



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Research and evaluate the potential of rice husk ash and rice straw ash for soil improvement in Vietnam



Duong Thanh Nguyen ^{1,2,*}, Ha Ngoc Thi Pham ¹, Toan Thi Ta ¹, Chinh Cong Thi Vo ¹

¹ Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² Research Group of Engineering and Geoenvironment (EEG), Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 05th Oct. 2023

Revised 13th Jan. 2024

Accepted 28th Jan. 2024

Keywords:

Cement,
Mechanical properties,
Physical properties,
Rice husk ash,
Rice straw ash,
Soil improvement.

ABSTRACT

Rice husk ash and rice straw ash are common agricultural wastes in developing countries. Currently, utilizing these wastes in the construction sector such as soil improvement and cement concrete production is a trend in many areas around the world. In Vietnam, with a rice production of more than 40 million tons/year, millions of tons of rice husk ash and straw ash can be generated. This is an abundant and a cheap material source. This article will research and evaluate the potential of rice husk ash and straw ash for soft soil improvement in Vietnam. Research results show that straw ash and rice husk ash are materials having high pozzolan activity. Various studies in the world and some studies in Vietnam showed that rice husk ash and straw ash not only improve some physical and mechanical properties of soil but can also partially replace the amount of binder. Vietnam has different types of soft soil and construction activities are increasing, so the demand for improving soft soil is also increasing. In which, improving soil with cement binder is one of the most popular methods. Therefore, rice husk ash and rice straw ash have great potential to combine with cement in improving soft soil in Vietnam. Utilizing these wastes not only helps reduce the negative impact their causes on the environment but also helps improve construction quality and reduce construction costs.

Copyright © 2024 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

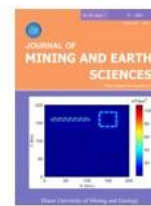
E - mail: nguyenthanhduong@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2024.65(1).06



Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>



Nghiên cứu, đánh giá tiềm năng sử dụng tro trấu, tro rơm rạ trong cải tạo đất ở Việt Nam

Nguyễn Thành Dương^{1,2,*}, Phạm Thị Ngọc Hà¹, Tạ Thị Toán¹, Võ Thị Công Chính¹

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

² Nhóm nghiên cứu Địa chất công trình và Địa môi trường, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

TÓM TẮT

Quá trình:

Nhận bài 05/10/2023

Sửa xong 13/01/2024

Chấp nhận đăng 28/01/2024

Từ khóa:

Tro trấu,

Tro rơm rạ,

Cải tạo đất,

Xi măng,

Tính chất vật lý,

Tính chất cơ học.

Tro trấu, tro rơm rạ là những phế thải nông nghiệp phổ biến ở các quốc gia đang phát triển. Hiện nay, việc tận dụng các phế thải này trong lĩnh vực xây dựng như cải tạo đất, sản xuất bê tông xi măng đang là một xu thế ở nhiều nơi trên thế giới. Tại Việt Nam, với sản lượng lúa hơn 40 triệu tấn/năm có thể tạo ra hàng triệu tấn tro trấu và tro rơm rạ. Đây chính là nguồn vật liệu sẵn có và giá thành rẻ. Bài báo tập trung nghiên cứu, đánh giá tiềm năng sử dụng tro trấu, tro rơm rạ trong cải tạo đất ở Việt Nam. Kết quả nghiên cứu cho thấy tro rơm rạ và tro trấu là những vật liệu có hoạt tính pozzolan cao. Các nghiên cứu trên thế giới và Việt Nam đã chỉ ra tro trấu và tro rơm rạ không chỉ cải tạo một số tính chất vật lý, cơ học của đất mà còn có thể thay thế một phần lượng chất kết dính. Việt Nam phân bố nhiều loại đất có thành phần và tính chất đặc biệt, nên việc cải tạo chúng trước khi xây dựng là rất cần thiết. Trong đó, cải tạo đất bằng chất kết dính xi măng là một trong những phương pháp phổ biến. Vì vậy, tro trấu và tro rơm rạ có tiềm năng lớn để kết hợp với xi măng trong cải tạo đất ở Việt Nam. Việc tận dụng các phế thải này không chỉ giúp giảm tác động tiêu cực do nó gây ra với môi trường mà còn giúp nâng cao chất lượng công trình và giảm giá thành xây dựng.

© 2024 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: nguyenthanhduong@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2024.65(1).06

1. Mở đầu

Nông nghiệp là ngành kinh tế mũi nhọn của nhiều quốc gia trên thế giới, đặc biệt ở các quốc gia đang phát triển, trong đó có Việt Nam. Hằng năm, hoạt động sản xuất nông nghiệp tạo ra một khối lượng lớn chất thải rắn như vỏ trấu, rơm rạ, bã mía, vỏ cà phê, xơ dừa,... Các chất thải này thường được đổ bỏ ra môi trường hoặc đốt ở ngoài tự nhiên, một phần được sử dụng làm chất đốt, thức ăn cho gia súc, phân bón sinh học,... Khi đốt, sẽ tạo các phụ phẩm như tro trấu, tro rơm rạ, tro bã mía, tro xơ dừa,... Các loại tro này thường ít được tận dụng và có thể gây tác động tiêu cực đến môi trường nước và không khí khi đổ bỏ ra môi trường. Vì vậy, việc nghiên cứu tận dụng các phế thải nông nghiệp này nhằm làm giảm tác động tiêu cực đến môi trường là rất cần thiết. Gần đây, xu hướng sử dụng các phế thải nông nghiệp như một vật liệu phụ gia trong hoạt động xây dựng như sản xuất bê tông xi măng, xử lý và cải tạo đất yếu ngày càng phổ biến (Chen và nnk., 2021; Gidebo và nnk., 2023; Mareeswaran và nnk., 2023).

Việt Nam là nước nông nghiệp với hơn 14 triệu lao động làm việc trong lĩnh vực này. Việt Nam cũng là một trong những nước sản xuất lúa gạo lớn nhất thế giới với khoảng 44 triệu tấn lúa năm 2023. Với sản lượng lúa gạo lớn như trên, một lượng lớn các phế thải như vỏ trấu, rơm rạ sẽ được thải ra hàng năm. Đi cùng với đó là 1 lượng lớn tro trấu, tro rơm rạ sẽ được tạo ra khi đốt vỏ trấu và rơm rạ. Đây chính là một nguồn vật liệu dồi dào, có giá thành và chi phí rẻ.

Ở Việt Nam, phân bố nhiều loại đất có thành phần và tính chất đặc biệt như đất sét yếu, đất

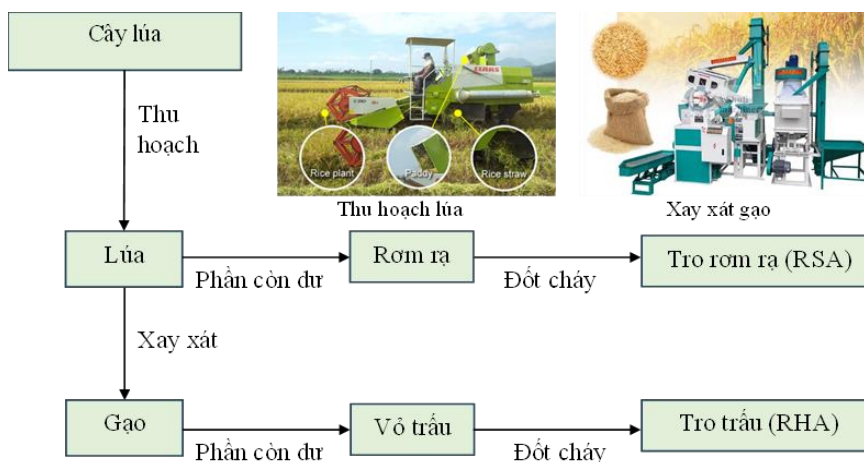
nhhiễm mặn, nhiễm phèn ở khu vực đồng bằng sông Hồng và sông Cửu Long; đất đỏ bazan, đất trưỡng nỏ, đất laterit ở khu vực Tây Nguyên. Các loại đất này cần phải được cải tạo trước khi xây dựng công trình hoặc trước khi sử dụng làm vật liệu đất xây dựng. Việc nghiên cứu tận dụng các phế thải nông nghiệp, trong đó có tro trấu, tro rơm rạ, để giảm lượng dư thừa và giúp bảo vệ môi trường là rất cần thiết. Vì vậy, bài báo này sẽ trình bày kết quả nghiên cứu, đánh giá tổng quan tiềm năng sử dụng tro trấu, tro rơm rạ trong xử lý, cải tạo đất ở Việt Nam.

2. Đặc điểm của tro trấu, tro rơm rạ

2.1. Tính chất vật lý

Rơm rạ là phần còn lại sau khi thu hoạch lúa. Trung bình khi sản xuất được 1 kg lúa gạo sẽ tạo ra khoảng 1÷1,5 kg rơm rạ. Rơm rạ thu hoạch trực tiếp từ ngoài đồng có khối lượng thể tích khô từ 12 đến 18 kg/m³. Thành phần hóa học của rơm rạ gồm 38% xenlulo, 25% hemixenlulo, 14% ligin (Van Hung và nnk., 2020). Khi đốt cháy hoàn toàn, lượng tro còn lại chiếm khoảng từ 18,67÷29,1% khối lượng rơm rạ (Hình 1).

Vỏ trấu là phụ phẩm của quá trình xay xát lúa gạo, chiếm khoảng 20% khối lượng thóc. Vỏ trấu có khối lượng thể tích từ 86÷114 kg/m³. Thành phần hóa học chính của vỏ trấu là silic (15÷20%), xenlulo (50%) và ligin (25÷30%), với độ ẩm từ 10÷15%, khối lượng thể tích từ 90÷150 kg/m³ (Singh, 2018). Khi đốt vỏ trấu, phần còn lại là tro trấu, với khối lượng chiếm khoảng 20% khối lượng vỏ trấu (Hình 1).



Hình 1. Quá trình tạo ra tro trấu và tro rơm rạ.

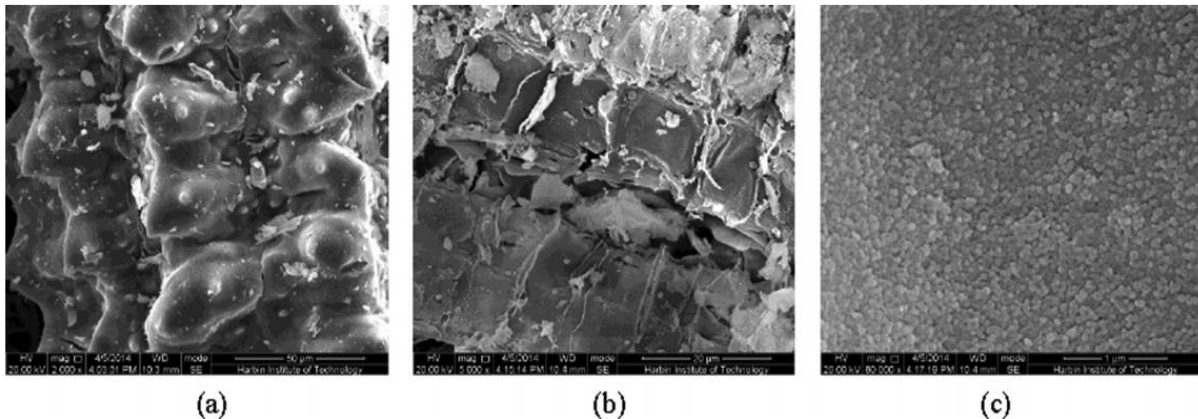
Tro trấu, tro rơm rạ thường có màu xám, xám đen, xám trắng và phụ thuộc vào hàm lượng SiO_2 , hàm lượng cacbon còn dư trong tro (Kang và nnk., 2019). Tro trấu, tro rơm rạ thường nhẹ, xốp và dễ phát tán trong không khí nên dễ ảnh hưởng đến môi trường nếu không được vận chuyển và lưu trữ cẩn thận. Khối lượng riêng của tro trấu, tro rơm rạ nhỏ hơn khối lượng riêng của đất và dao động từ khoảng $1900 \div 2400 \text{ kg/m}^3$ (Duong và nnk., 2020; El-Sayed và El-Samni, 2006; Pandey và Kumar, 2019).

Tro trấu và tro rơm rạ đều có cấu trúc lỗ rỗng (Ouyang, 2003; Chenpei, 2014; Hidalgo và nnk., 2021; Wang và nnk., 2021) (Hình 2, 3). Theo Ouyang (2003), tro trấu có 3 lớp cấu trúc lỗ rỗng; lớp 1 là lớp dạng tổ ong lỏng lẻo, có bề dày khoảng $10 \mu\text{m}$; lớp 2 bao gồm các thớ mỏng có nhiều lỗ rỗng, bề dày khoảng $1 \mu\text{m}$; lớp 3 là lớp có các siêu

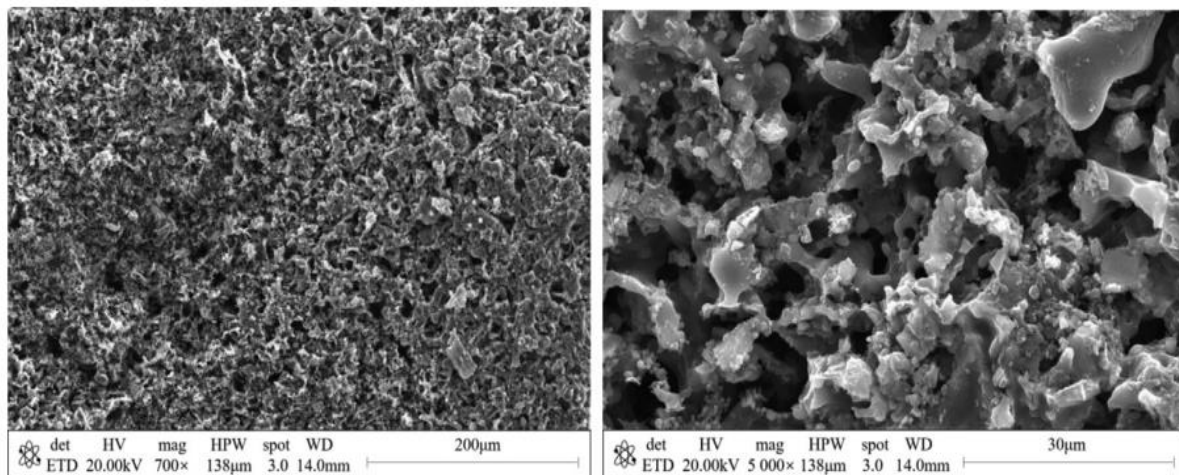
lỗ rỗng, kích thước $< 50 \text{ nm}$ hình thành từ các hạt SiO_2 .

2.2. Thành phần hóa học

Thành phần hóa học của tro trấu, tro rơm rạ phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ và thời gian đốt (Duong và nnk., 2020; El-Sayed và El-Samni, 2006). Thành phần hóa học của tro trấu, tro rơm rạ thu thập từ các nghiên cứu được tổng hợp trong Bảng 1, 2. Có thể thấy, trong các thành phần hóa học của tro trấu, hàm lượng SiO_2 chiếm tỷ lệ cao nhất, dao động từ khoảng $70 \div 90\%$, còn hàm lượng của các thành phần oxit khác không đáng kể. Trong tro rơm rạ, hàm lượng SiO_2 cũng chiếm tỷ lệ cao nhất, với hàm lượng từ khoảng $60 \div 80\%$, tuy nhiên hàm lượng các oxit như Fe_2O_3 , K_2O , CaO cũng khá cao, có thể lên đến hơn 20% , còn các oxit khác chiếm tỷ lệ không đáng kể.



Hình 2. Cấu trúc của tro trấu. (a) Mặt ngoài x2000 lần; (b) Mặt trong x5000 lần; (c) Mặt trong x8000 lần (Chenpei, 2014).



Hình 3. Cấu trúc của tro rơm rạ (Wang và nnk., 2021).

Bảng 1. Thành phần hóa học của tro trấu.

Thành phần hóa học									Tài liệu tham khảo
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	
89,18	1,75	0,78	1,29	0,64	0,01	0,85	1,38	0,60	Muntohar và nnk. (2013)
73,36	0,26	0,96	1,71	0,54	0,69	0,12	6,2	0,65	Rahgozar và nnk. (2018)
89,8	0,14	0,19	1,76	0,85	0,35	0,04	3,65	-	Medina và nnk. (2018)
93,0	0,17	0,35	0,91	0,42	0,11	0,63	2,82	-	Jongpradist và nnk. (2018)
92,0	0,31	0,38	0,97	0,47	-	0,2	3,87	0,75	Kang và nnk. (2019)
72,34	4,43	1,21	1,54	0,98	-	0,75	3,54	-	Liu và nnk. (2019)
88,09	1,25	-	0,98	0,34	-	-	-	-	Jiang và nnk. (2019)
75,30	1,40	1,98	2,95	-	-	0,98	5,55	-	Attah và nnk. (2021)
93,0	0,17	0,35	0,91	0,42	0,11	0,63	2,82	-	Sukkarak và nnk. (2022)
90,04	1,83	1,37	1,28	0,73	-	0,42	2,61	-	Pushpakumara và Mendis (2022)
87,6	0,09	0,61	0,88	0,33	0,22	-	2,87	0,48	Reis và nnk. (2022)
89,09	1,75	0,78	1,29	0,64	-	0,85	-	-	Wibowo và nnk. (2023)

Bảng 2. Thành phần hóa học của tro rơm rạ.

Thành phần hóa học										Tài liệu tham khảo
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	
65,92	1,78	0,2	2,4	3,11	0,69	-	-	-	-	El-Sayed và El-Sammi (2006)
75,0	1,4	2,0	1,5	1,9	0,9	1,9	10,0	2,7	0,02	Liu và nnk. (2011)
74,67	1,04	0,85	3,01	1,75	1,24	0,96	12,3	1,41	0,09	Jeng và nnk. (2012)
62,75	2,4	24,18	2,76	5,12	-	-	-	-	-	Anupam và nnk. (2013)
65,36	2,62	15,28	2,89	-	-	-	-	-	-	Sabat và nnk. (2015)
79,82	1,13	0,25	0,37	7,54	-	0,50	1,07	3,75	-	Pandey và Kumar (2019)
78,0	-	1,45	10,05	-	0,4	-	5,1	-	-	Amin và nnk. (2022)

Nhìn chung, hàm lượng SiO₂ trong tro trấu và tro rơm rạ đều cao và cho thấy đây là những vật liệu có hoạt tính pozzolan cao. Tuy nhiên, theo kết quả tổng hợp của Dương và nnk. (2020) để thu được tro trấu có hoạt tính pozzolan cao nên đốt vỏ trấu trong điều kiện kiểm soát nhiệt độ từ 500÷800°C và thời gian đốt từ 1÷4 giờ.

3. Vai trò của tro trấu, tro rơm rạ trong xử lý, cải tạo đất

3.1. Tác dụng cải tạo một số tính chất vật lý

Do tro trấu, tro rơm rạ có cấu trúc tổ ong, có khả năng hấp thụ nước nên khi trộn tro rơm rạ, tro trấu khô vào đất, nó hút nước trong đất và làm giảm độ ẩm. Ngoài ra, phản ứng thủy hóa của SiO₂ trong tro trấu, tro rơm rạ với Ca(OH)₂ tự do trong đất có thể giúp làm giảm độ ẩm (Yoobanpot và Jamsawang, 2014). Tro trấu, tro rơm rạ là những

vật liệu không có tính dính nên khi trộn vào đất nó sẽ làm giảm tính dẻo của đất. Khi độ ẩm và tính dẻo của đất giảm thì khả năng và áp lực trương nở của đất (nếu có) cũng sẽ giảm.

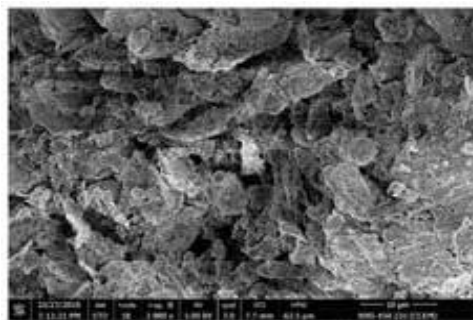
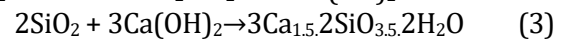
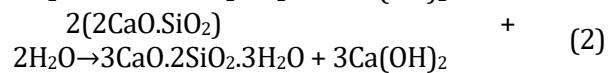
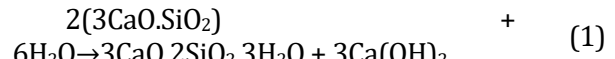
Đối với các chỉ tiêu đầm chặt như độ ẩm tối ưu (OMC) và khối lượng thể tích khô lớn nhất (MDD), khi trộn tro trấu, tro rơm rạ vào đất sẽ làm tăng giá trị OMC và giảm giá trị MDD. Giá trị OMC tăng là do khi trộn thêm tro trấu, tro rơm rạ vào đất sẽ tăng khả năng hấp thụ nước; giá trị MDD giảm là do tro trấu, tro rơm rạ có khối lượng riêng nhỏ hơn đất. Giá trị MDD giảm khi trộn thêm tro trấu, tro rơm rạ là 1 điểm bất lợi khi sử dụng làm vật liệu đắp đê, đắp đập.

3.2. Tác dụng nâng cao tính chất cơ học

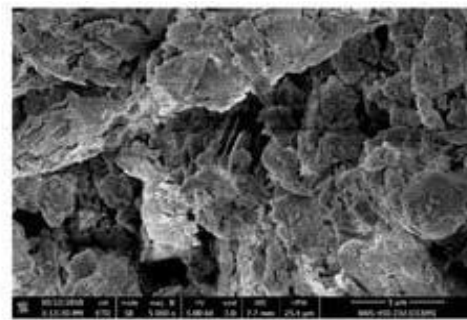
Bản thân tro trấu, tro rơm rạ không có khả năng dính kết nên ít hoặc không có tác dụng nâng cao cường độ khi trộn vào với đất. Để phát huy

hoạt tính pozzolan của tro trấu, tro rơm rạ, phải sử dụng kết hợp chúng với xi măng hoặc vôi (Basha và nnk, 2005; Behak, 2017). Khi đó, silic vô định hình trong tro trấu, tro rơm rạ có thể phản ứng với canxi hydroxit (phản ứng pozzolan) để hình thành gel CSH (Calcium-Silicate-Hydrate). Gel CSH là sản phẩm chính của quá trình thủy hóa xi măng Póc lăng và đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra cường độ. Khi sử dụng xi măng trong xử lý, cải tạo đất hoặc sản xuất bê tông, thành phần C₂S và C₃S trong xi măng sẽ phản ứng với nước theo các phản ứng (1) và (2) (phản ứng thủy hóa) tạo thành các sản phẩm gel CSH và canxi hydroxit tự do. Khi trộn thêm tro trấu, tro rơm rạ, silic vô định hình trong nó sẽ phản ứng với canxi hydroxit tự do theo phản ứng (3) để hình thành thêm gel CSH. Việc hình thành thêm các gel CSH này sẽ giúp nâng cao

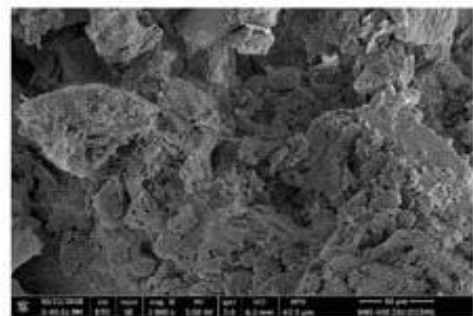
cường độ, độ bền của hỗn hợp đất hoặc bê tông xi măng. Như vậy, có thể thấy để giúp nâng cao cường độ, tro trấu và tro rơm rạ nên sử dụng kết hợp với xi măng hoặc vôi trong cải tạo đất. Kết quả hình ảnh chụp SEM của Jiang và nnk. (2019) cho thấy đã có sự thay đổi rõ rệt về cấu trúc của đất ở 28 ngày tuổi khi trộn vôi và tro trấu vào đất (Hình 4). Theo đó, khi trộn vôi và tro trấu vào đất đã hình thành nên các gel CSH với số lượng lớn, bao gồm chủ yếu là các tinh thể dạng kim và cột, có chiều dày và chiều dài lớn (Hình 4c2).



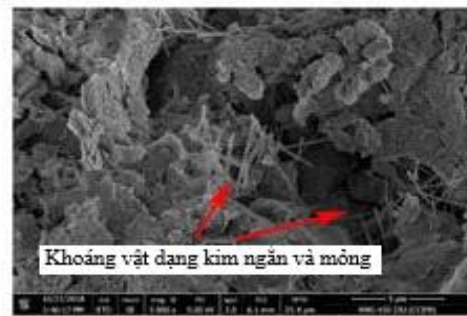
a1) Đất yếu, 28 ngày (×2000 lần)



a1) Đất yếu, 28 ngày (×5000 lần)

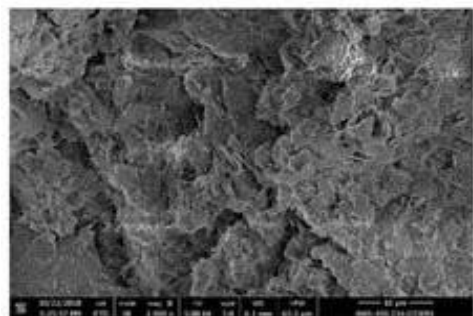


b1) Đất yếu+5% vôi, 28 ngày (×2000 lần)

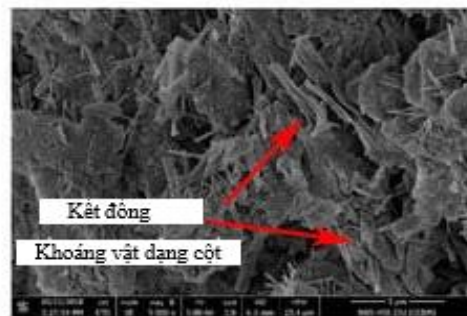


b2) Đất yếu+5% vôi, 28 ngày (×5000 lần)

Khoáng vật dạng kim ngắn và mỏng



c1) Đất yếu+5% vôi+4%RHA, 28 ngày (×2000 lần)



c2) Đất yếu+5% vôi+4%RHA, 28 ngày (×5000 lần)

Kết đông

Khoáng vật dạng cột

Hình 4. Hình ảnh SEM của đất khi cải tạo bằng vôi và vôi kết hợp với tro trấu (Jiang và nnk, 2019.)

4. Nghiên cứu sử dụng tro trấu, tro rơm rạ trong cải tạo đất ở trên thế giới

4.1. Nghiên cứu sử dụng tro trấu trong cải tạo đất

4.1.1. Cải tạo đất làm vật liệu đất xây dựng

Việc nghiên cứu sử dụng tro trấu để cải tạo đất làm vật liệu đất xây dựng như làm vật liệu đắp đường, đắp đê, đập đã được tiến hành trên nhiều loại đất khác nhau như đất trương nở, đất laterit, đất sét yếu, đất tàn tích và một số loại đất khác,...

a. Đất trương nở

Đất trương nở là loại đất phân bố khá phổ biến trên thế giới và nó gây khó khăn khi sử dụng làm vật liệu xây dựng do đặc tính trương nở khi gặp nước và tính dẻo cao. Việc nghiên cứu sử dụng tro trấu để cải tạo đất trương nở đã được nhiều tác giả ở nhiều nước trên thế giới quan tâm.

Nghiên cứu của Sharma và nnk. (2008) cho thấy hỗn hợp tro trấu và vôi có tác dụng cải tạo tốt một số tính chất của đất trương nở như nâng cao cường độ kháng nén 1 trục (UCS), nâng cao chỉ số sức chịu tải California (CBR). Cụ thể, giá trị UCS tăng 127%, chỉ số CBR tăng 191% khi hàm lượng vôi tăng từ 0÷4% và hàm lượng tro trấu là 12%. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu cho thấy khi hàm lượng vôi tăng lớn hơn 5% thì cả 2 chỉ số UCS và CBR đều giảm (Sharma và nnk., 2008). Brooks (2009) đã sử dụng hỗn hợp tro trấu và tro bay để cải tạo đất trương nở làm vật liệu lớp móng đường. Kết quả nghiên cứu cho thấy hỗn hợp 12% tro trấu và 25% tro bay được khuyến nghị để cải thiện đặc tính trương nở của đất. Tương tự, Singhai và Singh (2014) cũng cho thấy hỗn hợp 20% tro trấu và 15÷20% tro bay có khả năng cải tạo một số tính chất của đất trương nở như giảm tính dẻo, giảm khả năng trương nở. Karatai và nnk. (2016) cho thấy giá trị CBR có thể tăng 800% khi sử dụng kết hợp 20% tro trấu và 2% vôi để cải tạo đất trương nở. Ngoài ra, chỉ số dẻo cũng giảm đến 90% và khả năng trương nở tự do cũng giảm đến 70%. Liu và nnk. (2019) đã nghiên cứu sử dụng hỗn hợp tro trấu và cặn canxi cacbua (Calcium Carbide Residue, CCR) để cải tạo đất trương nở. Kết quả nghiên cứu cho thấy hỗn hợp tro trấu và cặn canxi cacbua làm giảm đáng kể khả năng trương nở, áp lực trương nở, số lượng và sự phát triển khe nứt của đất, đồng thời làm tăng

cường độ kháng nén 1 trục và sức kháng cắt. Kết quả nghiên cứu của Kumar và nnk. (2022) cho thấy tro trấu có thể làm giảm đáng kể khả năng trương nở tự do, chỉ số dẻo, giới hạn co ngót của đất trương nở (đất black cotton). Gần đây, Singh và nnk. (2023) đã sử dụng kết hợp tro trấu và sợi polypropylen thải (waste polypropylene fiber, PPF) để cải tạo một số tính chất của đất trương nở. Kết quả nghiên cứu cho thấy hỗn hợp này có thể dùng để cải tạo đất làm vật liệu móng đường.

b. Đất laterit

Đất laterit cũng là loại đất phân bố phổ biến trên thế giới. Nhiều tác giả đã nghiên cứu sử dụng tro trấu để cải tạo đất laterit làm vật liệu đắp (Rahman, 1987; Nasiri và nnk., 2016; Sani và nnk., 2020; Anburuvel và nnk., 2023; Okonkwo và nnk., 2023; Domphoeun và Eisazadeh, 2024). Nasiri và nnk. (2016) đã sử dụng tro trấu kết hợp vôi để cải tạo đất laterit A-6 sử dụng làm vật liệu móng đường giao thông. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc sử dụng vôi và tro trấu có hiệu quả tốt trong việc nâng cao cường độ, giảm tính dẻo. Trong đó, tổ hợp 4% vôi kết hợp 9% tro trấu và 6% vôi kết hợp 9% tro trấu cho hiệu quả cao nhất về nâng cao cường độ của hỗn hợp đất (CBR, UCS). Sani và nnk. (2020) nghiên cứu ảnh hưởng của tro trấu đến cường độ kháng nén của hỗn hợp đất laterit A-7-6 gia cố bằng sợi cây xidan (sisal fibre) ở bang Kaduna, Nigeria. Kết quả thí nghiệm nén 1 trục cho thấy cường độ kháng nén UCS của hỗn hợp đất gia cố đạt giá trị lớn nhất (696,4 kN/m²) khi sử dụng 6% tro trấu và 0,75% sợi xidan. Giá trị cường độ UCS này đáp ứng yêu cầu làm vật liệu đắp vỉa hè đường (UCS = 687÷1373 kN/m²). Sukkarak và nnk. (2022) đã nghiên cứu, đánh giá ảnh hưởng của tro trấu, tro bay đến cường độ kháng nén của hỗn hợp đất laterit cải tạo bằng xi măng. Kết quả nén 1 trục UCS ở 28 ngày tuổi cho thấy hàm lượng tro trấu từ 10÷30% thay thế có hiệu quả khi hàm lượng xi măng sử dụng từ 1 đến 2% mà không làm giảm cường độ của hỗn hợp. Vì vậy, cần sử dụng thêm các chất kết dính khác để đảm bảo yêu cầu vật liệu đất đắp đường. Gần đây, Anburuvel và nnk. (2023) đã nghiên cứu sử dụng hỗn hợp tro trấu (RHA) và tro vỏ trứng (ESA) làm vật liệu geopolymer để cải tạo đất laterit phục vụ đắp đường giao thông. Nhóm tác giả đã sử dụng 2 tổ hợp 3% ESA + 1% RHA + 1% NaOH và 2% ESA + 2% RHA + 1% NaOH và cho thấy các hỗn

hợp geopolymer này có tiềm năng lớn trong việc cải tạo đất làm vật liệu đắp đường. Okonkwo và nnk. (2023) đã nghiên cứu sử dụng tro trấu kết hợp với xi măng để cải tạo đất laterit A-7(1) để làm vỉa hè đường giao thông. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi sử dụng hỗn hợp tro trấu và xi măng các chỉ tiêu về cường độ của hỗn hợp đất tăng đáng kể. Cụ thể, với hỗn hợp 8% xi măng +28% tro trấu, cường độ kháng nén (UCS) và chỉ số CBR của hỗn hợp đất cải tạo sau 7 ngày bảo dưỡng tăng lần lượt là 1616,67% và 420,37%. Dompheun và Eisazadeh (2024) nghiên cứu đặc tính kháng uốn và sức kháng cắt của đất laterit cải tạo bằng hỗn hợp tro trấu, xơ dừa và vôi. Kết quả nghiên cứu cho thấy hỗn hợp 20% tro trấu +8% vôi cho cường độ kháng nén UCS lớn nhất sau 56 ngày bảo dưỡng. Trong khi đó, hỗn hợp 20% tro trấu +8% vôi +1% xơ dừa làm tăng đáng kể cường độ kháng uốn của hỗn hợp đất gia cố sau 28 ngày bảo dưỡng (tăng 10 lần so với đất tự nhiên). Nghiên cứu cũng cho thấy tro trấu và xơ dừa có thể dùng để cải tạo đất phục vụ các công trình như đê đập, lớp áo đường. Ngoài ra, tro trấu và xơ dừa cũng làm giảm độ giòn của hỗn hợp đất gia cố bằng vôi.

c. Đất tàn tích

Việc sử dụng tro trấu kết hợp với vôi, xi măng để cải tạo đất tàn tích đã được một số tác giả quan tâm nghiên cứu (Ali, 1992; Ali và nnk., 1992; Basha và nnk., 2005; Rahman và nnk., 2014). Theo các nghiên cứu này, bản thân tro trấu có thể làm giảm tính dẻo, giảm giá trị MDD, tăng giá trị OMC của đất (Rahman và nnk., 2014). Ngoài ra, khi kết hợp với vôi/xi măng còn làm tăng cường độ kháng nén 1 trục UCS và tăng độ bền (Ali 1992; Ali và nnk., 1992).

d. Đất sét yếu

Đất sét yếu cũng là loại đất cần phải cải tạo trước khi sử dụng làm vật liệu đất xây dựng (Anwar Hossain, 2011; Barwar và nnk., 2022; Wibowo và nnk., 2023). Điển hình, Barwar và nnk. (2022) sử dụng tro trấu kết hợp với xi măng để cải tạo đất sét yếu ở Ấn Độ. Kết quả nghiên cứu cho thấy tro trấu giúp tăng cường độ và độ bền của hỗn hợp đất xi măng. Không chỉ tăng cường độ và độ bền, tro trấu có thể giúp làm giảm ít nhất 1% xi măng. Nghiên cứu của Wibowo và nnk. (2023) khi sử dụng tro trấu kết hợp với xi măng để cải tạo đất sét yếu (A-7-5) cho thấy tro trấu có thể giúp nâng

cao cường độ và sức chịu tải của đất khi sử dụng làm vật liệu đắp vỉa hè.

e. Một số loại đất khác

Rahgozar và nnk. (2018) nghiên cứu sử dụng tro trấu kết hợp với xi măng để cải tạo đất cát pha (A-2-6) ở vùng Sejzi, Iran. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi tăng hàm lượng tro trấu sẽ làm tăng độ ẩm tối ưu, giảm khối lượng thể tích khô lớn nhất. Ngoài ra, ở 28 ngày tuổi, giá trị UCS và CBR đạt giá trị lớn nhất với 6% tro trấu và 8% xi măng (UCS và CBR của mẫu cải tạo tăng lần lượt 25,44 và 18,2 lần so với mẫu đất chưa cải tạo).

Talib và nnk. (2023) cải tạo đất bùn Bahu Pahat ở Malaysia bằng hỗn hợp xi măng và tro trấu. Tro trấu được sử dụng để thay thế một phần xi măng, với hàm lượng thay thế từ 5% đến 20%. Kết quả thí nghiệm xác định cường độ UCS cho thấy, giá trị cường độ UCS lớn nhất khi xi măng được thay thế bằng 5% tro trấu. Khi tỷ lệ tro trấu thay thế xi măng lớn hơn 5%, giá trị UCS có xu hướng giảm dần.

Zivari và nnk. (2023) đã sử dụng hỗn hợp vôi và tro trấu để cải tạo đất Hoàng Thổ (đất loess) ở tỉnh Golestan, Iran. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi tăng hàm lượng vôi và tro trấu, độ ẩm tối ưu tăng dần. Trong khi đó, khối lượng thể tích khô, giới hạn dẻo và chỉ số dẻo cũng có xu hướng tăng dần khi hàm lượng vôi và tro trấu tăng đến 5%, khi tăng vượt quá 5%, các chỉ tiêu này giảm dần. Giá trị CBR cũng đạt giá trị lớn nhất khi sử dụng 5% vôi và tro trấu. Vì vậy, hỗn hợp 5% vôi và tro trấu phù hợp để cải tạo đất này.

4.1.2. Cải tạo nền đất yếu

Ngoài việc sử dụng tro trấu để cải tạo đất làm vật liệu đắp, tro trấu còn được sử dụng để thay thế một phần xi măng trong cải tạo nền đất yếu bằng phương pháp trộn sâu (Yoobanpot và Jamsawang, 2014; Jongpradist và nnk., 2018; Tesanasin và nnk., 2023). Các nghiên cứu của Yoobanpot và Jamsawang (2014) và Jongpradist và nnk. (2018) cho thấy tro trấu vừa có thể dùng để thay thế một phần xi măng, vừa có thể dùng để nâng cao cường độ của hỗn hợp đất xi măng (tạo ra hỗn hợp đất xi măng có cường độ cao). Tùy vào hàm lượng xi măng, hàm lượng tro trấu trộn thêm để tăng cường độ kháng nén có thể lên đến 35%. Gần đây, Tesanasin và nnk. (2023) đã so sánh và đánh giá hiệu quả của việc sử dụng hỗn hợp xi măng+tro

trấu và xi măng + tro trấu + NaOH trong cải tạo đất sét yếu Bangkok bằng phương pháp trộn sâu đất-xi măng. Trong đó, tỷ lệ xi măng : tro trấu dao động từ 100 : 0÷0 : 100; hàm lượng NaOH là 5% và 10%. Kết quả nén 1 trục ở 28 ngày tuổi cho thấy việc sử dụng 2 hỗn hợp trên đều cho cường độ kháng nén 1 trục của đất gia cố lớn hơn 1000 kPa và đáp ứng yêu cầu phương pháp trộn sâu đất-xi măng của Ủy ban đường cao tốc Thái Lan (DOH).

Các nghiên cứu trên thế giới cho thấy tro trấu có thể dùng để cải tạo một số tính chất vật lý như giảm tính dẻo, giảm khả năng trương nở của đất. Ngoài ra, nó có thể được sử dụng kết hợp với xi măng, vôi, canxi cacbua, kiềm NaOH,... để nâng cao cường độ của nhiều loại đất khác nhau như đất trương nở, đất tàn tích, đất laterit, đất sét yếu,... Ngoài nâng cao cường độ, tro trấu có thể dùng để thay thế một phần xi măng giúp giảm lượng xi măng sử dụng, giảm giá thành xây dựng công trình.

4.2. Nghiên cứu sử dụng tro rơm rạ trong cải tạo đất

Cũng giống như tro trấu, tro rơm rạ là vật liệu có hoạt tính pozzolan cao. Tuy nhiên, cho đến nay, mới chỉ có một vài nghiên cứu về việc sử dụng tro rơm rạ trong xử lý, cải tạo đất. Điển hình, Anupam và nnk. (2013) nghiên cứu sử dụng phế phẩm nông nghiệp và công nghiệp bao gồm tro trấu, tro rơm rạ, tro bã mía và tro bay để cải tạo đất sét yếu (A-7-6) phục vụ xây dựng đường giao thông. Kết quả nghiên cứu cho thấy, tro rơm rạ cùng với tro trấu, tro bã mía và tro bay đều có tác dụng làm tăng giới hạn co ngót, tăng giá trị OMC và giảm giá trị MDD. Ngoài ra, các loại tro này khi trộn vào đất đều làm tăng chỉ số CBR tới một giới hạn nhất định. Đối với tro rơm rạ, hàm lượng tối ưu để đạt chỉ số CBR lớn nhất là 20%. Tương tự như tro trấu, tro rơm rạ cũng đã được nghiên cứu sử dụng để cải tạo một số tính chất của đất trương nở. Theo Sabat và nnk. (2015) tro trấu có tác dụng cải tạo một số tính chất của đất trương nở như tăng cường độ UCS, tăng chỉ số CBR, giảm áp lực trương nở và hàm lượng tro rơm rạ tối ưu là 20%. Tuy nhiên, với 20% tro rơm rạ thì áp lực trương nở vẫn còn khá lớn (90 kN/m²). Chính vì vậy, việc chỉ sử dụng tro rơm rạ không phù hợp để cải tạo đất trương nở mà cần kết hợp thêm với các chất kết dính khác như vôi, xi măng.

Nhìn chung, các nghiên cứu về sử dụng tro rơm rạ trong xử lý, cải tạo đất vẫn còn hạn chế. Tuy nhiên, trong lĩnh vực sản xuất bê tông, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra hiệu quả của việc kết hợp tro rơm rạ với xi măng để nâng cao cường độ của bê tông xi măng (Amin và nnk., 2022; Pandey và Kumar, 2020, 2019; Roselló và nnk., 2017; Wang và nnk., 2021).

5. Tro trấu, tro rơm rạ ở Việt Nam và tiềm năng sử dụng trong cải tạo đất

5.1. Nguồn tro trấu, tro rơm rạ ở Việt Nam

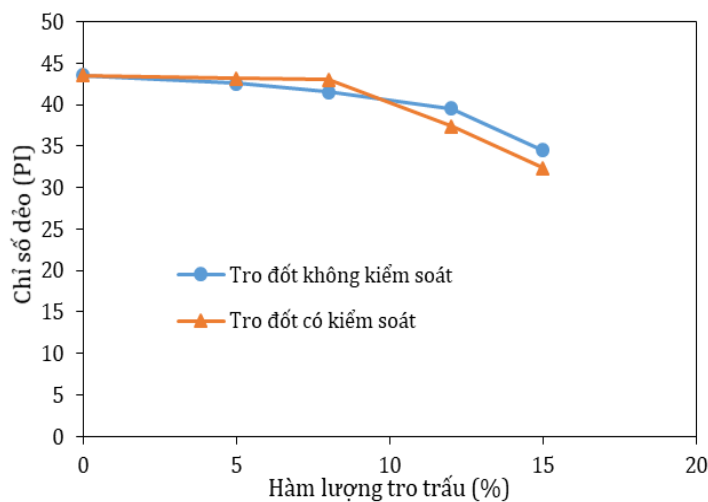
Theo thống kê, sản lượng lúa năm 2023 của Việt Nam là khoảng 43,5 triệu tấn (<http://surl.li/pgnbz>). Với lượng lúa gạo này sẽ tạo ra từ 44 triệu đến 65 triệu tấn rơm rạ mỗi năm. Hiện nay, chỉ mới 20% rơm rạ ở Việt Nam được sử dụng làm thức ăn cho gia súc, trồng nấm, dùng làm đệm lót vận chuyển hàng hóa, dùng đun nấu trong gia đình; 80% còn lại chủ yếu là vùi vào đất hoặc đốt trực tiếp ngoài đồng (<https://shorturl.at/fswDZ>). Việc đốt rơm rạ ở ngoài đồng sẽ thải ra một lượng khí thải lớn (CO, CO₂, NO₂, SO₂); lượng tro sau khi đốt nếu không được thu gom sẽ phát tán trong không khí làm ô nhiễm môi trường nước và khí. Lượng tro rơm rạ còn lại sau khi đốt chiếm khoảng 20% khối lượng rơm rạ. Giả sử 80% rơm rạ còn dư thừa được thu gom và đốt sẽ tạo ra từ 7÷10,5 triệu tấn tro rơm rạ.

Ngoài rơm rạ, khi xay xát lúa, hàng năm Việt Nam sẽ tạo ra khoảng 8,7 triệu tấn vỏ trấu. Khác rơm rạ, vỏ trấu không thích hợp làm thức ăn trực tiếp cho gia súc. Ở Việt Nam, vỏ trấu thường được dùng làm chất đốt trong gia đình hoặc trong sản xuất (nung gạch, sấy hoa quả, sấy hải sản, hấp cọc bê tông ly tâm,...); một phần được sử dụng làm phân bón hữu cơ để cải tạo đất và một phần được đổ bỏ ra môi trường. Nếu toàn bộ lượng vỏ trấu được sử dụng làm chất đốt sẽ tạo ra khoảng 1,7 triệu tấn tro trấu mỗi năm. Như vậy, có thể thấy, lượng tro rơm rạ và tro trấu ở Việt Nam rất dồi dào và có giá thành rẻ. Tuy nhiên, tro rơm rạ và tro trấu sau khi đốt thường được đổ bỏ ra môi trường, một phần được sử dụng để cải tạo đất và phần nhỏ được sử dụng trong lĩnh vực hóa chất.

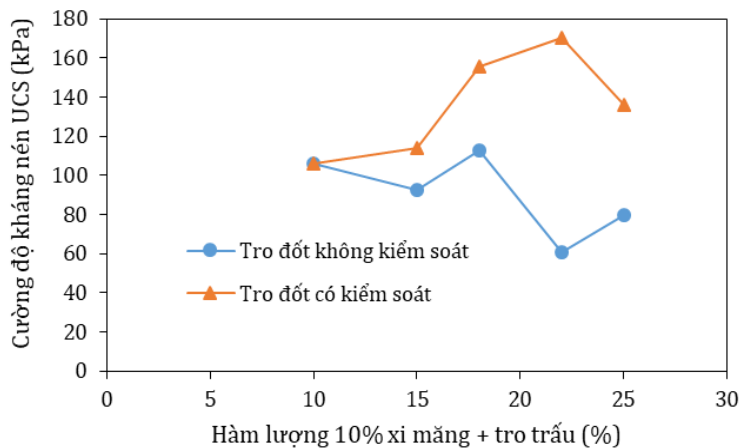
5.2. Tiềm năng sử dụng tro trấu, tro rơm rạ trong cải tạo đất ở Việt Nam

Cho đến nay, ở Việt Nam, đã có một số nghiên cứu về việc sử dụng tro trấu kết hợp với vôi hoặc xi măng để cải tạo đất (Nguyễn và Đỗ, 2008; Phạm và Tran, 2020; Duong, 2022a, 2022b; Phan và nnk., 2023). Điển hình, kết quả nghiên cứu Duong (2022a) cũng cho thấy tro trấu thu được từ đốt vỏ trấu trong điều kiện có kiểm soát nhiệt độ và thời gian (tro trấu đốt có kiểm soát) có chứa hàm lượng oxit silic cao hơn so với tro trấu thu được từ đốt vỏ trấu tự do ngoài không khí (tro trấu đốt không kiểm soát). Xét về khả năng cải tạo các tính chất vật lý của đất, khi trộn vào đất, cả 2 loại tro trấu đều làm giảm độ ẩm, giảm khối lượng riêng của đất và có thể dùng để cải tạo đất về mặt tính dẻo (Duong, 2022a) (Hình 5). Kết quả phân tích cũng cho thấy, loại tro trấu ảnh hưởng không đáng kể đến sự giảm độ ẩm và tính dẻo của đất. Về mặt cường độ, tro trấu có thể làm tăng đáng kể cường độ kháng nén của hỗn hợp đất xi măng, đặc biệt là

với tro trấu đốt có kiểm soát. Với 12% hàm lượng tro trấu có kiểm soát có thể làm tăng cường độ kháng nén của hỗn hợp đất +10% xi măng đến hơn 50% (Duong, 2022b) (Hình 6). Điều này chứng tỏ, tro trấu đốt tự do có hàm lượng oxit silic thấp, lượng mất khi nung cao nên ít có tiềm năng sử dụng kết hợp với xi măng trong cải tạo đất về mặt cường độ. Ngoài việc nâng cao cường độ, kết quả nghiên cứu của Duong và nnk. (2022) cho thấy tro trấu đốt có kiểm soát có thể được sử dụng để thay thế 1 phần xi măng trong cải tạo nền đất yếu bằng phương pháp trộn sâu đất xi măng. Kết quả nghiên cứu cho thấy tro trấu đốt có kiểm soát có thể được sử dụng để thay thế từ 10÷20% hàm lượng xi măng, trong đó hàm lượng thay thế tối ưu là 20% hàm lượng xi măng. Theo đó, với 20% tro trấu thay thế xi măng, cường độ kháng nén của hỗn hợp đất có thể tăng khoảng 19,8% (Hình 7).



Hình 5. Ảnh hưởng của hàm lượng tro trấu đến chỉ số dẻo của đất (Duong, 2022a).



Hình 6. Ảnh hưởng của hàm lượng tro trấu đến cường độ kháng nén (Duong, 2022b).

Gần đây, Phan và nnk. (2023) đã nghiên cứu sử dụng hỗn hợp tro trấu và xi măng để cải tạo đất sét yếu ở tỉnh Vĩnh Long làm vật liệu đắp đường. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi hàm lượng tro trấu tăng sẽ dẫn đến giảm giá trị MDD và tăng giá trị OMC. Ngoài ra, khi tăng hàm lượng tro trấu sẽ làm tăng một số chỉ tiêu cơ học như cường độ kháng nén 1 trục, cường độ kháng kéo và mô đun đàn hồi. Tổ hợp 80% đất +20% tro trấu +6% xi măng được coi là tối ưu khi cho giá trị cường độ kháng nén cao nhất (Hình 8) và thỏa mãn điều kiện độ bền cấp III của vật liệu gia cố trong xây dựng đường giao thông (TCVN 10379-2014).

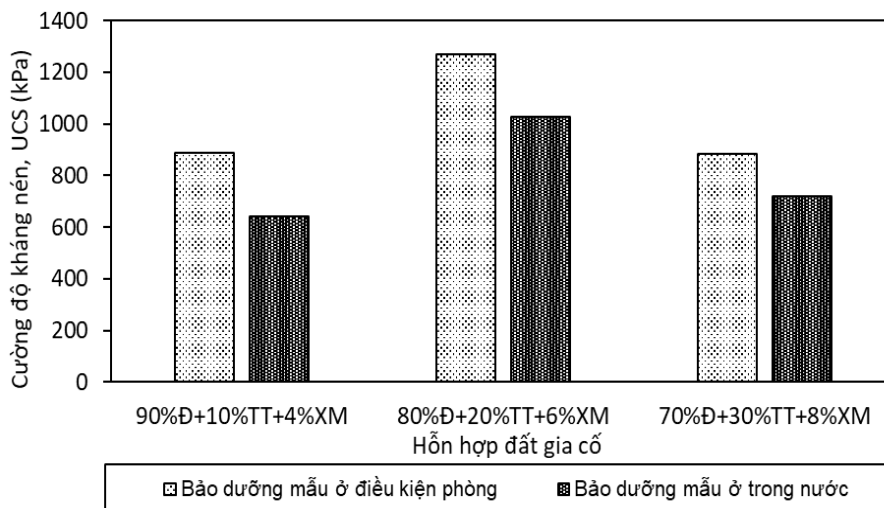
Ngoài kết hợp với vôi, xi măng, tro trấu có thể dùng làm chất hoạt hóa kiềm geopolymer. Theo đó, Nguyen và nnk. (2017) đã nghiên cứu sử dụng tro trấu làm chất kết dính kiềm hoạt hóa geopolymer để cải tạo đất sét yếu vùng đồng bằng

sông Cửu Long. Kết quả nghiên cứu đã cho thấy cường độ kháng nén của hỗn hợp đất gia cố bằng tro trấu và dung dịch kiềm tăng đáng kể (Hình 9). Điều này chứng tỏ tro trấu có thể sử dụng làm chất kết dính hoạt hóa geopolymer trong cải tạo đất.

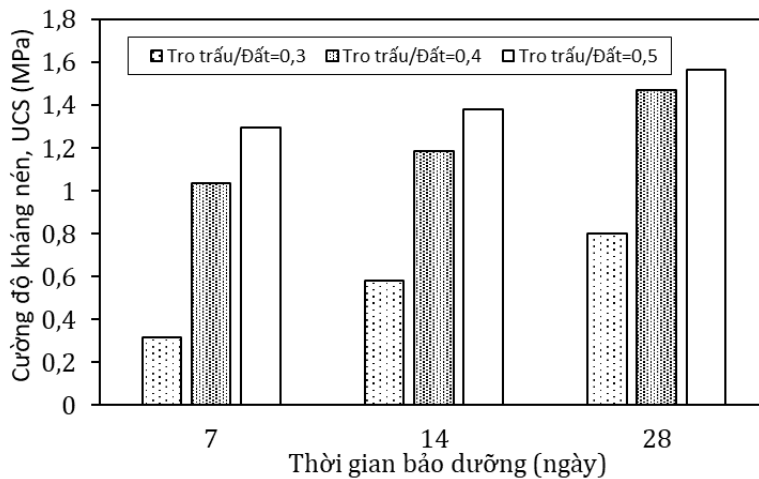
Việt Nam phân bố nhiều loại đất có tính chất đặc biệt như đất sét yếu, đất nhiễm muối, nhiễm phèn ở khu vực đồng bằng sông Hồng và sông Cửu Long (Nụ, 2014; Phuc và Giao, 2020; Vũ, 2018), đất laterit, đất trương nở, đất đỏ bazan ở khu vực Tây Nguyên (Bùi, 2020, Nguyễn, 2021). Đặc biệt, theo Nụ (2014) và Vũ (2018), đất yếu ở khu vực đồng bằng sông Cửu Long có diện phân bố rộng, nằm ngay gần mặt đất với nhiều loại khác nhau từ sét chảy, dẻo chảy đến các loại đất bùn sét. Chúng có chiều dày lớn từ vài mét đến hàng chục mét. Ngoài ra, nhiều khu vực đất bị nhiễm muối, nhiễm phèn, chứa nhiều hữu cơ. Các loại đất này thường



Hình 7. Ảnh hưởng của tro trấu thay thế một phần xi măng đến cường độ kháng nén (Dương và nnk., 2022).



Hình 8. Cường độ kháng nén của đất gia cố xi măng và tro trấu ở 28 ngày tuổi (Phan và nnk., 2023).



Hình 9. Cường độ kháng nén với hàm lượng tro trấu khác nhau và tỷ số dung dịch kiềm/(đất+tro trấu) = 0,4 (Nguyễn và nnk., 2017).

không phù hợp để sử dụng trực tiếp làm nền hoặc làm vật liệu đất xây dựng. Hiện nay, các công trình xây dựng ngày càng nhiều, đặc biệt là các tuyến đường giao thông trọng điểm như tuyến đường cao tốc Bắc Nam, các tuyến đường cao tốc kết nối vùng đồng bằng Sông Cửu Long. Do đó, nhu cầu về cải tạo nền đất yếu cũng như nhu cầu về vật liệu đất đắp là rất lớn. Trong đó, việc sử dụng xỉ măng, vôi trong cải tạo, xử lý nền hoặc cải tạo đất làm vật liệu đất đắp rất phổ biến. Các nghiên cứu trên thế giới cũng như ở Việt Nam đã cho thấy tro trấu không chỉ có hiệu quả trong việc nâng cao cường độ của đất mà còn có thể giúp giảm lượng xỉ măng sử dụng. Đối với tro rơm rạ, cho đến nay chưa có nghiên cứu về việc sử dụng tro rơm rạ trong xử lý, cải tạo đất phục vụ xây dựng ở Việt Nam. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu của Nguyễn và Tống (2023) cho thấy tro rơm rạ có thể làm phụ gia khoáng cho bê tông xỉ măng. Chính vì vậy, cùng với tro trấu, tro rơm rạ cũng có tiềm năng lớn để kết hợp với xỉ măng hoặc vôi trong cải tạo đất ở Việt Nam.

6. Kết luận

Từ quá trình nghiên cứu, phân tích và tổng hợp tài liệu rút ra một số kết luận sau:

1. Tro trấu và tro rơm rạ đều là những vật liệu có hoạt tính pozzolan cao do có chứa hàm lượng SiO₂ vô định hình cao. Trong đó, hàm lượng SiO₂ trong tro trấu dao động từ khoảng 70% đến hơn 90% và trong tro rơm rạ từ khoảng 60% đến hơn 80%.

2. Tro trấu và tro rơm rạ có thể dùng kết hợp với vôi/xi măng để cải tạo nhiều loại đất khác nhau như đất trương nở, đất laterit, đất tàn tích, đất sét yếu và một số loại đất khác như đất bùn, đất loess.

3. Tro trấu và tro rơm rạ không chỉ cải tạo đất về một số tính chất vật lý như giảm tính dẻo, giảm khả năng và áp lực trương nở mà còn giúp nâng cao cường độ kháng nén, chỉ số CBR của đất khi sử dụng kết hợp với vôi, xỉ măng. Ngoài nâng cao cường độ, tro trấu và tro rơm rạ có thể làm giảm lượng xỉ măng sử dụng trong cải tạo đất. Một số nghiên cứu cũng đã chỉ ra tro trấu có thể sử dụng làm chất kết dính kiềm hoạt hóa geopolymers trong cải tạo đất. Tuy nhiên, việc sử dụng tro trấu, tro rơm rạ trong cải tạo đất để làm vật liệu đắp đê đập cần chú ý vì chúng làm tăng độ ẩm tối ưu (OMC) nhưng lại làm giảm dung trọng khô lớn nhất (MDD).

4. Việt Nam có lượng tro trấu và tro rơm rạ rất dồi dào, lên đến hàng triệu tấn/năm. Việt Nam cũng phân bố nhiều loại đất có thành phần, tính chất đặc biệt và nhu cầu cải tạo đất phục vụ xây dựng ngày càng cao. Trong đó, cải tạo đất bằng xỉ măng là một trong những phương pháp phổ biến nhất. Chính vì vậy, tro trấu và tro rơm rạ có tiềm năng lớn để sử dụng kết hợp với xỉ măng trong cải tạo đất. Khi tận dụng được nguồn tro trấu, tro rơm rạ không chỉ giúp nâng cao chất lượng công trình, giảm lượng xỉ măng sử dụng, giảm giá thành xây dựng mà còn giảm lượng phế thải này và bảo vệ môi trường.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo theo đề tài mã số: B2024-MDA-7.

Đóng góp của tác giả

Nguyễn Thành Dương - phương pháp luận, viết bản thảo bài báo, đánh giá và chỉnh sửa; Phạm Thị Ngọc Hà - thu thập tài liệu, phân tích dữ liệu; Tạ Thị Toán- viết bản thảo bài báo, chỉnh sửa; Võ Thị Công Chính - thu thập tài liệu, viết bản thảo bài báo.

7. Tài liệu tham khảo

Ali, F. H. (1992). Stabilization of a residual soil. *Soils and Foundations* 32, 178-185.

Ali, F. H., Adnan, A., Choy, C. K. (1992). Use of rice husk ash to enhance lime treatment of soil. *Canadian Geotechnical Journal* 29, 843-852.

Amin, M., Tayeh, B. A., Kandil, M. A., Agwa, I. S., Abdelmagied, M. F. (2022). Effect of rice straw ash and palm leaf ash on the properties of ultrahigh-performance concrete. *Case Studies in Construction Materials* 17, e01266.

Anburuvel, A., Sathiparan, N., Dhananjaya, G. M. A., Anuruththan, A. (2023). Characteristic evaluation of geopolymer based lateritic soil stabilization enriched with eggshell ash and rice husk ash for road construction: An experimental investigation. *Construction and Building Materials* 387, 131659.

Anupam, A. K., Kumar, P., Ransinchung, G. D. (2013). Use of various agricultural and industrial waste materials in road construction. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 104, 264-273.

Anwar Hossain, K. M. (2011). Stabilized soils incorporating combinations of rice husk ash and cement kiln dust. *Journal of Materials in Civil Engineering* 23, 1320-1327.

Attah, I. C., Etim, R. K., Usanga, I. N. (2021). Potentials of cement kiln dust and rice husk ash blend on strength of tropical soil for sustainable road construction material. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 012072.

Barwar, A., Chandrappa, A. K., Sahoo, Umesh.C. (2022). Laboratory investigations on stabilization of weak clay soil using rice husk ash and cement. *Innov. Infrastruct. Solut.* 7, 327.

Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., Muntohar, A. S. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and Building Materials* 19, 448-453.

Behak, L. (2017). Soil Stabilization with Rice Husk Ash. *Chapter 3 in Rice-Technology and Production*.

Bùi, V. Đ. (2020). Nghiên cứu sử dụng một số chất thải rắn công nghiệp (bột đá công nghiệp, bột thủy tinh nghiền, bột nghiền từ gạch men và gốm sứ) làm chất kết dính kèm hoạt hóa geopolymer để gia cường đất lateritic phục vụ xây dựng công trình. Đề tài KH-CN cấp Bộ

Brooks, R. M. (2009). Soil stabilization with fly ash and rice husk ash. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences* 1, 209-217.

Chen, R., Congress, S. S. C., Cai, G., Duan, W., Liu, S. (2021). Sustainable utilization of biomass waste-rice husk ash as a new solidified material of soil in geotechnical engineering: A review. *Construction and Building Materials* 292, 123219.

Chenpei (2014). Effect of rice husk pretreatment on rice husk ash. *Doctoral thesis at Harbin Industrial University*.

Domphoeun, R., Eisazadeh, A. (2024). Flexural and Shear Strength Properties of Laterite Soil Stabilized with Rice Husk Ash, Coir Fiber, and Lime. *Transp. Infrastruct. Geotech.*

Duong, N. T. (2022a). Effect of rice husk ash on physical properties of soft soil. *International Journal of Environment and Waste Management* 30, 191.202.

Duong, N. T. (2022b). Effect of rice husk ash on unconfined compressive strength of soil-cement admixture. *Suranaree Journal of Science & Technology* 29, 1-9.

Duong, N. T., Nguyen, N. T., Pham, H. N. T., Phung, H. H., Van Nguyen, H. (2020). Rice husk ash and its utilization in soil improvement: An

- overview. *Journal of Mining and Earth Sciences* 61, 1-11.
- Duong, N. T., Son, B. T., Nu, N. T. (2022). Possibility of replacing cement with rice husk ash in soft soil improvement using soil-cement column. *Hội nghị toàn quốc khoa học trái đất and tài nguyên với phát triển bền vững (ERSD 2022)* 133-139.
- El-Sayed, M. A., El-Samni, T. M. (2006). Physical and chemical properties of rice straw ash and its effect on the cement paste produced from different cement types. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* 19, 21-29.
- Gidebo, F. A., Yasuhara, H., Kinoshita, N. (2023). Stabilization of expansive soil with agricultural waste additives: a review. *Geo-Engineering* 14, 14.
- Hidalgo, S., Soriano, L., Monzó, J., Payá, J., Font, A., Borrachero, M. V. (2021). Evaluation of rice straw ash as a pozzolan addition in cementitious mixtures. *Applied Sciences* 11, 773.
- <http://surl.li/pgnbz> (ngày truy cập: 14/1/2023).
- <https://shorturl.at/fswDZ> (ngày truy cập: 14/1/2023).
- Jeng, S. L., Zainuddin, A. M., Sharifah, R. W. A., Haslenda, H. (2012). A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renew Sust Energ Rev* 16:3084-3094
- Jiang, X., Huang, Z., Ma, F., Luo, X. (2019). Analysis of strength development and soil-water characteristics of rice husk ash-lime stabilized soft soil. *Materials* 12, 3873.
- Jongpradist, P., Homtragoon, W., Sukkarak, R., Kongkitkul, W., Jamsawang, P. (2018). Efficiency of rice husk ash as cementitious material in high-strength cement-admixed clay. *Advances in Civil Engineering* 2018.
- Kang, S. H., Hong, S. G., Moon, J. (2019). The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research* 115, 389-400.
- Karatai, T. R., Kaluli, J. W., Kabubo, C., Thiong'o, G. (2016). Soil stabilization using rice husk ash and natural lime as an alternative to cutting and filling in road construction. *Journal of Construction Engineering and Management* 143, 04016127.
- Kumar, S., Singh, R. P., Paswan, S. K. (2022). Strength and Impact of Rice Husk Ash on Expansive Soil by Using Soil Stabilization. *Advances in Geo-Science and Geo-Structures, Lecture Notes in Civil Engineering. Springer Singapore, Singapore*, 73-80.
- Liu, Y., Chang, C. W., Namdar, A., She, Y., Lin, C. H., Yuan, X., Yang, Q. (2019). Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue. *Construction and Building Materials* 221, 1-11.
- Liu, Z., Xu, A., Long, B. (2011). Energy from combustion of rice straw: status and challenges to China. *Energy and Power Engineering* 3, 325.
- Mareeswaran, M., Suryaprakash, T., Srinivas, N. T., Rathnavelu, P. (2023). An investigation on agricultural wastes as soil stabilizers. *Materials Today: Proceedings*.
- Medina, C. L., Bosque, I., Frias, M. (2018). Design and characteristics of ternary cements containing rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials* 187, 65-76
- Muntohar, A. S., Widiati, A., Hartono, E., Diana, W. (2013). Engineering Properties of Silty Soil Stabilized with Lime and Rice Husk Ash and Reinforced with Waste Plastic Fiber. *J. Mater. Civ. Eng.* 25, 1260-1270.
- Nasiri, M., Lotfalian, M., Modarres, A., Wu, W. (2016). Optimum utilization of rice husk ash for stabilization of sub-base materials in construction and repair project of forest roads. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 37, 333-343.
- Nguyễn H. N. (2021). Nghiên cứu cải tạo đất Bazan bằng hỗn hợp Puzolan - xi măng - vôi làm tường nghiêng chống thấm đập đất vùng Tây Nguyên. *Luận án Tiến sĩ kỹ thuật*.
- Nguyễn T. T., Đỗ M. T. (2008). Vai trò của phụ gia tro trấu trong cải tạo đất sét pha am Q_2^{2-3} phân bố ở Cần Thơ bằng chất kết dính vô cơ. Tuyển

- tập báo cáo HNKH lần thứ 18, trường Đại học Mỏ-Địa chất, Quyển 2, 88-94.
- Nguyễn T. T., Tống T. K. (2023). Nghiên cứu khảo sát khả năng xử lý phế thải rơm rạ làm phụ gia khoáng cho xi măng. *Tạp chí xây dựng* 02.2023, 66-72.
- Nguyen, T. N., Le, A. T., Nguyen, M. T. (2017). Factors influencing strength development in soft soil clay mixed rice husk ash based geopolymer. *Advanced Experimental Mechanics* 2, 153-158.
- Nụ, N. T. (2014). Nghiên cứu đặc tính địa chất công trình của đất loại sét yếu amQ_2^{2-3} phân bố ở các tỉnh ven biển đồng bằng sông Cửu Long phục vụ xử lý nền đường. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Mỏ - Địa chất.
- Okonkwo, U. N., Ekeoma, E. C., Ndem, H. E. (2023). Exponential Logarithmic Models for Strength Properties of Lateritic Soil Treated with Cement and Rice Husk Ash as Pavement of Low-Cost Roads. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 16, 333-342.
- Ouyang, D. (2003). Microstructure and chemical activity of rice husk ash burned at low temperature. *Journal of the Chinese Ceramic Society* 31, 1121-1124.
- Pandey, A., Kumar, B., (2020). A comprehensive investigation on application of microsilica and rice straw ash in rigid pavement. *Construction and Building Materials* 252, 119053
- Pandey, A., Kumar, B. (2019). Effects of rice straw ash and micro silica on mechanical properties of pavement quality concrete. *Journal of Building Engineering* 26, 100889
- Pham, V. P., Tran, V. T. (2020). Rice Husk Ash Burnt in Simple Conditions for Soil Stabilization, in: *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*. Springer, pp. 717-721.
- Phan, V. T. A., Nguyen, V. L., Tran, H. B., Le, V. B. (2023). Potential Usage of Rice Husk Ash-Cement Based Soil in Subbase and Base Courses in Road Construction. *International Journal of Integrated Engineering* 15, 299-309.
- Phuc, T. T., Giao, P. H. (2020). Geotechnical Properties of Hai Phong and Ninh Binh Clays in the Red River Delta. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*. Springer, 751-758.
- Pushpakumara, B. H. J., Mendis, W. S. W. (2022). Suitability of Rice Husk Ash (RHA) with lime as a soil stabilizer in geotechnical applications. *Geo-Engineering* 13, 4.
- Rahgozar, M. A., Saberian, M., Li, J. (2018). Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study. *Transportation Geotechnics* 14, 52-60.
- Rahman, M. A. (1987). Effects of cement-rice husk ash mixtures on geotechnical properties of lateritic soils. *Soils and Foundations* 27, 61-65.
- Rahman, Z. A., Ashari, H. A., Sahibin, A. R., Tukimat, L., Razi, I. W. M. (2014). Effect of rice husk ash addition on geotechnical characteristics of treated residual soil. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 14 (12), 1368-1377.
- Reis, J. B., Pelisser, G., Levandoski, W. M. K., Ferrazzo, S. T., Mota, J. D., Silveira, A. A., Korf, E. P. (2022). Experimental investigation of binder based on rice husk ash and eggshell lime on soil stabilization under acidic attack. *Scientific Reports* 12, 7542.
- Roselló, J., Soriano, L., Santamarina, M. P., Akasaki, J. L., Monzó, J., Payá, J. (2017). Rice straw ash: A potential pozzolan supplementary material for cementing systems. *Industrial Crops and Products* 103, 39-50.
- Sabat, A. K., Mohanta, S., Swain, S. (2015). Effect of moulding water content on geotechnical properties of rice straw ash stabilized expansive soil. *ARPJ. Eng. Appl. Sci* 10, 10427-10432.
- Sani, J. E., Yohanna, P., Chukwujama, I. A. (2020). Effect of rice husk ash admixed with treated sisal fibre on properties of lateritic soil as a road construction material. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* 32, 11-18.
- Sharma, R. S., Phanikumar, B. R., Rao, B. V. (2008). Engineering behavior of a remolded expansive clay blended with lime, calcium chloride, and rice-husk ash. *Journal of Materials in Civil Engineering* 20, 509-515.

- Singh, B. (2018). Rice husk ash, in: Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, 417-460.
- Singh, G., Kumar, R., Sharma, A. (2023). Strength improvement of local clayey soil using rice husk ash and polypropylene fiber. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing.
- Singhai, A. K., Singh, S. S. (2014). Laboratory study on soil stabilization using fly ash and rice husk ash. *International Journal of Research in Engineering and Technology* 2319-1163.
- Sukkarak, R., Thangjaroensuk, B., Jongpradist, P. (2022). Evaluation of fly ash and rice husk ash on the unconfined compressive strength of the compacted cement treated lateritic soil. *Suranaree Journal of Science & Technology* 29.
- Talib, M. A., Zainorabidin, A., Pakir, F., Yusof, Z. M., Basri, K., Salikin, A. (2023). Stabilization of Batu Pahat peat by using rice husk ash (RHA). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, p. 012041.
- TCVN 10379:2014. Gia cố đất bằng chất kết dính vô cơ, hóa chất hoặc gia cố tổng hợp, sử dụng trong xây dựng đường bộ: Thi công và nghiệm thu.
- Tesanasin, T., Suksiripattanapong, C., Kuasakul, T., Thongkhwan, T., Tabyang, W., Thumrongvut, J., Keawsawasvong, S. (2023). Comparison Between Cement-Rice Husk Ash and Cement-Rice Husk Ash One-Part Geopolymer for Stabilized Soft Clay as Deep Mixing Material. *Transp. Infrastruct. Geotech.*
- Van Hung, N., Maguyon-Detras, M. C., Migo, M. V., Quilloy, R., Balingbing, C., Chivenge, P., Gummert, M. (2020). Rice straw overview: availability, properties, and management practices. *Sustainable Rice Straw Management* 1-13.
- Vũ, N. B. (2018). Nghiên cứu ảnh hưởng đặc tính xây dựng của đất loại sét yếu vùng đồng bằng sông Cửu Long đến chất lượng gia cố nền bằng xi măng kết hợp với phụ gia trong xây dựng công trình. Luận án Tiến sỹ kỹ thuật.
- Wang, S., Song, X., Wei, M., Liu, W., Wang, X., Ke, Y., Tao, T. (2021). Strength characteristics and microstructure evolution of cemented tailings backfill with rice straw ash as an alternative binder. *Construction and Building Materials* 297, 123780.
- Wibowo, D. E., Ramadhan, D. A., Prayuda, H. (2023). Soil stabilization using rice husk ash and cement for pavement subgrade materials. *Revista de la construcción* 22, 192-202.
- Yoobanpot, N., Jamsawang, P. (2014). Effect of cement replacement by rice husk ash on soft soil stabilization. *Kasetsart Journal-Natural Science* 48, 323-332.
- Zivari, A., Siavoshnia, M., Rezaei, H. (2023). Effect of lime-rice husk ash on geotechnical properties of loess soil in Golestan province, Iran. *Geo-Engineering* 14, 20.