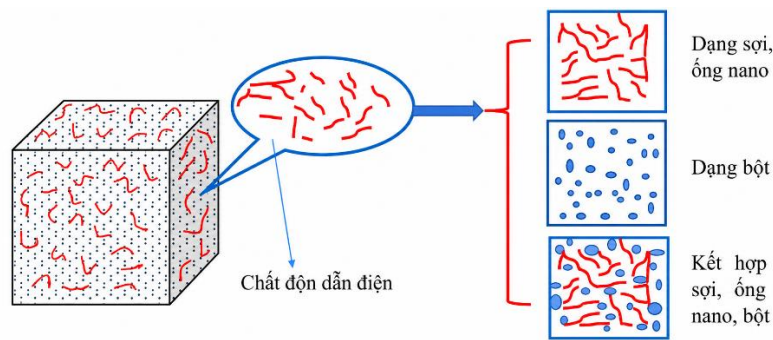
các hệ thống giao thông và logistics thông minh trong tương lai gần. Hình 1.1 là một số hình ảnh ứng dụng của hệ thống cân tải trọng cỡ lớn trong quản lý vận tải [3,4].



Hình 1.1. Hệ thống cân tải trọng cỡ lớn trong quản lý vận tải [3,4]

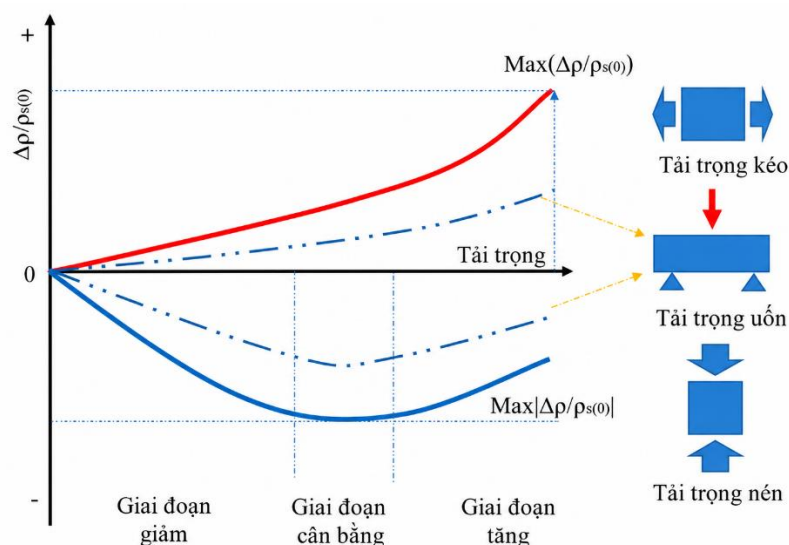
Thành phần quan trọng nhất của một trạm cân là hệ thống cảm biến tải trọng. Công nghệ chủ yếu được sử dụng hiện nay là cảm biến áp điện (piezoelectric sensor). Tuy nhiên, nhược điểm lớn của các loại cảm biến này là giá trị đo được chỉ phản ánh ứng suất hoặc biến dạng cục bộ tại vị trí gắn cảm biến. Vì vậy, để dự đoán được tải trọng có kích thước lớn tác dụng lên trạm cân, hệ thống cảm biến phải bao gồm rất nhiều cảm biến đơn lẻ được gắn vào các bộ phận chức năng của trạm. Kết quả là số lượng cảm biến và thiết bị tích hợp bao gồm bộ đọc và chuyển đổi dữ liệu cần thiết trong trạm cân trở nên khá phức tạp. Điều này làm tăng tổng chi phí lắp đặt trạm cân, trong khi độ bền theo thời gian của các cảm biến này chịu ảnh hưởng các yếu tố môi trường và khó khăn trong việc thi công thay thế. Đây là một trong những rào cản lớn trong việc quản lý hệ thống trạm cân trong hệ thống hạ tầng giao thông hiện nay.

Một trong những giải pháp được kỳ vọng có thể khắc phục được các nhược điểm nêu trên là một loại vật liệu bê tông thể hệ mới là SSC. Loại bê tông này được xem như một vật liệu đầy tiềm năng trong phát triển các công nghệ cảm biến mới, ứng dụng trong hệ thống quan trắc và quản lý hạ tầng, giao thông thông minh. SSC lần đầu tiên được giới thiệu vào đầu những năm 1990 và trong những năm gần đây đã thu hút sự quan tâm rộng rãi của cộng đồng nghiên cứu trên toàn thế giới. Song hành với sự phát triển mạnh mẽ của Cách mạng công nghiệp lần thứ 4, việc thu thập dữ liệu một cách liên tục, chính xác và tin cậy đã trở thành nền tảng quan trọng cho việc phát triển và triển khai các giải pháp hạ tầng thông minh [5].

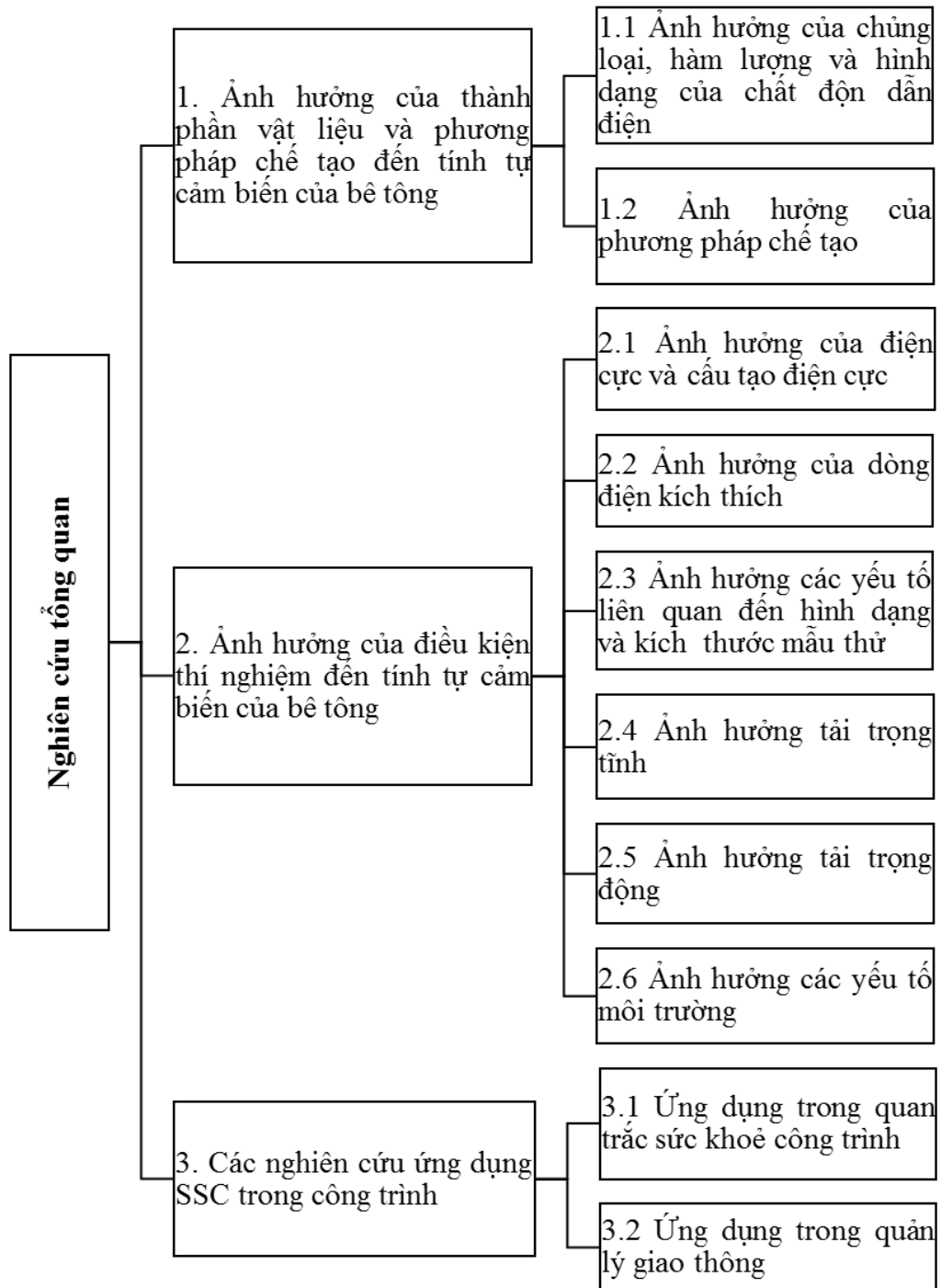


Hình 1.2. Cấu trúc của SSC

Hình 1.2 mô tả cấu trúc cơ bản của SSC. Nguyên lý cơ bản để tạo ra tính tự cảm biến của bê tông là đưa vào bê tông những vật liệu có tính dẫn điện một hàm lượng thích hợp để tăng tính dẫn điện của bê tông đến một mức độ phù hợp [6]. Khi đó, giá trị đặc trưng cho tính dẫn điện của vật liệu là điện trở suất của bê tông sẽ biến thiên khi vị trí tương đối của các chất độn dẫn điện bên trong bê tông bị thay đổi dưới tác dụng của các loại tải trọng bao gồm nén [7], kéo [8], uốn [9]. Các chất dẫn điện sẽ xích lại gần nhau hơn dưới tác dụng của tải trọng nén và xa nhau hơn dưới tác dụng của tải trọng kéo, điều này làm thay đổi vi cấu trúc bên trong bê tông và gián tiếp làm điện trở suất của bê tông thay đổi. Do đó, dựa vào việc đo đạc liên tục sự biến thiên của điện trở suất giúp gián tiếp dự đoán được sự thay đổi của ứng suất xuất hiện bên trong bê tông dưới tác dụng của các loại tải trọng. Hình 1.3 mô tả ứng xử điện trở suất của SSC dưới tác dụng của các loại tải trọng [10].



Hình 1.3. Ứng xử cảm biến điện hình của SSC khi chịu tác dụng tải trọng [10]



Hình 1.4. Sơ đồ nghiên cứu tổng quan

Tuy nhiên, để phát triển các ứng dụng này, việc phân tích và làm rõ ảnh hưởng của các yếu tố tác động lên tính tự cảm biến của bê tông là hết sức cần thiết. Vì vậy, phần nghiên cứu tổng quan được xây dựng trên cơ sở khảo sát và tổng hợp các tài liệu liên quan theo một cấu trúc hệ thống, được minh họa trong Hình 1.4. Cụ thể, nội dung tổng quan được phân chia thành ba nhóm chính, bao gồm: (i) ảnh hưởng của

thành phần vật liệu và phương pháp chế tạo đến tính tự cảm biến của bê tông; (ii) ảnh hưởng của các điều kiện thí nghiệm như cấu tạo điện cực, dòng điện kích thích, hình dạng và kích thước mẫu, điều kiện tải trọng và môi trường; và (iii) các hướng ứng dụng của bê tông tự cảm biến trong công trình, đặc biệt trong quan trắc sức khỏe công trình và quản lý giao thông. Cách tiếp cận này cho phép hệ thống hóa các kết quả nghiên cứu hiện có, đồng thời làm rõ những yếu tố then chốt cần được xem xét trong quá trình phát triển và ứng dụng SSC. Các nội dung nghiên cứu tổng quan được tổng hợp ở mục 1.2 và 1.3 sau đây.

1.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến tính cảm biến của bê tông

1.2.1. Ảnh hưởng của thành phần vật liệu và phương pháp chế tạo

1.2.1.1. Ảnh hưởng của chủng loại, hàm lượng và hình dạng của chất độn dẫn điện

Nhiều nghiên cứu về SSC đã thực hiện trong những năm gần đây với chủng loại, hình dáng, kích thước và hàm lượng của các chất độn dẫn điện khác nhau. Các yếu tố này đều có ảnh hưởng nhất định đến khả năng tự cảm biến của bê tông.

Nhiều loại chất độn dẫn điện, bao gồm sợi carbon, ống nano carbon, muội than đen, sợi thép, graphene và bột niken..., đã được tích hợp vào nền bê tông để phát triển vật liệu SSC. Các chất độn này góp phần hình thành hệ thống dẫn điện liên tục trong vật liệu, cho phép theo dõi sự thay đổi của các thông số điện nhằm phản ánh trạng thái ứng suất, biến dạng hoặc hư hỏng của kết cấu. Trong số đó, các nghiên cứu phát triển SSC sử dụng chất độn gốc carbon chiếm một số lượng đáng kể nhờ chi phí thấp và tính ổn định dưới tác động của môi trường của chúng [11-13].

Trong một số nghiên cứu điển hình về làm rõ mối tương quan giữa tính tự cảm biến của bê tông và tính chất cơ lý của chất độn dẫn điện, tác giả Yoo và các cộng sự [14] đã so sánh ứng xử điện trở của các mẫu thử sử dụng chất độn là ống nano carbon, graphene nano và graphene oxide và nhận thấy rằng ống nano carbon là chất dẫn điện hiệu quả nhất trong các loại vật liệu này trong việc làm tăng tính dẫn điện của vật liệu khi tất cả thành phần khác có cùng tỷ lệ. Trong khi đó, tác giả Al-Dahawi và các cộng sự [15] chỉ ra rằng sợi carbon có ưu thế hơn so với graphene nanoplatelets và ống nano carbon về chi phí và nâng cao tính dẫn điện. Sở dĩ graphene nanosheets trong

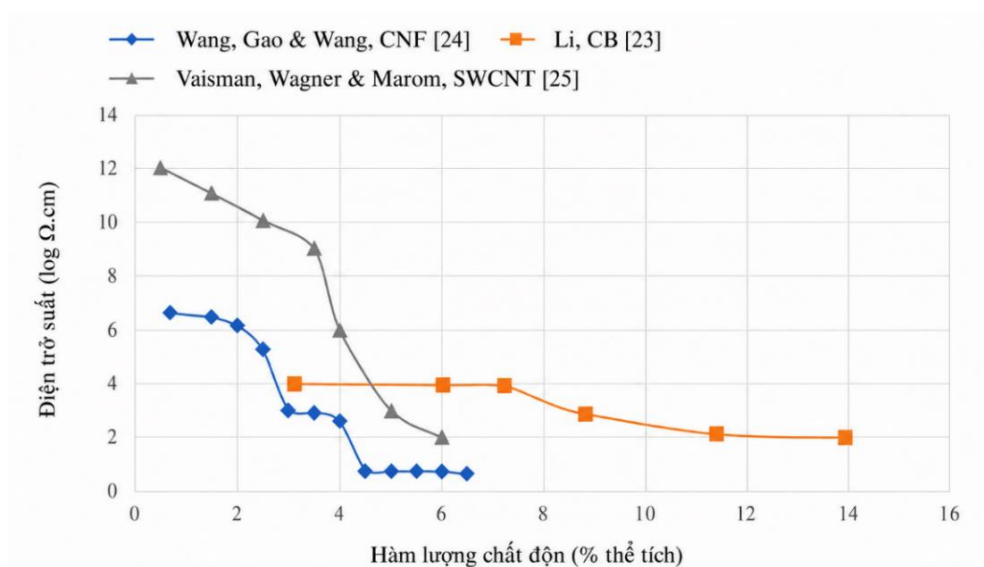
những năm gần đây được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng [16,17] vì một số lý do chính sau. Thứ nhất, so với ống nano carbon gần như có cấu trúc một chiều, graphene nanosheets có diện tích tiếp xúc với vật liệu lớn hơn, dẫn đến chức năng tự cảm biến của nó có thể nhạy hơn [18]. Thứ hai, chi phí của graphene nanosheets thường thấp hơn ống nano carbon. Cuối cùng, graphene nanosheets có thể được sử dụng hiệu quả ở hàm lượng thấp (thường từ 0,03% đến 0,1% khối lượng chất kết dính), đây là một ưu điểm so với ống nano carbon trong việc phát triển vật liệu composite dẫn điện [16–18].

Bên cạnh đó, một số nghiên cứu đã sử dụng kết hợp nhiều loại chất độn với nhau để chế tạo SSC. Khi 02 chất độn có kích thước khác nhau được đưa vào SSC, chất độn nhỏ hơn sẽ cải thiện độ phân tán của chất độn kia. Nghiên cứu của tác giả Chen và Chung [19] đã dùng sợi carbon làm chất độn dẫn điện chính và kết hợp với muối silic (đơn vị kích thước nhỏ hơn nhiều so với sợi) làm chất độn thứ hai. Thông qua thử nghiệm so sánh, muối silic đã được chứng minh là tăng cường tính dẫn điện của bê tông sợi carbon so với bê tông không sử dụng muối silic. Nghiên cứu cho rằng nên chọn chất độn dẫn điện thứ hai có kích thước nhỏ hơn chất độn dẫn điện thứ nhất để cải thiện độ phân tán của chất độn dẫn điện bên trong bê tông. Tương tự, tác giả Yoo và các cộng sự [8] thực hiện thí nghiệm bằng cách kết hợp sợi thép với ống nano carbon làm 02 chất độn dẫn điện bên trong bê tông tính năng siêu cao. Nghiên cứu chỉ ra rằng độ bền cơ học và khả năng tự cảm biến của bê tông đều được nâng cao. Tương tự, SSC có chứa 3 thành phần chất độn dẫn điện là sợi thép, xỉ hạt lò cao nghiền mịn và muối than đen cũng được chứng minh có khả năng cảm biến tốt hơn so với bê tông chỉ sử dụng một loại chất độn dẫn điện trong một số nghiên cứu khác [20,21].

Về hình dạng chất độn dẫn điện, chất độn dẫn điện dạng sợi như sợi hoặc ống nano có đặc điểm hình dạng thon dài. Do đó, để tạo ra mạng lưới dẫn điện bên trong bê tông, có thể sử dụng hàm lượng dạng chất độn này thấp hơn so với các loại chất độn có dạng hình cầu. Kết quả nghiên cứu bê tông sử dụng sợi carbon dài 3 mm và 6 mm cho thấy sợi dài có thể thiết lập một mạng lưới dẫn điện ổn định hơn so với sợi

ngắn bên trong SSC, điều này không chỉ làm giảm điện trở suất mà còn tăng cường độ chịu nén và kéo [22]. Tuy nhiên, chất độn dẫn điện dạng sợi có nhược điểm lớn nhất là khó phân tán đồng đều bên trong SSC. Hiện tượng kết tụ của các sợi dẫn điện có thể dẫn đến sự gia tăng lỗ rỗng bên trong SSC và ảnh hưởng đến độ bền, cường độ chịu nén cũng như làm tăng điện trở của SSC.

Về hàm lượng của chất độn dẫn điện, nghiên cứu của tác giả Li và các cộng sự [23], tác giả Wang và các cộng sự [24], tác giả Vaisman và các cộng sự [25] chỉ ra rằng hàm lượng chất độn dẫn điện của SSC ảnh hưởng đáng kể đến điện trở suất, nghĩa là khả năng dẫn điện của SSC.



Hình 1.5. Mối quan hệ giữa điện trở suất và hàm lượng thể tích chất độn dẫn điện trong bê tông (%) [23-25]

Hình 1.5 cho thấy sự thay đổi điện trở suất của bê tông phụ thuộc vào loại và hàm lượng chất độn dẫn điện. Đối với CNF và SWCNT, điện trở suất giảm rõ rệt khi tăng hàm lượng chất độn do các cấu trúc dạng sợi nano thuận lợi cho quá trình hình thành mạng dẫn điện liên tục trong nền bê tông. Trong khi đó, CB có xu hướng giảm điện trở suất chậm hơn và duy trì tương đối ổn định trong khoảng hàm lượng xấp xỉ (3–7)% thể tích, do các hạt CB cần hàm lượng lớn hơn để tạo thành các đường dẫn điện liên kết. Như vậy, khả năng hình thành mạng dẫn điện không chỉ phụ thuộc vào loại, hình dạng chất độn dẫn điện mà còn chịu ảnh hưởng bởi hàm lượng của chất dẫn

điện. Việc kiểm soát hàm lượng chất dẫn điện phù hợp là yếu tố quan trọng để tạo mạng dẫn điện có độ nhạy cao, phục vụ khả năng tự cảm biến của bê tông.

Hiện tượng này liên quan đến khái niệm “ngưỡng thấm” được đề cập trong các nghiên cứu trên. Ngưỡng thấm (percolation threshold) là hàm lượng chất độn tới hạn mà tại đó mạng dẫn điện liên tục được hình thành trong nền vật liệu, làm cho điện trở suất giảm mạnh do sự chuyển tiếp từ trạng thái không dẫn điện sang trạng thái dẫn điện. Việc xác định ngưỡng thấm có ý nghĩa quan trọng trong tối ưu hóa hàm lượng chất dẫn điện nhằm nâng cao khả năng cảm biến và hiệu quả sử dụng vật liệu. Thông thường, hàm lượng sợi nằm dưới ngưỡng thấm là hiệu quả về chi phí, ngược lại thì chi phí của SSC sẽ tăng lên. Việc sử dụng hàm lượng chất độn dẫn điện quá cao cũng là tác nhân làm suy giảm cường độ chịu nén và giảm tính công tác của bê tông [26]. Tác giả B. Han và các cộng sự [27] đã chỉ ra rằng hàm lượng chất độn dẫn điện cao hơn ngưỡng thấm thì có lợi cho hiệu suất cảm biến của bê tông chịu ứng suất kéo. Ngược lại, hàm lượng chất độn dẫn điện dưới ngưỡng thấm thì có lợi cho hiệu suất cảm biến của bê tông khi chịu ứng suất nén. Tác giả Sun và các cộng sự [28] đã sử dụng nano graphite platelets với hàm lượng thể tích từ 0-10 % và nhận thấy rằng có 2 ngưỡng thấm thứ nhất và thứ hai đạt được lần lượt là 2% thể tích và 9% thể tích. Khi hàm lượng chất độn dẫn điện nhỏ hơn 1,0% thể tích, không có hiệu ứng áp trở do hiện tượng phân cực. Tỷ lệ thay đổi điện trở suất đạt cực đại tại điểm mà hàm lượng chất độn dẫn điện là 5 % thể tích. Ngoài ra, độ biến thiên điện trở suất không thay đổi khi tải trọng nén không đổi, cho thấy hiệu ứng áp trở là ổn định. Tác giả Azhari và cộng sự [29] cho rằng ở ngưỡng thấm thứ hai, điện trở suất không thể bị ảnh hưởng bởi quá trình thủy hóa xi măng.

Mặc dù các thông số thử nghiệm và điều kiện chế tạo khác nhau giữa các nghiên cứu, kết quả cho thấy hàm lượng ống nano carbon trong khoảng (0,05–1,0)% thể tích là khoảng giá trị phù hợp thường được lựa chọn để chế tạo SSC, tùy thuộc vào thành phần vật liệu nền và yêu cầu về đặc tính cảm biến. Tương tự, tác giả D.D.L. Chung và các cộng sự cho rằng sử dụng sợi carbon với hàm lượng tối thiểu là 0,2% thể tích để nghiên cứu SSC chịu ứng suất kéo hoặc nén [11,30]. Nghiên cứu của tác giả S.

Taheri và các cộng sự [31], tác giả T.Shi và các cộng sự [32] sử dụng hàm lượng chất độn dẫn điện dao động từ 1% đến 2% theo thể tích của bê tông. Mặt khác, muội than đen cũng được sử dụng trong một số nghiên cứu khác và cho thấy là một chất độn dẫn điện tiềm năng nhờ 02 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. Tuy nhiên, theo nghiên cứu trước đây [31], để đảm bảo khả năng dẫn điện trong bê tông, muội than đen được sử dụng làm chất độn dẫn điện với hàm lượng thể tích tương đối cao, dao động trong khoảng (6–7) %.

Như vậy, trong những năm gần đây đã có nhiều nghiên cứu được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của các loại chất độn dẫn điện khác nhau đến tính năng cảm biến của bê tông. Các nghiên cứu đã chỉ ra 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 oxit kim loại thường dễ bị ảnh hưởng bởi môi trường bên ngoài dẫn đến thay đổi điện trở suất và làm giảm độ chính xác trong hoạt động của cảm biến. Ngược lại, các chất độn dẫn điện có nguồn gốc carbon thể hiện độ bền cao, khả năng kháng môi trường kiềm tốt và duy trì hiệu suất dẫn điện ổn định; do đó, chúng thường được sử dụng làm chất độn dẫn điện trong SSC.

1.2.1.2. Ảnh hưởng của phương pháp phân tán chất độn

Bên cạnh nghiên cứu ảnh hưởng của chủng loại và hàm lượng chất dẫn điện đến tính tự cảm biến của bê tông, các nghiên cứu làm rõ ảnh hưởng của phương pháp chế tạo, đặc biệt là phương pháp trộn giúp phân tán các chất độn dẫn điện bên trong bê tông đến tính tự cảm biến của bê tông cũng được quan tâm đáng kể.

Khi chế tạo SSC, việc sử dụng các loại phụ gia hoặc phương pháp xử lý nhằm hỗ trợ phân tán các chất độn dẫn điện bên trong bê tông thường được xem xét chi tiết. Các chất độn kích thước nano được sử dụng rộng rãi để phân tán trong bê tông với sự hỗ trợ của phương pháp cơ học và phụ gia chống tạo bọt. Tác giả Danoglidis và các cộng sự [33] cho rằng hàm lượng tối ưu của ống nano carbon trong hỗn hợp vữa là 0,1% trọng lượng xi măng, tuy nhiên, khi tăng hàm lượng lên 0,5%, phần thay đổi của điện trở suất giảm khoảng 70%, điều này là do sự phân tán kém hiệu quả hơn do

hàm lượng chất độn cao hơn. Các vùng kết tụ chất độn được hình thành do quá trình phân tán kém và các vùng này có hiện tượng co lại dưới tác dụng của tải trọng và không thể phục hồi về dạng ban đầu sau khi dỡ tải, nên tính cảm biến của bê tông kém ổn định. Các hệ lỗ rỗng được tạo ra trong bê tông có thể ảnh hưởng tiêu cực đến các tính cảm biến và cường độ cơ học của bê tông. Sợi carbon có thể được cải thiện 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. Bên cạnh đó, muối than đen có thể linh hoạt hơn trong việc phân tán trong hỗn hợp bê tông nhờ các loại phụ gia siêu dẻo [34].

Phụ gia dùng để phân tán chất độn dẫn điện thông thường được phân loại thành chất hoạt động bề mặt và phụ gia khoáng. Chất hoạt động bề mặt bao gồm phụ gia giảm nước, methyl cellulose, natri dodecyl sulfat, natri dodecyl benzen sulfonat, cetyl trimethyl ammonium bromide v.v. Chất hoạt động bề mặt có thể được chia thành chất hoạt động bề mặt không ion và có ion. Nghiên cứu đã tiến hành thí nghiệm phân tán graphene bằng hai loại chất hoạt động bề mặt này với hàm lượng lần lượt là 0,5% và 1,0% khối lượng trong nước. Người ta thấy rằng chất hoạt động bề mặt không ion hiệu quả hơn chất hoạt động bề mặt có ion, giá trị cao nhất lên tới 1 mg/ml. Khi sử dụng vật liệu phân tán cần xem xét ảnh hưởng xấu đến tính công tác và tính chất cơ học của bê tông và quá trình thủy hóa xi măng.

Mặc dù phụ gia giúp phân tán tốt các chất độn dẫn điện trong bê tông, lớp phụ gia bám trên bề mặt chất độn có thể làm tăng điện trở tiếp xúc giữa các hạt/sợi dẫn điện, dẫn đến ảnh hưởng nhất định đến tính dẫn điện của vật liệu [5]. Tác giả Adresi và các cộng sự [35] đề xuất tỷ lệ phối trộn giữa phụ gia siêu dẻo và chất hoạt động bề mặt nhằm cân bằng giữa tính chất cơ học của bê tông và mức độ phân tán, theo đó, tỷ lệ 9:1 là phù hợp khi yêu cầu bê tông có cường độ chịu nén tương đương bê tông thường, tỷ lệ 12:1 được sử dụng khi mục tiêu là nâng cao cường độ chịu nén của bê tông; trong khi tỷ lệ 5:1 được sử dụng đạt hiệu quả cao khi phân tán ống nano carbon trong nước, với tỷ lệ này ưu tiên chất lượng phân tán hơn là tính chất cơ học. Ngoài ra, các nghiên cứu khác đã chỉ ra ảnh hưởng của chất hoạt động bề mặt đến hiệu suất

cảm biến của bê tông. Tác giả Yu và Kwon [36] cho rằng do sự bao bọc của chất hoạt động bề mặt nên sự tiếp xúc giữa các ống nano carbon trở nên yếu hơn so với khi không sử dụng chất hoạt động bề mặt. Do đó, khi đo đặc tính hiệu bị nhiễu, đặc biệt là khi bê tông chịu ứng suất nén ở mức thấp.

Để khắc phục những nhược điểm này, tác giả Han và các cộng sự [34] đã nghiên cứu sử dụng chất phụ gia siêu dẻo như một chất phân tán và cho rằng nó có thể phân tán các ống nano carbon trong nước một cách hiệu quả và thúc đẩy tính đồng nhất của các ống nano carbon trong bê tông. Tác giả Wang và các cộng sự [24] 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. Vì việc sử dụng chất hoạt động bề mặt có thể dẫn đến tạo bọt khí và có thể làm giảm tính chất cơ học và tính cảm biến của bê tông, nên một loại phụ gia khác có tên là chất khử bọt tributyl phosphate được đề xuất thay thế để loại bỏ nhược điểm này. Ngoài ra, hàm lượng chất hoạt động bề mặt thấp sẽ làm giảm sự hình thành bong bóng khi chế tạo bê tông. Tác giả Adresi và các cộng sự [35] cho rằng độ phân tán chất dẫn điện đạt hiệu quả cao khi hàm lượng chất hoạt động bề mặt thấp, bằng cách trộn các chất hoạt động bề mặt cation và anion với nhau. Tương tự, tác giả L.Liu và các cộng sự [37] cho rằng cả natri dodecyl benzene sulfonate, chất hoạt động bề mặt anion và cetyl trimethyl ammonium bromide, chất hoạt động bề mặt cation, với hàm lượng từ 0,004% đến 0,4% thể tích hỗn hợp thì có thể phân tán các hạt graphene nano một cách hiệu quả.

Như vậy, phương pháp phân tán chất dẫn điện bên trong bê tông có ảnh hưởng đáng kể đến tính tự cảm biến của bê tông. Có ba phương pháp phân tán được sử dụng rộng rãi để đảm bảo đồng nhất bao gồm các phương pháp hóa học, vật lý và cơ học [38]. Trong đó, phương pháp hóa học được sử dụng rộng rãi và đạt được hiệu quả cao, vật liệu phân tán như phụ gia siêu dẻo, phụ gia muối silic cũng được sử dụng phổ biến.

Bên cạnh đó, tỷ lệ nước - chất kết dính là một thông số rất quan trọng ảnh hưởng đến cấu trúc vi mô và hiệu suất cảm biến của bê tông [39]. Tỷ lệ nước - chất kết dính cao làm tăng lỗ rỗng nên giảm cường độ và độ bền cơ học, nhưng thuận lợi cho tính công tác khi đổ bê tông. Tỷ lệ nước - chất kết dính thấp kết hợp các phụ gia siêu dẻo

giúp hỗ trợ chất độn dẫn điện được phân tán đều trong bê tông, độ rỗng thấp làm tăng độ nhạy, tính cảm biến của bê tông và cường độ nén bê tông cao. Do đó, khi chế tạo SSC cần tối ưu tỷ lệ nước - chất kết dính và quy trình bảo dưỡng tiêu chuẩn để kiểm soát đặc tính cơ học và tính cảm biến của bê tông.

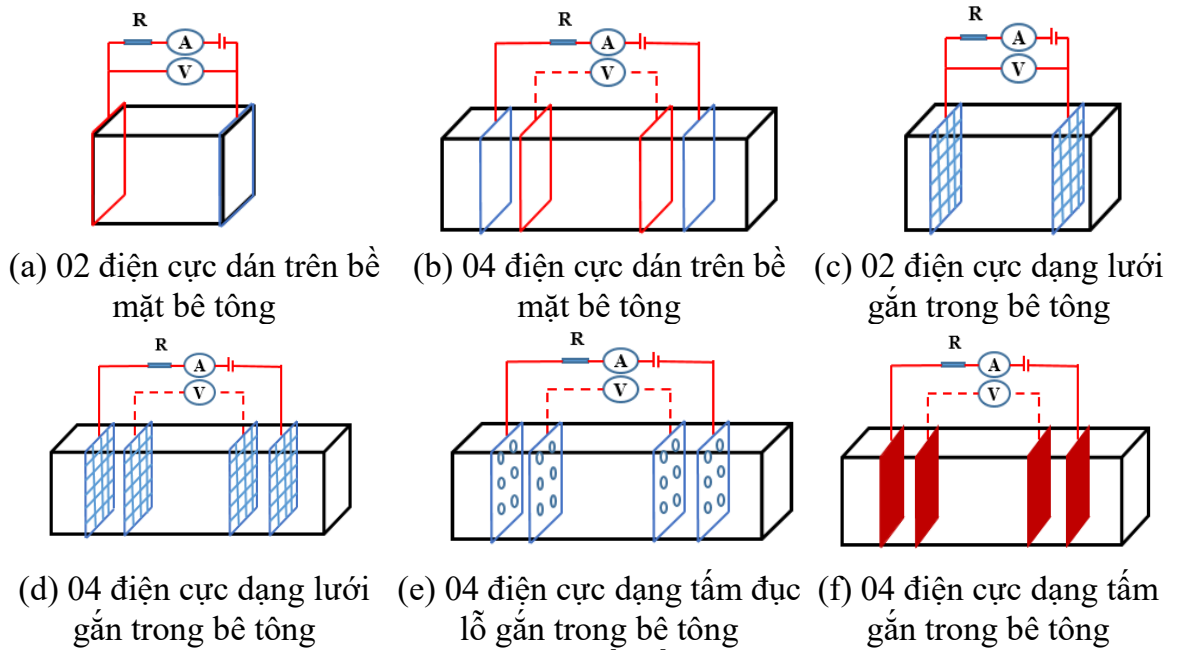
1.2.2. Ảnh hưởng của điều kiện thí nghiệm

1.2.2.1. Ảnh hưởng của điện cực và cấu tạo điện cực

Để đo đặc tính tự cảm biến của bê tông dưới tác dụng của các loại tải trọng, các mẫu SSC phải gắn các điện cực. Các điện cực này cũng được sử dụng để kết nối với thiết bị đo lường. Cấu tạo và vị trí của các điện cực là một vấn đề then chốt trong nghiên cứu và ứng dụng của SSC, vì các điện cực này có thể ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của phép đo.

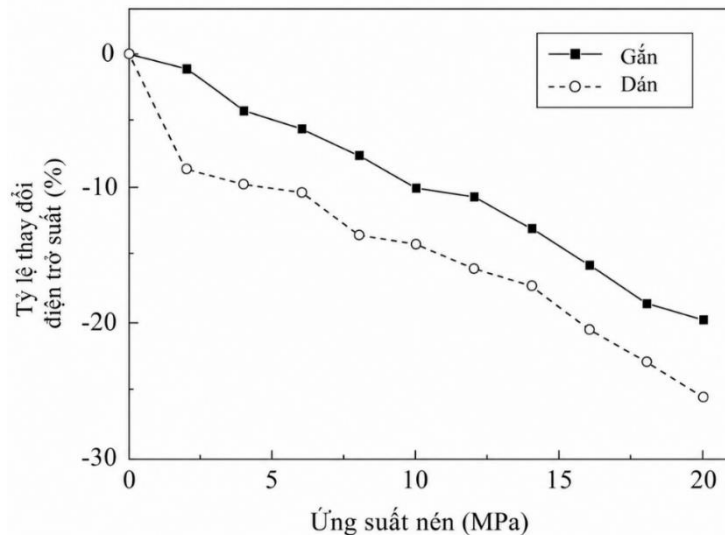
Tác giả Baoguo Han và các cộng sự [40] cho rằng việc lựa chọn điện cực cho SSC xét theo 03 yếu tố: vật liệu điện cực, phương pháp cố định điện cực và cách bố trí điện cực. Vật liệu điện cực cần có 02 tính năng là điện trở thấp và tính chất dẫn điện ổn định. Hiện nay, các vật liệu được sử dụng làm điện cực chủ yếu là kim loại: đồng, thép không gỉ và chì... có cấu tạo dạng có hoặc không có lỗ, lá, lưới...

SSC thường được lắp đặt hai điện cực [41–43] hoặc bốn điện cực [23,44,45]. Hiện nay, trong các nghiên cứu thường sử dụng 06 sơ đồ bố trí điện cực, như minh họa trong Hình 1.6. Theo nghiên cứu của tác giả S.Wen và các cộng sự [46] thì các điện cực dán trên bề mặt của mẫu bê tông theo Hình 1.6(a) và Hình 1.6(b) được sử dụng rộng rãi khi thí nghiệm đo đặc tính cảm biến của bê tông trong phòng thí nghiệm dưới tác dụng của tải trọng tĩnh, do các phương pháp này không làm suy giảm các tính chất cơ học của bê tông. Tuy nhiên, các loại điện cực dán này dễ bị tách khỏi bê tông trong các ứng dụng thực tế dưới tác dụng của các loại tải trọng va đập hoặc tải trọng động. Để khắc phục vấn đề này, 04 phương án đã được đề xuất như minh họa tại các Hình 1.6(c) đến Hình 1.6(f). Điện cực dạng lưới, tấm đục lỗ gắn vào trong bê tông có thể giảm thiểu ảnh hưởng điện trở của điện cực và đảm bảo tính toàn vẹn của điện cực và mẫu bê tông.



Hình 1.6. Các dạng sơ đồ bố trí điện cực [10]

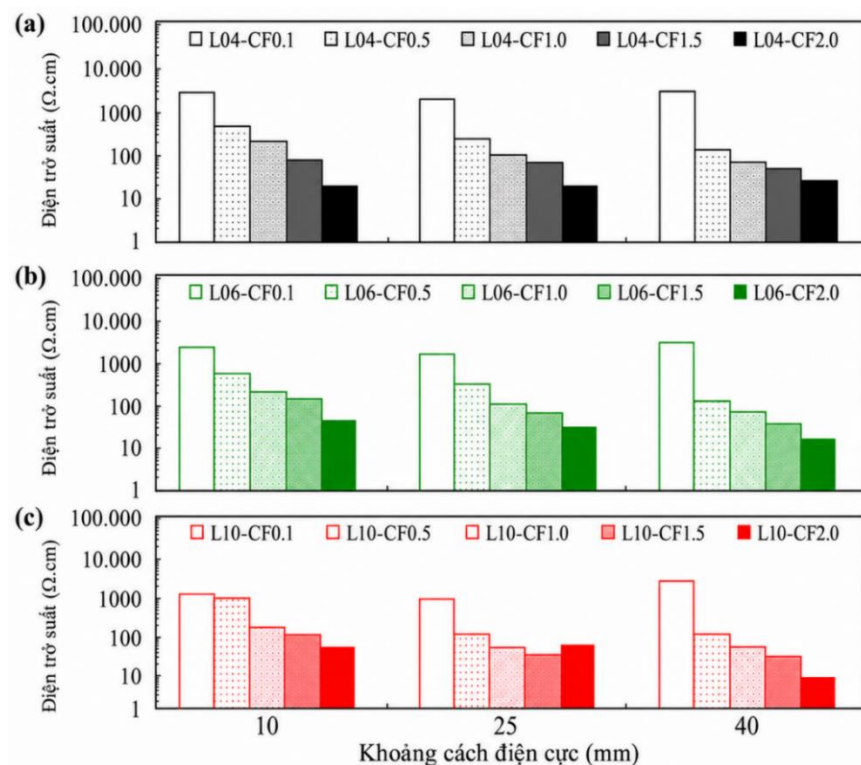
Nghiên cứu của tác giả B. Han và các cộng sự [40] chỉ ra rằng ứng xử điện trở của mẫu SSC có điện cực gắn bên trong bê tông dưới tác dụng của tải trọng nén là ổn định hơn mẫu SSC có điện cực được dán bên ngoài. Điều này là do liên kết tốt giữa điện cực và bê tông, ứng xử này được mô tả tại Hình 1.7. Bên cạnh đó, các nghiên cứu [40,47] cũng cho rằng điện cực gắn trong bê tông được bảo vệ rất tốt, không làm suy giảm tính chất cơ học của bê tông khi chịu tác dụng của tải trọng.



Hình 1.7. Ứng xử điện trở suất của SSC sử dụng điện cực gắn bên trong và dán bên ngoài bê tông dưới tác dụng của tải trọng nén [40]

Nhìn chung, các nghiên cứu đều khuyến nghị nên sử dụng điện cực gắn bên trong bê tông nhờ ưu điểm là không làm suy giảm tính chất cơ học của bê tông, bảo vệ điện cực tốt và điện trở suất thu được tốt hơn.

Ảnh hưởng của khoảng cách giữa các điện cực đến tính tự cảm biến của bê tông đã được tác giả Banthia và các cộng sự [48] nghiên cứu thông qua phép đo điện trở suất bằng phương pháp hai điện cực trên các mẫu bê tông kích thước $19 \times 19 \times 150$ mm chứa sợi thép với các hàm lượng khác nhau. Kết quả cho thấy điện trở suất phụ thuộc vào khoảng cách giữa các điện cực; giá trị điện trở suất giảm khi khoảng cách điện cực tăng. Tuy nhiên, khi khoảng cách điện cực lớn hơn 6 cm, điện trở suất gần như không thay đổi. Do đó, khoảng cách điện cực 7 cm được khuyến nghị sử dụng đối với loại mẫu này. Nghiên cứu của tác giả Ilhwan You và các cộng sự [49] cho thấy ảnh hưởng khoảng cách giữa 2 điện cực đến điện trở suất của các mẫu bê tông chứa sợi carbon có chiều dài khác nhau.

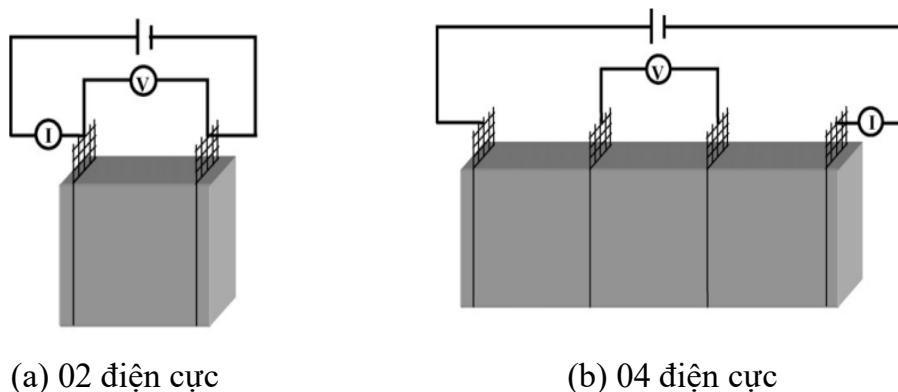


Hình 1.8. Ảnh hưởng khoảng cách giữa 2 điện cực đến điện trở suất của các mẫu SSC chứa sợi carbon có chiều dài khác nhau (a) 4 mm (L04), (b) 6 mm (L06) và (c) 10 mm (L10) [49]

Hình 1.8 chỉ ra rằng, đối với bê tông có khoảng cách điện cực 40 mm, điện trở suất của nó giảm khi tăng chiều dài sợi carbon. Tuy nhiên, khi khoảng cách điện cực là 10 mm, điện trở suất của bê tông tăng lên khi tăng chiều dài sợi carbon. Kết quả cho thấy khi thiết kế điện cực cho bê tông chứa sợi carbon, chiều dài sợi carbon nên ngắn hơn so với khoảng cách giữa các điện cực.

1.2.2.2. Ảnh hưởng của dòng điện kích thích

Các nghiên cứu thường sử dụng 02 sơ đồ mạch điện mô tả tại Hình 1.9 để đo đặc điện trở suất của bê tông, tương ứng với mẫu SSC được bố trí 02 điện cực hay 04 điện cực [40]. Trong phương pháp đo bốn điện cực, hệ thống sử dụng bốn tiếp điểm điện, trong đó hai tiếp điểm ngoài dùng để cấp dòng điện và hai tiếp điểm trong dùng để đo điện áp trên mẫu. Trong khi đó, phương pháp đo hai điện cực chỉ sử dụng hai tiếp điểm điện, mỗi tiếp điểm đảm nhiệm đồng thời việc cấp dòng điện và đo điện áp.



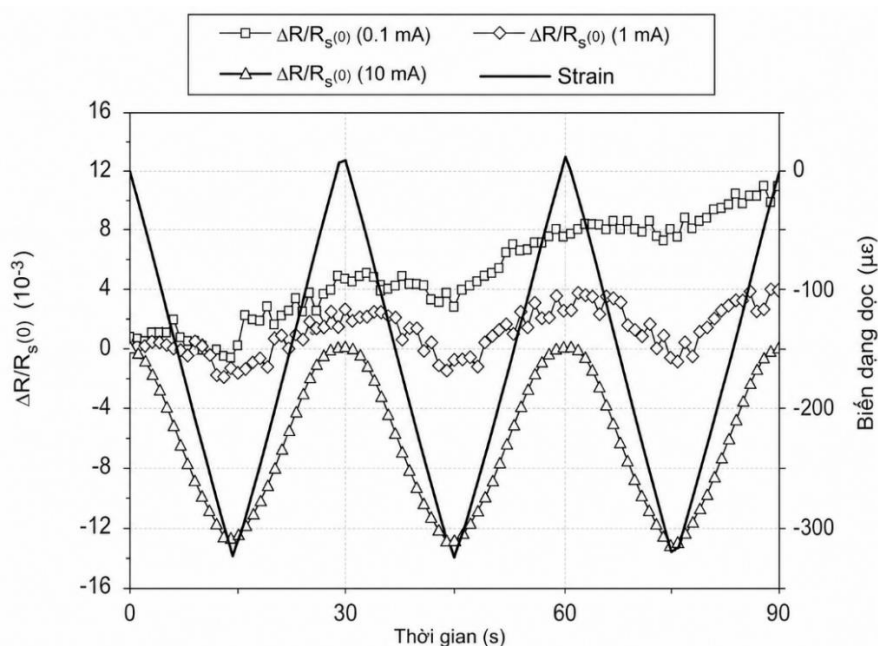
Hình 1.9. Sơ đồ mạch điện đo điện trở suất bê tông [40]

Mặc dù SSC chứa các chất dẫn điện nhưng SSC được xem là vật liệu có độ dẫn điện thấp [50]. Đối với các cảm biến điện thông thường, dòng điện kích thích có thể được cung cấp trực tiếp từ các bộ ghi dữ liệu (data logger) với điện áp nhỏ. Tuy nhiên, đối với SSC thì việc cung cấp 1 điện áp kích thích có độ lớn nhất định để tạo ra dòng điện ổn định khi thực hiện đo đặc là một yêu cầu mang tính bắt buộc trong phép đo điện trở suất của SSC.

Các nghiên cứu trước đây đều thực hiện với điều kiện của điện áp nguồn nhất định mà không tập trung xem xét ảnh hưởng của các yếu tố này lên kết quả đo đặc. Nghiên cứu của tác giả A.O. Monteiro và các cộng sự [41] sử dụng dòng điện kích

thích là 2 mA để cấp nguồn cho mẫu SSC chứa muối than đen. Nghiên cứu của tác giả Xiaopeng Li và các cộng sự [51] sử dụng dòng điện xoay chiều có tần số từ 0,1 Hz đến 10 MHz để cấp nguồn cho mẫu. Nghiên cứu của tác giả André O Monteiro và các cộng sự [44] sử dụng dòng điện 1 chiều với điện áp 12 V cung cấp cho mẫu.

Nghiên cứu của tác giả O. Galao và các cộng sự [52] đã chỉ ra ảnh hưởng quan trọng của cường độ dòng điện đến tính tự cảm biến của các mẫu SSC chứa 2% sợi carbon ở 28 ngày tuổi. Hình 1.10 mô tả sự thay đổi điện trở suất và biến dạng đối với mẫu 2% sợi carbon được cung cấp cường độ dòng điện ở ba mức khác nhau (0,1 mA, 1 mA và 10 mA). Nghiên cứu chỉ ra rằng cần cung cấp cường độ dòng điện nhất định để đo đặc điện trở suất hoặc biến dạng của SSC được ổn định. Tuy nhiên, nghiên cứu chưa xem xét cụ thể các yếu tố ảnh hưởng cường độ dòng điện đến tính tự cảm biến của mẫu



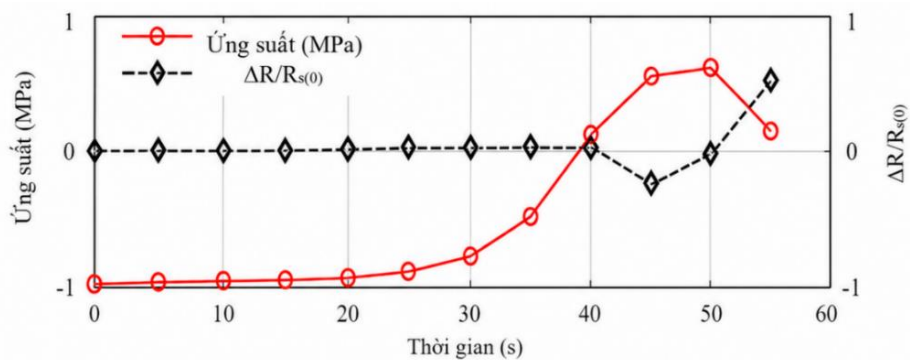
Hình 1.10. Ảnh hưởng cường độ dòng điện đến ứng xử điện trở và biến dạng đối với mẫu chứa 2% sợi carbon [52]

Như vậy, cường độ dòng điện và điện áp kích thích cung cấp cho mẫu ảnh hưởng đến tính cảm biến của bê tông. Các nghiên cứu trước đây thực hiện với điều kiện của điện áp nguồn nhất định mà chưa xét đến ảnh hưởng của các yếu tố này lên kết quả đo đạc.

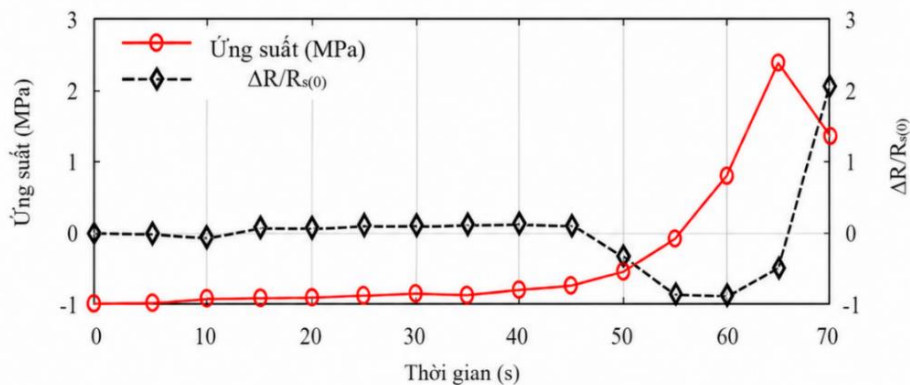
1.2.2.3. Ảnh hưởng các yếu tố liên quan đến hình dạng và kích thước mẫu

Các nghiên cứu sử dụng các mẫu với hình dạng và kích thước cụ thể nhất định để đo đặc điện trở suất, đo biến thiên điện trở so với điện trở ban đầu nhằm xác định ứng xử điện trở của vật liệu cảm biến.

Nghiên cứu của tác giả Imad Shakir Abbood và các cộng sự [53] sử dụng mẫu B11 có kích thước $7,5 \times 7,5 \times 7,5$ cm và mẫu As1 có kích thước $5 \times 5 \times 5$ cm.



(a) Mẫu B11 có kích thước $(7,5 \times 7,5 \times 7,5)$ cm



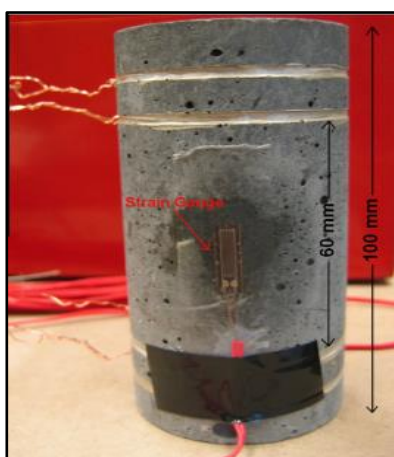
(b) Mẫu As1 có kích thước $(5 \times 5 \times 5)$ cm

Hình 1.11. Kích thước mẫu ảnh hưởng đến biến thiên điện trở của SSC [53]

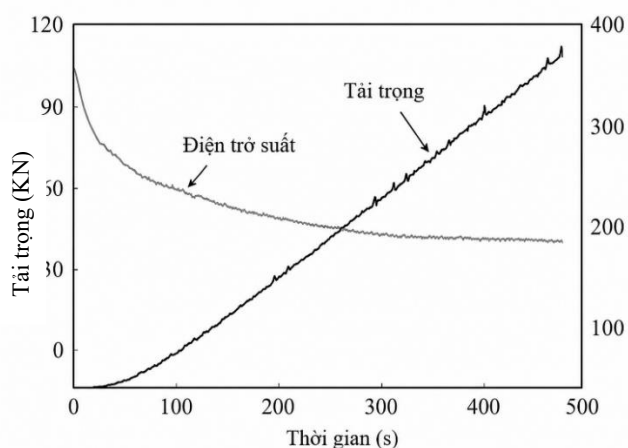
Theo đó, Hình 1.11(a), Hình 1.11(b) mô tả biến thiên điện trở tương đối ($\Delta R/R_{s(0)}$) của các mẫu SSC B11 có xu hướng tăng nhẹ dưới ứng suất nén cho đến khoảng giây thứ 40, trong khi đó, mẫu As1 thể hiện sự ứng xử chậm hơn, với sự gia tăng đáng kể về biến thiên điện trở so với giá trị ban đầu, bắt đầu vào khoảng giây thứ 60. Ứng suất nén của mẫu As1 bắt đầu tăng khoảng 20 giây trước khi xuất hiện biến thiên điện trở so với giá trị ban đầu. Độ trễ thời gian này có thể được sử dụng như một cảnh báo sớm cho các sự cố đứt gãy nghiêm trọng, mặc dù hàm lượng sợi

thép trong cả 02 mẫu B11 và As1 đều khá thấp (1,5%). Ngoài ra, kích thước mẫu có thể ảnh hưởng đến giá trị điện trở đo được và biên độ đáp ứng điện do sự thay đổi về chiều dài đường dẫn dòng điện cũng như sự phân bố ứng suất trong mẫu. Cụ thể, biên độ biến thiên điện trở tương đối $\Delta R/R_{s(0)}$ của mẫu B11 đạt 37,2%, lớn hơn đáng kể so với mẫu As1 (2,5%). Sự khác biệt này cho thấy kích thước hình học của mẫu cần được xem xét khi đánh giá đặc tính cảm biến điện trở của bê tông tự cảm biến.

Tác giả Faezeh Azhari và các cộng sự [54] đã nghiên cứu ứng xử điện trở suất của bê tông chứa sợi carbon dưới tải trọng nén trên các mẫu hình trụ có đường kính 50,8 mm và chiều cao 100 mm. Kết quả cho thấy điện trở suất giảm từ trên 400 $\Omega \cdot \text{cm}$ xuống khoảng 200 $\Omega \cdot \text{cm}$ khi tải trọng tăng, phản ánh sự cải thiện của mạng lưới dẫn điện do khoảng cách giữa các sợi carbon giảm. Tuy nhiên, mặc dù tải trọng được gia tăng tuyến tính theo thời gian, sự biến thiên điện trở suất lại có tính phi tuyến. Ngoài ra, kích thước mẫu tương đối nhỏ góp phần làm tăng độ nhạy của phép đo do chiều dài đường dẫn điện ngắn và sự phân bố sợi dẫn điện đồng đều hơn, dẫn đến sự thay đổi điện trở suất được ghi nhận rõ rệt dưới tác dụng của tải trọng nén. Xu hướng này được mô tả tại Hình 1.12.



(a) Hình dáng mẫu



(b) Ứng xử điện trở của mẫu chịu tải trọng nén

Hình 1.12. Ảnh hưởng mẫu hình trụ đến ứng xử điện trở [54]

Nghiên cứu của tác giả O. Galao và các cộng sự [52] sử dụng mẫu SSC có kích thước 4×4×16 cm, mẫu được chế tạo với hàm lượng sợi carbon khác nhau được thể hiện tại Hình 1.13. Nghiên cứu thí nghiệm về biến dạng, hư hỏng khi chịu ảnh hưởng

các yếu tố như hàm lượng chất độn, tuổi bảo dưỡng mẫu, cường độ dòng điện, tốc độ gia tải hoặc ứng suất tối đa được áp dụng.



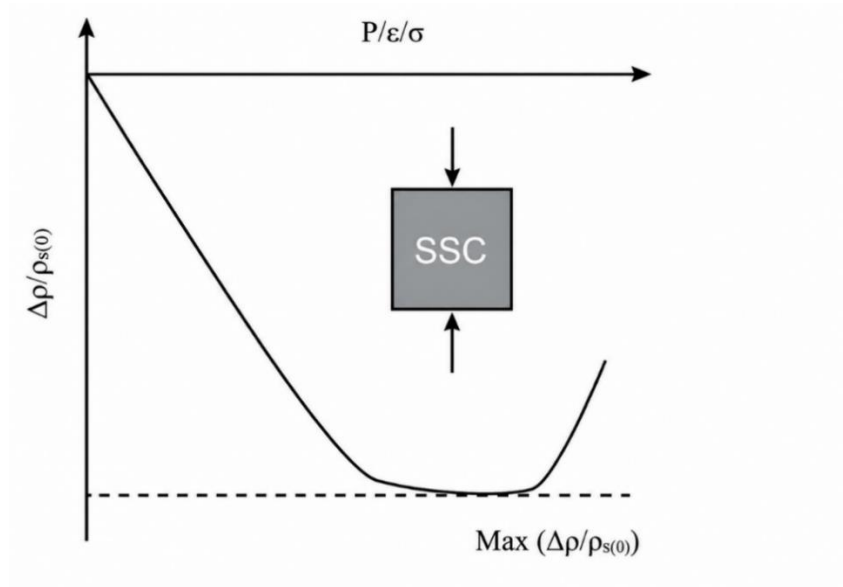
Hình 1.13. Mẫu có kích thước 4×4×16 cm [52]

Nghiên cứu của tác giả Hong-yan Chu và các cộng sự [55] chỉ sử dụng mẫu có kích thước 15×15×15 cm chứa hàm lượng sợi carbon lần lượt là 0,1%, 0,3%, ..., 1,5% thể tích. Nghiên cứu xác định mối tương quan giữa độ dẫn điện và sự phát triển hư hỏng trong bê tông dưới tác dụng tải trọng nén tĩnh dọc trục và tải chu kỳ bán tĩnh.

Như vậy, kích thước mẫu có ảnh hưởng đáng kể đến tính tự cảm biến của bê tông, do làm thay đổi chiều dài đường dẫn điện, sự phân bố mạng lưới chất độn dẫn điện và điện trở tổng thể của vật liệu, từ đó tác động đến độ nhạy và độ ổn định của tín hiệu điện trở khi chịu tải. Tuy nhiên, các nghiên cứu trước đây chủ yếu sử dụng các mẫu có kích thước và hình dạng cố định để đo điện trở suất và biến dạng, mà chưa làm rõ hoặc thiết lập được mối quan hệ định lượng giữa kích thước, hình dạng mẫu và khả năng tự cảm biến của vật liệu.

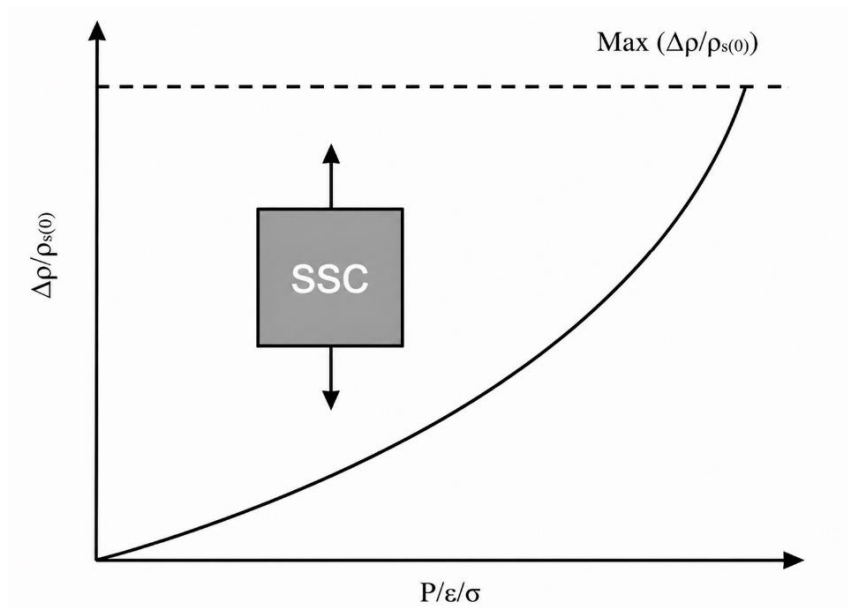
1.2.2.4. Ảnh hưởng của loại tải trọng

Tác giả Mishnaevsky và các cộng sự [56] đã nghiên cứu ứng xử của SSC dưới tác dụng của tải trọng nén tĩnh. Khi gia tăng tải, đầu tiên các giá trị tỷ lệ thay đổi điện trở suất $\Delta\rho/\rho_{s(0)}$ giảm, tiếp theo là trở nên cân bằng và sau đó đột ngột tăng lên, như thể hiện trong Hình 1.14. Tác giả S. Ding và các cộng sự [57] chỉ ra rằng: Đầu tiên, dưới tác dụng nén một trục, khoảng cách của các hạt dẫn điện gần hơn, do đó cải thiện mạng lưới dẫn điện bên trong bê tông, làm giảm điện trở suất của vật liệu. Sau đó, vết nứt bắt đầu phát triển do nén và đạt phá huỷ đã gây ứng xử phi tuyến của điện trở như Hình 1.14.



Hình 1.14. Ứng xử điện trở suất của mẫu SSC chịu tải trọng nén tĩnh [56]

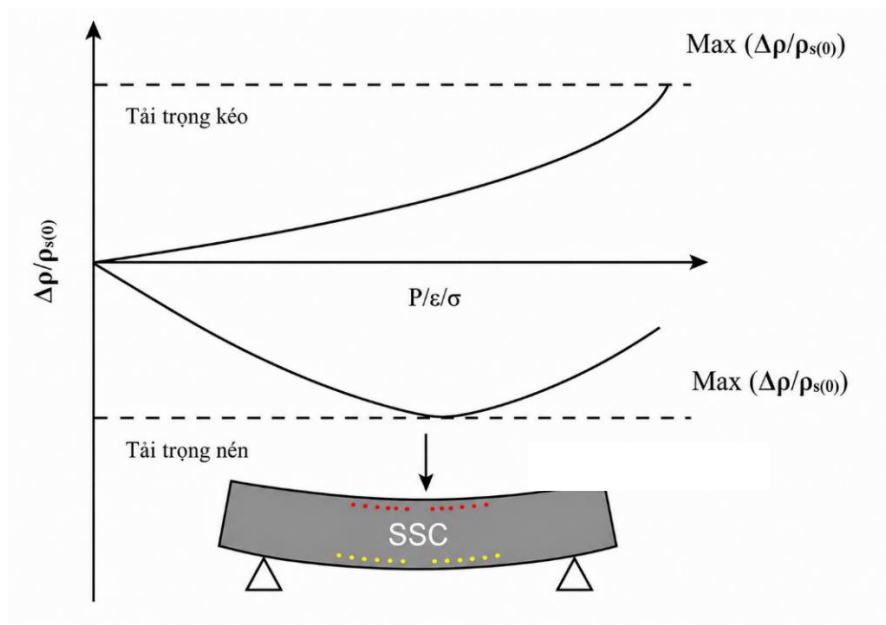
Đối với thí nghiệm kéo tĩnh, giá trị tỷ lệ thay đổi điện trở suất $\Delta\rho/\rho_{s(0)}$ tăng lên cùng với sự gia tăng ứng suất kéo khi các chất độn bên trong bê tông rời xa nhau, ứng xử biến thiên điện trở suất này được thể hiện tại Hình 1.15. Tuy nhiên, sự thay đổi của điện trở suất bắt đầu tăng mạnh khi biến dạng kéo tăng với sự hình thành các vết nứt bên trong bê tông, gây ra ứng xử phi tuyến như Hình 1.15.



Hình 1.15. Ứng xử điện trở suất của mẫu SSC chịu tải trọng kéo tĩnh [58]

Bên cạnh đó, nghiên cứu của tác giả S. Ding và các cộng sự [57] chỉ ra rằng tính cảm biến của bê tông không chỉ phụ thuộc vào sự thay đổi vị trí tương đối giữa các hạt dẫn điện, mà còn phụ thuộc vào quá trình hình thành các vết nứt bên trong mẫu. Tác giả Reza và các cộng sự [58] đã nghiên cứu ứng xử tự cảm biến của bê tông chứa sợi carbon dưới tác dụng của lực kéo. Theo đó, các nhà nghiên cứu cho rằng điện trở có thể được sử dụng để quan sát cơ chế của khu vực bị đứt gãy, giúp tính toán chiều dài vết nứt lan rộng. Do đó, tính cảm biến của bê tông không chỉ phụ thuộc vào sự thay đổi vị trí tương đối giữa các hạt dẫn điện, mà còn phụ thuộc vào quá trình hình thành các vết nứt bên trong mẫu khi chịu tác dụng của tải trọng.

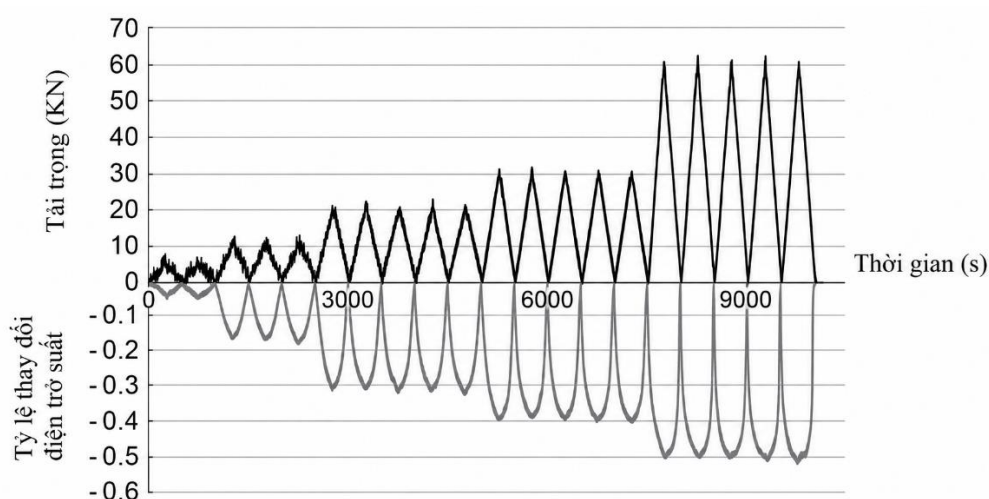
Tác giả B. Han và các cộng sự [10] thực hiện thí nghiệm uốn của dầm SSC chịu tác dụng tải trọng ở giữa như thể hiện tại Hình 1.16. Hình 1.16 chỉ ra rằng điện trở suất của dầm tăng phi tuyến ở vùng chịu kéo và điện trở suất giảm phi tuyến ở vùng chịu nén. Theo nghiên cứu của tác giả Wang và các cộng sự [59], sau khi dầm đạt trạng thái uốn lớn nhất, điện trở suất vùng nén có xu hướng tăng trở lại, trong khi ở vùng kéo, điện trở suất tiếp tục duy trì xu hướng tăng.



Hình 1.16. Ứng xử điện trở suất của mẫu SSC chịu uốn [10]

Đối với thí nghiệm nén lặp, trong mỗi chu kỳ nén lặp, giá trị tỷ lệ thay đổi điện trở suất $\Delta\rho/\rho_{s(0)}$ của SSC giảm khi có tải và tăng khi dỡ tải. Tuy nhiên, đối với các biên độ ứng suất nén khác nhau, sự biến đổi của điện trở suất cơ bản và sự thay đổi

của điện trở suất là khác nhau. Điện trở suất cơ bản đề cập đến điện trở suất khi ứng suất nén trở về 0 khi chịu tải theo chu kỳ. Nó khác với điện trở suất ban đầu của mẫu chưa chịu tác dụng của ngoại lực. Điều này là do một số khuyết tật bên trong (các vết nứt, lỗ hổng tự nhiên, v.v.) của SSC được giảm dần trong các chu kỳ chịu tải trọng nén. Kết quả là điện trở suất của SSC ở đầu mỗi chu kỳ không bằng điện trở suất ban đầu và nó được định nghĩa là điện trở suất cơ bản. Ứng xử của điện trở suất của SSC chứa các chất độn khác nhau khi chịu tải trọng nén lặp thể hiện từ rất nhiều thí nghiệm [26,45]. Các nghiên cứu chỉ ra rằng khi biên độ ứng suất nén dưới khoảng 30% cường độ giới hạn của mẫu, cả điện trở suất và tỷ lệ thay đổi điện trở suất đều có thể phục hồi, điều này do tính biến dạng đàn hồi của vật liệu được phục hồi về trạng thái ban đầu. Khi biên độ ứng suất nén nằm trong khoảng từ (30 – 75)% cường độ chịu nén của SSC, thì tỷ lệ thay đổi là có thể phục hồi, trong khi giá trị tuyệt đối của điện trở suất là không thể phục hồi. Điều này là do vết nứt vi mô trong bê tông xuất hiện và sau đó có thể tái thiết lại mạng dẫn điện bên trong SSC. Khi biên độ ứng suất nén cao hơn khoảng 75% cường độ nén của SSC, cả tỷ lệ thay đổi điện trở suất và điện trở suất đều không thể phục hồi. Điều này là do bê tông bị nứt trên diện rộng nên mạng dẫn điện bên trong SSC bị hỏng.

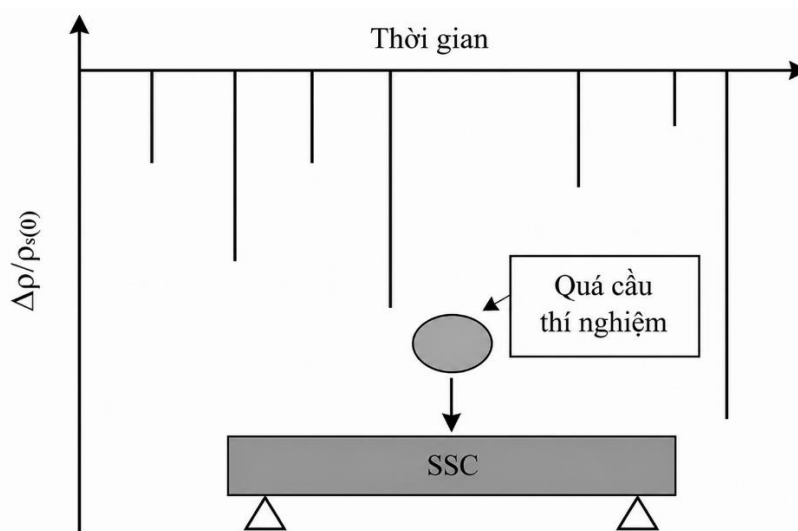


Hình 1.17. Ứng xử của SSC chứa sợi carbon khi chịu tải trọng nén lặp [54]

Hình 1.17 mô tả ứng xử của SSC chứa sợi carbon chịu tải trọng lặp theo chu kỳ với các biên độ khác nhau. Tốc độ tải được thiết lập sao cho mỗi chu kỳ kéo dài 500

giây, tốc độ gia tải là 0,01 KN/s, 0,02 KN/s, 0,04 KN/s, 0,06 KN/s và 0,12 KN/s tương ứng với biên độ gia tải lần lượt là 5 KN, 10 KN, 20 KN, 30 KN và 60 KN. Điện trở suất của các cảm biến thay đổi rõ rệt tùy theo tải tác dụng. Trong mỗi chu kỳ tải, giá trị điện trở suất giảm khi tải trọng nén tăng, dẫn đến giá trị tỷ lệ thay đổi điện trở suất $\Delta\rho/\rho_0$ âm, sau đó tăng lên giá trị ban đầu khi chu kỳ dỡ tải diễn ra.

Đối với thí nghiệm tải trọng va đập, khi mẫu SSC chịu tác dụng của tải trọng, giá trị tỷ lệ thay đổi điện trở suất $\Delta\rho/\rho_{s(0)}$ giảm đột ngột nhưng sau đó trở về 0 sau khi dỡ tải, như có thể quan sát được trong Hình 1.18 [60]. Nghiên cứu của tác giả Meehan và các cộng sự [61], tác giả Han và các cộng sự [62,63] đã khảo sát sự thay đổi điện trở của bê tông chứa xỉ thép, bê tông gia cường sợi carbon và bê tông chứa ống nano carbon dưới tác dụng của tải trọng va đập; qua đó cho thấy các vật liệu này có thể được sử dụng như cảm biến phát hiện hư hỏng.

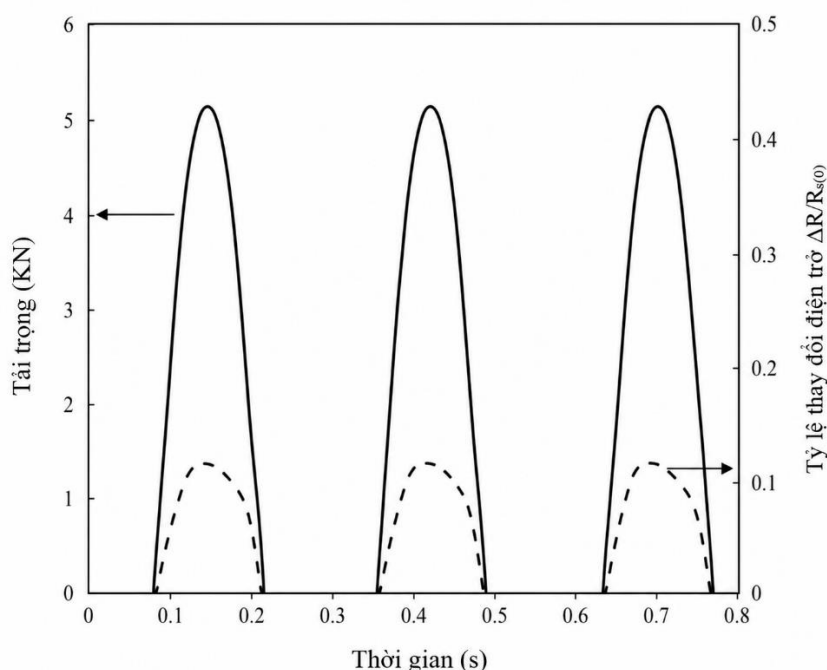


Hình 1.18. SSC dưới tác dụng tải trọng va đập [60]

Nghiên cứu của tác giả Phan Tấn Duy và các cộng sự [64] về SSC gia cường cốt sợi thép chịu 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 khi chịu 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.

Dưới tác dụng của tải trọng kéo lặp, giá trị tỷ lệ thay đổi điện trở suất $\Delta\rho/\rho_{s(0)}$

của SSC tăng khi gia tải và giảm khi dỡ tải trong mỗi chu kỳ. Giống như quá trình tải trọng nén lặp, sự biến đổi của điện trở suất và tỷ lệ thay đổi điện trở suất là khác nhau dưới các biên độ kéo khác nhau. Điện trở suất và tỷ lệ thay đổi điện trở suất có thể phục hồi trong vùng đàn hồi. Khi biên độ kéo cao, cả tỷ lệ thay đổi về điện trở suất và điện trở suất đều không thể phục hồi. Điều này đã được xác nhận bằng cách quan sát ứng xử cảm biến của SSC chứa sợi carbon, sợi thép và ống nano carbon [26,65]. Hình 1.19 minh họa ứng xử cảm biến của SSC chứa ống nano carbon trong ba chu kỳ tải đầu tiên. Kết quả cho thấy tỷ lệ thay đổi điện trở của SSC tăng theo sự gia tăng của tải trọng tác dụng và giảm tương ứng khi tải trọng được dỡ bỏ.



Hình 1.19. Ứng xử cảm biến của SSC chịu tải trọng kéo lặp [65]

1.2.3. Ảnh hưởng của các yếu tố môi trường

1.2.3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ

Tác giả Jinsheng Han và các cộng sự [13] cho rằng ảnh hưởng của nhiệt độ đến hiệu suất cảm biến của bê tông tự cảm biến (Self-Sensing Concrete – SSC) chủ yếu liên quan đến ba cơ chế: hiệu ứng nhiệt–điện trở, hiệu ứng gia nhiệt Joule và hiệu ứng Seebeck.

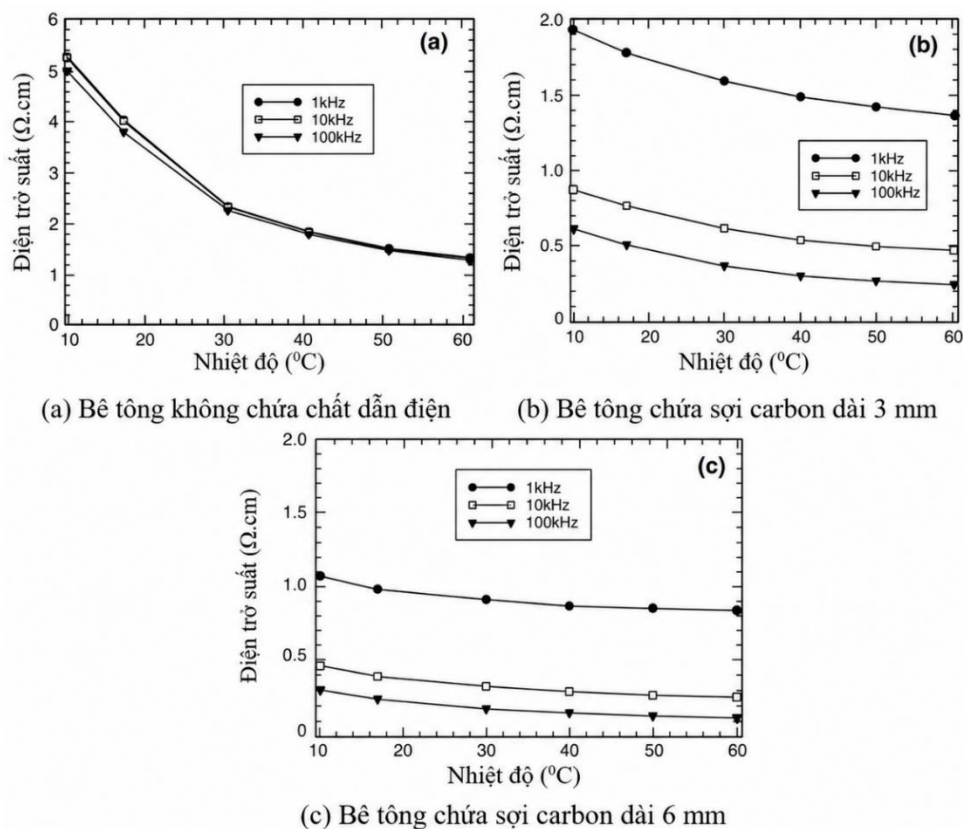
Đối với hiệu ứng nhiệt–điện trở, điện trở suất của SSC thay đổi theo nhiệt độ do sự biến đổi đồng thời của cấu trúc mạng dẫn điện và đặc tính vận chuyển điện tích trong vật liệu. Khi nhiệt độ thay đổi, sự giãn nở nhiệt hoặc co ngót của nền bê tông làm thay đổi khoảng cách giữa các pha dẫn điện, ảnh hưởng đến sự hình thành và tính liên tục của mạng dẫn điện. Đồng thời, nhiệt độ cũng tác động đến khả năng chuyển động của các hạt tải điện, làm thay đổi cơ chế dẫn điện và giá trị điện trở suất của SSC. Do đặc tính dẫn điện phụ thuộc mạnh vào loại vật liệu dẫn điện sử dụng (sợi carbon, bột carbon, graphene, CNT...) cũng như phạm vi nhiệt độ khảo sát, ứng xử điện trở–nhiệt độ của SSC cần được xác định thông qua thực nghiệm cụ thể đối với từng loại vật liệu [66].

Đối với hiệu ứng gia nhiệt Joule, khi dòng điện chạy qua SSC, một phần năng lượng điện được chuyển hóa thành nhiệt năng làm tăng nhiệt độ của mẫu theo cơ chế gia nhiệt điện trở. Hiện tượng này có thể làm thay đổi trạng thái nhiệt của vật liệu và ảnh hưởng đến kết quả đo điện trở suất. Đặc biệt đối với SSC sử dụng vật liệu dẫn điện gốc carbon, việc kiểm soát cường độ dòng điện đo, điện trở ban đầu của mẫu và lượng nhiệt sinh ra trong quá trình thí nghiệm là cần thiết nhằm hạn chế sai số do hiện tượng tự gia nhiệt gây ra [67].

Hiệu ứng Seebeck là hiện tượng xuất hiện suất điện động trong vật liệu khi tồn tại sự chênh lệch nhiệt độ, do sự khuếch tán của các hạt tải điện từ vùng có nhiệt độ cao sang vùng có nhiệt độ thấp. Nhờ đặc tính này, SSC có khả năng được sử dụng như một cảm biến nhiệt độ [68]. Tuy nhiên, suất điện động sinh ra bởi hiệu ứng Seebeck thường có giá trị nhỏ và ảnh hưởng không đáng kể đến phép đo điện trở suất trong điều kiện thí nghiệm thông thường. Vì vậy, trong các nghiên cứu đánh giá khả năng tự cảm biến của SSC dưới tác dụng của tải trọng cơ học, ảnh hưởng của nhiệt độ chủ yếu được xem xét thông qua hiệu ứng nhiệt–điện trở, trong khi hiệu ứng Joule và Seebeck cần được kiểm soát nhằm đảm bảo độ chính xác của phép đo.

Hình 1.20 chỉ ra rằng trong một phạm vi nhiệt độ nhất định, điện trở suất có xu hướng giảm nhẹ khi nhiệt độ tăng [69]. Tác giả Hong và các cộng sự [70] đã nghiên cứu hiệu suất cảm biến của SSC chứa sợi carbon ở nhiệt độ -40°C , -20°C , 0°C ,

20°C, 40°C, 60°C và 80°C. Nghiên cứu chỉ ra rằng hiệu suất cảm biến của SSC có độ ổn định và tính tái lập tốt nhất khi nhiệt độ từ 20°C đến 40°C và kém hơn một chút khi nhiệt độ là 60°C đến 80°C và kém nhất khi nhiệt độ âm dưới 0°C.



Hình 1.20. Nhiệt độ ảnh hưởng đến sự thay đổi điện trở suất của SSC [69]

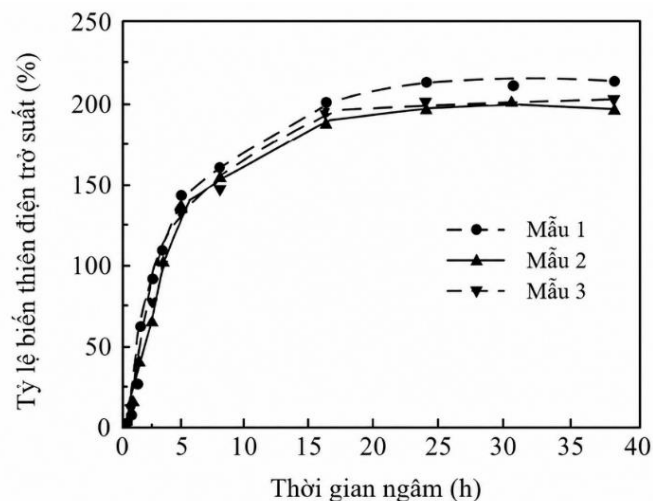
Nghiên cứu của tác giả Phan Tấn Duy và các cộng sự [71] chỉ ra rằng ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện trở suất của SSC thông qua phương pháp thử nghiệm. Theo đó, điện trở suất của SSC giảm rõ rệt khi nhiệt độ tăng từ 0°C lên 50°C.

Các nghiên cứu cho thấy nhiệt độ là một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến ứng xử điện trở suất của SSC; mức độ và chiều hướng ảnh hưởng có thể là tích cực hoặc tiêu cực tùy thuộc vào điều kiện môi trường. Tuy nhiên, các đặc tính về điện của SSC vẫn thể hiện tính tuyến tính và khả năng tái lập tốt, qua đó đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật trong các ứng dụng giám sát sức khỏe công trình [41,72,73]. Do đó, việc xác định ảnh hưởng của nhiệt độ đến ứng xử điện trở suất của SSC trong các điều kiện khác nhau như loại chất độn dẫn điện, phạm vi nhiệt độ là rất quan trọng.

1.2.3.2. Ảnh hưởng của độ ẩm

Theo tác giả Jinsheng Han và các cộng sự [13], độ ẩm có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất cảm biến của bê tông. Đường dẫn điện trong SSC chủ yếu bao gồm mạng lưới chất độn dẫn điện, hiệu ứng đường hầm và đường dẫn ion tự do, trong đó đường dẫn ion chịu ảnh hưởng mạnh nhất bởi độ ẩm. Khi độ ẩm môi trường thay đổi, độ ẩm bên trong bê tông cũng biến đổi, làm thay đổi các đường dẫn điện và do đó ảnh hưởng đến hiệu suất cảm biến của vật liệu [74].

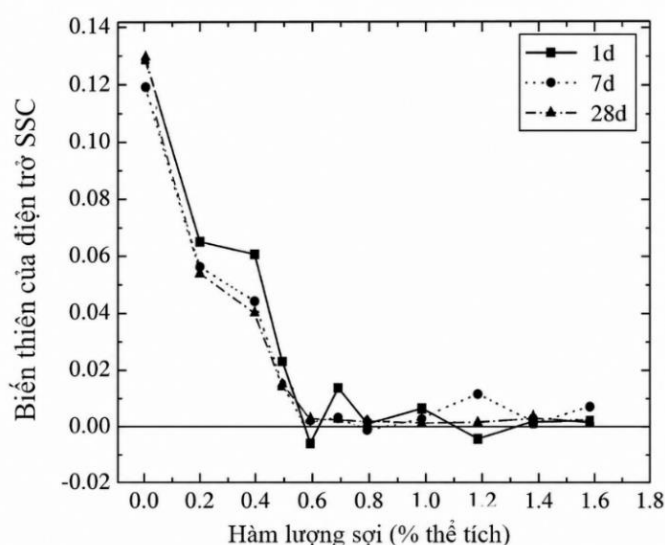
Ảnh hưởng của độ ẩm đến điện trở suất của bê tông tự cảm biến phụ thuộc vào loại và tổ hợp chất độn dẫn điện. Đối với bê tông sử dụng đồng thời muối than đen và sợi carbon (CB+CF), Hình 1.21 cho thấy điện trở suất tăng khi độ ẩm tăng [75]; xu hướng này được cho là liên quan đến sự hấp thụ nước của muối than đen, làm thay đổi trạng thái tiếp xúc và gia tăng điện trở tiếp xúc giữa các phân tử dẫn điện. Ngược lại, nghiên cứu [46] trên hệ bê tông sử dụng sợi carbon và ống nano carbon (CF+CNT) ghi nhận điện trở suất giảm khi độ ẩm tăng, chủ yếu do sự gia tăng khả năng dẫn ion của dung dịch lỗ rỗng. Sự khác biệt này cho thấy ảnh hưởng của độ ẩm đến đặc tính điện phụ thuộc đáng kể vào thành phần chất độn và cơ chế dẫn điện chi phối trong từng hệ vật liệu.



Hình 1.21. Độ ẩm ảnh hưởng đến thay đổi điện trở suất của SSC [75]

Ngoài ra, ảnh hưởng của độ ẩm đến tính cảm biến của SSC phụ thuộc vào hàm lượng chất độn dẫn điện. Theo tác giả H. Siad và các cộng sự [76], khi hàm lượng sợi carbon hoặc ống nano carbon chưa đạt ngưỡng thấm, độ ẩm làm tăng tính dẫn điện

nhưng có thể làm giảm độ nhạy cảm biến của vật liệu. Bên cạnh đó, nghiên cứu của tác giả B. Chen và các cộng sự [77] cho thấy ảnh hưởng của độ ẩm đến điện trở của SSC giảm đáng kể khi hàm lượng chất độn dẫn điện tăng. Ở hàm lượng chất độn thấp, điện trở của vật liệu thay đổi rõ rệt giữa trạng thái khô và trạng thái ẩm, cho thấy cơ chế dẫn điện còn phụ thuộc nhiều vào độ ẩm. Ngược lại, khi hàm lượng chất độn tăng và hình thành mạng lưới dẫn điện liên tục, ảnh hưởng của độ ẩm đến điện trở giảm đáng kể. Xu hướng này được minh họa tại Hình 1.22.



Hình 1.22. Độ ẩm ảnh hưởng đến hiệu suất cảm biến của SSC thông qua sự thay đổi hàm lượng sợi carbon trong mạng dẫn điện [77]

Như vậy, độ ẩm là một trong những yếu tố môi trường có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất cảm biến của SSC, thông qua sự thay đổi cơ chế dẫn điện của vật liệu. Mức độ ảnh hưởng này phụ thuộc vào loại và hàm lượng chất độn dẫn điện được sử dụng. Do đó, khi thiết kế và chế tạo SSC, cần xem xét điều kiện độ ẩm trong môi trường làm việc thực tế, đồng thời lựa chọn và tối ưu hóa thành phần chất độn dẫn điện nhằm giảm thiểu ảnh hưởng của độ ẩm, qua đó nâng cao độ ổn định và độ tin cậy của tín hiệu cảm biến.

1.3. Các nghiên cứu ứng dụng của SSC

Dựa trên nguyên lý và các yếu tố ảnh hưởng đến tính tự cảm biến đã phân tích, SSC được xem là vật liệu tiềm năng cho 02 lĩnh vực chính: quan trắc sức khỏe công

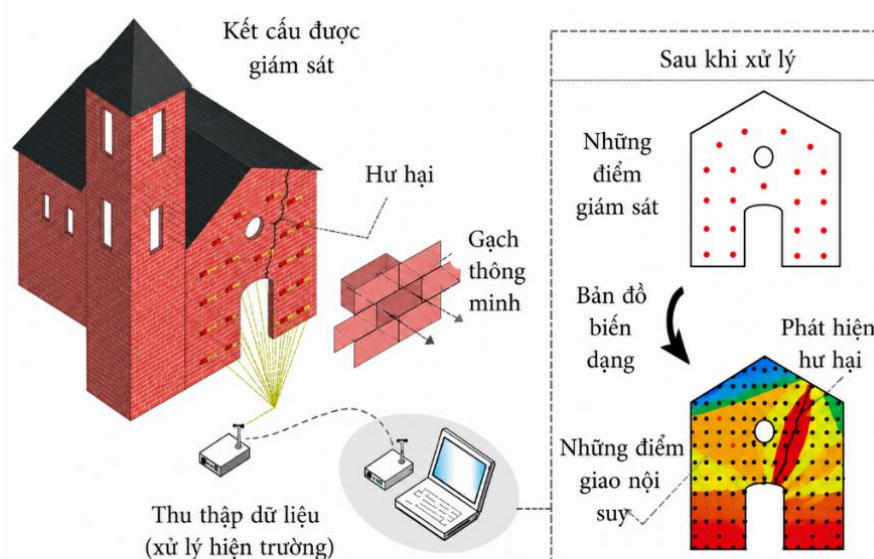
trình và quản lý hạ tầng, giao thông. Các ứng dụng và nghiên cứu liên quan được tổng hợp trong Bảng 1.1.

Bảng 1.1. Một số ứng dụng của SSC

Lĩnh vực	Khái quát	Tài liệu
Quan trắc sức khỏe công trình	Theo dõi biến dạng và phát hiện nứt kết cấu trụ khi thay đổi điện trở suất của SSC chứa sợi carbon	[78]
	Theo dõi biến dạng và phát hiện nứt cục bộ của kết cấu dầm bằng cách sử dụng SSC chứa sợi carbon nano và sợi carbon	[79]
	Đề xuất giải pháp sử dụng gạch SSC gắn vào kết cấu tòa nhà dân dụng, hạ tầng để quan trắc sức khỏe công trình, đặc biệt là phát hiện sự cố do thiên tai như động đất hoặc sạt lở đất.	[80]
	Giám sát biến dạng/ứng suất, phát hiện hư hỏng và giám sát tải trọng của các tòa nhà dân dụng sử dụng SSC với chất độn gốc carbon	[81]
Quản lý hạ tầng và giao thông	Sử dụng đặc tính điện của SSC chứa sợi carbon để làm tan băng/tuyết trên bề mặt mặt đường	[82]
	Sử dụng SSC chứa sợi carbon để giám sát giao thông và trạm cân động	[83]
	Sử dụng SSC 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	[62]
	Sử dụng SSC chứa ống nano carbon để thí nghiệm trong phòng và thực nghiệm hiện trường nhằm phát hiện lưu lượng, tốc độ phương tiện và mật độ giao thông	[84]
	Sử dụng SSC chứa bột niken phát hiện lưu lượng giao thông	[85]

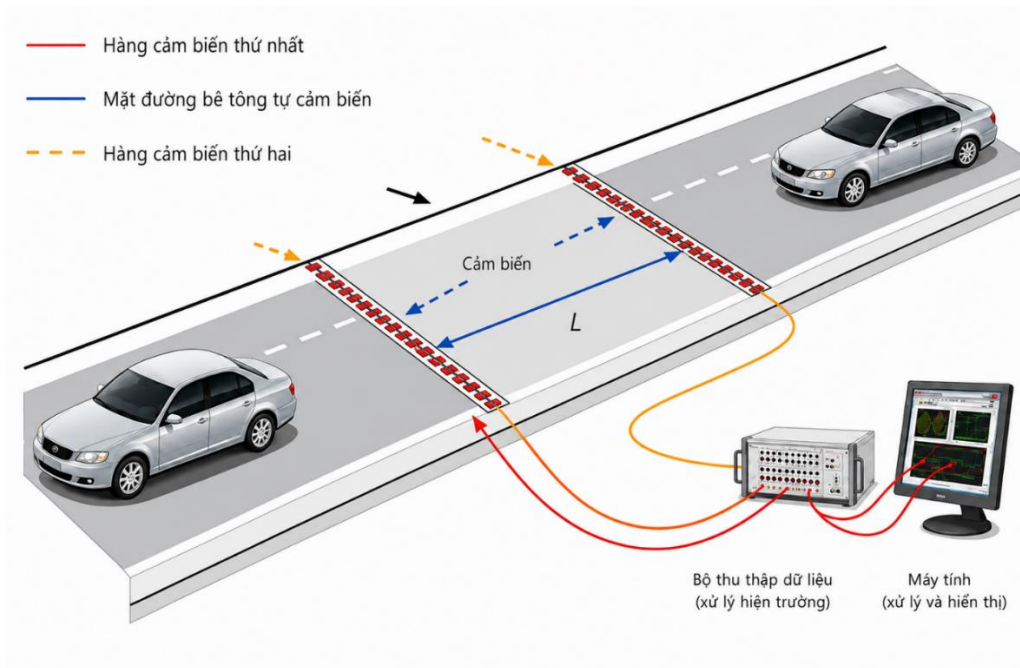
Đối với lĩnh vực quan trắc sức khỏe công trình, SSC chứa các loại chất độn dẫn điện được ứng dụng quan trắc ứng suất, biến dạng, vết nứt của kết cấu công trình dưới tác dụng của các loại tải trọng theo thời gian thực. Tác giả Rose Mary Chacko và các cộng sự [78] sử dụng SSC chứa sợi carbon chịu tải trọng nén dọc trục để theo dõi

biến dạng và tình trạng xuất hiện vết nứt của kết cấu trụ. Theo kết quả nghiên cứu, khi chịu tải trọng nén, điện trở suất của SSC giảm liên tục trong phạm vi đàn hồi và tiếp tục cho đến khi hình thành vết nứt nhìn thấy được đầu tiên, khi đó điện trở suất SSC tăng đột ngột. Dựa vào kết quả này, tác giả đề xuất việc sử dụng SSC để theo dõi liên tục độ biến dạng của kết cấu trụ và có giải pháp xử lý khi phát hiện bất thường trong ứng xử điện của bê tông. Nghiên cứu của tác giả Francisco Javier Baeza và các cộng sự [79] sử dụng SSC chứa sợi carbon hoặc sợi carbon nano khi chịu uốn nhằm theo dõi ứng xử biến dạng của dầm. Kết quả nghiên cứu đã chứng minh khả năng ứng dụng của SSC để phát hiện các vết nứt cục bộ gây ra hư hại dầm dưới tác dụng của tải trọng nén hoặc phát hiện vết nứt gây ra trên kết cấu dầm khi chịu uốn. Nghiên cứu của tác giả García-Macías và các cộng sự [80] hay tác giả Alessandro và các cộng sự [81] đã đề xuất giải pháp sử dụng bê tông như một loại cảm biến thông minh được gắn vào các cấu kiện của các tòa nhà dân dụng, hạ tầng để quan trắc liên tục sức khỏe công trình, đặc biệt là phát hiện sự cố do thiên tai như động đất hoặc sạt lở đất. Giải pháp này được xem là một phương án tiềm năng và đơn giản để áp dụng trong các công trình dân dụng trong tương lai gần. Hình 1.23 mô tả ứng dụng gạch SSC theo dõi sức khỏe kết cấu công trình.



Hình 1.23. Ứng dụng gạch SSC theo dõi sức khỏe kết cấu công trình [80]

Đối với lĩnh vực quản lý hạ tầng và giám sát giao thông, một số ứng dụng tiềm năng của SSC hướng đến xây dựng thành phố thông minh [2]. Tác giả Sassani và các cộng sự [82] đã nghiên cứu SSC chứa sợi carbon làm sưởi ấm mặt đường, tan băng, tuyết thay thế cho những phương pháp truyền thống. Tác giả Shi và cộng sự [83] đã thực hiện nghiên cứu trong phòng thí nghiệm về giám sát giao thông và trạm cân động sử dụng SSC chứa sợi carbon ngắn. Tác giả Han và các cộng sự [62] thực hiện thí nghiệm SSC chứa ống nano carbon đa vách để phát hiện luồng giao thông trên mặt đường. Kết quả nghiên cứu cho thấy SSC có tiềm năng ứng dụng trong việc nhận dạng tải trọng, xác định tốc độ và lưu lượng phương tiện đang lưu thông, như minh họa tại Hình 1.24.



Hình 1.24. Ứng dụng SSC để đo tải trọng, lưu lượng và tốc độ của xe [62]

Bên cạnh đó còn có một số nghiên cứu ứng dụng SSC được thực hiện ngoài hiện trường, tác giả Han và các cộng sự [84] đã sử dụng SSC chứa ống nano carbon được đúc sẵn và đổ tại chỗ để phát hiện phương tiện giao thông đi qua theo thời gian thực như tốc độ, lưu lượng, mật độ phương tiện giao thông. Tác giả Han và các cộng sự [85] đã triển khai các cảm biến làm từ các hạt niken để phát hiện chuyển động của các phương tiện giao thông.

Mặc dù SSC chưa được sử dụng rộng rãi trong các dự án thực tế và ứng dụng thương mại, nhưng những kết quả đạt được ban đầu trong các lĩnh vực như quan trắc sức khỏe công trình xây dựng, quản lý giao thông, v.v. cho thấy tiềm năng rất lớn của loại bê tông này.

1.4. Phân tích khoảng trống nghiên cứu

Dựa trên các phân tích toàn diện đối với các nghiên cứu có liên quan ở các mục 1.1, 1.2, 1.3, một số khoảng trống nghiên cứu có thể được đưa ra như sau:

- **Vấn đề 1: Làm rõ cơ chế ứng xử điện trở suất của SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi.** Phần lớn các nghiên cứu trước đây tập trung ứng dụng SSC để phát hiện hư hại của kết cấu, tức là trong các trường hợp xuất hiện biến dạng lớn hoặc hình thành vết nứt bên trong vật liệu. Trong điều kiện chịu tải trọng động hoặc tải trọng lặp, các vết nứt này có xu hướng phát triển theo thời gian, từ đó làm thay đổi cấu trúc dẫn điện bên trong vật liệu và ảnh hưởng đến độ ổn định cũng như độ chính xác của tín hiệu đo. Vì vậy, khi SSC được sử dụng như một thiết bị đo đặc phục vụ quan trắc dài hạn, cần thiết kế cấu kiện sao cho tải trọng tác dụng chỉ nằm trong một phạm vi ứng suất nhỏ, không gây phá hủy và hạn chế tối đa sự hình thành các vi nứt bên trong vật liệu. Cách tiếp cận này giúp duy trì tính ổn định của đặc tính điện và góp phần nâng cao độ chính xác của phép đo cũng như kéo dài tuổi thọ làm việc của thiết bị. Tuy nhiên, các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung đánh giá khả năng cảm biến của SSC dưới tác dụng của tải trọng, trong khi việc phân tích định lượng mối quan hệ giữa sự biến đổi điện trở suất và ứng suất trong phạm vi nén đàn hồi nhỏ, cũng như xây dựng các mô hình mô tả quy luật ứng xử này, vẫn cần được nghiên cứu sâu hơn nhằm phục vụ các ứng dụng cảm biến tải trọng ổn định và lâu dài.
- **Vấn đề 2: Làm rõ các yếu tố ảnh hưởng đến điện trở suất ban đầu của SSC trong điều kiện không tải.** Hầu hết các đề tài nghiên cứu hiện nay tập trung làm rõ mối quan hệ giữa sự thay đổi điện trở suất của SSC dưới tác dụng tải trọng hay

ứng suất và các yếu tố ảnh hưởng đến ứng xử này. Mặc dù các nghiên cứu trước đây đã khảo sát ảnh hưởng của nhiều yếu tố như nhiệt độ, độ ẩm, đặc điểm điện cực, điều kiện đo và kích thước mẫu đến điện trở suất ban đầu của SSC, nhưng phần lớn các nghiên cứu chủ yếu xem xét ảnh hưởng của từng yếu tố riêng lẻ trong các điều kiện thí nghiệm cụ thể. Do đó, việc phân tích đồng thời ảnh hưởng của thành phần vật liệu và các yếu tố môi trường đến điện trở suất ban đầu của SSC, đồng thời xây dựng mô hình dự đoán có xét đến sự tương tác giữa các yếu tố này, vẫn cần được nghiên cứu nhằm nâng cao độ chính xác trong hiệu chuẩn và ứng dụng SSC như một vật liệu cảm biến. Do đó, trước khi ứng dụng khả năng cảm biến của bê tông trong việc dự đoán ứng suất và độ biến dạng dưới tác dụng của các dạng tải trọng khác nhau, việc xác định chính xác giá trị điện trở suất ban đầu trong điều kiện không tải là hết sức cần thiết. Điều này tạo cơ sở cho việc xây dựng các công thức hiệu chỉnh giá trị ban đầu phù hợp với điều kiện sử dụng thực tế tại thời điểm bắt đầu đo đặc đối với các thiết bị cảm biến sử dụng vật liệu SSC. Vì vậy, việc nghiên cứu đo đặc điện trở suất ban đầu của các mẫu vật liệu SSC trong điều kiện không tải và các điều kiện nhiệt độ, độ ẩm, dòng điện kích thích và thành phần vật liệu khác nhau là hướng nghiên cứu hết sức cần thiết trước khi khảo sát tính tự cảm biến của vật liệu.

- **Vấn đề 3: Làm rõ và xây dựng mô hình dự đoán ứng xử điện trở của mẫu SSC có xét đến ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố môi trường và điều kiện đo đặc.** Các nghiên cứu hiện nay tập trung làm rõ mối quan hệ giữa sự thay đổi điện trở suất của SSC dưới tác dụng tải trọng và xem xét ảnh hưởng độc lập cho từng điều kiện về nhiệt độ, độ ẩm, thành phần vật liệu và điều kiện dòng điện kích thích. Tuy nhiên, khi áp dụng SSC trong dự đoán ứng suất và biến dạng trong thực tế, thì các yếu tố về nhiệt độ, độ ẩm, thành phần vật liệu và điều kiện dòng điện kích thích thường thay đổi một cách đồng thời. Do đó, mô hình hóa ứng xử điện trở của SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi có xét

đến ảnh hưởng tổng hợp nhiều yếu tố trên là khoảng trống cần nghiên cứu, nhằm đưa SSC tiến gần hơn đến việc ứng dụng trong thực tế.

- **Vấn đề 4: Làm rõ ứng xử cảm biến của hệ gồm nhiều mẫu bê tông dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi.** Các nghiên cứu hiện nay đều thí nghiệm ứng xử cảm biến của một mẫu bê tông riêng lẻ dưới tác dụng của các loại tải trọng nén, kéo hoặc uốn. Tuy nhiên, khi áp dụng loại vật liệu này vào các hệ thống phức tạp, ví dụ như các trạm cân tải trọng giao thông cỡ lớn, SSC hoạt động trên một hệ nhiều mẫu làm việc đồng thời. Do đó, vẫn cần các nghiên cứu khảo sát ứng xử cảm biến của một hệ gồm nhiều mẫu bê tông dưới tác dụng của tải trọng và đưa ra các giải pháp tính toán hợp lý để dự đoán tải trọng tác dụng lên cả hệ mẫu. Đây là một khoảng trống lớn cần được nghiên cứu.

CHƯƠNG 2. CHƯƠNG TRÌNH THỰC NGHIỆM

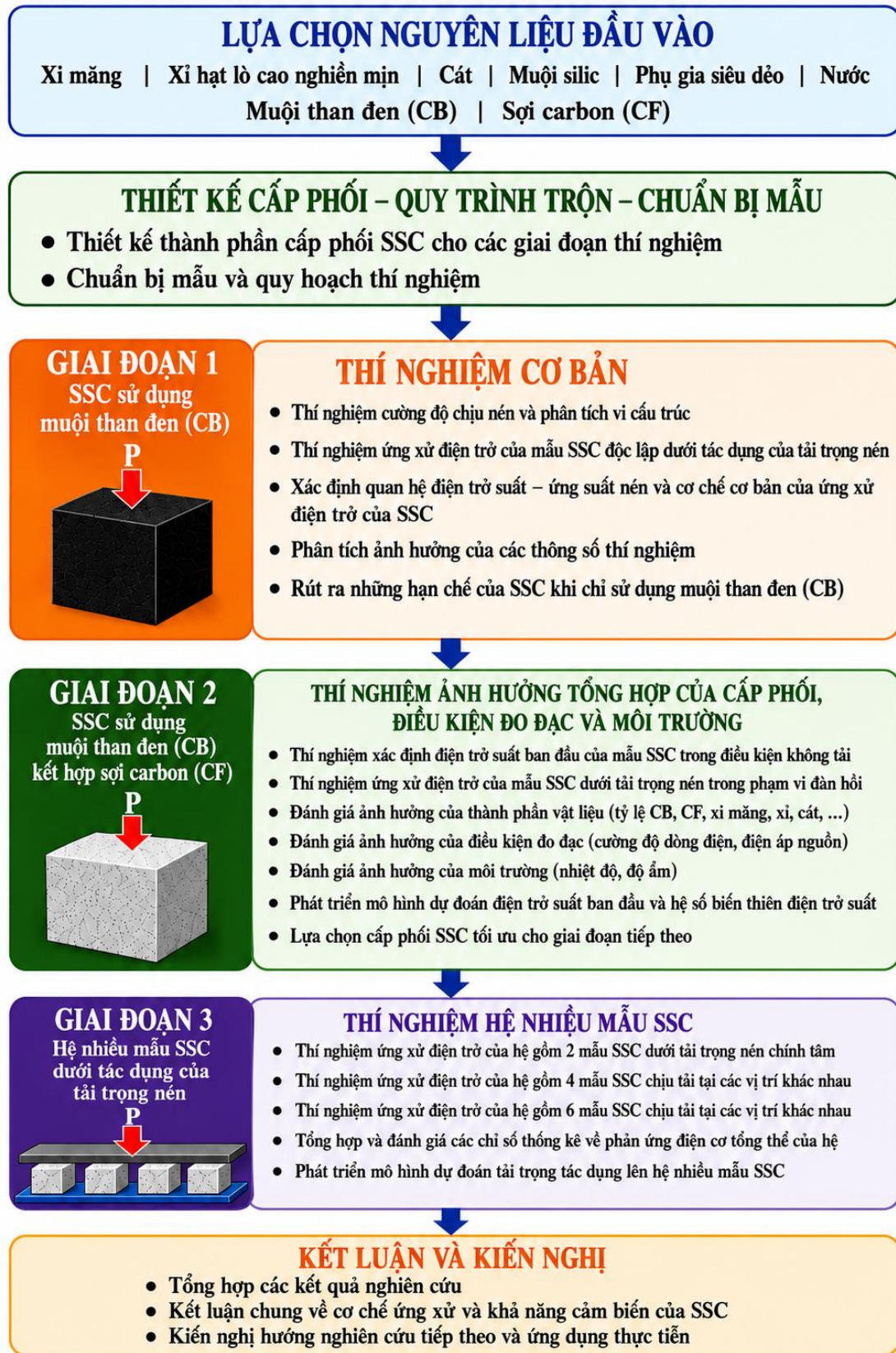
2.1. Khái quát

Chương trình thực nghiệm của luận án được xây dựng theo hướng tiếp cận từ nghiên cứu cơ bản đến nghiên cứu ứng dụng, bắt đầu từ khảo sát đặc tính của SSC ở cấp độ mẫu đơn và tiến tới đánh giá khả năng nhận dạng tải trọng của hệ nhiều mẫu. Các nội dung nghiên cứu được tổ chức thành ba giai đoạn liên hoàn nhằm làm rõ cơ chế tự cảm biến, các yếu tố ảnh hưởng và khả năng ứng dụng của vật liệu. Sơ đồ chương trình thực nghiệm được trình bày tại Hình 2.1.

Nguyên vật liệu sử dụng trong nghiên cứu gồm xi măng, xi hạt lò cao nghiền mịn, cát, muối silic, phụ gia siêu dẻo, nước, muối than đen (CB) và sợi carbon (CF). Từ đó, các cấp phối SSC được xây dựng phù hợp với mục tiêu nghiên cứu của từng giai đoạn.

- Giai đoạn 1: Nghiên cứu SSC sử dụng CB làm chất độn dẫn điện nhằm đánh giá cường độ chịu nén, phân tích vi cấu trúc, khảo sát ứng xử điện trở dưới tải trọng nén và xác định quan hệ giữa điện trở suất với ứng suất nén. Kết quả giúp làm rõ cơ chế tự cảm biến cơ bản và những hạn chế của vật liệu khi chỉ sử dụng CB.
- Giai đoạn 2: Nghiên cứu SSC sử dụng kết hợp CB và CF nhằm đánh giá ảnh hưởng của cấp phối, điều kiện đo và môi trường đến tính cảm biến của vật liệu. Các kết quả thu được được sử dụng để xây dựng mô hình dự đoán điện trở suất ban đầu và lựa chọn cấp phối SSC phù hợp cho giai đoạn tiếp theo.
- Giai đoạn 3: Đánh giá khả năng ứng dụng của SSC trong nhận dạng tải trọng thông qua hệ gồm 2, 4 và 6 mẫu chịu tải tại các vị trí khác nhau. Trên cơ sở kết quả thí nghiệm, luận án xây dựng mô hình dự báo tải trọng và đánh giá tiềm năng ứng dụng của SSC trong các hệ cảm biến diện rộng.

Cuối cùng, toàn bộ kết quả nghiên cứu được tổng hợp để đưa ra các kết luận về cơ chế tự cảm biến, các yếu tố ảnh hưởng đến đặc tính điện và khả năng ứng dụng của SSC trong nhận dạng tải trọng, đồng thời đề xuất các hướng nghiên cứu và ứng dụng tiếp theo.



Hình 2.1. Sơ đồ chương trình thực nghiệm

2.2. Lựa chọn nguyên vật liệu đầu vào

2.2.1. Định hướng chung lựa chọn nguyên vật liệu đầu vào

Việc lựa chọn nguyên liệu đầu vào để chế tạo SSC được định hướng dựa trên các tiêu chí đảm bảo tính ổn định cơ học, khả năng tạo mạng lưới dẫn điện và tính công tác thích hợp để đảm bảo sự phân tán đồng đều của các chất độn dẫn điện bên trong nền bê tông. Có ba định hướng cốt lõi trong việc lựa chọn nguyên liệu đầu vào cũng như thiết kế cấp phối như sau:

Thứ nhất, không sử dụng cốt liệu lớn trong thành phần hỗn hợp của bê tông. Việc phân bố không đồng đều của cốt liệu lớn có thể gây sai số đáng kể đến tính tự cảm biến do các hạt này có thể đóng vai trò như các vật cản đối với việc hình thành mạng lưới dẫn điện liên tục bên trong nền bê tông. Ngoài ra, việc loại bỏ cốt liệu lớn cũng phù hợp với mục tiêu chế tạo các phần tử cảm biến bê tông có kích thước nhỏ phục vụ nhiều ứng dụng đa dạng của SSC.

Thứ hai, cường độ thiết kế của SSC cần tương đương hoặc lớn hơn so với bê tông thông thường (lớn hơn 30 MPa), nhằm đảm bảo phạm vi ứng suất làm việc của các mẫu hoặc khối SSC không vượt quá giới hạn phá hủy khi chịu tải trọng giao thông thực tế. Điều này giúp vật liệu vừa có khả năng cảm biến, vừa đảm bảo độ bền cơ học và độ ổn định lâu dài trong các ứng dụng thực tế.

Thứ ba, chủng loại và hàm lượng của các chất độn dẫn điện được lựa chọn dựa trên cơ sở tổng hợp các kết quả nghiên cứu trước đây, kết hợp với tiêu chí giá thành hợp lý, dễ phân tán và không yêu cầu các quy trình xử lý vật liệu phức tạp trong điều kiện chế tạo và sản xuất tại Việt Nam.

Dựa vào các định hướng nêu trên, các nguyên liệu được lựa chọn trong nghiên cứu này bao gồm xi măng Poóc-lăng PC50 làm chất kết dính chính; xỉ hạt lò cao nghiền mịn (S95) và muội silic (SF) làm phụ gia khoáng hoạt tính nhằm cải thiện độ đặc chắc và giảm lượng xi măng sử dụng; cát mịn tự nhiên có hàm lượng SiO_2 cao làm cốt liệu nhỏ để đảm bảo cường độ của bê tông cũng như đảm bảo sự đồng nhất của nền bê tông khi hướng tới các cảm biến bê tông có kích thước nhỏ; phụ gia siêu dẻo nhằm tăng độ chảy của hỗn hợp bê tông đồng thời hỗ trợ phân tán chất độn dẫn

điện bên trong nền bê tông; muội than đen và sợi carbon làm vật liệu dẫn điện chính do có tính ổn định trong môi trường cũng như giá thành hợp lý, dễ xử lý; nước sạch. Đặc tính của các vật liệu thành phần được mô tả chi tiết trong các mục từ 2.2.2 đến 2.2.9 dưới đây.

2.2.2. Xi măng

Xi măng PC50 của Công ty Xi măng Nghi Sơn được sử dụng để chế tạo SSC, tính chất hóa - lý của xi măng thí nghiệm phù hợp với Tiêu chuẩn Việt Nam về Xi măng poóc lăng – Yêu cầu kỹ thuật TCVN 2682:2020. Thành phần hóa học, thành phần khoáng và tính chất vật lý của xi măng thể hiện ở Bảng 2.1.

Bảng 2.1. Tính chất cơ bản của xi măng PC50

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu	Phương pháp thử
SiO ₂	%	20,1	-	-
Al ₂ O ₃	%	4,37	-	-
Fe ₂ O ₃	%	3,19	-	-
CaO	%	63,3	-	-
MgO	%	1,02	≤5	TCVN 141:2008
SO ₃	%	2,15	≤3,5	TCVN 141:2008
LOI	%	1,29	≤3	TCVN 141:2008
Na ₂ O	%	0,2	-	-
K ₂ O	%	0,56	-	-
Cl ⁻	%	0,01	-	-
C ₃ S	%	60,3	-	-
C ₂ S	%	16,1	-	-
C ₃ A	%	5,1	-	-
C ₃ AF	%	9,88	-	-
Độ mịn Blaine	cm ² /g	3.900	Theo công bố nhà sản xuất	TCVN 4030:2003
Khối lượng riêng	g/cm ³	3,14	-	-

2.2.3. Phụ gia siêu dẻo

Bảng 2.2. Các thông số của phụ gia siêu dẻo loại Lotus-301M

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu	Phương pháp thử
Dạng tồn tại/màu sắc	-	Chất lỏng, vàng nhạt	-	Nhà sản xuất
Gốc phụ gia	-	Polycarboxylate base	-	Nhà sản xuất
Hàm lượng vật liệu thô	%	25,1	-	Nhà sản xuất
Khối lượng riêng	g/cm ³	1,06	-	Nhà sản xuất
Hàm lượng ion Cl ⁻	%	0,02	≤0,1	Nhà sản xuất

Phụ gia hoá học được lựa chọn dùng cho nghiên cứu là phụ gia siêu dẻo (giảm nước cao cấp) loại Lotus-301M do Công ty Cổ phần Hóa chất Hoa Sen sản xuất. Các thông số của Lotus-301M do nhà sản xuất cung cấp và kết quả thử nghiệm của Trung tâm chứng nhận phù hợp (Quacert) cung cấp được thể hiện như ở Bảng 2.2. Phụ gia Lotus-301M được lựa chọn nhằm cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông, đồng thời góp phần giảm lượng nước trộn mà vẫn đảm bảo khả năng duy trì độ linh động cần thiết của hỗn hợp. Việc sử dụng loại phụ gia này phù hợp với mục tiêu nghiên cứu nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng vật liệu, cải thiện một số tính chất cơ lý của bê tông trong quá trình thực nghiệm. Các chỉ tiêu kỹ thuật của phụ gia được kiểm tra và đối chiếu với yêu cầu của nhà sản xuất trước khi đưa vào sử dụng trong nghiên cứu.

2.2.4. Xi hạt lò cao nghiền mịn

Xi hạt lò cao nghiền mịn loại S95 do nhà máy Thép Hòa Phát Dung Quất – Quảng Ngãi cung cấp. Thành phần hóa học và tính chất vật lý của S95 được trình bày trong Bảng 2.3.

Bảng 2.3. Tính chất cơ bản của xỉ hạt lò cao nghiên mìn loại S95

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu TCVN 11586:2016	Phương pháp thử
Khối lượng riêng	g/cm ³	2,89	≥2,8	TCVN 13605:2023
Chỉ số hoạt tính cường độ 7 ngày	%	82,5	≥75	TCVN 6882:2016
Chỉ số hoạt tính cường độ 28 ngày	%	96	≥95	TCVN 6882:2016
Độ mịn Blaine	cm ² /g	5.332	≥5000	TCVN 13605:2023
MgO	%	7,74	≤10	TCVN 8265:2009
SO ₃	%	0,18	≤4	TCVN 8265:2009
LOI	%	0,11	≤3	TCVN 8265:2009
SiO ₂	%	35,77		
Al ₂ O ₃	%	13,02		
CaO	%	40,24		

2.2.5. Muội silic**Bảng 2.4. Thành phần muội silic loại Lotus-SP2**

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu	Phương pháp thử
SiO ₂	%	93	Theo nhà SX	-
SO ₃	%	0,42	Theo nhà SX	-
CaO	%	0,62	Theo nhà SX	-
LOI	%	2,5	Theo nhà SX	-
Khối lượng riêng	g/cm ³	2,89	Theo COA Lotus-SP2	-
Độ mịn	cm ² /g	2.580	Theo COA Lotus-SP2	-

Muội silic (SF) loại Lotus-SP2, là một sản phẩm của Công ty Cổ phần Hóa chất Hoa Sen, thành phần của Lotus-SP2 do nhà sản xuất cung cấp và kết quả thử nghiệm của Trung tâm chứng nhận phù hợp được thể hiện tại Bảng 2.4. Muội silic được lựa chọn sử dụng trong nghiên cứu do có hàm lượng silic dioxit (SiO₂) cao, khả năng tham gia phản ứng pozzolan với các sản phẩm thủy hóa của xi măng, góp phần cải

thiện cấu trúc vi mô của bê tông. Việc bổ sung Lotus-SP2 nhằm đánh giá ảnh hưởng của vật liệu khoáng hoạt tính đến một số tính chất của bê tông, đặc biệt là khả năng nâng cao độ đặc chắc và các đặc tính cơ học của vật liệu. Các chỉ tiêu kỹ thuật của muối silic được kiểm tra, đối chiếu với thông số công bố của nhà sản xuất trước khi sử dụng trong quá trình chế tạo mẫu nghiên cứu.

2.2.6. Cát

Bảng 2.5. Tính chất vật lý của cát

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu	Phương pháp thử
1	Thành phần hạt			Theo TCVN 10796:2015	TCVN 7572-2:2006
1.1	Lượng sót trên sàng 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm	%	0		
1.4	Lượng sót trên sàng 0,60 mm	%	2,15		
1.5	Lượng sót trên sàng 0,30 mm	%	59,54		
1.6	Lượng sót trên sàng 0,15 mm	%	33,02		
1.7	Lượng lọt qua sàng 0,15 mm	%	5,29		
2	Mô đun độ lớn	-	1,58	Theo TCVN 10796:2015	TCVN 7572-2:2006
3	Đường kính hạt lớn nhất	mm	0,6	≤ 2,0 (cát mịn)	TCVN 10796:2015
4	Khối lượng thể tích xốp	g/cm ³	1,43	-	TCVN 7572-6:2006
5	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,43	-	TCVN 7572-4:2006

Cát tự nhiên có nguồn gốc từ mỏ cát ở khu vực Phong Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế, Việt Nam và bao gồm chủ yếu là thạch anh (trên 98%). Phạm vi kích thước hạt chiếm ưu thế (0,15–0,6 mm) chiếm hơn 90%, với các hạt lớn hơn 0,6 mm và nhỏ hơn

0,15 mm chiếm tỷ lệ nhỏ. Thí nghiệm cát thực hiện theo TCVN 10796:2015 – Cát mịn cho bê tông và vữa. Tính chất vật lý của cát được trình bày trong Bảng 2.5. Cát được lựa chọn làm cốt liệu mịn trong nghiên cứu do có thành phần khoáng ổn định, hàm lượng thạch anh cao và sự phân bố kích thước hạt tương đối đồng đều. Đặc điểm cấp phối hạt của cát có ảnh hưởng trực tiếp đến độ đặc chắc, khả năng bao phủ cốt liệu và tính công tác của hỗn hợp bê tông. Các chỉ tiêu kỹ thuật của cát được xác định nhằm đánh giá sự phù hợp của vật liệu với yêu cầu chế tạo mẫu và đảm bảo tính đồng nhất trong quá trình thực nghiệm.

2.2.7. Nước

Nước được sử dụng để trộn bê tông là sạch có chất lượng thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật theo Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 4506:2012 về nước cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật.

2.2.8. Muội than đen

Muội than đen do OCI Hàn Quốc sản xuất, với các đặc tính được trình bày trong Bảng 2.6. Muội than đen đóng vai trò là chất độn dẫn điện trong bê tông. Việc bổ sung muội than đen nhằm cải thiện khả năng dẫn điện của vật liệu, đồng thời góp phần hình thành mạng lưới dẫn điện trong cấu trúc bê tông. Hàm lượng muội than đen được lựa chọn phù hợp nhằm đảm bảo sự cân bằng giữa tính năng dẫn điện và các yêu cầu về tính công tác, cường độ của bê tông trong nghiên cứu.

Bảng 2.6. Đặc tính kỹ thuật chính của muội than đen N330

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu	Phương pháp thử
Màu sắc	-	Đen	-	Nhà sản xuất
Khối lượng riêng	g/cm ³	1,63	-	Nhà sản xuất
Diện tích bề mặt	×10 ⁴ cm ² /g	77–88	-	Nhà sản xuất
Hàm lượng tro	%	<0,5	-	Nhà sản xuất
Tạp chất	%	<0,1	-	Nhà sản xuất

2.2.9. Sợi carbon

Sợi carbon do Công ty TNHH Vật liệu composite Haining Anjie sản xuất, với các đặc tính được trình bày trong Bảng 2.7. Sợi carbon đóng vai trò là chất độn dẫn

điện trong bê tông.

Bảng 2.7. Đặc tính kỹ thuật chính của sợi carbon

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu	Phương pháp thử
Chiều dài sợi	mm	3	Theo nhà SX	-
Đường kính sợi	μm	7–10	Theo nhà SX	-
Cường độ chịu kéo	GPa	3,6–3,8	Theo nhà SX	-
Mô đun đàn hồi kéo	GPa	220–240	Theo nhà SX	-
Hàm lượng carbon	%	>95	Theo nhà SX	-
Độ giãn dài	%	1,5	Theo nhà SX	-
Khối lượng riêng	g/cm ³	1,76	Theo nhà SX	-

2.3. Thiết kế thành phần cấp phối

2.3.1. Định hướng chung thiết kế thành phần cấp phối

Chương trình nghiên cứu trong luận án được triển khai theo ba giai đoạn thực nghiệm, được thiết kế nhằm từng bước làm rõ cơ chế ứng xử điện trở của SSC để đạt được cả tính năng cảm biến và cơ học.

Ở giai đoạn 1, mục tiêu chủ yếu là khảo sát cơ chế cơ bản ban đầu của ứng xử điện trở của SSC, từ đó xác định khuynh hướng biến thiên điện trở dưới tác dụng của tải trọng nén, cũng như rút ra những hạn chế trong thành phần cấp phối ban đầu. Kết quả thu được ở giai đoạn này đóng vai trò nền tảng định hướng cho việc cải tiến thành phần hỗn hợp ở các giai đoạn thực nghiệm tiếp theo.

Sau khi phân tích kết quả giai đoạn 1, giai đoạn 2 được thiết kế với quy mô thí nghiệm mở rộng hơn, nhằm đánh giá ảnh hưởng tổng hợp của các yếu tố bao gồm thành phần chất độn, nhiệt độ, độ ẩm, điều kiện đo đạc và tải trọng lên ứng xử điện trở của mẫu đơn SSC, tạo ra các kết quả cốt lõi ứng với mục tiêu nghiên cứu đề ra.

Trên cơ sở các kết quả thu được ở giai đoạn 2, giai đoạn thực nghiệm 3 lựa chọn thành phần cấp phối SSC phù hợp để chế tạo các mẫu SSC, nhằm khảo sát ứng xử của hệ nhiều mẫu SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi.

Ứng với các giai đoạn trên, cấp phối SSC cũng được cải tiến từng bước. Cụ thể, ở giai đoạn 1, hỗn hợp SSC được chế tạo với hàm lượng muội than đen cao (7% thể

tích hồ xi măng) được tham khảo từ nghiên cứu [31]. Các thí nghiệm bước đầu đã giúp xác định được ứng xử điện trở suất cơ bản của SSC. Tuy nhiên, phân tích vi cấu trúc vật liệu (SEM) cho thấy sự kết tụ cục bộ của CB và sự xuất hiện của các lỗ rỗng lân cận muội than đen. Những hạn chế này không chỉ làm suy giảm độ ổn định của tín hiệu điện trở suất, mà còn giới hạn khả năng tăng cường độ chịu nén của vật liệu.

Từ các hạn chế ở giai đoạn 1, giai đoạn 2 được điều chỉnh với mục tiêu cải thiện cấu trúc vi mô và tính ổn định của ứng xử điện trở. Do đó, hàm lượng muội than đen được giảm xuống dưới 2% thể tích, đồng thời một loại chất độn gốc carbon khác cũng được sử dụng là sợi carbon. Việc sử dụng sợi carbon giúp tạo mạng lưới dẫn điện ổn định hơn, đồng thời duy trì cường độ cơ học cao hơn [13].

Cuối cùng, cấp phối được sử dụng trong giai đoạn thực nghiệm 3 được xác định trên cơ sở lựa chọn các mẫu SSC thể hiện ứng xử ổn định nhất ở giai đoạn 2. Cụ thể, thành phần cấp phối hỗn hợp SSC có hàm lượng sợi carbon 2% được lựa chọn để áp dụng cho giai đoạn thí nghiệm này.

Các mục tiếp theo trình bày chi tiết quy trình thiết kế cấp phối và thí nghiệm của từng giai đoạn như sau:

2.3.2. Thành phần cấp phối SSC cho giai đoạn thực nghiệm 1

Trong giai đoạn thực nghiệm 1, nghiên cứu tập trung xác định cơ chế cơ bản ban đầu của ứng xử điện trở suất của SSC khi sử dụng muội than đen làm chất độn dẫn điện duy nhất. Các vật liệu đầu vào gồm xi măng PC50, muội silic (SF), xỉ hạt lò cao nghiền mịn S95, cát mịn tự nhiên, phụ gia siêu dẻo gốc polycarboxylate Lotus-301M, muội than đen và nước như đã trình bày ở mục 2.2. Trong giai đoạn thực nghiệm này, SSC được thiết kế với cường độ nén mục tiêu từ 30 MPa, bảo đảm cường độ tương đương hoặc lớn hơn bê tông thông thường. Độ chảy xè của hỗn hợp được lựa chọn là 280 ± 10 mm nhằm bảo đảm tính công tác và hỗ trợ sự phân tán đồng đều của chất độn dẫn điện trong nền bê tông, trên cơ sở tham khảo nghiên cứu [86].

Trước khi xác định thành phần cấp phối của SSC có chứa muội than đen, nghiên cứu tiến hành xác lập cấp phối nền không chứa chất độn dẫn điện. Vì hỗn hợp được nghiên cứu là bê tông không sử dụng cốt liệu lớn như đã trình bày ở mục 2.2.1, nên

thiết kế cấp phối dựa trên phương pháp thể tích tuyệt đối được áp dụng tương tự như với thiết kế hỗn hợp vữa. Trong hệ này, thể tích hồ xi măng cần chiếm tỷ lệ lớn để bọc đều cốt liệu nhỏ, giúp đảm bảo độ linh động, tính đồng nhất. Đồng thời, thể tích hồ xi măng đủ lớn cũng tạo điều kiện thuận lợi cho khả năng phân tán và duy trì mạng lưới dẫn điện của muối than đen trong hồ xi măng.

Đầu tiên, dựa trên tham khảo của nhiều nghiên cứu trước đây [87] đối với cấp phối của hỗn hợp bê tông không sử dụng cốt liệu lớn, tổng lượng chất kết dính được lựa chọn là 900 kg/m^3 . Mức hàm lượng này nhằm đảm bảo thể tích hồ xi măng đủ lớn cho hệ vật liệu không có cốt liệu lớn, đồng thời vẫn duy trì được độ đặc chắc của nền bê tông và khả năng kiểm soát co ngót.

Trong tổng lượng chất kết dính này, thành phần vật liệu được phân chia theo tỷ lệ khối lượng xi măng : xi hạt lò cao nghiền mịn : muối silic bằng $58 : 35 : 7$. Với tổng lượng chất kết dính $\text{CKD} = 900 \text{ kg/m}^3$, khối lượng của từng thành phần được xác định theo các biểu thức:

$$\text{Xi măng} = 0,583 \times 900 \approx 525 \text{ kg/m}^3;$$

$$\text{Xi hạt lò cao nghiền mịn} = 0,35 \times 900 = 315 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Muối silic} = 0,067 \times 900 \approx 60 \text{ kg/m}^3$$

Việc sử dụng xi hạt lò cao nghiền mịn loại S95 với hàm lượng tương đối cao (35%) nhằm thay thế một phần xi măng, qua đó giúp giảm lượng dùng xi măng, gián tiếp làm giảm nhiệt thủy hóa và giảm nguy cơ co ngót, đồng thời định hướng thiết kế bê tông SSC theo hướng thân thiện với môi trường. Bên cạnh đó, muối silic được bổ sung với hàm lượng 7% nhằm lấp đầy hệ lỗ rỗng vi mô, cải thiện chất lượng vùng chuyển tiếp ITZ giữa hồ xi măng và cốt liệu, đồng thời góp phần hạn chế hiện tượng phân tầng trong hỗn hợp bê tông có hàm lượng hồ cao.

Đối với các cấp phối vữa thông thường có cường độ khoảng 30 MPa , tỷ lệ nước/xi măng thường được lựa chọn quanh mức $N/X \approx 0,50$ khi không sử dụng phụ gia siêu dẻo. Tuy nhiên, trong cấp phối bê tông nền của nghiên cứu này, xi măng được thay thế một phần đáng kể bằng xi hạt lò cao nghiền mịn, đồng thời phụ gia siêu dẻo gốc polycarboxylate (PCE) được sử dụng với hàm lượng khoảng 1% khối lượng chất

kết dính. Nhờ sự kết hợp giữa vật liệu khoáng mịn và phụ gia siêu dẻo, lượng nước trộn có thể được giảm xuống và được lựa chọn theo tỷ lệ nước/chất kết dính N/CKD = 0,44. Với tổng CKD = 900 kg/m³, lượng nước trộn được xác định theo:

$$\text{Nước} = 0,44 \times 900 = 396 \text{ kg/m}^3 \approx 400 \text{ L/m}^3.$$

Cuối cùng, lượng cát tự nhiên được xác định theo phương pháp thể tích tuyệt đối, trong đó tổng thể tích các thành phần vật liệu phải thỏa mãn:

$$V_{\text{xi măng}} + V_{\text{xi lò cao}} + V_{\text{muội silic}} + V_{\text{nước}} + V_{\text{cát}} = 1 \text{ m}^3$$

Sau khi tính toán và hiệu chỉnh thông qua thí nghiệm để đảm bảo tính công tác và độ ổn định của hỗn hợp, lượng cát được xác định là 749 kg/m³. Thành phần vật liệu cho 1 m³ bê tông nền, ký hiệu N1, được tổng hợp tại Bảng 2.8.

Bảng 2.8. Thành phần vật liệu cho 1m³ bê tông nền N1 (đơn vị: kg)

Tên	Xi măng	Muội silic	Xi hạt lò cao nghiền mịn	Cát	Phụ gia siêu dẻo	Nước
N1	525	60	315	749	9	400

Từ cấp phối nền N1, muội than đen (carbon black N330) được bổ sung làm chất dẫn điện duy nhất trong cấp phối ở giai đoạn 1. Theo nghiên cứu của Milone và các cộng sự [88], hàm lượng muội than đen thích hợp cho vữa dẫn điện nằm trong khoảng 5–15% thể tích hồ xi măng. Trong nghiên cứu này, hàm lượng được lựa chọn là 7% thể tích hồ xi măng, nhằm đảm bảo ngưỡng hình thành mạng dẫn điện liên tục trong khi vẫn duy trì được tính công tác của hỗn hợp. Muội than đen được thay thế tương đương theo thể tích cát mịn, do đó tổng thể tích hỗn hợp vẫn giữ nguyên 1 m³. Các thông số khác không thay đổi so với N1. Thành phần vật liệu của hỗn hợp SSC có chứa muội than đen, ký hiệu CB7, được trình bày tại Bảng 2.9.

Bảng 2.9. Thành phần vật liệu cho 1m³ CB7 (đơn vị: kg)

Tên mẫu	Xi măng	Muội silic	Xi hạt lò cao nghiền mịn	Cát	Muội than đen	Phụ gia siêu dẻo	Nước
CB7	525	60	315	644	70,5	9	400

2.3.3. Thành phần cấp phối SSC cho giai đoạn thực nghiệm 2

Kế thừa những kết quả thu được ở giai đoạn 1 (sẽ được trình bày chi tiết ở chương 3), trong đó việc sử dụng muối than đen với hàm lượng 7% thể tích hồ xi măng đã cho thấy khả năng hình thành mạng dẫn điện nhưng đồng thời xuất hiện hiện tượng kết tụ cục bộ và tạo vi lỗ rỗng xung quanh đó, giai đoạn 2 được thiết kế nhằm khắc phục các hạn chế này, hướng tới tăng tính ổn định điện trở và cải thiện cường độ cơ học của SSC. Cụ thể, hàm lượng muối than đen được giảm xuống dưới 2% thể tích, đồng thời một loại chất độn gốc carbon khác cũng được sử dụng là sợi carbon. Việc sử dụng sợi carbon giúp tạo mạng lưới dẫn điện ổn định hơn, đồng thời duy trì cường độ cơ học cao hơn. Giai đoạn này, có 4 thành phần cấp phối được sử dụng dựa trên việc thay đổi tỷ lệ sử dụng muối than đen hoặc sợi carbon trong cấp phối SSC.

Các nguyên liệu đầu vào vẫn tương tự giai đoạn 1, bao gồm xi măng PC50, xi hạt lò cao nghiền mịn (S95), muối silic (SF), cát mịn tự nhiên, phụ gia siêu dẻo gốc polycarboxylate (PCE), nước sạch, muối than đen N330 và sợi carbon ngắn. Bên cạnh đó, cường độ mục tiêu của SSC được tăng lên ở mức 50 MPa và đảm bảo hỗn hợp đủ đặc chắc cho việc gắn cảm biến và chịu tải trọng thực tế.

Ở cấp phối cho hỗn hợp SSC ở giai đoạn thực nghiệm 2, tổng lượng chất kết dính được giữ ở mức 900 kg/m^3 , nhưng tỷ lệ giữa các thành phần được điều chỉnh nhỏ theo tỷ lệ xi măng : xi hạt lò cao nghiền mịn : muối silic = 53 : 40 : 7 (% khối lượng), tương ứng $480 : 360 : 60 \text{ kg/m}^3$.

Tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) ở quanh mức 0,3 được lựa chọn dựa trên cường độ mục tiêu 50 MPa, cao hơn so với giai đoạn thí nghiệm 1 để đáp ứng nhu cầu sử dụng của SSC trong các cấu kiện cần cường độ cao. Với tổng CKD = 900 kg/m^3 , lượng nước tương ứng là 250 L/m^3 . Phụ gia siêu dẻo PCE tiếp tục được dùng ở mức 1% CKD ($\sim 9 \text{ kg/m}^3$), đảm bảo hỗn hợp vẫn đạt độ chảy xòe $280 \pm 10 \text{ mm}$ và không xảy ra hiện tượng phân tầng. Cát mịn tự nhiên được tính toán theo phương pháp thể tích tuyệt đối, đạt 1154 kg/m^3 , đảm bảo tổng thể tích hỗn hợp bằng 1 m^3 . Thành phần cấp phối nên không chứa chất độn dẫn điện, ký hiệu N2, được trình bày tại Bảng 2.10.

Bảng 2.10. Thành phần vật liệu cho 1m³ bê tông nền N2 (đơn vị: kg)

Tên mẫu	Xi măng	Muội silic	Xi hạt lò cao nghiền mịn	Cát	Phụ gia siêu dẻo	Nước
N2	480	60	360	1154	9	250

Từ cấp phối nền N2, ba cấp phối SSC được phát triển bằng cách thay thế tương đương thể tích cát mịn bằng vật liệu dẫn điện, gồm muội than đen (CB) và sợi carbon (CF). Các tỷ lệ thay thế được chọn dựa trên việc tham khảo các nghiên cứu trước đây [31,32,89] cho thấy hiệu quả tối ưu của mạng lưới dẫn điện khi sử dụng sợi carbon trong khoảng (1–2)% thể tích cát. Do đó, nghiên cứu sử dụng ba trường hợp cấp phối cụ thể như sau:

- CB2: thay thế 2% thể tích cát bằng muội than đen;
- CF2: thay thế 2% thể tích cát bằng sợi carbon;
- CB1CF1: 1% muội than đen và 1% sợi carbon thay thế cùng thể tích cát.

Bảng 2.11. Thành phần vật liệu cho 1m³ SSC chứa các chất độn dẫn điện khác nhau (đơn vị: kg)

Tên mẫu	Xi măng	Muội silic	Xi hạt lò cao nghiền mịn	Cát	Muội than đen	Sợi carbon	Phụ gia siêu dẻo	Nước
N2	480	60	360	1154	0	0	9	250
CB2	480	60	360	923	12	0	9	330
CF2	480	60	360	1001	0	14	9	300
CB1CF1	480	60	360	975	6,5	7	9	310

Dựa trên kết quả thí nghiệm thực tế, do sự khác biệt về hình dạng và diện tích bề mặt riêng của các chất độn dẫn điện, lượng nước trong từng cấp phối được điều chỉnh phù hợp nhằm duy trì độ chảy xòe ở mức 280 ± 10 mm. Tỷ lệ N/CKD tương ứng là 0,37 đối với cấp phối CB2, 0,33 đối với CF2 và 0,34 đối với CB1CF1. Các cấp phối SSC chứa các loại chất độn dẫn điện khác nhau được trình bày tại Bảng 2.11.

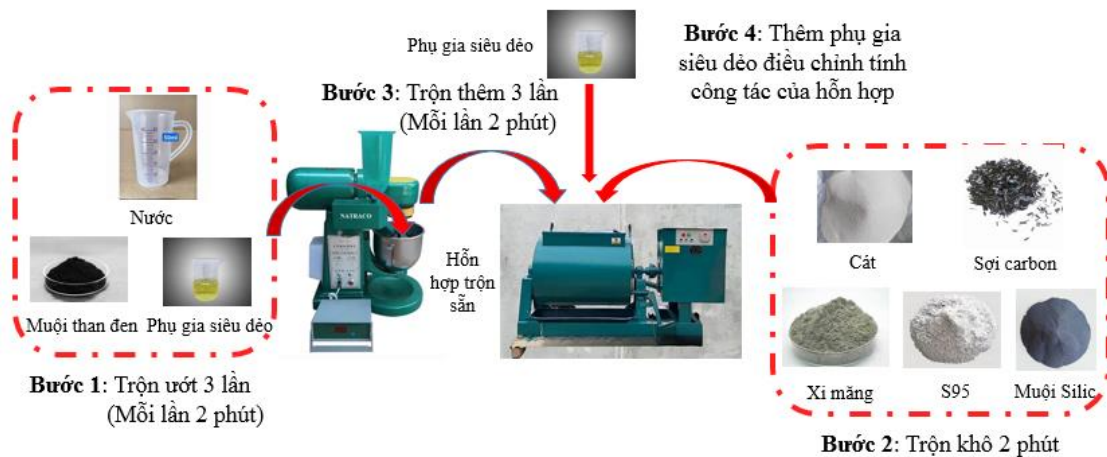
2.3.4. Thành phần cấp phối SSC cho giai đoạn thực nghiệm 3

Giai đoạn thực nghiệm 3 được triển khai nhằm đánh giá ứng xử điện trở của hệ nhiều mẫu SSC làm việc đồng thời dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi. Kết quả phân tích ở giai đoạn 2 (được trình bày chi tiết trong chương 4) cho thấy, trong ba loại cấp phối có chứa vật liệu dẫn điện (CB2, CF2 và CB1CF1), cấp phối CF2 sử dụng 2% thể tích sợi carbon, cấp phối SSC này thể hiện tính ổn định điện trở cao nhất, cường độ cơ học vượt trội, đồng thời tín hiệu điện trở biến thiên tuyến tính rõ rệt khi chịu tải trọng nén lặp lại. Điều này được lý giải bởi cấu trúc mạng dẫn điện ổn định của sợi carbon có hình dạng thon dài trong nền bê tông, giúp duy trì liên kết điện tử liên tục trong suốt quá trình chịu tải mà không bị ảnh hưởng mạnh bởi biến dạng cục bộ hoặc co ngót. Vì vậy, cấp phối CF2 được lựa chọn làm cấp phối cho giai đoạn thực nghiệm 3.

2.4. Quy trình trộn hỗn hợp SSC

Các vật liệu dẫn điện như muội than đen và sợi carbon ngắn có diện tích bề mặt riêng rất lớn và tính kỵ nước mạnh, do đó dễ bị kết tụ hoặc tạo thành cụm hạt trong quá trình trộn nếu không có biện pháp xử lý phù hợp. Việc kết tụ này có thể làm giảm tính công tác của hỗn hợp và tạo nên các vùng tập trung hạt dẫn điện cục bộ, ảnh hưởng đến tính ổn định của mạng dẫn điện trong bê tông. Tuy nhiên, mức độ kết tụ vừa phải cùng với sự kết nối của các hạt muội than rời rạc, chúng có thể tạo ra mạng lưới dẫn điện bên trong bê tông. Để ngăn chặn sự kết tụ quá mức, quy trình trộn SSC được mô tả tại Hình 2.2, dựa trên việc tham khảo phương pháp chế tạo SSC trong các nghiên cứu trước đây [6,90], đồng thời được điều chỉnh phù hợp với đặc điểm cấp phối vừa giàu hồ và thiết bị trộn hiện có.

Máy trộn được sử dụng trong nghiên cứu là máy trộn cưỡng bức hai trục nằm ngang có dung tích 50 lít, với tốc độ quay có thể điều chỉnh trong khoảng 50–280 vòng/phút. Quá trình trộn được chia thành hai giai đoạn: trộn khô nhằm đảm bảo sự phân bố đồng đều của các vật liệu rắn và trộn ướt để phân tán các chất độn dẫn điện trong hồ xi măng. Tùy thuộc vào từng loại chất độn dẫn điện, quy trình trộn được thực hiện theo các bước cụ thể như sau:



Hình 2.2. Các bước trộn hỗn hợp bê tông SSC

- (a) **Đối với trường hợp chỉ sử dụng muội than đen làm chất dẫn điện duy nhất** (mẫu CB), CB được chia thành ba phần bằng nhau và khuấy trộn sơ bộ với nước và phụ gia siêu dẻo trong ba lần liên tiếp, mỗi lần kéo dài khoảng 2 phút ở tốc độ 280 vòng/phút. Quá trình này giúp phá vỡ các cụm hạt lớn và tạo huyền phù muội than đồng nhất, nhờ đó muội than được bao ướt hoàn toàn trước khi đưa vào hỗn hợp xi măng. Song song đó, xi măng, cát, muội silic và xỉ hạt lò cao nghiền mịn (S95) được cho vào máy trộn và trộn khô trong 2 phút để đảm bảo sự phân bố đều giữa các hạt mịn. Sau khi hoàn tất bước trộn khô, hỗn hợp huyền phù muội than được thêm dần vào máy trộn qua ba lần, mỗi lần bổ sung cách nhau 2 phút trộn ướt. Sau khi thêm hết toàn bộ lượng huyền phù, hỗn hợp được tiếp tục trộn ở tốc độ thấp khoảng 50 vòng/phút trong 2 phút để đạt được trạng thái đồng nhất và loại bỏ các bọt khí lớn. Cuối cùng, lượng phụ gia siêu dẻo còn lại được bổ sung từ từ để hiệu chỉnh độ chảy xòe đến mức yêu cầu.
- (b) **Trong trường hợp chỉ sử dụng sợi carbon làm chất dẫn điện** (mẫu CF), do CF có chiều dài và tỷ trọng nhỏ nên dễ bị cuộn bó và nổi lên bề mặt khi tiếp xúc sớm với nước, vì vậy cần được trộn khô trước. Các CF được chia thành nhiều phần nhỏ, mỗi phần (0,5–1)g được đưa vào máy trộn cùng với xi măng, cát, muội silic và xỉ S95. Quá trình trộn khô kéo dài khoảng 2 phút ở tốc độ 280 vòng/phút, giúp CF được phân bố đều trong hỗn hợp bột mịn và hạn chế sự vón bó. Sau đó, toàn bộ lượng nước và phụ gia siêu dẻo được thêm vào một lần, trộn

tiếp trong (2–3) phút ở tốc độ 150 vòng/phút để đảm bảo hỗn hợp đồng nhất, đạt tính công tác cần thiết mà không phá vỡ sự liên kết tự nhiên giữa các sợi.

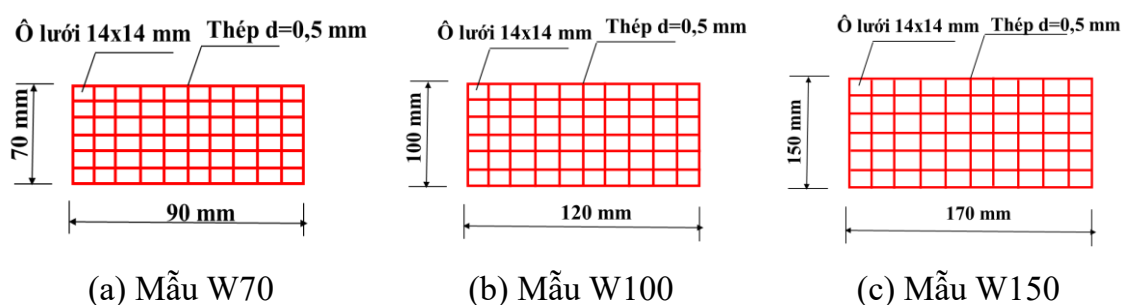
- (c) **Đối với trường hợp kết hợp cả muội than đen và sợi carbon (mẫu CB+CF)**, quy trình trộn được điều chỉnh để đảm bảo mỗi loại vật liệu dẫn điện được phân tán theo cơ chế riêng mà vẫn hình thành mạng lưới kết nối điện tổng thể. Muội than đen được chia làm ba phần và khuấy sơ bộ với nước và phụ gia siêu dẻo tương tự như ở cấp phối CB. Trong khi đó, sợi carbon được chia nhỏ và cho vào máy trộn cùng với xi măng, cát, muối silic và S95 để trộn khô trong 2 phút ở tốc độ 280 vòng/phút. Sau giai đoạn trộn khô, hỗn hợp huyền phù muội than được thêm vào từng phần ba lần liên tiếp, mỗi lần trộn 2 phút ở tốc độ 150 vòng/phút, giúp các hạt muội than phân bố đều quanh hệ sợi carbon đã được trộn sẵn. Sau khi hoàn tất, hỗn hợp được trộn thêm 2 phút ở tốc độ thấp 50 vòng/phút để đồng nhất hoàn toàn và loại bỏ bọt khí. Phần phụ gia siêu dẻo còn lại được bổ sung để điều chỉnh độ chảy xoe đạt mức 280 ± 10 mm.

Sau khi trộn, hỗn hợp SSC được kiểm tra độ chảy xoe (flow table) theo TCVN 3121-3:2003 để đảm bảo đạt giá trị yêu cầu. Hỗn hợp sau đó được đổ vào các mẫu thí nghiệm như được trình bày ở mục tiếp theo.

2.5. Quy trình chuẩn bị mẫu và quy hoạch thực nghiệm

2.5.1. Giai đoạn thực nghiệm 1

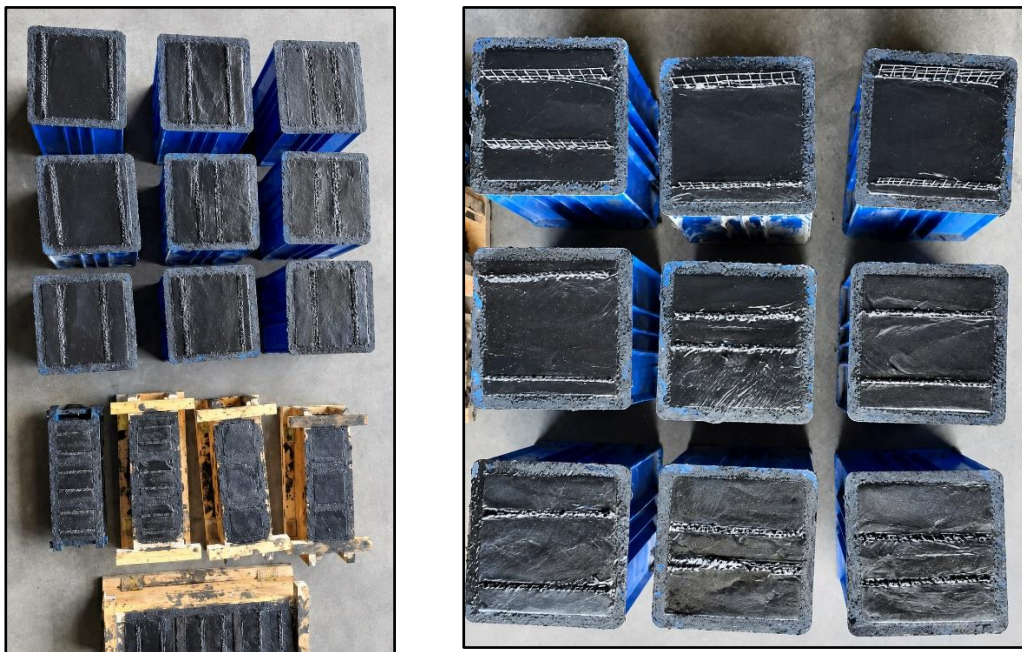
Giai đoạn thực nghiệm 1 sử dụng các mẫu SSC chứa 7% muội than đen (CB) theo thể tích hồ xi măng nhằm nghiên cứu cơ chế cơ bản của ứng xử điện trở suất. Ba kích thước mẫu được chế tạo gồm W70 ($70 \times 70 \times 70$ mm), W100 ($100 \times 100 \times 100$ mm) và W150 ($150 \times 150 \times 150$ mm).



Hình 2.3. Điện cực bằng lưới thép gắn vào các loại mẫu SSC CB7

Mẫu được đúc bằng ván khuôn nhựa hoặc thép, sử dụng điện cực lưới mạ kẽm có đường kính sợi 0,5 mm và kích thước ô lưới 14 mm. Kích thước điện cực của từng loại mẫu được thể hiện tại Hình 2.3.

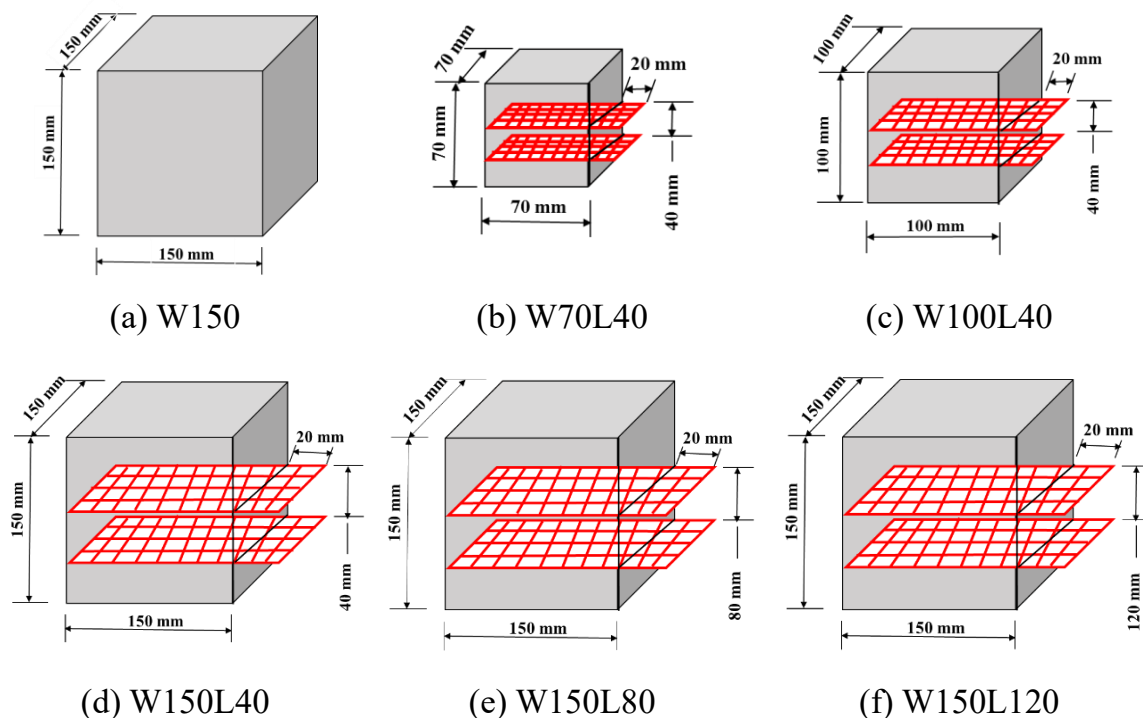
Sau khi được trộn đều, hỗn hợp bê tông được đổ thủ công vào các khuôn đã chuẩn bị sẵn. Đối với các loại mẫu SSC gắn điện cực, mẫu được chế tạo bằng cách sử dụng 02 điện cực gắn vuông góc với đáy ván khuôn, khoảng cách 2 điện cực được gắn theo từng loại mẫu. Mẫu sau khi được đổ, phần điện cực 20 mm bên ngoài được sử dụng để nối mạch điện khi đo đạc. Đối với các mẫu SSC không gắn điện cực, loại mẫu W150 được chế tạo để thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của SSC. Quá trình đầm rung được thực hiện tuần tự bằng búa và bàn rung trong 30 giây ở tần số 50 Hz. Hình 2.4 là ảnh chụp của một số mẫu sau khi đúc.



Hình 2.4. Hình ảnh một số mẫu CB7 sau khi được chế tạo

Các mẫu thí nghiệm được trình bày tại Hình 2.5, cụ thể như sau: Hình 2.5(a) là mẫu SSC có kích thước 150×150×150 mm không gắn điện cực, được ký hiệu là W150, loại mẫu này được chế tạo để kiểm tra cường độ chịu nén của bê tông sau 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày được bảo dưỡng theo TCVN 3105:2022. Hình 2.5(b) là mẫu có kích thước 70×70×70 mm, khoảng cách giữa 2 điện cực $L=40$ mm được ký hiệu là W70L40. Hình 2.5(c) là mẫu có kích thước 100×100×100 mm, khoảng cách giữa 2

điện cực $L=40$ mm được ký hiệu là W100L40. Hình 2.5(d) là mẫu có kích thước $150 \times 150 \times 150$ mm, khoảng cách giữa 2 điện cực $L=40$ mm được ký hiệu là W150L40. Hình 2.5(e) là mẫu có kích thước $150 \times 150 \times 150$ mm, khoảng cách giữa 2 điện cực $L=80$ mm được ký hiệu là W150L80. Hình 2.5(f) là mẫu có kích thước $150 \times 150 \times 150$ mm, khoảng cách giữa 2 điện cực $L=120$ mm được ký hiệu là W150L120.

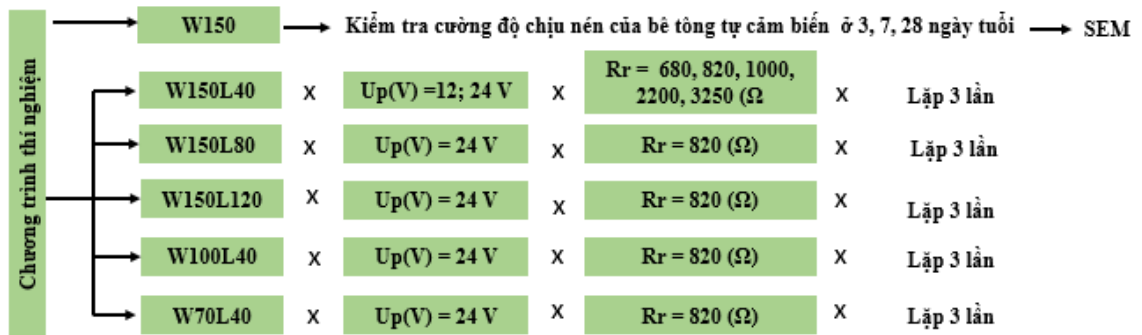


Hình 2.5. Các loại mẫu SSC phục vụ giai đoạn thực nghiệm 1

Sau 1 ngày đúc, các mẫu được tháo khuôn và được bảo dưỡng trong 27 ngày liên tiếp theo TCVN 3105:2022 [91]. Sau đó, tất cả các mẫu có điện cực được cho vào tủ sấy để sấy khô cho đến khi khối lượng mẫu không đổi. Nhiệt độ bề mặt của mẫu vật cũng được đo và xác định trong khoảng $27 \pm 2^{\circ}\text{C}$ khi thực hiện thí nghiệm. Các mẫu này được sử dụng trong thí nghiệm để xác định mối quan hệ giữa sự biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của bê tông. Qua đó, thí nghiệm xác định ảnh hưởng các thông số thí nghiệm như kích thước mẫu, điện trở trung gian, khoảng cách giữa 2 điện cực, điện áp kích thích đến tính tự cảm biến của bê tông.

Chương trình thực nghiệm ở giai đoạn 1 được mô tả tại Hình 2.6, trong đó việc làm rõ cơ chế cơ bản của ứng xử điện trở của SSC và ảnh hưởng các yếu tố bao gồm kích thước mẫu, khoảng cách giữa 2 điện cực, cường độ dòng điện lên sự biến thiên

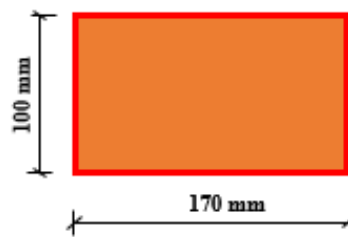
điện trở suất của SSC dưới tác dụng của tải trọng nén. Để thực hiện thí nghiệm theo chương trình này, 02 loại điện áp nguồn kích thích U_p được sử dụng, điện áp kích thích U_p có giá trị là 12 V và 24 V, loại Adapter 12 V, 5A và Adapter 24 V, 5A; 05 loại điện trở trung gian R_r có giá trị 680 Ω , 820 Ω , 1.000 Ω , 2.200 Ω và 3.250 Ω , điện trở trung gian có công suất định mức là 5 W; 03 loại kích thước mẫu hình lập phương W70, W100 và W150 và 03 loại khoảng cách điện cực L là 40 mm, 80 mm và 120 mm. Đối với mỗi trường hợp thí nghiệm, các thí nghiệm được thực hiện tái lập ba lần để kiểm tra độ ổn định của phép đo.



Hình 2.6. Chương trình thí nghiệm giai đoạn thực nghiệm 1

2.5.2. Giai đoạn thực nghiệm 2

Trong giai đoạn thực nghiệm 2, các mẫu SSC được chế tạo loại W150L40. Điện cực gắn vào mẫu W150L40 bằng đồng dày 1 mm, với kích thước điện cực mô tả tại Hình 2.7.



Hình 2.7. Điện cực bằng đồng gắn vào mẫu SSC W150L40

Hỗn hợp bê tông sau khi được trộn đều được đổ thủ công vào các khuôn đã chuẩn bị sẵn. Đối với các mẫu SSC gắn hai điện cực, các điện cực được cố định vuông góc với đáy khuôn, với khoảng cách giữa hai điện cực là 40 mm, sau đó tiến hành đổ bê tông vào khuôn. Phần điện cực nằm trong bê tông được cố định trong quá trình

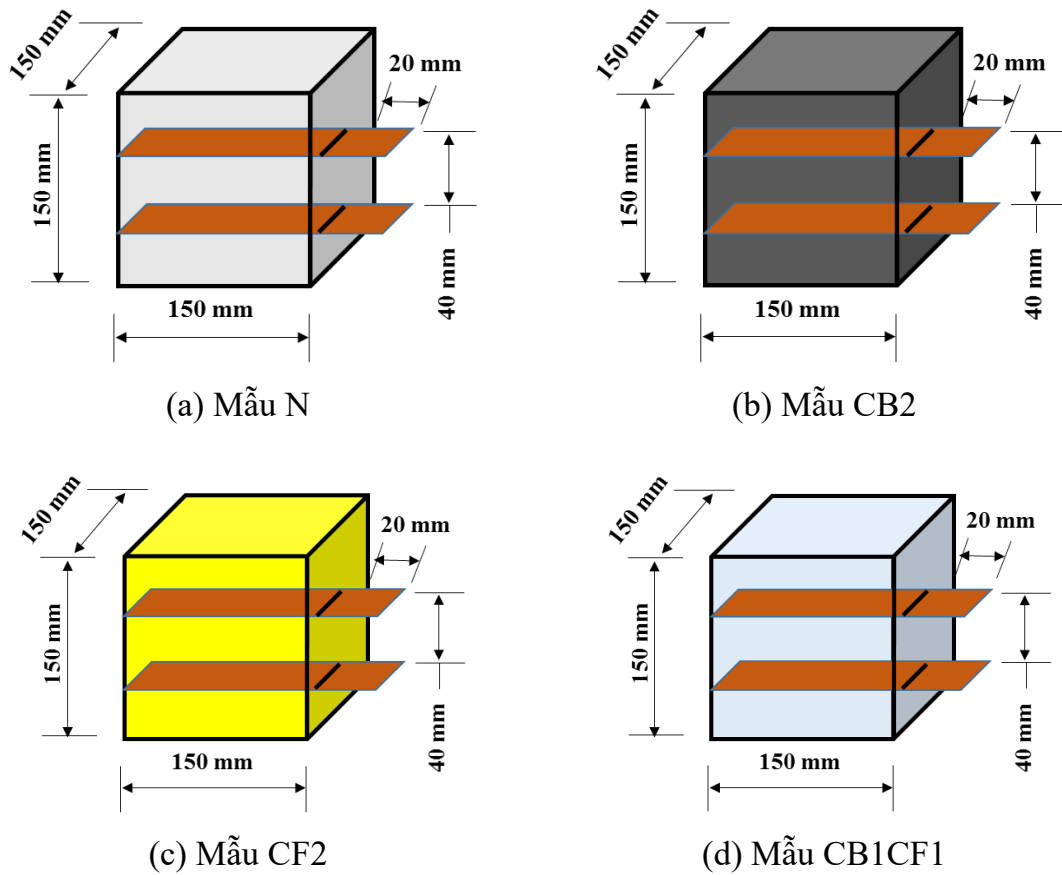
đúc mẫu, trong khi phần còn lại dài 20 mm nằm ngoài bê tông được sử dụng để kết nối với mạch điện trong quá trình đo đạc. Quá trình đầm chặt được thực hiện tuần tự bằng búa và bàn rung trong 30 giây với tần số 50 Hz. Các loại mẫu SSC được sử dụng trong giai đoạn thực nghiệm 2 thể hiện tại Hình 2.8.



Hình 2.8. Hình ảnh một số mẫu SSC W150L40 sau khi được chế tạo

Các mẫu SSC được chế tạo với 04 thành phần cấp phối khác nhau nhằm đánh giá ảnh hưởng của vật liệu dẫn điện đến đặc tính cảm biến của vật liệu. Các loại mẫu được ký hiệu lần lượt là N (Hình 2.9a), CB2 (Hình 2.9b), CF2 (Hình 2.9c) và CB1CF1 (Hình 2.9d). Trong đó, mẫu N không chứa vật liệu dẫn điện, trong khi các mẫu còn lại được bổ sung muội than đen (CB), sợi carbon (CF) hoặc kết hợp cả hai loại vật liệu này với các hàm lượng khác nhau. Các mẫu sau khi chế tạo được bảo dưỡng trong cùng điều kiện trước khi tiến hành các thí nghiệm đánh giá đặc tính cơ học và khả năng cảm biến.

Các mẫu được bảo dưỡng theo TCVN 3105:2022 [91]. Sau 28 ngày bảo dưỡng, toàn bộ mẫu gắn điện cực được đưa vào tủ sấy. Các mẫu được sấy ở nhiệt độ 100°C cho đến khi khối lượng không còn thay đổi, tức là mẫu đạt trạng thái khô tuyệt đối (độ ẩm bằng 0%) và được trình bày trong Hình 2.10.



Hình 2.9. Các loại mẫu SSC giai đoạn thực nghiệm 2

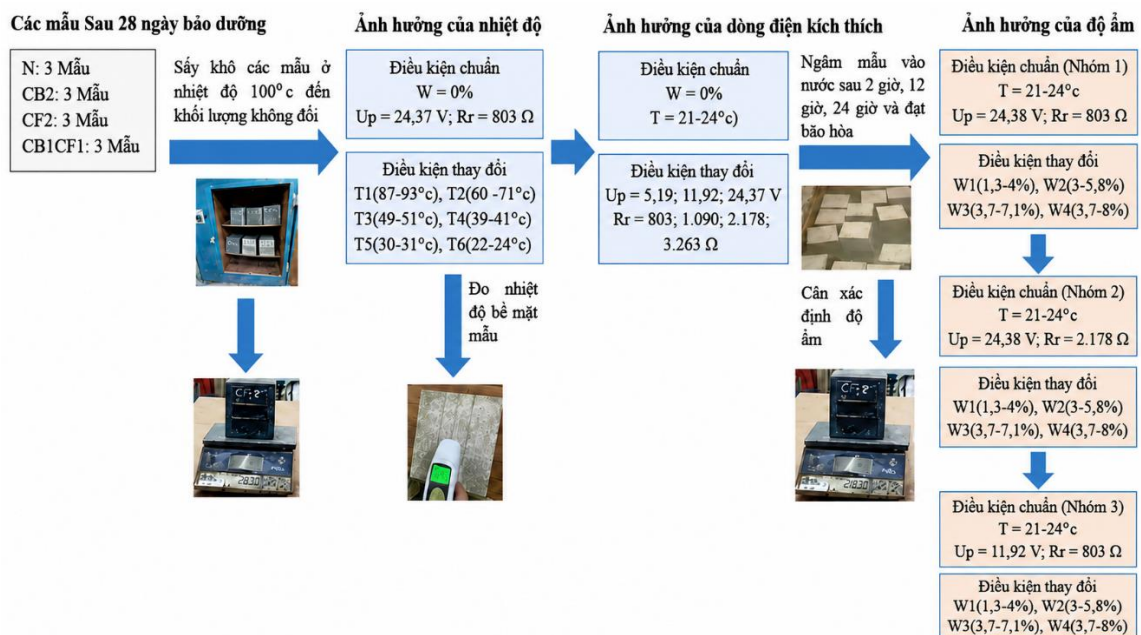


Hình 2.10. Các mẫu SSC được sấy trong tủ sấy

Sau khi các mẫu đạt trạng thái khô tuyệt đối, các thí nghiệm được tiến hành lần lượt nhằm đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ, cường độ dòng điện qua mẫu và độ ẩm đến điện trở suất ban đầu của SSC trong trạng thái chưa chịu tác dụng của tải trọng.

Chương trình thí nghiệm xác định điện trở suất ban đầu của SSC trong điều kiện không tải được ký hiệu là giai đoạn thí nghiệm 2A. Chương trình thí nghiệm giai đoạn 2A được trình bày trong Hình 2.11.

Các thí nghiệm được thực hiện tại 06 mức nhiệt độ khác nhau nhằm đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện trở suất ban đầu của SSC, bao gồm mức T1 (87⁰C – 93⁰C), mức T2 (69⁰C – 71⁰C), mức T3 (49⁰C – 51⁰C), mức T4 (39⁰C – 41⁰C), mức T5 (30⁰C – 31⁰C) và mức T6 (22⁰C – 24⁰C). Nhiệt độ được đo trên bề mặt của từng mẫu ngay trước mỗi lần đo điện trở suất. Việc đo nhiệt độ được thực hiện bằng nhiệt kế hồng ngoại không tiếp xúc. Cường độ dòng điện đi qua các mẫu SSC được tạo ra bằng cách cung cấp điện áp kích thích $U_p = 24,37$ V thông qua điện trở trung gian có giá trị $R_r = 803 \Omega$.



Hình 2.11. Chương trình thí nghiệm giai đoạn 2A

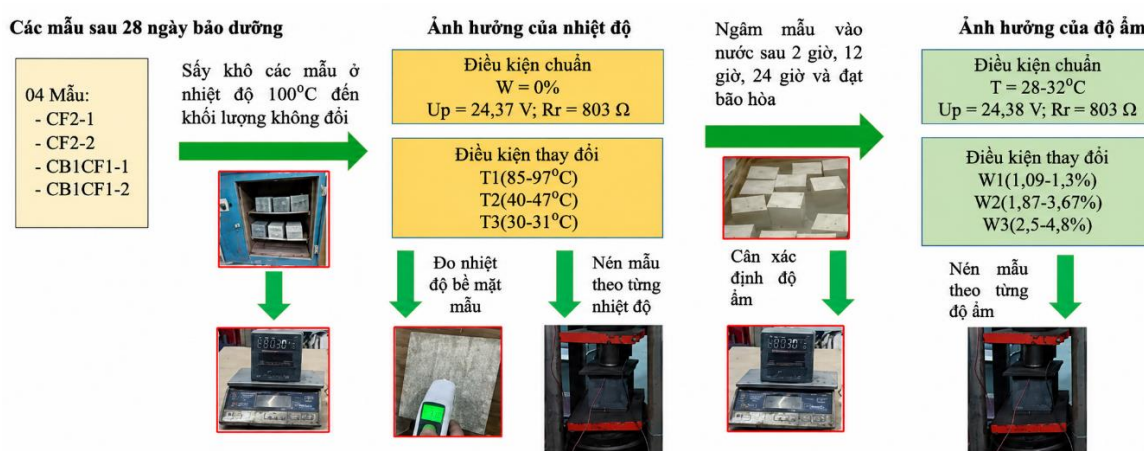
Ngoài ra, bê tông được xem là vật liệu dẫn điện kém, do đó điện trở suất của bê tông có thể phụ thuộc vào cường độ dòng điện đi qua vật liệu [92]. Để làm rõ ảnh hưởng này, cường độ dòng điện qua các mẫu SSC được điều chỉnh bằng cách thay đổi điện áp nguồn kích thích (U_p) và giá trị của điện trở trung gian (R_r). Trong thí nghiệm, 03 bộ chuyển đổi điện áp được sử dụng để chuyển đổi điện áp từ nguồn điện gia dụng sang điện áp cung cấp cho mạch đo, với các giá trị điện áp thực tế lần lượt

là 5,19 V, 11,92 V và 24,37 V. Đồng thời, 04 giá trị điện trở trung gian (R_r) gồm 803 Ω , 1.090 Ω , 2.178 Ω và 3.263 Ω được sử dụng nhằm điều chỉnh cường độ dòng điện đi qua mẫu bê tông. Việc khảo sát ảnh hưởng của cường độ dòng điện đến điện trở suất ban đầu của SSC được thực hiện trong điều kiện chuẩn, với độ ẩm mẫu ($W = 0\%$) và nhiệt độ môi trường dao động trong khoảng 21°C – 24°C .

Sau khi xác định điện trở suất của các mẫu bê tông ở trạng thái khô tuyệt đối (độ ẩm $W = 0\%$) dưới các mức nhiệt độ và cường độ dòng điện khác nhau, các mẫu tiếp tục được ngâm trong nước với các khoảng thời gian khác nhau nhằm thay đổi độ ẩm. 04 mức ngâm nước được áp dụng cho mẫu thử, bao gồm 2 giờ, 12 giờ, 24 giờ và ngâm cho đến trạng thái bão hòa (khối lượng mẫu không còn thay đổi). Tương ứng với các mức ngâm này, độ ẩm của mẫu nằm trong các khoảng: W1 (1,3%–4%), W2 (3,0%–5,8%), W3 (3,7%–7,1%) và W4 (3,7%–8,0%). Sự khác biệt về phạm vi độ ẩm là do độ rỗng khác nhau của các mẫu có thành phần vật liệu không đồng nhất. Trong điều kiện độ ẩm chưa bão hòa, việc đảm bảo phân bố độ ẩm đồng đều trong toàn bộ thể tích mẫu là khó khăn và hầu như không thể đạt được trong thực tế. Do đó, độ ẩm của mẫu được xác định theo giá trị trung bình của toàn bộ mẫu, được tính bằng tỷ lệ giữa khối lượng nước chứa trong mẫu và khối lượng của mẫu ở trạng thái khô tuyệt đối. Việc nghiên cứu ảnh hưởng của độ ẩm đến điện trở suất ban đầu của SSC được tiến hành tương ứng với ba trường hợp sử dụng các mức điện áp nguồn và các giá trị điện trở trung gian khác nhau, qua đó tạo ra các cường độ dòng điện khác nhau.

Sau khi hoàn tất các thí nghiệm trên mẫu SSC trong điều kiện không chịu tải, nghiên cứu tiếp tục tiến hành các thí nghiệm nhằm xác định ứng xử điện trở suất của SSC dưới tác dụng của tải trọng nén trong phạm vi không phá hủy, đồng thời làm rõ các yếu tố ảnh hưởng đến ứng xử này. Chương trình thí nghiệm của giai đoạn này được ký hiệu là giai đoạn 2B và được trình bày trong Hình 2.12. 04 mẫu CF2-1, CF2-2, CB1CF1-1 và CB1CF1-2 được lựa chọn do có cường độ chịu nén cao, độ rỗng thấp và điện trở suất ổn định khi chịu ảnh hưởng của cường độ dòng điện. Các mẫu được đưa vào tủ sấy và sấy khô ở nhiệt độ 100°C cho đến khi khối lượng không còn thay đổi. Ở trạng thái khô tuyệt đối (độ ẩm $W = 0\%$), ứng xử điện trở suất của từng

mẫu dưới tác dụng của tải trọng nén trong phạm vi không phá hủy được khảo sát tại 03 mức nhiệt độ khác nhau, bao gồm: T1 (85⁰C - 97⁰C), T2 (40⁰C - 47⁰C), T3 (30⁰C - 31⁰C). Nhiệt độ được đo trên bề mặt mỗi mẫu ngay trước mỗi lần đo điện trở suất. Bên cạnh đó, chương trình thí nghiệm còn xác định ứng xử điện trở suất của các mẫu chịu tải trọng nén trong phạm vi không phá hủy tại 03 mức độ ẩm khác nhau. Các mức độ ẩm này được tạo ra bằng cách cân khối lượng mẫu sau khi ngâm nước trong 2 giờ, 12 giờ và 24 giờ. Tương ứng với các mức ngâm này, độ ẩm của mẫu nằm trong các khoảng: W1 (1,09% - 1,3%), W2 (1,87% - 3,67%) và W3 (2,5% - 4,8%). Trong tất cả các trường hợp thí nghiệm, điện áp kích thích được giữ không đổi ở $U_p = 24,37$ (V) và điện trở trung gian có giá trị $R_r = 803$ (Ω). Ứng xử điện trở suất của từng mẫu dưới tác dụng của tải trọng nén trong phạm vi không phá hủy, xét đến ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ, độ ẩm và thành phần cấp phối, được khảo sát tương ứng với từng mức nhiệt độ và độ ẩm đã nêu. Để đánh giá tính tái lập của phép đo, mỗi thí nghiệm được lặp lại ba lần.



Hình 2.12. Chương trình thí nghiệm giai đoạn 2B

Tại mỗi lần đo, ứng suất nén tác dụng lên mẫu được lựa chọn là $\sigma_c = 10$ MPa nhằm khảo sát ứng xử điện trở của SSC trong phạm vi tải trọng nhỏ, khi vật liệu chưa xuất hiện phá hoại. Mức ứng suất này tương ứng xấp xỉ 1/5 cường độ chịu nén của SSC và được sử dụng để đánh giá khả năng cảm biến tải trọng trong vùng làm việc đàn hồi; cơ sở và kết quả kiểm chứng được trình bày tại Mục 3.2, Chương 3.

Đối với khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ, mẫu SSC sau khi sấy đến khối lượng không đổi được đưa đến các điều kiện nhiệt độ khảo sát theo chương trình thí nghiệm (Hình 2.11, Hình 2.12). Sau khi lấy mẫu ra khỏi môi trường gia nhiệt, nhiệt độ bề mặt mẫu được đo bằng thiết bị đo nhiệt độ không tiếp xúc trong thời gian không quá 5 phút nhằm hạn chế sự thay đổi nhiệt do trao đổi với môi trường. Nhiệt độ bề mặt được sử dụng để đánh giá trạng thái nhiệt của mẫu do đây là vị trí trao đổi nhiệt trực tiếp với môi trường. Đối với độ ẩm, mẫu được ngâm nước trong các thời gian 2 giờ, 12 giờ và 24 giờ; sau khi lấy ra, nước tự do trên bề mặt được loại bỏ trước khi cân. Thời gian từ khi cân đến khi đo điện trở không quá 5 phút. Độ ẩm được xác định theo TCVN 3115:2022. Do cấu trúc lỗ rỗng, độ ẩm bên trong có thể không đồng đều nên giá trị thu được là độ ẩm trung bình của toàn mẫu.

2.5.3. Giai đoạn thực nghiệm 3

Giai đoạn thực nghiệm 3 sử dụng cấp phối CF2 để chế tạo mẫu. Các mẫu SSC được đúc dưới dạng mẫu với 02 kích thước khác nhau, gồm $50 \times 50 \times 250$ mm và $50 \times 50 \times 50$ mm. Khuôn đúc mẫu SSC bằng gỗ và được trình bày trong Hình 2.13.



(a) Mẫu kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm

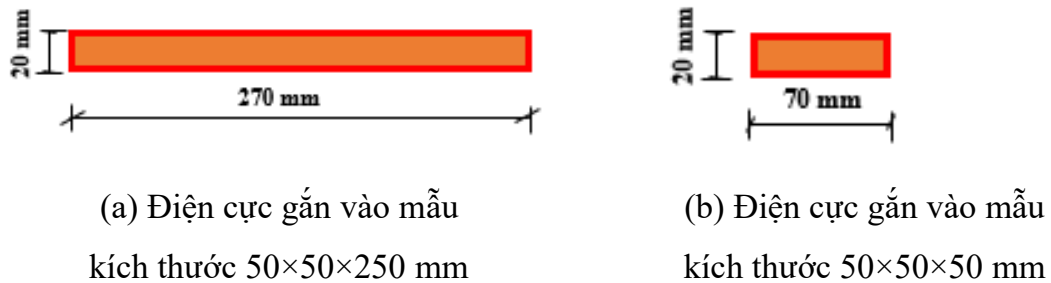


(b) Mẫu kích thước $50 \times 50 \times 50$ mm

Hình 2.13. Khuôn đúc chế tạo các loại mẫu SSC

Điện cực được chế tạo bằng đồng với chiều dày 1 mm. Mẫu SSC kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm, điện cực có chiều rộng 20 mm và chiều dài 270 mm, trong đó 250 mm được gắn vào trong bê tông và phần còn lại kết nối với mạch điện. Mẫu SSC kích thước $50 \times 50 \times 50$ mm, điện cực có chiều rộng 20 mm và chiều dài 70 mm, trong đó

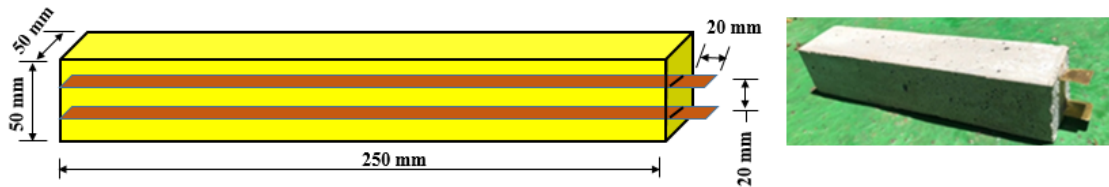
50 mm được gắn vào trong bê tông và phần còn lại để kết nối với mạch điện. Điện cực bằng đồng được chế tạo để lắp đặt vào mẫu SSC được trình bày trong Hình 2.14.



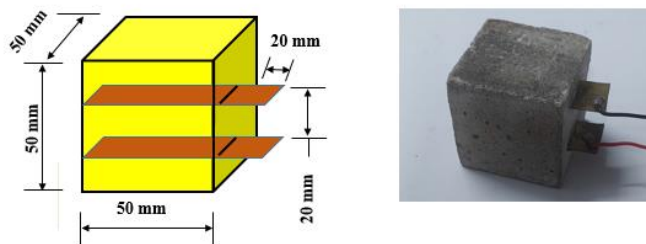
Hình 2.14. Điện cực bằng đồng gắn vào các loại mẫu SSC

Về cơ sở của việc lựa chọn kích thước mẫu trong thí nghiệm hệ thống cân, ngoài các yêu cầu về khả năng chế tạo, bố trí điện cực và điều kiện thiết bị thí nghiệm, NCS còn định hướng lựa chọn kích thước mẫu theo khả năng phát triển ứng dụng thực tế của hệ thống cân sử dụng vật liệu SSC. Cụ thể, mẫu kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm được lựa chọn nhằm mô phỏng dạng phần tử đỡ hoặc dải cảm biến chịu nén thường gặp trong các hệ nền cân, sàn chịu tải hoặc bộ đỡ giám sát tải trọng. Kích thước này bảo đảm đủ chiều dài để hình thành vùng phân bố ứng suất và vùng dẫn điện ổn định dưới tác dụng của tải trọng nén đúng tâm và lệch tâm, từ đó cho phép đánh giá khả năng truyền tải, phân bố tải và thu nhận tín hiệu điện trong điều kiện gần với cơ chế làm việc của các phần tử cảm biến thực tế. Đối với mẫu kích thước $50 \times 50 \times 50$ mm, việc thu nhỏ kích thước nhằm tăng số lượng phần tử cảm biến trong cùng diện tích bố trí, qua đó mô phỏng nguyên lý làm việc của hệ nhiều cảm biến trong các hệ thống cân phân bố tải. Cách tiếp cận này cho phép nghiên cứu khả năng tổng hợp tín hiệu điện, đánh giá ảnh hưởng của sự phân bố tải trọng và sai lệch vị trí đặt tải đến độ nhạy của toàn hệ thống cân. Ngoài ra, việc lựa chọn kích thước mẫu theo dạng mô-đun nhỏ còn hướng đến khả năng mở rộng và lắp ghép thành các hệ cảm biến diện tích lớn trong thực tế. Điều này phù hợp với định hướng ứng dụng vật liệu SSC trong các hệ thống cân tải trọng tĩnh, sân kho bãi/cảng, bộ

đồ giám sát tải trọng hoặc các kết cấu cần theo dõi phân bố tải theo thời gian thực. Hình 2.15 mô tả các mẫu SSC có hình dạng và kích thước khác nhau.



(a) Mẫu SSC kích thước 50×50×250 mm



(b) Mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm

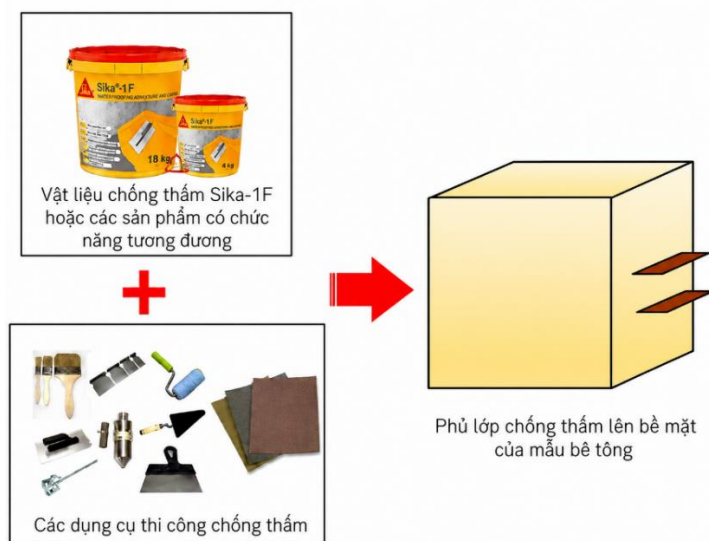
Hình 2.15. Các loại mẫu SSC phục vụ giai đoạn thực nghiệm 3

Quy trình trộn cấp phối SSC có chứa sợi carbon được thực hiện theo nội dung trình bày tại Mục 2.4. Các mẫu bê tông có gắn điện cực, 02 tấm điện cực kim loại được lắp đặt theo phương vuông góc với đáy ván khuôn, với khoảng cách giữa 02 điện cực là 20 mm; sau đó bê tông được đổ từ từ vào khuôn. Quá trình đầm rung được thực hiện bằng búa và bàn rung trong thời gian 30 giây, với tần số 50 Hz. Các mẫu được bảo dưỡng theo TCVN 3105:2022 [91].

Trước khi tiến hành các thí nghiệm, các mẫu SSC được sấy trong tủ sấy ở nhiệt độ từ 90°C đến 100°C cho đến khi khối lượng mẫu không còn thay đổi giữa các lần cân liên tiếp. Điều kiện này được xem là trạng thái khô tuyệt đối của vật liệu, tương ứng với độ ẩm bằng 0%, nhằm loại bỏ tối đa ảnh hưởng của nước lỗ rỗng đến tính chất điện của bê tông. Việc đưa các mẫu về cùng một trạng thái độ ẩm ban đầu giúp đảm bảo tính đồng nhất của điều kiện thí nghiệm và nâng cao độ tin cậy khi đánh giá sự biến thiên điện trở suất của vật liệu dưới tác động của tải trọng.

Sau khi hoàn thành quá trình sấy khô, toàn bộ bề mặt các mẫu SSC được phủ vật liệu chống thấm Sika-1F bằng phương pháp quét thủ công bằng cọ. Lớp chống

thấm được thi công thành ba lớp liên tiếp nhằm tạo thành màng bảo vệ kín trên bề mặt mẫu, hạn chế tối đa sự trao đổi ẩm giữa bê tông và môi trường bên ngoài. Biện pháp này được thực hiện nhằm duy trì trạng thái độ ẩm ổn định của mẫu trong suốt quá trình thí nghiệm, qua đó giảm thiểu ảnh hưởng của sự thay đổi độ ẩm đến kết quả đo điện trở suất và khả năng cảm biến của vật liệu. Công tác chống ẩm cho các mẫu SSC được trình bày tại Hình 2.16.

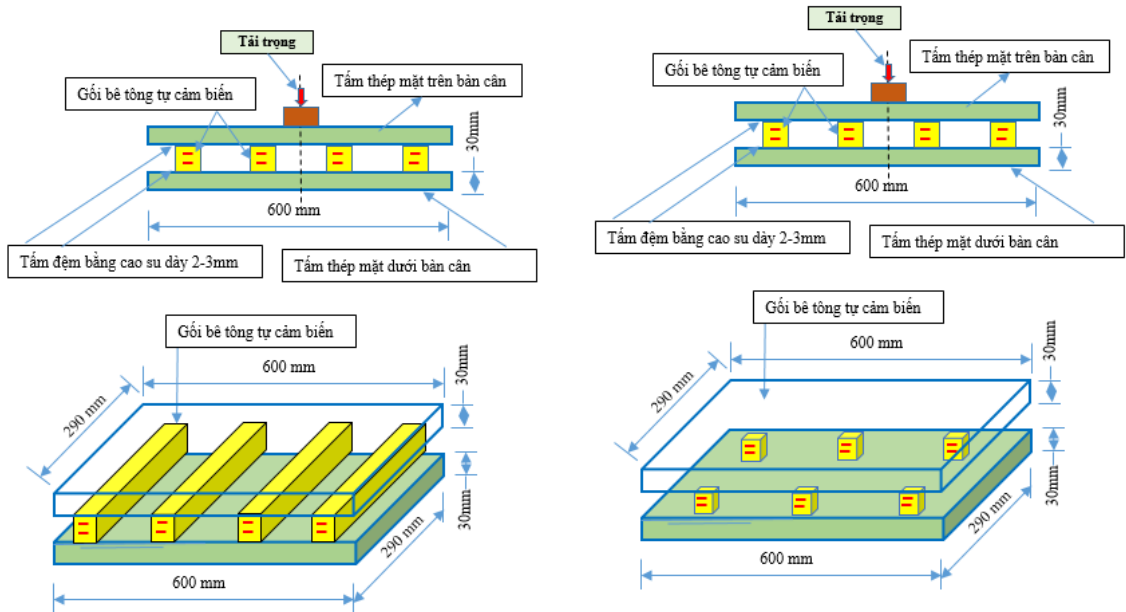


Hình 2.16. Công tác chống ẩm cho mẫu SSC

Trong chương trình thực nghiệm giai đoạn 3, mô hình hệ thống cân thu nhỏ được thiết kế phù hợp với các thiết bị đo trong phòng thí nghiệm. Cấu trúc cơ bản của hệ thống cân bao gồm các cảm biến được chế tạo từ các mẫu SSC, các mẫu được bố trí bên dưới mặt bàn cân cứng. Với cấu trúc này, tải trọng tác dụng lên bàn cân được chuyển hóa thành tải trọng nén tác dụng trực tiếp lên các mẫu SSC, qua đó loại bỏ ảnh hưởng của mô men uốn. Đồng thời, phạm vi ứng suất nén được khảo sát nằm trong miền đàn hồi của mẫu SSC, do đó các vết nứt vi mô trong bê tông chưa xuất hiện trong quá trình làm việc, góp phần kéo dài tuổi thọ của hệ thống cảm biến.

Hình 2.17 mô tả mô hình hệ thống cân thu nhỏ trong phòng thí nghiệm. Theo đó, Hình 2.17(a) trình bày mô hình hệ thống cân thu nhỏ, bao gồm 02 tấm thép có độ cứng lớn đóng vai trò là mặt trên và mặt dưới của bàn cân. Mỗi tấm thép có kích thước dài 600 mm, rộng 290 mm và dày 30 mm. Giữa các mẫu bê tông và tấm thép mặt trên,

dưới được lắp đặt bằng các tấm đệm cao su có chiều dày (2-3) mm nhằm đảm bảo mặt mẫu được tiếp xúc êm thuận khi chịu tải trọng nén, đồng thời hạn chế sai số đo do sự không bằng phẳng bề mặt tiếp xúc giữa các mẫu bê tông và các tấm thép. Mô hình này được sử dụng để khảo sát ứng xử điện trở của hệ gồm nhiều mẫu SSC có kích thước khác nhau, làm việc đồng thời dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi.



(a) Mô hình hệ thống cân thu nhỏ

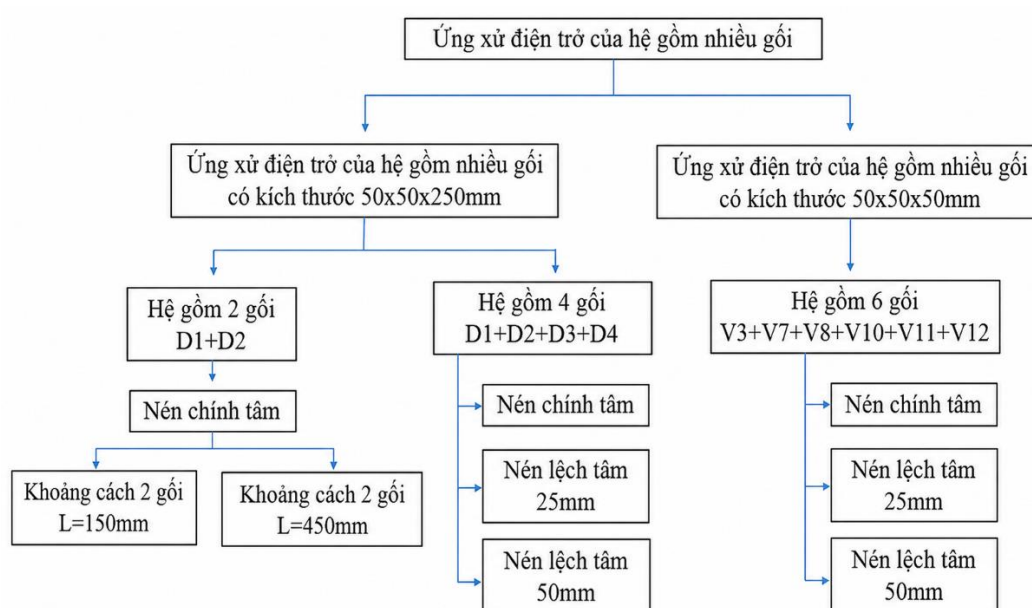


(b) Hệ thống cân thu nhỏ lắp đặt vào máy nén

Hình 2.17. Mô hình hệ thống cân thu nhỏ trong phòng thí nghiệm

Hình 2.17(b) trình bày mô hình hệ thống cân thu nhỏ được lắp đặt trên máy nén JYE-2000 nhằm nghiên cứu ứng xử điện trở của hệ gồm nhiều mẫu SSC làm việc đồng thời khi mặt cân chịu tác dụng của tải trọng nén tại các vị trí gia tải khác nhau,

bao gồm tải trọng nén đúng tâm, tải trọng nén lệch tâm 25 mm và tải trọng nén lệch tâm 50 mm. Vị trí gia tải lên hệ thống cân được xác định như sau: khi trục gia tải của máy nén trùng với tâm hình học của hệ thống cân thì hệ thống chịu tác dụng của tải trọng nén đúng tâm. Khi tâm hình học của hệ thống cân được dịch chuyển theo phương dọc một khoảng 25 mm so với trục gia tải của máy nén thì hệ thống cân chịu tác dụng của tải trọng nén lệch tâm 25 mm. Tương tự, khi tâm hệ thống cân được dịch chuyển theo phương dọc một khoảng 50 mm so với trục gia tải của máy nén thì hệ thống cân chịu tác dụng của tải trọng nén lệch tâm 50 mm.



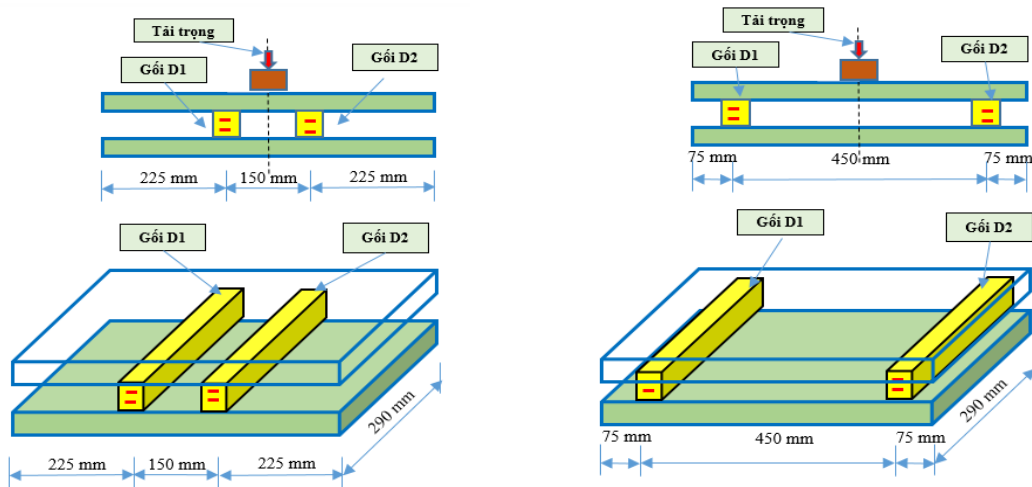
Hình 2.18. Chương trình thực nghiệm giai đoạn 3

Hình 2.18 trình bày chương trình thực nghiệm giai đoạn 3 nhằm xác định ứng xử điện trở của hệ gồm nhiều mẫu SSC có kích thước khác nhau khi được bố trí trong các mô hình hệ thống cân thu nhỏ trong phòng thí nghiệm. Ở giai đoạn này, các mẫu SSC làm việc đồng thời dưới tác dụng của tải trọng nén tại các vị trí gia tải khác nhau, qua đó đánh giá khả năng phản hồi tín hiệu điện của toàn hệ thống.

Nghiên cứu sử dụng hai loại kích thước mẫu, gồm $50 \times 50 \times 250$ mm và $50 \times 50 \times 50$ mm. Các thí nghiệm được thực hiện trên ba mô hình hệ thống cân, bao gồm: hệ cân gồm 2 mẫu kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm, hệ cân gồm 4 mẫu kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm và hệ cân gồm 6 mẫu kích thước $50 \times 50 \times 50$ mm. Việc thay đổi số lượng và kích thước mẫu nhằm đánh giá ảnh hưởng của cấu hình hệ cảm biến đến khả năng nhận

dạng tải trọng và tín hiệu điện tổng hợp của hệ thống. Các mô hình này được minh họa tại Hình 2.19 đến Hình 2.21.

➤ Mô hình thí nghiệm xác định ứng xử điện trở của hệ gồm 02 mẫu SSC có kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm, ký hiệu D1 và D2, làm việc đồng thời dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi, được mô tả tại Hình 2.19. Thông qua mô hình này, ứng xử điện trở của hệ mẫu SSC được khảo sát trong trạng thái chưa chịu tác dụng của tải trọng nén và trạng thái khi chịu tác dụng của tải trọng nén đúng tâm, xét cho 02 trường hợp với khoảng cách giữa 02 mẫu lần lượt là 150 mm và 450 mm.

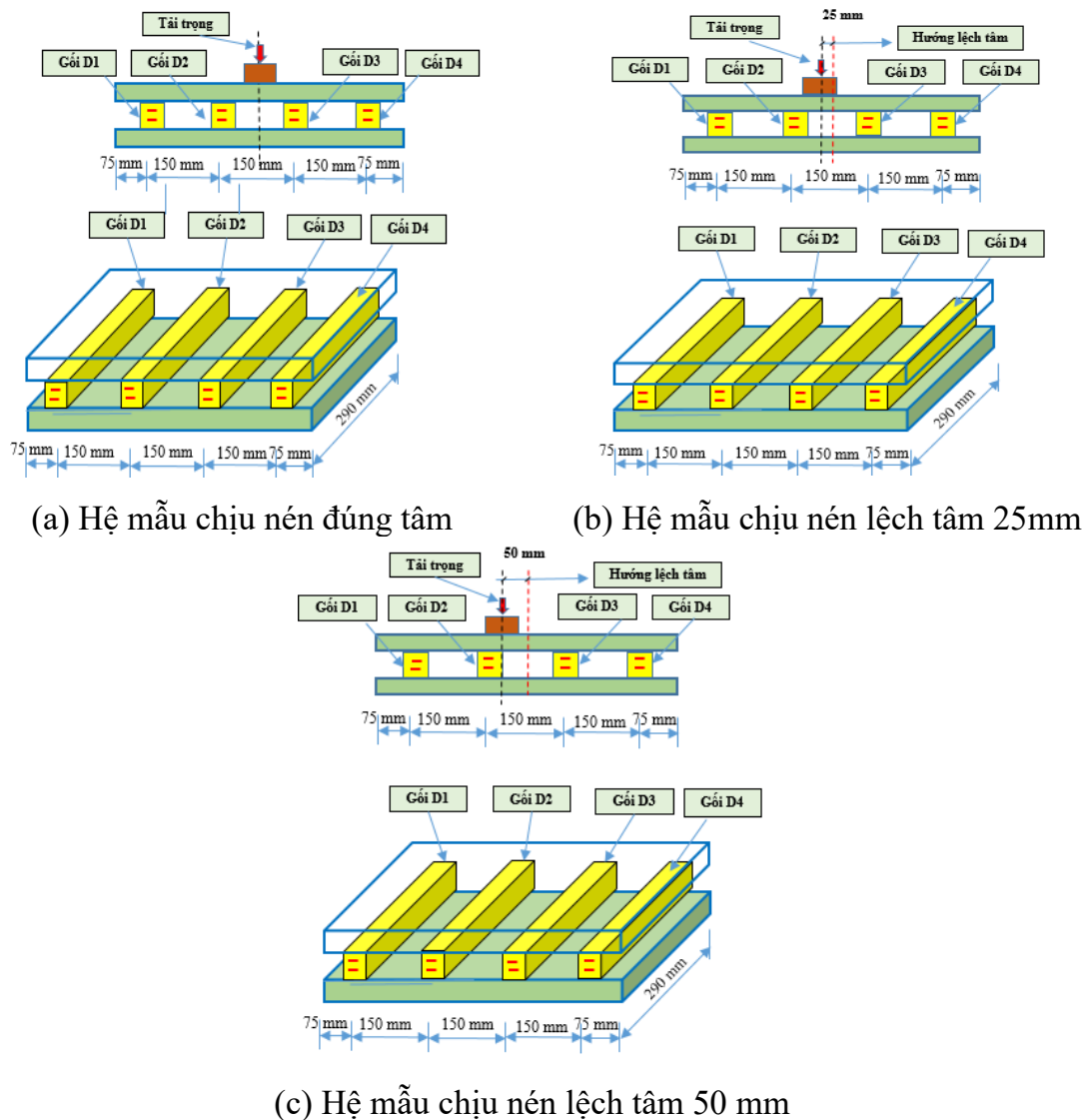


(a) Khoảng cách 02 mẫu 150 mm

(b) Khoảng cách 02 mẫu 450 mm

Hình 2.19. Mô hình thí nghiệm xác định ứng xử điện trở của hệ gồm 02 mẫu SSC kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm chịu tải trọng nén đúng tâm

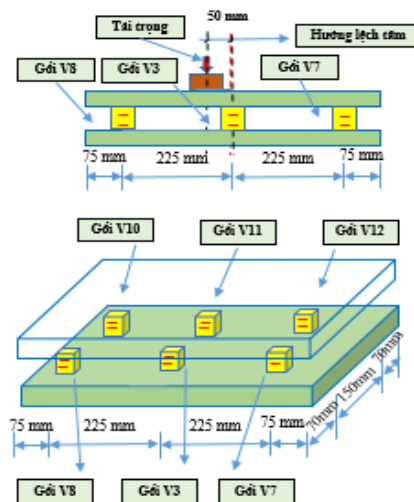
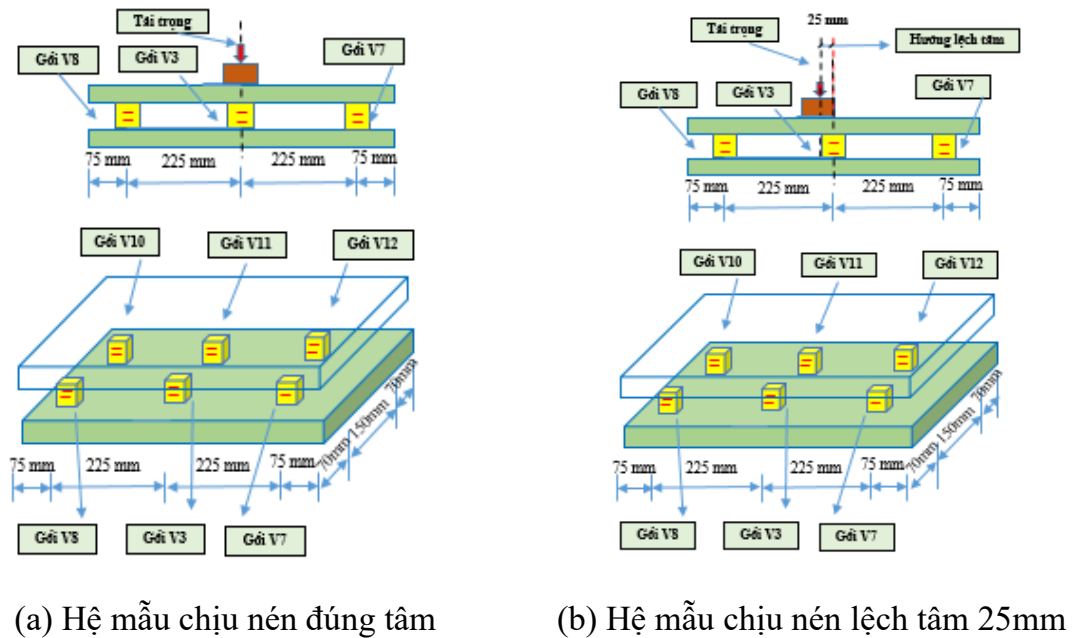
➤ Mô hình thí nghiệm xác định ứng xử điện trở của hệ gồm 04 mẫu SSC có kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm, ký hiệu D1, D2, D3 và D4, làm việc đồng thời dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi, với khoảng cách giữa các mẫu SSC theo chiều dọc cân là 150 mm. Ứng xử điện trở của hệ mẫu được xác định khi hệ cân chịu tác dụng của tải trọng nén tại các vị trí trên mặt cân, bao gồm: nén đúng tâm, nén lệch tâm 25 mm và nén lệch tâm 50 mm. Mô hình này được mô tả tại Hình 2.20.



Hình 2.20. Mô hình thí nghiệm xác định ứng xử điện trở của hệ gồm 04 mẫu SSC kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau

➤ Mô hình thí nghiệm xác định ứng xử điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC, ký hiệu V3, V7, V8, V10, V11 và V12, làm việc đồng thời dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi. Các mẫu được bố trí theo phương dọc của hệ cân với khoảng cách giữa các mẫu là 225 mm, tạo thành một hệ cảm biến gồm nhiều phần tử làm việc đồng thời khi chịu tải. Ứng xử điện trở của hệ mẫu được xác định thông qua sự thay đổi điện trở của toàn hệ dưới tác dụng của tải trọng nén đặt tại các vị trí khác nhau. Thí nghiệm được thực hiện trong ba trường hợp gia tải, bao gồm: nén đúng tâm, nén lệch tâm 25 mm và nén lệch tâm 50 mm. Việc thay đổi vị trí tác dụng của

tải trọng nhằm đánh giá ảnh hưởng của sự phân bố tải trọng hệ cân đến tín hiệu điện thu được từ các mẫu SSC. Mô hình thí nghiệm này được trình bày tại Hình 2.21.



(c) Hệ mẫu chịu nén lệch tâm 50 mm

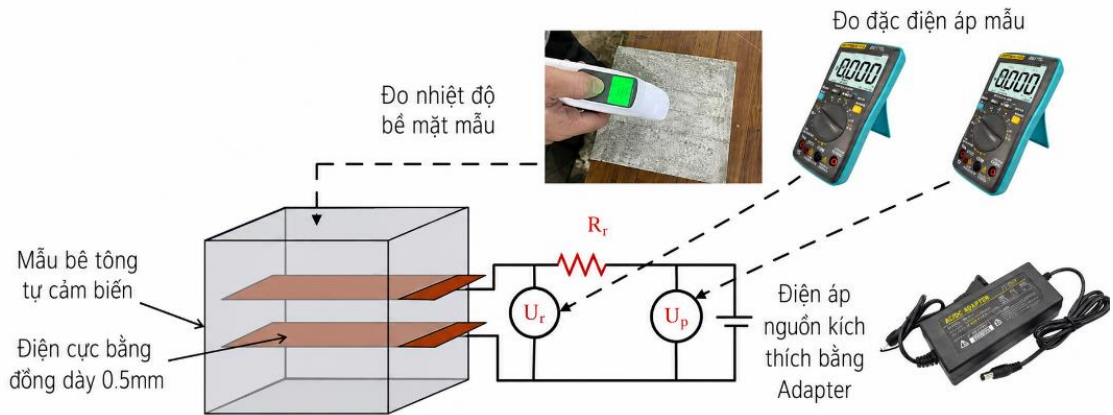
Hình 2.21. Mô hình thí nghiệm xác định ứng xử điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC kích thước $50 \times 50 \times 50$ mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau

2.6. Phương pháp thí nghiệm

2.6.1. Thí nghiệm xác định điện trở suất ban đầu của mẫu SSC khi không có tải trọng tác dụng

Để xác định điện trở suất của mẫu SSC khi chưa chịu tải, hai phương pháp đo

phổ biến là phương pháp bốn điện cực và hai điện cực [93]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, phương pháp hai điện cực được lựa chọn dựa trên các nghiên cứu trước đây [10,94,95]. Hình 2.22 trình bày sơ đồ đo điện trở suất ban đầu của mẫu SSC trong điều kiện chưa chịu tải.



Hình 2.22. Sơ đồ đo điện trở suất ban đầu của mẫu SSC khi chưa chịu tải

Mẫu SSC được coi là một điện trở có giá trị ký hiệu là R_s và được mắc nối tiếp với một điện trở trung gian có giá trị điện trở không đổi (R_r). Mạch được nối với nguồn điện có điện áp U_p . Trong sơ đồ mạch điện, giá trị điện áp U_s giữa 02 điện cực của mẫu SSC được đo bằng vôn kế. Vì R_s mắc nối tiếp với R_r nên cường độ dòng điện chạy qua cả 02 điện trở là bằng nhau, nghĩa là:

$$I_s = I_r = \frac{(U_p - U_s)}{R_r} \quad (2.1)$$

Do đó, điện trở R_s của mẫu có thể được tính bằng công thức sau:

$$R_s = \frac{U_s}{I_s} = \frac{U_s R_r}{(U_p - U_s)} \quad (2.2)$$

Dựa vào mối quan hệ giữa điện trở suất ρ_s và điện trở R_s của mẫu, công thức tính điện trở suất dựa trên các thông số như sau:

$$\rho_s = \frac{a}{L} R_s = \frac{a U_s R_r}{L (U_p - U_s)} \quad (2.3)$$

Trong đó: a là diện tích tiếp xúc giữa điện cực và mẫu bê tông (mm^2), L là khoảng cách giữa 02 điện cực (mm). Giá trị ρ_s được tính khi các giá trị trên thiết bị đo điện áp U_s và U_p ở trạng thái ổn định và không thay đổi theo thời gian.

Trong nghiên cứu này, phép đo điện trở suất được thực hiện nhằm xác định điện trở suất ban đầu của mẫu bê tông tự cảm biến ở trạng thái chưa chịu tải bằng phương pháp DC hai điện cực. Hệ thống đo gồm nguồn điện một chiều sử dụng adapter với các mức điện áp 5 V, 12 V và 24 V tùy theo đặc tính điện của mẫu; hai điện cực bằng đồng dày 0,5 mm bố trí cố định trong mẫu; đồng hồ vạn năng số Keysight 34461A để đo điện trở suất ban đầu trên mẫu và thiết bị đo nhiệt độ bề mặt để theo dõi sự thay đổi nhiệt độ trong quá trình đo.

Trong quá trình thực nghiệm, điện áp một chiều được cấp ổn định vào hai điện cực của mẫu. Sau khi cấp điện, hệ thống được duy trì trong khoảng 60 s trước khi ghi nhận kết quả nhằm hạn chế ảnh hưởng của trạng thái quá độ ban đầu. Giá trị điện áp được đọc trực tiếp bằng đồng hồ vạn năng số khi tín hiệu đạt trạng thái ổn định, được xác định khi giá trị hiển thị không thay đổi đáng kể trong khoảng 10 s liên tục. Điện trở của mẫu được xác định theo định luật Ohm và điện trở suất được tính toán dựa trên điện trở đo được cùng các thông số hình học của mẫu.

Thiết bị đo điện áp sử dụng là đồng hồ vạn năng số có độ phân giải đến 0,001 V, độ chính xác khoảng $\pm(0,5-1)\%$ giá trị đọc theo thông số kỹ thuật của thiết bị. Trước khi đo, thiết bị được kiểm tra trạng thái hoạt động nhằm đảm bảo độ ổn định của phép đo.

Đối với phương pháp DC hai điện cực, kết quả đo bao gồm ảnh hưởng của điện trở vật liệu và điện trở tiếp xúc điện cực–mẫu. Ảnh hưởng này được hạn chế bằng cách sử dụng cùng loại điện cực, cố định vị trí bố trí điện cực và duy trì điều kiện tiếp xúc thống nhất giữa các mẫu. Ngoài ra, hiện tượng phân cực điện cực và gia nhiệt Joule được giảm thiểu thông qua việc lựa chọn điện áp kích thích phù hợp, kiểm soát thời gian cấp điện và theo dõi nhiệt độ mẫu trong quá trình đo. Kết quả quan sát cho thấy nhiệt độ mẫu không thay đổi đáng kể trong thời gian đo.

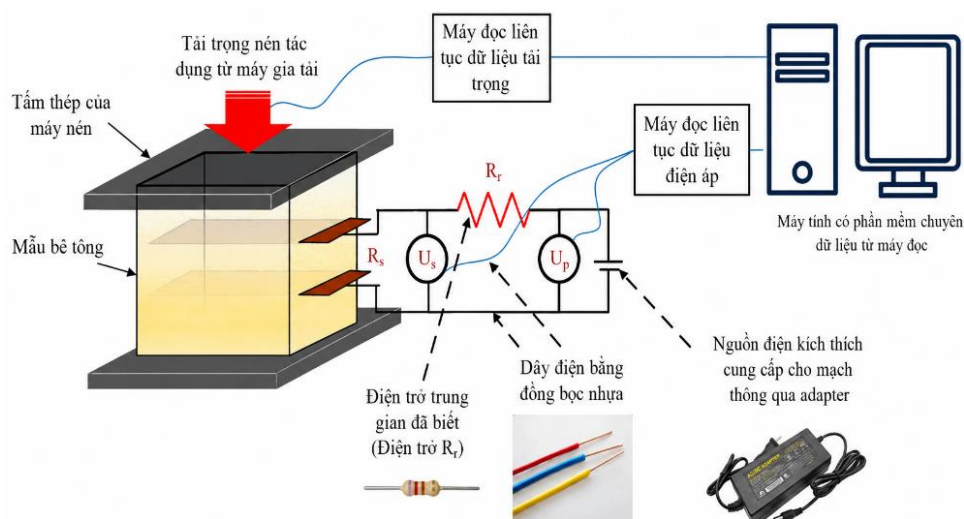
Độ không đảm bảo đo được xem xét từ các nguồn sai số chính gồm: sai số thiết bị đo ($\pm(0,5-1)\%$ giá trị đọc), sai số kích thước hình học mẫu, sự không đồng nhất vật liệu và điện trở tiếp xúc điện cực–mẫu. Do sử dụng phương pháp DC hai điện cực,

nguyên cứu đánh giá ảnh hưởng các nguồn sai số thay vì xác định sai số tổng hợp tuyệt đối. Quy trình đo thống nhất đảm bảo độ tin cậy của kết quả

2.6.2. Thí nghiệm ứng xử điện trở của mẫu SSC hoạt động độc lập dưới tác dụng của tải trọng nén

Mối quan hệ giữa sự biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu được khảo sát thông qua sơ đồ thí nghiệm như trong Hình 2.23. Mẫu SSC đặt trong máy thử tải trọng nén sẽ được nối với mạch điện trước khi gia tải. Trong quá trình gia tải, tín hiệu điện trở được ghi nhận đồng thời với sự thay đổi tải trọng nhằm xác định mối quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén. Các điều kiện đo điện được duy trì không đổi giữa các mẫu nhằm loại bỏ ảnh hưởng của các yếu tố ngoài tải trọng đến sự thay đổi tín hiệu điện trở.

Mẫu thử được xem là một điện trở (R_s) và được nối với mạch điện thông qua 02 điện cực làm bằng đồng. R_s này được mắc nối tiếp với một điện trở trung gian có giá trị không đổi R_r . Thông qua việc đo điện áp cấp cho mạch U_p và điện áp U_s giữa 02 điện cực R_s , điện trở suất của mẫu SSC giữa 02 điện cực này có thể được xác định theo phương pháp trình bày dưới đây.



Hình 2.23. Sơ đồ mạch điện thí nghiệm mẫu đơn chịu tác dụng tải trọng nén

Khi điện trở R_s được mắc nối tiếp với điện trở R_r , dòng điện chạy qua 02 điện trở là như nhau. Do đó, theo định luật Ohm, công thức (2.4) được thiết lập như sau:

$$I(t) = I_s(t) = I_r(t) = \frac{U_s(t)}{R_s(t)} = \frac{U_r(t)}{R_r} = \frac{U_p(t) - U_s(t)}{R_r} \quad (2.4)$$

Trong đó $I(t)$, $I_s(t)$ và $I_r(t)$ lần lượt là dòng điện chạy qua toàn bộ mạch, qua R_s và qua R_r ở bước gia tải trọng nén t ; $U_s(t)$ và $U_r(t)$ là điện áp giữa 02 điện cực R_s và R_r tại bước gia tải trọng nén t ; $R_s(t)$ là điện trở của mẫu SSC ở bước gia tải trọng nén t , R_r là điện trở trung gian có giá trị không đổi. Do đó, giá trị $R_s(t)$ cho mẫu SSC ở bước gia tải t có thể được xác định bằng công thức (2.5) như sau.

$$R_s(t) = R_r \frac{U_s(t)}{U_p(t) - U_s(t)} \quad (2.5)$$

Thiết lập công thức dựa trên mối quan hệ giữa điện trở suất $\rho_s(t)$ và điện trở $R_s(t)$, với a (mm^2) là diện tích tiếp xúc giữa điện cực và bê tông và L (mm) là khoảng cách giữa 02 điện cực

$$\rho_s(t) = R_s(t) \frac{a}{L} = R_r \frac{a U_s(t)}{L(U_p(t) - U_s(t))} \quad (2.6)$$

Dưới tác dụng của tải trọng nén lên mẫu, giá trị điện trở suất thu được có thể được tính toán theo Công thức (2.6). Theo đó, sự biến thiên điện trở suất của mẫu SSC tại bước gia tải t so với giá trị điện trở suất ban đầu trong điều kiện không chịu tải được biểu diễn thông qua đại lượng $\Delta\rho_s(t)$, được xác định như sau:

$$\Delta\rho_s(t) = \rho_s(t) - \rho_{s(0)} \quad (2.7)$$

Trong đó, $\rho_{s(0)}$ biểu thị điện trở suất ban đầu của mẫu SSC khi chưa chịu tác dụng tải trọng. Vì cường độ dòng điện có thể ảnh hưởng đến giá trị đo đặc điện trở suất đối với các vật liệu có tính dẫn điện thấp, nên cần phải đo $\rho_{s(0)}$ trong cùng điều kiện của thiết bị và sơ đồ mạch điện như trong Hình 2.22. Ngoài ra, điều kiện nhiệt độ và độ ẩm cũng ảnh hưởng đáng kể đến điện trở suất của vật liệu [50,96,97]. Do đó, $\rho_{s(0)}$ không phải là một giá trị không đổi mà bị ảnh hưởng bởi nhiều thông số thực nghiệm khác nhau.

Bên cạnh việc đánh giá sự thay đổi tuyệt đối của điện trở hoặc điện trở suất, một số nghiên cứu về bê tông tự cảm biến sử dụng đại lượng FCR (Fractional Change in Resistance/Resistivity) để biểu diễn mức độ thay đổi tương đối của tín hiệu điện so với giá trị ban đầu ($\text{FCR} = \frac{\Delta\rho_s(t)}{\rho_{s(0)}}$). FCR có ưu điểm trong việc chuẩn hóa ảnh hưởng

của giá trị điện trở suất ban đầu và thuận lợi khi so sánh khả năng cảm biến giữa các loại SSC khác nhau. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, biến thiên điện trở/điện trở suất được lựa chọn làm đại lượng chính nhằm phản ánh trực tiếp mức độ thay đổi tính chất điện của SSC dưới tác dụng của ứng suất, đồng thời làm rõ mối quan hệ định lượng giữa ứng suất và đáp ứng điện của vật liệu. Giá trị điện trở suất ban đầu được xem xét riêng nhằm đánh giá ảnh hưởng của thành phần vật liệu và điều kiện môi trường đến đặc tính điện của SSC.

Mặt khác, ứng suất nén $\sigma_c(t)$ sinh ra trên mẫu SSC trong bước gia tải t có thể được tính toán dựa trên giá trị tải trọng, được gọi là $P(t)$, được ghi lại bởi cảm biến tải trọng đặt phía trên mẫu trong quá trình thử tải

$$\sigma_c(t) = \frac{P(t)}{A} \quad (2.8)$$

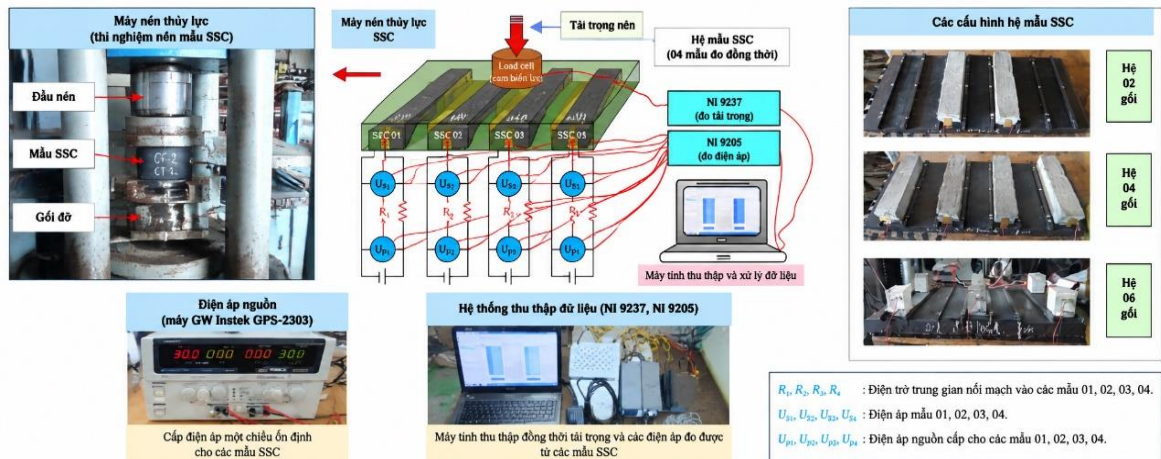
Trong đó, $P(t)$ là tải trọng tại bước tải (t) và (A) là diện tích mặt chịu nén ban đầu của mẫu SSC. Trong các thí nghiệm ở vùng ứng suất thấp, không vượt quá khoảng 1/5 cường độ chịu nén, ảnh hưởng của biến dạng ngang do hiệu ứng Poisson đến diện tích chịu tải được xem là không đáng kể và có thể bỏ qua [98].

Trong thí nghiệm nén mẫu SSC hoạt động độc lập, tải trọng được gia tăng với tốc độ từ 0,2 MPa/s đến 1,0 MPa/s. Tốc độ gia tải này được lựa chọn nhằm đảm bảo mẫu SSC làm việc trong phạm vi nén đàn hồi, đồng thời phù hợp với mục tiêu đánh giá sự thay đổi điện trở suất của vật liệu dưới tác dụng của tải trọng nén.

Trong phép đo điện trở suất bằng phương pháp DC hai điện cực, giá trị điện trở đo được có thể chịu ảnh hưởng của cấu hình điện cực, điện trở tiếp xúc giữa điện cực và mẫu, cũng như sự phân bố dòng điện trong vùng gần điện cực. Do đó, giá trị điện trở suất xác định theo công thức trên được xem là điện trở suất biểu kiến phụ thuộc vào điều kiện hình học của phép đo. Trong nghiên cứu này, các mẫu SSC được thực hiện đo trong cùng điều kiện về kích thước mẫu, loại điện cực, vị trí tiếp xúc và chế độ cấp điện. Vì vậy, ảnh hưởng của hệ số hình học và điện trở tiếp xúc được duy trì thống nhất giữa các phép đo. Mục

tiêu chính của phép đo là đánh giá khả năng tự cảm biến điện của SSC thông qua sự thay đổi điện trở suất dưới tác dụng tải trọng.

2.6.3. Thí nghiệm ứng xử điện trở của hệ gồm nhiều mẫu SSC dưới tác dụng của tải trọng nén



Hình 2.24. Bố trí thí nghiệm nén và hệ thống đo điện trở đồng thời của các mẫu SSC

Để thực hiện thí nghiệm xác định ứng xử điện trở của hệ mẫu SSC chịu tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi lên mặt bàn cân, sơ đồ bố trí thí nghiệm nén và hệ thống đo điện trở đồng thời của các mẫu SSC được thể hiện tại Hình 2.24. Tải trọng nén tác dụng lên hệ thống cân thông qua một cảm biến tải trọng được đặt ở trung tâm, cho phép đo lường tải trọng liên tục trong quá trình chịu tải. Tốc độ gia tải dao động từ 0,2 MPa/s đến 1,0 MPa/s, tải trọng tác dụng lên mặt bàn cân đảm bảo trong phạm vi nén đàn hồi. Trong phạm vi này, bên trong các mẫu SSC chưa ghi nhận dấu hiệu vi nứt, do đó cho phép chúng được sử dụng nhiều lần trong các thí nghiệm.

Mỗi mẫu SSC được kết nối với mạch điện độc lập như tại Hình 2.23. Cụ thể, từng mẫu bê tông được xem như một điện trở được kết nối với mạch điện thông qua 2 điện cực; điện trở này được mắc nối tiếp với 1 điện trở trung gian. Điện trở trung gian có công suất định mức là 5 W, điện áp kích thích sử dụng nguồn Instek SPD-3606, có khả năng cung cấp dải điện áp ổn định từ (1-30) V. Cảm biến tải trọng (load cell) được kết nối với đầu đọc National Instruments NI-9237 để đo đặc giá trị biến thiên tải trọng, trong khi đầu đọc NI-9205 đo liên tục giá trị điện áp mẫu SSC (U_s)

khi thay đổi tải trọng nén. Dữ liệu từ các đầu đọc này được chuyển đổi thành dữ liệu máy tính bằng phần mềm NI Signal Express - 2015. Ứng xử điện trở của hệ nhiều mẫu bê tông làm việc đồng thời dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi được thực hiện tại các vị trí khác nhau trên mặt cân giống như mô hình hệ thống cân thu nhỏ. Tại mỗi vị trí chịu tải, phép đo được thực hiện lặp lại hai lần nhằm đảm bảo tính tái lập và độ tin cậy của kết quả thí nghiệm.

Nguyên lý đo đặc các thông số cho từng mẫu trong sơ đồ nối mạch tại Hình 2.23 thực hiện như sau: Dưới tác dụng tải trọng lên mặt cân và từng điện áp nguồn kích thích cho từng mẫu, ở mỗi bước gia tải t , cường độ dòng điện qua mẫu SSC được xác định theo công thức (2.4); điện trở của mẫu SSC được xác định theo công thức (2.5); điện trở suất của mỗi mẫu SSC được xác định theo công thức (2.6); biến thiên điện trở mỗi mẫu SSC ở bước chịu tải t so với điện trở ban đầu $R_{s(0)}$ khi chưa chịu tác dụng tải trọng có thể được xác định bởi giá trị $\Delta R_s(t)$ như sau:

$$\Delta R_s(t) = R_s(t) - R_{s(0)} \quad (2.9)$$

Trong đó, giá trị điện trở ban đầu $R_{s(0)}$ của từng mẫu thực hiện theo Mục 2.6.1

Mặt khác, vì hệ gồm nhiều mẫu bê tông được sử dụng trong thí nghiệm, các giá trị biến thiên điện trở cho mỗi mẫu là $\Delta R_{s1}(t)$, $\Delta R_{s2}(t)$... $\Delta R_{sn}(t)$ tương ứng. Do đó, giá trị tổng biến thiên điện trở của hệ thống dưới tác dụng của tải trọng có thể được tính như là tổng của sự biến thiên điện trở ở tất cả các mẫu, tức là:

$$\Sigma \Delta R_s(t) = \Delta R_{s1}(t) + \Delta R_{s2}(t) + \dots + \Delta R_{sn}(t) \quad (2.10)$$

2.6.4. Các hạng mục thí nghiệm khác

- **Thí nghiệm xác định độ ẩm của mẫu bê tông:** Độ ẩm của mẫu được xác định theo Phụ lục B, TCVN 3115:2022 - Bê tông - Phương pháp xác định khối lượng thể tích [101].

- **Phân tích vi cấu trúc vật liệu bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM):** Các mẫu thử được chọn để quan sát sự phân tán của muội than đen, sợi carbon trong bê tông. Trước khi chụp ảnh bằng SEM trong buồng chân không, các mẫu sẽ được phủ kim loại trên bề mặt mẫu bằng bạch kim. Việc quan sát SEM được thực hiện bởi JSM-6010PLUS/LV của hãng JEOL. Các phương pháp chuẩn bị mẫu cho SEM thực hiện

theo ISO 21383 [102]. Hình 2.25 mô tả thực hiện phân tích vi cấu trúc vật liệu.



Hình 2.25. Phân tích vi cấu trúc vật liệu

- **Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của SSC:** Cường độ chịu nén của các mẫu SSC được xác định ở tuổi 28 ngày theo TCVN 3118:2022 [99]. Các mẫu thử được lấy, chế tạo và bảo dưỡng theo TCVN 3105:2022, mỗi tổ gồm 3 viên mẫu lập phương kích thước $150 \times 150 \times 150$ mm. Cường độ chịu nén của tổ mẫu được xác định bằng giá trị trung bình của ba viên mẫu khi kết quả thỏa mãn giới hạn sai lệch 15% theo TCVN 3118:2022. Hình 2.26 trình bày quá trình thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của mẫu SSC.



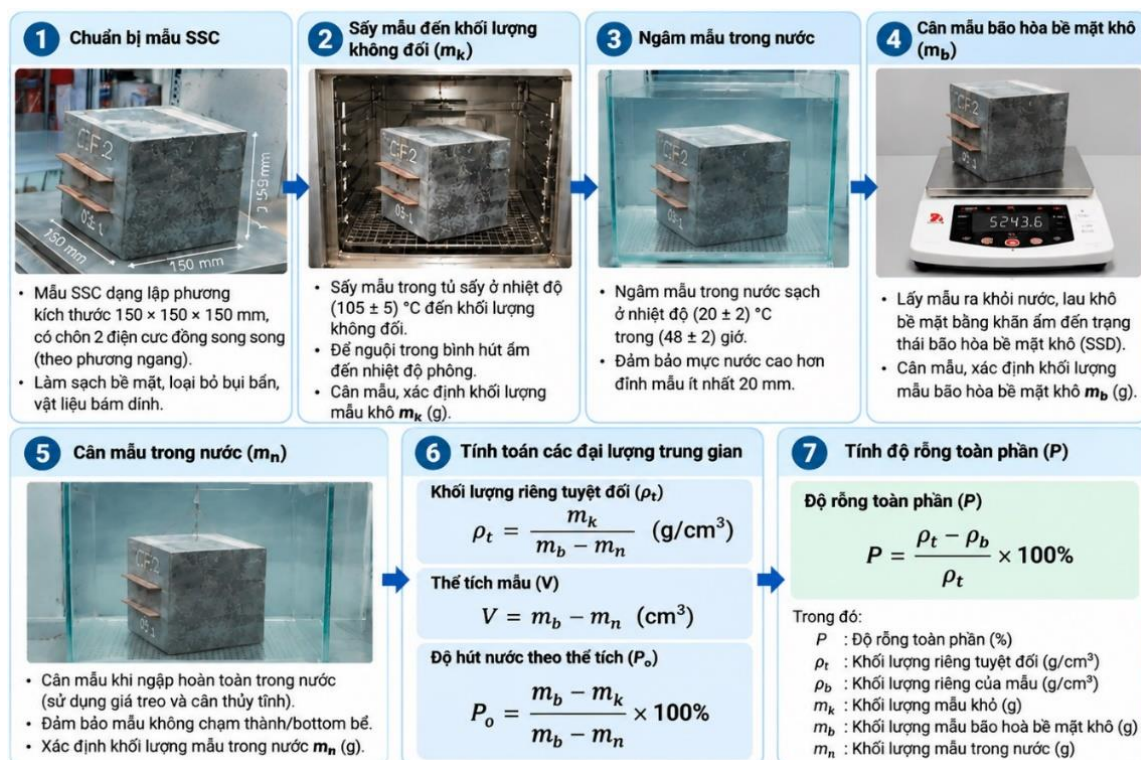
Hình 2.26. Thí nghiệm cường độ chịu nén của mẫu SSC

- **Thí nghiệm đo nhiệt độ mẫu bê tông:** Nhiệt độ được đo trên bề mặt của từng mẫu ngay trước mỗi lần đo điện trở suất. Việc đo nhiệt độ được thực hiện bằng nhiệt kế hồng ngoại không tiếp xúc (model Kaneko A200, Nhật Bản) với độ chính xác

khoảng $\pm(1-2)^{\circ}\text{C}$, độ phân giải $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ theo thông số kỹ thuật của nhà sản xuất. Nhiệt độ mẫu được đo như sau:

- + Hướng thiết bị vuông góc với bề mặt bê tông
- + Giữ đúng khoảng cách theo hướng dẫn của thiết bị
- + Tránh ánh nắng trực tiếp hoặc bề mặt ướt
- + Đọc và ghi kết quả

- **Thí nghiệm xác định độ rỗng của SSC:** Độ rỗng của mẫu thử được xác định theo TCVN 3112:2022 Bê tông – Phương pháp xác định khối lượng riêng và độ rỗng [100]. Độ rỗng của mẫu được xác định là độ rỗng toàn phần của mẫu là tỷ lệ thể tích các lỗ rỗng có trong bê tông trên tổng thể tích của nó. Hình 2.27 mô tả quy trình xác định độ rỗng toàn phần của mẫu SSC dựa trên phương pháp xác định khối lượng thể tích theo TCVN 3115:2022.



Hình 2.27. Quy trình xác định độ rỗng toàn phần của mẫu SSC

Như vậy, chương 2 đã trình bày toàn bộ chương trình thực nghiệm. Nội dung bao gồm việc giới thiệu và mô tả chi tiết các nguyên liệu sử dụng để chế tạo SSC, nguyên tắc và phương pháp thiết kế các cấp phối cho 03 giai đoạn thực nghiệm khác nhau,

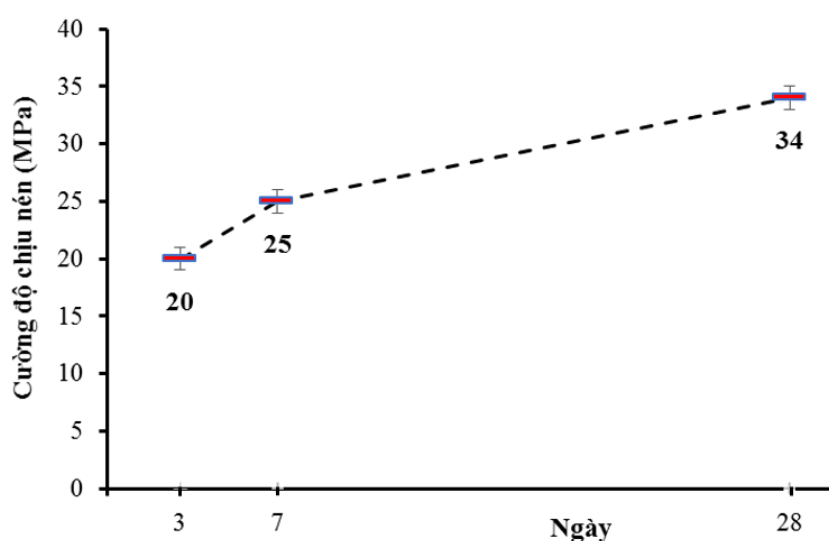
cũng như quy trình trộn hỗn hợp SSC có chứa vật liệu dẫn điện khác nhau. Bên cạnh đó, các quy trình chuẩn bị mẫu thí nghiệm, cách bố trí và quy hoạch các giai đoạn thực nghiệm cũng được trình bày nhằm đảm bảo tính hệ thống và khả năng so sánh kết quả. Các phương pháp thí nghiệm được xây dựng để xác định điện trở suất ban đầu của mẫu SSC trong điều kiện không chịu tải, ứng xử điện trở của mẫu SSC hoạt động độc lập dưới tác dụng của tải trọng nén, và ứng xử điện trở của hệ mẫu SSC làm việc đồng thời dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi. Ngoài ra, các hạng mục thí nghiệm bổ trợ được trình bày nhằm hoàn thiện chương trình nghiên cứu, tạo cơ sở cho việc phân tích, đánh giá kết quả và xây dựng các mô hình dự đoán trong các chương tiếp theo.

CHƯƠNG 3. CƠ CHẾ ỨNG XỬ CƠ BẢN CỦA BÊ TÔNG TỰ CẢM BIẾN SỬ DỤNG MUỘI THAN ĐEN DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NÉN

3.1. Cường độ chịu nén các mẫu và phân tích vi cấu trúc

Đầu tiên, chín mẫu CB7 được thí nghiệm xác định cường độ chịu nén tại các ngày tuổi 3, 7 và 28. Kết quả cho thấy cường độ chịu nén trung bình của mẫu lần lượt đạt 20,0 MPa, 25,0 MPa và 34,0 MPa, được thể hiện tại Hình 3.1. Độ lệch chuẩn của các kết quả dao động trong khoảng từ 0,60 MPa đến 1,00 MPa, cho thấy sự phân tán giữa các mẫu thí nghiệm tương đối nhỏ. Kết quả thí nghiệm được tổng hợp trong Bảng 3.1. Sự gia tăng cường độ theo thời gian bảo dưỡng phản ánh quá trình thủy hóa của chất kết dính tiếp tục diễn ra, góp phần nâng cao khả năng chịu lực của vật liệu. Đồng thời, giá trị độ lệch chuẩn thấp cho thấy vật liệu có tính đồng nhất tương đối tốt, đồng thời khẳng định độ tin cậy của quy trình chế tạo mẫu, bảo dưỡng và thí nghiệm cường độ nén được áp dụng trong nghiên cứu.

Cường độ chịu nén của mẫu ở 28 ngày tuổi là 34 MPa, đáp ứng yêu cầu thiết kế là 30 MPa cho SSC sau 28 ngày được bảo dưỡng. Do đó, thí nghiệm gia tải để khảo sát sự biến thiên điện trở suất của mẫu SSC trong phạm vi ứng suất nén bằng 1/2 cường độ nén thực tế của mẫu, tương đương 17 MPa.

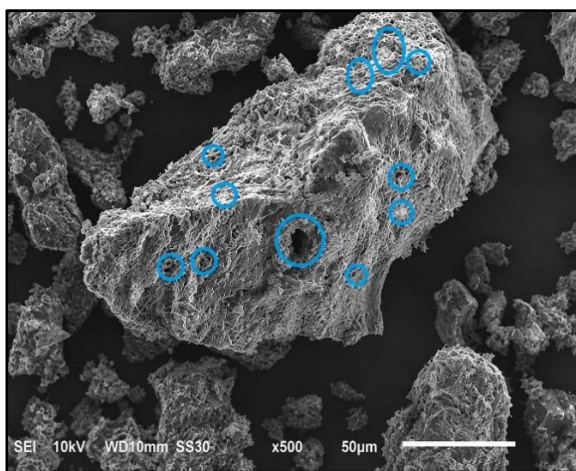


Hình 3.1. Cường độ chịu nén trung bình của các mẫu CB7 ở các ngày tuổi

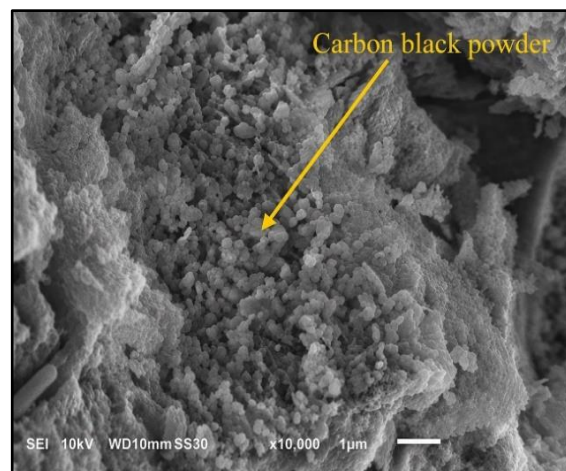
Bảng 3.1. Kết quả cường độ chịu nén của mẫu ở các ngày tuổi

Tuổi mẫu (ngày)	Mẫu 1 (MPa)	Mẫu 2 (MPa)	Mẫu 3 (MPa)	Cường độ chịu nén trung bình (MPa)	Độ lệch chuẩn S_{td} (MPa)
3	19,4	20	20,6	20	0,6
7	24,3	25	25,7	25	0,7
28	33	34	35	34	1

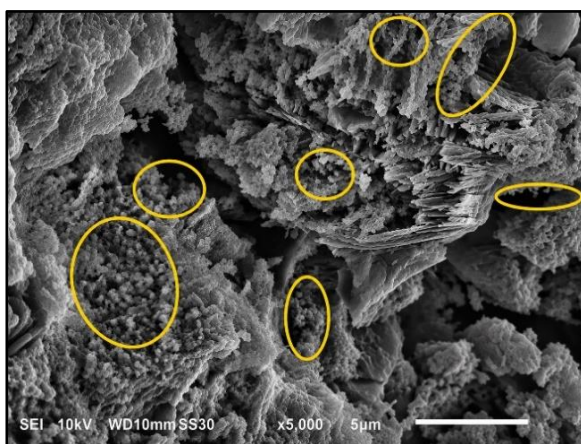
Tiếp theo, nghiên cứu tiến hành phân tích vi cấu trúc của mẫu CB7. Hình 3.2 trình bày kết quả quan sát SEM của mẫu CB7.



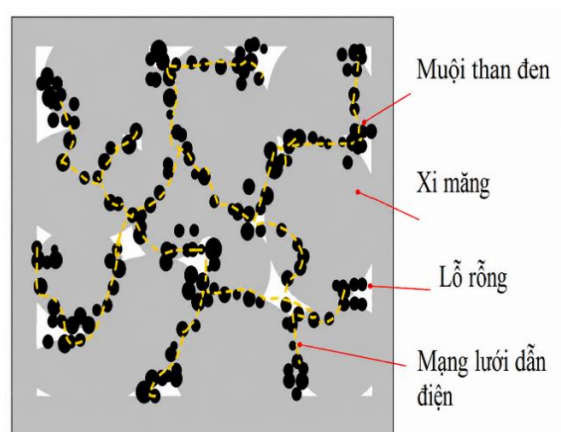
(a) Các lỗ rỗng trong bê tông
(Độ phóng đại: 500)



(b) Muội than đen trong bê tông
(Độ phóng đại: 10.000)



(c) Sự phân tán của muội than đen trong
bê tông (Độ phóng đại: 5.000)



(d) Hình ảnh phân tán của muội than
đen trong bê tông

Hình 3.2. SEM mẫu SSC CB7

Hình 3.2 là ảnh SEM của mẫu CB7 được sử dụng trong nghiên cứu. Các vùng được khoanh và chỉ dẫn được nhận dạng là vùng chứa muối than đen dựa trên đặc điểm hình thái dạng hạt nhỏ, xu hướng kết tụ trong nền hồ xi măng, sự phù hợp với thành phần cấp phối SSC có bổ sung muối than đen và sự đối chiếu với các nghiên cứu trước đây về đặc điểm vi cấu trúc của vật liệu xi măng chứa muối than đen. Do ảnh SEM chủ yếu phản ánh đặc điểm hình thái và sự phân bố của các pha, việc xác định chính xác thành phần hóa học của từng vùng cần được kết hợp với các phương pháp phân tích chuyên sâu khác.

Hình 3.2(a) cho thấy các lỗ rỗng trong mẫu SSC, được đánh dấu bằng các vùng tròn màu xanh, có kích thước khoảng (2–10) μm . Việc bổ sung muối than đen làm chất độn dẫn điện có thể làm gia tăng độ rỗng; tuy nhiên, sử dụng phụ gia siêu dẻo kết hợp phương pháp trộn ướt giúp cải thiện khả năng phân tán muối than và hạn chế hình thành các lỗ rỗng lớn trong mẫu.

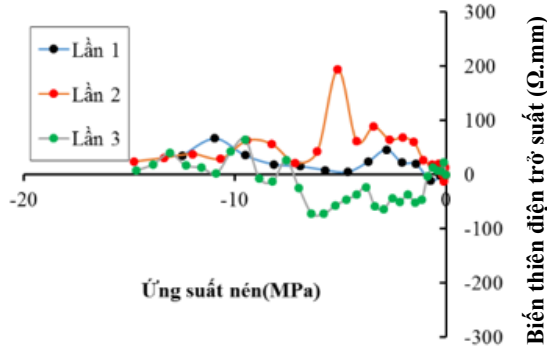
Hình 3.2(b), ở độ phóng đại 10.000 lần, cho thấy các hạt muối than đen có kích thước tương đối đồng đều nhưng xuất hiện hiện tượng kết tụ cục bộ. Ở độ phóng đại 5.000 lần [Hình 3.2(c)], các vùng kết tụ được đánh dấu màu vàng có kích thước khoảng (1–5) μm , lớn hơn đáng kể so với kích thước hạt muối than đen ở cấp nanomet. Khoảng cách giữa các vùng kết tụ dao động khoảng (1–10) μm , cho thấy muối than đen nhìn chung được phân tán tương đối trong nền SSC, mặc dù vẫn tồn tại một số vùng kết tụ cục bộ.

Hình 3.2(d) cho thấy sự kết tụ cục bộ và phân tán ngẫu nhiên của muối than đen trong nền SSC. Các cụm muối than có thể hình thành các đường dẫn điện trong vật liệu. Đồng thời, một số lỗ rỗng xuất hiện xung quanh vùng chứa muối than do vật liệu này chủ yếu đóng vai trò chất độn dẫn điện và không tham gia đáng kể vào phản ứng hóa học với nền xi măng [103]. Các lỗ rỗng có thể chứa không khí hoặc nước, do đó độ ẩm có ảnh hưởng đến tính dẫn điện của SSC. Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của độ ẩm được hạn chế bằng cách sấy mẫu đến khối lượng không đổi trước khi thí nghiệm.

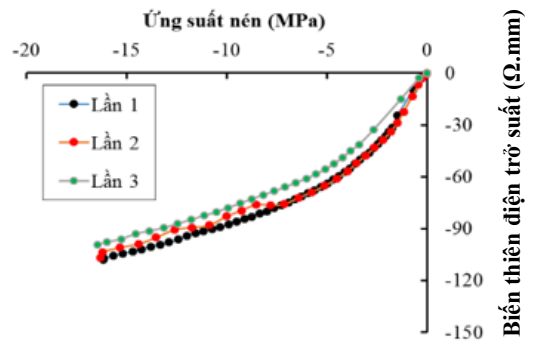
Kết quả phân tích vi cấu trúc tại Hình 3.2 là cơ sở để giải thích cơ chế biến thiên

điện trở suất của SSC dưới tác dụng của ứng suất nén trong các phần tiếp theo.

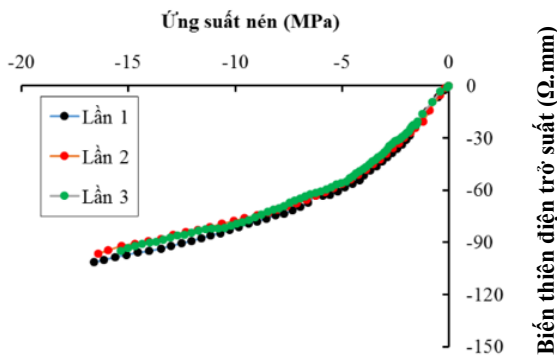
3.2. Quan hệ điện trở suất - ứng suất nén và cơ chế cơ bản của ứng xử điện trở suất của SSC



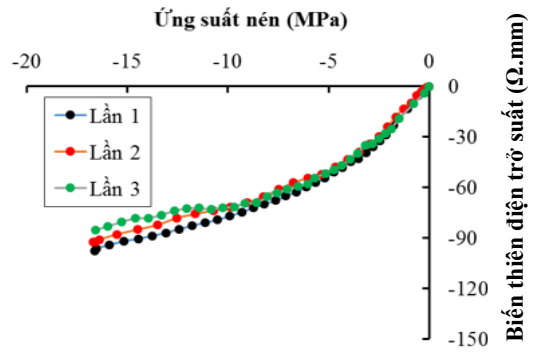
(a) $U_p = 12V$, $R_r = 820 \Omega$



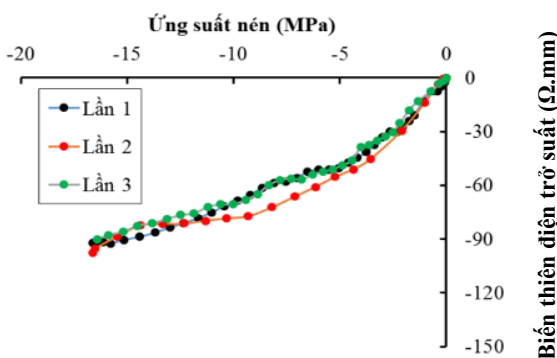
(b) $U_p = 24V$, $R_r = 680 \Omega$



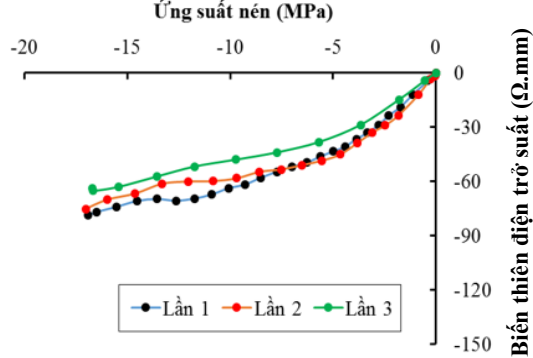
(c) $U_p = 24V$, $R_r = 820 \Omega$



(d) $U_p = 24V$, $R_r = 1000 \Omega$



(e) $U_p = 24V$, $R_r = 2200 \Omega$



(f) $U_p = 24V$, $R_r = 3250 \Omega$

Hình 3.3. Quan hệ giữa sự biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu W150L40

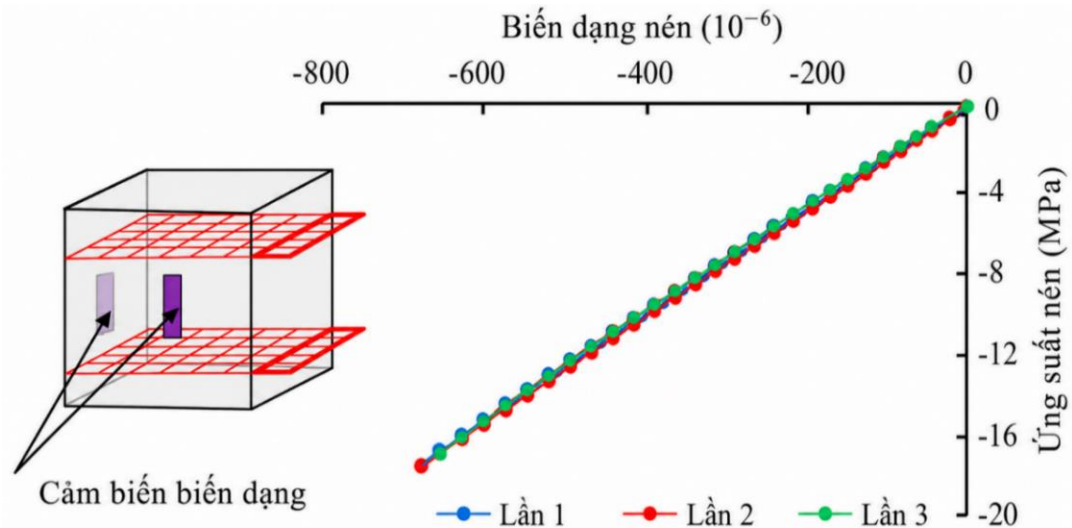
Hình 3.3 trình bày mối quan hệ giữa biến thiên điện trở suất ($\Delta\rho_s(t)$) và ứng suất nén $\sigma(t)$ (Phụ lục 3.1). Kết quả này được sử dụng để đánh giá mức độ ảnh hưởng của ứng suất nén đến sự thay đổi điện trở suất của SSC trong quá trình gia tải.

Hình 3.3(a) đến Hình 3.3(f) trình bày mối quan hệ nêu trên của mẫu W150L40 trong các điều kiện thí nghiệm khác nhau về điện áp kích thích và điện trở trung gian. Mỗi thí nghiệm được thực hiện lặp lại ba lần nên trong mỗi hình thể hiện ba đường với các màu khác nhau tương ứng với mỗi lần đo.

Hình 3.3(a) cho thấy mối quan hệ giữa $\Delta\rho_s(t)$ và $\sigma_c(t)$ thể hiện tính không ổn định và khả năng tái lặp kém qua ba lần đo khi điện áp nguồn $U_p = 12\text{ V}$ và điện trở trung gian $R_r = 820\ \Omega$. Do đó, với điện áp nguồn chỉ ở mức 12 V, không thể quan sát rõ ràng mối quan hệ giữa sự biến thiên điện trở suất của SSC và ứng suất nén tác dụng. Do đó, điện áp kích thích sử dụng cần đủ lớn để tạo ra dòng điện ổn định đi qua mẫu, đồng thời phù hợp với dải đo và độ nhạy của thiết bị đo. Các Hình 3.3(b) đến Hình 3.3(f) trình bày mối quan hệ giữa $\Delta\rho_s(t)$ và $\sigma_c(t)$ trên cùng một mẫu khi điện áp nguồn được tăng lên 24 V và sử dụng các giá trị điện trở trung gian khác nhau. Kết quả cho thấy điện trở suất của SSC giảm khi ứng suất nén tăng, và mối quan hệ này có tính phi tuyến. Mặc dù vẫn tồn tại sự sai khác nhỏ giữa ba lần đo, nhìn chung mối quan hệ giữa $\Delta\rho_s(t)$ và $\sigma_c(t)$ thể hiện tính ổn định và khả năng tái lặp.

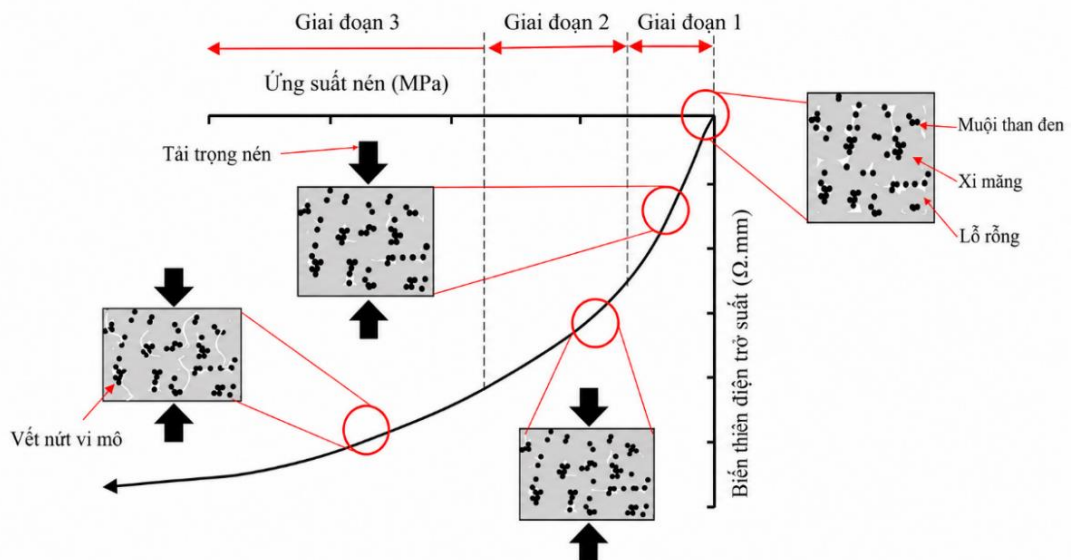
Trong tất cả các trường hợp từ Hình 3.3(b) đến Hình 3.3(f) khi ứng suất nén nhỏ hơn hoặc bằng 6 MPa (tương đương xấp xỉ 1/5 cường độ chịu nén của SSC), mối quan hệ giữa ứng suất và điện trở suất gần như tuyến tính. Sự suy giảm điện trở suất của mẫu SSC trong khoảng ứng suất này chủ yếu bắt nguồn từ việc các hạt dẫn điện trong bê tông tiến lại gần nhau hơn dưới tác dụng của ứng suất nén. Khi ứng suất nén vượt quá 6 MPa, mối quan hệ trên trở nên phi tuyến. Tính phi tuyến này có thể được giải thích bởi 02 nguyên nhân, bao gồm: (i) các lỗ rỗng thu hẹp dưới ứng suất nén, đặc biệt là ở vùng kết tụ của muối than đen làm giảm điện trở suất của mẫu và (ii) các vết nứt vi mô hình thành trong bê tông làm tăng thể tích không khí trong mẫu qua đó làm tăng điện trở suất của mẫu. Trong cơ chế (ii), Hình 3.4 mô tả mối quan hệ giữa ứng suất nén và độ biến dạng trung bình của mẫu W150L40, trong đó các thiết bị đo biến dạng được bố trí như minh họa trong hình. Mối quan hệ giữa ứng suất nén và biến dạng mô tả trong Hình 3.4 gần như tuyến tính khi ứng suất nén đạt gần 1/2 cường độ chịu nén thực tế của bê tông. Do đó, có thể suy luận rằng chưa ghi nhận ảnh hưởng

rõ rệt của quá trình biến đổi cấu trúc vật liệu đến đáp ứng điện – cơ của SSC trong phạm vi tải trọng khảo sát khi ứng suất nén nhỏ hơn 6 MPa, tương đương khoảng 1/5 cường độ chịu nén của bê tông. Giả định này phù hợp vì các vết nứt vi mô thường xuất hiện khi ứng suất nén đạt trên (30 – 40)% cường độ nén của bê tông [104].



Hình 3.4. Mối quan hệ giữa ứng suất nén và biến dạng của mẫu W150L40

Dựa vào các phân tích bên trên, cơ chế cơ bản của ứng xử điện trở suất của SSC có thể được giải thích như tại Hình 3.5 với 03 giai đoạn chính như sau:



Hình 3.5. Cơ chế của mối quan hệ giữa sự biến thiên điện trở suất và ứng suất nén mẫu SSC

➤ **Giai đoạn 1:** Dưới tác dụng của ứng suất nén, các hạt muội than đen xích lại gần nhau hơn, đồng thời các lỗ rỗng trong bê tông cũng co lại [105]. Điều này làm tăng tốc độ giảm điện trở suất của SSC vì các lỗ rỗng chứa không khí co lại cũng góp phần làm giảm điện trở suất của bê tông.

➤ **Giai đoạn 2:** Các lỗ rỗng trải qua sự co rút đáng kể trong giai đoạn đầu của quá trình gia tải và ổn định thể tích khi ứng suất nén đạt đến một ngưỡng nhất định [105]. Vì vậy, hiệu ứng co lỗ rỗng sẽ bị giảm dần ở giai đoạn 2, kéo theo sự thay đổi của điện trở suất sẽ giảm dần tạo mối quan hệ giữa sự biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của SSC trở nên phi tuyến khi ứng suất nén đạt khoảng 1/5 cường độ nén của SSC.

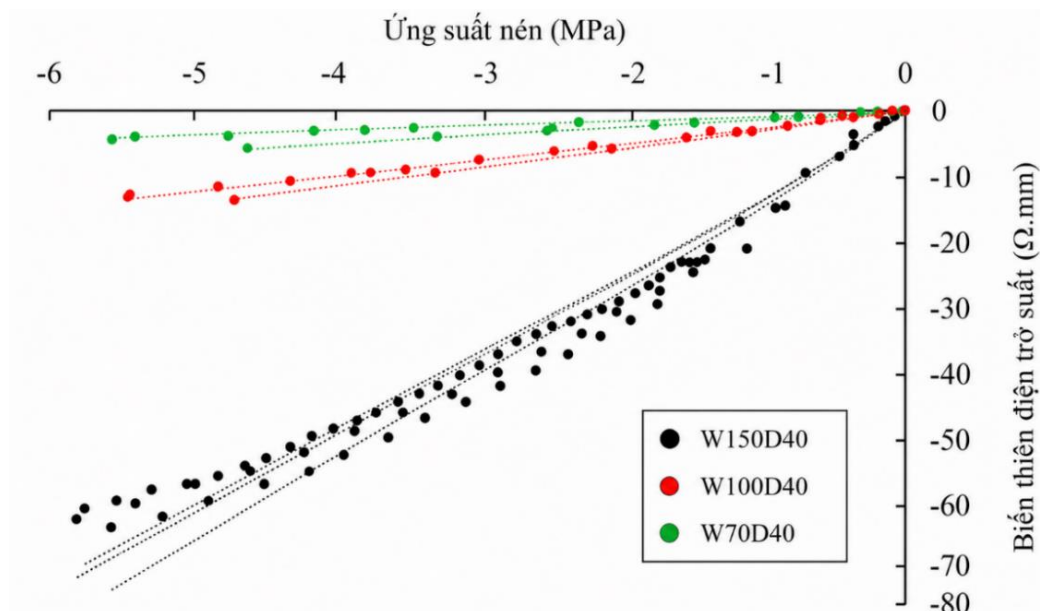
➤ **Giai đoạn 3:** Sự biến thiên điện trở suất có thể chậm lại hoặc trở nên không ổn định khi các vết nứt vi mô xuất hiện trong bê tông khi chịu ứng suất nén cao hơn.

Cơ chế phức tạp trên là một thách thức để định lượng và đo lường. Hơn nữa, khi sử dụng vật liệu tự cảm biến trong các ứng dụng thực tế, điều quan trọng là phải thiết kế chúng để hoạt động trong một phạm vi ứng suất cụ thể để có thể đo được chính xác và lặp lại nhiều lần. Do đó, kết quả phân tích nêu trên cho thấy việc giới hạn phạm vi ứng suất để ứng xử điện trở của SSC làm việc trong phạm vi tuyến tính là khả quan hơn việc sử dụng trong phạm vi phi tuyến. Cách tiếp cận này nhằm nâng cao độ chính xác của phép đo và tăng tuổi thọ của thiết bị sử dụng SSC.

3.3. Phân tích ảnh hưởng của các thông số thí nghiệm

Dựa trên mối quan hệ giữa điện trở suất và ứng suất của các mẫu thí nghiệm, Hình 3.6 trình bày về mối quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của các mẫu SSC có kích thước khác nhau (W150, W100 và W70, với cùng khoảng cách điện cực L40) trong miền ứng suất nén nhỏ hơn 6 MPa. Các dữ liệu thí nghiệm được biểu thị bằng các điểm đánh dấu hình tròn, với các màu khác nhau biểu thị các thông số thí nghiệm khác nhau. Thông qua phân tích hồi quy tuyến tính, các đường hồi quy tương ứng với dữ liệu thực nghiệm tại các thời điểm đo khác nhau được thể hiện bằng các đường chấm trong hình. Mặc dù hệ số xác định (R^2) không được hiển thị trong từng hình, nhưng kết quả tính toán cho thấy trong tất cả các trường hợp, giá trị $R^2 \geq$

0,95. Điều này cho thấy mối quan hệ giữa các điểm dữ liệu trong mỗi lần đo có tính tương quan cao và mối quan hệ này gần như tuyến tính.

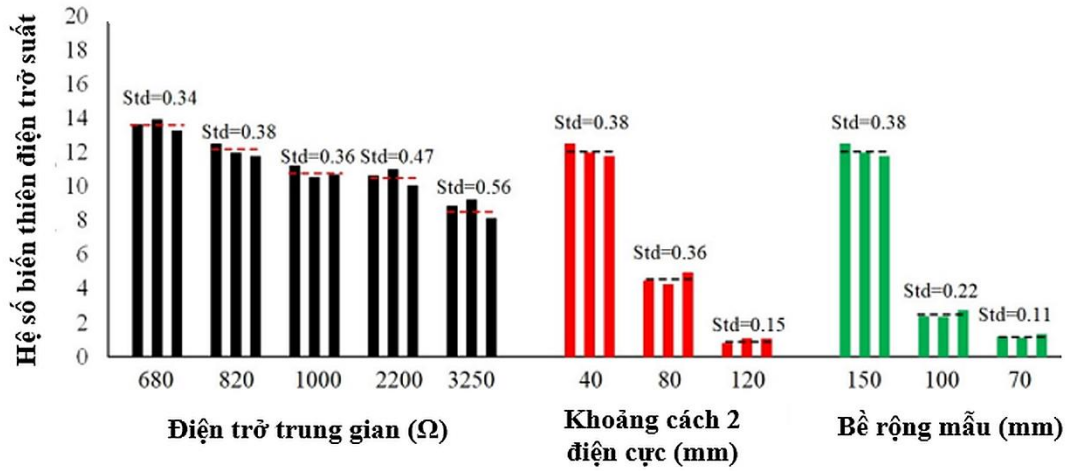


Hình 3.6. Mối quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu SSC trong phạm vi ứng suất nhỏ hơn 6MPa

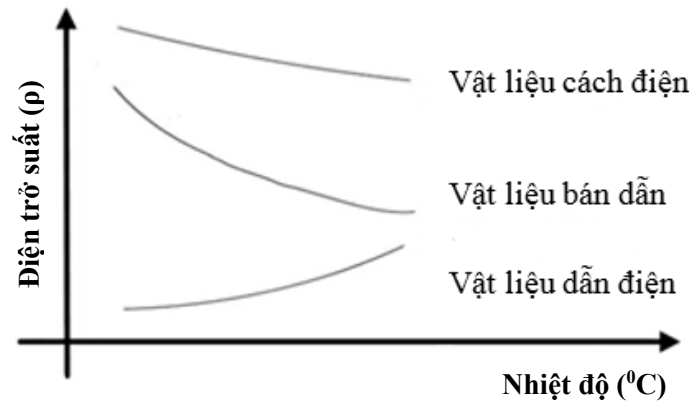
Độ dốc của đường hồi quy thay đổi khi kích thước của mẫu khác nhau. Đây là một chỉ số quan trọng, thể hiện tính tự cảm biến của SSC. Ví dụ: độ dốc $k = -10$ ($\Omega\text{.mm/MPa}$) cho biết điện trở suất của mẫu SSC giảm 10 $\Omega\text{.mm}$ khi ứng suất thay đổi 1 MPa. Do đó, giá trị tuyệt đối của độ dốc càng lớn cho thấy điện trở suất của mẫu SSC càng giảm tương ứng với cùng 1 ứng suất nén. Độ dốc trong mối quan hệ giữa sự biến thiên điện trở suất và ứng suất nén gọi là hệ số biến thiên điện trở suất, hệ số này đã được tính toán cho tất cả các trường hợp thực nghiệm trong nghiên cứu và kết quả được trình bày tại Hình 3.7(a). Trong hình này, trục tung biểu thị hệ số biến thiên điện trở suất, trong khi trục hoành biểu thị các tham số thí nghiệm. Ba kết quả thí nghiệm cho cùng một mẫu và độ lệch chuẩn (Std) của chúng cũng được thể hiện trong Hình 3.7(a). Hình 3.7(a) cho thấy hệ số biến thiên điện trở suất giảm khi giá trị của điện trở trung gian R_r tăng. Điều này có thể được giải thích bằng ảnh hưởng của dòng điện kích thích của mạch đo, trong đó việc tăng R_r làm giảm dòng điện kích thích đi qua SSC. Kết quả thực nghiệm này cho thấy dòng điện kích thích ảnh hưởng đến sự biến thiên điện trở suất SSC dưới cùng một ứng suất nén.

Ảnh hưởng của khoảng cách 02 điện cực và kích thước mẫu đến sự biến thiên điện trở suất của SSC cũng được quan sát rõ ràng. Ảnh hưởng của các tham số này cũng có thể được giải thích bằng ảnh hưởng của dòng điện kích thích. Mối quan hệ giữa điện trở và điện trở suất được xác định là $R_s(t) = \rho_s(t) \frac{L}{a}$, (trong đó, a là diện tích tiếp xúc giữa điện cực lưới mạ kẽm và lớp bê tông xung quanh của mẫu SSC, L là khoảng cách điện cực của mẫu SSC), mà điện trở mẫu SSC tỷ lệ nghịch với chiều rộng mẫu. Điều này có nghĩa là khoảng cách điện cực (L) càng lớn và chiều rộng của mẫu SSC càng nhỏ thì giá trị điện trở của SSC $R_s(t)$ càng lớn dẫn đến dòng điện kích thích càng nhỏ. Do đó, hệ số biến thiên điện trở suất của SSC càng nhỏ.

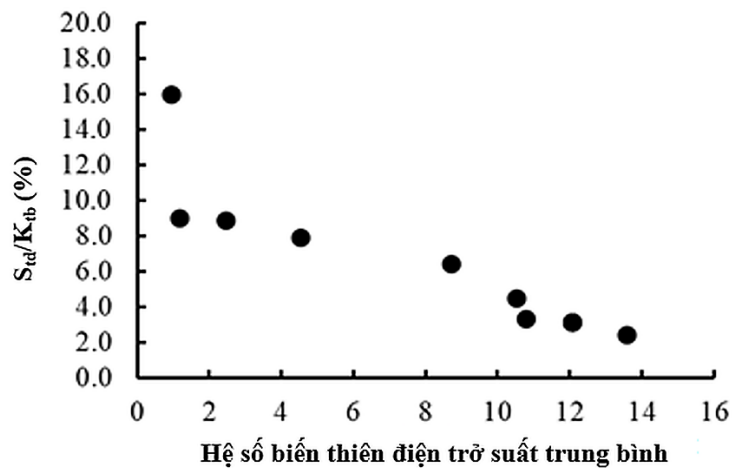
Như vậy, sự biến thiên điện trở suất của SSC dưới tác dụng của ứng suất nén chịu ảnh hưởng bởi cường độ dòng điện kích thích. Khi dòng điện kích thích tăng, sự thay đổi điện trở suất đo được có thể rõ ràng hơn do ảnh hưởng của quá trình vận chuyển điện tích và hiệu ứng gia nhiệt Joule. Tuy nhiên, cơ chế chi phối vẫn là sự thay đổi mạng dẫn điện dưới tác dụng của tải trọng nén. Cụ thể, dưới tác dụng của tải trọng nén, khoảng cách giữa các hạt dẫn điện trong nền bê tông giảm, làm tăng sự tiếp xúc giữa các pha dẫn điện và hình thành các đường dẫn điện liên tục, qua đó cải thiện độ dẫn điện và làm giảm điện trở suất của SSC. Sự biến thiên điện trở suất có tính phi tuyến do ảnh hưởng của quá trình thay đổi cấu trúc vi mô, bao gồm sự đóng kín lỗ rỗng ở giai đoạn đầu và sự phát triển vi nứt ở giai đoạn sau. Bên cạnh đó, dòng điện kích thích tác động đến đặc tính điện của SSC thông qua quá trình vận chuyển điện tích và hiệu ứng gia nhiệt Joule. Điện trường kích thích thúc đẩy sự dịch chuyển của các hạt mang điện trong mạng dẫn điện, bao gồm dẫn điện tử trong pha carbon và dẫn ion trong dung dịch lỗ rỗng bê tông; đồng thời nhiệt sinh ra do hiệu ứng Joule làm thay đổi trạng thái nhiệt của mẫu, ảnh hưởng đến thay đổi điện trở suất như Hình 3.7(b) [106]. Do đó, các thông số thí nghiệm như khoảng cách điện cực, kích thước mẫu và điện trở trung gian có thể ảnh hưởng đến cường độ dòng điện kích thích, từ đó tác động đến hệ số biến thiên điện trở suất của SSC



(a) Kết quả của hệ số biến thiên điện trở suất



(b) Ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện trở suất của vật liệu [106]



(c) Mối quan hệ giữa hệ số biến thiên điện trở suất và độ lệch chuẩn

Hình 3.7. Ảnh hưởng của các tham số thí nghiệm đến hệ số biến thiên điện trở suất của SSC

Nhằm làm rõ mức độ phân tán của các kết quả thí nghiệm, các giá trị hệ số biến thiên điện trở suất của từng mẫu được thống kê và tổng hợp trong Bảng 3.2. Mỗi giá trị trung bình được xác định từ ba lần trên cùng một mẫu và được đánh giá thông qua độ lệch chuẩn (Std). Kết quả cho thấy độ lệch chuẩn của các nhóm khảo sát dao động từ 0,11 đến 0,56, phản ánh sự phân tán nhỏ giữa các mẫu và độ tin cậy tương đối cao của kết quả thí nghiệm. Việc trình bày đồng thời giá trị từng mẫu, giá trị trung bình và độ lệch chuẩn giúp đánh giá đầy đủ hơn tính lặp lại và tính ổn định của kết quả đo, được mô tả tại Hình 3.7(a).

Bảng 3.2. Giá trị hệ số biến thiên điện trở suất của các mẫu SSC và các tham số thống kê theo từng yếu tố ảnh hưởng

Các yếu tố ảnh hưởng	Giá trị khảo sát	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Giá trị trung bình	S _{td}
Điện trở trung gian (Ω)	680	13,5	13,9	13,4	13,6	0,34
	820	12,3	11,8	11,9	12	0,38
	1000	11,0	10,6	10,6	10,7	0,36
	2200	10,5	10,8	10,3	10,5	0,47
	3250	8,7	8,8	8,0	8,5	0,56
Khoảng cách điện cực (mm)	40	12,5	12,0	11,8	12,1	0,38
	80	4,5	4,4	5,0	4,6	0,36
	120	0,9	1,0	1,1	1,0	0,15
Bề rộng mẫu (mm)	150	12,4	12,0	11,8	12,1	0,38
	100	2,5	2,6	2,9	2,7	0,22
	70	1,2	1,3	1,1	1,2	0,11

Hình 3.7(c) trình bày mối quan hệ giữa hệ số biến thiên điện trở suất trung bình và tỷ lệ độ lệch chuẩn tương đối (S_{td}/K_{tb}). Kết quả cho thấy vẫn tồn tại một mức độ sai lệch nhất định giữa ba lần đo được thực hiện trong cùng điều kiện thí nghiệm. Giá trị trên trục tung dao động trong khoảng từ 2,0% đến 16,5%, và độ lệch chuẩn có xu hướng giảm khi giá trị biến thiên điện trở suất tăng. Sự gia tăng hệ số biến thiên điện

trở suất của SSC cho thấy việc sử dụng cường độ dòng điện kích thích lớn hơn trong các phép đo giúp cải thiện độ tái lập các kết quả đo đạc. Nói cách khác, các yếu tố ảnh hưởng đến dòng điện kích thích, như khoảng cách giữa các điện cực mẫu, kích thước mẫu và giá trị điện trở trung gian, không chỉ tác động đến độ nhạy của SSC mà còn ảnh hưởng đến độ tin cậy của phép đo.

3.4. Kết luận chương 3

Từ các kết quả thí nghiệm trình bày trong chương này, có thể rút ra các kết luận chính như sau:

- (1) Dưới tác dụng của dòng điện kích thích có cường độ nhất định, điện trở suất của SSC giảm rõ rệt khi tăng ứng suất nén. Hiện tượng này phản ánh sự hình thành và phát triển của mạng dẫn điện trong nền xi măng khi các hạt muối than đen tiến gần nhau hơn dưới tác dụng của tải trọng nén. Hiện tượng co lỗ rỗng ở mức ứng suất thấp và sự hình thành, phát triển của vi nứt trong nền SSC ở mức ứng suất cao có thể là nguyên nhân làm thay đổi tính liên tục của mạng dẫn điện, dẫn đến mối quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén trở nên phi tuyến.
- (2) Trong phạm vi ứng suất nén nhỏ hơn 6 MPa, nghĩa là ở mức 1/5 cường độ nén của SSC, quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén là gần như tuyến tính. Kết quả này được xác định đối với cấp phối SSC, điều kiện bảo dưỡng và cấu hình đo trong phạm vi nghiên cứu của luận án. Trong khoảng ứng suất này, chưa ghi nhận sự thay đổi bất thường của tín hiệu điện do quá trình phá hủy vi mô, cho thấy mạng dẫn điện trong SSC vẫn duy trì khả năng đáp ứng ổn định.
- (3) Các yếu tố hình học của mẫu và cách thiết lập mạch điện của hệ đo bao gồm khoảng cách điện cực, kích thước mẫu và giá trị điện trở trung gian làm thay đổi cường độ dòng điện qua mẫu, do đó ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử điện trở cũng như độ nhạy của phép đo. Trong phạm vi nghiên cứu, các thông số này có ảnh hưởng đáng kể đến mức độ thay đổi điện trở suất của SSC. Khả năng tái lập của tín hiệu điện được đánh giá thông qua đáp ứng của mẫu trong các lần đo lặp,

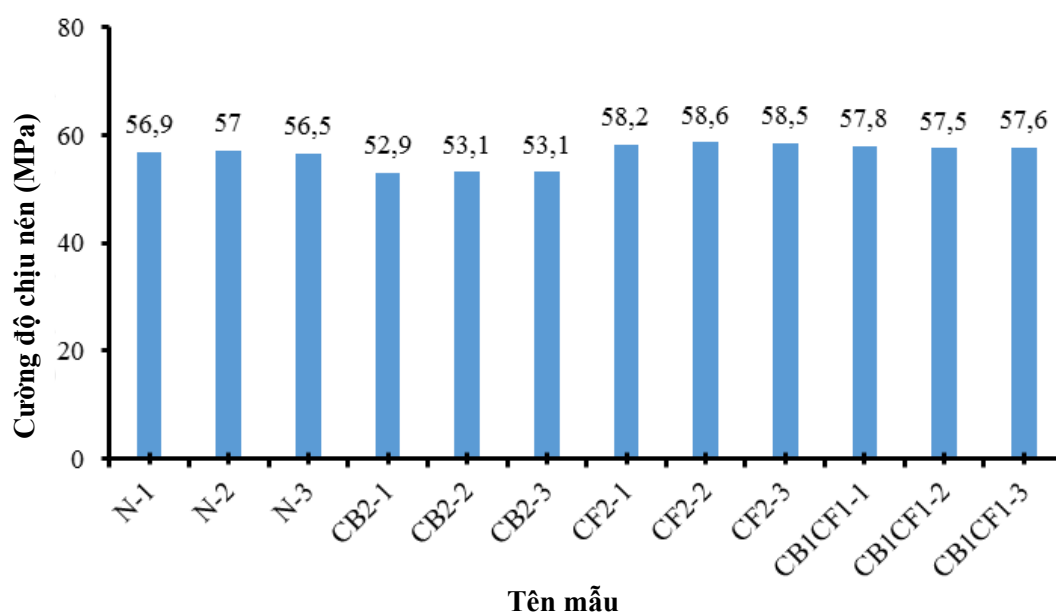
cho thấy mạng dẫn điện trong SSC duy trì được sự ổn định trong quá trình làm việc.

Mặc dù các kết quả thu được đã khẳng định khả năng cảm biến điện trở của SSC sử dụng muối than đen, tuy nhiên hệ vật liệu này vẫn bộc lộ một số hạn chế đáng kể. Việc sử dụng hàm lượng muối than đen cao (7% thể tích hồ xi măng) dẫn đến sự kết tụ cục bộ của hạt muối than đen, làm giảm tính công tác của hỗn hợp, tăng độ rỗng và có thể ảnh hưởng bất lợi đến cường độ cơ học của vật liệu. Quan sát vi cấu trúc vật liệu cho thấy các lỗ rỗng thường tập trung quanh vùng chứa muối than đen, tạo thành những vùng cách điện trong điều kiện khô và vùng dẫn điện khi có độ ẩm, khiến tín hiệu điện trở của SSC bị dao động theo điều kiện môi trường.

Những hạn chế này cho thấy cần có cải tiến trong thành phần vật liệu và thiết kế cấp phối để vừa duy trì tính dẫn điện, vừa tăng độ đặc chắc của SSC. Do đó, các nghiên cứu trong chương 4 sẽ mở rộng hơn chương trình thí nghiệm để phân tích ảnh hưởng của các yếu tố vật liệu bao gồm hàm lượng và loại vật liệu dẫn điện (muối than đen, sợi carbon) cũng như tác động của nhiệt độ và độ ẩm môi trường đến đặc tính cảm biến của SSC.

CHƯƠNG 4. ĐIỆN TRỞ SUẤT BAN ĐẦU VÀ ỨNG XỬ ĐIỆN TRỞ CỦA BÊ TÔNG TỰ CẢM BIẾN SỬ DỤNG SỢI CARBON VÀ MUỘI THAN ĐEN CÓ XÉT ĐẾN CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG

4.1. Cường độ chịu nén, độ rỗng và phân tích vi cấu trúc



Hình 4.1. Cường độ chịu nén các mẫu chứa các chất dẫn điện khác nhau

12 mẫu thí nghiệm khảo sát cường độ chịu nén của bê tông sau 28 ngày bảo dưỡng theo TCVN 3118:2022 [99]. Hình 4.1 trình bày kết quả cho thấy cường độ chịu nén trung bình của các mẫu N, CB2, CF2 và CB1CF1 lần lượt là 56,8, 53,0, 58,4 và 57,6 MPa, cường độ chịu nén các mẫu đáp ứng yêu cầu thiết kế 50 MPa. Hình 4.1 cho thấy các mẫu CF2 với hàm lượng sợi carbon 2% thể tích có cường độ chịu nén trung bình cao nhất so với các loại mẫu thử khác và cường độ chịu nén giữa các mẫu CF2- không có sự khác biệt.

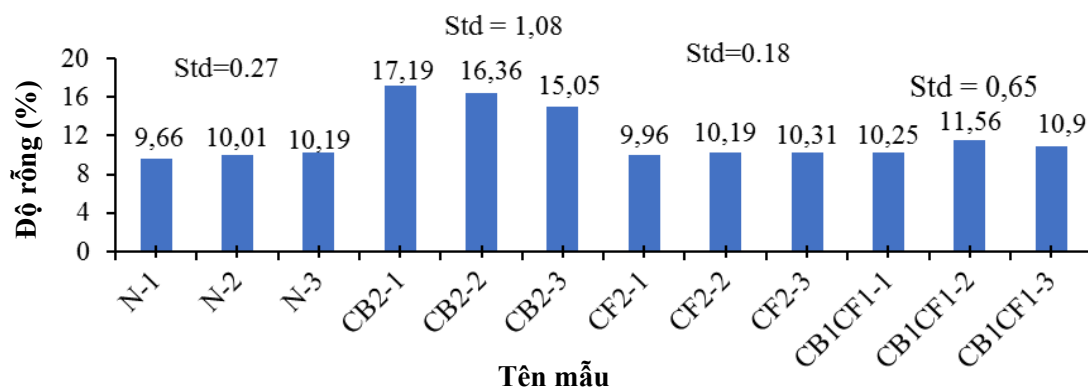
Kết quả thống kê cường độ chịu nén của các mẫu trong Bảng 4.1. Giá trị cường độ chịu nén trung bình của các nhóm mẫu dao động từ 53,03 MPa đến 58,43 MPa. Trong đó, nhóm mẫu CF2 đạt cường độ chịu nén trung bình lớn nhất (58,43 MPa), trong khi nhóm mẫu CB2 có cường độ thấp nhất (53,03 MPa). Độ lệch chuẩn của các nhóm mẫu dao động từ 0,12 MPa đến 0,26 MPa, tương ứng với hệ số biến thiên chỉ

từ 0,22% đến 0,46%. Các giá trị này cho thấy sự phân tán giữa các mẫu trong cùng một nhóm là rất nhỏ, phản ánh tính đồng nhất cao của vật liệu cũng như độ tin cậy của quy trình chế tạo, bảo dưỡng và thí nghiệm được áp dụng trong nghiên cứu.

Bảng 4.1. Giá trị cường độ chịu nén của từng mẫu và các tham số thống kê theo nhóm cấp phối

Nhóm mẫu	Mẫu 1 (MPa)	Mẫu 2 (MPa)	Mẫu 3 (MPa)	Trung bình (MPa)	S _{td} (MPa)	cv (%)
N	56,9	57,0	56,5	56,8	0,26	0,46
CB2	52,9	53,1	53,1	53,03	0,12	0,22
CF2	58,2	58,6	58,5	58,43	0,21	0,37
CB1CF1	57,8	57,5	57,6	57,63	0,15	0,26

Độ rỗng của các mẫu thử được thực hiện theo TCVN 3112:2022 [100] và được trình bày tại Hình 4.2.



Hình 4.2. Độ rỗng các mẫu chứa các chất độn dẫn điện khác nhau

Kết quả thống kê tại Bảng 4.2 cho thấy độ rỗng trung bình của các nhóm mẫu dao động từ 9,95% đến 16,20%. Nhóm mẫu CB2 có độ rỗng lớn nhất (16,20%), trong khi nhóm N có độ rỗng nhỏ nhất (9,95%). Độ lệch chuẩn của các nhóm mẫu nằm trong khoảng từ 0,18% đến 1,08%, tương ứng với hệ số biến thiên từ 1,78% đến 6,67%. Nhìn chung, các giá trị CV đều nhỏ hơn 10%, cho thấy kết quả thí nghiệm có độ phân tán thấp và tính lặp lại tốt. Trong đó, nhóm CF2 có mức độ đồng nhất cao nhất với CV chỉ 1,78%, còn nhóm CB2 có mức độ phân tán lớn hơn do sự chênh lệch độ rỗng giữa các mẫu trong cùng nhóm. Các mẫu nhóm CF2 có độ rỗng thấp nhất so

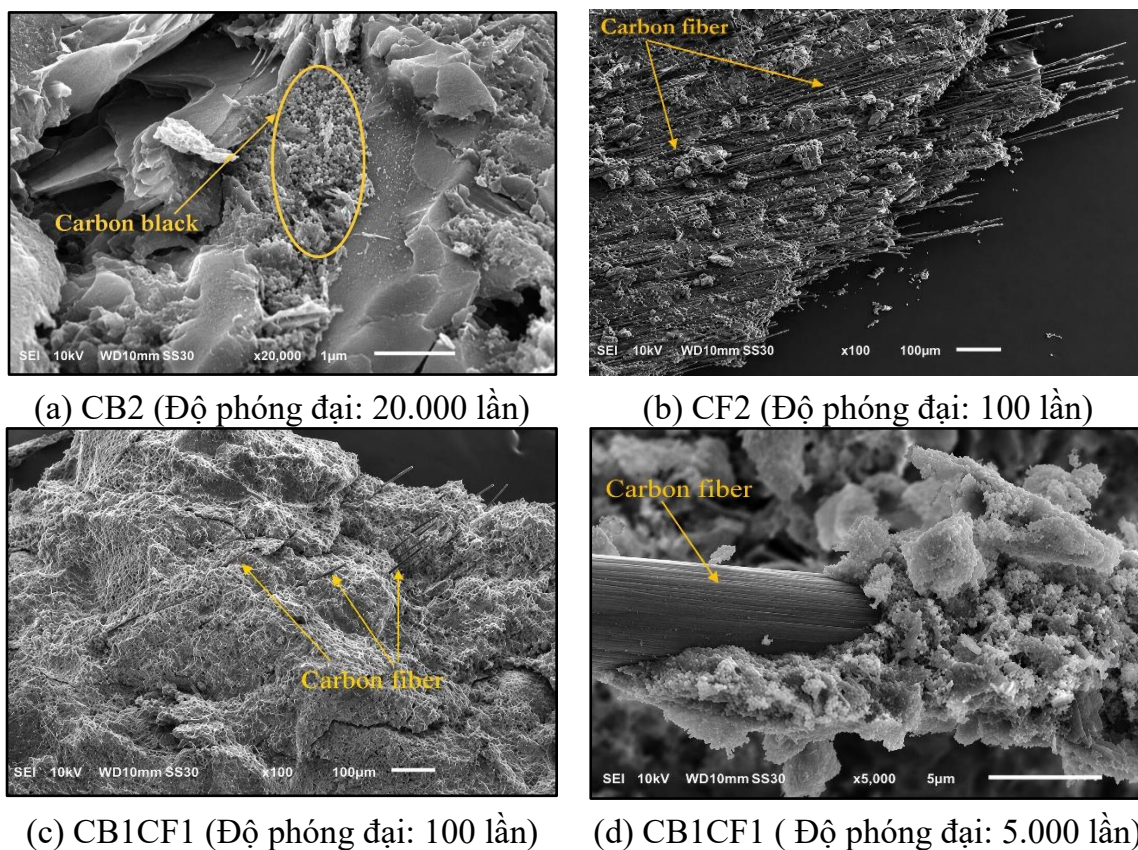
với các mẫu chứa chất độn dẫn điện khác, nên cường độ chịu nén của mẫu cao hơn các mẫu chứa chất độn dẫn điện khác, độ rỗng của bê tông thấp ảnh hưởng đến tính dẫn điện của bê tông. Do đó, việc sử dụng chất độn dẫn điện muối than đen góp phần đáng kể vào việc tăng độ rỗng trong bê tông, và sự kết tụ một cách ngẫu nhiên dẫn đến sự khác biệt đáng kể giữa các mẫu có cùng cấp phối.

Bảng 4.2. Giá trị độ rỗng của từng mẫu và các tham số thống kê theo nhóm cấp phối

Nhóm mẫu	Mẫu 1 (%)	Mẫu 2 (%)	Mẫu 3 (%)	Trung bình (%)	Std (%)	cv (%)
N	9,66	10,01	10,19	9,95	0,27	2,75
CB2	17,19	16,36	15,05	16,20	1,08	6,67
CF2	9,96	10,19	10,31	10,15	0,18	1,78
CB1CF1	10,25	11,56	10,90	10,9	0,65	5,96

Kết quả SEM đối với các mẫu bê tông có chất độn dẫn điện khác nhau được thể hiện tại Hình 4.3. Hình 4.3(a) thể hiện cấu trúc vi mô vật liệu của mẫu CB2 ở độ phóng đại 20.000 lần. Quan sát thấy rằng có sự kết tụ giữa các hạt muối than đen và một số lỗ rỗng nhỏ được hình thành xung quanh các khu vực kết tụ này. Kết quả này cho thấy mặc dù đã giảm hàm lượng sử dụng của muối than đen còn 2%, nhưng hiện tượng kết tụ là điều khó tránh khỏi do hạt muối than đen có diện tích bề mặt riêng lớn.

Hình 4.3(b) và Hình 4.3(c) cho thấy sự phân tán của sợi carbon trong bê tông ở độ phóng đại 100 lần đối với mẫu CF2- và CB1CF1. Hình 4.3(b) cho thấy sợi carbon được phân bố tương đối đồng đều trong bê tông, có rất ít bằng chứng về sự kết tụ, và khoảng cách giữa các sợi phân bố rất nhỏ, khoảng 50 μm . Tương tự, Hình 4.3(c) cho thấy sự phân bố của sợi carbon trong mẫu CB1CF1, do hàm lượng sợi carbon giảm đi một nửa nên mật độ phân bố sợi carbon trong Hình 4.3(c) thấp hơn so với Hình 4.3(b). Mặt khác, Hình 4.3(d) thể hiện vùng tiếp xúc giữa sợi carbon và vật liệu bê tông xung quanh của mẫu CB1CF1 ở độ phóng đại 5.000 lần, kết quả là không có khoảng trống đáng kể giữa sợi carbon và thành phần vật liệu xung quanh, điều này thể hiện mối liên kết cao giữa thành phần vật liệu và sợi carbon.



Hình 4.3. SEM của mẫu có sợi carbon và muội than đen

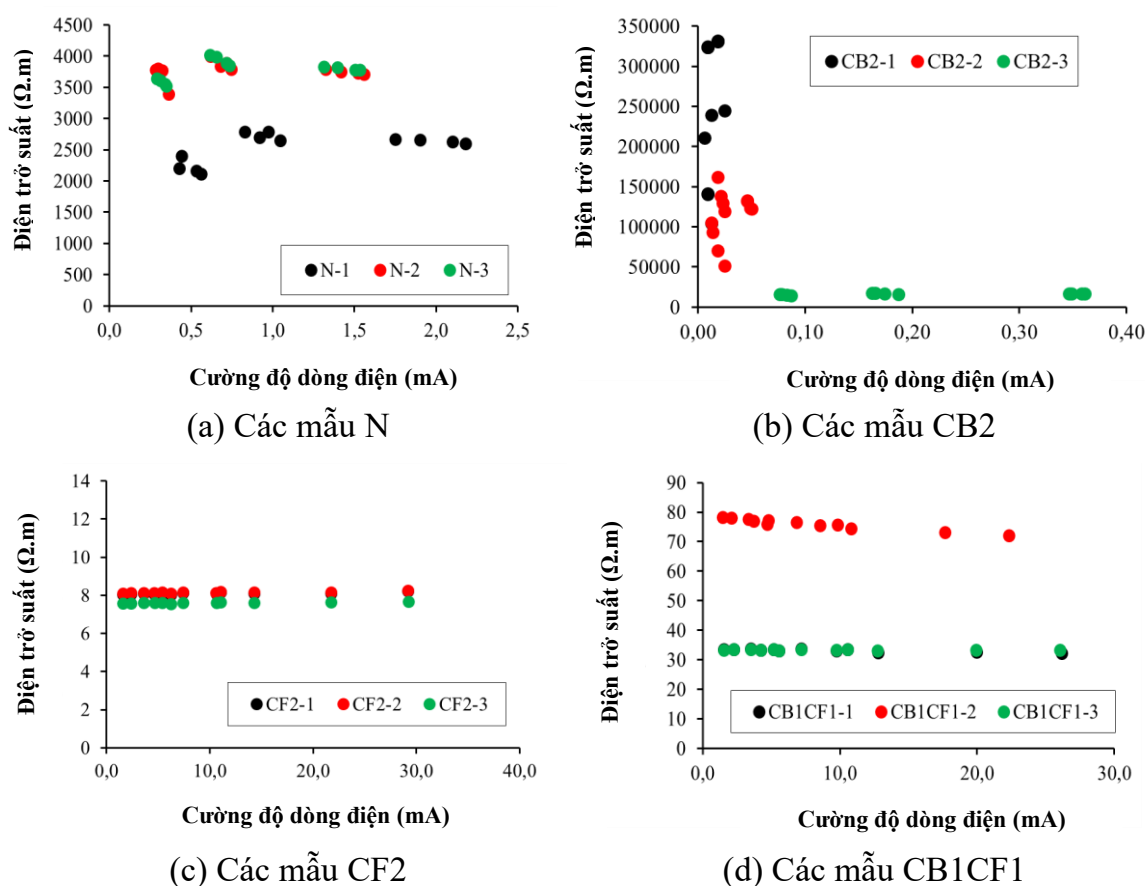
4.2. Điện trở suất ban đầu của SSC trong điều kiện không tải

4.2.1. Ảnh hưởng của thành phần vật liệu và cường độ dòng điện

Hình 4.4(a) đến Hình 4.4(d) thể hiện mối quan hệ giữa cường độ dòng điện và điện trở suất của các mẫu bê tông có thành phần vật liệu khác nhau (Phụ lục 4.1). Cường độ dòng điện chạy qua từng mẫu được tính theo công thức (2.1), trong khi điện trở suất của mẫu được tính theo công thức (2.3), như mô tả ở Mục 2.6.1. Số lượng mẫu có cùng thành phần vật liệu được thể hiện theo từng màu trong mỗi hình và dữ liệu các mẫu được trình bày trong Hình 4.4 có độ ẩm 0% và phạm vi nhiệt độ bề mặt là từ 21°C–24°C.

Hình 4.4(a), Hình 4.4(b) và Hình 4.4(d) cho thấy có một số khác biệt giữa dữ liệu của các mẫu có màu khác nhau trong cùng một hình. Điều này chỉ ra rằng dù các mẫu có cùng thành phần vật liệu và cùng mẻ trộn thì giá trị điện trở suất cũng không hoàn toàn giống nhau. Do đó, để cấu trúc các mẫu SSC đạt được sự đồng nhất hoàn toàn nhằm có được giá trị điện trở suất giống hệt nhau giữa các mẫu là việc bất khả

thi. Sự thay đổi giá trị điện trở suất này trong cùng một thành phần cũng có thể được khảo sát thông qua sự thay đổi kết quả độ rỗng giữa các mẫu cùng loại, như được trình bày trong Hình 4.2. Ví dụ, điện trở suất của mẫu CB1CF1-2 cao hơn so với mẫu CB1CF1-1 và CB1CF1-3 như trong Hình 4.4(d) tương ứng với độ rỗng cao hơn so với 02 mẫu còn lại như trong Hình 4.2, mặc dù có cùng thành phần vật liệu. Mỗi tương quan tương tự cũng được xác nhận trong Hình 4.4(a) và Hình 4.4(b).



Hình 4.4. Quan hệ giữa cường độ dòng điện và điện trở suất của mẫu SSC

Bên cạnh đó, Hình 4.4(a) đến Hình 4.4(d) cũng cho thấy sự khác biệt đáng kể về giá trị điện trở suất giữa các mẫu có thành phần vật liệu khác nhau. Tại Hình 4.4(c), mẫu CF2 có giá trị điện trở suất thấp nhất trong khoảng từ $7,5 \Omega \cdot m$ đến $8,5 \Omega \cdot m$. Tiếp theo là các mẫu CB1CF1 có điện trở suất với phạm vi từ $30 \Omega \cdot m$ đến $80 \Omega \cdot m$ được thể hiện tại Hình 4.4(d), các mẫu N có điện trở suất với phạm vi từ $2.500 \Omega \cdot m$ đến $4.000 \Omega \cdot m$ được thể hiện tại Hình 4.4(a) và mẫu CB2 có điện trở suất với phạm vi từ $15 \times 10^3 \Omega \cdot m$ đến $350 \times 10^3 \Omega \cdot m$ được thể hiện tại Hình 4.4(b).

Sự khác biệt về giá trị điện trở suất giữa các mẫu có thể bị ảnh hưởng bởi 02 yếu tố chính: (i) mạng dẫn điện được hình thành bởi các chất độn dẫn điện, giúp tăng cường độ dẫn điện và giảm điện trở suất của vật liệu và (ii) sự hiện diện của các khoảng trống không khí (trong điều kiện độ ẩm bằng không) trong nền xi măng, làm giảm độ dẫn điện và tăng điện trở suất của vật liệu. Với những kết quả thí nghiệm xác định độ rỗng của các mẫu ở Hình 4.2, cũng như quan sát SEM ở Hình 4.3, mẫu CB2 thể hiện giá trị điện trở suất cao nhất do chúng có độ rỗng cao nhất và hàm lượng muội than đen thấp (2%), đồng thời, hiện tượng kết tụ của muội than đen đã không tạo được mạng lưới dẫn điện hiệu quả trong bê tông. Ngược lại, các loại mẫu còn lại có độ rỗng thấp hơn mẫu CB2, việc sử dụng sợi carbon làm chất độn dẫn điện giúp tạo ra một mạng lưới dẫn điện hiệu quả trong bê tông. Do đó, giá trị điện trở suất của mẫu CF2- và CB1CF1 thấp hơn đáng kể so với mẫu N không có chất độn dẫn điện. Do mẫu CF2 có hàm lượng sợi carbon cao hơn so với mẫu CB1CF1 nên có sự khác biệt tương ứng về giá trị điện trở suất giữa 02 loại mẫu này.

Tuy nhiên, việc định lượng hóa ảnh hưởng phức tạp của thành phần cấp phối lên điện trở suất của bê tông là không thực tế vì ngay cả với cùng thành phần vật liệu và phương pháp trộn, các mẫu cùng loại có thể không giống nhau về mặt cấu trúc, nghĩa là giá trị điện trở suất có thể khác nhau đến một mức độ nào đó. Vì vậy, một phương pháp hiệu chuẩn, bao gồm việc xác định giá trị điện trở suất ban đầu cho từng mẫu ở điều kiện tham chiếu trước khi sử dụng trên các thiết bị là vô cùng cần thiết khi áp dụng thực tế trong tương lai.

Mặt khác, Hình 4.4 cho thấy các giá trị điện trở suất của mẫu CF2-, CB1CF1- và N vẫn tương đối ổn định khi cường độ dòng điện thay đổi. Tuy nhiên, mẫu CB2-1 và CB2-2 trong Hình 4.4(b) cho thấy điện trở suất giảm đáng kể khi cường độ dòng điện tăng dần. Điều này có thể giải thích là mặc dù cùng một điện áp nguồn và điện trở trung gian được dùng trong các phép đo, điện trở suất của mẫu CB2-1 và CB2-2 cao hơn, dẫn đến cường độ dòng điện thấp hơn so với các trường hợp khác. Khi cường độ dòng điện dưới 0,1 mA, điện trở suất của mẫu CB2-1 và CB2-2 giảm khi cường độ dòng điện tăng. Khi cường độ dòng điện vượt quá 0,1 mA, giá trị điện trở suất sẽ

ổn định và trở nên ít nhạy cảm hơn với những thay đổi về cường độ dòng điện như thể hiện ứng xử của mẫu CB2–3. Hiện tượng này cũng thường được quan sát trong lý thuyết điện trở suất phi tuyến của vật liệu cách điện cao [106]. Vì vậy, cường độ dòng điện đo đặc cũng là 1 yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến giá trị điện trở suất của SSC trong điều kiện không tải. Do đó, việc cung cấp cường độ dòng điện đủ lớn là rất quan trọng trong việc đảm bảo giá trị điện trở suất ổn định trong phép đo.

4.2.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm

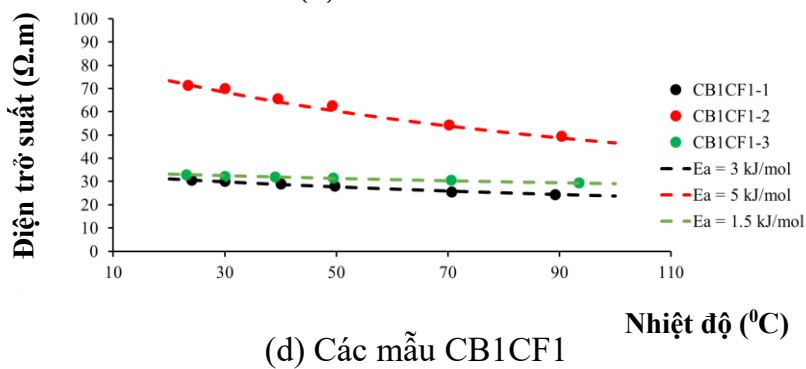
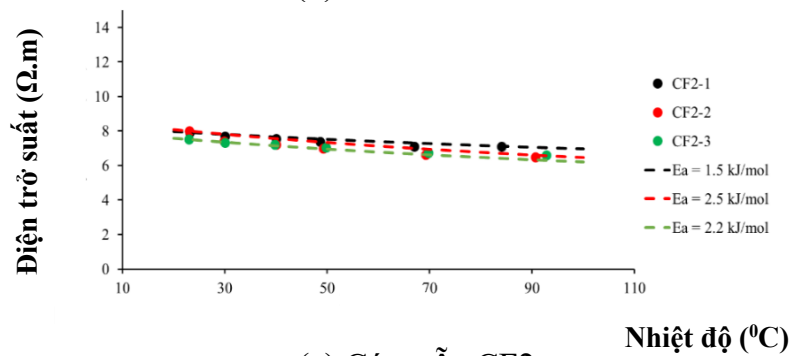
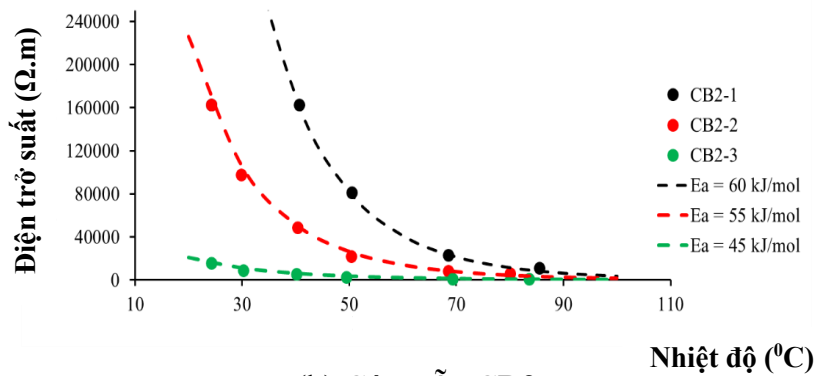
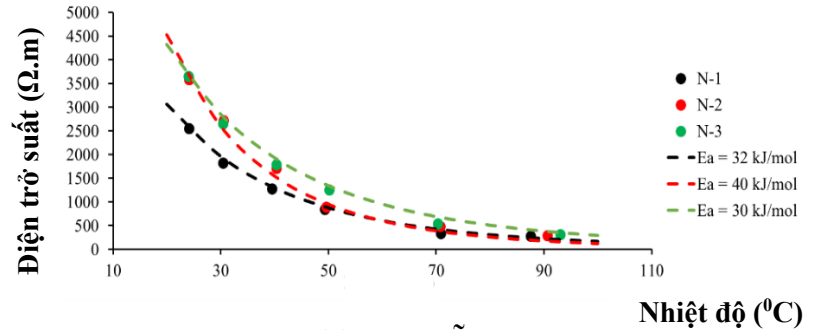
Bê tông được biết đến với đặc tính cách điện cao, do đó, điện trở suất của vật liệu này có thể bị ảnh hưởng đáng kể bởi nhiệt độ.

Hình 4.5(a) đến Hình 4.5(d) mô tả mối quan hệ giữa nhiệt độ và giá trị điện trở suất đo đặc của các mẫu có thành phần vật liệu khác nhau (Phụ lục 4.2). Hình 4.5 thể hiện điện trở suất của tất cả các mẫu bê tông giảm khi nhiệt độ tăng. Ứng xử này có thể là do sự dịch chuyển các hạt mang điện như electron và ion tăng lên khi nhiệt độ cao lên, tạo điều kiện cho chúng di chuyển qua vật liệu và giảm điện trở suất [107].

Tuy nhiên, mối quan hệ giữa nhiệt độ và điện trở suất đối với mẫu N và CB2 là phi tuyến, các mẫu này có tính cách điện cao hơn các mẫu còn lại. Hơn nữa, mức độ phi tuyến trong mối quan hệ giữa nhiệt độ và điện trở suất là khác nhau giữa các mẫu CB2 và N trong cùng một hình do giá trị điện trở suất của chúng dưới cùng điều kiện là khác nhau. Ngược lại, điện trở suất của mẫu CF2 và CB1CF1 chỉ giảm nhẹ khi nhiệt độ tăng với cùng một mức độ. Điều này có thể được giải thích là do mẫu N và CB2 có giá trị tuyệt đối của điện trở suất là cao hơn so với mẫu CF2- hoặc CB1CF1, nghĩa là mẫu N và CB2 có tính dẫn điện thấp hơn. Do đó, ảnh hưởng của nhiệt độ đến quá trình dẫn điện ion trong dung dịch lỗ rỗng của các mẫu này rõ rệt hơn so với các mẫu có tính dẫn điện cao nhờ sự hình thành mạng dẫn điện của chất độn.

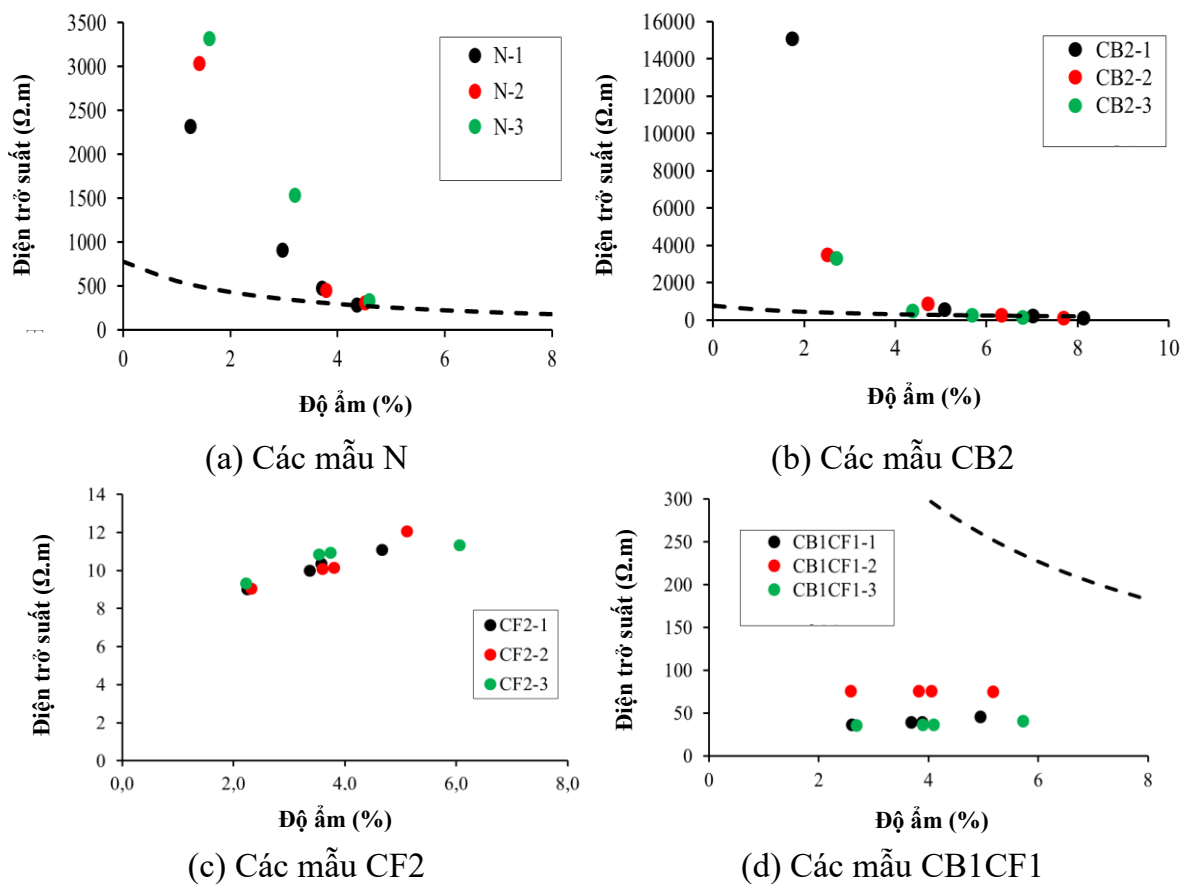
Như vậy, kết quả ở Hình 4.5 chỉ ra rằng mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện trở suất tăng lên cùng với sự gia tăng các đặc tính cách điện của vật liệu. Điều này cho thấy các vật liệu có điện trở suất ban đầu lớn hơn thường nhạy cảm hơn với sự thay đổi nhiệt độ, dẫn đến mức biến thiên điện trở suất rõ rệt hơn dưới cùng một điều kiện môi trường. Kết quả này cũng khẳng định rằng ảnh hưởng của nhiệt độ cần

được xem xét như một yếu tố quan trọng trong quá trình đánh giá và hiệu chỉnh tín hiệu điện của vật liệu SSC, đặc biệt đối với các cấp phối có khả năng dẫn điện thấp.



Hình 4.5. Mối quan hệ giữa nhiệt độ và điện trở suất của mẫu

Hình 4.6(a) đến Hình 4.6(d) mô tả mối quan hệ giữa độ ẩm và điện trở suất của các mẫu có thành phần vật liệu khác nhau (Phụ lục 4.3). Đường nét đứt không được hiển thị trong Hình 4.6(c) vì các giá trị được tính toán nằm ngoài phạm vi của trục tung. Hình 4.6(a) và Hình 4.6(b) thể hiện mối quan hệ phi tuyến giữa điện trở suất và độ ẩm. Điều này chỉ ra rằng khi độ ẩm tăng lên, điện trở suất của mẫu N và CB2 giảm, với tốc độ giảm trở nên nhỏ hơn khi độ ẩm tiến đến điểm bão hòa của vật liệu.

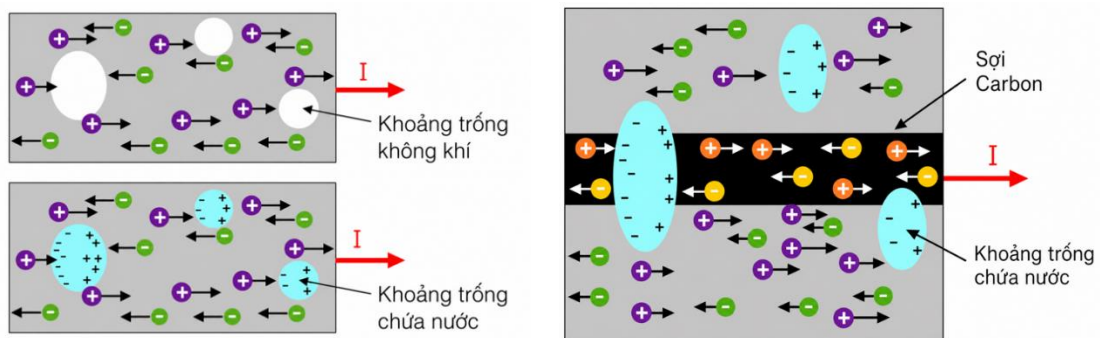


Hình 4.6. Mối quan hệ giữa độ ẩm và điện trở suất của mẫu

Sự hiện diện của các lỗ rỗng có độ cách điện cao trong bê tông tạo ra các vùng cản trở sự di chuyển của các hạt điện tích dưới ảnh hưởng của điện áp kích thích như thể hiện tại Hình 4.7(a). Tuy nhiên, Hình 4.7(a) chỉ ra rằng độ ẩm tăng thúc đẩy sự hình thành các đường dẫn điện bên trong bê tông do sự hiện diện của các ion dẫn điện trong nước, điều này làm tăng độ dẫn điện của vật liệu, làm giảm tính chất cách điện và do đó làm giảm điện trở suất của nó [108].

Hình 4.6(c) và Hình 4.6(d) cho thấy xu hướng ngược lại, khi điện trở suất của

các mẫu chứa sợi carbon (CF2- và CB1CF1-) nhìn chung ổn định hoặc tăng nhẹ khi độ ẩm tăng. Hiện tượng này có thể liên quan đến sự thay đổi trạng thái tiếp xúc trong mạng dẫn điện của sợi carbon. Khi độ ẩm tăng, nước xâm nhập vào hệ lỗ rỗng và vùng tiếp giáp sợi–nền có thể hình thành màng nước, đồng thời gây trương nở cục bộ của nền xi măng, làm thay đổi khoảng cách và trạng thái tiếp xúc giữa các sợi carbon cũng như giữa sợi carbon với các pha dẫn điện lân cận, như minh họa tại Hình 4.7(b). Sự thay đổi này có thể làm tăng điện trở tiếp xúc của mạng dẫn điện, qua đó làm cho điện trở suất của các mẫu CF2- và CB1CF1- duy trì ổn định hoặc tăng nhẹ. Như vậy, Hình 4.6 cho thấy độ ẩm có ảnh hưởng đáng kể đến điện trở suất của SSC, nhưng mức độ và xu hướng ảnh hưởng phụ thuộc vào thành phần chất độn dẫn điện và cơ chế dẫn điện chi phối trong từng cấp phối.



(a) Dòng hạt dẫn điện trong bê tông không chứa chất độn dẫn điện

(b) Dòng hạt dẫn điện trong bê tông chứa sợi carbon

Hình 4.7. Ảnh hưởng của độ ẩm đến điện trở suất của bê tông

4.2.3. Phát triển mô hình dự đoán điện trở suất ban đầu của SSC có xét đến ảnh hưởng đồng thời của thành phần vật liệu và yếu tố môi trường

Trong chương 3, biến thiên điện trở suất của mẫu SSC dưới tác dụng của tải trọng nén được xác định với giả thiết điện trở suất ban đầu của mẫu bằng 0. Tuy nhiên, trong thực tế, điện trở suất ban đầu của SSC luôn tồn tại một giá trị nhất định và chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố như nhiệt độ, độ ẩm, thành phần vật liệu và điều kiện đo. Do đó, khi sử dụng SSC trong các điều kiện khác nhau, sự biến thiên điện trở suất do tải trọng gây ra cần được xác định trên cơ sở so sánh với giá trị điện trở suất ban đầu của mẫu trước khi chịu tải.

Nhiều nghiên cứu trước đây đã chứng minh rằng giá trị điện trở suất của bê tông ở trạng thái không tải bị ảnh hưởng bởi thành phần vật liệu, nhiệt độ, độ ẩm. Tuy nhiên, các tài liệu này không đưa ra các công thức thực nghiệm xét đến ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố này để cho phép các kỹ sư dễ dàng dự đoán điện trở suất ban đầu của bê tông trong các điều kiện đo lường hoặc môi trường khác nhau. Điều này sẽ bất lợi cho các thiết bị sau khi được lắp đặt tại chỗ và sử dụng liên tục, đồng thời không thể thực hiện nhiều phép đo khi ở điều kiện thực tế hoặc điều kiện môi trường thay đổi. Các thiết bị này cần được hiệu chuẩn tự động dựa trên việc gắn sự thay đổi của các yếu tố ảnh hưởng cho mô hình dự đoán được xác định trước.

Một số nghiên cứu gần đây [109-115] đã thiết lập các mô hình dự đoán về điện trở suất của vật liệu gốc xi măng dựa trên mối quan hệ giữa điện trở suất và nhiệt độ, theo công thức Arrhenius như sau:

$$\rho = \rho_A e^{\frac{E_a}{GT}} \quad (4.1)$$

trong đó, ρ là giá trị điện trở suất tại nhiệt độ tuyệt đối T , ρ_A là điện trở suất danh định tại nhiệt độ vô hạn, E_a là năng lượng hoạt hóa (kJ/mol) và G là hằng số khí lý tưởng (8,314 J/(mol·K)). Do khó khăn trong việc xác định giá trị điện trở suất danh định tại nhiệt độ vô hạn (ρ_A) trong công thức (4.1), một số nghiên cứu [116,117] đã cải thiện công thức (4.1) dựa trên giá trị điện trở suất tham chiếu ($\rho_{s0(0)}$) tại nhiệt độ tham chiếu (T_0) như sau:

$$\rho = \rho_{s0(0)} e^{\frac{E_a}{G} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (4.2)$$

Tuy khả năng áp dụng công thức Arrhenius cho vật liệu gốc xi măng đã được công nhận từ các nghiên cứu trên, nhưng giá trị E_a trong công thức (4.2) được báo cáo với các giá trị khác nhau trong các tài liệu, cụ thể E_a có giá trị là 24 kJ/mol [109], 19,7 kJ/mol [110], 27,17 kJ/mol [111], (9 - 39) kJ/mol [112], (17 - 43) kJ/mol [113] và (22 - 55) kJ/mol [114]. Điều này gây khó khăn cho các kỹ sư khi ứng dụng cho việc dự đoán và lựa chọn các giá trị phù hợp với thiết bị của mình.

Mặt khác, tác giả Castellote và các cộng sự [115] đã sử dụng mô hình tuyến tính để biểu diễn mối quan hệ giữa điện trở suất và sự biến thiên của nhiệt độ so với giá

trị nhiệt độ tham chiếu. Tuy nhiên, nó chỉ được áp dụng trong khoảng nhiệt độ hẹp $\pm 5^{\circ}\text{C}$ so với nhiệt độ tham chiếu.

Về ảnh hưởng của độ ẩm, tác giả Martínez và các cộng sự [118] cũng đề xuất một mô hình dựa trên mối quan hệ giữa độ ẩm và hàm số mũ của điện trở suất như sau:

$$\frac{\Delta m}{m_{100}} = 10^{-0.745} \rho^{-0.942} - 0.026 \quad (4.3)$$

trong đó m_{100} là khối lượng mẫu ở điều kiện độ ẩm $W = 100\%$ và nhiệt độ tham chiếu $T = 22 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Tuy nhiên, mô hình này không thể đánh giá ảnh hưởng độ ẩm đến điện trở suất trong khi xem xét sự thay đổi nhiệt độ và thành phần vật liệu.

Các nghiên cứu nói trên đã có những đóng góp đáng kể trong việc dự đoán điện trở suất cho vật liệu gốc xi măng. Tuy nhiên, vẫn còn một số thách thức về mặt kỹ thuật, như: (i) các mô hình chỉ xem xét ảnh hưởng độc lập của các biến và không tích hợp được ảnh hưởng đồng thời khi các yếu tố này thay đổi cùng nhau và (ii) vẫn còn những hệ số chưa biết cần phải thử nghiệm để xác định cho từng trường hợp cụ thể. Đồng thời, những kết quả thực nghiệm tại Mục 4.2.2 cho thấy ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm đến điện trở suất của mẫu bê tông. Ảnh hưởng này không chỉ khác nhau giữa các mẫu có thành phần vật liệu khác nhau mà còn giữa các mẫu có cùng thành phần vật liệu. Ngoài ra, công thức Arrhenius biểu diễn được ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện trở suất của mẫu nhưng không xét đến ảnh hưởng của độ ẩm và sự thay đổi thành phần vật liệu của mẫu thử. Vì vậy, nghiên cứu phát triển một mô hình thực nghiệm xác định điện trở suất ban đầu của mẫu có xem xét ảnh hưởng đồng thời của chất dẫn điện carbon, cường độ dòng điện, nhiệt độ và độ ẩm là cần thiết và hữu ích. Việc này nhằm tối ưu hóa các mô hình và cung cấp cho kỹ sư những công cụ hiệu quả để hiệu chỉnh các giá trị điện trở suất ban đầu của các thiết bị thông minh dựa trên vật liệu gốc xi măng

Ở chương nghiên cứu này, để xây dựng mô hình dự đoán có xét ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố, trước tiên cần xác định giá trị điện trở suất trong điều kiện tham chiếu $\rho_{s0(0)}$ ở điều kiện độ ẩm 0% và nhiệt độ khoảng 20°C đối với mỗi mẫu. Dựa trên các kết quả thực nghiệm tại Hình 4.4, cường độ dòng điện nhỏ hơn $0,1\text{ mA}$ thì giá trị điện trở suất không ổn định và có độ lệch chuẩn cao. Vì vậy, các mẫu CB2-1 và CB2-

2 sẽ bị loại khỏi bộ dữ liệu dùng để xây dựng mô hình dự đoán điện trở suất ban đầu cho mẫu. Điện trở suất tham chiếu $\rho_{s0(0)}$ của các mẫu thử còn lại có thể thu được bằng cách lấy trung bình các kết quả đo cho từng mẫu trong Hình 4.4 khi cường độ dòng điện lớn hơn 0,1 mA. Các giá trị $\rho_{s0(0)}$ có thể được sử dụng làm giá trị điều kiện biên khi phát triển mô hình dự đoán có xem xét ảnh hưởng đồng thời các yếu tố như nhiệt độ và độ ẩm.

Trong mô hình Arrhenius, nhiệt độ T trong số hạng mũ được xác định theo nhiệt độ tuyệt đối (K). Khi biểu diễn kết quả thực nghiệm theo nhiệt độ Celsius (t), cần thực hiện phép chuyển đổi $T=t+273,15$ trước khi áp dụng mô hình. Do đó, phương trình Arrhenius vẫn được sử dụng phù hợp để mô tả ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện trở suất của SSC trong phạm vi nhiệt độ khảo sát. Hơn nữa, tỷ số giữa E_a và G là một hằng số, có thể được biểu thị bằng một hệ số α duy nhất. Hệ số này cần được biểu thị dưới dạng hàm thể hiện sự khác biệt về sự phụ thuộc nhiệt độ khi thành phần vật liệu hoặc cấu trúc vi mô của vật liệu thay đổi. Dựa trên phân tích, mối quan hệ giữa điện trở suất của mẫu bê tông và nhiệt độ có thể được biểu diễn dưới dạng tương tự của công thức Arrhenius như sau:

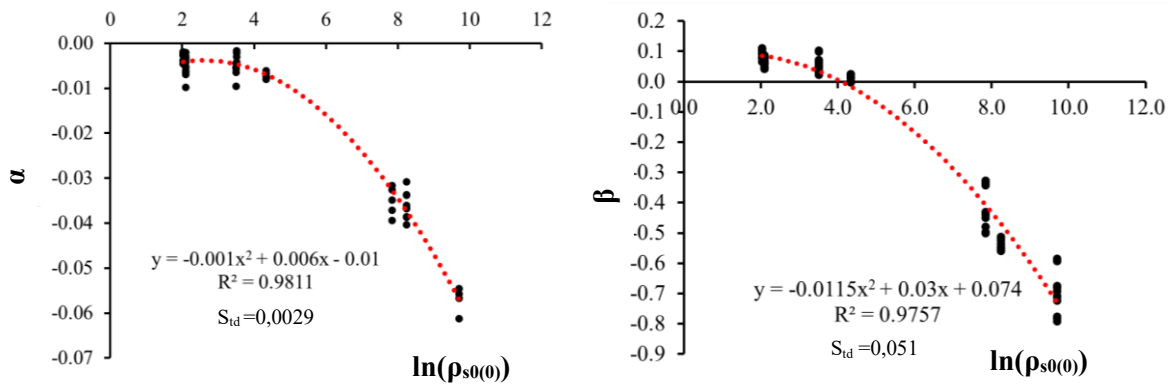
$$\rho_s = \rho_{s0(0)}(e^{\alpha(T-T_0)}) \quad (4.4)$$

trong đó, ρ_s là điện trở suất của mẫu ở nhiệt độ T và độ ẩm $W_0 = 0\%$, còn $\rho_{s0(0)}$ biểu thị điện trở suất của mẫu trong điều kiện tham chiếu với $T_0 = 20^\circ\text{C}$ và $W_0 = 0\%$. Như vậy, khi $T = T_0 = 20^\circ\text{C}$ thì $\rho_s = \rho_{s0(0)}$. Tại Mục 4.2.1, các giá trị của $\rho_{s0(0)}$ là khác nhau giữa các mẫu khác nhau về thành phần vật liệu của chúng, cũng như giữa các mẫu có cùng thành phần vật liệu. Do đó, giá trị này cơ bản có thể được sử dụng để thể hiện sự khác biệt trong cấu trúc vi mô của vật liệu. Do ảnh hưởng của nhiệt độ khác nhau giữa các mẫu nên hệ số mũ α có thể được biểu thị dưới dạng hàm của $\rho_{s0(0)}$. Để xác định mối quan hệ giữa α và $\rho_{s0(0)}$, trước tiên giá trị thực nghiệm của α trong công thức (4.4) có thể được tính bằng công thức (4.5). Tương ứng với các giá trị T, ρ_s , $\rho_{s0(0)}$ đo được trong điều kiện $W = 0\%$ sẽ tính được giá trị thực nghiệm của α_{exp} .

$$\alpha_{\text{exp}} = \frac{\ln(\frac{\rho_s}{\rho_{s0(0)}})}{(T-20)} \quad (4.5)$$

Trong số các hàm khác nhau được thử nghiệm trong phân tích hồi quy, bao gồm tuyến tính, logarit, hàm mũ, hàm lũy thừa, v.v., hồi quy hàm logarit được biểu thị trong công thức (4.6) có mối tương quan cao nhất giữa dữ liệu thực nghiệm và công thức hồi quy được thể hiện tại Hình 4.8(a). Hệ số xác định R^2 cao thể hiện mối tương quan cao giữa giá trị α và giá trị $\ln(\rho_{s0(0)})$. Do đó, hệ số mũ α có thể được tính dựa trên công thức (4.6).

$$\alpha = -0.001 (\ln(\rho_{s0(0)}))^2 + 0.006 \ln(\rho_{s0(0)}) - 0.01 \quad (4.6)$$



(a) Mối quan hệ giữa α and $\ln(\rho_{s0(0)})$ (b) Mối quan hệ giữa β and $\ln(\rho_{s0(0)})$

Hình 4.8. Phân tích hồi quy xem xét ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm

Tương tự như mối quan hệ giữa nhiệt độ và điện trở suất, mối quan hệ giữa độ ẩm và điện trở suất cũng là một hàm phi tuyến và mối quan hệ này khác nhau giữa các mẫu có thành phần vật liệu khác nhau, cũng như giữa các mẫu có cùng thành phần vật liệu. Do đó, mối quan hệ giữa độ ẩm và điện trở suất cũng có thể được biểu thị như công thức (4.7).

$$\rho_s = \rho_{s0(0)} e^{\beta(W-W_0)} \quad (4.7)$$

trong đó ρ_s là điện trở suất của mẫu ở điều kiện nhiệt độ $T_0 = 20^\circ\text{C}$ và độ ẩm W , còn $\rho_{s0(0)}$ là điện trở suất của mẫu ở điều kiện tham chiếu với $T_0 = 20^\circ\text{C}$ và $W_0 = 0\%$. Do đó, $\rho_s = \rho_{s0(0)}$ khi $W = W_0 = 0\%$. Do ảnh hưởng của độ ẩm đến điện trở suất của mẫu phụ thuộc vào chính giá trị của $\rho_{s0(0)}$, nên hệ số mũ β cũng có thể được biểu thị dưới dạng hàm của $\rho_{s0(0)}$ và thu được thông qua phân tích hồi quy của giá trị thực

thực nghiệm $\beta_{\text{exp}} = \frac{\ln(\frac{\rho_s}{\rho_{s0(0)}})}{W - W_0}$ từ công thức (4.7) và giá trị $\rho_{s0(0)}$ dựa trên kết quả đo đặc

mẫu SSC. Mối quan hệ giữa giá trị của β và $\rho_{s0(0)}$ được biểu thị bằng công thức (4.8) và mối tương quan giữa các giá trị này được thể hiện tại Hình 4.8(b). Các hệ số xác định R^2 cao thể hiện mối tương quan cao của mối quan hệ này. Do đó, hệ số mũ β trong công thức này có thể tính được dựa trên công thức (4.8).

$$\beta = -0.0115 (\ln(\rho_{s0(0)}))^2 + 0.03 \ln(\rho_{s0(0)}) - 0.074 \quad (4.8)$$

Công thức (4.6) và (4.8) chỉ xét đến ảnh hưởng của riêng từng yếu tố là nhiệt độ hoặc độ ẩm, còn điều kiện tham chiếu thì giữ nguyên. Do đó, có thể xem công thức sau đây để xem xét đồng thời ảnh hưởng của cả 02 yếu tố:

$$\rho_s = \rho_{s0(0)} e^{\alpha'(T-T_0) + \beta'(W-W_0)} \quad (4.9)$$

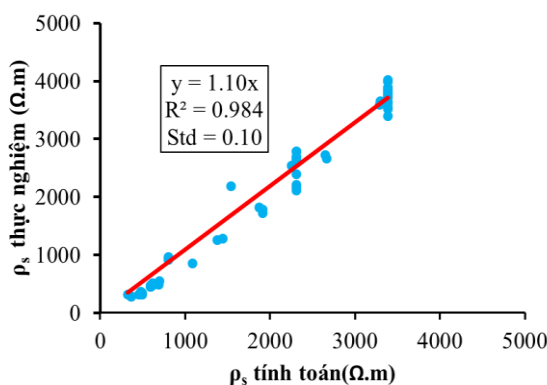
Quan sát thấy rằng $\rho_s = \rho_{s0(0)}$ khi $T = T_0 = 20^\circ\text{C}$ và $W = W_0 = 0\%$. Ngoài ra, có thể giả sử $\alpha' = a\alpha$ và $\beta' = b\beta$. Dựa trên phân tích hồi quy cho cả 04 loại mẫu, trong đó biến phụ thuộc là $\ln(\frac{\rho_{s0(0)}}{\rho_s})$ và 02 biến độc lập là $\alpha(T-T_0)$ và $\beta(W-W_0)$, với α và β được tính theo các công thức (4.6) và (4.8) tương ứng. Từ đó, kết quả hệ số $a = 1,2$ và $b = 0,9$ được xác định. Vì vậy, công thức (4.9) có thể được viết lại như sau:

$$\rho_s = \rho_{s0(0)} e^{1.2\alpha(T-T_0) + 0.9\beta(W-W_0)} \quad (4.10)$$

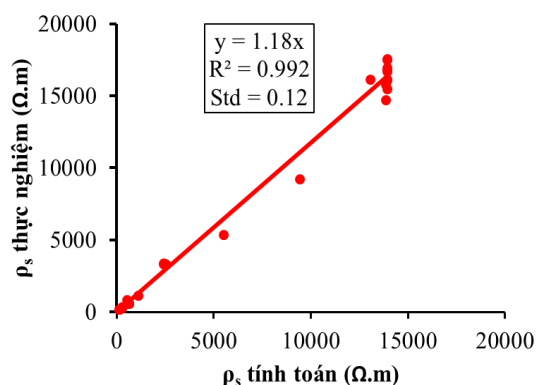
Công thức (4.10) xem xét ảnh hưởng của sự khác biệt về thành phần vật liệu hoặc sự khác biệt về cấu trúc vi mô của vật liệu có cùng thành phần được sử dụng, thông qua giá trị biên $\rho_{s0(0)}$ trong điều kiện môi trường tham chiếu. Ngoài ra, ưu điểm của mô hình này được phát triển so với các nghiên cứu trước đó là có thể xem xét đồng thời ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm. Mức độ ảnh hưởng của các yếu tố này khác nhau đối với các loại vật liệu khác nhau, do đó các hệ số ảnh hưởng như α và β cũng được biểu diễn dưới dạng các hàm liên quan đến giá trị biên $\rho_{s0(0)}$. Ngoài ra, công thức (4.10) được phát triển dựa trên dữ liệu thực nghiệm từ các mẫu bê tông có nhiệt độ dao động từ khoảng 20°C đến 100°C . Do đó, việc áp dụng công thức (4.10) cho các trường hợp nằm ngoài phạm vi nhiệt độ này cần được thực hiện thông qua các thí nghiệm mở rộng.

Mối tương quan giữa dữ liệu thực nghiệm và giá trị tính toán thu được từ công thức (4.10) thể hiện tại Hình 4.9. Các Hình 4.9(a) đến Hình 4.9(d) hiển thị dữ liệu

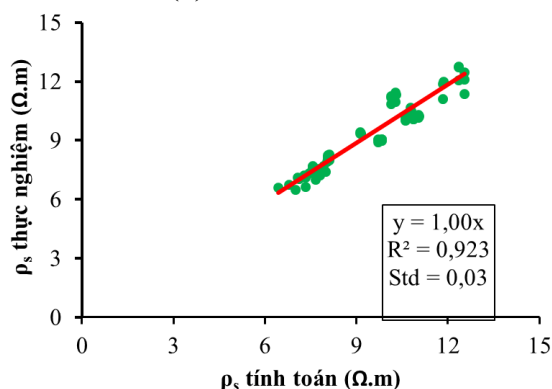
tương ứng cho các mẫu N, CB2, CF2 và CB1CF1. Trong mỗi hình, đường hồi quy tuyến tính có dạng $y = ax$ và hệ số xác định R^2 , độ lệch chuẩn (S_{td}) cũng được thể hiện cho từng mẫu. Có thể thấy rằng các hệ số xác định cho tất cả các trường hợp đều lớn hơn 0,9, cho thấy mối tương quan rất cao giữa dữ liệu thực nghiệm và mô hình hồi quy được xây dựng. Các hệ số R^2 trong Hình 4.9(c) và Hình 4.9(d) thấp hơn so với Hình 4.9(a) và Hình 4.9(b) được cho là do giá trị điện trở suất của mẫu CF2 và CB1CF1 có phạm vi biến đổi nhỏ hơn so với mẫu N và CB2. Ngược lại, độ dốc của đường hồi quy trong Hình 4.9(c) đạt được giá trị lý tưởng là 1,0 và trong Hình 4.9(d) là 1,01, cũng tương đối gần với giá trị lý tưởng. Các giá trị độ lệch chuẩn trong Hình 4.9(c) và Hình 4.9(d) lần lượt là 0,03 và 0,06 thấp hơn các giá trị độ lệch chuẩn trong Hình 4.9(a) và Hình 4.9(b) lần lượt là 0,10 và 0,12. Từ kết quả này, có thể thấy các giá trị tính toán theo mô hình dự đoán có mối tương quan cao với kết quả thực nghiệm.



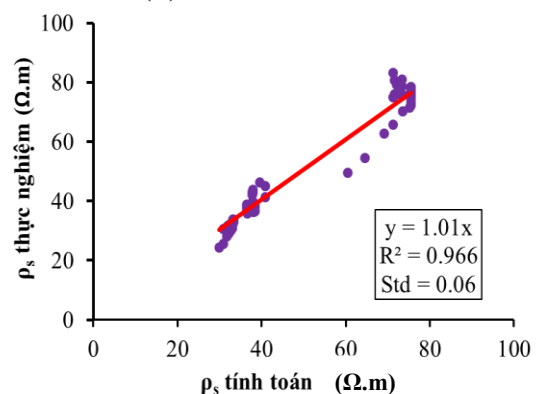
(a) Các mẫu N



(b) Các mẫu CB2



(c) Các mẫu CF2



(d) Các mẫu CB1CF1

Hình 4.9. Mối quan hệ giữa điện trở suất thực nghiệm và điện trở suất tính toán của các mẫu SSC

Độ lệch giữa giá trị tính toán và giá trị thực nghiệm đối với mẫu thử sử dụng sợi carbon thấp hơn so với mẫu thử sử dụng muội than đen hoặc mẫu không có chất dẫn điện. Sự khác biệt này được cho là do sự không ổn định về điện trở suất của cùng một mẫu thử trong điều kiện nhiệt độ và độ ẩm giống nhau đối với các mẫu không có chất dẫn điện và có chất dẫn điện muội than đen 2%. Nguyên nhân của sự sai lệch này nằm ở cấu trúc vi mô của mẫu CB2, có độ rỗng cao cũng như cả mẫu CB2 và N đều thiếu tính dẫn điện ổn định.

Để giảm thiểu độ lệch giữa mô hình dự đoán và kết quả thử nghiệm, các hệ số a và b trong công thức (4.9) có thể được xác định bằng phân tích hồi quy cho dữ liệu của từng loại mẫu. Kết quả phân tích này được thể hiện ở Bảng 4.3.

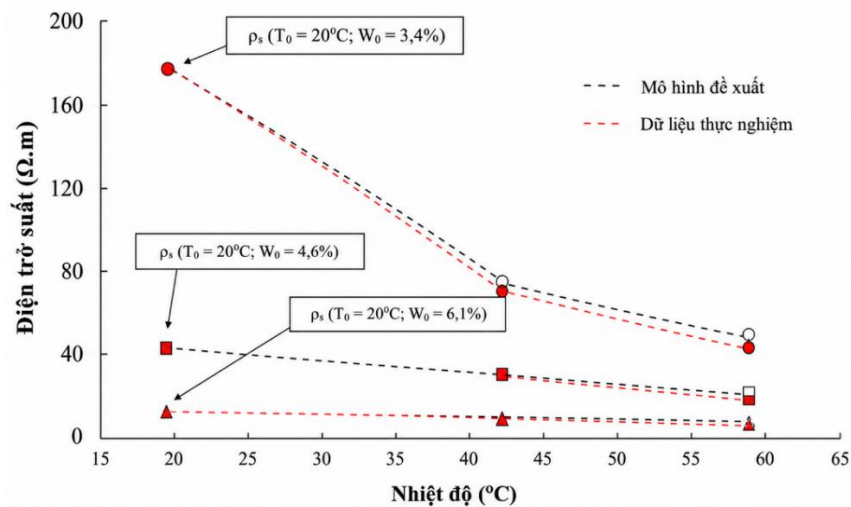
Bảng 4.3. Hệ số a , b dựa trên phân tích hồi quy dữ liệu của từng loại mẫu

Loại mẫu	N	CB2	CF2	CB1CF1
a	1.18	1.16	1.23	1.22
b	0.92	0.95	0.89	0.91
Hệ số xác định	0.989	0.993	0.930	0.978
Hệ số độ dốc	1.08	1.15	1.00	1.01
Độ lệch chuẩn của tỷ lệ	0.08	0.09	0.03	0.05

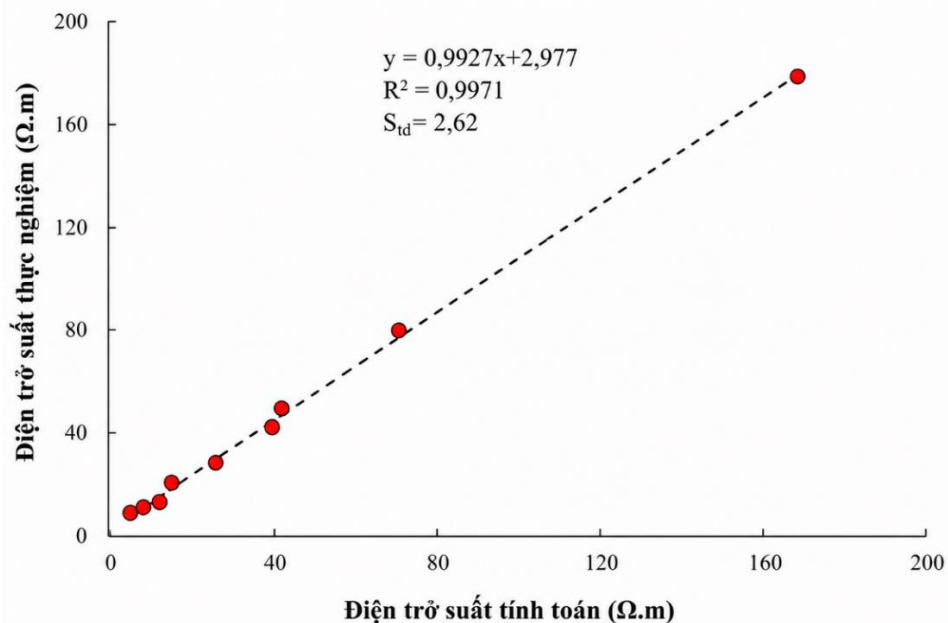
Các tham số biểu thị độ lệch giữa số liệu thực nghiệm và mô hình dự đoán đã giảm, tuy nhiên mức giảm tương đối nhỏ so với phân tích hồi quy được thực hiện trên toàn bộ tập dữ liệu (từ 3% - 9%). Điều này là do các hệ số a và b chỉ thay đổi nhỏ so với phân tích hồi quy trên toàn bộ tập dữ liệu, với hệ số a dao động từ 1,16 đến 1,23, trong khi hệ số b dao động từ 0,89 đến 0,95. Do đó, các giá trị của hệ số a và b có thể được chia sẻ cho cả 4 loại thành phần vật liệu như được trình bày trong công thức (4.10) để đơn giản hóa quá trình tính toán.

Ngoài ra, để thảo luận về khả năng ứng dụng mô hình đề xuất trong việc dự đoán ảnh hưởng của nhiệt độ, độ ẩm đến điện trở suất của các loại vật liệu gốc xi măng khác nhau, số liệu đo đạc từ một số nghiên cứu trước đây được thu thập nhằm đối chiếu. Tuy nhiên, do mục đích nghiên cứu đa dạng nên không có nhiều nghiên cứu cung cấp đầy đủ các giá trị đo điện trở suất và các thông số đầu vào cần thiết để tính điện trở suất theo công thức (4.10) dưới dạng bảng dữ liệu cụ thể. Trong số đó,

dữ liệu được trình bày trong công bố gần đây của tác giả Badr và các cộng sự [117] tương đối cụ thể và có thể được sử dụng để đối chiếu với mô hình đề xuất. Trong công bố này, các phép đo điện trở suất của bê tông được tiến hành ở nhiệt độ từ 20°C đến 60°C với các mức độ ẩm khác nhau. Đối với hỗn hợp bê tông, tỷ lệ nước - xi măng là 0,59, độ rỗng là $15,3 \pm 0,3\%$ và kích thước cốt liệu tối đa là 12,5 mm, thành phần vật liệu cụ thể không được cung cấp trong tài liệu tham khảo.



(a) Mối quan hệ giữa điện trở suất và nhiệt độ, độ ẩm



(b) Mối quan hệ giữa điện trở suất thực nghiệm và tính toán

Hình 4.10. Mối tương quan giữa mô hình đề xuất và dữ liệu thực nghiệm thu được từ tài liệu tham khảo [117]

Mối tương quan giữa giá trị tính toán của mô hình đề xuất và dữ liệu thực nghiệm được thể hiện trong Hình 4.10. Các điểm dữ liệu biểu thị giá trị trung bình của 3 lần đo. Hình 4.10(a) cho thấy mối quan hệ giữa điện trở suất và nhiệt độ ở các mức độ ẩm khác nhau. Đường màu đỏ biểu thị dữ liệu thử nghiệm, trong khi đường màu đen biểu thị các giá trị được tính toán bằng mô hình đề xuất. Hơn nữa, Hình 4.10(b) thể hiện mối tương quan cao giữa các giá trị điện trở suất thực nghiệm và tính toán của mô hình đề xuất. Điều lưu ý là nghiên cứu của tác giả Badr và các cộng sự [117] không đo điện trở suất của mẫu ở điều kiện độ ẩm tham chiếu $W = 0\%$ nên giá trị điện trở suất tham chiếu $\rho_{s0(0)}$ được lấy dựa trên các giá trị khi đo mẫu ở điều kiện $T_0 = 20^\circ\text{C}$ và W_0 tương ứng với độ ẩm của mẫu thử như trong Hình 4.10(a). Các kết quả trong Hình 4.10(a) cho thấy xu hướng điện trở suất giảm khi nhiệt độ tăng và mối tương quan cao giữa các giá trị thực nghiệm và tính toán được quan sát thấy ở cả ba mức độ ẩm. Mối tương quan cao được phản ánh trong công thức hồi quy ở Hình 4.10(b) có độ dốc là 0,9927 và hệ số xác định $R^2 = 0,9971$, độ lệch chuẩn $S_{td} = 2,62$. Do đó, mô hình đề xuất không chỉ thể hiện mối tương quan cao với số liệu thực nghiệm trong nghiên cứu mà còn đánh giá được ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện trở suất của vật liệu gốc xi măng ở các mức độ ẩm khác nhau trong nghiên cứu khác.

Như vậy, mô hình được xây dựng cho thấy mối tương quan chặt chẽ với dữ liệu thực nghiệm cho cả 04 thành phần vật liệu. Độ lệch của mô hình so với dữ liệu thực nghiệm thấp hơn đối với các mẫu có kết hợp sợi carbon làm chất độn dẫn điện. Điều này có thể là do sự hình thành mạng lưới dẫn điện tương đối ổn định bởi các sợi carbon trong bê tông. Ngoài ra, mô hình đề xuất cũng thể hiện mối tương quan cao với dữ liệu ngoài phạm vi nghiên cứu này như thể hiện trong Hình 4.10. Điều này chứng tỏ tiềm năng của mô hình đề xuất trong việc dự đoán điện trở suất trong khi xem xét ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm đối với các thành phần vật liệu khác nhau. Tuy nhiên, để xác nhận thêm tính khái quát của mô hình, cần tiến hành các phép đo hoặc thu thập dữ liệu toàn diện hơn với các thành phần vật liệu khác nhau, các loại chất độn khác nhau và các phương pháp đo khác nhau và so sánh với mô hình trong các nghiên cứu trong tương lai.

4.3. Ứng xử điện trở và mô hình dự đoán hệ số biến thiên điện trở suất của SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi

4.3.1. Ứng xử điện trở suất của mẫu ở các cấp nhiệt độ và độ ẩm khác nhau

Ứng xử điện trở suất của mẫu SSC độc lập dưới tác dụng của tải trọng nén trong phạm vi không phá huỷ ở các cấp nhiệt độ và độ ẩm khác nhau thực hiện theo chương trình thí nghiệm thể hiện tại Mục 2.5.2. Ở mỗi bước gia tải, cường độ dòng điện qua mẫu SSC được xác định theo công thức (2.4); điện trở của mẫu SSC được xác định theo công thức (2.5); điện trở suất của mỗi mẫu SSC được xác định theo công thức (2.6); biến thiên điện trở suất được ký hiệu là $\Delta\rho_s(t)$ được xác định theo công thức (2.7) và ứng suất nén $\sigma_c(t)$ của mẫu SSC được xác định theo công thức (2.8).

Hình 4.11, Hình 4.12, Hình 4.13 và Hình 4.14 thể hiện mối quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của các mẫu CF2-1, CF2-2, CB1CF1-1 và CB1CF1-2 ở các cấp nhiệt độ và độ ẩm khác nhau (Phụ lục 4.4). Trục hoành thể hiện thay đổi ứng suất nén trong phạm vi không phá huỷ, trục tung thể hiện biến thiên điện trở suất theo ứng suất nén.

Hình 4.11 cho thấy ứng xử điện trở suất của mẫu CF2-1 dưới tác dụng của tải trọng nén, có xét đến ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ và độ ẩm, thể hiện mối quan hệ tuyến tính rõ rệt. Điện trở suất của mẫu giảm dần khi tải trọng nén tăng, chứng tỏ mạng lưới dẫn điện trong cấu trúc vật liệu được hình thành và phát triển mạnh. Mẫu thể hiện tính cảm biến tốt nhất trong khoảng nhiệt độ từ 28°C đến 32°C. Khi nhiệt độ tăng lên gần 88°C, tính cảm biến của mẫu giảm, do mạng lưới dẫn điện trở nên ổn định hơn, làm suy giảm khả năng biến đổi điện trở suất. Bên cạnh đó, độ ẩm có xu hướng làm giảm tính cảm biến của mẫu, cho thấy mẫu CF2-1 phù hợp hơn khi làm việc trong môi trường khô.

Hình 4.12 cho thấy mẫu CF2-2 có tính cảm biến cao nhất trong nhóm CF2. Điện trở suất của mẫu giảm mạnh dưới tác dụng của tải trọng nén và mối quan hệ giữa điện trở suất với ứng suất nén là tuyến tính, phản ánh hiệu suất cảm biến cao. Mẫu hoạt động tối ưu trong khoảng nhiệt độ 30°C–32°C. Khi độ ẩm tăng, tính cảm biến của mẫu suy giảm đáng kể, cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của độ ẩm. Do đó, mẫu CF2-2 cần

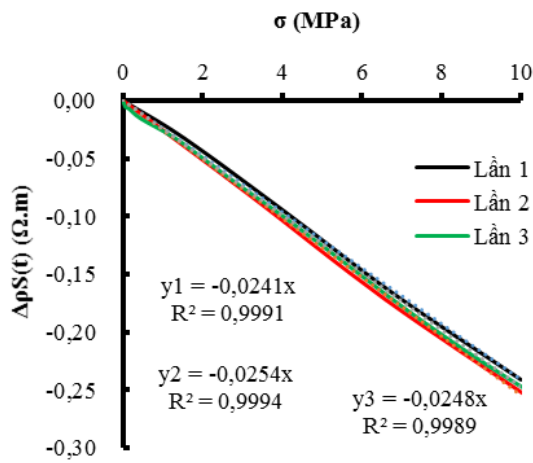
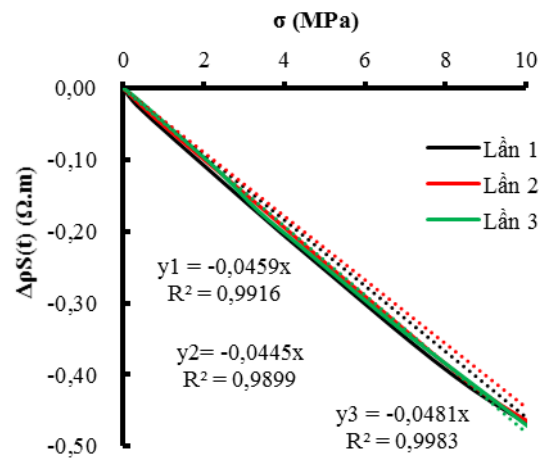
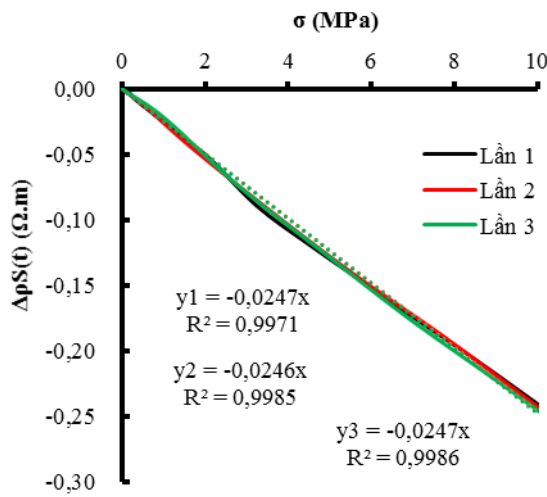
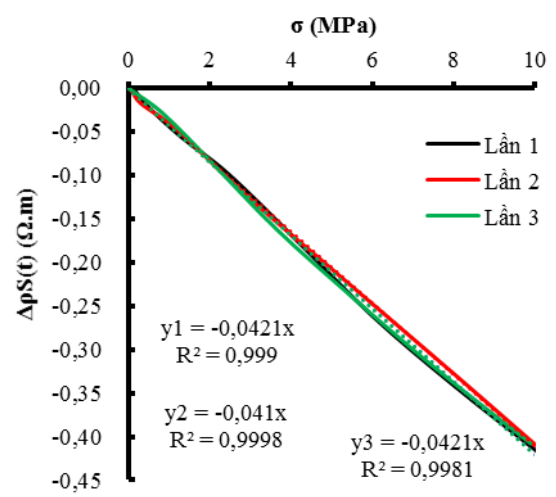
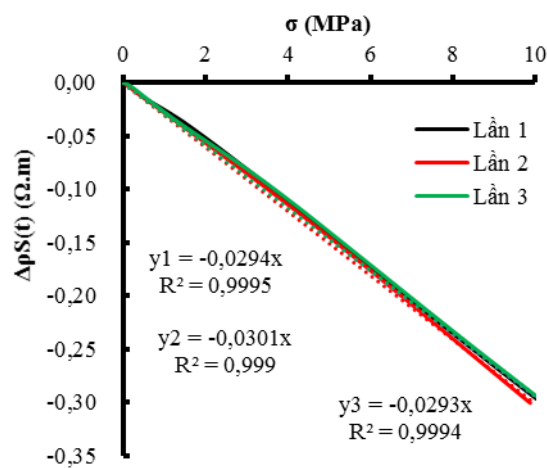
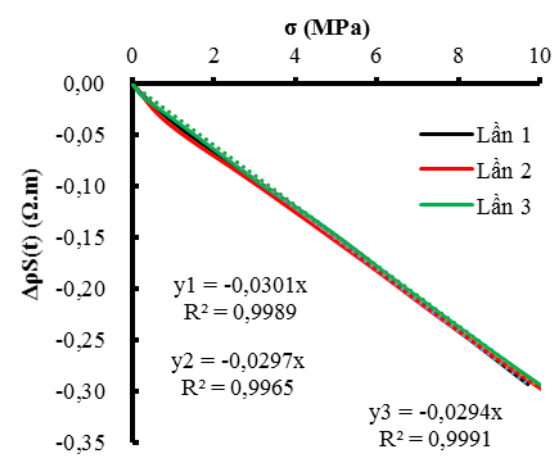
được phủ lớp bảo vệ chống thấm khi ứng dụng trong môi trường ẩm.

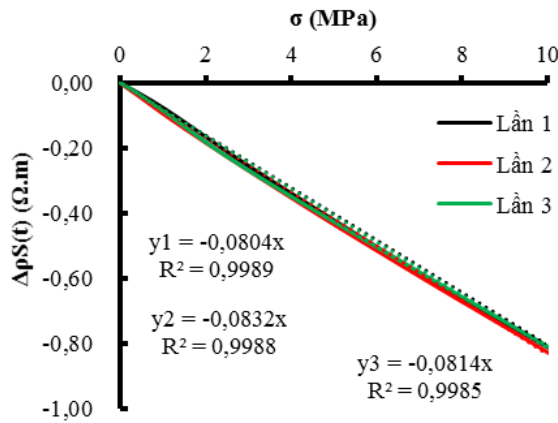
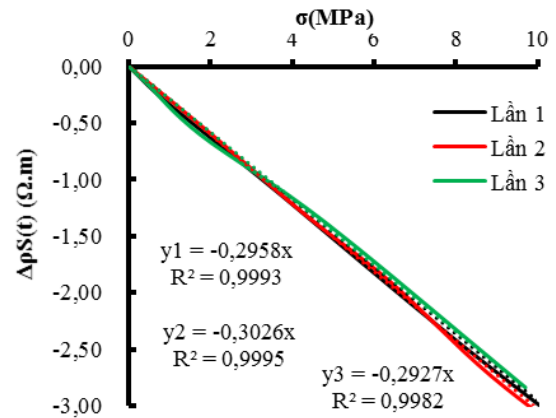
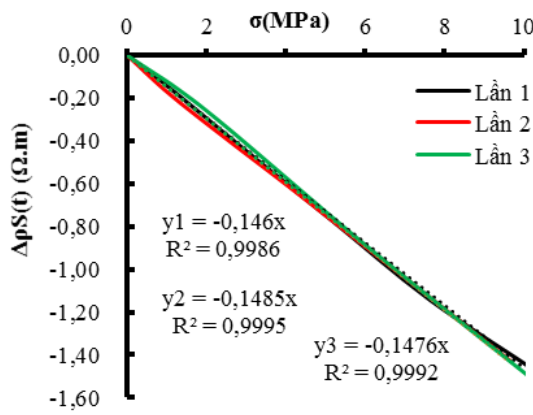
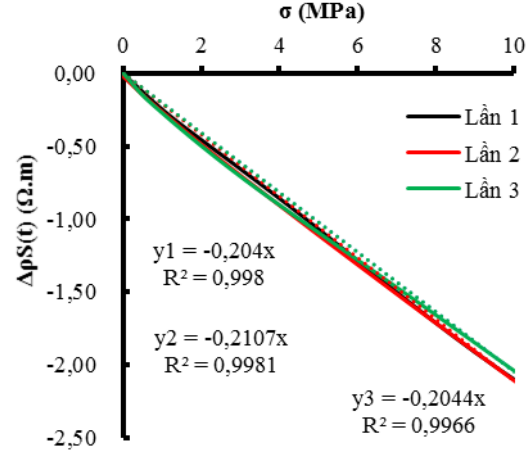
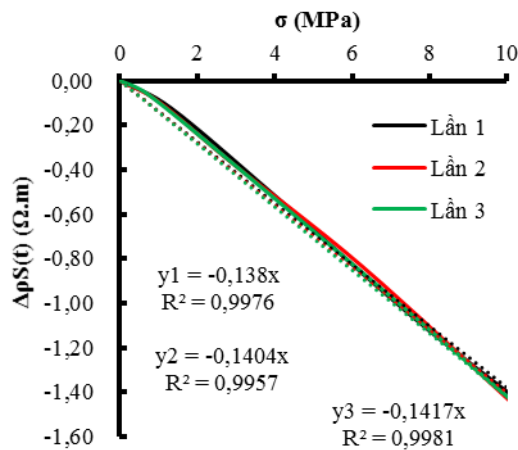
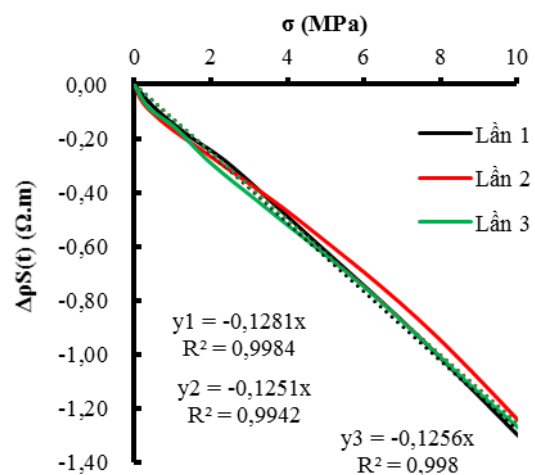
Hình 4.13 chỉ ra rằng mẫu CB1CF1-1 có tính cảm biến tốt nhất khi mẫu ở nhiệt độ phòng và nhiệt độ thấp. Dưới tác dụng của tải trọng nén, điện trở suất của mẫu giảm tuyến tính nên cơ chế cảm biến ổn định. Tuy nhiên, khi độ ẩm tăng, tính cảm biến giảm mạnh và tín hiệu trở nên kém ổn định. Điều này cho thấy mẫu phù hợp nhất trong điều kiện môi trường khô.

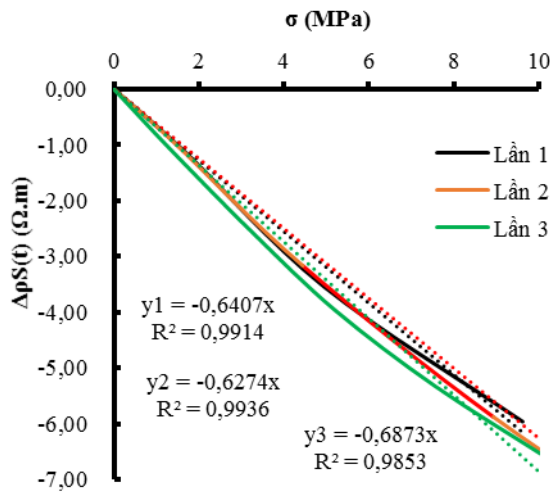
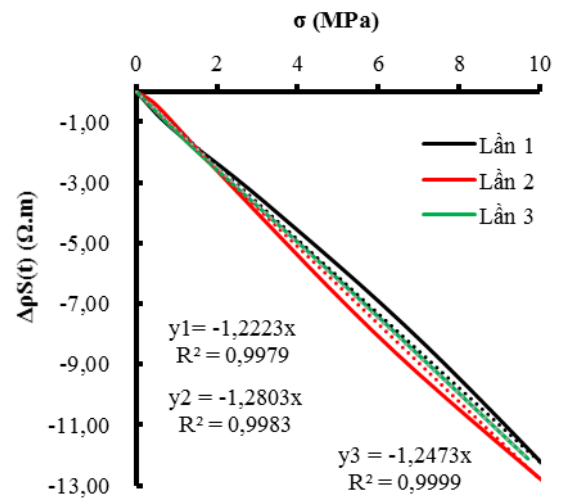
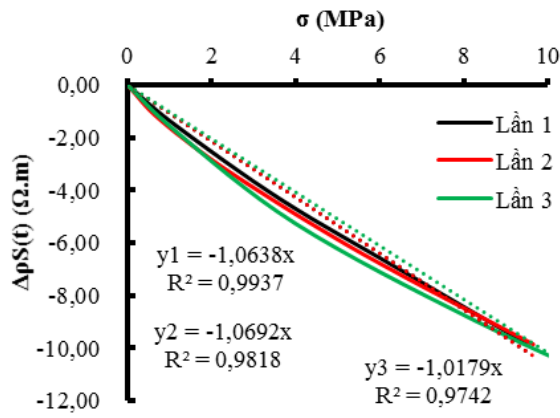
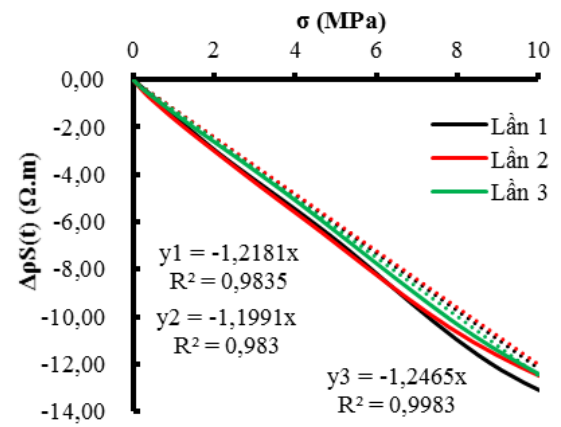
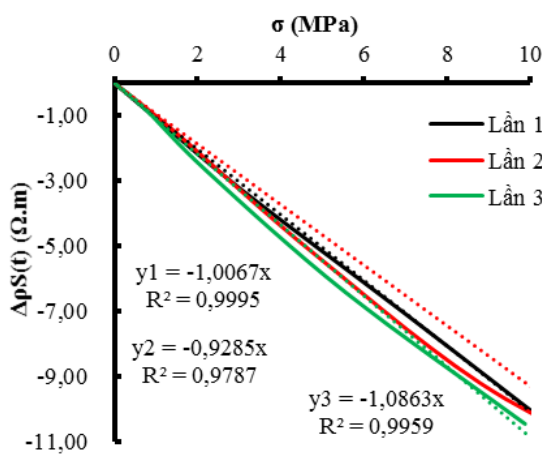
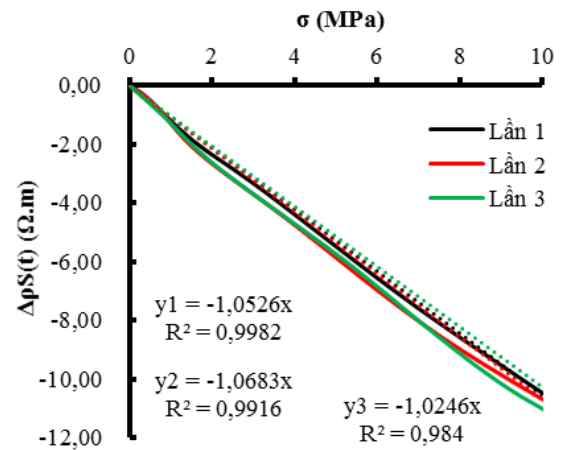
Hình 4.14 chỉ ra rằng mẫu CB1CF1-2 có tính cảm biến cao tại nhiệt độ thấp tương tự CB1CF1-1. Tuy nhiên, khác với các mẫu còn lại, khi độ ẩm tăng đến khoảng 3%, tính cảm biến của mẫu tăng thay vì giảm. Sự gia tăng này có thể liên quan đến khả năng hấp thụ hơi nước giúp cải thiện tiếp xúc dẫn trong các sợi carbon. Điều này cho thấy CF1CB1-2 có thể có tiềm năng ứng dụng độc lập như cảm biến.

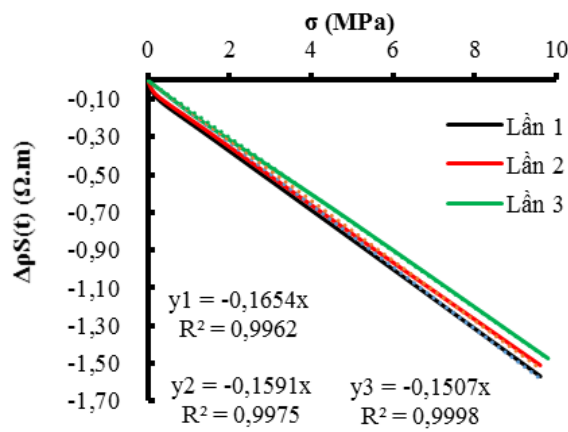
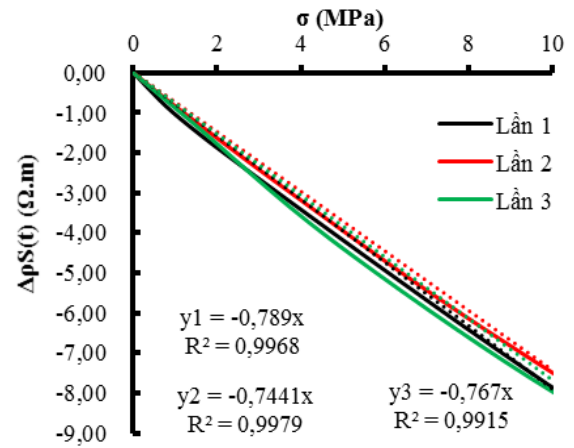
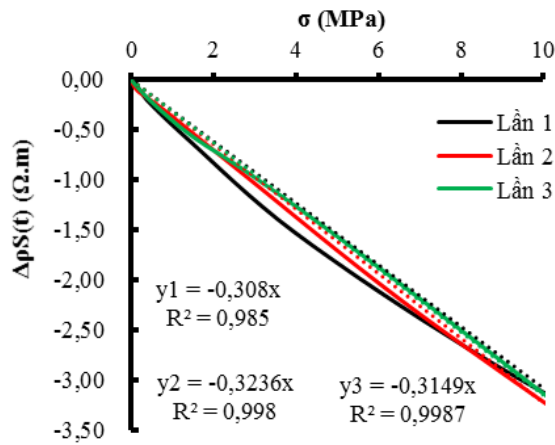
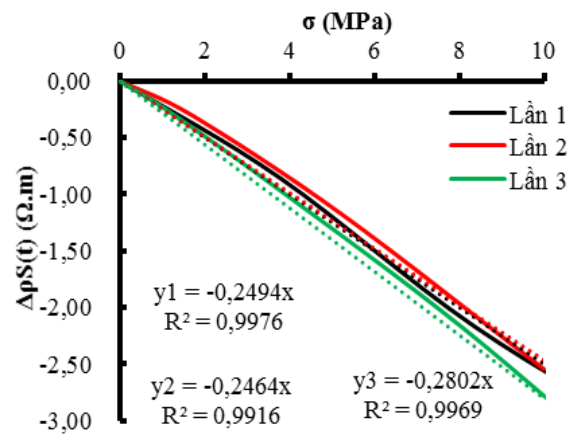
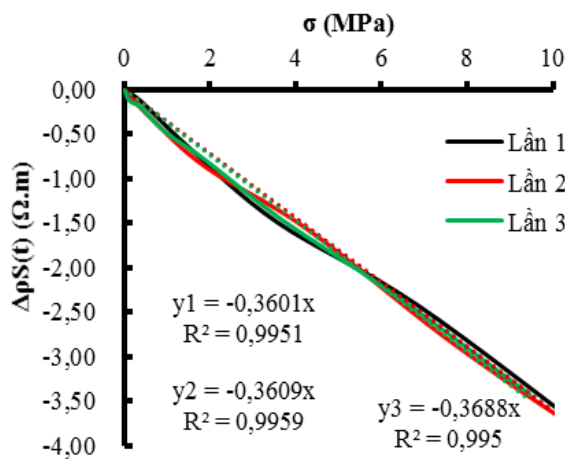
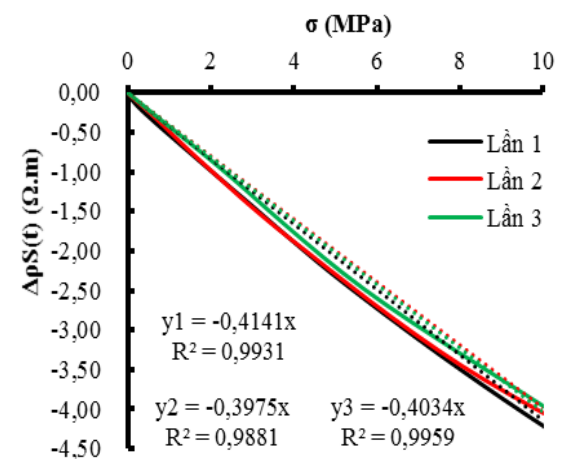
Sau khi thực hiện phân tích hồi quy tuyến tính giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của các mẫu SSC dưới các điều kiện môi trường khác nhau, các tham số thu được được tổng hợp trong Bảng 4.4. Kết quả cho thấy mối quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của tất cả các mẫu đều có tính tuyến tính cao, với hệ số xác định trung bình $R^2_{tb} > 0,9832$. Giá trị hệ số biến thiên điện trở suất trung bình K_{tb} thay đổi theo thành phần cấp phối và điều kiện môi trường, phản ánh sự khác biệt về độ nhạy cảm biến của các loại vật liệu SSC. Đồng thời, độ lệch chuẩn S_{td} của K_{tb} tương đối nhỏ và hệ số biến thiên CV (CV được xác định là tỷ số giữa S_{td} và K_{tb}) nằm trong khoảng từ 0,23% đến 7,83%, trong đó phần lớn các trường hợp có CV nhỏ hơn 5%. Kết quả này cho thấy các phép đo có độ lặp lại cao và tính ổn định tốt giữa các lần thí nghiệm. Các mẫu CF2-1 và CF2-2 thể hiện khả năng tái lập tín hiệu điện tốt hơn, với phần lớn giá trị CV nhỏ hơn 2%. Đối với các mẫu chứa CB1CF1, mặc dù xuất hiện một số trường hợp có mức độ phân tán lớn hơn, song các giá trị R^2_{tb} vẫn duy trì ở mức cao, khẳng định độ tin cậy của phép đo.

Nhìn chung, các kết quả thu được chứng minh vật liệu SSC có khả năng cảm biến ứng suất ổn định và đáng tin cậy dưới các điều kiện nhiệt độ và độ ẩm khác nhau, cho thấy tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống cảm biến tải trọng và giám sát sức khỏe kết cấu giao thông.

(a) $T = 88^\circ\text{C}$, $W = 0\%$ (b) $T = 43^\circ\text{C}$, $W = 0\%$ (c) $T = 30^\circ\text{C}$, $W = 0\%$ (d) $T = 30^\circ\text{C}$, $W = 1,09\%$ (e) $T = 30^\circ\text{C}$, $W = 1,87\%$ (f) $T = 28^\circ\text{C}$, $W = 2,5\%$ **Hình 4.11. Quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu CF2-1**

(a) $T = 85^{\circ}\text{C}$, $W = 0\%$ (b) $T = 40^{\circ}\text{C}$, $W = 0\%$ (c) $T = 31^{\circ}\text{C}$, $W = 0\%$ (d) $T = 32^{\circ}\text{C}$, $W = 1,54\%$ (e) $T = 29^{\circ}\text{C}$, $W = 2,64\%$ (f) $T = 30^{\circ}\text{C}$, $W = 3,38\%$ **Hình 4.12. Quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu CF2-2**

(a) $T = 90^\circ\text{C}$, $W = 0\%$ (b) $T = 41^\circ\text{C}$, $W = 0\%$ (c) $T = 31^\circ\text{C}$, $W = 0\%$ (d) $T = 32^\circ\text{C}$, $W = 1,92\%$ (e) $T = 29^\circ\text{C}$, $W = 3,67\%$ (f) $T = 31^\circ\text{C}$, $W = 4,8\%$ **Hình 4.13. Quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu CB1CF1-1**

(a) $T = 97^\circ\text{C}$, $W = 0\%$ (b) $T = 40^\circ\text{C}$, $W = 0\%$ (c) $T = 30^\circ\text{C}$, $W = 0\%$ (d) $T = 31^\circ\text{C}$, $W = 1,32\%$ (e) $T = 31^\circ\text{C}$, $W = 3,21\%$ (f) $T = 32^\circ\text{C}$, $W = 4,44\%$ **Hình 4.14.** Quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của mẫu CB1CF1-2

Bảng 4.4. Các tham số hồi quy tuyến tính của quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất nén của các mẫu SSC dưới các điều kiện môi trường khác nhau

Mẫu	Môi trường		R^2_{tb}	k_1	k_2	k_3	k_{tb}	S_{td}	cv (%)
	T (°C)	W (%)							
CF2-1	88	0	0,9991	-0,0241	-0,0254	-0,0248	-0,0248	0,00065	2,62
	43	0	0,9933	-0,0459	-0,0445	-0,0481	-0,0462	0,00182	3,94
	30	0	0,9981	-0,0247	-0,0246	-0,0247	-0,0247	0,00006	0,23
	30	1,09	0,9990	-0,0421	-0,0410	-0,0421	-0,0417	0,00064	1,54
	30	1,87	0,9993	-0,0294	-0,0301	-0,0293	-0,0296	0,00044	1,50
	28	2,50	0,9982	-0,0301	-0,0297	-0,0294	-0,0297	0,00035	1,17
CF2-2	85	0	0,9987	-0,0804	-0,0832	-0,0814	-0,0817	0,00143	1,75
	40	0	0,9990	-0,2958	-0,3026	-0,2927	-0,2970	0,00505	1,70
	31	0	0,9991	-0,1460	-0,1485	-0,1476	-0,1474	0,00127	0,86
	32	1,54	0,9976	-0,2040	-0,2107	-0,2044	-0,2064	0,00376	1,82
	29	2,64	0,9971	-0,1380	-0,1404	-0,1417	-0,1400	0,00187	1,33
	30	3,38	0,9969	-0,1281	-0,1251	-0,1256	-0,1263	0,00162	1,28
CB1CF1-1	90	0	0,9901	-0,6407	-0,6274	-0,6873	-0,6518	0,0318	4,88
	41	0	0,9987	-1,2223	-1,2803	-1,2473	-1,2500	0,0291	2,33
	31	0	0,9832	-1,0638	-1,0692	-1,0179	-1,0503	0,0282	2,68
	32	1,92	0,9883	-1,2181	-1,1991	-1,2465	-1,2212	0,0238	1,95
	29	3,67	0,9914	-1,0067	-0,9285	-1,0863	-1,0072	0,0789	7,83
	31	4,80	0,9913	-1,0526	-1,0683	-1,0246	-1,0485	0,0222	2,12
CB1CF1-2	97	0	0,9978	-0,1654	-0,1591	-0,1507	-0,1604	0,0073	4,57
	40	0	0,9954	-0,7890	-0,7441	-0,7670	-0,7667	0,0227	2,96
	30	0	0,9939	-0,3080	-0,3263	-0,3149	-0,3162	0,0094	2,96
	31	1,32	0,9954	-0,2494	-0,2464	-0,2802	-0,2587	0,0188	7,28
	31	3,21	0,9953	-0,3601	-0,3609	-0,3688	-0,3633	0,0048	1,32
	32	4,44	0,9924	-0,4141	-0,3975	-0,4034	-0,4050	0,0084	2,08

4.3.2. Mô hình dự đoán hệ số biến thiên điện trở suất của SSC khi chịu ứng suất trong phạm vi nén đàn hồi

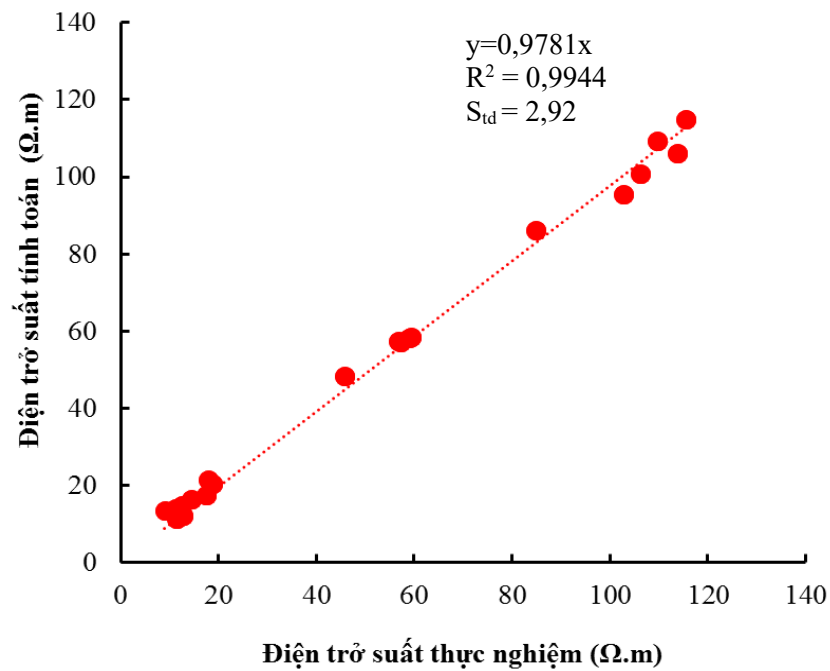
Dựa trên kết quả ở Mục 4.3.1, có thể thấy quan hệ giữa điện trở suất và ứng suất nén ở tất cả các mẫu ở các cấp nhiệt độ và độ ẩm đều có quan hệ tuyến tính. Tuy nhiên, hệ số biến thiên điện trở suất chịu ứng suất trong phạm vi nén đàn hồi tại các trường hợp có sự sai khác nhỏ. Điều này có thể là do ảnh hưởng của cấu trúc của bản thân mỗi mẫu cũng như điều kiện nhiệt độ và độ ẩm khác nhau của các mẫu khi bắt đầu quá trình gia tải. Hay nói cách khác, điện trở suất ban đầu khi chưa chịu tác dụng của tải trọng có thể là yếu tố chính ảnh hưởng đến hệ số biến thiên điện trở suất của các mẫu khi gia tải trọng nén. Để chứng minh điều này, mối tương quan giữa điện trở suất thực nghiệm và điện trở suất tính toán cần được xác định.

Điện trở suất thực nghiệm tương ứng ở các cấp nhiệt độ và độ ẩm khác nhau của tất cả các mẫu SSC được xác định theo công thức $\rho = R_{s(0)} \cdot \frac{a}{L}$. Trong đó, $R_{s(0)}$ là điện trở ban đầu của từng mẫu SSC tương ứng với từng cấp nhiệt độ, độ ẩm (Ω); a là diện tích tiếp xúc của điện cực (m^2); L là khoảng cách giữa 2 điện cực (m).

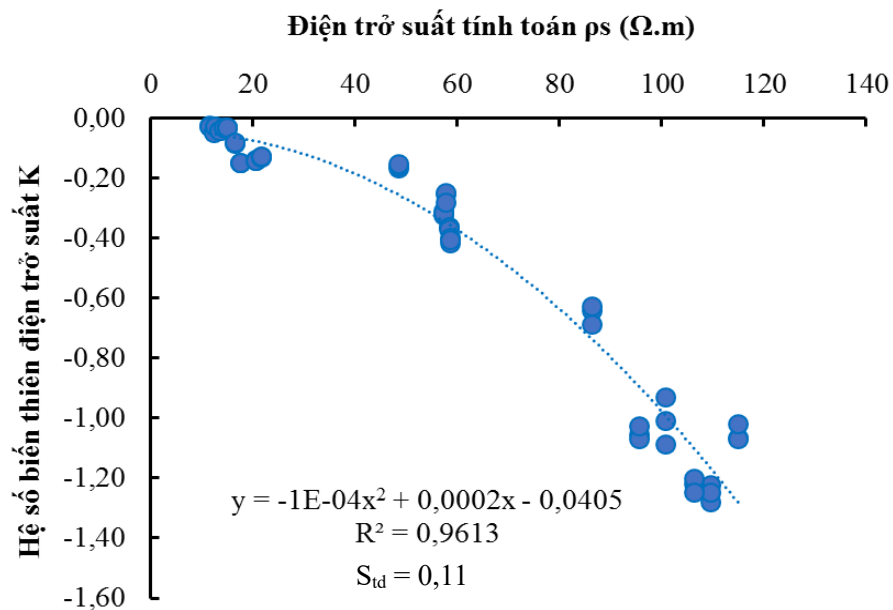
Điện trở suất tính toán của 04 mẫu chịu tải trọng nén trong phạm vi không phá huỷ ở các cấp nhiệt độ và độ ẩm khác nhau được xác định theo công thức số (4.10).

Trong đó: $\rho_{s0(0)}$ là điện trở suất của mẫu ở điều kiện tham chiếu; α được xác định theo công thức số (4.6) và β được xác định theo công thức số (4.8)

Hình 4.15 mô tả mối tương quan giữa điện trở suất tính toán và thực nghiệm (Phụ lục 4.5). Các điểm dữ liệu hình tròn màu đỏ phân bố gần sát theo một đường thẳng, cho thấy mối quan hệ tuyến tính cao giữa 02 đại lượng. Đường hồi quy tuyến tính được xác định với công thức $y=0,9781x$, $R^2=0,9944$, $S_{td} = 2,92$. Giá trị hệ số góc gần bằng 1, độ lệch chuẩn thấp và R^2 gần bằng 1 cho thấy mức tương quan cao của mô hình tính toán so với dữ liệu thực nghiệm. Kết quả này minh chứng phương pháp tính toán điện trở suất đã được áp dụng có độ tin cậy cao và có thể sử dụng để dự đoán điện trở suất của mẫu SSC khi chịu ứng suất trong phạm vi nén đàn hồi ảnh hưởng đồng thời các yếu tố.



Hình 4.15. Tương quan giữa điện trở suất thực nghiệm và tính toán



Hình 4.16. Quan hệ giữa hệ số biến thiên điện trở suất và điện trở suất tính toán

Hệ số biến thiên điện trở suất k của 4 mẫu ở mỗi cấp nhiệt độ và độ ẩm được xác định tại các Hình 4.11 đến Hình 4.14. Điện trở suất tính toán được xác định thông qua công thức (4.10). Dựa vào phân tích hồi quy, mỗi tương quan 02 đại lượng này được xác định bằng 1 hàm số tương quan. Trong số các hàm khác nhau được thử nghiệm

trong phân tích hồi quy thì hàm bậc 2 có mối tương quan cao nhất và độ lệch chuẩn thấp, thể hiện như trong Hình 4.16.

Tương quan giữa hệ số biến thiên điện trở suất (k) và điện trở suất tính toán ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ và độ ẩm được xác định tại công thức (4.11)

$$y = -10^{-4}\rho_s^2 + 0,0002\rho_s - 0,0405 \quad (4.11)$$

Từ công thức (4.11), công thức dự đoán hệ số biến thiên điện trở suất (k) dưới tác dụng của tải trọng nén khi chịu ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố như thành phần cấp phối, nhiệt độ và độ ẩm được biểu diễn như sau:

$$k = -10^{-4}\rho_{s0(0)}^2 e^{2,4\alpha(T-T_0)+1,8\beta(W-W_0)} + 0,0002\rho_{s0(0)} e^{1,2\alpha(T-T_0)+0,9\beta(W-W_0)} - 0,0405 \quad (4.12)$$

Trong đó, $\rho_{s0(0)}$ là điện trở suất của mẫu ở điều kiện tham chiếu $T_0=20^\circ\text{C}$ và $W_0=0\%$

T là nhiệt độ của mẫu tại thời điểm đo

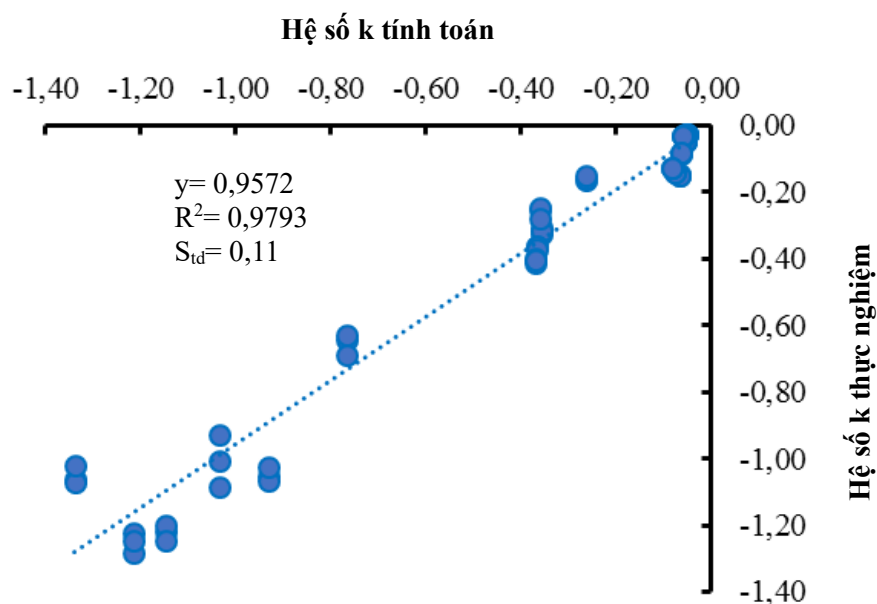
T_0 là nhiệt độ của mẫu ở điều kiện tham chiếu

W là độ ẩm của mẫu tại thời điểm đo

W_0 là độ ẩm của mẫu ở điều kiện tham chiếu

α xác định theo công thức (4.6)

β xác định theo công thức (4.8)



Hình 4.17. Tương quan giữa hệ số k tính toán và hệ số k thực nghiệm

Để đánh giá độ tin cậy và khả năng áp dụng của công thức (4.12), nghiên cứu đã thực hiện phân tích hồi quy tuyến tính giữa hệ số biến thiên điện trở suất (k) tính toán theo công thức (4.12) và hệ số (k) xác định từ thực nghiệm. Kết quả phân tích được trình bày tại Hình 4.17 (Phụ lục 4.5), trong đó trục hoành biểu diễn giá trị hệ số (k) tính toán, còn trục tung biểu diễn giá trị hệ số (k) thực nghiệm.

Kết quả phân tích hồi quy cho thấy hệ số góc của đường tương quan đạt 0,9572, gần bằng 1, trong khi hệ số xác định $R^2 = 0,9793$ và độ lệch chuẩn của dữ liệu ở mức thấp $Std = 0,11$. Các kết quả này cho thấy sự phù hợp tốt giữa giá trị hệ số (k) tính toán và giá trị thực nghiệm, đồng thời phản ánh mức độ tương quan cao giữa hai đại lượng. Điều này chứng tỏ công thức (4.12) có khả năng dự báo tương đối chính xác hệ số biến thiên điện trở suất (k) trong phạm vi điều kiện khảo sát. Do đó, công thức đề xuất có thể được sử dụng như một mô hình thực nghiệm đáng tin cậy để xác định hệ số (k) của vật liệu SSC dưới tác động đồng thời của các yếu tố thành phần cấp phối và điều kiện môi trường nghiên cứu. Trên cơ sở đó, công thức (4.12) có thể được sử dụng để xác định hệ số biến thiên điện trở suất (k) của vật liệu SSC trong miền ứng suất nén đàn hồi khi đồng thời chịu ảnh hưởng của các yếu tố thành phần cấp phối, nhiệt độ và độ ẩm môi trường. Đây là cơ sở để dự đoán sự thay đổi điện trở suất của vật liệu, từ đó hướng đến phục vụ việc nhận dạng và đánh giá tải trọng tác dụng lên mẫu SSC.

4.4. Kết luận chương 4

Những kết luận từ chương này như sau:

- (1) Nhiệt độ và độ ẩm có ảnh hưởng đáng kể đến điện trở suất ban đầu của mẫu ở điều kiện không tải. Những ảnh hưởng này khác nhau không chỉ giữa các mẫu có thành phần vật liệu khác nhau mà còn giữa các mẫu có cùng thành phần vật liệu.
- (2) Công thức dự đoán điện trở suất ban đầu của SSC khi chưa chịu tác dụng của tải trọng được xây dựng có xem xét ảnh hưởng đồng thời của thành phần vật liệu khác nhau và yếu tố môi trường và được trình bày tại công thức (4.10).
- (3) Ứng xử điện trở của mẫu SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén

đàn hồi có xem xét ảnh hưởng đồng thời của thành phần cấp phối khác nhau, ở các cấp nhiệt độ và độ ẩm khác nhau đều có quan hệ giảm tuyến tính.

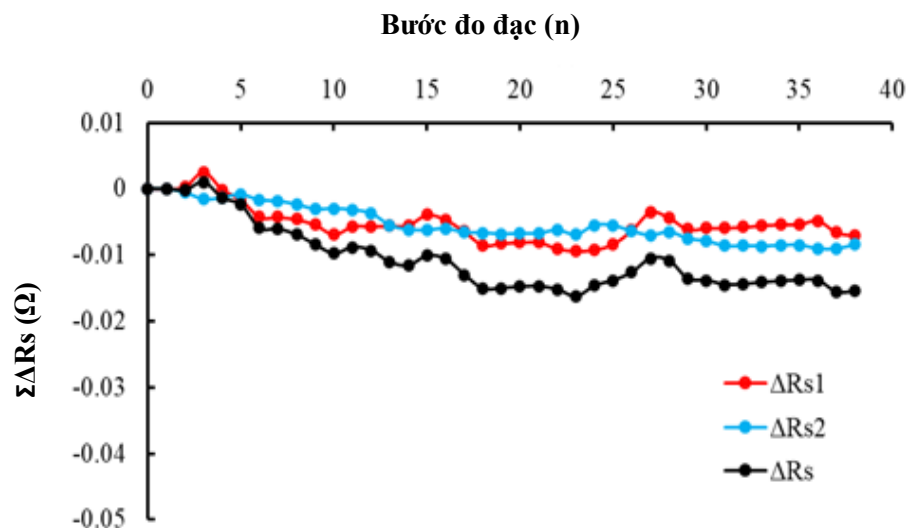
- (4) Công thức xác định giá trị hệ số biến thiên điện trở suất (k) khi chịu tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố như thành phần cấp phối, nhiệt độ và độ ẩm được xác định nhằm dự đoán tải trọng tác dụng lên mẫu SSC và được trình bày tại công thức (4.12).
- (5) Mẫu SSC chứa chất độn dẫn điện sợi carbon với hàm lượng 2% thể tích (CF2) có độ rỗng thấp, cường độ nén cao hơn các loại mẫu SSC có thành phần cấp phối khác. Điều này giúp giảm điện trở suất ban đầu của mẫu bê tông trong điều kiện không tải. Quan sát vi cấu trúc cho thấy các sợi carbon phân bố tương đối đồng đều, ít có hiện tượng kết tụ và không có khoảng trống đáng kể giữa sợi carbon và nền bê tông. Các kết quả này kéo theo kết quả thí nghiệm điện trở suất trong điều kiện có tải và không tải đối với cấp phối CF2 đều tương đối ổn định và có tính tái lập cao. Từ kết quả này, mẫu cấp phối CF2 được lựa chọn để chế tạo mẫu SSC phục vụ nghiên cứu ở chương tiếp theo.

CHƯƠNG 5. ỨNG XỬ ĐIỆN TRỞ CỦA HỆ MẪU BÊ TÔNG TỰ CẢM BIẾN DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG TRONG PHẠM VI NÉN ĐÀN HỒI VÀ PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH DỰ ĐOÁN TẢI TRỌNG

5.1. Ứng xử điện trở của hệ mẫu SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi

5.1.1. Ứng xử điện trở của hệ gồm 02 mẫu kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm chịu nén đúng tâm

5.1.1.1. Ứng xử điện trở của hệ mẫu SSC trong điều kiện không tải



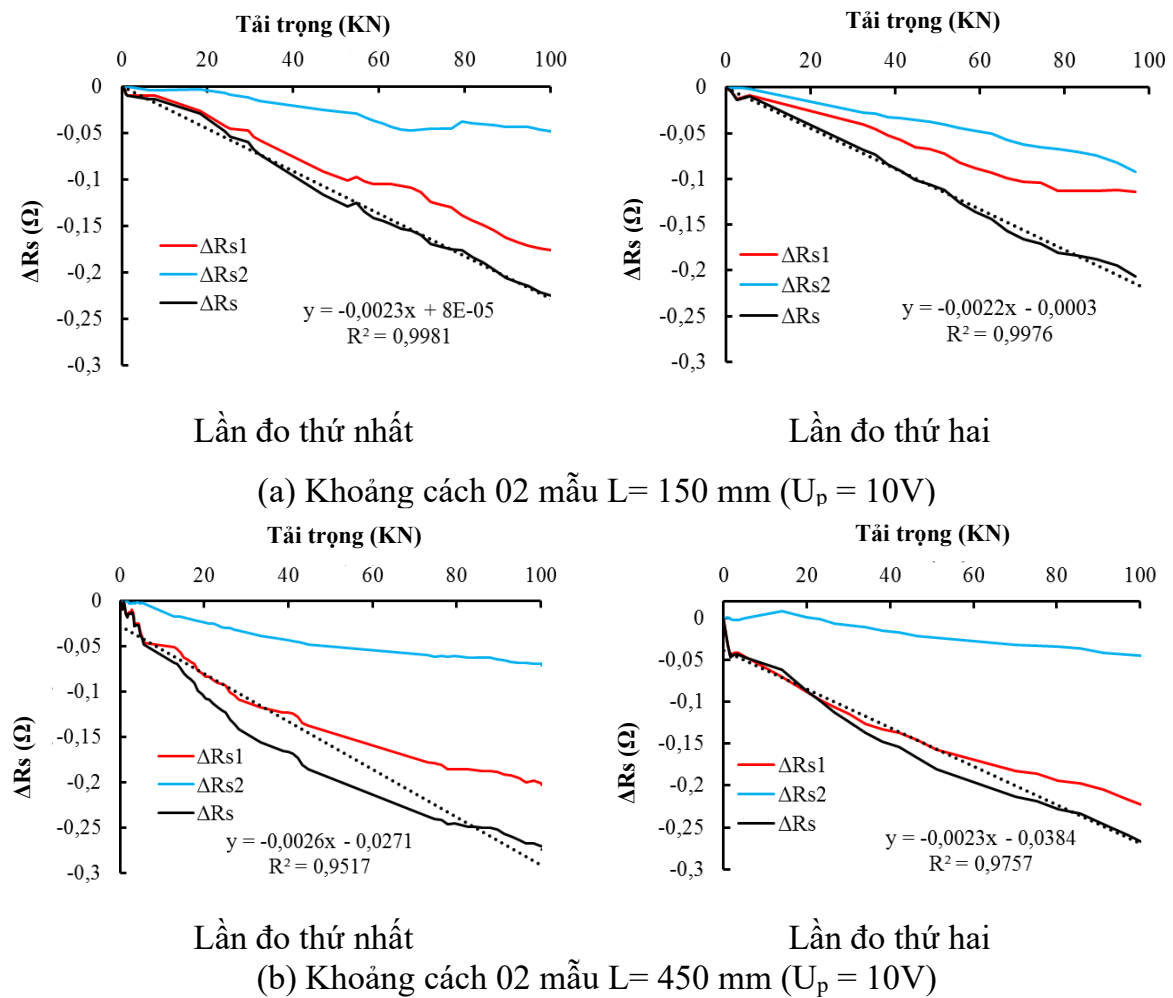
Hình 5.1. Ứng xử điện trở của hệ gồm 2 mẫu SSC trong điều kiện không tải

Mẫu D1 được cung cấp điện áp kích thích $U_p = 12$ (V) và điện trở trung gian có giá trị $R_r = 100$ (Ω). Tương tự, mẫu D2 cũng được cung cấp các thông số $U_p = 12$ (V) và $R_r = 100$ (Ω). 02 mẫu SSC ký hiệu là D1 và D2 được lắp đặt vào mô hình hệ thống cân như trình bày trong Hình 2.17, với các mẫu được nối mạch điện theo sơ đồ trong Hình 2.24. Hình 5.1 thể hiện ứng xử điện trở của hệ mẫu bê tông trong hệ cân trong điều kiện không tải. Các đường màu đỏ (ΔR_{s1}) và màu xanh (ΔR_{s2}) biểu thị ứng xử điện trở của mẫu D1 và D2, trong khi đường màu đen ($\Sigma \Delta R_s$) biểu thị tổng biến thiên điện trở của cả hai mẫu, được xác định theo công thức (2.10).

Trong điều kiện không chịu tải, ứng xử điện trở của các mẫu SSC được quan sát

nhằm đánh giá tính ổn định và sự khác biệt giữa các mẫu. Hình 5.1 cho thấy điện trở từng mẫu có sự biến đổi rất nhỏ và không tuân theo một xu hướng cụ thể nào. Tổng biến thiên điện trở của hệ mẫu cũng gần như không đổi, với các thay đổi dưới $0,02 \Omega$, có thể xem là không đáng kể. Kết quả này chứng tỏ rằng, khi không chịu tác dụng của tải trọng nén, điện trở của các mẫu SSC được cung cấp điện áp kích thích vẫn duy trì ổn định, phù hợp để làm cơ sở đánh giá ứng xử điện trở dưới tải trọng nén trong các giai đoạn thí nghiệm tiếp theo.

5.1.1.2. Ứng xử điện trở của hệ gồm 2 mẫu bê tông chịu tải trọng nén đúng tâm



Hình 5.2. Ứng xử điện trở của hệ gồm 2 mẫu SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi

Ứng xử điện trở của hệ gồm 2 mẫu SSC D1 và D2 làm việc đồng thời được xác định khi chịu tải trọng nén đúng tâm xét cho 2 trường hợp khi khoảng cách 2 mẫu là 150 mm và 450 mm (Phụ lục 5.1). Hình 5.2 cho thấy ứng xử điện trở của các mẫu

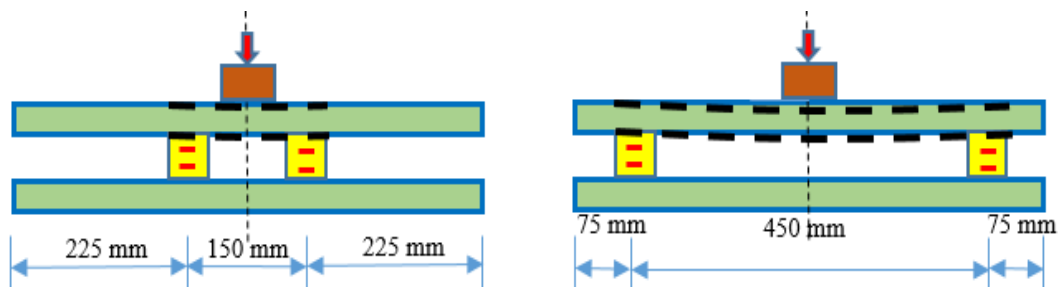
SSC chịu tải trọng nén trên bàn cân. Các đường màu đỏ (ΔR_{s1}) và xanh (ΔR_{s2}) lần lượt thể hiện ứng xử điện trở của các mẫu bê tông D1 và D2, trong khi đường màu đen (ΔR_s) thể hiện ứng xử tổng hợp của cả 02 mẫu theo công thức (2.10). Hình 5.2(a) minh họa trường hợp khi 02 mẫu được đặt cách nhau 150 mm, với các kết quả của lần đo lần thứ nhất và lần thứ hai lần lượt được hiển thị ở các hình bên trái và bên phải. Tương tự, Hình 5.2(b) cho thấy kết quả của 02 lần đo trong trường hợp khoảng cách giữa 02 mẫu là 450 mm. Trong cả 02 trường hợp, nguồn điện áp kích thích sử dụng là 10 V, tương ứng với cường độ dòng điện là 0,164 A và 0,159 A qua các mẫu D1 và D2. Ngoài ra, tải trọng tối đa tác dụng lên mặt cân cho mỗi lần đo là 100 KN, tương ứng với ứng suất nén là 4 MPa tạo ra trên mặt các mẫu bê tông, đảm bảo trong phạm vi nhỏ hơn 1/5 cường độ nén thiết kế của bê tông.

Hình 5.2(a) cho thấy một xu hướng rõ ràng, trong đó điện trở của các mẫu bê tông giảm khi tải trọng nén tăng, trái ngược với xu hướng không ổn định ở Hình 5.1 khi chưa chịu tác dụng của tải trọng nén. Điều này phù hợp với bản chất của SSC, khi các thành phần dẫn điện trong bê tông di chuyển lại gần nhau và giảm kích thước lỗ rỗng gây ra hiện tượng giảm điện trở của các mẫu bê tông dưới tải trọng nén. Tuy nhiên, ứng xử của 02 mẫu SSC khác nhau và không đồng nhất giữa 02 lần đo. Điều này là vì ngay cả với cùng một thành phần vật liệu bê tông, cấu trúc vi mô của 02 mẫu không thể giống hệt nhau. Ngoài ra, mặc dù 02 mẫu được đặt đối xứng nhau so với vị trí chịu tải, nhưng các sai số về độ phẳng của bề mặt các mẫu bê tông và tấm thép có thể ảnh hưởng đến sự phân bố ứng suất không đều giữa 02 mẫu và giữa các lần đo khác nhau.

Một phát hiện quan trọng ở đây là ứng xử điện trở tổng hợp của 2 mẫu (ΔR_s) thể hiện đường màu đen trong cả 02 lần đo cho thấy ứng xử tổng hợp biến thiên điện trở là tương đối nhất quán. Đường nét đứt màu đen đại diện cho đường hồi quy của các điểm dữ liệu trong ứng xử tổng hợp biến thiên điện trở của 02 mẫu, cho thấy độ dốc của đường hồi quy giữa lần đo thứ nhất và lần thứ hai lần lượt là -0,0023 và -0,0022 là khá tương đồng. Hơn nữa, mặc dù các đường ứng xử điện trở của các mẫu D1 và D2 thể hiện xu hướng phức tạp hơn, ứng xử tổng hợp của chúng lại cho thấy

một ứng xử tuyến tính và khá ổn định. Điều này được phản ánh qua hệ số xác định R^2 lớn hơn 0,99 cho cả 02 lần đo.

Hình 5.2(b) cho thấy một xu hướng ứng xử điện trở 02 mẫu tương tự khi khoảng cách giữa 02 mẫu bê tông là 450 mm. Xu hướng này khá giống với Hình 5.2(a), tức là ứng xử của 02 mẫu bê tông khác nhau và thay đổi giữa 02 lần đo. Độ dốc của đường hồi quy ứng xử điện trở tổng hợp là -0,0026 và -0,0023, khá tương đồng với kết quả ở Hình 5.2(a) nhưng cao hơn một chút. Tuy nhiên, có một sự khác biệt rõ ràng giữa kết quả ở Hình 5.2(b) so với Hình 5.2(a), đó là ứng xử tổng biến thiên điện trở của 02 mẫu thể hiện đường màu đen trong lần đo đầu tiên trở nên phi tuyến thay vì tuyến tính. Điều này có thể do khoảng cách giữa 02 mẫu bê tông tăng lên, làm cho ảnh hưởng của tải trọng lệch tâm trở nên rõ ràng hơn được thể hiện tại Hình 5.3. Điều này có nghĩa là độ võng của tấm thép tăng lên, làm cho ứng suất nén tác dụng lên các mẫu bê tông trở nên không đồng đều, qua đó làm tăng tính phi tuyến tính của ứng xử điện trở của hệ 2 mẫu SSC. Điều này có thể được xem là ảnh hưởng khi một tải trọng nén lệch tâm tác dụng lên một cặp mẫu SSC. Để giảm ảnh hưởng này, việc tăng độ cứng của bàn cân cũng như tăng diện tích tiếp xúc bề mặt phẳng của các mẫu bê tông có thể là phương pháp cần thiết.

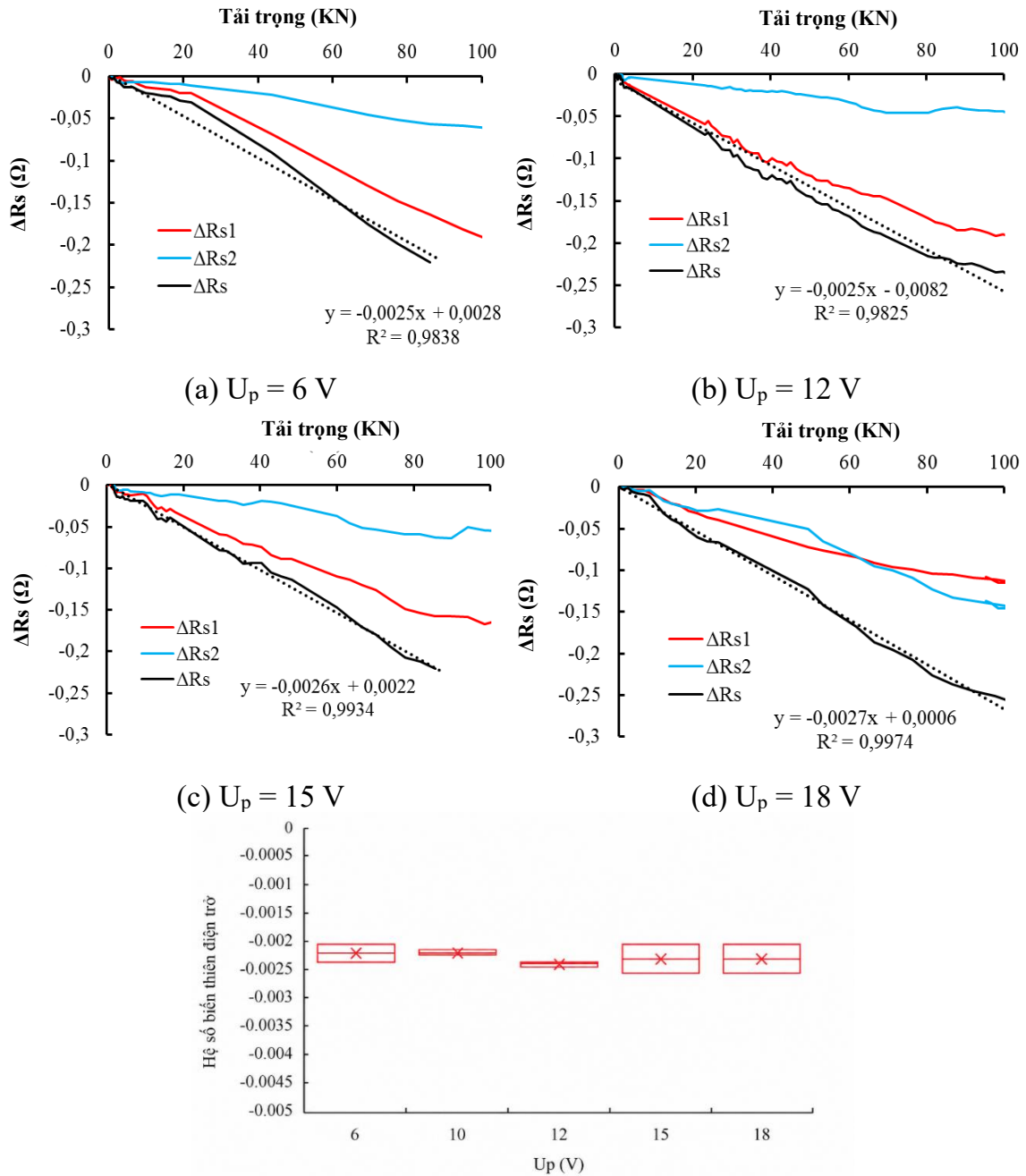


Hình 5.3. Ảnh hưởng khoảng cách giữa 2 mẫu SSC

5.1.1.3. Ứng xử điện trở của hệ gồm 2 mẫu SSC khi chịu tải nén với điện áp nguồn kích thích khác nhau

Từ những kết quả trong Hình 5.2 dẫn đến việc tiến hành các thí nghiệm tiếp theo với các mẫu SSC được đặt cách nhau 150 mm. Điện áp nguồn (U_p) đã được thay đổi trong 4 trường hợp bổ sung, bao gồm 6 V, 12 V, 15 V và 18 V để thay đổi cường độ dòng điện qua mẫu bê tông, là một yếu tố có thể ảnh hưởng đến ứng xử điện trở của bê tông. Trong các trường hợp thí nghiệm này, cường độ dòng điện qua hệ mẫu SSC được xác định theo điều

kiện mạch điện và công thức (2.4) đã trình bày tại Mục 2.6.2, trong đó điện áp kích thích U_p được thay đổi để tạo ra các mức dòng điện khác nhau qua mẫu. Kết quả đo đặc ứng xử điện trở của các mẫu bê tông trong các trường hợp này được hiển thị trong các Hình 5.4(a) đến Hình 5.4(d) tương ứng (Phụ lục 5.2).



(e) Quan hệ giữa điện áp kích thích U_p và hệ số biến thiên điện trở
Hình 5.4. Ứng xử điện trở của hệ gồm 2 mẫu SSC khi chịu tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi tương ứng với điện áp kích thích

Các phát hiện cho thấy ứng xử điện trở trong những hình này không có sự khác

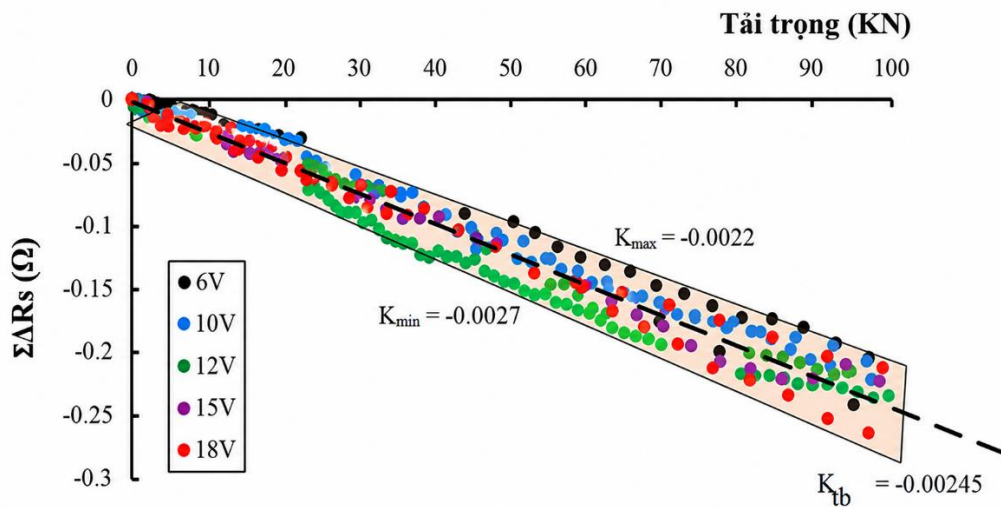
biệt đáng kể so với các ứng xử đã giải thích trong Hình 5.2(a) và Hình 5.2(b) khi điện áp nguồn $U_p = 10V$. Mặc dù ứng xử điện trở của mỗi mẫu bê tông có thể không ổn định, nhưng ứng xử tổng hợp điện trở của hệ mẫu gần như là tuyến tính và ổn định trong tất cả các trường hợp. Việc thay đổi điện áp nguồn trong khoảng từ 6V đến 18V đã làm thay đổi cường độ dòng điện qua mẫu. Tuy nhiên, ngay cả ở trường hợp điện áp thấp nhất là 6V, cường độ dòng điện qua mẫu vẫn đạt 0,098 A và 0,095 A. Trong khi đó, các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng khi cường độ dòng điện kích thích được đặt trên 2 mA thì ứng xử điện trở của SSC ổn định dưới các cấp tải trọng khác nhau. Do đó, cường độ dòng điện được cung cấp trong nghiên cứu này hoàn toàn phù hợp và việc tăng cường độ dòng điện không gây ra sự thay đổi đáng kể trong ứng xử điện trở của các mẫu bê tông.

Mặt khác, hệ số độ dốc của đường hồi quy trong ứng xử tổng biến thiên điện trở của hệ mẫu được gọi là hệ số biến thiên điện trở, đây là giá trị cốt lõi để chuyển đổi giá trị thay đổi điện trở của các mẫu SSC trong hệ cân thành giá trị tải trọng tác dụng lên bàn cân nhằm phát triển ứng dụng hệ thống cân tải trọng quy mô lớn. Do đó, việc xác định giá trị này để gán cho mỗi sản phẩm như một giá trị hiệu chuẩn trước khi chúng được thương mại hóa là cần thiết. Vì vậy, kỹ thuật cốt lõi ở đây là làm sao giảm thiểu sai số trong giá trị này càng nhiều càng tốt.

Từ kết quả đo đạc trong nghiên cứu này, Hình 5.4(e) cho thấy mối quan hệ giữa hệ số độ dốc của đường hồi quy cho ứng xử tổng biến thiên điện trở và điện áp nguồn. Biểu đồ hộp thể hiện biên độ biến thiên trong 02 lần đo với dấu thập thể hiện giá trị trung bình của 02 lần. Kết quả cho thấy giá trị trung bình trong tất cả các trường hợp khá tương đồng, dao động từ -0,0024 đến -0,0025. Trong khi đó, xét giá trị của 02 lần đo, các hệ số dao động từ -0,0022 đến -0,0027. Những kết quả này chỉ ra rằng mặc dù xu hướng của các kết quả thí nghiệm là khá rõ ràng, vẫn có một sai số nhất định trong hệ số biến thiên điện trở của hệ mẫu bê tông tự cảm biến.

Hình 5.5 thể hiện rõ hơn sai số đo lường trong nghiên cứu bằng cách hiển thị tập hợp các điểm dữ liệu của ứng xử tổng hợp điện trở của hệ mẫu theo các trường hợp đo, với vùng màu cam biểu thị phạm vi biến đổi dữ liệu. Có thể thấy rằng giới

hạn trên và giới hạn dưới của hệ số biến thiên điện trở là -0,0022 và -0,0027 so với hệ số trung bình là -0,00245. Điều này có nghĩa là ứng với một giá trị biến thiên điện trở nhất định, giá trị tải trọng có thể chênh lệch trong khoảng $\pm 10\%$ so với giá trị dự đoán trung bình. Do đó, việc giảm phạm vi chênh lệch này là một trong những thách thức lớn trong giai đoạn nghiên cứu tiếp theo để phát triển các hệ thống cân tải trọng quy mô lớn tiên tiến sử dụng SSC.



Hình 5.5. Dữ liệu đo lường mối quan hệ giữa sự biến thiên điện trở và tải trọng nén tương ứng với điện áp kích thích

5.1.2. Ứng xử điện trở của hệ gồm 4 mẫu SSC kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau

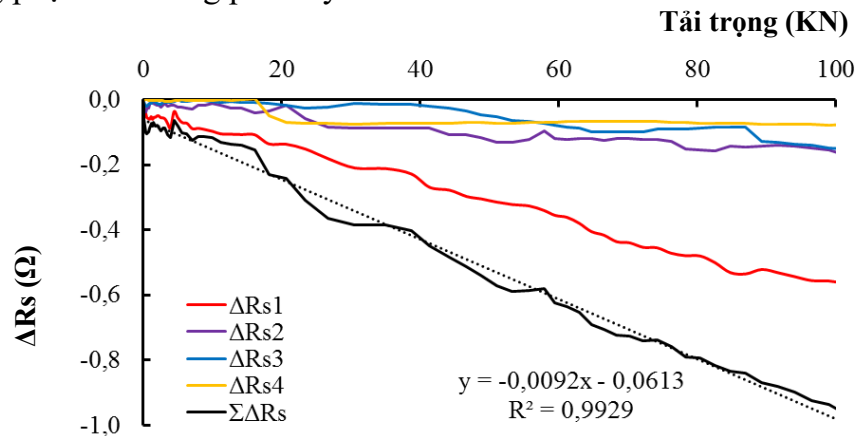
04 mẫu kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm có ký hiệu D1, D2, D3 và D4 được lắp đặt theo mô hình hệ thống cân trình bày trong Hình 2.17, với khoảng cách giữa các mẫu là 150 mm. Sơ đồ kết nối mạch điện của các mẫu bê tông được thực hiện theo Hình 2.24. Điện trở ban đầu $R_{s(0)}$ của mỗi mẫu được đo theo quy trình mô tả tại Mục 2.6.1, và kết quả được tổng hợp trong Bảng 5.1.

Bảng 5.1. Điện trở ban đầu của các mẫu kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm

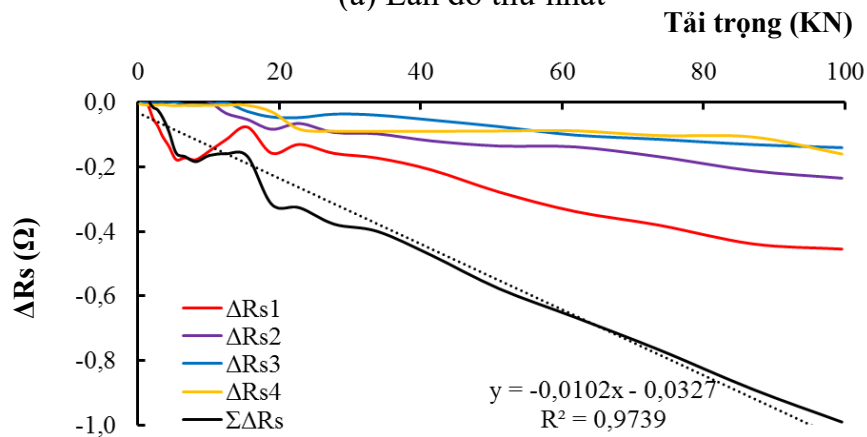
Tên mẫu	D1	D2	D3	D4
$R_{s(0)}$ (Ω)	28	47	18	16

Mặc dù các mẫu được chế tạo từ cùng một thành phần cấp phối bê tông, vẫn tồn tại sự khác biệt nhỏ về điện trở giữa các mẫu, do khó có thể sản xuất các mẫu hoàn

toàn đồng nhất, như đã được ghi nhận trong các nghiên cứu trước. Trong mô hình này, ứng xử điện trở của hệ gồm 04 mẫu làm việc đồng thời được xác định khi hệ cân chịu tải trọng nén tại các vị trí khác nhau: nén đúng tâm, lệch tâm 25 mm và lệch tâm 50 mm. Ở mỗi vị trí, tải trọng tác dụng lên mặt cân là 100 KN, tương ứng với ứng suất nén tác dụng lên bề mặt bê tông của mỗi mẫu là 2 MPa, đảm bảo rằng tải trọng nén nằm trong phạm vi không phá hủy của các mẫu.



(a) Lần đo thứ nhất



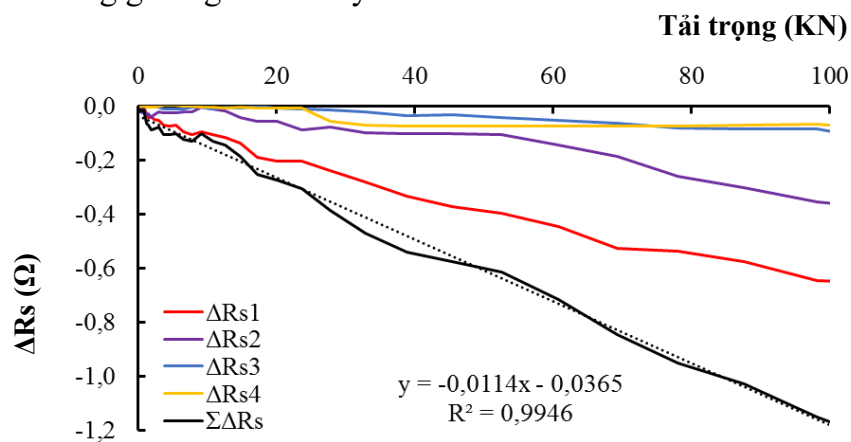
(b) Lần đo thứ hai

Hình 5.6. Ứng xử điện trở của hệ gồm 04 mẫu kích thước 50×50×250 mm chịu tải trọng nén đúng tâm

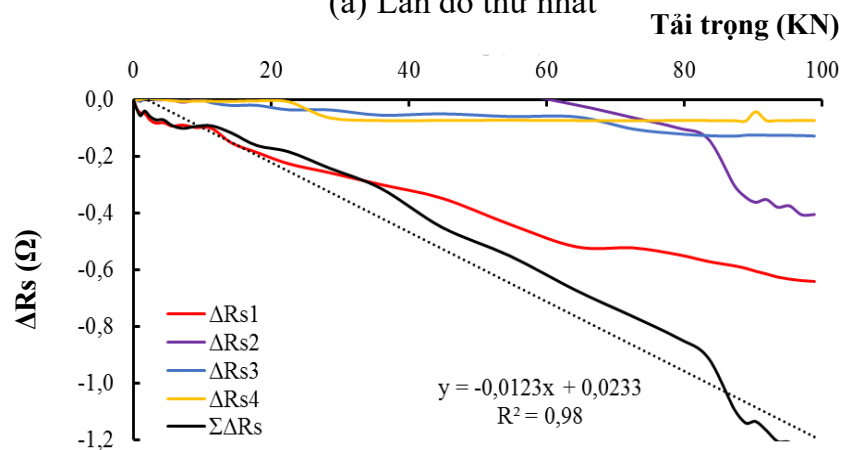
Hình 5.6(a) và Hình 5.6(b) trình bày kết quả lần đo thứ nhất và lần đo thứ hai khi tải trọng được đặt đúng tâm lên bản thép phía trên 04 mẫu SSC. Ứng xử điện trở của từng mẫu trong hệ khác nhau, thể hiện qua các đường ΔR_{s1} , ΔR_{s2} , ΔR_{s3} và ΔR_{s4} , và không tuân theo một xu hướng cố định. Tuy nhiên, ứng xử tổng hợp điện trở của hệ gồm 04 mẫu làm việc đồng thời dưới tác dụng của tải trọng nén trong phạm vi

không phá huỷ tại vị trí nén đúng tâm ở cả hai lần đo đều có chung xu hướng giảm tuyến tính (Phụ lục 5.3). Xu hướng này tương tự như quan sát được ở hệ gồm hai mẫu, đã được phân tích tại Mục 5.1.1.

Hình 5.7(a) và Hình 5.7(b) trình bày ứng xử điện trở của hệ gồm 04 mẫu làm việc đồng thời khi hệ cân chịu tải trọng nén lệch tâm 25 mm (Phụ lục 5.4). Ở cả hai lần đo, ứng xử điện trở của từng mẫu trong hệ có sự khác biệt và không theo một xu hướng cố định; tuy nhiên, ứng xử tổng hợp biến thiên điện trở của toàn hệ mẫu vẫn cho thấy xu hướng giảm gần như tuyến tính.



(a) Lần đo thứ nhất

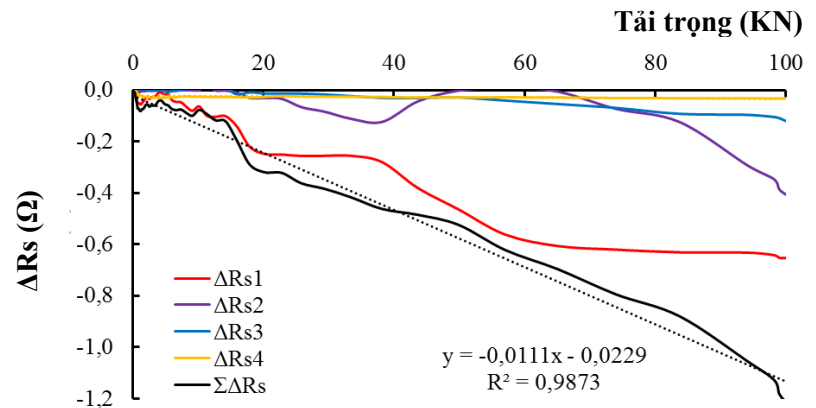


(b) Lần đo thứ hai

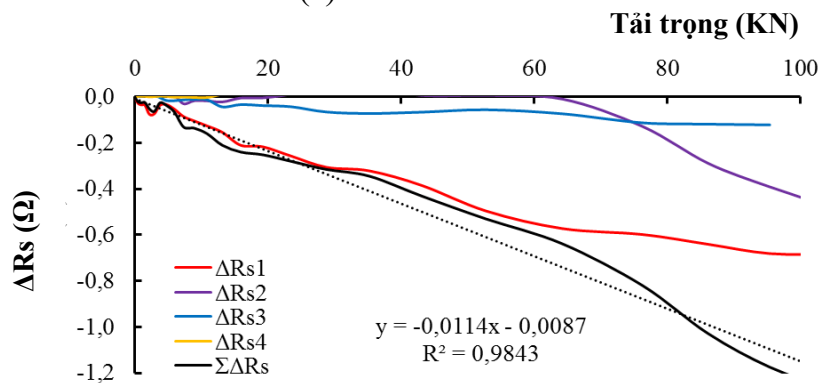
Hình 5.7. Ứng xử điện trở của hệ gồm 04 mẫu SSC kích thước 50×50×250 mm chịu nén lệch tâm 25 mm

Hình 5.8(a) và Hình 5.8(b) trình bày ứng xử điện trở của hệ gồm 04 mẫu khi chịu tải trọng nén lệch tâm 50 mm, ứng với hai lần đo (Phụ lục 5.5). Kết quả cho thấy, ở cả hai lần đo, ứng xử điện trở của từng mẫu trong hệ có sự khác biệt, nhưng ứng xử

tổng hợp biến thiên điện trở của toàn hệ 04 mẫu làm việc đồng thời vẫn có xu hướng giảm gần như tuyến tính. Đồng thời, hệ số xác định (R^2) của đường hồi quy ứng xử tổng biến thiên điện trở dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi đều lớn hơn 0,98, cho thấy ứng xử này có tính tương quan cao.



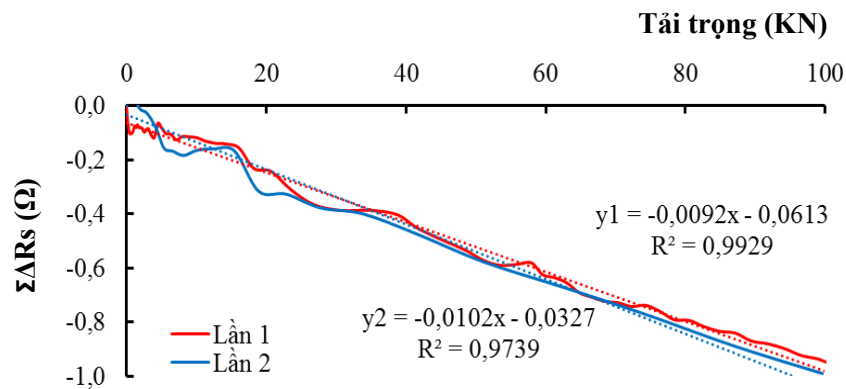
(a) Lần đo thứ nhất



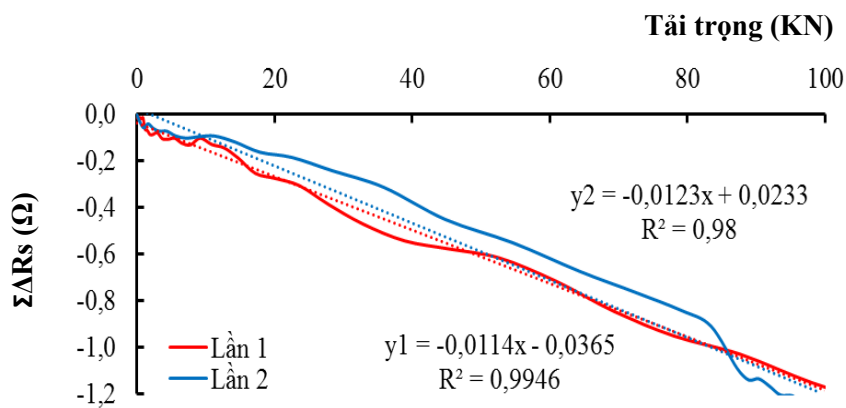
(b) Lần đo thứ hai

Hình 5.8. Ứng xử biến thiên điện trở của hệ gồm 04 mẫu SSC kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm chịu tải trọng nén lệch tâm 50 mm

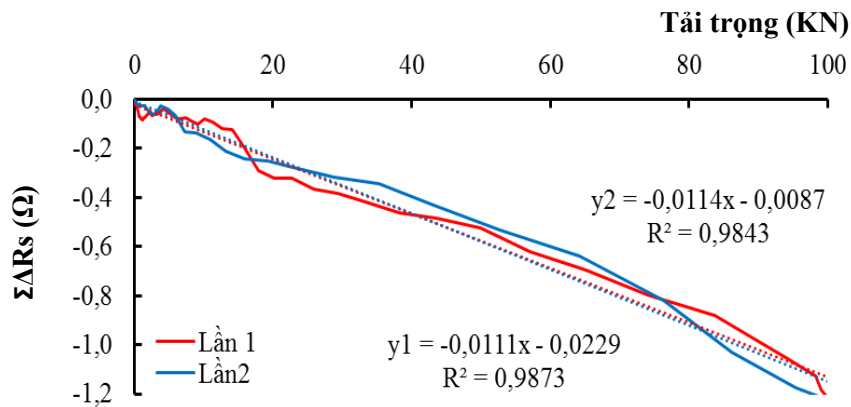
Hình 5.9(a), Hình 5.9(b) và Hình 5.9(c) cho thấy tổng biến thiên điện trở của hệ gồm 04 mẫu làm việc đồng thời khi chịu tải trọng nén đúng tâm, lệch tâm 25 mm và lệch tâm 50 mm đều có xu hướng giảm tuyến tính tương tự (Phụ lục 5.3, Phụ lục 5.4, Phụ lục 5.5). Ở mỗi vị trí gia tải của hệ cân, hệ số biến thiên điện trở (K) giữa các lần đo chỉ chênh lệch nhỏ: tại vị trí nén đúng tâm, K là -0,0092 và -0,0102; khi chịu nén lệch tâm 25 mm, K là -0,0114 và -0,0123; còn khi chịu nén lệch tâm 50 mm, K là -0,0111 và -0,0114. Ứng xử tổng hợp biến thiên điện trở giữa hai lần đo đều có tính tương quan cao, với hệ số (R^2) lớn hơn 0,97, chứng tỏ dữ liệu đo đạc có mối quan hệ tuyến tính mạnh.



(a) Tổng biến thiên điện trở của hệ mẫu khi chịu nén đúng tâm của 2 lần đo



(b) Tổng biến thiên điện trở của hệ mẫu khi chịu nén lệch tâm 25 mm của 2 lần đo

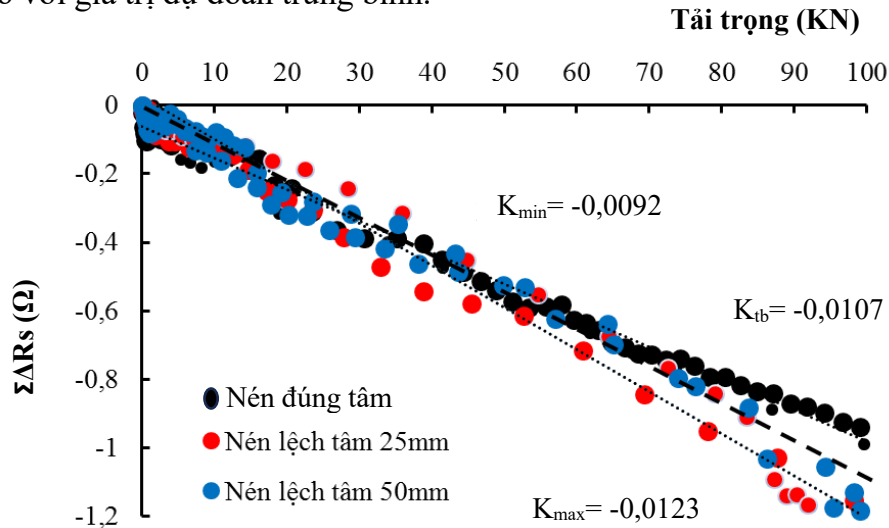


(c) Tổng biến thiên điện trở của hệ mẫu khi chịu nén lệch tâm 50 mm của 2 lần đo

Hình 5.9. Ứng xử tổng biến thiên điện trở của hệ gồm 4 mẫu SSC kích thước 50×50×250 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau

Hình 5.10 minh họa rõ hơn sự chênh lệch trong quá trình đo lường bằng cách hiển thị tập hợp các điểm dữ liệu của ứng xử tổng hợp điện trở của hệ mẫu theo từng trường hợp đo. Có thể thấy rằng giới hạn trên và giới hạn dưới của hệ số biến thiên điện trở

lần lượt là -0,0092 và -0,0123, so với hệ số trung bình là -0,0107. Điều này cho thấy, với một giá trị biến thiên điện trở xác định, giá trị tải trọng có thể dao động khoảng $\pm 14,4\%$ so với giá trị dự đoán trung bình.



Hình 5.10. Dữ liệu tổng hợp tổng biến thiên điện trở của hệ gồm 04 mẫu SSC

kích thước 50×50×250 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau

5.1.3. Ứng xử điện trở của hệ gồm 6 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén tại các vị trí khác nhau

06 mẫu có kích thước 50×50×50 mm, ký hiệu V3, V7, V8, V10, V11 và V12, được lắp đặt vào hệ cân theo mô hình trình bày trong Hình 2.21, với khoảng cách giữa các mẫu theo phương dọc của cân là 225 mm. Các mẫu được kết nối vào mạch điện theo sơ đồ thể hiện trong Hình 2.24, và điện trở ban đầu của mỗi mẫu được đo theo quy trình trình bày tại Mục 2.6.1. Giá trị điện trở ban đầu của từng mẫu được tổng hợp trong Bảng 5.2.

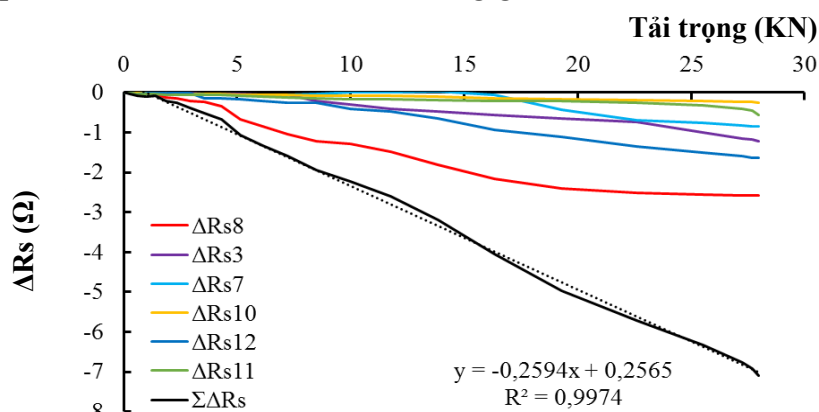
Bảng 5.2. Điện trở ban đầu của các mẫu kích thước 50×50×50 mm

Tên mẫu	V3	V7	V8	V10	V11	V12
$R_{s(o)}$ (Ω)	110	91	61	61	92	110

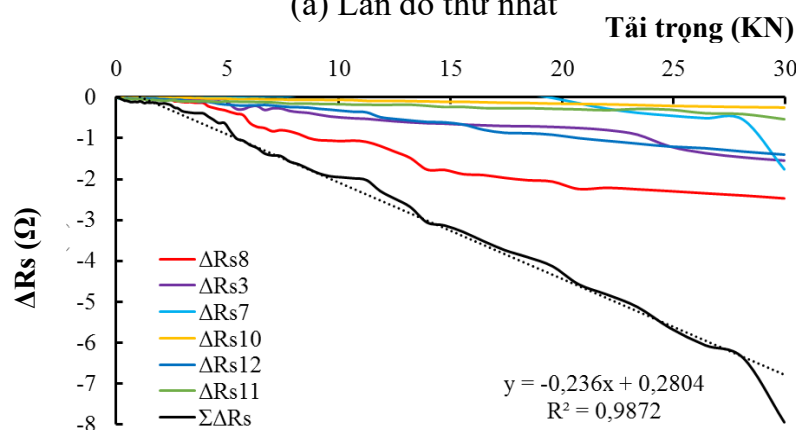
Thí nghiệm được thực hiện xác định ứng xử điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC làm việc đồng thời dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi, tại ba vị trí gia tải: nén đúng tâm, nén lệch tâm 25 mm và nén lệch tâm 50 mm. Ở mỗi vị trí, tải trọng tác dụng lên mặt cân đạt đến 30 KN, đảm bảo ứng suất lên bề mặt bê tông mỗi

mẫu là 2 MPa, tương ứng với ứng suất trong phạm vi nén đàn hồi.

Hình 5.11(a) và Hình 5.11(b) trình bày ứng xử điện trở của từng mẫu trong hệ và ứng xử tổng hợp của hệ gồm 06 mẫu làm việc đồng thời, qua hai lần đo, khi hệ cân chịu tải trọng nén đúng tâm (Phụ lục 5.6). Ở cả hai lần đo, ứng xử điện trở của từng mẫu có sự khác biệt và không tuân theo một xu hướng cố định; tuy nhiên, ứng xử tổng hợp của hệ mẫu lại thể hiện xu hướng giảm tuyến tính theo tải trọng.



(a) Lần đo thứ nhất

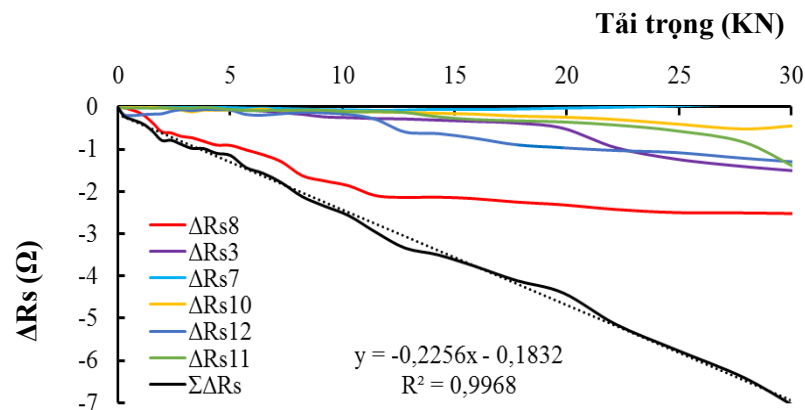


(b) Lần đo thứ hai

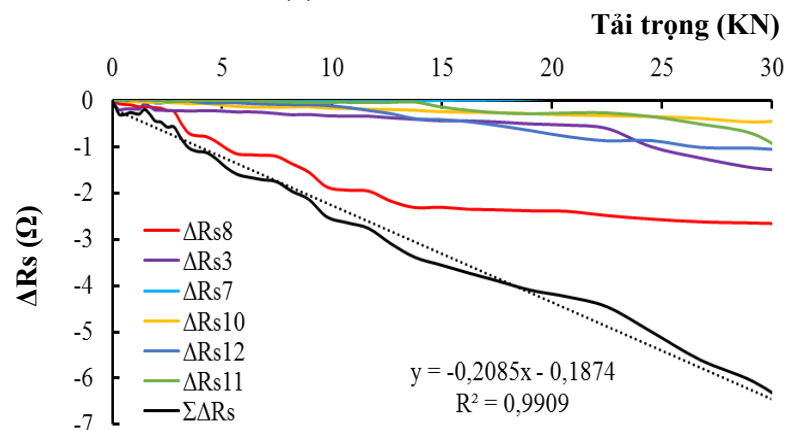
Hình 5.11. Ứng xử biến thiên điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu nén đúng tâm

Hình 5.12(a) và Hình 5.12(b) trình bày ứng xử điện trở của hệ gồm 06 mẫu làm việc đồng thời khi chịu tác dụng của tải trọng nén trong phạm vi không phá huỷ tại vị trí lệch tâm 25 mm (Phụ lục 5.7). Ứng xử điện trở của từng mẫu trong hệ có sự khác biệt, nhưng ứng xử tổng hợp biến thiên điện trở của toàn hệ vẫn thể hiện xu hướng giảm tuyến tính, và xu hướng này được lặp lại tương tự ở hai lần đo. Tuy nhiên,

khi hệ cân chịu nén lệch tâm 25 mm, ứng xử tổng hợp điện trở của hệ mẫu xuất hiện sự phi tuyến nhẹ, nguyên nhân chủ yếu là do hệ chịu nén lệch tâm, khoảng cách giữa các mẫu lớn hơn so với các mô hình khác (khoảng cách giữa các mẫu là 225 mm), đồng thời diện tích tiếp xúc của các mẫu với mặt cân tương đối nhỏ (diện tích 2.500 mm² so với diện tích mặt cân 174.10³ mm²)



(a) Lần đo thứ nhất

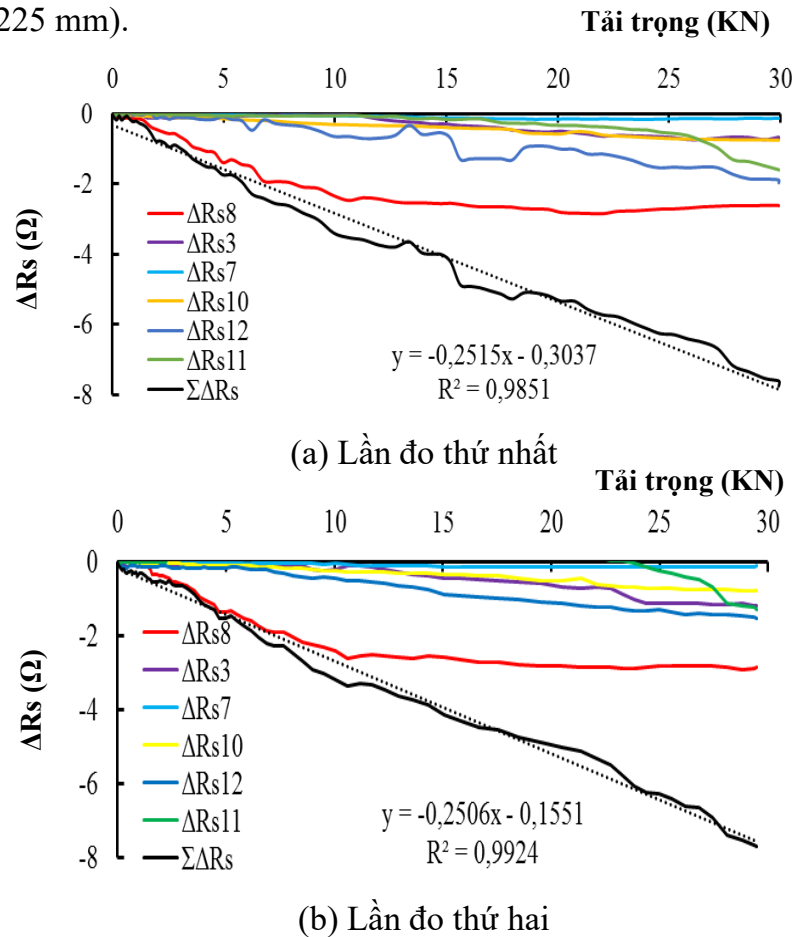


(b) Lần đo thứ hai

Hình 5.12. Ứng xử biến thiên điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu nén lệch tâm 25 mm

Hình 5.13(a) và Hình 5.13(b) trình bày ứng xử điện trở của hệ gồm 06 mẫu làm việc đồng thời khi chịu tải trọng nén trong phạm vi không phá hủy tại vị trí nén lệch tâm 50 mm (Phụ lục 5.8). Ở vị trí nén này, ứng xử điện trở của từng mẫu và cả hệ mẫu có xu hướng tương tự như khi hệ cân chịu nén đúng tâm và nén lệch tâm 25 mm, nghĩa là điện trở của từng mẫu trong hệ có sự khác biệt, nhưng ứng xử tổng hợp biến thiên điện trở của toàn hệ vẫn thể hiện xu hướng giảm tuyến tính, và xu hướng này

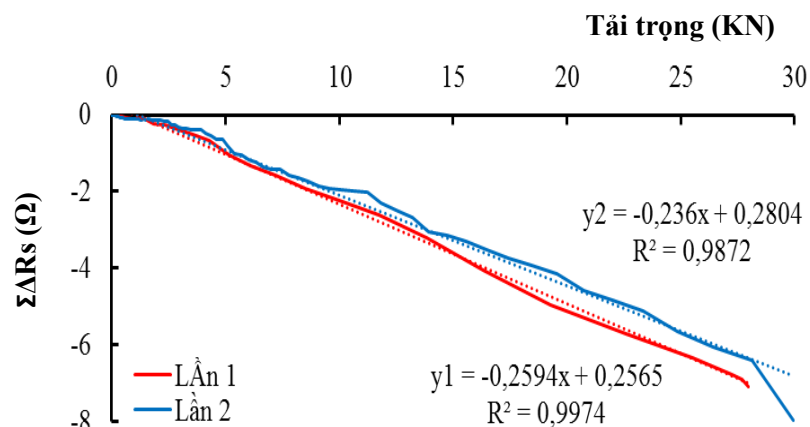
được lặp lại ở hai lần đo. Tuy nhiên, tổng biến thiên điện trở của hệ mẫu xuất hiện sự phi tuyến, nguyên nhân là do hệ cân chịu nén lệch tâm 50 mm, diện tích tiếp xúc giữa mặt mẫu và mặt cân nhỏ, đồng thời khoảng cách giữa các mẫu lớn hơn so với các mô hình khác (225 mm).



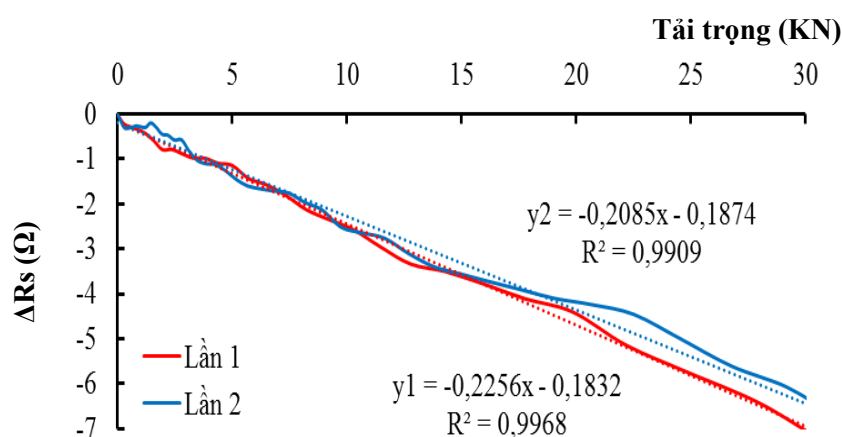
Hình 5.13. Ứng xử biến thiên điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu nén lệch tâm 50 mm

Hình 5.14(a), Hình 5.14(b) và Hình 5.14(c) cho thấy ứng xử tổng hợp biến thiên điện trở của hệ gồm 06 mẫu làm việc đồng thời khi chịu tải trọng nén đúng tâm, lệch tâm 25 mm và lệch tâm 50 mm đều có xu hướng giảm tuyến tính (Phụ lục 5.6, Phụ lục 5.7, Phụ lục 5.8). Tuy nhiên, khi hệ mẫu chịu nén lệch tâm 25 mm và 50 mm, bắt đầu xuất hiện sự phi tuyến nhẹ. Ứng xử tổng hợp điện trở của hệ mẫu tại mỗi vị trí gia tải có tính tái lập, thể hiện qua hệ số biến thiên (K) gần nhau, hệ số (K) khi chịu nén đúng tâm: -0,2594 và -0,236, hệ số (K) khi chịu nén lệch tâm 25 mm: -0,2256 và -0,2085, hệ số (K) khi chịu nén lệch tâm 50 mm: -0,2515 và -0,2506. Tại các hình,

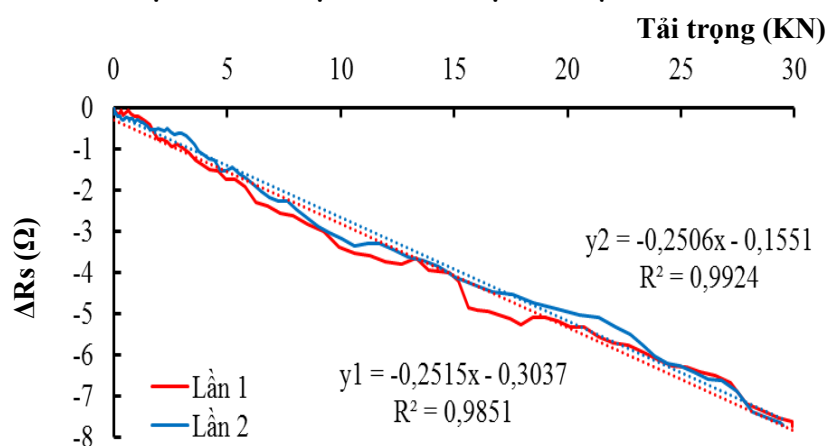
ứng xử điện trở và tải trọng có tính tương quan cao, với hệ số R^2 đều lớn hơn 0,98.



(a) Tổng biến thiên điện trở của hệ mẫu khi chịu nén đúng tâm của 2 lần đo



(b) Tổng biến thiên điện trở của hệ mẫu khi chịu nén lệch tâm 25 mm của 2 lần đo

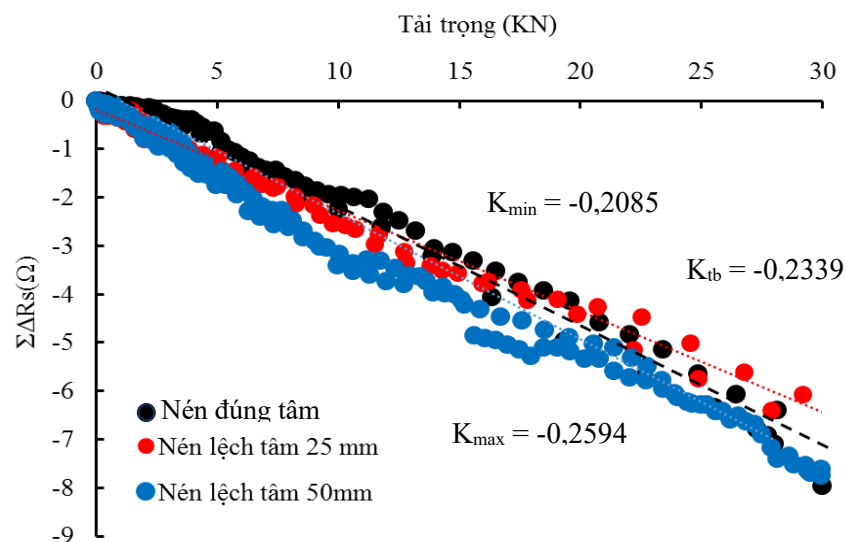


(c) Tổng biến thiên điện trở của hệ mẫu khi chịu nén lệch tâm 50 mm của 2 lần đo

Hình 5.14. Ứng xử tổng biến thiên điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau

Mặc dù xu hướng của các kết quả thí nghiệm thể hiện tại Hình 5.14(a), Hình 5.14(b) và Hình 5.14(c) khá rõ ràng, giá trị hệ số biến thiên điện trở của hệ mẫu khi

chịu tác dụng của tải trọng tại các vị trí khác nhau vẫn có sự chênh lệch. Sự khác biệt về đáp ứng điện giữa các mẫu SSC trong cùng một hệ không chỉ xuất phát từ điều kiện chịu tải khác nhau mà còn liên quan đến tính không đồng nhất vốn có của vật liệu SSC. Mặc dù các mẫu được chế tạo cùng cấp phối, sự phân bố ngẫu nhiên của sợi dẫn điện, cấu trúc lỗ rỗng và mạng dẫn điện trong nền xi măng làm cho điện trở suất ban đầu và hệ số đáp ứng điện của từng mẫu có thể khác nhau. Bên cạnh đó, trong hệ nhiều mẫu, tải trọng truyền qua bản phân phối lực không hoàn toàn đồng đều giữa các vị trí, dẫn đến sự khác biệt về ứng suất tác dụng lên từng mẫu SSC. Do đó, đáp ứng điện riêng lẻ của các mẫu có thể khác nhau. Tuy nhiên, khi tổng hợp đáp ứng của toàn bộ hệ, sự sai khác cục bộ được bù trừ và mối quan hệ giữa tải trọng tác dụng với tín hiệu điện tổng thể vẫn duy trì tính ổn định. Hình 5.15 minh họa sự chênh lệch này bằng cách hiển thị tập hợp các điểm dữ liệu ứng xử tổng hợp điện trở của hệ mẫu theo từng trường hợp đo. Có thể thấy rằng giới hạn trên và giới hạn dưới của hệ số biến thiên điện trở lần lượt là -0,2085 và -0,2594, trong khi hệ số trung bình là -0,2339. Điều này cho thấy, với một giá trị biến thiên điện trở xác định, giá trị tải trọng có thể lệch khoảng $\pm 10,8\%$ so với giá trị dự đoán trung bình.



Hình 5.15. Dữ liệu tổng hợp tổng biến thiên điện trở của hệ gồm 06 mẫu SSC kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau

5.1.4. Tổng hợp các chỉ số thống kê về ứng xử điện cơ tổng thể cho tất cả các trường hợp thí nghiệm

Bảng 5.3. Các chỉ số thống kê về phản ứng điện cơ tổng thể cho tất cả các trường hợp thí nghiệm

Hệ cân	Hệ cân gồm 2 mẫu kích thước 50×50×250 mm		Hệ cân gồm 4 mẫu kích thước 50×50×250 mm			Hệ cân gồm 6 mẫu kích thước 50×50×50 mm		
Chỉ số đánh giá	Nén đúng tâm L giữa 2 gói 150 mm	Nén đúng tâm L giữa 2 gói 450 mm	Nén đúng tâm	Nén lệch tâm 25 mm	Nén lệch tâm 50 mm	Nén đúng tâm	Nén lệch tâm 25 mm	Nén lệch tâm 50 mm
R^2_{tb}	0,9978	0,9637	0,9834	0,9873	0,9858	0,9923	0,9938	0,9887
K_{tb}	-0,0022	-0,0024	-0,0097	-0,0118	-0,0112	-0,2477	-0,2170	-0,2511
S_{td}	0,0001	0,0002	0,0007	0,0006	0,0002	0,0166	0,0121	0,0006
CV (%)	4,55	8,66	7,29	5,37	1,89	6,68	5,57	0,25
Sai số	± 10%		± 14,4%			± 10,8%		

Dựa vào kết quả phân tích tại Mục 5.1.1 – 5.1.3, Bảng 5.3 trình bày các chỉ số thống kê đánh giá phản ứng điện cơ tổng thể của hệ cảm biến SSC trong các cấu hình thí nghiệm khác nhau. Kết quả cho thấy mối quan hệ giữa biến thiên điện trở và tải trọng tác dụng có độ tuyến tính rất cao, với hệ số xác định trung bình R^2_{tb} dao động từ 0,9637 đến 0,9938. Điều này chứng tỏ tín hiệu điện thu được phản ánh tốt sự thay đổi của tải trọng trong các trường hợp khảo sát. Hệ số nhạy điện cơ trung bình K_{tb} có sự khác biệt đáng kể giữa các cấu hình hệ cân, từ -0,0022 đến -0,2511, cho thấy kích thước mẫu cảm biến, số lượng mẫu và vị trí tác dụng tải có ảnh hưởng rõ rệt đến độ nhạy của hệ thống. Các giá trị độ lệch chuẩn (S_{td}) tương đối nhỏ, trong khi hệ số biến thiên (CV) dao động từ 0,25% đến 8,66%, phản ánh độ lặp lại và tính ổn định tốt của kết quả thí nghiệm. Đặc biệt, hệ cân gồm 6 mẫu kích thước 50×50×50 mm

cho giá trị CV thấp nhất (0,25%) trong trường hợp tải lệch tâm 50 mm, thể hiện độ tin cậy cao của phản ứng điện cơ. Sai số tổng hợp của các cấu hình hệ cân lần lượt khoảng $\pm 10,0\%$, $\pm 14,4\%$ và $\pm 10,8\%$, cho thấy mô hình đề xuất có khả năng nhận dạng tải trọng với độ chính xác tương đối tốt trong phạm vi điều kiện thí nghiệm đã khảo sát. Nhìn chung, kết quả là cơ sở khoa học hướng đến ứng dụng của SSC trong các hệ thống cân tải trọng quy mô lớn dựa trên nguyên lý áp điện trở.

5.2. Mô hình dự đoán tải trọng tác dụng lên hệ nhiều mẫu SSC

Từ các kết quả thu được ở Mục 5.1 về ứng xử điện trở của hệ gồm nhiều mẫu SSC khi chịu tác dụng của tải trọng trong phạm vi đàn hồi tại các vị trí gia tải khác nhau trên mô hình cân thu nhỏ, nghiên cứu này đề xuất xây dựng mô hình dự đoán tải trọng tác dụng lên hệ nhiều mẫu SSC, qua đó hướng tới việc phát triển một hướng ứng dụng hoàn toàn mới cho vật liệu SSC. Mô hình dự báo tải trọng được xây dựng trong phạm vi làm việc tuyến tính của các mẫu SSC. Giá trị tải trọng giới hạn của hệ được xác định dựa trên điều kiện làm việc của mẫu SSC chịu trạng thái bất lợi nhất trong từng cấu hình tải, nhằm bảo đảm các mẫu SSC trong hệ vẫn nằm trong miền ứng xử tuyến tính của cảm biến.

Mô hình dự đoán tải trọng tác dụng lên hệ thống cân thu nhỏ trong phòng thí nghiệm được minh họa trong Hình 2.17. Tải trọng (P) tác dụng lên mặt cân được truyền xuống hệ gồm nhiều mẫu bê tông tại các vị trí gia tải khác nhau. Khi đó, tải trọng tổng (P) của hệ được xác định bằng tổng tải trọng tác dụng lên từng mẫu bê tông, như sau:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (5.1)$$

$$P = \sigma_1 \cdot A + \sigma_2 \cdot A + \dots + \sigma_n \cdot A \quad (5.2)$$

$$P = A \left(\frac{\Delta \rho_1}{K_1} + \frac{\Delta \rho_2}{K_2} + \dots + \frac{\Delta \rho_n}{K_n} \right) \quad (5.3)$$

$$P = A \cdot \frac{a}{L} \left(\frac{\Delta R_1}{K_1} + \frac{\Delta R_2}{K_2} + \dots + \frac{\Delta R_n}{K_n} \right) \quad (5.4)$$

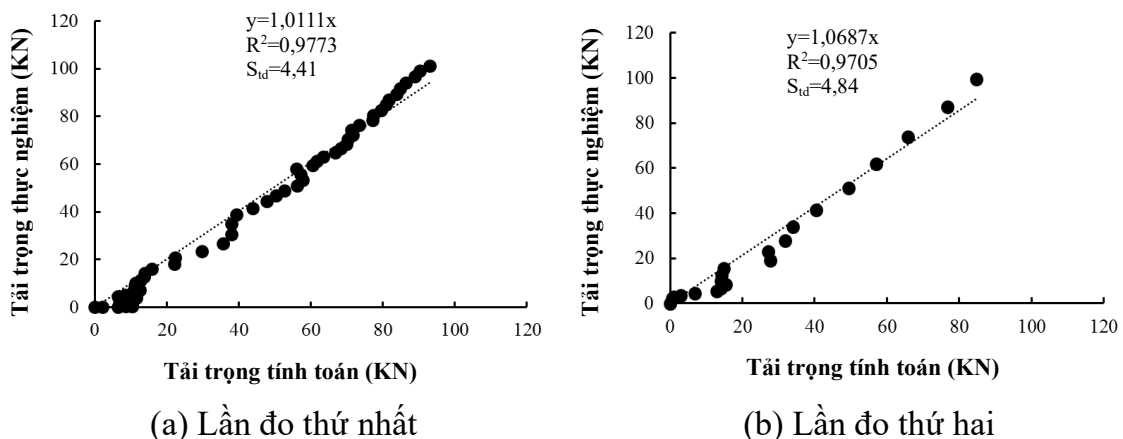
Trong đó, P (KN) là tải trọng vật thể cần xác định; $\Delta \rho_1, \Delta \rho_2, \dots, \Delta \rho_n$ ($\Omega \cdot m$) lần lượt là giá trị biến thiên điện trở suất so với điện trở suất ban đầu của các mẫu SSC từ mẫu 1 đến mẫu (n); $\Delta R_1, \Delta R_2, \dots, \Delta R_n$ (Ω) lần lượt là giá trị biến thiên điện trở so với điện trở ban đầu tương ứng của các mẫu SSC từ mẫu 1 đến mẫu (n); $K_1, K_2, \dots, K_n$ là hệ số biến thiên điện trở suất của từng mẫu SSC từ 1 đến n được xác định công thức (4.12); A (m^2) là diện tích chịu lực của mỗi mẫu; a (m^2) là diện tích tiếp xúc giữa

điện cực và bê tông của mỗi mẫu; L (m) là khoảng cách giữa 2 điện cực của mỗi mẫu.

Để kiểm chứng phương pháp đề xuất, tải trọng tính toán được xác định theo công thức (5.4) cho hệ mẫu gồm 04 mẫu có kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm và 06 mẫu có kích thước $50 \times 50 \times 50$ mm, dưới tác dụng tải trọng tại các vị trí nén khác nhau. Sau đó, các giá trị tải trọng tính toán trên được so sánh với tải trọng thực nghiệm tác dụng lên hệ cân tại các vị trí tương ứng, như trình bày trong Mục 5.1.2 và Mục 5.1.3.

Trong trường hợp xét đến ở đây, các mẫu trong hệ cân được sấy khô đến khi khối lượng không còn thay đổi và sau đó được phủ lớp vật liệu chống thấm nhằm duy trì trạng thái độ ẩm không đổi trong suốt quá trình đo đạc. Do đó, độ ẩm của các mẫu được xem là không đổi và bằng giá trị ban đầu ($W = W_0$), đồng thời nhiệt độ môi trường được duy trì ở điều kiện chuẩn ($T = T_0$). Trong điều kiện này, hệ số biến thiên điện trở suất của từng mẫu theo công thức (4.12) được xác định như sau:

$$Kn = -10^{-4} \rho_{s0(0)n}^2 + 0,0002 \rho_{s0(0)n} - 0,0405 \quad (5.5)$$

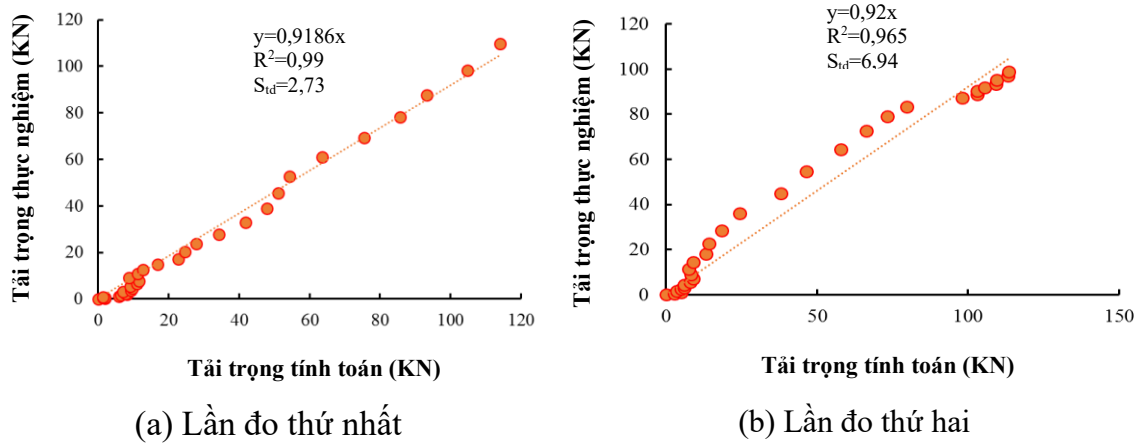


Hình 5.16. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của hệ gồm 04 mẫu kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm chịu tải trọng nén đúng tâm

Hình 5.16 cho thấy mối tương quan giữa tải trọng thực nghiệm được xác định tại Hình 5.9(a) khi hệ cân chịu nén đúng tâm và tải trọng tính toán của hệ gồm 04 mẫu có kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm được xác định theo công thức (5.4) và (5.5), lần lượt cho 2 lần đo. Ở cả hai lần đo, hệ số xác định R^2 đều đạt giá trị cao, lớn hơn 0,97; độ lệch chuẩn lần lượt là 4,41 và 4,84..

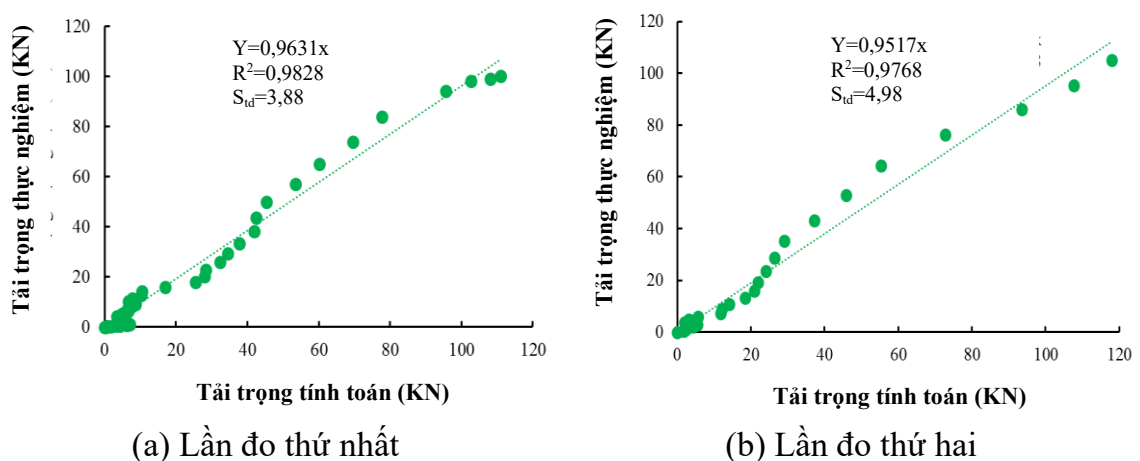
Hình 5.17 mô tả mối tương quan giữa tải trọng thực nghiệm được xác định tại Hình 5.9(b) khi hệ cân chịu nén lệch tâm 25 mm và tải trọng tính toán của hệ gồm 04

mẫu có kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm được xác định theo công thức (5.4) và (5.5), tương ứng với hai lần đo. Ở cả hai lần đo, hệ số xác định R^2 lớn hơn 0,96; độ lệch chuẩn lần lượt là 2,73 và 6,94.

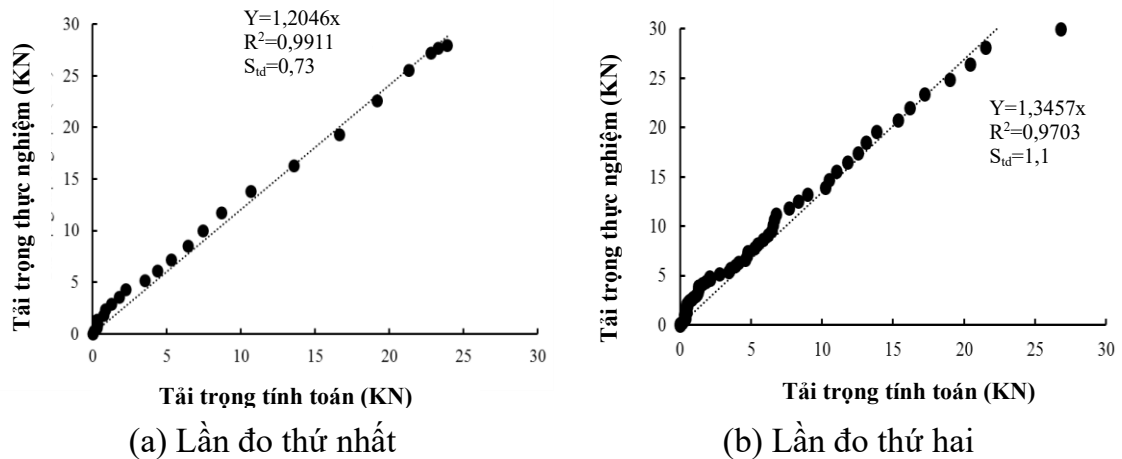


Hình 5.17. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của hệ gồm 04 mẫu kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm chịu nén lệch tâm 25 mm

Hình 5.18 cho thấy mối tương quan cao giữa tải trọng thực nghiệm được xác định tại Hình 5.9(c) khi hệ cân chịu nén lệch tâm 50 mm và tải trọng tính toán của hệ gồm 04 mẫu có kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm được xác định theo công thức (5.4) và (5.5), tương ứng với hai lần đo. Ở cả hai lần đo, hệ số xác định R^2 lớn hơn 0,97; độ lệch chuẩn giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán so với đường hồi quy lần lượt là 3,88 và 4,98.

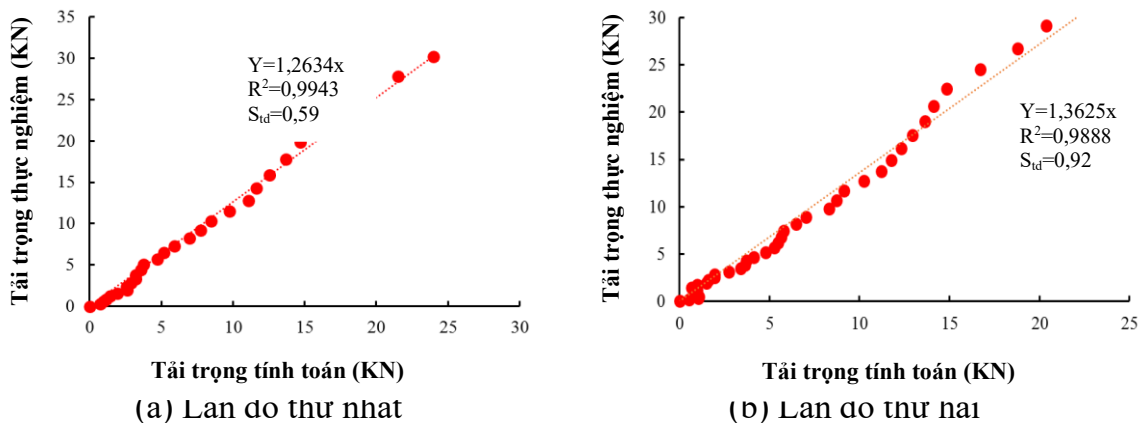


Hình 5.18. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của hệ gồm 04 mẫu kích thước $50 \times 50 \times 250$ mm chịu tải trọng nén lệch tâm 50 mm



Hình 5.19. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của hệ gồm 06 mẫu kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén đúng tâm

Hình 5.19 mô tả mối tương quan cao giữa tải trọng thực nghiệm được xác định tại Hình 5.14(a) khi hệ cân chịu nén đúng tâm và tải trọng tính toán của hệ gồm 06 mẫu có kích thước 50×50×50 mm được xác định theo công thức (5.4) và (5.5), tương ứng với hai lần đo. Ở cả hai lần đo, hệ số xác định R^2 đều đạt giá trị cao, lớn hơn 0,97; độ lệch chuẩn giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán so với đường hồi quy lần lượt là 0,73 và 1,10.

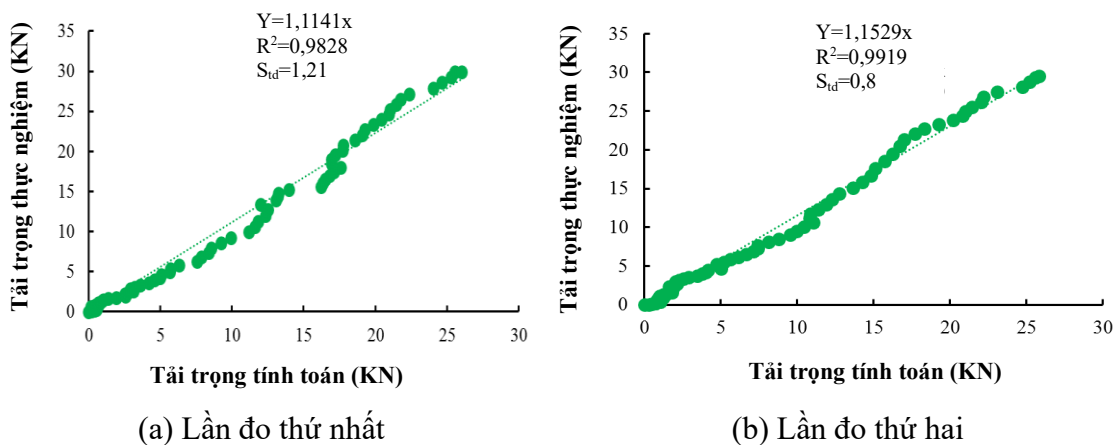


Hình 5.20. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán hệ gồm 06 mẫu kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén lệch tâm 25 mm

Hình 5.20 cho thấy mối tương quan cao giữa tải trọng thực nghiệm được xác định tại Hình 5.14(b) khi hệ cân chịu nén lệch tâm 25 mm và tải trọng tính toán của hệ gồm 06 mẫu có kích thước 50×50×50 mm được xác định theo công thức (5.4) và (5.5), tương ứng với hai lần đo. Ở cả hai lần đo, hệ số xác định R^2 đều đạt giá trị rất

cao, lớn hơn 0,98; độ lệch chuẩn giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán so với đường hồi quy lần lượt là 0,59 và 0,92.

Hình 5.21 cho thấy mối tương quan chặt chẽ giữa tải trọng thực nghiệm được xác định tại Hình 5.14(c) khi hệ cân chịu nén lệch tâm 50 mm và tải trọng tính toán của hệ gồm 06 mẫu có kích thước 50×50×50 mm được xác định theo công thức (5.4) và (5.5), tương ứng với hai lần đo. Ở cả hai lần đo, hệ số xác định R^2 đều đạt giá trị cao, lớn hơn 0,98; độ lệch chuẩn giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán so với đường hồi quy lần lượt là 1,21 và 0,80.



Hình 5.21. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán hệ gồm 06 mẫu kích thước 50×50×50 mm chịu tải trọng nén lệch tâm tâm 50 mm

Các thông số hồi quy tuyến tính quan hệ giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của các mô hình cân khi chịu tác dụng của tải trọng ở các vị trí khác nhau thể hiện tại Bảng 5.4. Bảng thống kê cho thấy mối quan hệ giữa tải trọng tính toán và tải trọng thực nghiệm của các hệ cân đều có độ tuyến tính rất cao, với hệ số xác định trung bình R^2_{tb} dao động từ 0,9739 đến 0,9916. Điều này cho thấy mô hình tính toán tải trọng được xây dựng từ tín hiệu điện của vật liệu SSC có mức độ phù hợp tương đối tốt với kết quả thực nghiệm trong phạm vi các điều kiện khảo sát. Mô hình có khả năng phản ánh xu hướng biến thiên của tải trọng thực tế và bước đầu cho thấy tiềm năng ứng dụng trong nhận dạng tải trọng dựa trên phản ứng điện cơ của vật liệu SSC

Đối với hệ cân gồm 4 mẫu kích thước 50×50×250 mm, hệ số góc trung bình K_{tb} dao động từ 0,9193 đến 1,0399 và đều xấp xỉ bằng 1, cho thấy tải trọng tính toán

có sự phù hợp cao với tải trọng thực nghiệm. Độ lệch chuẩn S_{td} từ 0,0010 đến 0,0407, trong khi hệ số biến thiên CV nằm trong khoảng 0,11%–3,92%, phản ánh độ lặp lại rất tốt giữa hai lần đo. Đặc biệt, trường hợp tải lệch tâm 25 mm có giá trị CV thấp nhất (0,11%), chứng tỏ kết quả đo có độ ổn định và độ tin cậy rất cao.

Bảng 5.4. Các thông số hồi quy tuyến tính quan hệ giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của các mô hình cân khi chịu tác dụng của tải trọng ở các vị trí khác nhau

Hệ cân	Vị trí nén	R^2_{tb}	K_1	K_2	K_{tb}	S_{td}	CV (%)
Hệ cân 4 mẫu kích thước 50×50×250 mm	Đúng tâm	0,9739	1,0111	1,0687	1,0399	0,0407	3,92
	Lệch tâm 25 mm	0,9775	0,9186	0,92	0,9193	0,0010	0,11
	Lệch tâm 50 mm	0,9798	0,9631	0,9517	0,9574	0,0081	0,84
Hệ cân 6 mẫu kích thước 50×50×50 mm	Đúng tâm	0,9807	1,2046	1,3457	1,2752	0,0998	7,83
	Lệch tâm 25 mm	0,9915	1,2634	1,3625	1,3130	0,0701	5,34
	Lệch tâm 50 mm	0,9873	1,1141	1,1529	1,1335	0,0274	2,42

Đối với hệ cân gồm 6 mẫu kích thước 50×50×50 mm, hệ số góc trung bình K_{tb} nằm trong khoảng 1,1335–1,3130, cao hơn so với hệ cân 4 mẫu và lớn hơn 1, cho thấy tải trọng thực nghiệm có xu hướng cao hơn tải trọng tính toán. Mặc dù vậy, hệ số xác định vẫn duy trì ở mức cao ($R^2_{tb} > 0,98$), chứng tỏ tương quan giữa hai đại lượng vẫn rất chặt chẽ. Độ lệch chuẩn Std dao động từ 0,0274 đến 0,0998 và hệ số biến thiên CV từ 2,42%–7,83%. Trong đó, trường hợp nén đúng tâm có CV lớn nhất (7,83%), cho thấy mức độ phân tán giữa hai lần đo cao hơn so với các trường hợp

còn lại, nhưng vẫn nằm trong giới hạn chấp nhận được đối với các thí nghiệm vật liệu cảm biến.

Bên cạnh các chỉ tiêu đánh giá mức độ phù hợp của mô hình thông qua hệ số xác định (R^2), hệ số hồi quy (K), độ lệch chuẩn (S_{td}) và hệ số biến thiên CV, nghiên cứu bổ sung đánh giá sai số dự báo thông qua hai chỉ tiêu MAE và RMSE, thể hiện tại Bảng 5.5. Các chỉ tiêu này phản ánh trực tiếp mức độ sai lệch giữa tải trọng tính toán từ mô hình và tải trọng thực nghiệm.

Bảng 5.5. Các chỉ tiêu đánh giá sai số của mô hình dự đoán tải trọng tác dụng lên hệ nhiều mẫu SSC

TT	Hệ cân	Vị trí nén	MAE (KN)	RMSE (KN)
1	Hệ cân 4 mẫu kích thước 50×50×250 mm	Nén đúng tâm	4,06	5,4
		Nén lệch tâm 25 mm	7,23	8,59
		Nén lệch tâm 50 mm	4,1	5,35
2	Hệ cân 6 mẫu kích thước 50×50×50 mm	Nén đúng tâm	2,54	3,08
		Nén lệch tâm 25 mm	2,37	3,64
		Nén lệch tâm 50 mm	1,22	1,92

Kết quả tại Bảng 5.5 cho thấy sai số dự báo của mô hình ở mức phù hợp. Giá trị MAE và RMSE nhỏ chứng tỏ sự sai lệch giữa tải trọng dự báo và tải trọng thực nghiệm không lớn. Khi kết hợp với hệ số trong Bảng 5.4, có thể nhận thấy mô hình đề xuất có khả năng dự đoán tải trọng tác dụng lên hệ nhiều mẫu SSC với độ tin cậy phù hợp.

Kết quả nghiên cứu này được thảo luận trong mối liên hệ với các công trình đã công bố về SSC nhằm làm rõ đóng góp và khả năng mở rộng ứng dụng của hệ cảm biến nhiều mẫu. Trong phạm vi các công trình được khảo sát, các nghiên cứu trước đây về SSC chủ yếu tập trung đánh giá đặc tính của từng phần tử cảm biến đơn lẻ, trong đó các thông số như độ nhạy, độ tuyến tính và ảnh hưởng của điều kiện môi trường (nhiệt độ, độ ẩm) được xem xét nhằm đánh giá khả năng ứng dụng của vật liệu. Tuy nhiên, để hướng đến ứng dụng SSC cho hệ thống giám sát tải trọng, việc

tích hợp và khai thác tín hiệu từ nhiều phần tử cảm biến vẫn là vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu. Trong luận án này, hệ nhiều mẫu SSC được khảo sát nhằm làm rõ khả năng tổng hợp tín hiệu từ nhiều vị trí đo dưới các trạng thái tải trọng khác nhau. Kết quả nghiên cứu cho thấy hệ SSC nhiều mẫu có khả năng sử dụng tín hiệu tổng hợp để xây dựng mô hình dự đoán tải trọng. Bên cạnh đó, các yếu tố môi trường như nhiệt độ và độ ẩm cần tiếp tục được xem xét trong quá trình hiệu chuẩn và đánh giá độ ổn định của hệ thống khi triển khai trong điều kiện thực tế.

5.3. Kết luận chương 5

Những kết luận từ chương này như sau:

- (1) Trong tất cả các mô hình thí nghiệm, khi hệ thống cân gồm nhiều mẫu chịu tác dụng của tải trọng nén tại các vị trí khác nhau, ứng xử điện trở của từng mẫu trong hệ có thể khác nhau; tuy nhiên, ứng xử điện trở tổng hợp của toàn hệ vẫn thể hiện tính tuyến tính và ổn định giữa các lần đo. Đây là một kết quả quan trọng, cho thấy tiềm năng ứng dụng của hệ thống trong các cân tải trọng quy mô lớn. Điều này đồng nghĩa với việc, đối với một giá trị tải trọng tác dụng xác định, sự thay đổi tổng điện trở của các mẫu trong hệ gần như không thay đổi giữa các lần đo. Tính tuyến tính mạnh hơn khi các mẫu được đặt gần nhau và dần dần trở nên phi tuyến khi chúng được đặt cách xa nhau. Điều này có thể được xem là ảnh hưởng tải trọng nén lệch tâm tác dụng lên các mẫu SSC.
- (2) Hệ số biến thiên điện trở K của hệ dưới tác dụng của tải trọng xuất hiện sai số ở mức xấp xỉ 10%. Do đó, việc giảm thiểu phạm vi sai lệch này là một trong những thách thức quan trọng trong các giai đoạn nghiên cứu tiếp theo, nhằm phát triển các hệ thống cân tải trọng quy mô lớn sử dụng vật liệu SSC.
- (3) Việc sử dụng công thức (5.4) để xác định tải trọng tác dụng lên hệ gồm nhiều mẫu có kích thước khác nhau, chịu tải trọng tại các vị trí gia tải khác nhau trên mặt cân, cho kết quả dự đoán tương đối chính xác khi so sánh với tải trọng thực nghiệm.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Những kết quả đạt được của luận án

Nghiên cứu đã tiến hành khảo sát một cách có hệ thống ứng xử điện trở của bê tông tự cảm biến dưới tác dụng của tải trọng nén và đánh giá khả năng ứng dụng của vật liệu này trong các hệ thống đo tải trọng. Các thành quả chính dựa trên kết quả nghiên cứu trong luận án có thể được rút ra như sau:

- (1) Nghiên cứu đã làm rõ cơ chế cơ bản chi phối ứng xử điện trở suất của SSC dưới tác dụng của tải trọng nén. Kết quả thực nghiệm cho thấy trong phạm vi ứng suất nén nhỏ (tương ứng khoảng 1/5 cường độ chịu nén của vật liệu), khi vật liệu chưa xuất hiện các biến đổi phá hủy cấu trúc, sự thay đổi điện trở suất có quan hệ gần tuyến tính với ứng suất nén. Điều này cho thấy SSC có thể hoạt động ổn định trong phạm vi nén đàn hồi, qua đó duy trì sự ổn định của tín hiệu điện và nâng cao độ lặp lại của phép đo khi được sử dụng làm vật liệu cảm biến.
- (2) Nghiên cứu đã phân tích ảnh hưởng của các yếu tố môi trường và thành phần vật liệu đến điện trở suất ban đầu của SSC trong điều kiện không tải. Kết quả thực nghiệm cho thấy điện trở suất ban đầu của vật liệu chịu ảnh hưởng đáng kể bởi nhiệt độ, độ ẩm môi trường và thành phần cấp phối. Trên cơ sở đó, một mô hình thực nghiệm dự đoán điện trở suất ban đầu đã được xây dựng, cho phép hiệu chỉnh giá trị điện trở suất ban đầu của vật liệu trong các điều kiện đo đạc khác nhau. Mô hình này tạo cơ sở để giảm sai số khi so sánh các giá trị điện trở trong quá trình đo tải trọng thực tế. Đồng thời, nghiên cứu đã xây dựng được mô hình mô tả ứng xử điện trở suất của mẫu SSC chịu tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi, có xét đến ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố như thành phần vật liệu, nhiệt độ và độ ẩm môi trường. Từ mô hình này, hệ số biến thiên điện trở suất (k) được xác định, cho phép thiết lập mối quan hệ định lượng giữa tải trọng tác dụng và tín hiệu điện trở thu được từ mẫu SSC.
- (3) Nghiên cứu đã mở rộng phân tích từ một mẫu SSC đơn lẻ sang hệ gồm nhiều mẫu SSC, nhằm mô phỏng cấu hình thực tế của các hệ thống cảm biến tải trọng. Kết quả thực nghiệm cho thấy phương pháp dự đoán tải trọng được đề xuất cho

hệ nhiều mẫu SSC có độ phù hợp tương đối tốt với tải trọng thực nghiệm. Cụ thể, sai số của hệ số biến thiên điện trở K của hệ được ghi nhận ở mức khoảng (10-14)%, cho thấy tiềm năng ứng dụng của hệ thống SSC trong các thiết bị đo tải trọng. Trên cơ sở đó, một công thức dự đoán tải trọng cho hệ nhiều mẫu SSC đã được đề xuất, cho phép xác định tải trọng tác dụng lên hệ mẫu có kích thước và vị trí chịu tải khác nhau.

Các kết quả nghiên cứu bước đầu đã góp phần làm rõ cơ chế cảm biến của bê tông SSC dưới tác động của tải trọng trong phạm vi ứng suất nén đàn hồi, đồng thời đề xuất được mô hình dự đoán điện trở suất ban đầu và xây dựng các mô hình hệ thống gồm 2, 4 và 6 mẫu với kích thước khác nhau nhằm: (i) mô phỏng sự phân bố tải trọng trong hệ gối chịu tải tập trung; (ii) đánh giá tính tuyến tính của tín hiệu điện tổng hợp; và (iii) khảo sát ảnh hưởng của sự lệch tâm tải trọng. Các kết quả này cung cấp cơ sở khoa học ban đầu cho việc nghiên cứu phát triển các hệ cảm biến tải trọng dựa trên vật liệu bê tông tự cảm biến, đồng thời mở ra tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống giám sát tải trọng quy mô lớn. Tuy nhiên, khả năng triển khai trong điều kiện thực tế cần tiếp tục được kiểm chứng thông qua các nghiên cứu mở rộng về quy mô kết cấu, điều kiện khai thác và độ bền làm việc lâu dài của hệ thống cảm biến.

2. Kiến nghị hướng nghiên cứu tiếp theo

Mặc dù nghiên cứu đã làm rõ được một số cơ chế cơ bản và đề xuất được các mô hình dự đoán ứng xử điện trở của SSC dưới tác dụng của tải trọng nén, vẫn còn một số vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học và nâng cao khả năng ứng dụng của vật liệu này trong các hệ thống cảm biến kết cấu và giao thông thông minh.

Trước hết, cần tiếp tục nghiên cứu sâu hơn về ảnh hưởng dài hạn của các yếu tố môi trường đến đặc tính điện của SSC. Trong điều kiện làm việc thực tế, các cấu kiện bê tông thường chịu tác động đồng thời của nhiều yếu tố môi trường như nhiệt độ, độ ẩm, chu kỳ khô-ướt, quá trình cacbonat hóa và sự xâm nhập của các ion trong môi trường. Những yếu tố này có thể làm thay đổi cấu trúc lỗ rỗng và mạng dẫn điện bên trong vật liệu, từ đó ảnh hưởng đến điện trở suất và độ ổn định của tín hiệu cảm biến

theo thời gian. Do đó, cần thực hiện các nghiên cứu dài hạn nhằm đánh giá sự suy giảm tính dẫn điện và độ nhạy cảm biến của SSC, qua đó xác định tuổi thọ làm việc hiệu quả của vật liệu khi sử dụng trong các hệ thống cảm biến kết cấu.

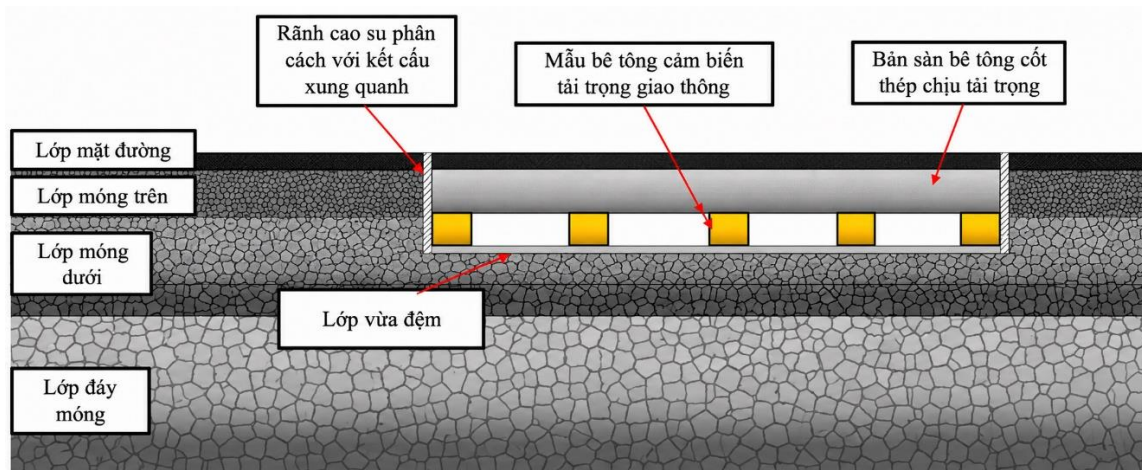
Thứ hai, các thí nghiệm trong nghiên cứu chủ yếu được thực hiện dưới tải trọng nén tĩnh, trong khi trong điều kiện thực tế các công trình giao thông và kết cấu hạ tầng thường chịu tác dụng của tải trọng động, tải trọng lặp và rung động do phương tiện giao thông gây ra. Vì vậy, cần tiếp tục nghiên cứu ứng xử điện cơ của SSC dưới các dạng tải trọng động và tải trọng chu kỳ, bao gồm việc đánh giá độ ổn định của tín hiệu điện trở, khả năng lặp lại của phép đo và sự thay đổi của độ nhạy cảm biến theo số chu kỳ tải. Các kết quả này sẽ giúp đánh giá chính xác hơn khả năng ứng dụng của SSC trong các hệ thống giám sát tải trọng giao thông và quan trắc sức khỏe công trình.

Thứ ba, để hướng đến hoàn thiện công nghệ cảm biến áp dụng cho hệ thống giao thông thông minh, việc thiết kế và tối ưu hóa cấu tạo cụ thể hệ cảm biến sử dụng mẫu SSC được lắp đặt dưới nền đường là việc tất yếu. Sơ đồ tổng quát của hệ thống này được minh họa trong Hình 5.22. Trong hệ thống công nghệ này, các vấn đề kỹ thuật cần được đảm bảo bao gồm:

- Phương án cấp phối vật liệu SSC với độ nhạy cao và độ ổn định lâu dài;
- Giải pháp vật liệu chống thấm và bảo vệ cảm biến nhằm giảm ảnh hưởng của độ ẩm;
- Hệ thống cấp điện và thu tín hiệu bảo đảm độ chính xác và ổn định;
- Thiết bị hiển thị và truyền dữ liệu cho phép kết nối trực tiếp với hệ thống quản lý giao thông.

Đối với các loại cân giao thông có phạm vi tải trọng khác nhau, nghiên cứu cần xem xét tối ưu hóa kích thước và khoảng cách giữa các mẫu SSC trong hệ thống để đảm bảo độ chính xác đo lường. Bên cạnh đó, phương pháp xác định hệ số hiệu chuẩn cho từng cấu hình thiết bị cũng cần được tích hợp một cách phù hợp. Ở giai đoạn ban đầu, hệ thống có thể được ứng dụng như cân tĩnh phục vụ đo tải trọng phương tiện hoặc hàng hóa tại cảng và nhà kho công nghiệp. Trong tương lai, với các cải tiến về thuật toán và phần cứng, hệ thống có thể được mở rộng thành trạm cân giao thông

động (Weigh-in-Motion system), đóng vai trò quan trọng trong mạng lưới giám sát và quản lý tải trọng thông minh.



Hình 5.22. Định hướng cấu tạo nguyên lý của hệ thống giám sát tải trọng giao thông sử dụng các mẫu SSC

Trong cấu hình định hướng ứng dụng, bản sàn bê tông cốt thép phía trên có độ cứng hữu hạn nên tải trọng tác dụng không phân bố hoàn toàn đồng đều giữa các mẫu SSC. Mỗi phần tử SSC có thể chịu mức tải trọng khác nhau phụ thuộc vào vị trí bố trí, độ cứng của bản sàn, điều kiện tiếp xúc và đặc tính lớp đệm. Tuy nhiên, hệ nhiều mẫu SSC được khai thác dựa trên đáp ứng tổng hợp của các phần tử cảm biến, trong đó tải trọng tổng thể được liên hệ với tín hiệu điện thu nhận từ toàn bộ hệ. Việc đánh giá chi tiết sự phân bố tải trọng trong điều kiện thực tế cần được tiếp tục nghiên cứu thông qua mô hình số và thí nghiệm quy mô lớn hơn.

Trong giai đoạn hướng đến thương mại hóa sản phẩm, việc thực hiện các nghiên cứu thử nghiệm quy mô lớn và thử nghiệm hiện trường nhằm đánh giá khả năng làm việc của hệ thống cảm biến SSC trong điều kiện thực tế là không thể thiếu. Các thí nghiệm này có thể bao gồm việc lắp đặt các mẫu SSC trong các hệ thống cân thử nghiệm hoặc các cấu kiện bê tông thực tế, từ đó đánh giá khả năng hoạt động của hệ thống trong điều kiện khai thác lâu dài. Kết quả của các thử nghiệm này sẽ cung cấp cơ sở quan trọng cho việc chuyển giao công nghệ và triển khai ứng dụng thực tế của vật liệu SSC trong các hệ thống đo tải trọng và giám sát giao thông.

Cuối cùng, các nghiên cứu tiếp theo cần tiếp tục đánh giá ứng xử của hệ SSC ở quy mô lớn hơn, trong điều kiện tải trọng và môi trường gần với thực tế khai thác, đồng thời nghiên cứu độ ổn định dài hạn của tín hiệu điện nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học trước khi xem xét khả năng ứng dụng trong các hệ thống giám sát tải trọng. Bên cạnh đó, cần xem xét thêm khía cạnh kinh tế và tính bền vững của vật liệu SSC. Việc sử dụng các vật liệu dẫn điện như sợi carbon hoặc vật liệu nano có thể ảnh hưởng đến chi phí chế tạo vật liệu; do đó, cần tiếp tục nghiên cứu tối ưu hóa thành phần vật liệu, đánh giá độ bền làm việc dài hạn, vòng đời vật liệu và phân tích hiệu quả kinh tế của hệ thống cảm biến SSC trước khi xem xét khả năng triển khai trong các ứng dụng thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. Luo, L. Lin, K. Chen, M. F. Antwi-Afari, and L. Chen, “Digital technology for quality management in construction: A review and future research directions,” *Dev. Built Environ.*, vol. 12, no. August, p. 100087, 2022, doi: 10.1016/j.dibe.2022.100087.
- [2] 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.
- [3] B. Jacob and V. Feypell-de La Beaumelle, “Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology,” *IATSS Research*, vol. 34, no. 1, pp. 47–54, 2010.
- [4] H. van Loo and A. Žnidarič, “Guide for Users of Weigh-In-Motion,” *Iswim, Int. Soc. Weigh-in-Motion*, 2019.
- [5] 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.
- [6] 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, no. August, p. 107437, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107437.
- [7] G. Yıldırım, O. Öztürk, A. Al-Dahawi, A. Afşın Ulu, and M. Şahmaran, “Self-sensing capability of Engineered Cementitious Composites: Effects of aging and loading conditions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 231, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117132.
- [8] D. Y. Yoo, S. Kim, and S. H. Lee, “Self-sensing capability of ultra-high-performance concrete containing steel fibers and carbon nanotubes under tension,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 276, pp. 125–136, 2018, doi: 10.1016/j.sna.2018.04.009.
- [9] H. Xiao, H. Li, and J. Ou, “Strain sensing properties of cement-based sensors embedded at various stress zones in a bending concrete beam,” *Sensors*

- Actuators, A Phys.*, vol. 167, no. 2, pp. 581–587, 2011, doi: 10.1016/j.sna.2011.03.012.
- [10] 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.
- [11] M. Sun, Q. Liu, Z. Li, and Y. Hu, “Study of piezoelectric properties of carbon fiber reinforced concrete and plain cement paste during dynamic loading,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 10, pp. 1593–1595, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00338-0.
- [12] S. Wen and D. D. L. Chung, “Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement,” *Carbon N. Y.*, vol. 45, no. 4, pp. 710–716, 2007, doi: 10.1016/j.carbon.2006.11.029.
- [13] J. Han, J. Pan, J. Cai, and X. Li, “A review on carbon-based self-sensing cementitious composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 265, p. 120764, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120764.
- [14] D. Y. Yoo, I. You, H. Youn, and S. J. Lee, “Electrical and piezoresistive properties of cement composites with carbon nanomaterials,” *J. Compos. Mater.*, vol. 52, no. 24, pp. 3325–3340, 2018, doi: 10.1177/0021998318764809.
- [15] A. Al-Dahawi, O. Öztürk, F. Emami, G. Yildirim, and M. Şahmaran, “Effect of mixing methods on the electrical properties of cementitious composites incorporating different carbon-based materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 104, pp. 160–168, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.072.
- [16] S. K. Ur Rehman *et al.*, “Influence of graphene nanosheets on rheology, microstructure, strength development and self-sensing properties of cement based composites,” *Sustain.*, vol. 10, no. 3, 2018, doi: 10.3390/su10030822.
- [17] Y. Li, K. Wang, and Z. Su, “Dispersed sensing networks in nano-engineered polymer composites: From static strain measurement to ultrasonic wave acquisition,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 5, 2018, doi: 10.3390/s18051398.

- [18] S. Chuah, Z. Pan, J. G. Sanjayan, C. M. Wang, and W. H. Duan, “Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 113–124, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040.
- [19] P. W. Chen and D. D. L. Chung, “Improving the electrical conductivity of composites comprised of short conducting fibers in a nonconducting matrix: The addition of a nonconducting particulate filler,” *J. Electron. Mater.*, vol. 24, no. 1, pp. 47–51, 1995, doi: 10.1007/BF02659726.
- [20] S. Y. Lee, H. V. Le, and D. J. Kim, “Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 220, pp. 149–160, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.197.
- [21] 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.
- [22] B. Han, L. Zhang, C. Zhang, Y. Wang, X. Yu, and J. Ou, “Reinforcement effect and mechanism of carbon fibers to mechanical and electrically conductive properties of cement-based materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 479–489, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.063.
- [23] H. Li, H. gang Xiao, and J. ping 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, 2006, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.05.004.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] S. Wen and D. D. L. Chung, “A comparative study of steel- and carbon-fibre cement as piezoresistive strain sensors,” *Adv. Cem. Res.*, vol. 15, no. 3, pp. 119–128, 2003, doi: 10.1680/adcr.2003.15.3.119.
- [27] B. Han, X. Yu, and J. Ou, *Self-Sensing Concrete in Smart Structures*. 2014. doi: 10.1016/C2013-0-14456-X.
- [28] S. Sun *et al.*, “Nano graphite platelets-enabled piezoresistive cementitious composites for structural health monitoring,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 136, pp. 314–328, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.006.
- [29] F. Azhari and N. Banthia, “Carbon fiber-reinforced cementitious composites for tensile strain sensing,” *ACI Mater. J.*, vol. 114, no. 1, pp. 129–136, 2017, doi: 10.14359/51689486.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] P. A. Danoglidis, M. S. Konsta-Gdoutos, E. E. Gdoutos, and S. P. Shah, “Strength, energy absorption capability and self-sensing properties of multifunctional carbon nanotube reinforced mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 120, pp. 265–274, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.049.
- [34] 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.

- [35] M. Adresi, A. Hassani, S. Javadian, and J. M. Tulliani, “Determining the Surfactant Consistent with Concrete in order to Achieve the Maximum Possible Dispersion of Multiwalled Carbon Nanotubes in Keeping the Plain Concrete Properties,” *J. Nanotechnol.*, vol. 2016, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1155/2016/2864028.
- [36] X. Yu and E. Kwon, “A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 18, no. 5, pp. 3–8, 2009, doi: 10.1088/0964-1726/18/5/055010.
- [37] L. Liu, B. Gao, L. Wu, Y. Sun, and Z. Zhou, “Effects of surfactant type and concentration on graphene retention and transport in saturated porous media,” *Chem. Eng. J.*, vol. 262, pp. 1187–1191, 2015, doi: 10.1016/j.cej.2014.10.032.
- [38] 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.
- [39] W. Dong, W. Li, K. Wang, K. Vessalas, and S. Zhang, “Mechanical strength and self-sensing capacity of smart cementitious composite containing conductive rubber crumbs,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 31, no. 10, pp. 1325–1340, 2020, doi: 10.1177/1045389X20916788.
- [40] B. Han, X. Guan, and J. Ou, “Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 135, no. 2, pp. 360–369, 2007, doi: 10.1016/j.sna.2006.08.003.
- [41] 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.
- [42] L. Zhang, S. Ding, B. Han, X. Yu, and Y. Q. Ni, “Effect of water content on the

- piezoresistive property of smart cement-based materials with carbon nanotube/nanocarbon black composite filler,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 119, pp. 8–20, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.01.010.
- [43] G. H. Nalon *et al.*, “Effects of different kinds of carbon black nanoparticles on the piezoresistive and mechanical properties of cement-based composites,” *J. Build. Eng.*, vol. 32, no. May, 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101724.
- [44] A. O. Monteiro, P. B. Cachim, and P. M. F. J. Costa, “Self-sensing piezoresistive cement composite loaded with carbon black particles,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 81, pp. 59–65, 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.04.009.
- [45] B. Han and J. Ou, “Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 138, no. 2, pp. 294–298, 2007, doi: 10.1016/j.sna.2007.05.011.
- [46] S. Wen and D. D. L. Chung, “The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement,” *Carbon N. Y.*, vol. 44, no. 11, pp. 2130–2138, 2006, doi: 10.1016/j.carbon.2006.03.013.
- [47] 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,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 149, no. 1, pp. 51–55, 2009, doi: 10.1016/j.sna.2008.10.001.
- [48] N. Banthia, S. Djeridane, and M. Pigeon, “Electrical resistivity of carbon and steel microfiber reinforced cements,” *Cem. Concr Res.*, vol. 22, no. 5, pp. 804–814, 1992.
- [49] I. You, S. J. Lee, G. Zi, and D. Lim, “Influence of carbon fiber incorporation on electrical conductivity of cement composites,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 24, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3390/app10248993.
- [50] 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.

- [51] X. Li and M. Li, “Multifunctional self-sensing and ductile cementitious materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 123, no. March, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.03.008.
- [52] O. Galao, F. J. Baeza, E. Zornoza, and P. Garcés, “Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 46, pp. 90–98, 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.009.
- [53] 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, pp. 615–620, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.381.
- [54] 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.
- [55] H. Y. Chu and J. K. Chen, “The experimental study on the correlation of resistivity and damage for conductive concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 67, pp. 12–19, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.005.
- [56] A. Al-Dahawi, M. H. Sarwary, O. Ozturk, G. Yildirim, A. Akin, M. Sahmaran, and M. Lachemi, “Electrical percolation threshold of cementitious composites possessing self-sensing functionality incorporating different carbon-based materials,” 2016.
- [57] S. Ding, S. Dong, A. Ashour, and B. Han, “Development of sensing concrete: Principles, properties and its applications,” *J. Appl. Phys.*, vol. 126, no. 24, 2019, doi: 10.1063/1.5128242.
- [58] F. Reza, J. A. Yamamuro, and G. B. Batson, “Electrical resistance change in compact tension specimens of carbon fiber cement composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 7, pp. 873–881, 2004, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2003.06.002.
- [59] X. Wang, Y. Wang, and Z. Jin, “Electrical conductivity characterization and

- variation of carbon fiber reinforced cement composite,” *J. Mater. Sci.*, vol. 37, no. 1, pp. 223–227, 2002, doi: 10.1023/A:1013107623281.
- [60] 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.
- [61] D. G. Meehan, Shoukai Wang, and D. D. L. Chung, “Electrical-resistance-based sensing of impact damage in carbon fiber reinforced cement-based materials,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 21, no. 1, pp. 83–105, 2010, doi: 10.1177/1045389X09354786.
- [62] 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.
- [63] B. Han, X. Yu, and J. Ou, “Dispersion of carbon nanotubes in cement-based composites and its influence on the piezoresistivities of composites,” *Proc. ASME Conf. Smart Mater. Adapt. Struct. Intell. Syst. 2009, SMASIS2009*, vol. 2, pp. 57–62, 2009, doi: 10.1115/SMASIS2009-1318.
- [64] Phan Tấn Duy và Cộng sự, “Nghiên cứu ứng xử cơ - điện của bê tông tính năng cao dưới tải trọng uốn trùng phục,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN*, vol. 17, pp. 34–48, 2023.
- [65] M. Saafi, “Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures,” *Nanotechnology*, vol. 20, no. 39, 2009, doi: 10.1088/0957-4484/20/39/395502.
- [66] W. J. McCarter, “Effects of Temperature on Conduction and Polarization in Portland Cement Mortar,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 78, no. 2, pp. 411–415, 1995, doi: 10.1111/j.1151-2916.1995.tb08816.x.
- [67] B. Han, K. Zhang, X. Yu, E. Kwon, and J. Ou, “Electrical characteristics and pressure-sensitive response measurements of carboxyl MWNT/cement composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 6, pp. 794–800, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.012.

- [68] S. Mingqing, L. Zhuoqiu, M. Qizhao, and S. Darong, “A study on thermal self-monitoring of carbon fiber reinforced concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 5, pp. 769–771, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00006-X.
- [69] W. J. McCarter, G. Starrs, T. M. Chrisp, and P. F. G. Banfill, “Activation energy and conduction in carbon fibre reinforced cement matrices,” *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 6, pp. 2200–2203, 2007, doi: 10.1007/s10853-007-1517-x.
- [70] Y. Hong, Z. Li, G. Qiao, J. Ou, and W. Cheng, “Pressure sensitivity of multiscale carbon-admixtures-enhanced cement-based composites,” *Nanomater. Nanotechnol.*, vol. 8, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1177/1847980418793529.
- [71] Phan Tấn Duy và Cộng sự, “Effect of temperature on electrical resistivity of high-performance fiber-reinforced concretes,” *J. Sci. Technol. Civ. Eng. - HUCE*, vol. 17, no. 3, pp. 21–32, 2023, doi: 10.31814/stce.huce2023-17(3)-02.
- [72] S. Wen and D. D. L. Chung, “Carbon fiber-reinforced cement as a thermistor,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 6, pp. 961–965, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00075-7.
- [73] A. O. Monteiro, P. M. F. J. Costa, M. Oeser, and P. B. Cachim, “Dynamic sensing properties of a multifunctional cement composite with carbon black for traffic monitoring,” *Smart Materials and Structures*, vol. 29, no. 2, Art. no. 025023, 2020, doi: 10.1088/1361-665X/ab62e2.
- [74] Z. Zhou *et al.*, “Electrical properties of low dosage carbon nanofiber/cement composite: Percolation behavior and polarization effect,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 109, p. 103539, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103539.
- [75] B. Han, L. Zhang, and J. Ou, “Influence of water content on conductivity and piezoresistivity of cement-based material with both carbon fiber and carbon black,” *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, vol. 25, no. 1, pp. 147–151, 2010, doi: 10.1007/s11595-010-1147-z.
- [76] H. Siad, M. Lachemi, M. Sahmaran, H. A. Mesbah, and K. A. Hossain, “Advanced engineered cementitious composites with combined self-sensing

- and self-healing functionalities,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 176, pp. 313–322, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.026.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] F. J. Baeza, O. Galao, E. Zornoza, and P. Garcés, “Multifunctional cement composites strain and damage sensors applied on reinforced concrete (RC) structural elements,” *Materials (Basel)*, vol. 6, no. 3, pp. 841–855, 2013, doi: 10.3390/ma6030841.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] 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.

- [85] 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.
- [86] K. Wille and K. J. Loh, “Nanoengineering ultra-high-performance concrete with multiwalled carbon nanotubes,” *Transp. Res. Rec.*, no. 2142, pp. 119–126, 2010, doi: 10.3141/2142-18.
- [87] M. T. Marvila, A. R. G. de Azevedo, P. R. de Matos, S. N. Monteiro, and C. M. F. Vieira, “Materials for Production of High and Ultra-High Performance Concrete: Review and Perspective of Possible Novel Materials,” *Materials*, vol. 14, no. 15, Art. no. 4304, 2021, doi: 10.3390/ma14154304.
- [88] G. Milone, C. Vlachakis, J. M. Tulliani, and A. Al-Tabbaa, “Strain Monitoring of Concrete Using Carbon Black-Based Smart Coatings,” *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 7, 2024, doi: 10.3390/ma17071577.
- [89] M. G. Falara, A. K. Thomoglou, F. I. Gkountakou, A. Elenas, and C. E. Chalioris, “Hybrid smart cementitious materials incorporating ladder scale carbon fiber reinforcement: An experimental investigation,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, no. April, p. e02035, 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02035.
- [90] M. Konkanov, T. Salem, P. Jiao, R. Niyazbekova, and N. Lajnef, “Environment-friendly, self-sensing concrete blended with byproduct wastes,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 7, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/s20071925.
- [91] Tiêu chuẩn Quốc gia *TCVN 3105:2022 – Hỗn hợp bê tông và bê tông – Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử*, 2022.
- [92] Y. Sang, Y. Yang, and Q. Zhao, “Electrical resistivity of plain cement-based materials based on ionic conductivity: A review of applications and conductive models,” *Journal of Building Engineering*, vol. 46, Art. no. 103642, 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103642.
- [93] Layssi H., Ghods, P., Alizadeh, Aali, R., and Salehi, M., “Electrical Resistivity of Concrete,” *Concr. Int.*, no. MAY 2015, pp. 41–46, 2015.
- [94] E. F. de Almeida Junior and S. Martini, “Measurements of electrical impedance

- in cementitious mortars: Influence of electrodes and physical dimensions of specimens,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, no. January, p. e01880, 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e01880.
- [95] H. Dehghanpour and K. Yilmaz, “The relationship between resistances measured by two-probe, Wenner probe and C1760-12 ASTM methods in electrically conductive concretes,” *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1007/s42452-019-1811-7.
- [96] H. Minagawa, S. Miyamoto, and M. Hisada, “Relationship of apparent electrical resistivity measured by four-probe method with water content distribution in concrete,” *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 15, no. 6, pp. 278–289, 2017, doi: 10.3151/jact.15.278.
- [97] G. Hong, S. Choi, D. Y. Yoo, T. Oh, Y. Song, and J. H. Yeon, “Moisture dependence of electrical resistivity in under-percolated cement-based composites with multi-walled carbon nanotubes,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 16, pp. 47–58, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.11.151.
- [98] S. A. Klink, “Poisson’s ratio variations in concrete,” *Exp. Mech.*, vol. 15, no. 4, pp. 139–141, 1975, doi: 10.1007/bf02318850.
- [99] “Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 3118:2022: Bê tông - phương pháp xác định cường độ chịu nén,” 2022.
- [100] “Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 3112:2022 Bê tông – Phương pháp xác định khối lượng riêng và độ rỗng,” 2022.
- [101] “Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 3115:2022 – Bê tông – Phương pháp xác định khối lượng thể tích,” 2022.
- [102] ISO/TS 21383:2021, *Microbeam analysis — Scanning electron microscopy — Qualification of the scanning electron microscope for quantitative measurements*. 2021.
- [103] Q. Zhang, C. Luan, C. Yu, Y. Huang, and Z. Zhou, “Mechanisms of carbon black in multifunctional cement matrix: Hydration and microstructure perspectives,” *Construction and Building Materials*, vol. 346, Art. no. 128455,

- 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128455.
- [104] G. L. Golewski, “The Phenomenon of Cracking in Cement Concretes and Reinforced Concrete Structures: The Mechanism of Cracks Formation, Causes of Their Initiation, Types and Places of Occurrence, and Methods of Detection—A Review,” *Buildings*, vol. 13, no. 3, 2023, doi: 10.3390/buildings13030765.
- [105] L. Zingg, M. Briffaut, J. Baroth, and Y. Malecot, “Influence of cement matrix porosity on the triaxial behaviour of concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 80, pp. 52–59, 2016, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.10.005.
- [106] R. Blumenfeld and A. Aharony, “Nonlinear resistor fractal networks, topological distances, singly connected bonds and fluctuations,” *J. Phys. A. Math. Gen.*, vol. 18, no. 8, pp. L443–L448, 1985, doi: 10.1088/0305-4470/18/8/008.
- [107] E. Samson and J. Marchand, “Modeling the effect of temperature on ionic transport in cementitious materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 3, pp. 455–468, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.11.008.
- [108] L. Huang, L. Tang, I. Löfgren, N. Olsson, Z. Yang, and Y. Li, “Moisture and ion transport properties in blended pastes and their relation to the refined pore structure,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 161, no. February, 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106949.
- [109] B. B. H. and A. K. Ip and D. G. Queen’s University, Kingston, Canada and Manning, “Corrosion and electrical impedance in concrete,” *Concrete*, vol. 15, no. c, pp. 525–534, 1985.
- [110] G. A. Julio-Betancourt and R. D. Hooton, “Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 6, pp. 1007–1015, 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.11.012.
- [111] K. Osterminski, P. Schießl, A. Volkwein, and T. F. Mayer, “Modelling reinforcement corrosion - Usability of a factorial approach for modelling

- resistivity of concrete,” *Mater. Corros.*, vol. 57, no. 12, pp. 926–931, 2006, doi: 10.1002/maco.200604017.
- [112] A. T. Coyle, R. P. Spragg, P. Suraneni, A. N. Amirkhanian, M. Tsui-Chang, and W. J. Weiss, “Activation energy of conduction for use in temperature corrections on electrical measurements of concrete,” *Adv. Civ. Eng. Mater.*, vol. 8, no. 1, pp. 158–170, 2019, doi: 10.1520/ACEM20180045.
- [113] Y. A. Villagrán Zaccardi, J. F. García, P. Huélamo, and Á. A. Di Maio, “Influence of temperature and humidity on Portland cement mortar resistivity monitored with inner sensors,” *Mater. Corros.*, vol. 60, no. 4, pp. 294–299, 2009, doi: 10.1002/maco.200805075.
- [114] W. J. McCarter, G. Starrs, T. M. Chrisp, P. A. M. Basheer, S. V. Nanukuttan, and S. Srinivasan, “Conductivity/activation energy relationships for cement-based materials undergoing cyclic thermal excursions,” *J. Mater. Sci.*, vol. 50, no. 3, pp. 1129–1140, 2015, doi: 10.1007/s10853-014-8669-2.
- [115] M. C. A. Marta Castellote, Carmen Andrade, “Standardization, to a Reference of 25 °C, of Electrical Resistivity for Mortars and Concretes in Saturated or Isolated Conditions,” *Mater. J.*, vol. 99, no. 2, pp. 119–128, 2002.
- [116] Y. Liu and F. J. Presuel-Moreno, “Normalization of temperature effect on concrete resistivity by method using Arrhenius law,” *ACI Mater. J.*, vol. 111, no. 4, pp. 433–442, 2014, doi: 10.14359/51686725.
- [117] J. Badr *et al.*, “Temperature Effect on Electrical Resistivity Measurement Using an Embedded Sensor to Estimate Concrete Water Content,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 19, 2022, doi: 10.3390/app12199420.
- [118] A. Martínez Ibernón, J. Lliso Ferrando, I. Gasch, and M. Valcuende, “Estimation of Humidity Variation and Electric Resistivity in Hardened Concrete by Means of a Stainless Steel Voltammetric Sensor,” *Sensors*, vol. 22, no. 19, 2022, doi: 10.3390/s22197279.

DANH MỤC CÁC SẢN PHẨM KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

1. Các bài báo công bố Quốc tế

- (1) **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, no. October, p. e02685, 2023, [doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02685](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02685). (SCIE, Q1)
- (2) **V. M. Chi**, N. M. Hai, N. Lan, and N. Van Huong, “Stress Self-sensitivity of Carbon Black-filled Mortar under Non-Destructive 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](https://doi.org/10.3151/jact.21.762). (SCIE, Q2)
- (3) **V. M. Chi**, N. Lan, N. M. Hai, and N. Van Huong, “Compression self-sensibility of the concrete using high content carbon black with various measurement conditions,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1289, no. 1, p. 012033, 2023, [doi: 10.1088/1757-899x/1289/1/012033](https://doi.org/10.1088/1757-899x/1289/1/012033). (Bài báo hội thảo quốc tế TISDIC 2023, danh mục Web of Science)

2. Các bài báo công bố trong nước

- (1) **Võ Minh Chí**, Nguyễn Minh Hải, Nguyễn Lan, Nguyễn Văn Hương, “Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng lên đặc tính dẫn điện và một số ứng dụng của SSC”, *Tạp chí khoa học công nghệ đại học Giao thông Vận Tải Thành Phố Hồ Chí Minh*, Volume 13, Issue 2, Pages: 64 - 78, 2024, [doi: https://www.doi.org/10.55228/jtst.13\(2\).64-78](https://www.doi.org/10.55228/jtst.13(2).64-78) (danh mục tạp chí tính điểm của HDGSNN)
- (2) **Vo Minh Chi**, Nguyen Minh Hai, Nguyen Lan, Pham Van Ngoc, Nguyen Van Huong, Nguyen Duc Hung, “Electrical resistance response of a pair of self-sensing concrete blocks under non-destructive compression,” *Transport and Communications Science Journal*, Vol. 76, Issue 04 (05/2025), 568-582. [Doi: https://doi.org/10.47869/tcsj.76.4.10](https://doi.org/10.47869/tcsj.76.4.10) (danh mục tạp chí tính điểm của HDGSNN)

3. Bằng độc quyền giải pháp hữu ích

- (1) Tên bằng: “Phương pháp chế tạo mẫu bê tông tự cảm biến và hệ thống cân tải trọng giao thông sử dụng mẫu bê tông này”. Số bằng 5110. Tác giả: TS. Nguyễn Minh Hải, **ThS. NCS. Võ Minh Chí**, TS. Phạm Văn Ngọc, PGS. TS. Nguyễn Lan, PGS. TS. Nguyễn Văn Hương, ThS. Mai Thị Thu Thủy.