

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT
KHOA KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT ĐỊA CHẤT
BỘ MÔN ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH

BÁO CÁO HỌC THUẬT

ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CỦA XỈ LÒ CAO NGHIÊN MỊN S95
TRONG CẢI TẠO ĐẤT Bùn THẢI LÀM VẬT LIỆU SAN LẤP VÀ
ĐÁP NỀN

Người thực hiện: TS Bùi Văn Bình
Bộ môn Địa chất công trình

HÀ NỘI - 2025

Mục lục

MỞ ĐẦU	2
2. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU	3
2.1. Tổng quan về vật liệu bùn nạo vét.....	3
2.2. Tổng quan về xi lò cao nghiên mìn S95	5
2.3. Các nghiên cứu trong và ngoài nước về ứng dụng xi lò cao trong gia cố đất yếu.	7
2.3. Các nghiên cứu trong nước.....	7
2.4. Các nghiên cứu trên Thế Giới	10
3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT	12
3.1. Cơ chế cải tạo đất bằng vật liệu hoạt tính xi lò cao.....	12
3.2. Ảnh hưởng của xi lò cao S95 đến các tính chất của đất.....	14
4. ÁP DỤNG XI LÒ CAO TRONG CẢI TẠO BÙN NẠO VÉT.....	16
4.1. Đặc điểm địa kỹ thuật của bùn nạo vét.....	16
4.2. Đặc điểm của xi lò cao nghiên mìn S95	1
4.3. Thiết kế cấp phối thí nghiệm	3
5. PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ	7
5.1 Cường độ kháng nén (q_u) của mẫu 7 ngày tuổi	7
5.2. Cường độ kháng nén (q_u) của mẫu 14 ngày tuổi	10
5.3. Cường độ kháng nén (q_u) của mẫu 28 ngày tuổi	13
6. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	16
6.1. Kết luận.....	16
6.2. Kiến nghị	17

MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh đô thị hóa và phát triển hạ tầng diễn ra mạnh mẽ tại Việt Nam trong những năm gần đây, nhu cầu về vật liệu đất đắp và đất san lấp cho các công trình giao thông, khu công nghiệp, khu đô thị và các dự án thủy lợi ngày càng gia tăng nhanh chóng. Đất đắp, đất san lấp là loại vật liệu có khối lượng sử dụng rất lớn, quyết định trực tiếp đến tiến độ, chi phí và độ ổn định lâu dài của công trình. Tuy nhiên, nguồn đất tự nhiên đạt yêu cầu kỹ thuật ngày càng khan hiếm do việc khai thác đất đồi, đất sét bị siết chặt nhằm bảo vệ tài nguyên và môi trường. Thực tế này dẫn đến tình trạng thiếu hụt vật liệu đất đắp, chi phí vận chuyển tăng cao, đồng thời gây ra nhiều hệ lụy về sạt lở, suy thoái môi trường tại các khu vực khai thác đất truyền thống.

Song song với sự thiếu hụt đất đắp là khối lượng rất lớn bùn nạo vét phát sinh hằng năm từ các hoạt động nạo vét luồng lạch, sông ngòi, hồ chứa, cảng biển, cũng như bùn thải từ các khu công nghiệp và hệ thống thoát nước đô thị. Phần lớn lượng bùn này có đặc trưng là hàm lượng nước cao, cấu trúc rời rạc, cường độ thấp và tính nén lún lớn, nên không thể sử dụng trực tiếp làm vật liệu san lấp theo các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành. Do đó, bùn nạo vét thường được xem là chất thải, phải vận chuyển đi đổ bỏ, vừa tốn kém chi phí xử lý, vừa tiềm ẩn nguy cơ ô nhiễm môi trường đất, nước và không khí nếu không được quản lý phù hợp.

Trước thực trạng đó, việc nghiên cứu tái chế và cải tạo bùn nạo vét bằng các loại phụ gia để biến chúng thành vật liệu đất đắp và đất san lấp là một hướng tiếp cận có ý nghĩa khoa học và thực tiễn rất lớn. Các phụ gia như vôi, xi măng, tro bay, xỉ lò cao nghiền mịn... có khả năng cải thiện đáng kể các chỉ tiêu cơ lý của đất bùn thông qua các phản ứng hóa học và cơ học, làm giảm độ ẩm, giảm tính dẻo, tăng cường độ chịu lực và ổn định thể tích của vật liệu sau xử lý. Đặc biệt, việc sử dụng các phụ gia có nguồn gốc từ phế thải công nghiệp không chỉ góp phần nâng cao chất lượng vật liệu san lấp mà còn phù hợp với định hướng phát triển bền vững, kinh tế tuần hoàn và giảm phát thải khí nhà kính trong ngành xây dựng.

Trong bối cảnh Việt Nam đang thiếu hụt nghiêm trọng nguồn đất đắp đạt chuẩn, đồng thời phải đối mặt với bài toán xử lý khối lượng lớn bùn nạo vét, các nghiên cứu đánh giá hiệu quả của việc cải tạo bùn bằng phụ gia là hết sức cần thiết. Kết quả nghiên cứu không chỉ cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn giải pháp kỹ thuật hợp lý mà

còn mở ra khả năng tận dụng nguồn vật liệu sẵn có, giảm chi phí xây dựng, giảm áp lực khai thác tài nguyên thiên nhiên và hạn chế tác động tiêu cực đến môi trường. Vì vậy, nghiên cứu tái chế bùn nạo vét làm đất đắp và đất san lấp có ý nghĩa quan trọng trong việc giải quyết đồng thời các vấn đề kỹ thuật, kinh tế và môi trường, góp phần thúc đẩy sự phát triển bền vững của ngành xây dựng và hạ tầng tại Việt Nam.

2. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

2.1. Tổng quan về vật liệu bùn nạo vét

Bùn nạo vét là sản phẩm phụ của quá trình bảo trì kênh rạch, sông hồ, tuyến luồng hàng hải và cảng biển, bao gồm trầm tích tự nhiên tích tụ theo thời gian và các hạt bùn thải do hoạt động sinh hoạt – sản xuất. Bùn thải này thường có hàm lượng nước cao, cấu trúc rời rạc, độ chắc thấp và có thể chứa các chất gây ô nhiễm (như kim loại nặng, chất hữu cơ), nên không thể sử dụng trực tiếp làm vật liệu san lấp hoặc đắp nền theo quy định kỹ thuật mà phải qua xử lý hoặc tái chế trước khi sử dụng.

Theo số liệu tổng hợp từ các hệ thống cảng biển lớn, toàn bộ hệ thống cảng biển Việt Nam mỗi năm phải nạo vét khoảng 75 triệu m³ vật chất trầm tích để duy trì độ sâu luồng tàu, trong đó bao gồm bùn, cát và đất phù sa tích tụ dưới đáy. Phần lớn khối lượng này phải được xử lý hoặc đổ thải sau khi nạo vét.

Vùng Bắc Bộ, đặc biệt là khu vực ven biển phía bắc và Đồng bằng sông Hồng, có hệ thống sông ngòi dày đặc và nhiều cảng biển lớn như Hải Phòng, Quảng Ninh. Đây là khu vực có hoạt động nạo vét thường xuyên và với khối lượng lớn vì trầm tích tích tụ nhanh do đặc điểm thủy văn sông Hồng – Thái Bình. Tại cảng Hải Phòng và các luồng chính dẫn vào, mỗi năm phải nạo vét nhiều triệu m³ bùn, cát để đảm bảo độ sâu thiết kế cho tàu lớn. Một nghiên cứu cho thấy chỉ riêng khu vực cảng và luồng tàu lớn ở Bắc Bộ đã phát sinh khoảng 39 triệu m³ vật chất nạo vét hàng năm.

Ngoài các tuyến luồng biển, các sông sào như sông Đuống, sông Cầu, sông Lô và các kênh rạch đô thị (ví dụ như sông Tô Lịch tại Hà Nội) cũng phải được nạo vét định kỳ do bồi lắng, tạo ra hàng chục tới hàng trăm nghìn m³ bùn mỗi vụ nạo vét. Ví dụ, trong một dự án nạo vét sông Tô Lịch giai đoạn đầu, hơn 47.000 m³ bùn thải đã được hút lên và đưa đi xử lý.

Hiện chính quyền các tỉnh, thành phố khu vực này chủ yếu sử dụng một trong các phương thức sau: Đổ thải ở các bãi tập trung trên đất liền, khi tìm được khu vực phù hợp về thủy văn và môi trường; Đổ thải ra khu vực ngoài khơi hoặc trong vùng biển được cấp phép (như Hải Phòng đã được cấp phép tiếp nhận tổng lượng gần 100 triệu m³ trầm tích ngoài khơi). Xử lý sơ bộ trước khi thải, ví dụ đưa bùn vào bãi lắng để lắng nước, giảm độ ẩm trước khi vận chuyển.

Tuy nhiên, vùng Bắc Bộ cũng gặp nhiều khó khăn: thiếu bãi đổ phù hợp gần khu vực dân cư, chi phí vận chuyển cao và nhiều vướng mắc pháp lý, kỹ thuật trong một số đô thị lớn như Hà Nội

Trung Bộ Việt Nam với các tỉnh ven biển có hệ thống cảng biển quan trọng như Nghi Sơn (Thanh Hóa), Cửa Lò (Nghệ An), Vũng Áng (Hà Tĩnh), Chân Mây (Thừa Thiên – Huế), Quy Nhơn (Bình Định) và Dung Quất (Quảng Ngãi) tạo ra nguồn bùn nạo vét khá lớn mỗi năm để duy trì độ sâu luồng tàu, đặc biệt là trong mùa bão lũ khi trầm tích từ sông đổ ra biển mạnh. Ước tính tổng khối lượng bùn – trầm tích phải nạo vét hàng năm tại các cảng và luồng trọng yếu ở vùng này khoảng 14,7 triệu m³, bao gồm cả phần đất phù sa và cát bùn. Ngoài ra, các hệ thống sông như sông Cả, sông Gianh, sông Thu Bồn... cũng cần được nạo vét định kỳ để hạn chế bồi lắng, đảm bảo thoát lũ và giao thông thủy nội địa.

Vùng Trung Bộ sử dụng thường xuyên hai hình thức chính: Đổ trầm tích ra các bãi đổ thải ven biển hoặc tại khu vực đã được phê duyệt; Xử lý sơ bộ tại bãi lắng, tách nước và sau đó tìm phương án xử lý thích hợp. Các tỉnh ven biển cũng đang nghiên cứu các phương án tái sử dụng trầm tích bùn sau xử lý vào các công trình san lấp mặt bằng gần đó nhằm giảm khối lượng thải. Tuy nhiên, mức độ tái chế vẫn chưa phổ biến do chưa có hệ thống tiêu chuẩn và kỹ thuật sử dụng rộng rãi.

Vùng Nam Bộ và đặc biệt Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) có hệ thống kênh rạch, sông ngòi dày đặc, dùng cho thủy lợi, vận tải nội địa và nuôi trồng thủy sản. Đây là khu vực phát sinh lượng bùn nạo vét khổng lồ mỗi năm do trầm tích tích tụ và nhu cầu duy trì giao thông thủy. Theo một số báo cáo kỹ thuật, cảng biển tại khu vực này (liên quan đến Sài Gòn – Cần Thơ, Soài Rạp...) cần nạo vét hàng triệu m³ bùn lỏng để duy trì độ sâu luồng tàu mỗi năm. Điển hình, luồng vận tải chính như Soài Rạp cũng đòi

mặt với tình trạng “bùn lỏng” cần xử lý kỹ thuật trước khi sử dụng hoặc thải. Vùng ĐBSCL cũng có mạng lưới sông – kênh – rạch lớn phục vụ nông nghiệp và giao thông nội địa, tạo ra một khối lượng bùn nạo vét đặc trưng mỗi mùa mưa. Tuy chưa có số liệu quốc gia tổng hợp chi tiết cho ĐBSCL riêng lẻ, nhiều nghiên cứu địa phương nhấn mạnh rằng khối lượng bùn ở đây dễ dàng lên tới hàng chục triệu m³ mỗi năm. Tại vùng này, ngoài đổ thải ở các bãi ven sông và khu vực đã được cấp phép, còn xuất hiện nghiên cứu và triển khai bước đầu các mô hình tái chế bùn nạo vét để làm vật liệu san lấp mặt bằng – đặc biệt trong bồi cảnh nguồn cát tự nhiên ngày càng giảm. Viện Thủy công – Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam đã nghiên cứu phụ gia để cứng hóa bùn nạo vét, tạo vật liệu xây dựng và san lấp hữu ích thay vì chôn lấp đơn thuần.

Bùn nạo vét nếu bị xử lý không đúng cách có thể gây phân hủy trở lại, phát sinh mùi, ô nhiễm nước mặt, và làm tái phát giải phóng các chất ô nhiễm tích tụ trong trầm tích, ảnh hưởng đến hệ sinh thái. Pháp luật Việt Nam hiện khuyến khích tái sử dụng và tái chế bùn nạo vét, miễn là đảm bảo tiêu chuẩn môi trường, nhằm giảm khối lượng chất thải và tận dụng tài nguyên sẵn có.

2.2. Tổng quan về xỉ lò cao nghiền mịn S95

Xi lò cao nghiền mịn (Ground Granulated Blast Furnace Slag – GGBFS) là sản phẩm thu được từ quá trình luyện gang trong lò cao của ngành công nghiệp gang thép. Trong quá trình luyện, quặng sắt, đá vôi và các chất trợ dung được nấu chảy ở nhiệt độ cao, tạo thành hai pha chính: gang lỏng và xỉ lỏng. Phần xỉ lỏng này nếu được làm nguội nhanh bằng nước áp lực cao sẽ tạo thành xỉ hạt lò cao có cấu trúc chủ yếu là pha thủy tinh. Sau khi thu hồi, khử nước và nghiền mịn bằng các thiết bị nghiền (như nghiền bi), xỉ hạt lò cao trở thành xỉ lò cao nghiền mịn, có hoạt tính thủy lực tiềm ẩn cao và được sử dụng rộng rãi như một loại phụ gia khoáng hoạt tính trong xây dựng.

Xi hạt lò cao trước khi nghiền có hình dạng gần giống cát thô, kích thước hạt chủ yếu nhỏ hơn 5 mm, bề mặt góc cạnh và cấu trúc xốp. Khi được nghiền mịn, các hạt xỉ có kích thước rất nhỏ, bề mặt riêng lớn (có thể đạt trên 4.000 cm²/g), giúp tăng khả năng tham gia phản ứng hóa học với môi trường kiềm. Thành phần pha thủy tinh chiếm tỷ lệ lớn là yếu tố quyết định tính hoạt tính của xỉ lò cao nghiền mịn, giúp vật liệu này có khả năng phản ứng với Ca(OH)₂ sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng để tạo thêm các sản

phẩm bền chắc như C–S–H, góp phần nâng cao cường độ và độ bền lâu của vật liệu xây dựng.

Về mặt hóa học, xỉ lò cao nghiền mịn có thành phần chủ yếu là các oxit như SiO_2 , CaO , Al_2O_3 và MgO . Theo kết quả phân tích xỉ hạt lò cao Hòa Phát được trình bày trong tài liệu, hàm lượng SiO_2 chiếm khoảng 36–38%, CaO khoảng 37%, Al_2O_3 xấp xỉ 13% và MgO khoảng 8%. Các oxit kiềm như K_2O , Na_2O và SO_3 tồn tại với hàm lượng rất thấp, trong khi hàm lượng lưu huỳnh và clo ở mức không đáng kể. Thành phần hóa học này tương đối ổn định và phù hợp cho các phản ứng hoạt hóa pozzolan và thủy lực tiềm ẩn, giúp xỉ lò cao nghiền mịn trở thành vật liệu khoáng bổ sung hiệu quả trong nhiều ứng dụng xây dựng.

Các thí nghiệm trong tài liệu cho thấy xỉ lò cao nghiền mịn có khối lượng riêng khoảng $2,9 \text{ g/cm}^3$ và độ mịn cao, với lượng sót sàng $45 \mu\text{m}$ chỉ khoảng 8%. Đặc biệt, chỉ số hoạt tính cường độ của xỉ lò cao nghiền mịn đạt trên 90% ở tuổi 28 ngày và có thể vượt 100% ở tuổi 91 ngày khi sử dụng thay thế một phần xi măng. Điều này chứng tỏ xỉ lò cao nghiền mịn không chỉ đóng vai trò là vật liệu độn mà còn trực tiếp tham gia vào quá trình hình thành cường độ của hệ vật liệu, làm tăng độ đặc chắc và khả năng chống xâm thực.

Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của ngành luyện kim, sản lượng xỉ lò cao phát sinh hàng năm ở Việt Nam là rất lớn, tập trung chủ yếu tại các tổ hợp thép lớn như Hòa Phát, Formosa Hà Tĩnh và một số nhà máy khác. Mỗi tấn gang sản xuất có thể phát sinh khoảng 250–300 kg xỉ lò cao. Nếu không được tái sử dụng hiệu quả, lượng xỉ này sẽ chiếm diện tích bãi chứa lớn, gây áp lực lên quỹ đất, đồng thời tiềm ẩn nguy cơ phát tán bụi, rửa trôi các chất kiềm và ảnh hưởng đến môi trường đất, nước xung quanh.

Mặc dù xỉ lò cao nhìn chung được đánh giá là an toàn hơn so với một số loại xỉ thép, song nếu tồn trữ lâu dài và không được quản lý đúng cách, vật liệu này vẫn có thể gây ra các vấn đề môi trường như tăng độ kiềm của nước rỉ bãi thải, phát sinh bụi mịn trong điều kiện khô hanh, hoặc lãng phí tài nguyên khoáng thứ cấp. Do đó, việc coi xỉ lò cao là một nguồn tài nguyên cần được tái chế thay vì là chất thải là định hướng quan trọng trong quản lý môi trường và phát triển bền vững.

Nhờ các đặc tính hóa học và cơ lý ưu việt, xỉ lò cao nghiền mịn đã và đang được ứng dụng rộng rãi làm phụ gia khoáng cho xi măng, bê tông, vữa xây dựng và các vật liệu nền móng. Việc sử dụng xỉ lò cao nghiền mịn giúp giảm lượng xi măng Portland cần thiết, từ đó giảm phát thải CO₂ trong sản xuất vật liệu xây dựng. Ngoài ra, xỉ lò cao nghiền mịn còn được nghiên cứu sử dụng trong ổn định và cải tạo đất yếu, đất bùn, nhờ khả năng phản ứng với môi trường kiềm và hình thành cấu trúc liên kết bền vững, phù hợp với xu hướng tận dụng chất thải công nghiệp làm vật liệu địa kỹ thuật. Việc tận dụng xỉ lò cao nghiền mịn không chỉ mang lại hiệu quả kinh tế mà còn có ý nghĩa lớn về môi trường. Thay thế một phần vật liệu truyền thống bằng xỉ lò cao giúp giảm nhu cầu khai thác tài nguyên thiên nhiên, giảm diện tích bãi thải và hạn chế phát thải khí nhà kính. Trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh kinh tế tuần hoàn và sử dụng vật liệu thân thiện môi trường, xỉ lò cao nghiền mịn được xem là một giải pháp quan trọng góp phần hài hòa giữa phát triển công nghiệp và bảo vệ môi trường.

2.3. Các nghiên cứu trong và ngoài nước về ứng dụng xỉ lò cao trong gia cố đất yếu.

2.3. Các nghiên cứu trong nước

Trong bối cảnh phát triển hạ tầng và nhu cầu sử dụng vật liệu thay thế truyền thống ngày càng gia tăng, các nghiên cứu tại Việt Nam trong những năm gần đây đã dành nhiều sự quan tâm đến việc ứng dụng tro bay (fly ash) và xỉ lò cao (blast furnace slag) — hai sản phẩm phụ phong phú của ngành công nghiệp nhiệt điện và luyện kim — trong gia cố và cải tạo đất yếu. Các nghiên cứu này không chỉ nhằm giải quyết bài toán kỹ thuật của nền móng và đất đắp, mà còn hướng tới mục tiêu tận dụng chất thải công nghiệp, giảm khai thác tài nguyên thiên nhiên, giảm chi phí và ô nhiễm môi trường.

Tro bay là vật liệu mịn, giàu silica và alumina, được hình thành trong quá trình đốt than ở các nhà máy nhiệt điện. Thành phần khoáng và tính pozzolanic đã tạo ra tiềm năng lớn cho tro bay được phối trộn với các chất kết dính (xi măng, vôi) để cải thiện tính chất cơ học của đất yếu.

Ở Việt Nam, rất nhiều công trình nghiên cứu đã khảo sát hiệu quả của tro bay khi ứng dụng cho đất sét, đất bùn yếu. Ví dụ, nghiên cứu thực nghiệm do Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng (IBST) phối hợp với các đơn vị khác đã chỉ ra rằng khi trộn tro

bay với một lượng nhỏ xi măng hoặc vôi, cường độ kháng cắt và độ ổn định thể tích của đất sét được cải thiện rõ rệt theo thời gian bảo dưỡng. Kết quả thí nghiệm cho thấy với tỷ lệ tro bay chiếm 20–30% khối lượng hỗn hợp và xi măng 5–10%, cường độ unconfined compressive strength (UCS) tăng lên đáng kể so với mẫu đất gốc, đồng thời giảm hệ số nén lún và tăng giới hạn dẻo. Nghiên cứu này nhấn mạnh tính pozzolanic của tro bay góp phần hình thành các sản phẩm thủy hóa bền chắc khi kết hợp với canxi từ xi măng hoặc vôi, tạo ra liên kết giữa các hạt đất và tăng cường độ nội tại.

Một loạt công trình từ các trường đại học lớn như Đại học Xây dựng, Đại học Thủy lợi và Đại học Giao thông Vận tải cũng thực hiện các thử nghiệm tương tự, tập trung vào việc khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng tro bay, điều kiện bảo dưỡng và thời gian đến các chỉ tiêu như: giới hạn Atterberg, khối lượng thể tích, độ bão hòa, cường độ chịu nén một trục và kháng cắt. Kết quả chung đều thể hiện xu hướng tăng cường độ khi tro bay được phối trộn với đất sét yếu, đặc biệt khi có bổ sung chất kết dính như xi măng hoặc vôi. Những nghiên cứu này không chỉ bó hẹp trong phòng thí nghiệm, mà còn mở rộng thử nghiệm ở quy mô lớn hơn, đánh giá hiệu quả trong các điều kiện gần thực tế như nền đắp, ổn định mái dốc.

Trong nhiều nghiên cứu, tro bay còn được xem xét phối hợp cùng chịu tải trọng lặp (cyclic loading) nhằm mô phỏng điều kiện tải trọng thực tế của nền giao thông hoặc kho bãi. Kết quả cho thấy tro bay giúp cải thiện đáng kể khả năng phân phối ứng suất và giới hạn biến dạng, giảm nguy cơ lún lệch hoặc sụt lún không đều.

Xi lò cao, đặc biệt khi được nghiền mịn (như dạng GGBFS/S95), có hoạt tính pozzolanic cao và khả năng phản ứng thủy lực khi có môi trường kiềm. Đây là điểm khác biệt quan trọng so với tro bay thuần túy, khiến xi lò cao trở thành đối tượng nghiên cứu tiềm năng cho việc gia cố đất yếu.

Ở Việt Nam, các nhà nghiên cứu tại Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, Đại học Thủy lợi, Đại học Xây dựng Hà Nội và một số đơn vị tư vấn cơ khí – địa kỹ thuật đã tiến hành loạt thử nghiệm phối trộn xi lò cao nghiền mịn vào các loại đất yếu đặc trưng trong nước như đất sét, đất bùn sông và đất triền ven sông. Các nghiên cứu này tập trung vào khảo sát ảnh hưởng của xi lò cao mịn lên cường độ nén một trục, độ biến dạng, hệ số nén, giới hạn dẻo và khả năng chống lún.

Một điểm chung trong các nghiên cứu là khi sử dụng xỉ lò cao nghiền mịn phối trộn với đất yếu cùng với một lượng nhỏ xi măng hoặc vôi, các chỉ tiêu cơ học của đất được cải thiện rõ rệt theo thời gian bảo dưỡng. Có nghiên cứu ghi nhận rằng đất bùn sau khi trộn với 15–20% xỉ lò cao và 5–10% xi măng cho thấy cường độ nén một trục tăng gấp 2–3 lần so với đất gốc không xử lý sau 28 ngày bảo dưỡng, đồng thời độ nén lún giảm đáng kể. Những kết quả này cho thấy xỉ lò cao không chỉ đóng vai trò như vật liệu độn mà còn trực tiếp tham gia các phản ứng hóa học tạo ra chất kết dính mới trong hệ đất – phụ gia.

Các nghiên cứu khác mở rộng phạm vi khảo sát như ảnh hưởng của kích thước hạt xi, độ mịn sau nghiền và điều kiện ngâm nước lên hiệu quả gia cố. Kết quả đều nhất quán ở chỗ: xỉ lò cao mịn hơn có hoạt tính cao hơn và dẫn đến cải thiện cường độ mạnh hơn. Ngoài ra, khi phối trộn xỉ lò cao với tro bay và xi măng, một số công trình đã ghi nhận hiệu ứng cộng hưởng, làm tăng độ ổn định và khả năng chịu tải.

Nhìn chung, các nghiên cứu trong nước đã xác nhận tiềm năng ứng dụng tro bay và xỉ lò cao trong cải tạo đất yếu, đặc biệt khi kết hợp với các chất kết dính như xi măng hoặc vôi. Các kết quả thí nghiệm đều chỉ ra rằng:

Tro bay tăng khả năng pozzolanic nếu có nguồn kiềm (Ca^{2+}) từ xi măng/vôi, giúp cải thiện liên kết hạt đất và tăng cường độ;

Xỉ lò cao nghiền mịn thể hiện hoạt tính pozzolanic và thủy lực mạnh hơn, có thể thay thế một phần xi măng trong hỗn hợp cải tạo đất;

Kết hợp tro bay + xỉ lò cao + xi măng/vôi thường cho kết quả tốt nhất về cường độ, tính nén và ổn định lâu dài.

Tuy nhiên, vẫn tồn tại một số hạn chế và khoảng trống nghiên cứu cần được khắc phục:

Hầu hết nghiên cứu chủ yếu tập trung trong phòng thí nghiệm, còn thiếu các chương trình thử nghiệm dài hạn ở quy mô thực tế;

Chưa có nhiều nghiên cứu cụ thể về tính thấm, ứng xử biến dạng theo thời gian và dưới tải trọng lặp, điều rất quan trọng trong thiết kế nền móng và đường giao thông;

Vấn đề đặc trưng địa phương của đất yếu (biến thể theo vùng miền) chưa được xét đến kỹ lưỡng trong nhiều nghiên cứu.

2.4. Các nghiên cứu trên Thế Giới

Trong lĩnh vực kỹ thuật địa chất và xây dựng dân dụng, gia cố đất yếu là một trong những thách thức lớn nhất đối với các kỹ sư do các đặc tính như độ ẩm cao, độ dẻo cao, cường độ thấp và độ nén lún lớn thường gặp trong các đất sét mềm, đất bùn và một số loại đất phù sa. Truyền thống, các giải pháp như xi măng, vôi hoặc các chất ổn định truyền thống khác được sử dụng để cải thiện các tính chất cơ học này. Tuy nhiên, các chất liệu công nghiệp phụ như tro bay (fly ash) và xỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS) đang hấp dẫn cộng đồng nghiên cứu toàn cầu do tính bền vững, tái chế chất thải và tiềm năng kỹ thuật lớn hơn. Nhiều nghiên cứu quốc tế đã khảo sát hiệu quả của tro bay và xỉ lò cao trong việc tăng cường cường độ, độ ổn định và các chỉ tiêu địa kỹ thuật khác của đất yếu, mở ra các hướng ứng dụng hiệu quả trong môi trường xây dựng hiện đại.

Tro bay và xỉ lò cao là hai sản phẩm phụ phong phú từ hoạt động công nghiệp — tro bay phát sinh từ các nhà máy nhiệt điện than, trong khi xỉ lò cao là sản phẩm phụ của ngành luyện kim. Các vật liệu thải này chứa hàm lượng lớn SiO_2 , Al_2O_3 và các pha khoáng hoạt tính khác, do đó có thể tham gia vào phản ứng pozzolanic hoặc thủy lực khi phối trộn với đất và chất kiềm/dung dịch hoạt hóa. Nhiều nghiên cứu tổng quan trên thế giới đã nhấn mạnh khả năng tro bay tác động đến tính chất địa kỹ thuật của đất, bao gồm cải thiện độ bền, giảm độ dẻo, ảnh hưởng đến sự phân bố kích thước hạt và tính nén khi được phối trộn với đất yếu hoặc các thành phần geopolymer hóa. Phương pháp kích hoạt kiềm (alkali activation) tro bay và xỉ lò cao để tạo geopolymer đang là một hướng nghiên cứu mới nổi. Theo tổng quan của các nghiên cứu tại các trường đại học và viện nghiên cứu, tro bay và GGBFS có thể được hoạt hóa bằng dung dịch kiềm (như NaOH , Na_2SiO_3), tạo ra liên kết geopolymer bên trong đất xử lý, góp phần cải thiện đáng kể các chỉ số như cường độ nén không phụ thuộc, kháng cắt và độ bền lâu dài.

Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã tập trung vào việc phối trộn tro bay vào đất sét và đất yếu nhằm cải thiện khối đất ban đầu. Kết quả cho thấy tro bay giúp giảm độ dẻo, giảm độ nén lún và tăng cường độ tương đối của đất khi được phối trộn với nước và các chất kiềm kích hoạt. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng khi tro bay được sử dụng ở tỷ lệ

từ 5–25% theo khối lượng đất khô, các chỉ tiêu như giới hạn Atterberg, độ ẩm tối ưu và khối lượng thể tích được cải thiện, góp phần nâng cao cường độ chịu nén và độ ổn định cơ học.

Tuy nhiên, các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng tro bay sử dụng riêng lẻ đôi khi không đạt được yêu cầu cường độ tối thiểu theo các tiêu chuẩn như ASTM D 4609 (cần $\geq 0,8$ MPa đối với vật liệu dùng cho nền đường) mà không bổ sung chất khác hoặc tăng thời gian bảo dưỡng. Điều này dẫn đến nhu cầu phối hợp tro bay với các chất ổn định khác như xỉ lò cao hoặc chất kiềm để tăng hiệu quả cải tạo đất yếu.

Xi lò cao nghiền mịn (GGBFS) thường được nghiên cứu như một chất ổn định đất có hoạt tính cao hơn tro bay, nhờ khả năng phản ứng thủy lực khi phối trộn với kiềm hoặc với tro bay. Các công trình nghiên cứu tại nhiều quốc gia đã chỉ ra rằng khi phối trộn xỉ lò cao với đất yếu ở tỷ lệ thích hợp (thường 10–25%), cường độ nén không phụ thuộc và khả năng chống cắt của đất được cải thiện rõ rệt so với đất gốc không xử lý. Ngoài ra, xỉ lò cao còn thể hiện hiệu quả khi phối hợp với tro bay để tăng cường tạo geopolymer, nhờ đó đất ổn định hơn về mặt cơ học và có khả năng đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật nghiêm ngặt hơn.

Một nghiên cứu gần đây còn cho thấy đất được ổn định bằng geopolymer tro bay và xỉ lò cao có thể đạt giá trị cường độ nén không phụ thuộc vượt trội hơn so với đất ổn định bằng xi măng truyền thống, đồng thời thể hiện tính kháng đông – nóng tốt hơn trong các thử nghiệm mô phỏng thực tế như test đóng băng – tan.

Một lợi thế lớn của tro bay và xỉ lò cao trong cải tạo đất là khả năng tận dụng các chất thải công nghiệp với sản lượng lớn, giảm gánh nặng xử lý và tiêu hủy phế thải, đồng thời giảm nhu cầu khai thác tài nguyên thiên nhiên. Việc sử dụng các phụ gia này còn góp phần giảm phát thải CO₂ so với xi măng do sản xuất xi măng là một trong những nguồn phát thải lớn của ngành xây dựng. Ngoài ra, geopolymer hóa tro bay và xỉ lò cao còn hạn chế nhu cầu sử dụng xi măng Portland, giúp giảm tiêu thụ năng lượng và ô nhiễm môi trường liên quan đến sản xuất vật liệu xây dựng mới.

Các nghiên cứu thực nghiệm cũng chỉ ra rằng đất được ổn định bằng tro bay và xỉ lò cao thường có tính thấm thấp hơn, khả năng chịu tải trọng cao hơn và ít biến dạng

hơn khi chịu tải trọng lặp lại, điều này rất quan trọng đối với các công trình như nền đường, nền công nghiệp hoặc các bãi đỗ xe chịu tải trọng lớn.

Mặc dù tiềm năng ứng dụng tro bay và xỉ lò cao trong gia cố đất yếu là rất rõ ràng, các nghiên cứu quốc tế cũng chỉ ra một số thách thức còn tồn tại. Trong đó có việc đảm bảo giá trị cường độ đạt yêu cầu kỹ thuật trong thời gian bảo dưỡng ngắn hơn, khảo sát đặc tính biến dạng theo thời gian và dưới tải trọng lặp, rung, cũng như đánh giá tính bền vững lâu dài trong môi trường tự nhiên có thay đổi khí hậu và thủy văn.

Xu hướng mới của nghiên cứu là tích hợp thêm các trình tự kích hoạt kiềm tiên tiến, cũng như phối hợp tro bay và xỉ lò cao với các phụ gia khác như silica fume hoặc nano vật liệu để tăng hiệu quả geopolymer hóa, rút ngắn thời gian bảo dưỡng và nâng cao cường độ ngang bằng hoặc vượt yêu cầu tiêu chuẩn về kỹ thuật địa chất – xây dựng.

3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

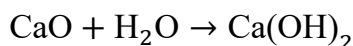
3.1. Cơ chế cải tạo đất bằng vật liệu hoạt tính xỉ lò cao

Xỉ lò cao nghiền mịn (Ground Granulated Blast Furnace Slag – GGBFS) là một vật liệu hoạt tính khoáng có nguồn gốc từ quá trình luyện gang, sở hữu khả năng tham gia các phản ứng hóa học trong môi trường kiềm để tạo ra các sản phẩm liên kết bền vững. Khi được sử dụng trong cải tạo đất yếu, xỉ lò cao không chỉ đóng vai trò là vật liệu độn làm thay đổi cấu trúc hạt mà còn trực tiếp tham gia vào các phản ứng hóa học phức tạp, hình thành các sản phẩm keo kết dính giúp liên kết các hạt đất, làm tăng cường độ và độ ổn định lâu dài của nền đất.

Về bản chất, xỉ lò cao nghiền mịn có cấu trúc vô định hình (pha thủy tinh) chiếm tỷ lệ lớn, với thành phần hóa học chủ yếu gồm các oxit như CaO , SiO_2 , Al_2O_3 và MgO . Cấu trúc này khiến xỉ lò cao ở trạng thái năng lượng cao, dễ bị phá vỡ liên kết trong môi trường kiềm để giải phóng các ion Ca^{2+} , SiO_4^{4-} và AlO_4^{5-} . Tuy nhiên, trong điều kiện tự nhiên, xỉ lò cao có tốc độ phản ứng chậm; do đó, để kích hoạt hoạt tính của xỉ, cần có nguồn kiềm hoặc canxi tự do, thường được cung cấp từ vôi, xi măng, hoặc chính môi trường đất có pH cao.

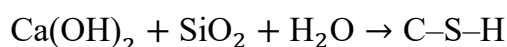
Khi xỉ lò cao nghiền mịn được phối trộn với đất yếu và nước, quá trình đầu tiên xảy ra là sự hòa tan từng phần của pha thủy tinh trong xỉ. Trong môi trường kiềm, các

liên kết Si–O–Si và Al–O–Si trong cấu trúc xi bị phá vỡ, giải phóng các ion silic và nhôm hoạt tính. Đồng thời, CaO trong xi hoặc từ chất kích hoạt sẽ phản ứng với nước tạo thành canxi hydroxit:

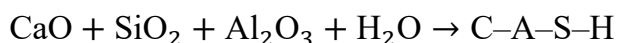
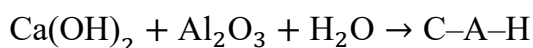


Canxi hydroxit sinh ra làm tăng pH của môi trường, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hòa tan tiếp theo của các pha hoạt tính trong xi lò cao cũng như trong khoáng sét của đất.

Sau giai đoạn hòa tan, các ion Ca^{2+} , SiO_4^{4-} và AlO_4^{5-} trong dung dịch bắt đầu tái kết hợp thông qua các phản ứng pozzolanic và thủy lực, tạo thành các sản phẩm keo bền chắc. Phản ứng quan trọng nhất là sự hình thành gel canxi silicat hydrat (C–S–H), được xem là sản phẩm chủ đạo quyết định sự gia tăng cường độ của hệ đất – xi:



Gel C–S–H có cấu trúc vi tinh thể hoặc vô định hình, bề mặt riêng lớn, khả năng bám dính cao, đóng vai trò như một chất keo liên kết các hạt đất rời rạc thành một khối đặc chắc. Bên cạnh đó, khi có mặt Al_2O_3 , các phản ứng tạo thành canxi aluminat hydrat (C–A–H) hoặc canxi aluminat silicat hydrat (C–A–S–H) cũng diễn ra:



Các sản phẩm này góp phần tăng cường khả năng liên kết và ổn định cấu trúc của đất cải tạo, đặc biệt trong các loại đất sét và đất bùn giàu khoáng sét hoạt tính.

Song song với các phản ứng hóa học, cơ chế vật lý – hóa học tương tác với hạt đất cũng đóng vai trò quan trọng. Các gel C–S–H và C–A–H được hình thành sẽ lấp đầy các lỗ rỗng giữa các hạt đất, làm giảm độ rỗng tổng thể và hạn chế sự di chuyển của nước trong cấu trúc đất. Đồng thời, các gel này bám lên bề mặt hạt đất sét, trung hòa điện tích âm trên bề mặt khoáng sét, từ đó giảm lực đẩy tĩnh điện giữa các hạt, thúc đẩy hiện tượng keo tụ và kết tụ hạt. Kết quả là cấu trúc đất chuyển từ trạng thái phân tán sang trạng thái kết dính, ổn định hơn.

Trong đất sét, các khoáng vật như montmorillonite, illite hay kaolinite cũng có thể tham gia gián tiếp vào quá trình cải tạo. Các ion Ca^{2+} từ xi lò cao có khả năng thay thế

các cation yếu hơn (Na^+ , K^+) trong lớp hấp phụ của khoáng sét, làm giảm khả năng trương nở và tăng độ ổn định thể tích của đất. Đây là một trong những cơ chế quan trọng giúp giảm độ dẻo, giảm độ nhạy nước và hạn chế lún của đất sau cải tạo.

Theo thời gian bảo dưỡng, các phản ứng hóa học tiếp tục diễn ra, làm tăng dần lượng gel liên kết và cải thiện cường độ của đất. Điều này lý giải vì sao đất cải tạo bằng xỉ lò cao thường có cường độ tăng theo thời gian, khác với một số vật liệu chỉ cải thiện tức thời. Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy cường độ nén một trục và sức kháng cắt của đất trộn xỉ lò cao có thể tăng đáng kể sau 28 ngày và tiếp tục tăng ở các mốc thời gian dài hơn như 56 hoặc 90 ngày, phản ánh sự phát triển bền vững của hệ liên kết keo.

Tóm lại, cơ chế cải tạo đất bằng vật liệu hoạt tính xỉ lò cao là sự kết hợp chặt chẽ giữa phản ứng hóa học pozzolanic – thủy lực và các tương tác vật lý – hóa học với hạt đất. Các phản ứng tạo gel C–S–H, C–A–H và C–A–S–H đóng vai trò trung tâm trong việc liên kết các hạt đất, giảm độ rỗng, tăng cường độ và ổn định thể tích của nền đất. Nhờ cơ chế này, xỉ lò cao nghiền mịn trở thành một vật liệu cải tạo đất yếu hiệu quả, có tiềm năng thay thế một phần các chất kết dính truyền thống, đồng thời góp phần tận dụng phế thải công nghiệp và giảm tác động tiêu cực đến môi trường.

3.2. Ảnh hưởng của xỉ lò cao S95 đến các tính chất của đất

Ảnh hưởng của xỉ lò cao nghiền mịn S95 đến tính dẻo của đất chủ yếu xuất phát từ sự hình thành các sản phẩm keo liên kết mới trong quá trình phản ứng pozzolanic và thủy lực tiềm ẩn. Khi S95 được phối trộn với đất, đặc biệt là các loại đất sét và đất bùn giàu khoáng sét, trong môi trường có đủ độ ẩm và pH kiềm, các pha thủy tinh hoạt tính trong xỉ lò cao bị hòa tan từng phần, giải phóng các ion Ca^{2+} , SiO_4^{4-} và AlO_4^{5-} . Các ion này nhanh chóng tham gia vào các phản ứng hóa học tạo thành các sản phẩm keo kết dính như gel canxi silicat hydrat (C–S–H), canxi aluminat hydrat (C–A–H) và canxi aluminat silicat hydrat (C–A–S–H). Các gel này có cấu trúc vô định hình, bề mặt riêng lớn và khả năng bám dính cao, chúng bao phủ và liên kết các hạt đất rời rạc, làm thay đổi căn bản trạng thái cấu trúc vi mô của đất. Trước khi cải tạo, các hạt đất sét tồn tại chủ yếu ở trạng thái phân tán, chịu ảnh hưởng mạnh của lực đẩy tĩnh điện giữa các lớp khoáng sét, dẫn đến tính dẻo cao và khả năng biến dạng lớn khi hàm lượng nước thay đổi. Tuy nhiên, khi các keo liên kết C–S–H và C–A–H được hình thành, chúng vừa lấp

đầy các lỗ rỗng giữa các hạt đất, vừa trung hòa điện tích âm trên bề mặt khoáng sét, làm giảm đáng kể lực đẩy tĩnh điện và thúc đẩy quá trình keo tụ – kết tụ hạt. Kết quả là cấu trúc đất chuyển dần từ trạng thái phân tán sang trạng thái kết dính ổn định hơn, làm giảm khả năng trượt tương đối giữa các hạt khi chịu tác động của nước. Sự thay đổi cấu trúc này thể hiện rõ rệt qua việc giảm giới hạn chảy, giảm chỉ số dẻo và thu hẹp khoảng biến thiên dẻo của đất sau khi trộn xỉ lò cao S95. Đồng thời, các ion Ca^{2+} từ xỉ lò cao còn có khả năng trao đổi với các cation yếu hơn (như Na^+ , K^+) trong lớp hấp phụ của khoáng sét, làm giảm khả năng trương nở và giảm độ nhạy nước của đất. Nhờ đó, đất cải tạo bằng xỉ lò cao S95 không chỉ giảm tính dẻo mà còn trở nên ổn định hơn về thể tích và cơ học theo thời gian bảo dưỡng. Các nghiên cứu thực nghiệm trong và ngoài nước đều cho thấy hàm lượng xỉ lò cao nghiền mịn càng tăng thì chỉ số dẻo của đất càng giảm, đặc biệt rõ rệt ở các loại đất bùn và đất sét mềm, khẳng định vai trò quyết định của các keo liên kết mới hình thành trong việc kiểm soát và cải thiện tính dẻo của đất.

Việc cải thiện cường độ của đất khi sử dụng xỉ lò cao nghiền mịn S95 có mối liên hệ chặt chẽ với các phản ứng hóa học pozzolanic và thủy lực tiềm ẩn, dẫn đến sự hình thành các sản phẩm keo liên kết mới trong cấu trúc đất. Khi S95 được phối trộn với đất yếu trong điều kiện có đủ độ ẩm và môi trường kiềm thích hợp, các pha thủy tinh hoạt tính giàu CaO , SiO_2 và Al_2O_3 trong xỉ lò cao bị hòa tan từng phần, giải phóng các ion Ca^{2+} , SiO_4^{4-} và AlO_4^{5-} vào dung dịch lỗ rỗng. Dưới tác động của pH cao, các ion này tham gia vào chuỗi phản ứng hóa học tạo thành các sản phẩm hydrat như gel canxi silicat hydrat (C–S–H), canxi aluminat hydrat (C–A–H) và canxi aluminat silicat hydrat (C–A–S–H). Các sản phẩm này có cấu trúc vô định hình hoặc vi tinh thể, bề mặt riêng lớn và khả năng kết dính cao, đóng vai trò như các keo liên kết bền vững, gắn kết các hạt đất riêng lẻ thành một hệ vật liệu đồng nhất và có cường độ cao hơn. Trước khi cải tạo, đất yếu – đặc biệt là đất bùn và đất sét mềm – thường có cấu trúc rời rạc, liên kết giữa các hạt chủ yếu dựa vào lực ma sát và lực hút yếu, dẫn đến khả năng chịu tải thấp. Tuy nhiên, khi các gel C–S–H và C–A–H hình thành và phát triển theo thời gian bảo dưỡng, chúng bao phủ bề mặt hạt đất, lấp đầy các lỗ rỗng và tạo ra các “cầu liên kết” hóa học giữa các hạt, làm tăng đáng kể khả năng truyền ứng suất trong khối đất. Đồng thời, các ion Ca^{2+} từ xỉ lò cao còn tham gia quá trình trao đổi cation với các ion yếu hơn (Na^+ , K^+) trên bề mặt khoáng sét, làm giảm lực đẩy tĩnh điện giữa các lớp sét và thúc đẩy quá trình

keo tụ – kết tụ hạt, qua đó góp phần gia tăng cường độ kháng cắt và cường độ nén của đất. Sự phát triển liên tục của các phản ứng hóa học này theo thời gian giải thích cho hiện tượng cường độ đất cải tạo bằng xỉ lò cao S95 tăng dần theo tuổi bảo dưỡng, khác với các cải thiện tức thời thuần túy mang tính cơ học. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã chỉ ra rằng đất trộn xỉ lò cao nghiền mịn S95 có thể đạt giá trị cường độ nén một trục và sức kháng cắt cao hơn rõ rệt so với đất nguyên trạng, đặc biệt khi kết hợp với một lượng nhỏ chất kích hoạt như xi măng hoặc vôi. Do đó, có thể khẳng định rằng các phản ứng hóa học hình thành keo liên kết là cơ chế then chốt quyết định hiệu quả cải thiện cường độ của đất khi sử dụng xỉ lò cao nghiền mịn S95, đồng thời tạo cơ sở khoa học cho việc ứng dụng vật liệu này trong gia cố và cải tạo đất yếu phục vụ xây dựng bền vững.

4. ÁP DỤNG XỈ LÒ CAO TRONG CẢI TẠO Bùn NẠO VẾT

4.1. Đặc điểm địa kỹ thuật của bùn nạo vét

Trong nghiên cứu này, chúng tôi nghiên cứu hiệu quả trong việc cải tạo bùn nạo vét bằng xỉ lò cao S95 lấy ví dụ cho khu vực Hải Phòng.

Khu vực Hải Phòng là đầu mối hàng hải quan trọng bậc nhất của miền Bắc Việt Nam, nơi tập trung hệ thống luồng hàng hải dày đặc, giữ vai trò kết nối trực tiếp giữa vùng biển vịnh Bắc Bộ với mạng lưới cảng biển, khu công nghiệp và trung tâm kinh tế – logistics của vùng Đồng bằng sông Hồng. Hệ thống luồng hàng hải Hải Phòng gồm 09 luồng chính, bao gồm: Lạch Huyện, Kênh Hà Nam, Bạch Đằng, Sông Cấm, Vật Cách, Nam Triệu, Phà Rừng, Kênh Cái Tráp và các đoạn luồng liên kết, với tổng chiều dài toàn tuyến khoảng 92,4 km. Các luồng này được hình thành trên cơ sở điều kiện địa hình – thủy văn tự nhiên của khu vực cửa sông ven biển, kết hợp với quá trình chỉnh trị và đầu tư hạ tầng hàng hải lâu dài, tạo nên mạng lưới giao thông thủy hoàn chỉnh phục vụ phát triển kinh tế biển.

Trong hệ thống trên, luồng Lạch Huyện có vị trí ngoài khơi và giữ vai trò là cửa ngõ hàng hải chiến lược của Hải Phòng, trực tiếp thông ra biển Đông, cho phép tiếp nhận tàu container cỡ lớn và các tuyến vận tải biển xuyên đại dương. Từ Lạch Huyện, tàu thuyền tiếp tục hành trình vào khu vực nội địa thông qua kênh Hà Nam và luồng Bạch Đằng, là các tuyến luồng chuyển tiếp quan trọng, dẫn tàu từ vùng nước sâu ven biển vào khu vực cảng Đình Vũ và các bến cảng dọc sông. Luồng sông Cấm nằm sâu

trong đất liền, đóng vai trò kết nối trực tiếp các cảng truyền thống của Hải Phòng với hệ thống sông ngòi nội vùng, đồng thời là trục giao thông thủy chính phục vụ vận tải tổng hợp, container và hàng rời.

Bên cạnh các luồng chính, các luồng Vật Cách, Nam Triệu và Phà Rừng có vị trí chiến lược trong việc phân luồng, điều tiết giao thông và kết nối với các khu công nghiệp, cơ sở đóng tàu, cảng chuyên dùng và khu neo đậu tàu thuyền. Luồng Nam Triệu đặc biệt quan trọng khi đóng vai trò là tuyến kết nối giữa luồng hàng hải Hải Phòng với vùng biển phía đông bắc và các tuyến hàng hải quốc tế, đồng thời hỗ trợ thoát tàu trong điều kiện thủy triều, thời tiết phức tạp. Luồng Phà Rừng và luồng Vật Cách chủ yếu phục vụ tàu cỡ trung và nhỏ, góp phần giảm tải cho các luồng chính và bảo đảm tính linh hoạt cho toàn hệ thống.

Ngoài ra, kênh Cái Tráp giữ vai trò kết nối giữa các tuyến luồng nội địa với khu vực cảng Đình Vũ – Nam Hải, hình thành mạng lưới luồng nhánh quan trọng phục vụ phát triển công nghiệp, logistics và vận tải thủy khu vực phía Đông Nam thành phố. Nhìn tổng thể, 09 luồng hàng hải khu vực Hải Phòng được phân bố hợp lý theo không gian từ ngoài khơi vào nội địa, tạo thành hệ thống luồng liên hoàn, vừa đáp ứng yêu cầu tiếp nhận tàu biển lớn, vừa bảo đảm kết nối sâu vào đất liền, qua đó khẳng định vị thế của Hải Phòng là trung tâm cảng biển và logistics hàng đầu miền Bắc Việt Nam.

Luồng hàng hải Lạch Huyện là tuyến luồng biển nước sâu quan trọng nhất của khu vực Hải Phòng, giữ vai trò cửa ngõ hàng hải quốc tế kết nối trực tiếp hệ thống cảng biển phía Bắc Việt Nam với vịnh Bắc Bộ và các tuyến vận tải biển toàn cầu. Luồng nằm ở phía đông nam thành phố Hải Phòng, kéo dài từ vùng nước ngoài khơi qua cửa Lạch Huyện, dẫn tàu vào khu bến cảng container trên đảo Cát Hải. Với vị trí ngoài khơi, ít chịu ảnh hưởng của hệ thống sông nội địa, luồng Lạch Huyện có điều kiện tiếp cận thuận lợi cho tàu biển cỡ lớn, đặc biệt là tàu container hoạt động trên các tuyến hàng hải xuyên đại dương. Về quy mô kỹ thuật, luồng Lạch Huyện được quy hoạch theo tiêu chuẩn luồng biển nước sâu hiện đại. Đoạn luồng chính từ phao số 0 đến khu vực vùng quay trở tàu có chiều rộng đáy luồng khoảng 160 m, bảo đảm không gian hành hải an toàn cho tàu có kích thước lớn. Tại các khu vực vùng quay, đường kính vùng quay đạt tới 660 m, đáp ứng yêu cầu quay trở đối với tàu container có chiều dài hàng trăm mét. Các đoạn

tiếp theo của luồng, kết nối vào hệ thống luồng nội địa, có bề rộng đáy luồng thu hẹp dần, phù hợp với điều kiện địa hình và tổ chức giao thông hàng hải. Về chiều sâu, luồng Lạch Huyện hiện được duy trì với độ sâu khai thác lớn nhất trong hệ thống luồng hàng hải Hải Phòng, đạt khoảng âm 13,0–13,5 m so với mực nước “0” hải đồ, cho phép tiếp nhận tàu container cỡ lớn, tàu có trọng tải hàng trăm nghìn tấn tùy theo môn nước và điều kiện thủy triều. Tuy nhiên, do ảnh hưởng của dòng chảy, sóng và quá trình sa bồi ven biển, độ sâu luồng có xu hướng biến đổi theo thời gian, đòi hỏi công tác nạo vét duy tu thường xuyên. Với quy mô lớn về chiều dài, chiều rộng và chiều sâu, luồng Lạch Huyện được xem là hạ tầng then chốt, quyết định năng lực tiếp nhận tàu biển lớn và định hướng phát triển cảng trung chuyển quốc tế của Hải Phòng trong tương lai.

Kênh Cái Tráp là một tuyến luồng hàng hải quan trọng trong hệ thống luồng khu vực Hải Phòng, nằm ở khu vực phía đông nam thành phố, kết nối luồng sông Cấm và khu bến cảng Đình Vũ – Nam Hải với các tuyến luồng chính dẫn ra biển. Kênh có vai trò là tuyến dẫn tàu trung chuyển, phục vụ trực tiếp cho hoạt động khai thác của các bến cảng, khu công nghiệp và cơ sở logistics tập trung dọc khu vực Đình Vũ – Cát Hải. Nhờ vị trí nằm trong vùng cửa sông – ven biển, kênh Cái Tráp chịu ảnh hưởng rõ rệt của chế độ thủy triều, dòng chảy và quá trình bồi lắng tự nhiên, khiến điều kiện luồng thay đổi theo thời gian. Về đặc điểm kỹ thuật, kênh Cái Tráp có quy mô nhỏ hơn so với các luồng biển nước sâu, được thiết kế phù hợp với tàu có trọng tải trung bình và nhỏ. Chiều rộng đáy luồng của kênh ở mức vừa phải, bảo đảm cho tàu hành hải an toàn theo tổ chức giao thông một chiều. Chiều sâu luồng được duy trì ở mức khoảng âm 5,5 m, đáp ứng yêu cầu khai thác của tàu sông – biển và tàu ven bờ ra vào các bến cảng trong khu vực. Do đặc điểm địa hình và thủy văn phức tạp, kênh Cái Tráp cần được duy tu, nạo vét định kỳ nhằm duy trì ổn định chiều rộng và chiều sâu khai thác. Với quy mô phù hợp và vị trí kết nối chiến lược, kênh Cái Tráp đóng vai trò quan trọng trong việc hoàn thiện mạng lưới luồng hàng hải và nâng cao năng lực khai thác cảng khu vực Hải Phòng.

Hệ thống các luồng kênh Hà Nam, Phà Rừng, Nam Triệu, Vật Cách và sông Cấm giữ vai trò đặc biệt quan trọng trong mạng lưới luồng hàng hải khu vực Hải Phòng, hình thành các trục kết nối từ luồng biển vào sâu trong nội địa, phục vụ trực tiếp cho hoạt động khai thác cảng biển, công nghiệp và vận tải thủy. Kênh Hà Nam nằm ở khu vực chuyển tiếp giữa luồng biển Lạch Huyện và các luồng nội địa, có vị trí dẫn tàu từ vùng

nước sâu ven biển vào khu vực cảng Đình Vũ – Nam Hải. Kênh có quy mô trung bình, chiều rộng đáy luồng khoảng 80 m, độ sâu duy trì khoảng âm 8,0 m, cho phép tàu có trọng tải trung bình và tàu container feeder hành hải an toàn. Do chịu ảnh hưởng của thủy triều và dòng chảy cửa sông, kênh Hà Nam thường xuyên phát sinh bồi lắng, đòi hỏi công tác duy tu định kỳ.

Luồng Nam Triệu là tuyến luồng cửa sông quan trọng, nối trực tiếp hệ thống luồng Hải Phòng với vùng biển vịnh Bắc Bộ. Với vị trí chiến lược ở khu vực cửa sông, luồng Nam Triệu đóng vai trò phân luồng và điều tiết giao thông hàng hải, hỗ trợ tàu ra vào các luồng chính trong nhiều điều kiện thủy triều và thời tiết khác nhau. Luồng có bề rộng và độ sâu tương đối lớn so với các luồng nội địa, đủ khả năng tiếp nhận tàu biển cỡ trung, đồng thời là tuyến dự phòng quan trọng cho toàn hệ thống.

Luồng Phà Rừng và luồng Vật Cách nằm sâu hơn trong khu vực nội địa, chủ yếu phục vụ tàu có trọng tải nhỏ và trung bình, tàu hàng tổng hợp và tàu chuyên dùng. Các luồng này có chiều rộng đáy luồng ở mức vừa phải, phù hợp với tổ chức giao thông một chiều, và độ sâu khai thác không lớn, phụ thuộc nhiều vào mực nước triều. Mặc dù quy mô không lớn, Phà Rừng và Vật Cách giữ vai trò quan trọng trong việc kết nối các khu công nghiệp, cơ sở đóng tàu và bến cảng chuyên dùng, góp phần giảm tải cho các luồng chính.

Luồng sông Cấm là trục luồng nội địa quan trọng nhất của Hải Phòng, chạy xuyên qua khu vực trung tâm cảng truyền thống, kết nối trực tiếp các bến cảng lâu đời với hệ thống luồng biển. Sông Cấm có chiều rộng đáy luồng phổ biến khoảng 80 m, độ sâu khai thác dao động từ âm 6,6 m đến âm 7,0 m, giảm dần về phía thượng lưu. Do đặc điểm uốn khúc, mật độ giao thông cao và ảnh hưởng mạnh của bồi lắng, luồng sông Cấm đòi hỏi quản lý chặt chẽ và duy tu thường xuyên. Tổng thể, các luồng kênh Hà Nam, Phà Rừng, Nam Triệu, Vật Cách và sông Cấm tạo thành mạng lưới luồng nội địa – cửa sông hoàn chỉnh, bảo đảm khả năng kết nối linh hoạt giữa luồng biển nước sâu và hệ thống cảng, qua đó nâng cao năng lực khai thác và vai trò của cảng biển Hải Phòng trong phát triển kinh tế vùng và quốc gia.

Ngoài ra, Cửa sông Văn Úc giữ vai trò quan trọng trong hệ thống giao thông thủy khu vực Hải Phòng, đặc biệt trong việc kết nối các tuyến sông nội địa với vùng biển ven

Hình 1. Vị trí lấy mẫu đại diện cho các khu vực cửa sông, luồng lạch khu vực Hải Phòng.

Tại khu vực Lạch Huyện, các mẫu bùn được nạo vét đã được tập kết trong 02 bãi. Vì vậy để đảm bảo tính đại diện, mỗi bãi được tiến hành lấy 3 mẫu đại diện. Do các mẫu bùn đã bị xáo động so với trạng thái tự nhiên nên mẫu được lấy dưới dạng mẫu phá hủy.

Các khu vực khác mẫu được lấy dưới dạng mẫu nguyên dạng bằng ống thành mỏng và mẫu phá hủy để phục vụ cho công tác nghiên cứu.

Thành phần chủ yếu của các mẫu bùn nạo vét là sét, sét pha, cát pha màu xám nâu, xám đen. Các thí nghiệm phân tích thành phần hạt, độ ẩm giới hạn chảy, độ ẩm giới hạn dẻo và khối lượng riêng được thực hiện. Khối lượng thực hiện là 30 mẫu. Kết quả thí nghiệm một số tính chất vật lý của mẫu được thể hiện như bảng 1.



(a) Vị trí lấy mẫu tại bãi chứa bùn nạo vét khu vực Lạch Huyện



(b) Vị trí lấy mẫu tại bãi cửa Văn Úc

Hình 2. Hình ảnh lấy mẫu tại các bãi vật liệu tại Hải Phòng

Công tác thí nghiệm

Thí nghiệm thành phần hạt

Thí nghiệm xác định thành phần hạt của các mẫu đất bùn nạo vét từ các luồng lạch khu vực Hải Phòng được thực hiện theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 4198-2014. Do thành phần của bùn chủ yếu là nhóm hạt mịn nên phương pháp xác định thành phần hạt được thực hiện theo phương pháp tỷ trọng kế.

Theo quy trình này mẫu đất bùn sau khi lấy về phòng được phơi khô gió trong điều kiện phòng thí nghiệm. Các mẫu đất sau đó được nghiền nhỏ bằng cối sứ và chày bọc cao su để phân tán các hạt lớn. Sau đó, dùng phương pháp chia tư để chia mẫu đất thành 4 phần, và 2 mẫu để đem phân tích thành phần hạt. Tổng cộng có 3 mẫu lấy tại 3 bãi lưu trữ bùn khác nhau vì vậy chúng tôi tiến hành thí nghiệm 2 mẫu cho một mẫu bùn tại mỗi bãi thải.

Để thực hiện phân tích hạt, mẫu sau được nghiền mịn và sử dụng phương pháp chia tư để chọn mẫu, mỗi mẫu phân tích hạt được lấy với khối lượng từ 30 đến 40g. Sau khi cân mẫu dùng trong phân tích hạt, cho mẫu vào cốc thủy tinh và cho nước cất và chất phân tán NH_4^+ hoặc dung dịch thủy tinh lỏng Na_2SiO_4 và đun sôi để phân tán hoàn toàn các hợp chất và các hạt trong hỗn hợp.

Mẫu sau khi đun sôi được lọc qua sàng 0.06mm để rửa lấy dung dịch chứa các hạt bụi sét thực hiện phân tích tỷ trọng kế. Các hạt trên sàng 0.06mm được cho vào bát sứ hoặc hộp nhôm đem đi sấy khô rồi thực hiện xác định thành phần hạt bằng phương pháp rây.

Phần dung dịch lọt qua sàng 0.06mm được cho vào bình đong bằng thủy tinh có dung tích vạch chia đến 1000ml. Sau đó đổ đầy nước vào bình đong để hỗn hợp dung dịch bằng 1000ml. Khuấy đều dung dịch trong bình và kiểm tra sự keo tụ của dung dịch, kiểm soát độ pH của dung dịch thí nghiệm khoảng bằng 7,0. Khi dung dịch không có biểu hiện keo tụ, khuấy đều dung dịch và bắt đầu thí nghiệm bằng cách thả tỷ trọng kế vào bình đong. Khoảng lắng chìm của tỷ trọng kế vào trong bình đong được xác định dựa trên thang đo của tỷ trọng kế. Thời gian thực hiện thí nghiệm theo các mốc thời gian 30'', 1' 2' 5' 10' 15' 30' 1h 2h 5h 10h và 24h. Trong quá trình thí nghiệm ghi lại nhiệt độ phòng thí nghiệm.



(a) Bình đong dung tích 1000ml



(b) Tỷ trọng kế

Hình 3. Dụng cụ thí nghiệm thành phần hạt

Thí nghiệm khối lượng riêng

Thí nghiệm xác định khối lượng riêng của các mẫu bùn được thực hiện theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 4195-1995. Tương tự phương pháp thí nghiệm thành phần hạt, mẫu bùn phải được phơi khô gió và nghiền nhỏ bằng cối sứ và chày bọc cao su. Sau đó, mẫu được rây qua sàng 2,0mm để loại bỏ các hạt có kích thước lớn.

Dụng cụ thí nghiệm bao gồm:

Tủ sấy tùy chỉnh được nhiệt độ;

Cân kỹ thuật có độ chính xác đến 0,01g

Bình tỷ trọng có dung tích từ 100cm³

Phễu rót nước

Bình và bơm hút chân không



Hình 4. Thí nghiệm phân tích khối lượng riêng

Khi chuẩn đầy đủ các dụng cụ, xác định khối lượng của các bình tỷ trọng dùng trọng thí nghiệm. Sau đó, cho một lượng đất khô khoảng 20g đã sàng qua rây 2mm vào bình và đem cân xác định chính xác khối lượng của bình và đất khô. Đổ nước cất vào bình, thường đổ đến khoảng 2/3 của bình và lắc đều sau đó cho đun sôi trên bếp cát trong thời gian khoảng 1h. Sau khi đun sôi, cho thêm nước cất vào bình đến vạch ở miệng bình và đậy nắp và chờ cho dung dịch nguội ở nhiệt độ phòng. Sau đó đem cân để xác định khối lượng của bình, đất và nước.

Sau khi cân xong đổ đất và nước trong bình ra và rửa sạch bình. Cho đầy nước cất vào bình và lau khô bên ngoài. Đậy nắp bình và đem cân nhằm xác định khối lượng của bình với nước.

Từ các tham số trên, tính toán xác định được khối lượng riêng của các mẫu đất bùn.

Thí nghiệm độ ẩm giới hạn chảy, độ ẩm giới hạn dẻo

Thí nghiệm xác định độ ẩm giới hạn chảy và độ ẩm giới hạn dẻo của đất được thực hiện theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 4197-2012.

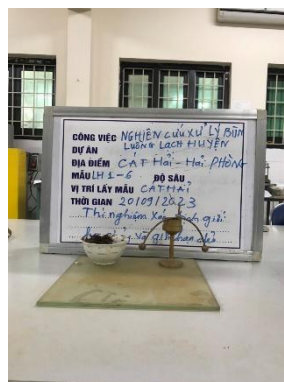
Thí nghiệm xác định độ ẩm giới hạn dẻo WP nhằm xác định hàm lượng nước tại đó đất chuyển từ trạng thái nửa cứng sang trạng thái dẻo, phản ánh khả năng biến dạng dẻo của đất hạt mịn. Theo TCVN 4197:2012, mẫu đất sử dụng trong thí nghiệm là phần

đất lọt sàng 0,425 mm, được làm khô gió và trộn đều với nước cát đến trạng thái dẻo đồng nhất, không dính tay. Sau khi chuẩn bị, một lượng đất vừa đủ được lấy ra, vo tròn bằng tay trên mặt phẳng nhẵn hoặc tấm kính để tạo thành sợi đất có đường kính giảm dần. Quá trình vê đất được thực hiện nhẹ nhàng, đều tay, không ép mạnh, cho đến khi sợi đất đạt đường kính xấp xỉ 3 mm. Tại thời điểm này, nếu sợi đất bắt đầu xuất hiện các vết nứt dọc theo chiều dài và bị đứt thành các đoạn ngắn, thì độ ẩm của đất được coi là đạt giới hạn dẻo. Phần đất bị đứt được thu gom lại, cho vào hộp xác định độ ẩm và tiến hành xác định hàm lượng nước theo phương pháp sấy khô ở nhiệt độ 105–110°C. Thí nghiệm được lặp lại ít nhất hai lần với các phần đất khác nhau, và giá trị W_p được lấy bằng trung bình cộng của các kết quả hợp lệ. Độ ẩm giới hạn dẻo là chỉ tiêu quan trọng dùng để đánh giá tính dẻo, khả năng thi công và tính ổn định của đất trong các công trình địa kỹ thuật.

Thí nghiệm xác định độ ẩm giới hạn chảy WL nhằm xác định hàm lượng nước tại đó đất chuyển từ trạng thái dẻo sang trạng thái chảy, thể hiện mức độ mềm yếu của đất khi chịu tác động cơ học. Theo TCVN 4197:2012, thí nghiệm được thực hiện bằng dụng cụ Casagrande. Mẫu đất lọt sàng 0,425 mm được trộn với nước cát đến trạng thái giữa chảy và trạng thái dẻo, đồng nhất, sau đó cho vào đĩa kim loại của thiết bị Casagrande và san phẳng bề mặt. Một rãnh tiêu chuẩn được tạo ở giữa mẫu đất bằng dao rãnh chuyên dụng. Tiếp theo, tay quay của thiết bị được quay đều với tốc độ khoảng 2 vòng/giây, làm cho đĩa đất nâng lên và rơi tự do từ độ cao tiêu chuẩn. Số lần đập được đếm cho đến khi hai mép rãnh khép lại trên chiều dài khoảng 12 mm. Thí nghiệm được thực hiện với nhiều độ ẩm khác nhau, thường từ 3 đến 4 lần, sao cho số lần đập nằm trong khoảng 15–35 lần. Sau mỗi lần xác định số cú gõ, mẫu đất được lấy ra để xác định độ ẩm. Kết quả được biểu diễn trên đồ thị quan hệ giữa logarit số lần đập và độ ẩm. Độ ẩm giới hạn chảy WL được xác định là độ ẩm tương ứng với 25 lần đập trên đường thẳng nội suy. Chỉ tiêu WL có ý nghĩa quan trọng trong phân loại đất, đánh giá trạng thái làm việc và khả năng chịu tải của nền đất trong thiết kế công trình.



(a)-Thí nghiệm tỷ trọng kế xác định thành phần hạt



(b)-Thí nghiệm xác định độ ẩm giới hạn chảy và độ ẩm giới hạn dẻo

Hình 5. Thí nghiệm một số tính chất vật lý của bùn nạo vét

Thí nghiệm xác định hàm lượng muối

Thí nghiệm xác định hàm lượng muối hòa tan trong đất được thực hiện theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 8727-2012.

Các mẫu đất bùn sau khi được lấy phải được bảo quản trong hộp nhựa hoặc túi kín nước nhằm không gây thất thoát nước tách ra từ trong bùn. Sau khi về phòng thí nghiệm mẫu được hong khô trong điều kiện phòng thí nghiệm và được phân tán bằng cối sứ và chày bọc cao su. Các mẫu thí nghiệm được rây qua sàng 2,0mm. Cân khoảng 500g đất đem đi thí nghiệm. Muối trong đất được chiết suất bằng nước cất không chứa CO₂. Nước được cho vào mẫu để hòa tan hoàn toàn muối trong đất. Sau đó học dung dịch đất qua giấy lọc mịn để rút ra hết dung dịch nước muối. Cô cạn dung dịch nước chiết và sấy khô cạn ở nhiệt độ 150°C đến khối lượng cạn không đổi. Xác định khối lượng cạn sấy khô. Từ lượng cạn sấy khô và lượng đất khô thí nghiệm tính toán tổng hàm lượng muối hòa tan.

Thí nghiệm xác định hàm lượng hữu cơ

Thí nghiệm xác định hàm lượng hữu cơ được thực hiện theo tiêu chuẩn Việt nam TCVN 8726-2012.

Thiết bị thí nghiệm:

Tủ sấy, có thể sấy tới 300°C, có role tự điều chỉnh nhiệt độ và nhiệt kế kèm theo:

- Bình hút ẩm có chất hút ẩm silicagel;
- Các cân phân tích có độ chính xác 0,001 g hoặc 0,0001 g;
- Cối và chày bằng sứ hoặc thủy tinh, đầu chày bọc cao su;
- Các sàng thí nghiệm lỗ 2 mm; 0,25 mm;
- Hộp chia mẫu nhiều rãnh hoặc dụng cụ chia mẫu thích hợp;
- Các ống đong bằng thủy tinh, có dung tích chuẩn 10; 25 ; 50; 100; 250 ;500 và 1000 ml;
- Ống hút (pipet) chia vạch chính xác đến 0,1 ml;
- Ống chuẩn độ (buret) các loại dung tích 10; 25 ml, chia vạch chính xác đến 0,1 ml.
- Ống nhỏ giọt;
- Bình tam giác các loại, có dung tích chuẩn 50; 100; 250; 500 và 1000 ml;

Chuẩn bị mẫu thí nghiệm:

Dùng cối và chày bằng sứ hoặc thủy tinh, đầu chày bọc cao su để nghiền vụn đất. Sau đó, trộn thật đều đất rồi dùng hộp chia mẫu nhiều rãnh hoặc bằng phương pháp chia đôi liên tiếp để lấy ra một lượng đất đại diện dùng thí nghiệm. Lượng đất đại diện cần lấy phụ thuộc vào loại đất, sao cho từ đó nhận được không ít hơn 100 g phần đất hạt lọt sàng 2 mm, có thể tham khảo căn cứ sau: cần lấy ít nhất 300 g, đối với đất bùn sét.

Cho mẫu thử nghiệm 5 g (đã lấy theo 4.4.1.6) vào bình tam giác dung tích 250 ml, thêm vào đó 250 ml dung dịch axit clohydric 25% thể tích.

- Đun bình đựng dung dịch đất trên bếp yếu (nhỏ lửa), đồng thời kiểm tra sự có mặt sunfua trong đất bằng cách hơ trên miệng bình một mảnh giấy axetat chì. Giấy sẽ chuyển thành màu đen nếu đất có chứa sunfua hydro, thì phải rửa mẫu theo như quy định trong 4.2.2 để loại bỏ sunfua ra khỏi đất trước khi tiến hành xác định hàm lượng chất hữu cơ; nếu không có sunfua (giấy không chuyển thành màu đen) thì bỏ qua thao tác này, nhưng cần rửa mẫu để loại bỏ clorua.

Cho mẫu đất dùng thí nghiệm (50g đã lấy theo 4.4.1.6) vào bình tam giác dung tích 250 ml;

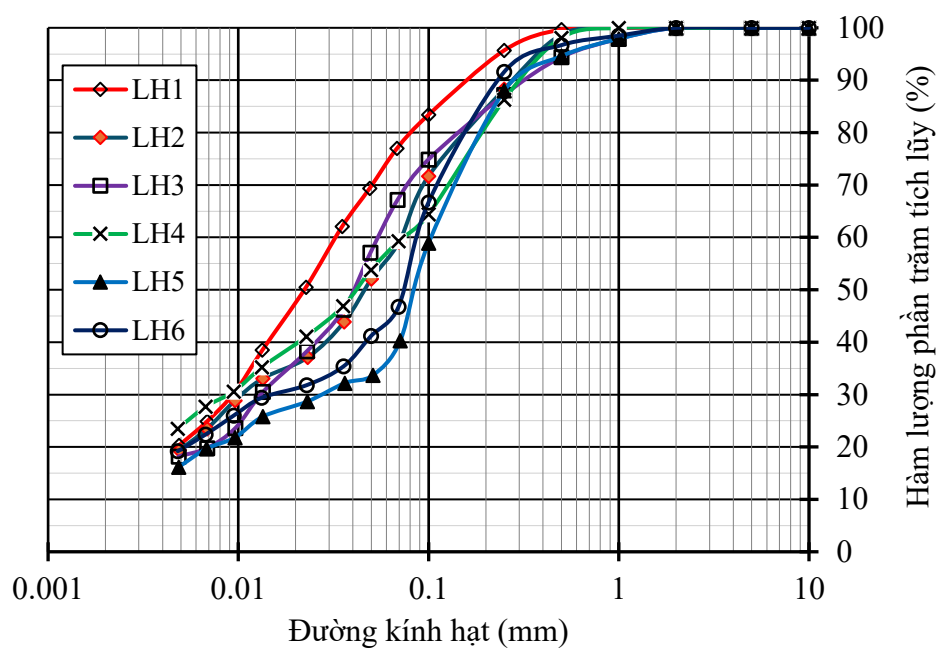
- Thêm dần từng lượng nhỏ dung dịch axit sunfuric 1mol/L vào bình chứa mẫu và lắc đều, cho đến khi không còn sunfua hydro trong đất (khi hơ giấy axetat chì trên miệng bình không thấy giấy bị nhuộm màu đen);

Tắm ướt giấy lọc định tính và lót vào phễu có đường kính miệng khoảng 10 cm, sao cho kín khắp mặt trong của phễu. Dùng bình tia và bằng nước cất để chuyển hết mẫu dung dịch đất trong bình tam giác vào phễu lọc và rửa mẫu bằng nước cất. Cần thận để giữ lại tất cả các hạt rắn; rửa mẫu cho đến khi hết axit

Tiếp tục dùng nước cất rửa mẫu trên phễu lọc để loại bỏ clorua ra khỏi đất, cho đến khi không còn thấy đục khi dùng một giọt nitrat bạc để thử nước lọc chảy ra ở cuống phễu.

Dem sấy khô giấy lọc và đất ở trên đó trong khoảng từ 3h đến 4 h ở 45⁰C đến 50⁰, rồi để nguội trong bình hút ẩm. Sau đó, cẩn thận bóc vỏ giấy lọc, thu hết đất và nghiền lại cho lọt hết qua sàng lỗ 0,25 mm.

Kết quả phân tích hạt cho thấy rằng nhóm hạt sét (<0.005 mm) dao động trong khoảng từ 16.4 đến 23.9%, nhóm hạt bụi (0.005-0.05mm) dao động trong khoảng từ 16.9 đến 49.1%. Nhóm hạt cát (0.05-2mm) dao động trong khoảng từ 33.3 đến 66.7%. Độ ẩm giới hạn chảy của mẫu đất dao động từ 29.7% đến 37.5%. Độ ẩm giới hạn dẻo dao động trong khoảng từ 18.4% đến 24.1%. Với kết quả phân tích thành phần hạt, độ ẩm giới hạn chảy và độ ẩm giới hạn dẻo kết hợp với quan sát lượng hữu cơ, các mẫu đất bùn lũng Lạch Huyện có thể xếp vào loại đất bùn sét pha.



Hình 7. Đường cong thành phần hạt của các mẫu đất thí nghiệm

Bảng 1. Các tính chất vật lý của bùn nạo vét luồng lạch Hải Phòng

BẢNG TỔNG HỢP CHỈ TIÊU CƠ LÝ

Nghiên cứu ứng dụng xử lý cao hoạt hóa để cải tạo bùn nạo vét các cửa sông, luồng lạch khu vực Hải Phòng làm vật liệu san lấp và đắp nền.

Đề tài:
Mã số: : B2025-MDA-01

TT - No.	Lỗ khoan - Boring	Số hiệu mẫu - Sample No.	Độ sâu mẫu(m) Depth											Độ ẩm tự nhiên Natural moisture content	Giới hạn chảy Liquid limit	Giới hạn dẻo Plastic Limit	Chỉ số dẻo Plastic Index	Độ sệt Liquidity Index	Khối lượng thể tích Bulk density		Khối lượng riêng Specific gravity	Hệ số rỗng tự nhiên Void Ratio	Độ lỗ rỗng Porosity	Độ bão hòa Degree of Saturation	Hàm lượng hữu cơ (%)	Hàm lượng muối	Phân loại đất 5747-1993 CLASSIFICATION		
																			Từ - From	,								Đến - To	Tự nhiên Wet Density
			2.0 - 1.0 mm	0.5 - 1.0 mm	0.25 - 0.50 mm			0.08 - 0.25mm	0.06- 0.08mm	0.01 - 0.06mm	0.002 - 0.01mm	< 0.002mm																	
													W																
1	2	3	4	5	6		6	7	8	9	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	
1	VT1	LH1	0.00	-	1.00	0.00	0.30	4.00	12.30	13.70	38.30	10.80	20.60	76.26	57.08	23.20	33.88	1.57	1.54	0.87	2.65	2.035	67.05	99.30	10.13	3.10	CH		
2	VT2	LH2	0.00	-	1.00	0.00	1.30	10.40	16.60	19.60	22.80	9.70	19.60	73.55	58.18	22.90	35.28	1.44	1.54	0.89	2.63	1.964	66.26	98.50	15.54	3.22	CH		
3	VT3	LH3	0.00	-	1.00	2.10	3.50	7.20	12.30	17.60	33.10	5.90	18.30	71.55	49.55	18.40	31.15	1.71	1.53	0.89	2.66	1.975	66.38	96.38	10.71	3.28	CH		
4	VT4	LH4	0.00	-	1.00	0.00	1.90	11.80	21.90	10.60	22.60	7.30	23.90	74.89	60.23	24.10	36.13	1.41	1.54	0.88	2.66	2.029	66.98	98.20	12.41	3.01	CH		
5	VT5	LH5	0.00	-	1.00	2.10	3.30	6.60	29.10	25.60	11.10	5.80	16.40	74.24	50.10	19.30	30.80	1.78	1.54	0.88	2.65	2.004	66.71	98.16	14.35	2.91	CH		
6	VT6	LH6	0.00	-	1.00	1.50	1.80	5.10	24.90	25.50	14.70	7.00	19.50	77.46	51.88	18.60	33.28	1.77	1.56	0.88	2.67	2.041	67.12	101.32	16.79	2.94	CH		
7	VT7	HP1	0.00	-	1.00		0.00	0.00	13.00	6.18	43.56	24.52	12.74	80.25	58.05	37.29	20.76	2.07	1.50	0.83	2.65	2.192	68.67	97.09	2.8	1.7	MH		
8	VT8	HP2	0.00	-	1.00		0.00	0.00	9.00	6.90	47.89	22.14	14.07	77.43	56.18	37.41	18.77	2.13	1.53	0.86	2.65	2.065	67.37	99.29	2.9	2.7	MH		
9	VT9	HP3	0.00	-	1.00		0.00	0.00	9.00	6.80	47.33	22.92	13.95	83.53	56.30	35.20	21.10	2.29	1.51	0.82	2.67	2.243	69.16	99.35	2.3	2.6	MH		
10	VT10	HP4	0.00	-	1.00		0.00	0.00	23.00	5.50	34.17	23.90	13.43	71.53	56.44	33.40	23.04	1.65	1.52	0.89	2.67	2.008	66.75	95.15	3.1	1.9	MH		
11	VT11	HP5	0.00	-	1.00		0.00	0.00		5.59	39.70	37.28	17.43	76.91	76.96	41.60	35.36	1.00	1.50	0.85	2.64	2.113	67.88	96.00	3.8	1.1	MH		
12	VT12	HP6	0.00	-	1.00		0.00	0.00	13.00	6.54	37.83	27.07	15.56	70.42	45.57	30.87	14.70	2.69	1.57	0.92	2.67	1.897	65.49	99.05	1.8	1.2	ML		
13	VT13	HP7	0.00	-	1.00		0.00	0.00		1.63	16.11	35.74	46.52	76.06	66.77	37.83	28.94	1.32	1.54	0.88	2.67	2.046	67.17	99.09	9.0	1.5	MH		
14	VT14	HP8	0.00	-	1.00		0.00	0.00		5.82	54.61	25.59	13.98	74.87	62.55	38.88	23.67	1.52	1.54	0.88	2.66	2.025	66.94	98.35	5.5	2.7	MH		
15	VT15	HP9	0.00	-	1.00		0.00	0.00		7.37	41.08	35.57	15.98	83.53	80.80	43.87	36.93	1.07	1.51	0.83	2.70	2.276	69.47	99.24	7.5	1.3	MH		

16	VT16	HP10	0.00	-	1.00		0.00	0.00	25.00	7.08	40.58	15.74	11.60	71.94	49.61	29.79	19.82	2.13	1.56	0.91	2.64	1.903	65.55	99.64	3.9	2.2	ML
17	VT17	HP11	0.00	-	1.00		0.00	0.00	7.00	4.84	41.84	28.28	18.04	84.58	59.56	36.24	23.32	2.07	1.51	0.82	2.65	2.244	69.18	99.81	7.3	3.1	MH
18	VT18	HP12	0.00	-	1.00		0.00	0.00		5.54	21.58	37.04	35.84	72.91	66.71	39.98	26.73	1.23	1.53	0.89	2.64	1.981	66.45	97.22	4.4	1.7	MH
19	VT19	HP13	0.00	-	1.00		0.00	0.00	6.00	16.23	43.52	21.63	12.62	76.06	42.56	27.46	15.10	3.22	1.52	0.87	2.70	2.122	67.97	96.92	0.9	2.1	ML
20	VT20	HP14	0.00	-	1.00		0.00	0.00	4.00	6.01	47.02	27.35	15.62	70.18	50.69	34.55	16.14	2.21	1.55	0.91	2.63	1.885	65.34	97.78	3.8	2.5	MH
21	VT21	HP15	0.00	-	1.00		0.00	0.00	10.00	8.09	43.66	23.63	14.62	71.32	44.86	28.68	16.18	2.64	1.53	0.89	2.68	2.012	66.80	95.08	2.9	3.3	ML
22	VT22	HP16	0.00	-	1.00		0.00	0.00	5.00	8.72	45.03	26.37	14.88	77.26	52.80	29.61	23.19	2.05	1.52	0.86	2.70	2.140	68.15	97.41	3.9	1.0	MH
23	VT23	HP17	0.00	-	1.00		0.00	0.00		12.37	26.90	44.08	16.65	73.09	136.02	75.74	60.28	-0.04	1.50	0.87	2.63	2.025	66.94	94.89	17.5	1.5	MH
24	VT24	HP18	0.00	-	1.00		0.00	0.00		7.17	50.32	29.14	13.37	80.90	61.74	38.45	23.29	1.82	1.52	0.84	2.65	2.149	68.24	99.61	4.7	1.7	MH
25	VT25	HP19	0.00	-	1.00		0.00	0.00	26.00	7.16	47.29	13.00	6.55	82.36	36.67	28.56	8.11	6.63	1.52	0.83	2.65	2.189	68.64	99.80	1.5	1.4	ML
26	VT26	HP20	0.00	-	1.00			0.50	19.50	8.90	39.70	14.20	17.20	78.14	39.11	27.50	11.61	4.36	1.51	0.85	2.67	2.151	68.26	96.86		4.5	ML
27	VT27	HP21	0.00	-	1.00					3.82	39.18	37.18	19.82	74.00	48.04	29.20	18.84	2.38	1.53	0.88	2.68	2.055	67.27	96.46	1.2	3.0	ML
28	VT28	HP22	0.00	-	1.00			0.10	7.70	5.00	40.70	24.30	22.20	80.68	53.41	35.00	18.41	2.48	1.52	0.84	2.71	2.227	69.01	98.26		1.1	MH
29	VT29	HP23	0.00	-	1.00			0.50	23.90	8.60	42.40	8.50	16.10	78.87	44.04	30.40	13.64	3.55	1.51	0.84	2.68	2.172	68.48	97.28		3.0	ML
30	VT30	HP24	0.00	-	1.00				19.00	7.46	43.84	18.72	10.98	83.86	44.37	30.62	13.75	3.87	1.51	0.82	2.66	2.235	69.08	99.83	2.9	2.7	ML

Nhóm nghiên cứu đã tiến hành lấy mẫu bùn tại các luồng lạch khu vực Hải Phòng đảm bảo tính đại diện cho bùn nạo vét tại các cửa sông ven biển.

Các mẫu được vận chuyển về phòng thí nghiệm Địa kỹ thuật công trình, Trường Đại học Mỏ - Địa chất để thực hiện các thí nghiệm phân tích thành phần hạt, hàm lượng muối và hàm lượng hữu cơ.

Sáu mẫu thí nghiệm nhằm xác định thành phần hạt, hàm lượng muối, hàm lượng hữu cơ của các mẫu bùn tại các bãi thải. Kết quả thí nghiệm đảm bảo độ tin cậy và chính xác. Kết quả này là tiền đề cho công tác gia cố tiếp theo.

4.2. Đặc điểm của xỉ lò cao nghiền mịn S95

Xi lò cao nghiền mịn S95 (Ground Granulated Blast Furnace Slag – GGBFS cấp S95) là một loại phụ gia khoáng hoạt tính cao, được sản xuất từ xỉ hạt lò cao sau khi làm nguội nhanh bằng nước và nghiền mịn đến độ mịn tiêu chuẩn. Về thành phần hóa học, xỉ lò cao S95 chủ yếu bao gồm các oxit bazơ và axit có hoạt tính pozzolanic và thủy lực tiềm ẩn. Hàm lượng CaO thường nằm trong khoảng 35–42%, đóng vai trò là nguồn canxi quan trọng cho các phản ứng thủy hóa. SiO₂ chiếm khoảng 30–38%, là thành phần chính tham gia tạo gel liên kết C–S–H. Al₂O₃ có hàm lượng tương đối cao, thường từ 10–15%, góp phần hình thành các sản phẩm hydrat aluminat như C–A–H và C–A–S–H. MgO chiếm khoảng 5–10%, tồn tại chủ yếu ở dạng ổn định, không gây trương nở có hại khi hàm lượng nằm trong giới hạn cho phép. Các oxit kiềm như Na₂O và K₂O thường rất thấp (tổng kiềm quy đổi < 1,0%), trong khi hàm lượng SO₃ thường < 2,0%, đảm bảo xỉ lò cao S95 có tính ổn định hóa học tốt và ít nguy cơ gây phản ứng có hại.

Về tính chất vật lý, xỉ lò cao nghiền mịn S95 có khối lượng riêng dao động trong khoảng 2,85–2,95 g/cm³, thấp hơn một chút so với xi măng Portland, giúp cải thiện khả năng thi công và giảm khối lượng thể tích của hỗn hợp vật liệu. Độ mịn Blaine là chỉ tiêu quan trọng đặc trưng cho cấp S95, thường đạt ≥ 4000 cm²/g, trong đó nhiều sản phẩm thương mại đạt 4200–4500 cm²/g. Hàm lượng sót sàng 45 μ m thường nhỏ hơn 10%, thể hiện mức độ nghiền mịn cao, tạo điều kiện thuận lợi cho các phản ứng

hóa học diễn ra nhanh và đồng đều. Nhờ độ mịn lớn và cấu trúc pha thủy tinh chiếm ưu thế (thường > 90%), xi lò cao S95 có chỉ số hoạt tính cường độ cao, đạt $\geq 95\%$ ở tuổi 28 ngày và có thể vượt 100% ở tuổi 90 ngày khi so sánh với mẫu đối chứng xi măng.

Xét về đặc điểm cấu trúc và tính chất, xi lò cao S95 có cấu trúc vô định hình giàu năng lượng, khác với các khoáng kết tinh ổn định, do đó có khả năng tham gia mạnh mẽ vào các phản ứng pozzolanic và thủy lực khi có môi trường kiềm thích hợp. Các hạt xi có hình dạng góc cạnh, bề mặt nhám, giúp tăng khả năng bám dính cơ học và hóa học với các hạt vật liệu khác như đất, cốt liệu hoặc sản phẩm hydrat. Ngoài ra, xi lò cao nghiền mịn có nhiệt thủy hóa thấp, giúp hạn chế nứt do nhiệt, đồng thời cải thiện độ bền lâu, khả năng chống xâm thực sunfat và giảm tính thấm của vật liệu sau khi đóng rắn.

Nhờ sự kết hợp giữa thành phần hóa học giàu hoạt tính, độ mịn cao và tính ổn định vật lý – hóa học, xi lò cao nghiền mịn S95 được đánh giá là một vật liệu khoáng bổ sung hiệu quả, không chỉ trong lĩnh vực xi măng – bê tông mà còn có tiềm năng lớn trong gia cố và cải tạo đất yếu, đặc biệt là đất sét và đất bùn, góp phần nâng cao cường độ, giảm biến dạng và hướng tới phát triển bền vững trong xây dựng.

Bảng 2. Kết quả thử nghiệm mẫu xi lò cao nghiền mịn S95

STT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Phương pháp thử
1	Chỉ số hoạt tính cường độ, phần trăm so với mẫu đối chứng:	%		TCVN11586:2016 (*)
	- - 7 ngày		84	
	- - 28 ngày		115	
2	Tỷ lệ độ lưu động	%	102	TCVN 4030:2003
3	Khối lượng riêng	g/cm ³	288	
4	Bề mặt riêng	cm ² /g	5320	
5	Mất khi nung (LOI)	%	-0.25	TCVN 8265:2009
6	MgO	%	7.86	TCVN 8265:2009 (*)
7	SO ₃	%	0.09	
8	Độ ẩm	%	0.00	
9	Hệ số kiềm tính K	%	1.69	TCVN 4315:2017 (*)
10	Hàm lượng Cl	%	< 0.001	TCVN 141:2008

4.3. Thiết kế cấp phối thí nghiệm

Xi măng được sử dụng để gia cố bùn nạo vét là xi măng PCB40 Bút Sơn, loại xi măng thuộc hệ thống Vicem. Thành phần cũng như các đặc tính của xi măng PCB40 Bút Sơn.

Công tác chế bị mẫu đất gia cố bùn nạo vét bằng xi măng kết hợp với xỉ lò cao nghiền mịn S95 được thực hiện theo phụ lục E trong tiêu chuẩn TCVN9403 – 2012. Hàm lượng xi măng và xỉ lò cao nghiền mịn S95 được thử nghiệm với 5 hàm lượng khác nhau. Trong mỗi hàm lượng xi măng và xỉ lò cao S95, tỷ lệ giữa xi măng và xỉ lò cao S95 thay đổi với tỷ lệ XN/S95 lần lượt là 40/60%, 50/50%, 60/40%, 80/20%. Theo tiêu chuẩn TCVN9403-2012 tỷ lệ nước trên xi măng (N/XM) là 0.8. Dựa trên hàm lượng xi măng và xỉ S95 và tỷ lệ XN/S95, chúng tôi tính toán hàm lượng các hợp phần đất ẩm, đất khô gió, khối lượng xi măng, khối lượng xỉ lò cao nghiền mịn S95 và lượng nước trộn như bảng 3.

Bảng 3. Hàm lượng xi măng và xỉ lò cao

ST T	Tên mẫu	HL XM+S9 5	Tỷ lệ XM-S95		Số lượng mẫu	KL đất ẩm TN	KL đất khô gió	KL XM	KL S95	Lượng nước trộn
		kg/cm ³	XM	S95		(kg)	(kg)	(g)	(g)	(g)
1	M1.1	60	40	60	9	3.796	2.743	50.8938	76.3407	1154.824 1
	M1.2		50	50	9	3.796	2.743	63.6173	63.6173	1154.824 1
	M1.3		60	40	9	3.796	2.743	76.3407	50.8938	1154.824 1
	M1.4		80	20	9	3.796	2.743	101.7876	25.4469	1154.824 1
2	M2.1	80	40	60	9	3.796	2.743	67.8584	101.7876	1188.753 3
	M2.2		50	50	9	3.796	2.743	84.8230	84.8230	1188.753 3
	M2.3		60	40	9	3.796	2.743	101.7876	67.8584	1188.753 3
	M2.4		80	20	9	3.796	2.743	135.7168	33.9292	1188.753 3
3	M3.1	110	40	60	9	3.796	2.743	93.3053	139.9580	1239.647 1
	M3.2		50	50	9	3.796	2.743	116.6316	116.6316	1239.647 1
	M3.3		60	40	9	3.796	2.743	139.9580	93.3053	1239.647 1

	M3.4		80	20	9	3.796	2.743	186.6106	46.6527	1239.647 1
4	M4.1	140	40	60	9	3.796	2.743	118.7522	178.1283	1290.540 9
	M4.2		50	50	9	3.796	2.743	148.4403	148.4403	1290.540 9
	M4.3		60	40	9	3.796	2.743	178.1283	118.7522	1290.540 9
	M4.4		80	20	9	3.796	2.743	237.5044	59.3761	1290.540 9
5	M5.1	160	40	60	9	3.796	2.743	135.7168	203.5752	1324.470 1
	M5.2		50	50	9	3.796	2.743	169.6460	169.6460	1324.470 1
	M5.3		60	40	9	3.796	2.743	203.5752	135.7168	1324.470 1
	M5.4		80	20	9	3.796	2.743	271.4336	67.8584	1324.470 1
Tổng khối lượng					180	75.9166	54.86	2682.53	1982.74	24792.94

Các tổ hợp mẫu đất gia cố bằng xi măng và xi lò cao nghiền mịn S95 được chế bị theo quy trình như phụ lục E – Phương pháp thí nghiệm trong phòng xác định sức kháng nén của mẫu đất – xi măng (phương pháp trộn ướt) tiêu chuẩn TCVN 9403-2012. Quy trình chế bị mẫu thí nghiệm như sau:

1- Chuẩn bị mẫu đất: mẫu đất bùn được trộn đều với nhau và phân chia khối lượng cho mỗi tổ hợp mẫu. Khối lượng đất theo mỗi tổ hợp mẫu sẽ được đem xác định độ ẩm ban đầu và được hong khô gió. Mẫu sau khi được hong khô gió sẽ được nghiền nhỏ lọt qua sàng 5mm.

2- Cân các hợp phần đất khô gió, khối lượng xi măng, khối lượng xi lò cao nghiền mịn S95 và lượng nước cần trộn theo từng tổ hợp mẫu như bảng 3. Nước dùng để trộn là nước sạch cấp cho sinh hoạt. Hỗn hợp được trộn đều trong thùng trộn. Thời gian trộn mẫu được thực hiện trong khoảng 10-15 phút.

3- Đúc mẫu: dùng khuôn hình trụ có đường kính 50mm và chiều cao 100mm bằng thép hoặc nhôm có độ cứng cao và dễ dàng tháo lắp. Việc sử dụng khuôn hình trụ đã được báo cáo với chủ nhiệm đề án và được chủ nhiệm đề án cho phép thực hiện. Bề mặt trong của khuôn được vệ sinh sạch sẽ đảm bảo phải trơn bóng, sai số phẳng không vượt quá 0.05% chiều dài cách. Sai số độ vuông góc của mặt đáy không vượt quá $\pm 0.5^\circ$.

Khuôn mẫu được đặt trên máy rung. Hỗn hợp đất được chia thành 2 phần, một phần sẽ được đổ vào khuôn chiếm khoảng 50% thể tích khuôn và rung trong khoảng 1-2 phút, sau đó đổ tiếp phần còn lại và rung thêm 1-2 phút. Để đảm bảo độ đồng

đều, đặc chắc của mẫu thử, mẫu được đặt trên máy rung, tần số 3000 ± 200 lần trên phút. Kết thúc quá trình rung, bề mặt mẫu được miết đảm bảo độ phẳng cũng như tránh cho mẫu bị rỗ mặt.

4- Mẫu sau khi được chế bị xong, giữ nguyên trong khuôn và được bọc trong túi ni lông để giữ ẩm. Duy trì nhiệt độ trong phòng để đảm bảo độ ẩm của mẫu. Sau 3 ngày tùy theo cường độ của mẫu có thể tháo khuôn. Mẫu được bảo quản trong tủ giữ ẩm và nhiệt độ phòng khoảng 25°C cho tới khi thực hiện các thí nghiệm nén xác định cường độ theo yêu cầu. Các mẫu sau khi tháo khuôn sẽ được đo chiều cao, đường kính cũng như xác định trọng lượng của mẫu.



(a) Chế bị mẫu sử dụng máy rung



(b) – Mẫu được bảo quản sau khi chế bị

Hình 5. Công tác chế bị mẫu trong phòng thí nghiệm

Thí nghiệm xác định cường độ kháng nén trong điều kiện không nở hông (qu) của mẫu đất gia cố tuân thủ theo tiêu chuẩn TCVN 9403-2012 và tiêu chuẩn ASTM D2166. Mẫu đất gia cố sẽ được bảo dưỡng và thí nghiệm xác định cường độ ở các độ tuổi 7, 14 và 28 ngày. Yêu cầu đối với máy nén phải có hành trình để khi đạt tới tải trọng phá hủy dự kiến của của mẫu thử không nhỏ hơn 20% và không vượt quá 80% tổng hành trình. Sai số tương đối của số đọc khoảng quá 2%.

Để thực hiện công tác nén mẫu gia cố, đơn vị thực hiện tiến hành trên máy nén CONTROLS TRITECH 50 kN. Máy được vận hành theo hướng điều khiển biến dạng. Lực tác dụng và biến dạng của mẫu trong khi nén được đo ghi tự động dựa trên các cảm biến lực và sensor đo biến dạng.

Mẫu sau khi lấy ra khỏi tủ bảo dưỡng được đặt giữa tâm bàn nén dưới của máy nén. Khi bàn nén trên tiếp xúc gần mẫu, điều chỉnh để gối cầu tiếp xúc đúng vào vị trí trên bàn nén phía trên. Quá trình thí nghiệm được thực hiện bằng phương pháp

điều khiển biến dạng với tốc độ biến dạng được lựa chọn là 1.0mm/ phút. Quá trình thí nghiệm đến khi mẫu bị phá hủy hoàn toàn.

Cường độ kháng nén của mẫu đất gia cố xi măng và xỉ lò cao nghiền mịn S95 được tính theo công thức 1.

$$q_u = \frac{P}{A} \quad (1)$$

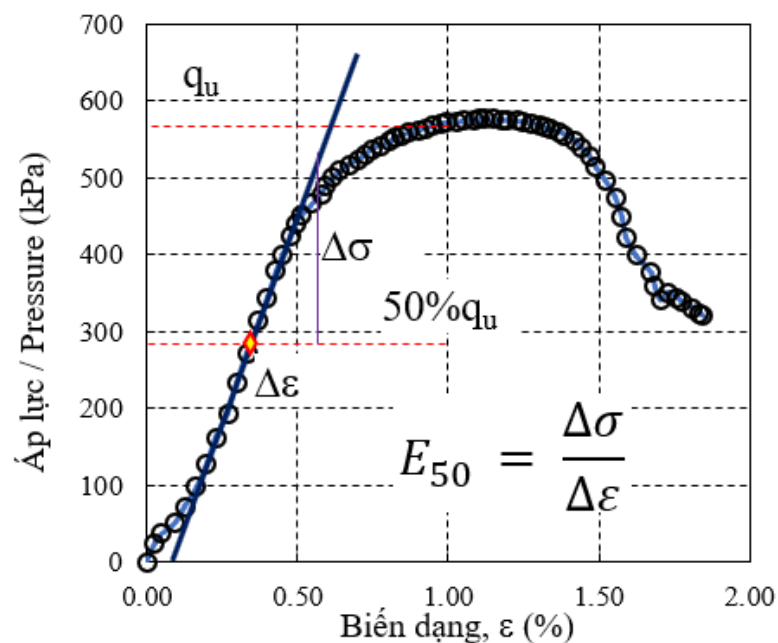
Trong đó, q_u – là cường độ kháng nén của mẫu đất xi măng ở tuổi thí nghiệm (kPa hoặc kN/m²);

P – Tải trọng nén gây phá hủy mẫu (N);

A – Tiết diện chịu nén của mẫu (m²).

Giá trị mô đun đàn hồi của mẫu được tính toán từ trên biểu đồ quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của mẫu thí nghiệm. Giá trị mô đun được tính toán dựa trên độ dốc trung bình của phần đoạn thẳng trên đường cong quan hệ giữa ứng suất và biến dạng. Đoạn thẳng đó tiếp tuyến với đường cong tại điểm có ứng suất bằng 50% ứng suất gây phá hủy mẫu. Giá trị mô đun đàn hồi này còn được gọi là E_{50} . Công thức tính mô đun đàn hồi được thể hiện như công thức 2.

$$E_{50} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2)$$



Hình 7. Đường quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của mẫu đất gia cố

Mỗi nhóm mẫu thử theo các ngày tuổi sẽ được thực hiện trên 3 thời mẫu. Sai số của các thời so với sai số trung bình khoảng 15%.



(a) – Thí nghiệm nén mẫu gia cố 7 ngày tuổi



(b) – Thí nghiệm nén mẫu gia cố 14 ngày tuổi



(c) – Thí nghiệm nén mẫu gia cố 28 ngày tuổi

Hình 7. Thí nghiệm nén đơn trục nỏ hông tự do mẫu bùn gia cố

5. PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

5.1 Cường độ kháng nén (q_u) của mẫu 7 ngày tuổi

Các tổ hợp mẫu chế bị sau khi được bảo dưỡng đủ 7 ngày tuổi sẽ được tiến hành thí nghiệm nén trong điều kiện nỏ hông tự do như đã được đề cập trong tiêu chuẩn TCVN 9403-2012. Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng cường độ của mẫu đất gia cố ở 7 ngày tuổi có xu hướng tăng mạnh với sự tăng lên của hàm lượng xi măng và xỉ lò cao nghiền mịn S94. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 60 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 38.62 đến 77.65 kPa, trung bình khoảng 64.09 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 54 đến 86.6. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 80 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 101.69 đến 225.91 kPa, trung bình khoảng 150.55 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 72.24 đến 109.9. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 110 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 160.65 đến 279.15 kPa, trung bình khoảng 241.33 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 57.6 đến 117.23. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 140 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 377.56 đến 483.83 kPa, trung

binh khoảng 441.34 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 68.95 đến 147.28. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 160 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 421.80 đến 702.79 kPa, trung bình khoảng 582.95 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 83.69 đến 143.8. Kết quả cường độ kháng nén (q_u) của các mẫu gia cố với các hàm lượng xi măng và xỉ lò cao nghiền mịn S95 tương ứng là 60 kg, 80 kg, 110 kg, 140 kg và 160 kg được thể hiện như bảng 4.

Bảng 4. Kết quả cường độ kháng nén (q_u) của mẫu 7 ngày tuổi

Hàm lượng XM+S95 (kg)	XM/S95	Số hiệu mẫu	Kích thước mẫu		Khối lượng (g)	KL thể tích (g/cm^3)	Cường độ q_u (kPa)	Mô đun đàn hồi E_{50} (kPa)	Tỷ số E_{50}/q_u	Cường độ q_u trung bình (kPa)	Mô đun đàn hồi E_{50} trung bình (kPa)
			D (cm)	H (cm)							
60	40/60	M1.1-1	5.00	9.91	361.46	1.858	36.52	2381.02	65.20	38.62	2844.89
		M1.1-2	5.00	9.94	368.01	1.885	44.05	3303.72	74.99		
		M1.1-3	5.00	9.98	358.26	1.829	35.29	2849.92	80.75		
	50/50	M1.2-1	5.00	10.00	365.73	1.863	64.58	4997.62	77.39	72.71	5381.51
		M1.2-2	5.00	9.99	369.01	1.882	72.12	5125.94	71.08		
		M1.2-3	5.00	9.91	363.71	1.869	81.44	6020.96	73.93		
	60/40	M1.3-1	5.00	9.98	367.92	1.877	68.50	5863.52	85.60	67.36	4791.78
		M1.3-2	5.00	9.96	368.17	1.883	67.84	4906.49	72.32		
		M1.3-3	5.00	9.90	359.53	1.849	65.75	3605.32	54.83		
	80/20	M1.4-1	5.00	9.92	356.94	1.832	78.84	5735.46	72.75	77.65	5664.71
		M1.4-2	5.00	9.93	361.37	1.854	78.18	5226.91	66.86		
		M1.4-3	5.00	9.97	362.37	1.852	75.94	6031.76	79.43		
80	40/60	M2.1-1	5.00	9.96	368.16	1.882	113.78	10051.11	88.34	101.69	8517.76
		M2.1-2	5.00	9.91	358.14	1.840	95.39	8323.78	87.26		
		M2.1-3	5.00	9.90	362.99	1.867	95.90	7178.40	74.85		
	50/50	M2.2-1	5.00	9.96	368.84	1.887	127.94	14060.85	109.91	121.72	12142.84
		M2.2-2	5.00	9.91	361.97	1.861	115.36	11635.17	100.86		

Hàm lượng XM+S95 (kg)	XM/S95	Số hiệu mẫu	Kích thước mẫu		Khối lượng (g)	KL thể tích (g/cm ³)	Cường độ qu (kPa)	Mô đun đàn hồi E ₅₀ (kPa)	Tỷ số E ₅₀ /qu	Cường độ qu trung bình (kPa)	Mô đun đàn hồi E ₅₀ trung bình (kPa)
			D (cm)	H (cm)							
		M2.2-3	5.00	9.94	366.35	1.878	121.87	10732.51	88.06		
	60/40	M2.3-1	5.00	9.93	367.73	1.887	218.34	20383.47	93.36	225.91	19026.63
		M2.3-2	5.00	9.94	367.95	1.886	226.08	19385.38	85.75		
		M2.3-3	5.00	9.97	366.34	1.871	233.31	17311.04	74.20		
	80/20	M2.4-1	5.00	9.92	367.90	1.889	158.39	14406.48	90.96	152.87	13829.40
		M2.4-2	5.00	9.92	362.80	1.863	148.56	10731.34	72.24		
		M2.4-3	5.00	9.92	361.44	1.856	151.67	16350.38	107.80		
	110	M3.1-1	5.00	9.93	368.43	1.890	243.29	23309.67	95.81	255.75	22778.89
		M3.1-2	5.00	9.98	369.61	1.886	259.49	21916.63	84.46		
		M3.1-3	5.00	9.92	358.05	1.839	264.48	23110.36	87.38		
		M3.2-1	5.00	9.96	362.23	1.853	259.84	14972.09	57.62	269.77	20441.01
		M3.2-2	5.00	9.91	364.07	1.872	281.03	21245.37	75.60		
		M3.2-3	5.00	9.90	363.54	1.870	268.45	25105.58	93.52		
		M3.3-1	5.00	9.92	368.68	1.893	275.80	19909.44	72.19	279.15	18547.11
		M3.3-2	5.00	9.96	364.23	1.863	272.37	17929.99	65.83		
		M3.3-3	5.00	9.93	363.90	1.866	289.28	17801.92	61.54		
	80/20	M3.4-1	5.00	10.00	371.42	1.892	150.65	13626.84	90.45	160.65	17258.02
		M3.4-2	5.00	9.92	360.20	1.850	168.58	19071.92	113.13		
		M3.4-3	5.00	10.00	367.46	1.872	162.72	19075.32	117.23		
140	40/60	M4.1-1	5.00	9.94	366.87	1.879	420.53	42643.88	101.41	442.15	38936.24
		M4.1-2	5.00	9.92	367.89	1.888	417.57	40492.56	96.97		
		M4.1-3	5.00	9.92	365.09	1.874	488.36	33672.27	68.95		
	50/50	M4.2-1	5.00	9.92	369.61	1.897	378.66	45385.25	119.86	483.83	53345.72
		M4.2-2	5.00	9.90	364.16	1.873	574.99	62417.64	108.55		

Hàm lượng XM+S95 (kg)	XM/S95	Số hiệu mẫu	Kích thước mẫu		Khối lượng (g)	KL thể tích (g/cm ³)	Cường độ q _u (kPa)	Mô đun đàn hồi E ₅₀ (kPa)	Tỷ số E ₅₀ /q _u	Cường độ q _u trung bình (kPa)	Mô đun đàn hồi E ₅₀ trung bình (kPa)
			D (cm)	H (cm)							
	60/40	M4.2-3	5.00	9.99	372.14	1.897	497.84	52234.28	104.92	461.81	56037.00
		M4.3-1	5.00	9.98	370.08	1.888	466.67	54009.41	115.73		
		M4.3-2	5.00	9.92	365.02	1.874	444.00	51436.74	115.85		
		M4.3-3	5.00	9.92	368.28	1.890	474.77	62664.86	131.99		
	80/20	M4.4-1	5.00	9.96	371.53	1.900	341.79	37852.73	110.75	377.56	46622.60
		M4.4-2	5.00	9.97	372.96	1.905	457.19	52869.68	115.64		
		M4.4-3	5.00	9.95	366.36	1.876	333.69	49145.40	147.28		
	40/60	M5.1-1	5.00	9.92	370.48	1.903	600.15	73751.84	122.89	613.48	62984.22
		M5.1-2	5.00	9.92	372.37	1.911	635.65	53197.57	83.69		
		M5.1-3	5.00	9.93	374.70	1.922	604.64	62003.27	102.55		
160	50/50	M5.2-1	5.00	9.93	373.88	1.917	694.07	68820.05	99.15	702.79	76578.54
		M5.2-2	5.00	9.99	373.12	1.902	732.67	81181.03	110.80		
		M5.2-3	5.00	9.97	371.79	1.899	681.64	79734.55	116.97		
	60/40	M5.3-1	5.00	9.99	375.28	1.913	655.62	79045.88	120.57	602.73	66442.83
		M5.3-2	5.00	9.91	369.13	1.898	572.75	58783.17	102.63		
		M5.3-3	5.00	9.91	371.80	1.910	579.83	61499.45	106.06		
	80/20	M5.4-1	5.00	9.91	371.27	1.909	387.27	45246.74	116.84	412.80	51299.07
		M5.4-2	5.00	9.93	371.89	1.907	433.92	48652.20	112.12		
		M5.4-3	5.00	9.92	372.11	1.911	417.22	59998.29	143.80		

5.2. Cường độ kháng nén (q_u) của mẫu 14 ngày tuổi

Các tổ hợp mẫu chế bị sau khi được bảo dưỡng đủ 14 ngày tuổi sẽ được tiến hành thí nghiệm nén trong điều kiện nở hông tự do như đã được đề cập trong tiêu chuẩn TCVN 9403-2012. Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng cường độ của mẫu đất gia cố ở 14 ngày tuổi có xu hướng tăng mạnh với sự tăng lên của hàm lượng xi măng và xỉ lò cao nghiền mịn S94. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 60 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 89.89 đến 142.76 kPa, trung bình khoảng 125.13 kPa, tỷ số

giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 79.37 đến 214.02. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 80 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 130.33 đến 333.89 kPa, trung bình khoảng 269.74 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 82.64 đến 207.47. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 110 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 206.26 đến 605.35 kPa, trung bình khoảng 434.22 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 80.84 đến 238.80. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 140 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 405.20 đến 681.85 kPa, trung bình khoảng 533.80 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 68.69 đến 169.69. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 160 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 751.62 đến 1227.30 kPa, trung bình khoảng 958.69 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 71.58 đến 152.85. Kết quả cường độ kháng nén (q_u) của các mẫu gia cố với các hàm lượng xi măng và xỉ lò cao nghiền mịn S95 tương ứng là 60 kg, 80 kg, 110 kg, 140 kg và 160 kg được thể hiện như bảng 5.

Bảng 5. Kết quả cường độ kháng nén (q_u) của mẫu 14 ngày tuổi

Hàm lượng XM+S95 (kg)	XM/S95	Số hiệu mẫu	Kích thước mẫu		Khối lượng (g)	KL thể tích (g/cm^3)	Cường độ q_u (kPa)	Mô đun đàn hồi E_{50} (kPa)	Tỷ số E_{50}/q_u	Cường độ trung bình q_u (kPa)	Mô đun đàn hồi trung bình E_{50} (kPa)
			D (cm)	H (cm)							
60	40/60	M1.1-2	5.00	9.91	361.74	1.860	135.17	10728.32	79.37	119.50	13917.46
		M1.1-3	5.00	9.91	357.64	1.838	133.44	17495.19	131.11		
		M1.1-5	5.00	9.96	361.17	1.847	89.89	13528.88	150.50		
	50/50	M1.2-1	5.00	9.97	360.54	1.841	141.18	20241.90	143.38	128.84	17382.80
		M1.2-2	5.00	9.91	367.13	1.886	117.09	16688.45	142.53		
		M1.2-5	5.00	9.93	355.10	1.822	128.24	15218.04	118.67		
	60/40	M1.3-1	5.00	9.98	365.39	1.865	111.38	17974.91	161.38	116.44	17809.74
		M1.3-5	5.00	9.98	361.65	1.845	97.12	12069.51	124.27		
		M1.3-6	5.00	9.90	359.03	1.847	140.82	23384.79	166.06		
	80/20	M1.4-1	5.00	9.96	367.28	1.879	134.45	28775.44	214.02	135.74	22310.45
		M1.4-2	5.00	9.95	356.12	1.823	142.76	23467.96	164.39		
		M1.4-5	5.00	9.91	359.93	1.849	130.00	14687.96	112.98		
80	40/60	M2.1-1	5.00	9.98	363.30	1.854	319.34	64015.05	200.46	313.64	52212.46
		M2.1-3	5.00	9.99	365.11	1.861	287.70	49973.81	173.70		
		M2.1-6	5.00	9.96	366.63	1.874	333.89	42648.52	127.73		

Hàm lượng XM+S95 (kg)	XM/S95	Số hiệu mẫu	Kích thước mẫu		Khối lượng (g)	KL thể tích (g/cm ³)	Cường độ q_u (kPa)	Mô đun đàn hồi E_{50} (kPa)	Tỷ số E_{50}/q_u	Cường độ q_u trung bình (kPa)	Mô đun đàn hồi E_{50} trung bình (kPa)
			D (cm)	H (cm)							
	50/50	M2.2-2	5.00	9.98	361.63	1.846	314.74	26009.84	82.64	302.62	48046.94
		M2.2-4	5.00	9.94	364.50	1.867	282.91	58696.50	207.47		
		M2.2-5	5.00	9.96	359.57	1.839	310.22	59434.48	191.59		
	60/40	M2.3-1	5.00	9.92	362.04	1.858	307.16	47292.29	153.97	308.02	51248.69
		M2.3-2	5.00	9.90	357.28	1.838	301.30	53930.94	178.99		
		M2.3-6	5.00	9.97	366.66	1.873	315.61	52522.83	166.42		
	80/20	M2.4-1	5.00	9.97	365.88	1.869	130.33	20442.32	156.85	154.66	22350.10
		M2.4-3	5.00	9.91	364.31	1.873	163.03	18124.79	111.17		
		M2.4-4	5.00	9.92	358.41	1.841	170.61	28483.20	166.95		
110	40/60	M3.1-4	5.00	9.96	369.35	1.889	486.99	65263.88	134.01	442.97	62640.99
		M3.1-5	5.00	9.90	357.86	1.841	410.54	54987.95	133.94		
		M3.1-6	5.00	9.98	366.45	1.871	431.37	67671.13	156.87		
	50/50	M3.2-1	5.00	9.97	365.73	1.869	449.10	72149.97	160.65	518.24	78070.64
		M3.2-3	5.00	9.94	368.06	1.886	500.28	64768.59	129.46		
		M3.2-5	5.00	9.97	367.96	1.880	605.35	97293.37	160.72		
	60/40	M3.3-1	5.00	9.94	369.85	1.895	552.79	91096.74	164.79	468.55	64582.17
		M3.3-2	5.00	9.91	363.09	1.866	424.45	34312.19	80.84		
		M3.3-3	5.00	9.93	370.22	1.899	428.42	68337.58	159.51		
	80/20	M3.4-3	5.00	9.97	367.79	1.878	368.48	87991.95	238.80	307.12	49630.56
		M3.4-4	5.00	9.98	360.84	1.842	346.63	42833.46	123.57		
		M3.4-6	5.00	10.00	369.89	1.884	206.26	18066.26	87.59		
140	40/60	M4.1-1	5.00	9.93	371.54	1.905	529.36	41554.16	78.50	576.12	58821.42
		M4.1-5	5.00	9.96	368.33	1.884	586.56	59231.34	100.98		
		M4.1-6	5.00	9.93	369.56	1.896	612.43	75678.76	123.57		
	50/50	M4.2-3	5.00	10.00	370.90	1.889	405.20	51164.76	126.27	514.29	77062.18

Hàm lượng XM+S95 (kg)	XM/S95	Số hiệu mẫu	Kích thước mẫu		Khối lượng (g)	KL thể tích (g/cm ³)	Cường độ q_u (kPa)	Mô đun đàn hồi E_{50} (kPa)	Tỷ số E_{50}/q_u	Cường độ q_u trung bình (kPa)	Mô đun đàn hồi E_{50} trung bình (kPa)
			D (cm)	H (cm)							
		M4.2-5	5.00	9.96	371.72	1.900	642.22	108979.55	169.69		
		M4.2-6	5.00	9.90	368.67	1.896	495.44	71042.24	143.39		
	60/40	M4.3-3	5.00	9.97	372.73	1.904	681.85	79767.20	116.99	639.79	74152.77
		M4.3-4	5.00	9.90	369.02	1.898	652.20	84563.17	129.66		
		M4.3-6	5.00	9.97	368.90	1.885	585.33	58127.94	99.31		
	80/20	M4.4-1	5.00	9.95	371.64	1.903	503.03	72008.71	143.15	485.00	50949.70
		M4.4-2	5.00	9.91	369.12	1.897	463.92	47416.20	102.21		
		M4.4-5	5.00	9.95	365.73	1.872	488.06	33424.19	68.48		
160	40/60	M5.1-2	5.00	9.96	374.23	1.913	836.57	85389.30	102.07	805.38	92258.45
		M5.1-5	5.00	9.98	373.81	1.908	751.62	103840.12	138.16		
		M5.1-6	5.00	9.91	374.11	1.923	827.96	87545.92	105.74		
	50/50	M5.2-2	5.00	9.91	373.01	1.917	1227.30	87852.75	71.58	1186.66	100203.33
		M5.2-3	5.00	9.93	373.23	1.915	1222.67	104924.29	85.82		
		M5.2-4	5.00	9.93	370.77	1.902	1110.00	107832.94	97.15		
	60/40	M5.3-1	5.00	9.92	370.90	1.904	919.13	132861.50	144.55	861.82	119277.37
		M5.3-3	5.00	9.91	371.97	1.912	884.65	113509.59	128.31		
		M5.3-5	5.00	9.93	373.80	1.917	781.67	111461.03	142.59		
	80/20	M5.4-1	5.00	10.00	372.88	1.900	978.05	109141.79	111.59	980.89	129240.84
		M5.4-3	5.00	9.93	372.21	1.909	1057.35	139914.32	132.33		
		M5.4-6	5.00	9.96	373.57	1.910	907.26	138666.42	152.84		

5.3. Cường độ kháng nén (q_u) của mẫu 28 ngày tuổi

Các tổ hợp mẫu chế bị sau khi được bảo dưỡng đủ 28 ngày tuổi sẽ được tiến hành thí nghiệm nén trong điều kiện nở hông tự do như đã được đề cập trong tiêu chuẩn TCVN 9403-2012. Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng cường độ của mẫu đất gia cố ở 28 ngày tuổi có xu hướng tăng mạnh với sự tăng lên của hàm lượng xi măng và xỉ lò cao nghiền mịn S94. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 60 kg, giá trị cường

độ kháng nén thay đổi từ 116.22 đến 213.50 kPa, trung bình khoảng 158.44 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 100.35 đến 235.71. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 80 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 186.00 đến 380.00 kPa, trung bình khoảng 303.02 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 75.35 đến 291.11. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 110 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 474.92 đến 681.85 kPa, trung bình khoảng 584.03 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 68.9 đến 191.7. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 140 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 700.28 đến 1026.33 kPa, trung bình khoảng 835.84 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 93.01 đến 174.56. Với hàm lượng xi măng và xỉ S95 160 kg, giá trị cường độ kháng nén thay đổi từ 1089.89 đến 1829.90 kPa, trung bình khoảng 1353.17 kPa, tỷ số giữa E_{50}/q_u thay đổi từ 79.91 đến 153.12. Kết quả cường độ kháng nén (q_u) của các mẫu gia cố với các hàm lượng xi măng và xỉ lò cao nghiền mịn S95 tương ứng là 60 kg, 80 kg, 110 kg, 140 kg và 160 kg được thể hiện như bảng 6.

Bảng 6. Kết quả cường độ kháng nén (q_u) của mẫu 28 ngày tuổi

Hàm lượng XM+S95 (kg)	XM/S95	Số hiệu mẫu	Kích thước mẫu		Khối lượng (g)	KL thể tích (g/cm^3)	Cường độ q_u (kPa)	Mô đun đàn hồi E_{50} (kPa)	Tỷ số E_{50}/q_u	Cường độ q_u trung bình (kPa)	Mô đun đàn hồi E_{50} trung bình (kPa)
			D (cm)	H (cm)							
60	40/60	M1.1-2	5.00	9.92	366.68	1.882	116.22	27268.30	234.6239	124.13	26744.70
		M1.1-3	5.00	9.94	358.99	1.839	129.97	30635.81	235.7103		
		M1.1-4	5.00	9.97	366.22	1.870	126.20	22329.99	176.9364		
	50/50	M1.2-1	5.00	9.92	357.37	1.834	149.94	21070.57	140.5298	153.40	22347.49
		M1.2-4	5.00	9.94	359.01	1.840	155.64	30456.21	195.6827		
		M1.2-6	5.00	10.00	363.26	1.851	154.62	15515.70	100.3459		
	60/40	M1.3-3	5.00	9.92	366.23	1.881	213.50	33462.27	156.7343	182.21	31081.12
		M1.3-4	5.00	9.99	362.17	1.846	162.52	31102.53	191.381		
		M1.3-6	5.00	9.98	359.88	1.836	170.61	28678.55	168.0901		
	80/20	M1.4-3	5.00	9.91	357.36	1.836	196.28	25696.12	130.9139	174.03	21872.84
		M1.4-4	5.00	9.91	354.25	1.820	160.84	17161.49	106.7021		
		M1.4-6	5.00	9.92	367.04	1.884	164.96	22760.91	137.9776		
80	40/60	M2.1-3	5.00	9.93	359.57	1.844	298.60	53619.27	179.5688	312.60	54893.88
		M2.1-4	5.00	9.97	363.58	1.858	332.00	62614.09	188.5966		
		M2.1-5	5.00	9.95	369.32	1.890	307.21	48448.28	157.7055		

Hàm lượng XM+S95 (kg)	XM/S95	Số hiệu mẫu	Kích thước mẫu		Khối lượng (g)	KL thể tích (g/cm ³)	Cường độ q _u (kPa)	Mô đun đàn hồi E ₅₀ (kPa)	Tỷ số E ₅₀ /q _u	Cường độ q _u trung bình (kPa)	Mô đun đàn hồi E ₅₀ trung bình (kPa)
			D (cm)	H (cm)							
	50/50	M2.2-1	5.00	9.91	360.77	1.855	362.82	61756.93	170.2126	350.06	57069.87
		M2.2-4	5.00	9.97	365.91	1.869	380.00	57184.72	150.4861		
		M2.2-6	5.00	9.91	367.92	1.891	307.36	52267.98	170.0546		
	60/40	M2.3-3	5.00	9.90	357.35	1.838	360.22	81953.76	227.5072	357.20	72049.41
		M2.3-4	5.00	9.93	364.75	1.870	373.52	108735.76	291.1128		
		M2.3-5	5.00	9.98	365.96	1.867	337.87	25458.72	75.35134		
	80/20	M2.4-1	5.00	10.00	363.21	1.850	204.38	32006.00	156.6002	192.23	30732.11
		M2.4-2	5.00	9.92	357.38	1.835	186.30	26541.22	142.4646		
		M2.4-5	5.00	9.98	363.14	1.853	186.00	33649.11	180.9092		
110	40/60	M3.1-1	5.00	9.97	364.52	1.863	474.92	86241.73	181.5927	556.47	97352.51
		M3.1-2	5.00	9.99	365.78	1.864	618.08	95314.35	154.21		
		M3.1-3	5.00	9.93	360.33	1.849	576.42	110501.45	191.7027		
	50/50	M3.2-2	5.00	9.95	362.02	1.853	623.58	65660.58	105.2959	648.81	69206.59
		M3.2-4	5.00	10.00	372.13	1.896	641.00	69450.12	108.3466		
		M3.2-6	5.00	10.00	368.74	1.878	681.85	72509.06	106.3424		
	60/40	M3.3-4	5.00	9.91	364.84	1.875	565.88	68329.70	120.7498	578.29	51120.32
		M3.3-5	5.00	9.92	360.00	1.849	532.11	41128.67	77.29321		
		M3.3-6	5.00	9.92	365.40	1.876	636.87	43902.59	68.93445		
	80/20	M3.4-1	5.00	9.95	364.37	1.866	535.07	80520.30	150.4866	552.57	76416.92
		M3.4-2	5.00	9.95	359.99	1.843	557.63	72374.95	129.7907		
		M3.4-5	5.00	9.96	364.35	1.864	565.01	76355.51	135.1394		
140	40/60	M4.1-1	5.00	9.90	365.91	1.882	700.28	65132.76	93.00936	874.90	114613.84
		M4.1-3	5.00	9.99	366.81	1.870	1026.33	134922.69	131.4609		
		M4.1-4	5.00	9.99	372.70	1.901	898.09	143786.08	160.1017		
	50/50	M4.2-1	5.00	9.90	364.62	1.875	786.96	118603.29	150.7099	816.84	115036.31

Hàm lượng XM+S95 (kg)	XM/S95	Số hiệu mẫu	Kích thước mẫu		Khối lượng (g)	KL thể tích (g/cm ³)	Cường độ q _u (kPa)	Mô đun đàn hồi E ₅₀ (kPa)	Tỷ số E ₅₀ /q _u	Cường độ q _u trung bình (kPa)	Mô đun đàn hồi E ₅₀ trung bình (kPa)
			D (cm)	H (cm)							
		M4.2-2	5.00	10.00	370.12	1.885	844.72	147456.55	174.563		
		M4.2-4	5.00	9.99	370.96	1.891	818.85	79049.08	96.5372		
		M4.3-1	5.00	9.96	370.68	1.896	972.19	156324.74	160.7957		
	60/40	M4.3-2	5.00	9.93	370.61	1.901	864.68	129112.97	149.3184	909.30	136887.25
		M4.3-3	5.00	9.91	366.31	1.882	891.01	125224.02	140.5412		
		M4.4-3	5.00	9.95	371.91	1.904	719.38	117120.93	162.8081		
	80/20	M4.4-4	5.00	9.90	368.67	1.896	794.71	79935.22	100.5847	742.32	88867.14
		M4.4-5	5.00	9.95	370.14	1.894	712.86	69545.26	97.5579		
		M5.1-1	5.00	9.90	372.40	1.915	1182.13	156795.58	132.6386		
160	40/60	M5.1-3	5.00	9.95	374.52	1.917	1285.92	162427.53	126.3122	1264.89	163214.96
		M5.1-6	5.00	9.96	371.26	1.898	1326.61	170421.77	128.4637		
		M5.2-1	5.00	9.93	374.82	1.923	1829.90	176066.21	96.21631	1660.64	190485.92
	50/50	M5.2-5	5.00	10.00	373.47	1.903	1601.12	207641.46	129.6848		
		M5.2-6	5.00	9.97	376.41	1.923	1550.91	187750.09	121.0582		
	60/40	M5.3-2	5.00	9.98	374.56	1.912	1498.65	119754.18	79.90783	1314.31	161732.94
		M5.3-4	5.00	9.90	371.08	1.909	1189.87	182188.95	153.117		
		M5.3-6	5.00	9.92	371.95	1.910	1254.40	183255.70	146.0903		
	80/20	M5.4-1	5.00	10.00	372.91	1.900	1247.32	129916.87	104.1571	1172.82	147142.59
		M5.4-4	5.00	9.94	371.42	1.904	1089.89	144196.27	132.3031		
		M5.4-5	5.00	9.90	370.61	1.906	1181.26	167314.64	141.6407		

6. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

6.1. Kết luận

Kết quả thí nghiệm trong phòng mẫu bùn nạo vét gia cố bằng xi măng kết hợp với xỉ lò cao nghiền mịn S95 cho thấy có sự gia tăng cường độ đáng kể khi tăng hàm lượng xi măng và xỉ S95.

Kết quả thí nghiệm cường độ mẫu gia cố với các hàm lượng khác nhau đã đạt được yêu cầu cường độ dự kiến đạt được .

Kết quả thí nghiệm cho thấy hàm lượng xỉ lò cao nghiền mịn S95 có tác động tốt đến sự gia tăng cường độ của đất gia cố và có thể thay thế lên đến 50% xi măng.

Xỉ lò cao nghiền mịn S95 cho thấy hiệu quả rõ rệt và bền vững trong việc cải tạo bùn nạo vét thành vật liệu có thể sử dụng cho mục đích đắp và san lấp. Với hàm lượng oxit hoạt tính cao (chủ yếu là CaO , SiO_2 và Al_2O_3), xỉ S95 tham gia mạnh mẽ vào các phản ứng thủy hóa và pozzolan, tạo thành các sản phẩm gel liên kết như C–S–H và C–A–H, qua đó làm tăng đáng kể cường độ, độ ổn định thể tích và khả năng chịu tải của bùn sau xử lý. Thực nghiệm cho thấy khi trộn xỉ S95 với hàm lượng hợp lý, cường độ kháng cắt và sức chịu nén không thoát nước của bùn nạo vét tăng lên nhiều lần, trong khi độ nén lún và tính biến dạng giảm rõ rệt, đáp ứng các yêu cầu cơ bản của vật liệu đắp nền và san lấp kỹ thuật.

Bên cạnh cải thiện cơ học, xỉ lò cao S95 còn giúp giảm độ ẩm tự nhiên, tăng giới hạn dẻo và cải thiện tính công tác, làm cho bùn sau xử lý dễ thi công hơn so với bùn nguyên trạng. Quá trình tạo cấu trúc keo – khung xương khoáng thứ sinh giúp vật liệu có tính ổn định lâu dài, ít suy giảm cường độ theo thời gian, đặc biệt phù hợp với các công trình đắp nền đường, bãi san lấp và khu vực cải tạo đất yếu. Về mặt kinh tế – môi trường, việc sử dụng xỉ S95 không chỉ giảm nhu cầu vật liệu tự nhiên và xi măng, hạ giá thành xử lý bùn nạo vét, mà còn tái sử dụng chất thải công nghiệp, góp phần giảm phát thải CO_2 và áp lực lên bãi thải.

Tổng hợp các kết quả cho thấy, xỉ lò cao S95 là vật liệu phụ gia hiệu quả, khả thi và thân thiện môi trường trong giải pháp cải tạo bùn nạo vét thành vật liệu đắp và san lấp. Khi được thiết kế cấp phối hợp lý và kiểm soát tốt điều kiện thi công, giải pháp này hoàn toàn có thể ứng dụng rộng rãi trong thực tiễn, đặc biệt tại các khu vực ven sông, ven biển và các dự án hạ tầng có khối lượng bùn nạo vét lớn ở Việt Nam.

6.2. Kiến nghị

Kết quả thí nghiệm khi thay đổi tỷ lệ xi măng và xỉ lò cao nghiền mịn S95 cho thấy giá trị cường độ của mẫu biến đổi khá nhiều và đôi khi chưa thể hiện rõ ràng quy luật của sự thay đổi hàm lượng xi măng và xỉ lò cao S95 trong cùng một hàm lượng. Điều này cần được nghiên cứu để làm rõ thêm.

Nghiên cứu chưa làm rõ ảnh hưởng của hàm lượng hữu cơ, hàm lượng muối đến sự gia tăng cường độ cũng như sự ổn định của đất gia cố.

Hỗn hợp bùn nạo vét tập kết ở các bãi vật liệu tương đối bất đồng nhất. Cần nghiên cứu với số lượng mẫu nhiều hơn để đảm bảo tính đại diện.

Kết quả nghiên cứu này chỉ đúng mới mẫu bùn mang về phòng thí nghiệm với kết quả phân tích một số tính chất vật lý của bùn như trình bày ở trên.