

Tối ưu hóa cường độ nén nở hông của đất bề mặt ở Cần Thơ cải tạo bằng xi măng kết hợp phụ gia theo phương pháp bề mặt đáp ứng

Optimization of unconfined compressive strength of surface soil in Can Tho City improved with cement and additive using response surface methodology

> **THS.NCS LÊ VĂN HIỆP^{1,*}, PGS.TS NGUYỄN ĐỨC MẠNH², PGS.TS PHẠM THÁI BÌNH¹**

¹Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

²Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email: hieplv@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu nhằm tối ưu cường độ nén không nở hông (UCS, qu) của đất gia cố bằng xi măng và phụ gia DZ33, sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) với thiết kế trung tâm hợp thành (CCD). Ba yếu tố được khảo sát gồm hàm lượng xi măng (0 - 6%), hàm lượng phụ gia (0 - 0,006%) và thời gian bảo dưỡng (14 - 28 ngày). Kết quả ANOVA cho thấy mô hình hồi quy bậc hai có ý nghĩa thống kê ($p < 0,001$; $R^2 = 84,72\%$), trong đó hàm lượng xi măng là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất, tiếp theo là thời gian bảo dưỡng, còn phụ gia có ảnh hưởng phi tuyến. Điều kiện tối ưu (6% xi măng, 0,006% DZ33 và 24,5 ngày bảo dưỡng) cho giá trị UCS dự báo đạt 4,691 MPa. Kết quả khẳng định hiệu quả của giải pháp gia cố xi măng - phụ gia và cho thấy RSM-CCD là phương pháp hiệu quả trong tối ưu hóa gia cố đất.

Từ khóa: Đất cải tạo xi măng; phụ gia DZ33; cường độ nén không nở hông; gia cố đất; phương pháp bề mặt đáp ứng; thiết kế trung tâm hợp thành.

ABSTRACT

This study aims to optimize the unconfined compressive strength (UCS, qu) of soil stabilized with cement and a DZ33 enzyme-based additive using Response Surface Methodology (RSM) with a Central Composite Design (CCD). Three factors were investigated, including cement content (0 - 6%), additive dosage (0-0.006%), and curing time (14 - 28 days). The ANOVA results indicate that the quadratic regression model is statistically significant ($p < 0.001$; $R^2 = 84.72\%$), in which cement content is the most influential factor, followed by curing time, while the additive exhibits a nonlinear effect. The optimal condition (6% cement, 0.006% DZ33 and 24.5 days of curing) yields a predicted UCS of 4.691 MPa. The results confirm the effectiveness of cement - additive stabilization and demonstrate that RSM-CCD is an efficient method for optimizing soil stabilization systems.

Keywords: Cement-treated soil; additive DZ33; unconfined compressive strength; soil stabilization; response surface methodology; central composite design.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đồng bằng sông Cửu Long, đặc biệt là Cần Thơ có nền đất yếu phân bố rộng, lớp đất bề mặt chủ yếu là bụi và sét dẻo lẫn hữu cơ chiều dày từ 0,5 - 2 m. Theo TCVN 9436 - 2012 [1], lớp đất này không thích hợp làm nền hay vật liệu đắp, nên thường đào bỏ trong quá trình xây dựng. Nhiều nghiên cứu đã áp dụng phương pháp cải tạo đất bằng chất kết dính vô cơ kết hợp phụ gia nhằm cải thiện tính chất cơ lý và khả năng chịu tải của đất [9, 11-14, 18].

Cường độ nén nở hông (q_u) được xác định theo TCVN 9438:2012 hoặc ASTM D2166/D2166M [2, 15]. Giá trị này phụ thuộc đồng thời vào nhiều yếu tố như hàm lượng xi măng, loại đất, thời gian dưỡng hộ và phụ gia. Các nghiên cứu gần đây cho thấy việc kết hợp phụ gia khoáng hoặc phụ gia hoạt tính có thể cải thiện đáng kể cường độ và cấu trúc vi mô của đất-xi măng [5, 7].

DZ33 là loại phụ gia hoạt tính được sử dụng nhằm tăng cường phản ứng thủy hóa, cải thiện cấu trúc liên kết và nâng cao cường độ

của vật liệu gia cố [6]. Tuy nhiên, hiệu quả của DZ33 phụ thuộc vào hàm lượng sử dụng và sự tương tác với xi măng cũng như thời gian dưỡng hộ. Nếu lựa chọn tỷ lệ không hợp lý, hiệu quả cải thiện cường độ có thể không đạt tối ưu, thậm chí gây lãng phí vật liệu.

Phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology - RSM) kết hợp với thiết kế thí nghiệm trung tâm (Central Composite Design - CCD) đã được áp dụng rộng rãi trong nghiên cứu vật liệu xây dựng và địa kỹ thuật nhằm mô hình hóa và tối ưu hóa các thông số ảnh hưởng đến cường độ vật liệu [4, 10]. Phương pháp này cho phép đánh giá đồng thời ảnh hưởng tuyến tính, phi tuyến và tương tác giữa các biến độc lập, đồng thời xác định tổ hợp thông số tối ưu với số lượng thí nghiệm hợp lý.

Nghiên cứu này tập trung tối ưu hóa cường độ nén không nở hông của đất bề mặt tại Cần Thơ cải tạo bằng xi măng kết hợp phụ gia DZ33 theo phương pháp bề mặt đáp ứng. Mục tiêu của nghiên cứu là: (i) Xây dựng mô hình hồi quy dự báo q_u theo các biến; (ii) đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố thông qua phân tích

phương sai; (iii) xác định điều kiện nhằm đạt giá trị q_u lớn nhất trong phạm vi khảo sát.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu thí nghiệm

Đất mặt được lấy tại xã Thạnh Tiến, Vĩnh Thạnh, Cần Thơ (Hình 1). Một số đặc trưng vật lý và thành phần hạt của đất nghiên cứu phân tích theo TCVN hiện hành được trình bày trong Bảng 1.



Hình 1. Vị trí lấy mẫu đất thí nghiệm

Bảng 1. Một số đặc trưng vật lý của mẫu đất nghiên cứu

STT	Cỡ sàng	Ký hiệu	Đơn vị	Hàm lượng lọt sàng	STT	Chỉ tiêu	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
1	Thành phần hạt đất (mm)				2	Khối lượng riêng	ρ_s	g/cm ³	2,48
	50,0	P	%	100	3	Giới hạn chảy	W_L	%	65,69
	37,5	P	%	100	4	Giới hạn dẻo	W_p	%	39,46
	25,0	P	%	100	5	Chỉ số dẻo	I_p	%	26,23
	19,0	P	%	100	6	Khối lượng thể tích khô lớn nhất	$\rho^{k,max}$	g/cm ³	1,392
	9,5	P	%	100	7	Độ ẩm tốt nhất	W_{tn}	%	21,96
	4,75	P	%	100	8	Hàm lượng hữu cơ	H	%	13,09
	2,36	P	%	99,7	9	Độ trương nở	ϵ	%	8,25
	0,425	P	%	99,2	10	Trị số xuyên CBR (95%)	CBR	%	0,7
	0,075	P	%	98,5	11	Tên đất theo AASHTO	A - 7-5 (35) Đất bụi dẻo cao (MH)		

Xi măng trong nghiên cứu sử dụng xi măng Nghi Sơn PC40 hàm lượng 0%, 3% và 6% theo khối lượng đất khô, xi măng có thành phần hóa học như Bảng 2.

Bảng 2. Thành phần hóa học của xi măng Nghi Sơn PC40 theo công bố của nhà sản xuất

Loại xi măng	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
PC40	20,26	4,81	3,15	63,72	1,94	2,4	0,09	0,65	2,5

Phụ gia sử dụng trong nghiên cứu là chế phẩm thương mại DZ33, được giới thiệu là phụ gia ổn định đất dạng lỏng, có nguồn gốc hữu cơ và được ứng dụng trong gia cố nền đường, nền công trình giao thông và xử lý nền đất yếu [6]. DZ33 thuộc nhóm phụ gia đa enzyme (multi-enzyme stabilizer), có thành phần hoạt tính hữu cơ kết hợp với các chất hoạt động bề mặt và một số vi lượng, có khả năng phân hủy sinh học [6].

Trong nghiên cứu này, DZ33 được sử dụng với hàm lượng 0%; 0,003%; 0,006% theo khối lượng đất khô và kết hợp với xi măng nhằm đánh giá ảnh hưởng đồng thời của phụ gia, hàm lượng xi măng và thời gian dưỡng hộ đến cường độ nén một trục của đất cải tạo.

2.2. Quy trình chế tạo mẫu

Quy trình trộn đất với xi măng và phụ gia, đúc mẫu và thí nghiệm được thực hiện theo TCVN 9403:2012 [17], ASTM D2166 [3]. Đất nghiên cứu khi đưa về phòng thí nghiệm được phơi khô, nghiền nhỏ sau đó trộn với xi măng và lượng nước cần thiết để đất đạt đến độ ẩm tốt nhất. Các mẫu đất được chế bị dạng hình trụ có đường kính $d=38$ mm, chiều cao $h=76$ mm. Sau khi đúc xong, mẫu được tháo khuôn bảo dưỡng trong điều kiện bốc hơi ở 7 ngày tuổi, sau đó bóc bỏ lớp bọc và bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng 14, 21, 28 ngày ở nhiệt độ phòng từ 25 - 30°C như Hình 2.





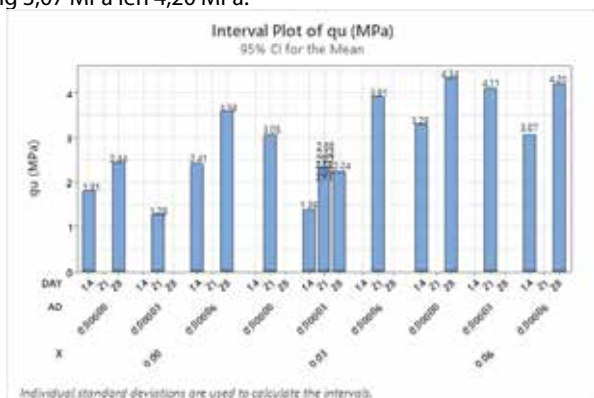
Hình 2. Quy trình chế bị mẫu, bảo dưỡng và nén mẫu thí nghiệm

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

Mẫu chế bị sau khi bảo dưỡng đủ ngày tuổi được lấy ra thí nghiệm trên máy nén một trục nở hồng. Quy trình thí nghiệm được thực hiện theo TCVN 9438:2012 [16] và ASTM D2166 [3], với tốc độ gia tải 1% đường kính của mẫu cho đến khi mẫu bị phá hủy. Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong Hình 3.

Hình 3 thể hiện khoảng tin cậy 95% của q_u theo thời gian dưỡng hộ (14 và 28 ngày), hàm lượng phụ gia AD (0; 0,0003; 0,0006) và hàm lượng X (0; 0,03; 0,06).

Kết quả cho thấy q_u tăng theo thời gian dưỡng hộ đối với tất cả các cấp phối. Ở mẫu đối chứng ($X = 0$; $AD = 0$), q_u tăng từ khoảng 2,18 MPa (14 ngày) lên 2,44 MPa (28 ngày). Mức tăng rõ rệt hơn khi hàm lượng X cao, điển hình tại $X = 0,06$ và $AD = 0,0006$, q_u tăng từ khoảng 3,07 MPa lên 4,20 MPa.



Hình 3. Biểu đồ ảnh hưởng của ngày bảo dưỡng, hàm lượng xi măng và phụ gia

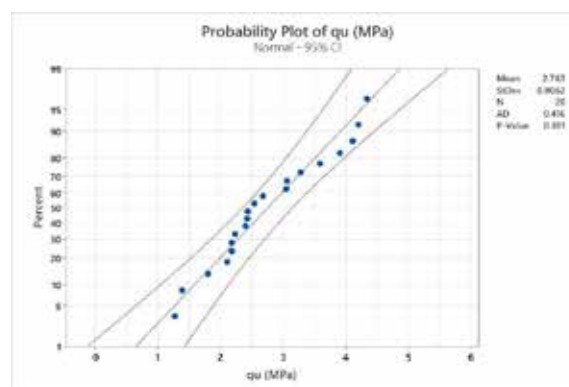
Hàm lượng X có ảnh hưởng mạnh nhất đến cường độ. Tại cùng mức AD và thời gian dưỡng hộ, q_u tăng rõ rệt khi X tăng từ 0 lên 0,03 và 0,06. Ví dụ ở 28 ngày và $AD = 0,0006$, q_u tăng từ khoảng 3,59 MPa ($X = 0$) lên 3,91 MPa ($X = 0,03$) và đạt 4,20 MPa ($X = 0,06$).

Ảnh hưởng của phụ gia AD nhỏ hơn và phụ thuộc vào X. Ở X thấp, sự thay đổi q_u theo AD không rõ rệt do khoảng tin cậy chồng lấn. Tuy nhiên, tại $X = 0,03 - 0,06$, việc tăng AD nhìn chung cải thiện q_u , đặc biệt ở giai đoạn 14 ngày.

Giá trị q_u lớn nhất đạt khoảng 4,20 - 4,34 MPa tại $X = 0,06$ và 28 ngày, gần gấp đôi so với mẫu đối chứng 14 ngày. Kết quả khẳng định X là yếu tố chi phối chính, trong khi AD đóng vai trò hỗ trợ cải thiện cấu trúc vật liệu.

4. THẢO LUẬN MÔ HÌNH CCD

Sử dụng phần mềm Minitab Statistical Software 22 xây dựng hàm tương quan cho q_u với các biến (X, AD và DAY) được kết quả như sau:



Hình 4. Biểu đồ xác suất của q_u

Biểu đồ Normal Probability Plot (Hình 4) của cường độ kháng nén không thoát nước q_u cho thấy các điểm dữ liệu phân bố khá sát đường thẳng chuẩn và hầu hết nằm trong khoảng tin cậy 95%. Giá trị kiểm định Anderson-Darling (AD) = 0,416 với P-value = 0,301 > 0,05, cho thấy không có đủ bằng chứng để bác bỏ giả thuyết rằng dữ liệu tuân theo phân bố chuẩn. Do đó, có thể xem tập dữ liệu q_u có phân bố gần chuẩn. Ngoài ra, giá trị trung bình của q_u là 2,763 MPa và độ lệch chuẩn là 0,906 MPa với 20 mẫu thí nghiệm. Kết quả này cho thấy dữ liệu có mức độ phân tán vừa phải và phù hợp để sử dụng các phương pháp phân tích thống kê dựa trên giả định phân bố chuẩn.

Kết quả ANOVA (Hình 5) cho thấy mô hình hồi quy bậc hai có ý nghĩa thống kê cao ($F = 15,52$; $p < 0,001$), chứng tỏ các biến độc lập ảnh hưởng đáng kể đến đáp ứng. Hệ số xác định $R^2 = 84,72\%$ và $R^2_{adj} = 79,26\%$ cho thấy mô hình giải thích tốt dữ liệu và không bị quá khớp. Giá trị $R^2_{pred} = 67,47\%$ phản ánh khả năng dự đoán ở mức khá. Độ lệch chuẩn phần dư nhỏ ($S = 0,4127$) và kiểm định Lack-of-Fit không có ý nghĩa ($p = 0,055 > 0,05$), cho thấy mô hình phù hợp với dữ liệu thực nghiệm.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	13.2191	2.64383	15.52	0.000
Linear	3	8.4653	2.82176	16.57	0.000
X	1	5.5942	5.59419	32.84	0.000
AD	1	0.5036	0.50356	2.96	0.108
DAY	1	2.3675	2.36752	13.90	0.002
Square	2	4.7539	2.37694	13.95	0.000
AD*AD	1	4.4929	4.49286	26.38	0.000
DAY*DAY	1	0.7449	0.74488	4.37	0.055
Error	14	2.3847	0.17033		
Lack-of-Fit	9	2.1241	0.23601	4.53	0.055
Pure Error	5	0.2606	0.05211		
Total	19	15.6038			



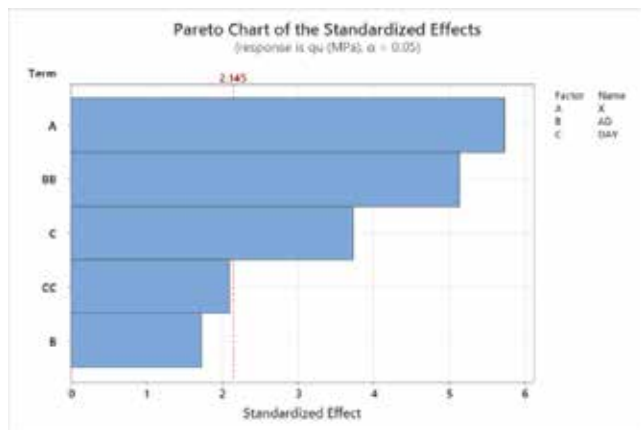
Hình 5. Kết quả mô hình CCD

Về ảnh hưởng của các yếu tố, biến X có tác động mạnh nhất đến đáp ứng ($F = 32,84$; $p < 0,001$; Coef = 0,748), tiếp theo là DAY ($F = 13,90$; $p = 0,002$; Coef = 0,487). Biến AD không có ý nghĩa thống kê ở dạng tuyến tính ($p = 0,108$). Tuy nhiên, thành phần bậc hai AD^2 có ảnh hưởng rất mạnh ($F = 26,38$; $p < 0,001$; Coef = 1,185), cho thấy tồn tại quan hệ phi tuyến và giá trị tối ưu của biến này. Thành phần DAY^2 có hệ số âm và gần ngưỡng ý nghĩa ($p = 0,055$), phản ánh xu hướng giảm tốc độ tăng đáp ứng theo thời gian.

Các giá trị VIF $\leq 1,56$ cho thấy không tồn tại đa cộng tuyến đáng kể giữa các biến độc lập, đảm bảo độ tin cậy của các hệ số hồi quy.

Phương trình hồi quy q_u

$$q_u = 2,422 + 0,748X + 0,224AD + 0,487DAY + 1,185AD^2 - 0,482DAY^2 \quad (1)$$

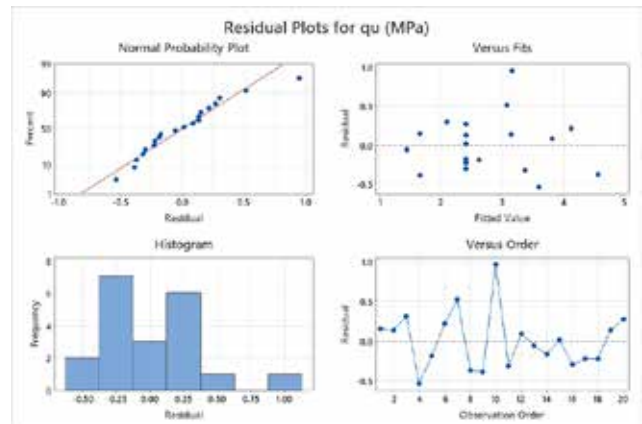


Hình 6. Biểu đồ chuẩn hóa các hiệu ứng và biểu đồ Pareto

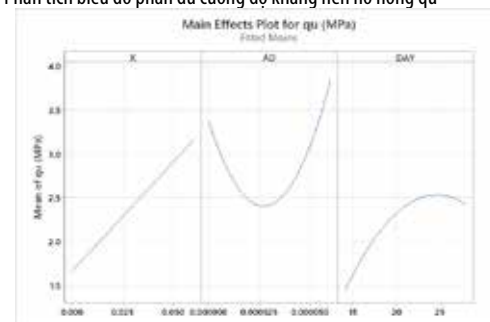
Biểu đồ Pareto (Hình 6) đánh giá định lượng mức độ ảnh hưởng của các yếu tố dựa trên giá trị tuyệt đối của hiệu ứng chuẩn hóa. Với ngưỡng ý nghĩa $\alpha = 0,05$ (giá trị 2,145), các yếu tố vượt ngưỡng gồm (X), (AD^2), (DAY) và (DAY^2). Trong đó, X có ảnh hưởng mạnh nhất, tiếp theo là AD^2 và DAY. Ngược lại, B (AD) không vượt ngưỡng ý nghĩa, phù hợp với kết quả ANOVA ($p = 0,108$), cho thấy ảnh hưởng tuyến tính của AD không đáng kể nhưng thành phần bậc hai lại có ý nghĩa thống kê.

Phân tích phần dư và kiểm định giả định mô hình (Hình 7). Các đồ thị phần dư được sử dụng để đánh giá mức độ phù hợp của mô hình hồi quy bậc hai, bao gồm: Normal probability plot, Residuals versus Fits, Histogram và Residuals versus Order.

Biểu đồ xác suất chuẩn cho thấy các điểm dữ liệu phân bố gần đường thẳng tham chiếu, trong khi Histogram thể hiện phân bố đối xứng quanh giá trị 0, cho thấy phần dư xấp xỉ phân phối chuẩn. Biểu đồ Residuals versus Fits cho thấy các điểm phân bố ngẫu nhiên quanh trục 0 và không xuất hiện dạng phễu, chứng tỏ phương sai phần dư gần như không đổi. Ngoài ra, biểu đồ Residuals versus Order không thể hiện xu hướng hoặc chu kỳ rõ rệt, cho thấy phần dư độc lập và không phụ thuộc vào thứ tự thí nghiệm. Kết quả này xác nhận các giả định cơ bản của mô hình hồi quy được thỏa mãn.



Hình 7. Phân tích biểu đồ phần dư cường độ kháng nén nở hông qu

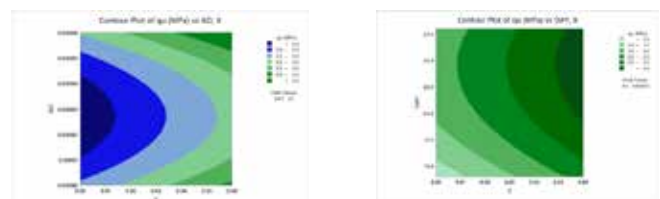


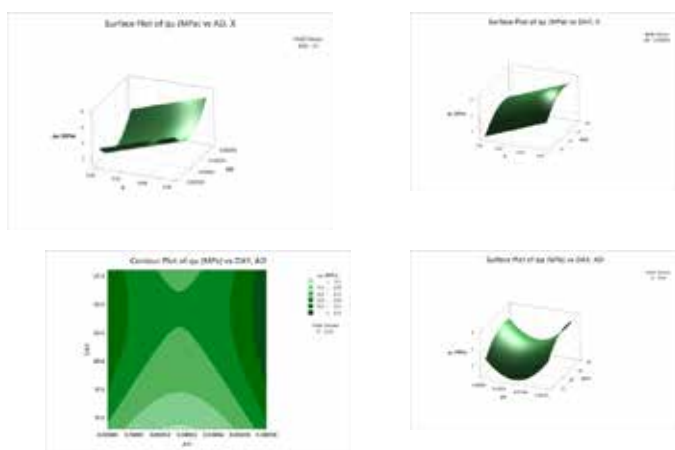
Hình 8. Kết quả các yếu tố ảnh hưởng chính

Ngược lại, biến AD thể hiện mối quan hệ phi tuyến với q_u . Đường cong có dạng parabol mở lên với giá trị q_u thấp nhất ở vùng trung tâm và tăng ở hai phía biên. Điều này phù hợp với kết quả ANOVA khi thành phần bậc hai AD^2 có ý nghĩa thống kê cao ($p < 0,001$), cho thấy ảnh hưởng của AD chủ yếu mang tính phi tuyến và tồn tại vùng tối ưu trong miền khảo sát.

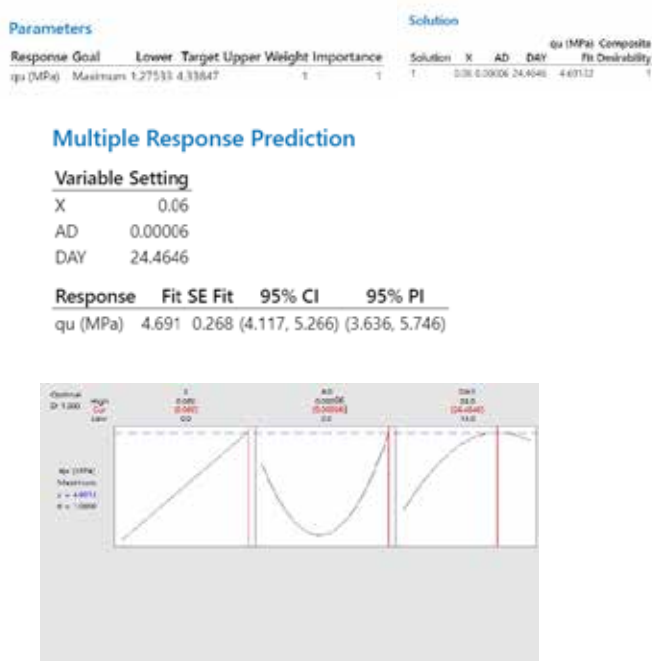
Biến DAY cũng có quan hệ phi tuyến với q_u . Cường độ tăng nhanh khi thời gian dưỡng hộ tăng từ 14 đến khoảng 24 - 25 ngày chủ yếu do quá trình thủy hóa của xi măng diễn ra mạnh mẽ, hình thành các sản phẩm C - S - H làm gia tăng liên kết trong cấu trúc vật liệu. Sau giai đoạn này, tốc độ phát triển cường độ giảm dần và có xu hướng ổn định, phù hợp với quy luật phát triển cường độ đã được ghi nhận trong các nghiên cứu quốc tế của Horpibulsuk et al. (2010) [8] có xu hướng ổn định hoặc giảm nhẹ, phản ánh quá trình phát triển cường độ của vật liệu theo thời gian.

Trên Hình 8 thấy rằng, các đồ thị bề mặt đáp ứng và đường đồng mức cường độ q_u chịu ảnh hưởng mạnh nhất bởi hàm lượng X, với xu hướng tăng gần tuyến tính trong toàn miền khảo sát. Biến AD thể hiện mối quan hệ phi tuyến rõ rệt, trong đó giá trị q_u thấp hơn ở vùng trung tâm và tăng ở hai phía biên, phù hợp với ý nghĩa thống kê của thành phần bậc hai AD^2 . Thời gian bảo dưỡng (DAY) có tác động tích cực đến q_u , tuy nhiên mức tăng có xu hướng chậm dần ở vùng thời gian cao, phản ánh quá trình phát triển cường độ tiệm cận trạng thái ổn định. Các đường đồng mức tương đối trơn và không xuất hiện sự xoắn mạnh, cho thấy tương tác giữa các yếu tố không chi phối đáng kể so với ảnh hưởng riêng lẻ của từng biến.





Hình 9. Các đồ thị Contour và Surface Plot



Hình 10. Xác định giá trị tối ưu của q_u

Hình 9 kết quả tối ưu hóa bằng hàm mong muốn (desirability function) cho thấy giá trị q_u lớn nhất đạt tại $X = 0,06$; $AD = 0,00006$ và $DAY \approx 24,46$ ngày, với q_u dự đoán = 4,691 MPa. Khoảng tin cậy 95% của giá trị dự đoán là 4,117 - 5,266 MPa và khoảng dự đoán 95% là 3,636 - 5,746 MPa, cho thấy độ tin cậy thống kê cao của mô hình. Kết quả này cho thấy điều kiện tối ưu đạt được khi hàm lượng X cao, AD ở vùng biên trên và thời gian dưỡng hộ khoảng 24 - 25 ngày.

5. KẾT LUẬN

Từ các kết quả thực nghiệm và phân tích mô hình CCD, có thể rút ra các kết luận chính sau:

Hàm lượng xi măng (X) là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến cường độ nén không giới hạn q_u của đất bề mặt Cần Thơ. Khi tăng X từ 0 lên 6%, giá trị q_u tăng gần gấp đôi, khẳng định vai trò chi phối của phản ứng thủy hóa. Thời gian dưỡng hộ (DAY) làm tăng đáng kể cường độ mẫu, tuy nhiên tốc độ tăng giảm dần theo thời gian, phản

ảnh hưởng bão hòa cường độ sau khoảng 24 - 28 ngày.

Phụ gia DZ33 không có ảnh hưởng tuyến tính rõ rệt nhưng có ảnh hưởng phi tuyến rất có ý nghĩa thống kê. Điều này chứng tỏ tồn tại hàm lượng tối ưu của phụ gia trong miền khảo sát.

Mô hình RSM-CCD xây dựng được có ý nghĩa thống kê cao ($p < 0,001$), hệ số $R^2 = 84,72\%$, không có sai lệch Lack-of-Fit đáng kể và thỏa mãn các giả định phần dư, cho thấy khả năng mô tả và dự báo tốt trong phạm vi nghiên cứu. Điều kiện tối ưu xác định được là: $X = 6\%$, $AD = 0,006\%$ và thời gian dưỡng hộ $\approx 24,5$ ngày, tại đó q_u dự đoán đạt 4,691 MPa với độ tin cậy cao.

Kết quả nghiên cứu góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc tận dụng và cải tạo lớp đất mặt yếu tại đồng bằng sông Cửu Long bằng phương pháp gia cố xi măng kết hợp phụ gia, hướng tới giải pháp kinh tế và bền vững trong xây dựng nền đường.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bộ Giao thông vận tải. TCVN 9436:2012 - Nền đường ô tô - Thi công và nghiệm thu. Hà Nội, 2012.
- [2] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 9438:2012 - Đất xây dựng - Phương pháp xác định độ bền nén một trục nở hông. Hà Nội, 2012.
- [3] ASTM D2166-00. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- [4] G. E. P. Box và K. B. Wilson. On the experimental attainment of optimum conditions, in Breakthroughs in Statistics: Methodology and Distribution. New York: Springer, pp. 270-310, 1992.
- [5] V. Q. Dang and et al. Mechanical properties and microstructures of cement-treated soils: a review. Journal of Science and Transport Technology - UTT, pp. 52-68, 2023.
- [6] Environmental Choices Inc. ENCHOICE® DZ33 - Soil Stabilizer Technical Description. Internet: <https://www.enchoices.com>, 10/09/2025.
- [7] H. Güllü và H. I. Fedakar. Response surface methodology for optimization of stabilizer dosage rates of marginal sand stabilized with Sludge Ash and fiber based on UCS performances. KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 21, no. 5, pp. 1717-1727, 2017.
- [8] S. Horpibulsuk and et al. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. Construction and Building Materials, vol. 24, no. 10, pp. 2011-2021, 2010.
- [9] M. Kitazume và M. Terashi. The Deep Mixing Method. London: CRC Press, 2013.
- [10] R. H. Myers, D. C. Montgomery and C. M. Anderson-Cook. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.
- [11] F. I. Shalabi and et al. Cement-stabilized waste sand as sustainable construction materials for foundations and highway roads. Materials, vol. 12, no. 4, p. 600, 2019.
- [12] N. V. Long và các cộng sự. Nghiên cứu cải thiện hỗn hợp đất tại chỗ và phế thải tro bay bằng xi măng kết hợp phụ gia DZ33 làm móng đường giao thông nông thôn tại khu vực ĐBSCL. Journal of Transportation Science and Technology, 2021.
- [13] S. A. Saleh and et al. Effect of soil stabilization on subgrade soil using cement, lime and fly ash. Eurasian Journal of Science and Engineering, vol. 6, no. 2, pp. 39-52, 2020.
- [14] M. Terashi. Fundamental properties of lime-treated soils (1st Report). Report of the Port and Harbour Research Institute, vol. 16, no. 1, pp. 3-28, 1977.
- [15] ASTM D2166. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [16] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 9438:2012 - Đất xây dựng - Phương pháp xác định độ bền nén một trục nở hông. Hà Nội, 2012.
- [17] Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng - Bộ Xây dựng. TCVN 9403:2012 - Gia cố nền đất yếu - Phương pháp trụ đất xi măng, Hà Nội, 2012.
- [18] T. V. Thu. Nghiên cứu gia cố cấu trúc đất bùn sét theo công nghệ geopolymers để cải tạo nền đất yếu. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, 2021.