



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลกระทบของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเล
ที่ถูกขุดลอกด้วยปูนขาว เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในงานทาง

Influence of magnesium sulfate on lime-marine dredged sediments stabilization
as a new material resource for road construction

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิกม

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2560A10802128

สัญญาเลขที่ 156/2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลกระทบของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเล

ที่ถูกขุดลอกด้วยปูนขาว เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในงานทาง

Influence of magnesium sulfate on lime-marine dredged sediments stabilization
as a new material resource for road construction

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กรกฎาคม 2560

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 156/2560

บทคัดย่อ

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้สารผสมเพิ่มถือเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการก่อสร้างทางวิศวกรรม อย่างไรก็ตามการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีประสิทธิภาพสูงสุดมีความจำเป็นต้องเลือกใช้สารผสมเพิ่มที่เหมาะสม เนื่องจากดินต่างชนิดกันมีกลไกการกำเนิดดินและแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบที่แตกต่างกัน อีกทั้งอยู่ในลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศที่ต่างกัน ย่อมตอบสนองต่อบริการเคมีมากน้อยแตกต่างกันตามไปด้วย เช่น โครงสร้างทางที่มีดินตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเลเป็นวัสดุ มักได้รับอิทธิพลของซัลเฟตไอออนและคลอไรด์ไอออน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ดินบวมตัวสูงเนื่องจากสารประกอบยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟลุมิเนตที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว โดย (i) แปรผันปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อดินตะกอนทะเลโดยน้ำหนักแห้ง คือ 0% 3% และ 5% (ii) แปรผันอัตราส่วนผสมปูนขาวต่อดินตะกอนทะเลโดยน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด คือ 0% 2% 4% 6% และ 8% และ (iii) แปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่างดินคือ 0 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ ลดลง ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างดินที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และอัตราการลดลงของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของปูนขาวเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ดินตะกอนทะเล, แมกนีเซียมซัลเฟต, กำลังรับแรงอัดแกนเดียว, ปูนขาว

Abstract

Chemical stabilization is a popular technique to improve engineering characteristics of soils for constructions. However, in order to obtain an efficient soil improvement, appropriate selection of chemicals is very important. It is because the difference in soil characteristics, such as soil type, soil formation, geography and climate, and soil compounds, can affect chemical reactions differently. For example, the influences of sulfate ion and chloride ion when using marine sediment can cause soil swelling due to gypsum and Calcium Sulfoaluminate from the chemical reaction. The objectives of this research were to study the effect of magnesium sulfate on dredged marine sediments stabilized with lime. The variables of interest were (i) concentrations of magnesium sulfate of 0%, 3% and 5%, (ii) lime of 0%, 2%, 4%, 6% and 8% of dry total weight, and (iii) curing times of 0, 7, 14 and 28 days. The unconfined compressive strength was evaluated for all soil specimens. The results showed that increasing of magnesium sulfate concentration caused unconfined compressive strength to decrease. Increasing of curing time caused unconfined compressive strength to increase. Moreover, reduction rate of unconfined compressive strength tended to decrease when percent of lime increased.

Keywords: marine sediment, magnesium sulfate, unconfined compressive strength, Lime

สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ

บทคัดย่อ

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1/1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1/4
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1/5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1/6

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปรับปรุงคุณภาพดิน	2/1
2.1.1 การปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil Stabilization)	2/1
2.2 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี	2/2
2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีทางเคมี	2/2
2.2.2 คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงหลังจากปรับปรุงคุณภาพ	2/3
2.2.3 วัสดุผสมเพิ่มที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ	2/4
2.3 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาว	2/6
2.3.1 ปฏิกริยาระหว่างปูนขาวกับดิน	2/6
2.3.2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินเมื่อผสมปูนขาว	2/8
2.3.3 ประโยชน์ของปูนขาว	2/10
2.4 ปัจจัยของสารประกอบซัลเฟตที่ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังของดิน	2/12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2/12
2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับซีปีอาร์ของดินเหนียวอ่อนผสมซีเมนต์และปูนขาว	2/12
2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนผสมซีเมนต์	2/12
2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์และเถ้าแกลบ	2/13
2.5.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีซัลเฟตผสมเถ้าแกลบ	2/13
2.5.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของซัลเฟตต่อกำลังของดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์	2/14

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	3/1
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	3/2
3.3 อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ	3/3
3.3.1 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน (ASTM D854)	3/3
3.3.2 การทดสอบหาค่าพิกัดชั้นเหลว (Atterberg's limit)	3/4
3.3.3 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM D1557)	3/6
3.3.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดิน (ASTM D2166)	3/8

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน	4/1
4.1.1 ค่าขีดพิกัดเหลว ขีดพิกัดพลาสติก และดัชนีพลาสติกของดินตัวอย่าง	4/1
4.1.2 ความถ่วงจำเพาะของดิน	4/2
4.1.3 ความเข้มข้นของซัลเฟต	4/2
4.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test)	4/3
4.3 ผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินตะกอนทะเลผสมปูนขาว	4/5
4.4 ผลของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อค่าความเครียดที่หน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาว	4/8
4.5 ผลของระยะเวลาทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินตะกอนทะเลผสมปูนขาว	4/12
4.6 ผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer	4/14

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย	5/1
5.2 ข้อเสนอแนะ	5/1
ผลงานตีพิมพ์	
รายงานการเงิน	
บรรณานุกรม	
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพิกัดอัตโนมัติของดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ	4/2
ตารางที่ 4.2 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ	4/3
ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาว	4/5
ตารางที่ 4.4 ค่าความเครียดที่หน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาวโดยแปรผันความเข้มข้นของแมกนีเซียมซิลิเฟต	4/8
ตารางที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาวโดยแปรผันระยะเวลาการบ่ม	4/12
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer	4/14

สารบัญรูป

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ในการทดสอบ	3/2
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าพิกัดเหลว)Liquid Limit(3/5
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	3/7
รูปที่ 3.4 เครื่อง Los Angeles	3/9
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว	3/10
รูปที่ 4.1 จำแนกชนิดของดินตัวอย่างโดยวิธี USCS	4/1
รูปที่ 4.2 ค่าพิกัดอัตราเตอร์เบอร์กของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ	4/2
รูปที่ 4.3 กราฟการบดอัดดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ	4/3
รูปที่ 4.4 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาว ในอัตราส่วนต่างๆ	4/4
รูปที่ 4.5 ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ	4/4
รูปที่ 4.6 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลผสมปูนขาว เมื่อแปรผันความ เข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟต	4/7
รูปที่ 4.7 ค่าความเครียดของดินตะกอนทะเลผสมปูนขาว เมื่อแปรผันความเข้มข้น ของแมกนีเซียมซัลเฟต	4/10
รูปที่ 4.8 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลผสมปูนขาว เมื่อแปรผัน ระยะเวลาการบ่ม	4/13
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบ SEM and DEX ของดินตะกอนทะเล ขยาย 500 เท่า	4/15
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบ SEM and DEX ของดินตะกอนทะเล ขยาย 3,000 เท่า	4/16

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีทางวิศวกรรมโยธาและการก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้แหล่งวัสดุธรรมชาติแหล่งเดิมๆ ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการก่อสร้างทางวิศวกรรมเริ่มขาดแคลนลง และเป็นสาเหตุสำคัญให้ต้นทุนการก่อสร้างมีราคาเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการเสาะแสวงหาแหล่งวัสดุใหม่เพื่อใช้ทดแทนวัสดุแหล่งเดิมที่กำลังจะหมดไปถือเป็นเรื่องสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในปัจจุบัน ซึ่งทางเลือกหนึ่งในการแสวงหาแหล่งวัสดุใหม่ คือ การนำวัสดุเหลือใช้ วัสดุที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle aggregate) รวมถึงวัสดุทางธรรมชาติที่มีอยู่ในพื้นที่มาใช้ประโยชน์ทดแทน อาทิเช่น การนำวัสดุมวลรวมคอนกรีตที่ใช้แล้ว (Recycled concrete aggregate) อิฐดินเหนียวแตก (Crushed clay bricks) มาใช้เป็นวัสดุมวลรวมในโครงสร้างชั้นทาง (Herrador et al., 2012; Jimenez et al., 2012; Agrela et al., 2012; Poon and Chan, 2006; Molenaar and Niekerk, 2002; Chini et al., 2001) การนำเถ้าแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Songsuda and Runglawan, 2013) การนำเถ้ากำมะถันและแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหลือทิ้งจากโรงงานมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังเพื่อใช้เป็นวัสดุในงานทาง รวมถึงการใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุในการทำอิฐก่อสร้าง (Chao and Trong, 2015) เป็นต้น

นอกจากวัสดุที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นยังพบว่า ในปัจจุบันมีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจในการนำเอาขยะทางธรรมชาติหรือดินที่ถูกขุดลอกบริเวณชายฝั่งทะเลมาใช้ประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมโยธา เกษตรกรรม และอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งวิธีการนี้สามารถช่วยแก้ไขปัญหาคาร์บอนไดออกไซด์ในบริเวณชายฝั่งทะเลอันเนื่องมาจากการทับถมของตะกอนที่เพิ่มขึ้นจากอิทธิพลของระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง และส่งผลเสียต่อการเข้าจอดเทียบเรือขนาดใหญ่เพื่อการขนส่งสินค้าได้ ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การนำดินทรายหรือดินตะกอนที่ถูกขุดลอกบริเวณชายฝั่งทะเลมาใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในงานดินและงานคอนกรีต (Dubois et al., 2009; Zentar et al., 2008; Kozlova et al., 2004; Ulbricht, 2002; Millrath et al., 2001; Chapman, 1968, Limeira et al., 2010; Siham et al., 2008; Newman, 1968) และนำมาใช้เป็นแหล่งวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง (Dubois et al., 2009; Zentar et al., 2008; Siham et al., 2008; Maher et al., 2006) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามแม้ว่าดินที่ทับถมบริเวณชายฝั่งจะสามารถนำมาใช้ทดแทนวัสดุมวลรวมในงานคอนกรีตและงานทางได้ แต่ลักษณะการกำเนิดทางธรณีวิทยาของดินที่แตกต่างกันออกไป เช่นการตกตะกอนทับถมภายใต้ระดับน้ำทะเล (น้ำเค็ม) สภาวะน้ำขุ่นน้ำล้น องค์ประกอบและแร่ธาตุต่างๆ ในดิน ฯลฯ อาจส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของดินประเภทนี้แตกต่างออกไปจากวัสดุมวล

รวมชนิดอื่นที่ใช้โดยทั่วไปในงานวิศวกรรมได้ เช่น ปริมาณเกลือที่สะสมในมวลดินอาจเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตและเพิ่มความพรุนของคอนกรีต (Gutt and Collin, 1987) หรือปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) ที่ปะปนอยู่ในมวลดินส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของดินลดลง (Schmidt, 1965; Holtz and Krizek, 1970) นอกจากนี้อิทธิพลขององค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ที่สะสมอยู่ในมวลดิน เช่น ซัลเฟตไอออน (Sulfate ion) คลอไรด์ไอออน (Chloride ion) ไนเตรตไอออน (Nitrate ion) และฟอสเฟตไอออน (Phosphate ion) ยังเป็นสาเหตุให้คุณสมบัติการรับแรงเฉือนของดินลดลงและบวมตัวสูง (McCarthy et al., 2014; Saussaye et al., 2014; Bakharev, 2005) เป็นต้น ดังนั้น นอกเหนือไปจากการมุ่งเน้นให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำเอาวัสดุเหลือใช้หรือวัสดุทางธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างแล้ว วิศวกรควรพิจารณาเลือกใช้วัสดุอย่างรอบคอบและให้ความสำคัญในเรื่องความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างรวมถึงความคงทนต่อสภาวะการใช้งานที่ยาวนานด้วย

จากอดีตจนถึงปัจจุบันการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางโดยการเติมสารให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Stabilization) เพื่อเพิ่มกำลังการรับแรงและลดการบวมตัวและหดตัวของโครงสร้างชั้นทาง ถือเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งสารผสมเพิ่มที่นิยมใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ปูนขาว (Lime) และ เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เป็นต้น

กลไกการปรับปรุงคุณภาพดินหรือวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ เมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีสารประกอบหลักอยู่ 4 ชนิด คือ C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ขึ้นในช่วงแรก เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) และ Released Hydrated Lime หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ระหว่าง Silica และ Alumina ที่มีอยู่ในเม็ดดินกับแคลเซียมไอออน (Calcium ion) ที่เกิดจาก Released Hydrated Lime ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรก ทำให้เกิด CSH และ CAH เพิ่มขึ้นและมีค่าดัชนีกรดต่าง (pH) ลดลง สารประกอบ CSH และ CAH ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีนี้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานและจากความแตกต่างที่สูงขึ้นเป็นผลทำให้ Colloid Gel หรือ Cement Gel ที่ประกอบไปด้วย CSH และ CAH เกิดการรวมตัวกันและยึดเกาะกันเป็นโครงสร้างที่มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น (Lambe et al., 1959; Moh, 1969) ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับกลไกการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้แก่ (Horpibusuk et al, 2011; Du et al., 1999; Nalbantoglu and Gucbilmez, 2001; Rao et al., 2001; Nalbantoglu, 2004; Yong and Ouhadi, 2007)

อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนและดินเหนียว คือการใช้ปูนขาวเป็นสารผสมเพิ่ม มีกลไกการปรับปรุงดังนี้คือ เมื่อผสมปูนขาวในดินจะเกิดการแลกเปลี่ยนกันของไอออนบวก (Cation) ในดินและแคลเซียมไอออนในปูนขาว ทำให้ความหนาของน้ำในชั้น Double layer บางลงและเกิดการดึงดูด

กันของอนุภาคดินเหนียวเป็นโครงสร้างแบบประเกสรกระกะ (Flocculation) และโครงสร้างแบบประเกสรกระกะนี้จะถูกทำให้มั่นคงแข็งแรงขึ้นโดยสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วคือ สารประกอบเตตระแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Tetracalcium Aluminate Hydrate, C₄AH) ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้นำผลทำให้ดินลดการบวมตัวและหดตัว และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินดีขึ้น คือ ค่าพิกัดเหลว (Liquid limit) ลดลง ค่าพิกัดพลาสติก (Plastic limit) เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) ลดลง และความสามารถในการระบายน้ำของดินเพิ่มขึ้น (Du et al., 1999; Kinuthia et al., 1999; Nalbantoglu and Gucbilmez, 2001; Rao et al., 2001; Nalbantoglu, 2004; Lin et al., 2007; Yong and Ouhadi, 2007; Langroudi and Yasrobi, 2009) นอกจากนั้นค่าดัชนีกรดต่าง (pH) ที่สูงขึ้นในดินจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกคือ ซิลิกาและอะลูมินาในดินทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนขาว เกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานคือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ส่งผลทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มสูงขึ้น (Nalbantoglu, 2004; Guney et al., 2007; Yong and Ouhadi, 2007; Chen and Lin, 2009)

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเติมสารให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ต่างล้วนแล้วแต่ส่งผลทำให้ดินมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นทั้งสิ้น แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีประสิทธิภาพสูงสุด มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาเลือกใช้สารเคมีที่เหมาะสมเนื่องจากดินที่ต่างชนิดกัน กลไกการกำเนิดดิน ลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศ ตลอดจนแร่ธาตุและสารประกอบในดินที่แตกต่างกัน ย่อมตอบสนองต่อปฏิกิริยาเคมีมากน้อยแตกต่างกันตามไปด้วย เช่น Horpibulsuk et al. (2012) ทำการศึกษาค่ากำลังการรับแรงของดินเค็ม (Saline clay) ที่มีแหล่งกำเนิดในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ พบว่าค่ากำลังการรับแรงของตัวอย่างดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมระหว่าง clay-water/cement (w_c/C) มีค่าลดลงในตัวอย่างดินที่มีอัตราส่วนผสม w_c/C เท่ากัน ความเข้มข้นของเกลือในตัวอย่างดินที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างดินและซีเมนต์ลดลง นอกจากนั้นยังพบว่าเพื่อเพิ่มกำลังการรับแรงของดินเค็มให้สูงขึ้น การใช้เถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวลเพื่อทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างดินและซีเมนต์เพิ่มขึ้นได้ Ruenkraitersa and Pimsarn (1982) พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ปะปนอยู่ในมวลดินส่งผลให้การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาวมีประสิทธิภาพลดลงและเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกลดลง เป็นต้น

นอกเหนือไปจากคุณสมบัติพื้นฐานเฉพาะตัวของดินแต่ละชนิดแล้ว อิทธิพลของสิ่งแวดล้อมที่กระทบต่อโครงสร้างยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เช่น โครงสร้างอาคารหรือโครงสร้างชั้นทางที่ใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ที่อยู่ในใกล้บริเวณชายฝั่งทะเล หรือแม้แต่บริเวณบ่อฝังกลบขยะ ล้วนแล้วแต่ได้รับอิทธิพลของซัลเฟตไอออน คลอไรด์ไอออน ไนเตรตไอออน และฟอสเฟตไอออนด้วย จากงานวิจัยในอดีตจำนวนมากได้ทำการศึกษถึงอิทธิพลของซัลเฟตไอออนต่อโครงสร้างคอนกรีตและแสดงให้เห็นว่าซัลเฟตอิ

ออนถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตบวมตัวสูงขึ้น นอกจากนั้นยังมักพบปัญหาการบวมตัวของดินที่มีการปนเปื้อนของซัลเฟตไอออนในโครงสร้างชั้นทางที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนขาว รวมถึงโครงสร้างชั้นทางที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลหรือได้รับอิทธิพลของน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อนของซัลเฟตไอออนด้วย ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีของซัลเฟตกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดเป็นยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Ettringite) สารประกอบยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตที่เกิดขึ้นนี้มีปริมาตรเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 เท่า ส่งผลทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เฟสที่ในโครงสร้างคอนกรีตและเกิดการบวมตัวเพิ่มขึ้นของดินในโครงสร้างชั้นทาง ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ (Mitchell and Dermatas, 1990; Hunter, 1998)

อย่างไรก็ตามแม้ว่าจากอดีตจนถึงปัจจุบันจะมีการศึกษาวิจัยถึงอิทธิพลของสารประกอบไอออนต่างๆ ต่อคุณสมบัติของวัสดุทางวิศวกรรม และกลับพบว่าการศึกษาเกี่ยวกับผลของอิทธิพลของสารประกอบไอออนต่างๆ ดังกล่าวยังคงมีน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินประเภท Marine soil ที่ปัจจุบันนิยมใช้เป็นแหล่งวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในโครงสร้างชั้นทางและในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ดังนั้นเพื่อเติมเต็มฐานข้อมูลวิจัยในส่วนดังกล่าว โครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติการรับแรงของดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว และศึกษาอิทธิพลของแมกนีเซียมซัลเฟตตลอดจนระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล โดยตัวอย่างดินตะกอนทะเลที่ใช้ในการทดสอบนี้คือดินที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในงานทางและงานทางด้านวิศวกรรมโยธาตลอดจนช่วยแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการกำจัดขยะทางธรรมชาติอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ
2. เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ
3. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ภายในตัวอย่างดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวภายหลังการเกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อเผชิญสภาวะความเข้มข้นของซัลเฟตไอออนและระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปโดยวิธีเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

4. เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ผู้วิจัยจึงออกแบบขอบเขตของโครงการวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติการรับแรงของดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว และศึกษาอิทธิพลของแมกนีเซียมซัลเฟตตลอดจนระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล โดยตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้คือดินตะกอนทะเลบริเวณท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี และสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. ทำการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ

2. แปรผันปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตในตัวอย่างดินตะกอนทะเลคือ 0% 5% และ 10% และแปรผันอัตราส่วนผสมของปูนขาวต่อดินตะกอนทะเลโดยน้ำหนักแห้ง คือ 0% 2% 4% 6% และ 8% และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test, UC test) ในทุกๆ อัตราส่วนผสม เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้จะถูกเตรียมโดยจำลองพฤติกรรมเช่นเดียวกับการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง คือการบดอัดแบบสถิตย์ เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่มีความชื้นบดอัดเหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) และมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, $\gamma_{dry, max}$) ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test)

3. แปรผันระยะเวลาการบดตัวอย่างดินในทุกๆ อัตราส่วนผสม (ดังแสดงในข้อที่ 2) คือ 0 วัน 7 วัน 14 วัน 28 วัน ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ

4. ภายหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่างดินตะกอนทะเลจะถูกนำมาทดสอบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ภายในตัวอย่างดินภายหลังการเกิดปฏิกิริยาเคมี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบถึงผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ
2. สามารถทราบถึงผลของระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ
3. สามารถทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ภายในตัวอย่างดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวภายหลังการเกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อเผชิญสภาวะความเข้มข้นของซัลเฟตไอออนและระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปโดยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน
4. สามารถทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิรา จังหวัดชลบุรี เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปรับปรุงคุณภาพดิน

การปรับปรุงคุณภาพดินเป็นกระบวนการใดๆ ที่ทำให้ดินตามธรรมชาติมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น เช่น เพิ่มกำลังรับแรงเฉือน เพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อน สามารถรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ เป็นต้น โดยอาจใช้วิธีการต่างๆ เช่น การบดอัด การทำให้แน่นด้วยเทคนิคเฉพาะ หรือการใช้สารผสมเพิ่มซึ่งอาจอยู่ในรูปของของเหลวหรือเป็นผงมาเติมลงในดิน โดยการเลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ หลายประการ เช่น คุณสมบัติของดิน ส่วนประกอบของแร่ดินเหนียว ราคา และความสะดวกในการทำงาน เป็นต้น

2.1.1 การปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil Stabilization) สามารถแบ่งได้หลายวิธี

2.1.1.1 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี (Chemical Stabilization) คือใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในดินเพื่อที่ดินจะได้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น เช่น การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ (Cement Stabilization) การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาว (Lime Stabilization) การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยโซเดียมคลอไรด์ (Sodium-Chloride Stabilization)

2.1.1.2 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางกายภาพ (Physical Stabilization) เป็นวิธีการที่ไม่ทำให้โครงสร้างภายใน และการยึดเกาะของดินเปลี่ยนไปจากเดิม เช่น (Thermal Stabilization), (Pressure Stabilization)

2.1.1.3 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้เครื่องมือกล (Mechanical Stabilization) เป็นวิธีการที่ทำให้เม็ดดินมีการขัดตัวกันภายในสูงขึ้น (Mechanical Interlock) เช่น (Sand Piling), (Vibroflotation)

2.1.1.4 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Stabilization) เป็นวิธีการลดปริมาณความชื้นในดิน ทำให้เกิดการออสโมซิสของน้ำในดินโดยใช้ขั้วไฟฟ้า บวกและลบเป็นตัวทำให้เกิดประจุไฟฟ้า ประจุที่เกิดขึ้นเป็นตัวนำพาน้ำให้เคลื่อนที่ออกไปจากพื้นที่ที่ทำการปรับปรุงคุณภาพ

2.1.1.5 การเร่งระบายน้ำออกจากมวลดิน (Drainage) คือ การที่มีน้ำอยู่ในมวลดินในปริมาณมากจะส่งผลให้ดินอ่อนตัวง่ายและรับกำลังได้ค่อนข้างต่ำ การแก้ไขสามารถทำได้โดยการระบายน้ำออกจากมวลดิน (Drainage) การใช้วิธีเร่งระบายน้ำโดยน้ำหนักกดทับ (Pre-Loading) หรือการติดตั้งแถบเร่งระบายน้ำแนวตั้ง (Prefabricate Vertical Drains, PVD) ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างใช้เวลานาน

2.2 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมีเป็นการใช้สารเคมีผสมลงในดินโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรซึ่งพิจารณาได้จากการบวมตัวและการหดตัวของดินปรับปรุงคุณสมบัติในการรับน้ำหนักหรือพฤติกรรมของความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain) ของดิน ปรับปรุงการไหลซึมผ่านของน้ำในดินและเพิ่มความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ สารเคมีหรือวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือปูนซีเมนต์ ปูนขาว หรือเถ้าลอย ซึ่งจะทำให้ดินมีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนดไว้และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย สำหรับความเหมาะสมของการเลือกใช้วัสดุผสมเพิ่มนั้นจะต้องคำนึงถึงผลประโยชน์ในการทำงาน การจัดเก็บรักษาและต้องมียังค์ประกอบที่ไม่มีพิษรวมทั้งต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกิดขึ้นด้วย

2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีทางเคมี

2.2.1.1 คุณสมบัติของดิน (Soil Properties)

ดินตามธรรมชาติจะมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเฉพาะตัวซึ่งลักษณะพื้นฐานทั้งสองชนิดนี้มีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เมื่อพิจารณาธรรมชาติของดิน สรุปได้ว่า การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Particle Size Distribution) คือสัดส่วนของทราย (Sand) ทรายแป้ง (Silt) ดินเหนียว (Clay) อินทรีย์สาร (Organic Material) และสารประกอบอื่นๆ เช่น เกลือซัลเฟตหรือคลอไรด์และองค์ประกอบทางเคมี จัดเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติดินซีเมนต์และดินผสมปูนขาว

2.2.1.2 วัสดุผสมเพิ่ม (Stabilizing Agent)

โดยทั่วไปแล้ว วัสดุผสมเพิ่มชนิดเดียวกันที่ผสมในปริมาณที่มากกว่าจะทำให้กำลังมากกว่าภายใต้เงื่อนไขตัวแปรอื่นคงที่และดินนั้นมีความชื้นเพียงพอต่อการ เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ในทางกลับกันวัสดุผสมเพิ่มต่างชนิดกันย่อมมีผลต่อการพัฒนากำลังของดินด้วยอัตราที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเชื่อมประสาน (Cementations Compounds) รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เมื่อวัสดุผสมเพิ่มนั้นทำปฏิกิริยากับดิน

2.2.1.3 น้ำ (Water)

น้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี เพราะน้ำจะเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเพิ่มกำลังของดิน ปริมาณความชื้นในดินที่น้อยเกินไปอาจทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไป得不สมบูรณ์ หรือถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไป น้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยาจะยังคงเหลือกระจุกกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของดินที่แข็งตัวแล้วและเป็นตัวทำให้พื้นผิวลื่นเมื่อมีแรงกระทำเป็นผลทำให้ได้ค่ากำลังของดินต่ำกว่าความเป็นจริง

2.2.1.4 เทคนิคการปรับปรุง (Techniques of Stabilization)

นอกจากองค์ประกอบอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้ว กำลังของดินยังขึ้นอยู่กับเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพระยะเวลาในการผสมที่ต่างกัน ความเร็วในการผสม เงื่อนไขในการบ่ม ตลอดจนการเตรียมสภาพดินก่อนการปรับปรุง และการดูแลหลังการผสม (Pre and Post Treatment) จะมีผลทำให้กำลังของดินที่แตกต่างกันไป

2.2.2 คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงหลังจากปรับปรุงคุณภาพ

2.2.2.1 คุณสมบัติด้านความเหนียว (Plasticity)

วัสดุผสมเพิ่มเมื่อเติมลงไปดินจะทำให้ความเหนียวของดินลดลง เนื่องจากปฏิกิริยา Hydration โดยผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) นี้ทำให้เกิด Calcium Ions แล้วมีการแลกเปลี่ยนหรือการรวมตัวกันของประจุไฟฟ้ารอบเม็ดดินทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน เม็ดดินจะจับตัวเป็นก้อนและค่าคุณสมบัติด้านความเหนียวจึงลดลง

2.2.2.2 คุณสมบัติทางการบดอัด (Compaction)

เมื่อผสมวัสดุผสมเพิ่มลงไปดินส่งผลทำให้คุณสมบัติของดินทางการบดอัดเปลี่ยนแปลงไปคือ ทำให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight) ลดลงและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของดินเดิมที่ใช้ จากการศึกษาของ Divison (1961) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Optimum Moisture Content (OMC) และ Maximum Dry Density (MDD) ของดินผสมซีเมนต์ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการผสม หรือ การทำการบดอัดให้ช้าลงโดยทั่วไปจะมีผลทำให้ OMC เพิ่มขึ้น หน่วยน้ำหนักแห้งลดลงและกำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Marshall (1954) พบว่าการผสมที่ช้าลงจะทำให้ OMC ของดินซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้นและจะมีผลต่อค่ากำลังสูงสุด (Maximum Strength) การหน่วงเวลาการผสม และการบดอัดให้ช้าลงจะมีผลต่อค่ากำลังเพียงเล็กน้อยสำหรับดินทราย ถ้าเป็นดินตะกอนและดินเหนียวการหน่วงเวลาการผสมและการบดอัดให้ช้าลงจะมีผลต่อค่ากำลังมาก

2.2.2.3 คุณสมบัติทางการกำลัง (Compressive Strength)

กำลังของส่วนผสม ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ชนิดของดิน ปริมาณและชนิดของวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ ความหนาแน่นของการบดอัด ปริมาณความชื้น ระยะเวลาในการผสม อุณหภูมิในการบ่ม และปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น

2.2.2.4 การยึดประสาน (Cementation)

ในการบดอัดดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ส่วนประกอบต่างๆ ของซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration ในอัตราที่แตกต่างกันเม็ดดินจะเกิดการเกาะกันเป็นก้อนและสามารถรับแรงอัดได้ การยึดเกาะนี้จะเกิดขึ้นทั้งระหว่างเม็ดดินกับซีเมนต์และซีเมนต์กับซีเมนต์เองซึ่งแยกประเภทสำหรับดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ ดังนี้

(1) สำหรับดินเม็ดละเอียดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะสูงกว่าดินเม็ดหยาบเพราะว่าดินเม็ดละเอียดจะมีพื้นที่ผิวและจุดสัมผัสมากกว่า ซีเมนต์จะเป็นตัวช่วยให้การเกาะตัวของเม็ดดินแข็งแรงขึ้น ดังนั้นนอกจากซีเมนต์จะทำให้ค่าของคุณสมบัติด้านความเหนียวลดลงแล้ว ยังเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนอีกด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเกิดตามผิวเม็ดดินจะไปไล่น้ำที่เกาะอยู่รอบผิวเม็ดดินออกไปและซีเมนต์จะเข้าไปอยู่แทนที่ ทำให้ลดการอ่อนตัวของดินเมื่อน้ำภายนอกซึมเข้าไปอีก

(2) สำหรับดินเม็ดหยาบปฏิกิริยาของซีเมนต์จะทำหน้าที่คล้ายกับการผสมคอนกรีต เว้นแต่ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) จะไม่ไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน อนุภาคของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์จะขัดตัวกันด้วย Mechanical Interlock และยึดเกาะกันด้วย Chemical Cementation กรณีของทรายการยึดเกาะกันจะมีตรงบริเวณผิวสัมผัสกัน เมื่อทรายมีการบดอัดแน่นช่องว่างเม็ดทรายจะมีน้อยพื้นที่สัมผัสมากขึ้น การยึดเกาะกันจะแข็งแรงขึ้นด้วยแต่ถ้าเป็นทรายที่มีขนาดเดียวกันจะมีพื้นที่สัมผัสน้อยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะมากกว่าชนิดที่ขนาดคละกันดี

2.2.3 วัสดุผสมเพิ่มที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ

2.2.3.1 การปรับปรุงดินโดยใช้ซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นสารเสถียรภาพที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่าย มีราคาถูก สามารถนำมาใช้งานได้ง่ายโดยไม่ต้องนำมาแปรสภาพก่อนใช้งานและมีประสิทธิภาพสูง ปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์ ดิน และน้ำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางวิศวกรรมอย่างชัดเจน มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มีค่าความตึงน้ำสูงขึ้น การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์นี้เรียกว่า ดินซีเมนต์ โดยดินซีเมนต์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมโยธาได้หลายประเภท เช่น เสาค้ำดินซีเมนต์ในงานฐานราก งานกำแพงกันดินหรือใช้ในงานก่อสร้างถนน เป็นต้น

2.2.3.2 การปรับปรุงดินโดยใช้ปูนขาว

การเติมปูนขาวลงในดินที่ปนดินเหนียวจะทำให้ความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงสำหรับการบดอัดเดียวกัน ตัวบ่งชี้ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคือปริมาณปูนขาวที่เติมลงไป ในดินเหนียวและปริมาณแร่ธาตุในดินเหนียว โดยกำลังของปูนขาวผสมดินจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น ชนิดของดิน ชนิดของปูนขาวและปริมาณของปูนขาวที่เติมลงไป ในดินเหนียวที่มีกรดโลนิติก

ปะปนอยู่ผสมกับปูนขาวจะทำให้ได้กำลังต่ำกว่าการผสมกับปูนขาวที่มีแคลเซียมสูงหรือปูนขาวกึ่งเหลว (Bell, 1988)

การใช้ปริมาณปูนขาวน้อยๆ ในการปรับปรุงคุณภาพดินจะได้กำลังสูงสุดในเวลาน้อยกว่า โดยปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 4.5 – 8 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินที่จะปรับปรุง แต่ใช้ปริมาณมากกว่านี้ได้ถ้าดินที่นำมาปรับปรุงมีอนุภาคของดินเหนียวปนอยู่มาก นอกจากนี้ระยะเวลาในการผสมก็เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังเช่นกัน (Bell, 1988)

2.2.3.3 การปรับปรุงดินโดยวัสดุอื่นๆ

เถ้าลอย(Ash) เป็นวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน เช่น หินเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Tuff), หินพูน (Pumicite), หินเชล (Shale) หรือการเผาวัสดุที่ได้จากธรรมชาติมีสมบัติเป็นสารปอซโซลานที่สามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวและเกิดเป็นสารเชื่อมประสาน จากการศึกษาของ วิจิตต์อัจฉรา และคณะ (2536) พบว่าเถ้าบางชนิดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิค เนื่องจากเถ้ามีส่วนผสมของซิลิกา (Silica) และอลูมินา(Alumina) สูง ซึ่งทำปฏิกิริยากับปูนขาวเกิดเป็น Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งทำให้เม็ดของเถ้าเกิดการเกาะรวมตัวกัน ปฏิกิริยานี้คล้ายกับ Hydration ของปูนซีเมนต์

ยางมะตอย (Bitumen) เป็นสารที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ ซึ่งมีความหนืดที่ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำยาง การใช้ยางมะตอยในการปรับปรุงคุณภาพของดินจะช่วยป้องกันหรือลดการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ทั้งนี้เป็นเพราะยางมะตอยมีสมบัติที่น้ำเมื่อไปเคลือบรอบเม็ดดินก็จะทำให้ความชื้นเข้าไปไม่ได้แต่มีข้อเสียคืออย่างมีความแข็งแรงต่ำถ้าใช้ในปริมาณมากอาจเกิดผลเสียด้านกำลังได้

โมลลาส (Mollas) เป็นกากของเหลือในรูปของเหลวจากอุตสาหกรรมน้ำตาลหรือโรงกลั่นสุรา ใช้เพิ่มความเหนียวให้ดินแต่สามารถถูกชะล้างโดยน้ำฝนได้ง่าย

ยางไม้ลิกนิน เป็นกากของเหลือในรูปของเหลวจากโรงงานกระดาษ ใช้เพิ่มความเหนียวให้กับดินแต่อาจก่อให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะ

โซเดียมคลอไรด์หรือแคลเซียมคลอไรด์ เป็นกากของเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโซเดียมคาร์บอเนตและฟลูออคาร์บอเนต (ยาสีฟัน) ช่วยในการดูดความชื้นในดินแต่มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีต

2.3 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาว

ปูนขาวเป็นวัสดุก่อสร้างที่เก่าแก่ที่สามารถพบเห็นได้ในปัจจุบัน เคยปรากฏในการสร้างสิ่งปลูกสร้างในยุคสมัยโรมันและกรีก นับว่าเป็นเวลานานหลายพันปีมาแล้วที่มี การใช้ปูนขาวเป็นวัสดุเชื่อมยึดโครงสร้างอาคาร หินปูนขาว (Lime Stone) มีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมคาบอเนต (CaCO_3) ประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อาจมีส่วนประกอบอื่นๆ เช่น แมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) หรือไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) ด้วย ปูนขาวสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. ปูนขาวสุก (Quicklime) เป็นปูนขาวที่ได้จากการเผาหินปูนขาว (Limestone) ให้สุกจึงเรียกกันว่าปูนขาวสุก ปูนขาวสุกเหล่านี้แห้งมากต้องการน้ำผสม 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสามารถ ดูได้จาก ASTM C 5 Quicklime for Structure Purposes

2. ปูนขาวที่อมน้ำ (Slaking of lime) เกิดจากการนำปูนสุกที่เป็น CaO หรือ MgO เข้ามาผสมน้ำจนชุ่มเต็มที่ กระบวนการนี้เรียกว่า Slaking หรือ Hydration ระหว่างที่เกิดการ Slaking ปูนขาวจะดูดน้ำเข้าไปและจะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) อาจเรียกได้ว่า Slaking lime หรือ Hydration lime

2.3.1 ปฏิกริยาระหว่างปูนขาวกับดิน

ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมปูนขาวลงในดินเหนียวที่มีความชื้นนั้นมีหลายชนิดและหลายรูปแบบทั้งที่เกิดขึ้นทันทีทันใด และเกิดขึ้นภายหลังในระยะเวลาต่างๆ กัน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินดังนี้

1. ลดค่า Plasticity Index
2. เพิ่มค่า Shrinkage Limit
3. ปรับปรุง Workability
4. ลดศักยภาพของการบวมตัว

2.3.1.1 Cation Exchange

เมื่อเติมปูนขาวลงในดินเหนียวเปียกจะทำให้ดินเหนียวนั้นร่วนขึ้นสามารถแยกเป็นเม็ดได้ เนื่องจากเกิดการแทนที่หรือแลกเปลี่ยนกันของ Cation ต่างๆ ที่มีอยู่ในดินกับแคลเซียม โดย Cation ของแคลเซียมจะเข้าไปแทนที่ Ion ของธาตุโลหะในดิน เช่น Na^+ และ H^+ ซึ่งปฏิกริยานี้จะเกิดขึ้นในบริเวณผิวของเม็ดดิน (Clay Particle Surface)

Herrin และ Mitchell (1961) กล่าวว่า เมื่อปูนขาวและดินเหนียวถูกผสมเข้าด้วยกันและมีการบ่มในระยะเวลาหนึ่งจะมีปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ

1. ปฏิกิริยา Base Ion – Exchange เกิดขึ้นกับ Ca^{2+} ของปูนขาวที่เข้าไปเกาะยึดติดกับเม็ดดินเหนียวโดยเข้าไปแทนที่ Weaker Material Ion ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินที่มีอยู่แบบเดิม (Na^+ และ Ca^{2+}) ทำให้อนุภาคดินเหนียวเดิมรวมตัวกันเป็นก้อนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่า Plasticity ของดินลดลง

2. การจับตัวกันแน่นของ Calcium Cation ของปูนขาวที่มีมากขึ้นที่ผิวของเม็ดดิน แม้ว่า Ions ของสารอื่นยังคงอยู่ในเม็ดดินเหนียว Ca^{2+} ที่มากกว่าความต้องการอยู่ที่ผิวของเม็ดดิน ซึ่งจะพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งสองนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจำนวนประจุไฟฟ้าบนผิวของเม็ดดินเหนียวอัตราการแทนที่ของ Cation จะขึ้นกับเหตุผลหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแร่ดินเหนียวความเข้มข้นของสารละลาย และอุณหภูมิทั่วไป

2.3.1.2 Flocculation and Agglomeration

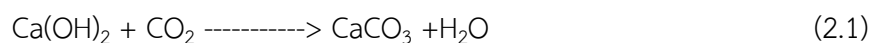
การเกิด Flocculation นั้นจะทำให้ขนาดเม็ดดินโตขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดดินเหนียวส่วนมากเป็นแผ่นบางๆ (Platy Structure) ซึ่งเมื่อเข้าใกล้กันอย่างอิสระจะวางตัวในลักษณะ Random Arrangement ทำให้เกิดมุมหรือเหลี่ยมซึ่งเป็นผลต่อการต้านทานการกระทำจากแรงภายนอก การที่ขนาดของเม็ดดินโตขึ้นนั้นเนื่องจากเมื่อเติมปูนขาวเข้าไปทำให้ปริมาณ Ca^{2+} ของน้ำในช่องว่างของมวลดินมีความเข้มข้นของไอออนสูงขึ้น ดังนั้นจะเกิด Cation Exchange ของแร่ดินเหนียวซึ่งทำให้น้ำ Double Layer หดตัวแคบเข้าและเกิดการดึงดูดกันเป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ ซึ่งสอดคล้องกับความคิดของ Ruenkairergsa (1982) ซึ่งได้กล่าวว่า เมื่อผสมปูนขาวลงในดิน Ca^{2+} จะเข้าไปเกาะติดอยู่รอบๆ เม็ดดินทำให้ได้สารใหม่คือ $Ca(OH)_2$ และผลึกให้ Fe_2SO_3 , Al_2O_3 และ SiO_2 เคลื่อนที่ห่างออกไปจากเม็ดดิน จากนั้นเม็ดดินจะเกิดประจุไฟฟ้าที่มีแรงดึงดูดให้เม็ดดินเคลื่อนที่เข้าหากัน

2.3.1.3 Pozzolanic Reaction

ปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction เป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวและ Soil Silica หรือ Alumina เพื่อก่อให้เกิดการประสานตัวกันและกัน ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ทำให้กำลังของส่วนผสมดินเหนียวและปูนขาวเพิ่มมากขึ้น ส่วนหนึ่งของปฏิกิริยา Pozzolanic คือค่าความเป็นกรดหรือค่า pH ซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นเป็นผลอันเนื่องมาจากปูนขาว คือการเพิ่มปูนขาวจำนวนเล็กน้อย (มากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในดินจะเพิ่มค่าความเป็นกรดต่างมากขึ้นจนมีค่าประมาณ 12.3 และที่สภาวะ pH ที่สูงนี้การละลายตัว (Solubility) ของ Silica และ Alumina จะเพิ่มมากขึ้นด้วย และการที่ค่า pH สูงนั้น Silica ที่ละลายตัวออกจากโครงสร้างของอนุภาคดินเหนียวมาทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} แล้วเกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งเป็นผลึกของ Calcium Silicate Hydrate (CHS)

2.3.1.4 Lime Carbonation

ปฏิกิริยาเคมีชนิดนี้เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในปูนขาวทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 ในอากาศแล้วเกิดสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) หรือแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) กับน้ำซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานเล็กน้อย โดยที่การเกิดสารประกอบคาร์บอเนตชนิดใดนั้นกับชนิดของปูนขาวที่ได้ตั้งสมการ



ปฏิกิริยา Carbonation นี้เป็นกระบวนการที่สวนทางกับปฏิกิริยาเคมีที่ผ่านมาทั้ง 2 ชนิดเพราะ CaCO_3 ที่เกิดขึ้นจะหน่วงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่จะทำให้เกิดสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate ให้ช้าลง เป็นผลให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินเหนียวผสมปูนขาวช้าลงกว่าปกติได้ ดังนั้นจึงต้องเก็บปูนขาวให้มิดชิดก่อนนำไปใช้งาน นอกจากนี้ยังพบว่าในตัวอย่างดินที่ป้องกันไม่ให้ปูนขาวเกิดปฏิกิริยา Carbonation กับอากาศนั้นเมื่อบ่มในระยะเวลาอันนานจะทำให้ได้กำลังสูงกว่าดินตัวอย่างที่บ่มแล้วปล่อยให้ปูนขาวทำปฏิกิริยากับอากาศได้

2.3.2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินเมื่อผสมปูนขาว

2.3.2.1 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้าน Plasticity

เมื่อผสมปูนขาวลงในดินเหนียวถึงแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยแต่ก็จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไปในทางที่ดีขึ้นโดย Herrin และ Mitchell (1961) พบว่า Ca^{2+} จากปูนขาวซึ่งเป็นประจุบวกจะเข้าไปแทนที่ประจุบวกที่มีวาเลนต่ำกว่า เช่น Na^{2+} หรือ H^+ บนผิวของอนุภาคดินเหนียวจะทำให้ประจุไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคดินเหนียวเกิดการเปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ Ca^{2+} ยังทำให้ Electrolyte Content ของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้โครงสร้างของดินเหนียวเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะมากขึ้น แต่ว่าโครงสร้างแบบระเกะระกะนี้ยังมีความไวต่อน้ำมาก คือถ้าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น Electrolyte Content จะลดน้อยลง ส่งผลทำให้ Double layer ขยายตัวมีแรงผลักสูงจนทำให้เกิดสาร Detlocculate ได้ แต่เนื่องจาก Ca^{2+} ในสารละลายนั้นถูกดูดซึมโดยสารประกอบหลายชนิดแล้วจะทำปฏิกิริยาเกิดสารประกอบใหม่เป็นสารประกอบที่มีผลึกชัดเจนของ Tetracalcium Aluminate Hydrate C_4AH ($\text{C}=\text{CaO}$, $\text{A}=\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{H}=\text{H}_2\text{O}$) สารประกอบใหม่นี้จะเกิดที่จุดสัมผัสระหว่างขอบดินเหนียวอนุภาคหนึ่งกับดินเหนียวอีกอนุภาคหนึ่งในโครงสร้างแบบระเกะระกะ สารประกอบใหม่นี้จะเป็นตัวประสานที่ทำให้โครงสร้างแบบระเกะระกะมันคงขึ้น จึงมีผลทำให้คุณสมบัติด้าน Plasticity ของส่วนผสมระหว่างดินเหนียวกับปูนขาวเปลี่ยนแปลงไป

ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit) ของดินเหนียวจะเพิ่มขึ้นทันทีที่ผสมปูนขาว Herrin และ Mitchell, (1961) และอัตราการเพิ่มขึ้นนี้จะเปลี่ยนแปลงไปโดยตรงกับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมจนถึงจุดๆ

หนึ่งที่เรียกว่าจุด Lime Fixation Point ซึ่งเมื่อผสมปูนขาวในปริมาณมากกว่าจุดนี้ไปค่าขีดจำกัดพลาสติกจะไม่เพิ่มขึ้นหรือเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดพลาสติกในช่วงแรกๆ

ส่วนค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) นั้นจะมีค่าลดลงเมื่อปูนขาวปริมาณมากขึ้น แต่ในดินบางชนิด เช่น ดินประเภทคาโอไลไนท์ ค่าขีดจำกัดเหลวจะเพิ่มขึ้นมากเมื่อผสมปูนขาวในปริมาณที่มากขึ้น ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวแล้วค่าขีดจำกัดเหลวจะลดลงในดินเหนียวที่มีค่า Plasticity สูง แต่ในดินที่มีค่า Plasticity ต่ำขีดจำกัดเหลวจะเพิ่มขึ้น ค่าขีดจำกัดเหลวของดินเหนียวจะมีความไวมากกับชนิดของประจุบวกมากกว่าขีดจำกัดพลาสติก ไม่ว่าค่าขีดจำกัดเหลวจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อได้เพิ่มปริมาณปูนขาวค่าขีดจำกัดพลาสติกที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) ของดินที่มีค่า Plasticity สูงจะลดลง 50-80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปแม้จะเป็นปริมาณเล็กน้อย แต่ในดินบางชนิดที่มี Plasticity ต่ำเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวเข้าไปกลับทำให้ค่าดัชนีพลาสติกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีพลาสติกจะขึ้นกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างดินเหนียวกับปูนขาว การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นมากภายในชั่วโมงแรกๆ ที่ผสมปูนขาวและการเปลี่ยนแปลงทางด้าน Plasticity จะเกิดขึ้นหมดภายใน 2-3 วัน ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีพลาสติกเมื่อเวลาในการบ่มมากๆ ยังพบว่ามีบ้างแต่น้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรก โดยทั่วไปค่าดัชนีพลาสติกของปูนขาว Quicklime จะลดลงเร็วกว่าปูนขาว Hydrated Lime

2.3.2.2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกำลังความแข็งแรง

โดยทั่วไปดินทุกชนิดเมื่อนำมาผสมกับปูนขาวจะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้ส่วนผสมระหว่างดินกับปูนขาวมีความแข็งแรงขึ้น ส่วนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดินและปริมาณปูนขาวที่ผสม

Herrin และ Mitchell (1961) พบว่ากำลังรับแรงของส่วนผสมระหว่างดินกับปูนขาวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาวที่ผสมเพิ่มขึ้น และจากการทดลองคล้ายกับว่าไม่มีค่า Optimum Lime Content ที่จะให้กำลังแรงสูงสุด

2.3.2.3 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางการบดอัด

เมื่อบดดินที่ผสมปูนขาว 24 ชั่วโมง แล้วค่อยมาทำการบดอัดจะทำให้มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{dry,max}$) ที่ปริมาณน้ำร้อยละ 22.5 แต่พบว่าหากผสมเสร็จแล้วบดอัดทันทีจะมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ปริมาณน้ำร้อยละ 20 จากผลการทดสอบดังกล่าวพอสรุปได้ว่าผลของ Delay Compaction ทำให้ดินรวมตัวกันเป็นก้อนโตขึ้นจึงทำให้การบดอัดลำบากขึ้นและทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดลดลง

2.3.2.4 การเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดดิน

Herrin และ Mitchell (1961) พบว่าเมื่อผสมปูนขาวกับดินที่มีเนื้อละเอียดเม็ดดินจะทำปฏิกิริยา agglomeration และ flocculation ซึ่งจะเป็นผลทำให้เม็ดดินมีขนาดใหญ่ขึ้น การเกิดปฏิกิริยา agglomeration จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดินเป็นสำคัญดินที่มีขนาดเม็ดละเอียดกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดดินมากกว่าดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่กว่าโดยทั่วไปดินที่มี plasticity สูงมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยา agglomeration มากกว่าดินที่มี plasticity ต่ำปฏิกิริยานี้จะเป็นเหตุผลหนึ่งชี้ให้เห็นว่าปูนขาวเหมาะสมที่จะใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินที่มีค่า plasticity สูงถึงปานกลางมากกว่าดินที่มีค่า plasticity ต่ำปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมก็จะมีผลกับการเกิดปฏิกิริยา agglomeration ของดินคือถ้าปริมาณปูนขาวที่ผสมยิ่งมากการเกิดปฏิกิริยา agglomeration ก็จะมีสูง

2.3.2.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร

เมื่อนำปูนขาวมาผสมกับดินจะมีผลทำให้ปริมาณของส่วนผสมระหว่างดินกับปูนขาวเกิดการเปลี่ยนแปลง คือปริมาตรจะลดลงโดยเมื่อปริมาณปูนขาวที่ผสมลงไปดินเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาตรของส่วนผสมลดลงจนถึงค่าหนึ่ง เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวสูงกว่าค่านั้นแล้วก็ทำให้การเปลี่ยนแปลงปริมาตรลดลงอีกเล็กน้อย ปูนขาวจะมีผลสำคัญที่ทำให้ส่วนผสมมีความคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและการพองตัวเล็กน้อย

2.3.3 ประโยชน์ของปูนขาว

2.3.3.1 ด้านวิศวกรรม

การเติมปูนขาวลงในดินที่ปนดินเหนียวจะทำให้ความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดลดลงสำหรับการบดอัดเดียวกัน ตัวบ่งชี้ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคือปริมาณปูนขาวที่เติมลงไป ในดินเหนียวและปริมาณแร่ธาตุในดินเหนียว โดยกำลังของปูนขาวผสมดินจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของดิน ชนิดของปูนขาวและปริมาณของปูนขาวที่เติมลงไปดิน เช่น ในดินเหนียวที่มีกรดโลนิติกปะปนอยู่ เมื่อผสมกับปูนขาวจะทำให้ได้กำลังต่ำกว่าการผสมกับปูนขาวที่มีแคลเซียมสูงหรือปูนขาวกึ่งเหลว (Bell, 1988)

การใช้ปริมาณปูนขาวน้อยๆ ในการปรับปรุงคุณภาพดินจะได้กำลังสูงสุดในเวลาน้อยกว่า โดยปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 4.5 – 8 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินที่จะปรับปรุง แต่ใช้ปริมาณมากกว่านี้ได้อาติดินที่นำมาปรับปรุงมีอนุภาคของดินเหนียวปนอยู่มาก นอกจากนั้นระยะเวลาในการผสมก็เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังเช่นกัน (Bell, 1988)

2.3.3.2 ด้านเกษตรกรรม

1) การปรับปรุงดิน

ปุ๋ยขาวในทางเกษตรมีใช้มากในด้านการปรับปรุงดินจำพวกหน้าดินเหนียว ดินเป็นกรด ดินมีเชื้อโรค เป็นต้น ซึ่งมักใช้ในแปลงนา แปลงผัก สวนผลไม้ เพื่อปรับปรุงให้ดินมีคุณภาพเหมาะแก่การเพาะปลูก

2) การแลกเปลี่ยนประจุ

เมื่อนำปุ๋ยขาวผสมกับดินประจุที่เกิดจากปุ๋ยขาวจะเข้าแทนที่ประจุของแร่ธาตุต่างๆ ในดินทำให้แร่ธาตุถูกปลดปล่อยออกจากดิน ซึ่งจะทำให้พืชสามารถดูดซึมนำมาใช้ประโยชน์ได้ง่าย ประจุของแร่ธาตุที่พบในดิน ได้แก่ Al^{3+} Mg^{2+} K^+ H^+ Na^+ Li^+ $(SO_4)_2$ $(PO_4)_3$ (NO_3) เป็นต้น

3) ทำให้ดินร่วนซุย

เมื่อมีการแลกเปลี่ยนประจุของไอออนต่างๆ จะทำให้ดินสามารถแยกเป็นเม็ดหรือแบ่งเป็นก้อนได้ง่าย แทนที่จะเป็นเนื้อละเอียดเกาะกันแน่น

4) ปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง

การใส่ปุ๋ยขาวในดินจะช่วยปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างได้ดี โดยเฉพาะในสภาพดินที่มีค่าความเป็นกรดสูง (H^+) จะถูกทำให้ความเป็นกรดลดลงจากสภาพความเป็นด่างของปุ๋ยขาว (OH^-) ที่แตกตัวในดิน

5) การปรับสภาพน้ำ

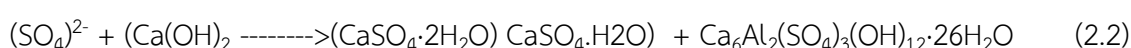
การปรับสภาพน้ำในทางเกษตรมักใช้ปรับสภาพน้ำตามบ่อเก็บน้ำแหล่งน้ำซึ่ง รวมถึงระบบบำบัดน้ำเสียในการเกษตร โดยเฉพาะแหล่งน้ำที่มีลักษณะเป็นกรดจากภาวะการเน่าเสียของสารอินทรีย์หรือแหล่งน้ำที่มีกรดกำมะถันมาก ซึ่งการใช้ปุ๋ยขาวจะช่วยลดความเป็นกรดของน้ำได้

6) การฆ่าเชื้อโรค

การฆ่าเชื้อโรคด้วยปุ๋ยขาวสามารถนำไปใช้กับแหล่งต่างๆ ของการเกษตร อาทิ การฆ่าเชื้อในดินตามแปลงเกษตร ฟันโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ รางระบายน้ำ บ่อบำบัดน้ำเสีย แหล่งน้ำเน่าเสีย เป็นต้น เมื่อปุ๋ยขาวละลายน้ำหรือได้รับความชื้นจะทำให้ดินหรือน้ำมีสภาพเป็นด่างเพิ่มขึ้นไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบางชนิดได้

2.4 ปัจจัยของสารประกอบซัลเฟตที่ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังของดิน

กระบวนการทำปฏิกิริยาของซัลเฟตจะเริ่มจากซัลเฟตไอออนของแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดเป็นยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต (Ettringite) สารประกอบยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตที่เกิดขึ้นมีปริมาตรเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 เท่า ทำให้เกิดการขยายตัว นอกจากนี้แมกนีเซียมไอออนจากแมกนีเซียมซัลเฟต จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ซึ่งเมื่อสารประกอบนี้มีปริมาณมากจะก่อให้เกิดการสลายตัวของ C-S-H ทำให้กำลังของดินที่ถูกผสมด้วยปูนขาวลดลง



2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับซีปีอาร์ของดินเหนียวอ่อนผสมซีเมนต์และปูนขาว

ศิริศักดิ์ (2550) พบว่าการก่อสร้างคันดินทางรถไฟในภาคเหนือตอนล่างนั้นจะใช้ดินเหนียวในบริเวณแนวเส้นทางซึ่งดินนี้จะเสียวก้าลงอย่างมากเมื่อถูกแช่น้ำ และเป็นสภาวะที่ต้องเผชิญทุกปีในฤดูฝน ทำให้แนวรางรถไฟเกิดการเคลื่อนตัวและต้องมีการบำรุงรักษาคันทางอยู่บ่อยครั้ง และยังทำให้รถไฟไม่สามารถวิ่งด้วยความเร็วที่ออกแบบไว้ได้ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินดังกล่าวด้วยการผสมปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยจะศึกษาค่า CBR (soaked) และการบวมตัวหลังแช่น้ำของดินที่ถูกปรับปรุงแล้วหลังจากการถูกบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่แปรผันปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ แปรผันความชื้นในการบดอัดและระยะเวลาการบ่มต่างๆ การศึกษานี้จะเน้นความสนใจไปที่คุณสมบัติในสภาพแช่น้ำของดินที่ถูกปรับปรุงแล้วเนื่องจากเป็นสภาวะที่ตรงกับสภาพจริงในสนามซึ่งพบว่าดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวในสภาพแช่น้ำจะเป็นการบวมตัวเมื่อแช่น้ำซึ่งจะมีผลกระทบต่อกำลังของดินการลดการบวมตัวจะทำได้ด้วยการเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มให้เพียงพอทำการบดอัดที่ความชื้นสูงกว่า OMC และมีระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมจากการทดลองยังพบว่าการผสมด้วยปูนซีเมนต์จะให้ค่า CBR มากกว่าปูนขาวซึ่งผลของงานวิจัยนี้พร้อมทั้งการศึกษาถึงคุณสมบัติทางด้าน strength และ stiffness เพิ่มเติมจะช่วยให้การพิจารณาการแก้ไขปัญหาของคันทางรถไฟต่อไป

2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนผสมซีเมนต์

เกษม (2541) ทำการศึกษาผลของการผสมปูนซีเมนต์ลงในดินเหนียวอ่อนในห้องปฏิบัติการโดยใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณ 250 300 และ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินที่ถูกปรับปรุงหรือเทียบเป็นร้อยละ 21.9 26.3 และ 30.7 และใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ากำลังรับ

แรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มเพิ่มขึ้น

2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์และเถ้าแกลบ

อภิชาติ และคณะ (2007) ทำการศึกษากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัดที่ผสมด้วยซีเมนต์และเถ้าแกลบ โดยทำการแปรผันปริมาณซีเมนต์ที่ 3%, 5%, และ 7% ของน้ำหนักดินแห้ง แปรผันอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่ถูกบดอัดและเถ้าแกลบที่ไม่ถูกบดอัดในปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ 40 และ 30, 20 และบ่มดินตัวอย่างเป็นเวลา 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน พบว่าที่ปริมาณซีเมนต์ค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์จะมีค่าสูงกว่าดินซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบในช่วงอายุบ่มระหว่าง 7 ถึง 28 วัน หลังจากนั้น อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์จะมีค่าต่ำ และพบว่าที่อายุบ่ม 60 วัน กำลังอัดแกนเดียวของทั้งดินซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ผ่านการบดและไม่ผ่านการบด ที่ทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบในปริมาณ 20 และ 10 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์เพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าการทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้ดินมีกำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มดินตัวอย่างนานขึ้น

ศุภกิจ และ กมล (2545) ทำการศึกษาถึงผลการปรับปรุงคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) ด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์และปูนขาวเท่ากับ 100 : 150 : 200 และ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสานที่ใช้เท่ากับ 0.8 และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 4, 7, 14, 28, 90 และ 180 วันตามลำดับซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าการพัฒนา กำลังรับแรงส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มผสมถึงอายุ 28 วันและหลังจากนั้นกำลังรับแรงจะพัฒนาไปอย่างช้าๆ ในระยะยาว โดยกำลังรับแรงของดินผสมปูนซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่ม แต่สำหรับดินที่ผสมปูนขาวกำลังของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวจนถึงปริมาณปูนขาวที่เหมาะสม (Optimum Lime Content) ซึ่งจะให้กำลังสูงสุด หากใช้ปริมาณปูนขาวมากไปกว่านี้ จะไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลัง

2.5.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีซัลเฟตผสมเถ้าแกลบ

อภิชาติ และคณะ (2008) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปนเปื้อนด้วยสารละลายซัลเฟตโดยทำการศึกษากำลังอัดแกนเดียวของปูนซีเมนต์ในธรรมชาติ ดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตและดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตที่ทดแทนปริมาณซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วน 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20 และ 70 : 30 พบว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ในธรรมชาติและดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ 5% 10% และ 15% และอายุบ่มที่ 7 วัน 14 วัน 28 วัน และ 60 วัน จนถึงปริมาณซีเมนต์ที่ 20% กำลังอัด

แกนเดียวจะมีค่าลดลง ปริมาณซีเมนต์ที่ทำให้กำลังแกนเดียวมีค่าสูงสุดในปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 25% ของน้ำหนักแห้ง อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าสูงในช่วงอายุบ่มระหว่าง 7 ถึง 28 วัน หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลง โดยที่กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติ จากการแทนที่เถ้ากลบในดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟต พบว่า ปริมาณสารเชื่อมประสาน (ซีเมนต์+เถ้ากลบ) เท่ากับ 10% ของน้ำหนักดินแห้งและอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบที่ 10% ของน้ำหนักซีเมนต์ที่อายุบ่มน้อยกว่า 28 วัน กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติและที่อายุบ่ม 60 วัน กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าสูงกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า การทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้ดินมีกำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มนานขึ้น

2.5.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของซัลเฟตต่อกำลังของดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์

เชิดชนินทร์ และ คณะ (2548) ได้ศึกษาผลกระทบของซัลเฟตต่อกำลังของดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์โดยทำแปรผันปริมาณซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ร้อยละ 10 15 และ 20 ต่อน้ำหนักดินแห้ง และแปรผัน Na_2SO_4 ร้อยละ 5 10 และ 15 ต่อน้ำหนักดินแห้ง ทำการบ่มตัวอย่างที่อายุ 7 14 และ 28 วัน จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าทั้งประจุลบ SO_4^{2-} และสารประกอบ Na_2SO_4 ส่งผลในทางลบต่อกำลังของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ประจุลบ SO_4^{2-} ส่งผลเสียมากกว่าสารประกอบ Na_2SO_4 ประมาณ 3 เท่าต่อกำลังของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และการใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ช่วยลดผลกระทบของซัลเฟตที่มีต่อกำลังของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ นอกจากนี้ยังช่วยต้านการแทรกเข้าของประจุลบ SO_4^{2-}

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ผู้วิจัยออกแบบวิธีการดำเนินการวิจัยของโครงการวิจัยโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้คือดินตะกอนทะเลบริเวณท่าเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิรา จันทบุรี โดยสามารถแบ่งงานได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิรา จันทบุรี โดยทำการทดสอบดังนี้

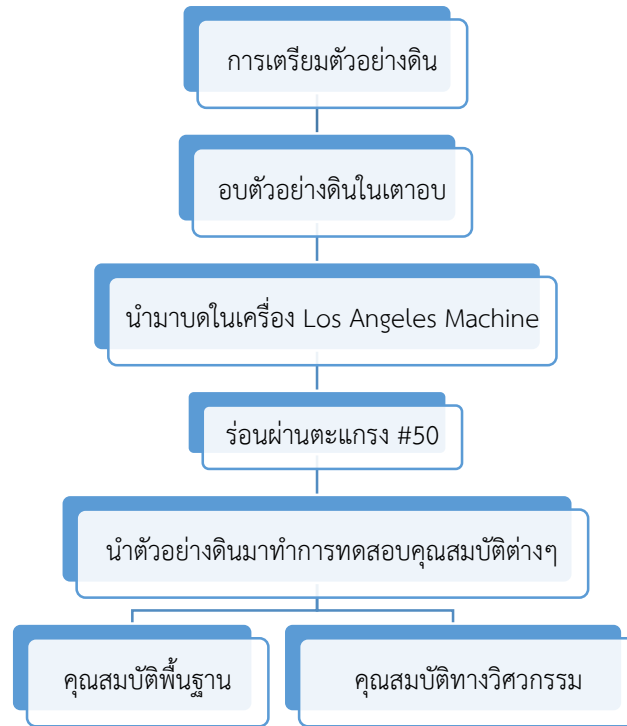
1.1 ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test: ASTM D854)

1.2 ทดสอบหาค่าพิกัดชั้นเหลว (Atterberg limit test: ASTM D4318, D427) ได้แก่ ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit) และค่าดัชนีพลาสติก (Plastic index)

ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ โดยแปรผันปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อดินตะกอนทะเลโดยน้ำหนักแห้ง คือ 0% 3% และ 5% และแปรผันอัตราส่วนผสมของปูนขาวต่อดินตะกอนทะเลโดยน้ำหนักแห้ง คือ 0% 2% 4% 6% และ 8% ตามลำดับ และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test: ASTM D2166-85) ในทุกๆ อัตราส่วนผสม เพื่อวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, q_u) และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, su) ในทุกๆ อัตราส่วนผสม ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้จะถูกเตรียมโดยจำลองพฤติกรรมเช่นเดียวกับการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทางคือการบดอัดแบบสถิตย์ เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่มีความชื้นบดอัดเหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) และมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, $\gamma_{dry, max}$) ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Standard compaction Test: ASTM D1557)

ส่วนที่ 3 แปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่างดินในทุกๆ อัตราส่วนผสม (ดังรายละเอียดในวิธีการดำเนินการวิจัยส่วนที่ 2) คือ 0 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงอัดแกนเดียว ค่ากำลังรับแรงเฉือน และความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ

ส่วนที่ 4 ภายหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่างดินตะกอนทะเลจะถูกนำมาทดสอบเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ภายในตัวอย่างดินภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ในการทดสอบ

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ดินตะกอนจากชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี
2. ปูนขาวชนิด Quick lime
3. แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)
4. น้ำกลั่น

3.3 อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน (ASTM D854)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องชั่ง ชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
2. เทอร์โมมิเตอร์ชนิด 0-100 องศาเซลเซียส
3. เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส
4. เตาและภาชนะต้มน้ำ
5. อ่างน้ำ
6. เครื่องกวน (Stirring Apparatus)
7. ขวดพลาสติกขนาดความจุ 500 มิลลิลิตรที่สามารถทนความร้อนได้สูง

วิธีการทดสอบ

1. ขั้นตอนการสอบเทียบ (Calibrate) ขวดพลาสติกก่อนหรือหลังการทดสอบ

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำในขวดพลาสติก (ที่ขีดปริมาตร 500 มิลลิลิตร) และน้ำหนักขวดที่อุณหภูมิต่างๆ (ในช่วงที่ทำการทดสอบ) สำหรับอ่านค่าน้ำหนักของน้ำในขวดพลาสติกที่อุณหภูมิตดสอบสามารถทำได้ดังนี้

1. ทำความสะอาดขวดพลาสติกที่จะใช้ทำการทดสอบ
2. เติมน้ำกลั่นในขวดประมาณ 3 ใน 4 ของคอขวด (เพื่อไม่ให้ น้ำเดือดขวดแก้วจะแตก)
3. ไล่อากาศในน้ำด้วยการต้มน้ำให้เดือดในเตาแผ่นร้อนประมาณ 10 นาที นำขวดแก้วลงจากเตา เติมน้ำกลั่นที่ต้มไล่ฟองอากาศทิ้งไว้แล้วลงในขวดพลาสติกให้เต็มด้วยวิธีกลักน้ำ จุ่มปลายสายยางลงใต้ผิวน้ำ เพื่อไม่ให้อากาศเข้าไปผสมในน้ำอีกและปล่อยให้เย็น ถ้าต้องการให้เย็นเร็วอาจแช่ในแช่อ่างน้ำจมนกระทั่ง อุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 40-50 องศา ตรวจสอบว่าอุณหภูมิของน้ำในขวดพลาสติกเท่ากันทุกระดับหรือไม่ ถ้าไม่เท่ากันให้คลึงขวดเอียงไปมาหรือใช้หลอดแก้วกวนไปมา
4. แต่งขอบน้ำให้อยู่ที่ขีดบอกปริมาตร 500 มิลลิลิตร สังเกตขอบล่างของโค้งผิวน้ำเซ็ดขวด ภายนอกและภายในเหนือผิวน้ำให้แห้ง
5. นำขวดพลาสติกที่ใส่น้ำอยู่ในขวดขึ้นชั่ง และวัดอุณหภูมิน้ำตรวจสอบอีกครั้งว่าอุณหภูมิของน้ำ ในขวดเท่ากันทุกระดับหรือไม่

6. ทำการทดสอบในข้อ 4 – 5 ซ้ำอีก 3 – 4 ครั้ง ในช่วงอุณหภูมิจากประมาณ 40 องศาหรือ 50 องศา จนถึงอุณหภูมิห้อง ถ้าต้องการให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องให้ใช้น้ำแข็งผสมในอ่างน้ำ แต่ต้องระวังขณะอ่านค่า อุณหภูมิทดสอบจะต้องกวนน้ำ (แบบไม่ให้อากาศเข้าไปผสม) ให้มีอุณหภูมิเท่ากันทั่วขวด

2. ขั้นตอนการหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

1. นำดินใส่ในขวดพลาสติกและใส่น้ำลงไปประมาณ 3 ใน 4 ส่วนของปริมาตรขวดโดยให้ดินจมอยู่ใต้ทั้งหมดและอย่าให้ดินติดอยู่ข้างๆ ขวด

2. ทำการไล่ฟองอากาศโดยใช้ปั๊มสุญญากาศแรงดูด 10 - 20 นิ้วปรอทประมาณ 4 – 5 ชั่วโมง หรือนำไปกวนในน้ำร้อนอย่างน้อย 10 นาที หรือจะทำทั้งสองอย่างควบคู่กันไปได้โดยใช้ปั๊มสุญญากาศไม่น้อยกว่า 10 นาทีแล้วจึงกวนในน้ำร้อนอีกประมาณ 10 นาที พร้อมกับบดทิ้งขวดไปมาหลายรอบทำเช่นนั้นสลับกันไปเรื่อยๆ และคอยสังเกตว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นอีกหรือไม่ ทำจนกระทั่งฟองอากาศหมดไปซึ่งต้องใช้เวลาและความละเอียดในการสังเกต

3. หลังจากไล่ฟองอากาศหมดแล้วทำการเติมน้ำกลั่นให้ระดับท้องน้ำอยู่ที่ขีด 500 มิลลิลิตรพอดี ในการเติมน้ำกลั่นนั้นควรใช้หลอดและปล่อยน้ำกลั่นจากหลอดโดยจุ่มปากหลอดให้อยู่ใต้ระดับน้ำในขวดพลาสติกเพื่อป้องกันอากาศลงไปอีก แล้วตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องทดสอบจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำในขวดพลาสติกเท่ากับอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิที่ต้องการ (โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์คอยเช็คคอยู่เสมอ) และคอยสังเกตว่าถ้าระดับในขวดพลาสติกต่ำกว่า ขีด 500 มิลลิลิตร ก็ให้เติมน้ำกลั่นท้องน้ำพอดีกับขีดอยู่เสมอ

4. นำขวดพลาสติกไปชั่งจะได้เป็นน้ำหนักของขวดพลาสติก + น้ำ + ดิน แล้วจึงทำการวัดอุณหภูมิโดยจุ่มเทอร์โมมิเตอร์ให้อยู่ประมาณกึ่งกลางกระเปาะของขวดพลาสติก คอยจนกระทั่งอุณหภูมิตั้งที่แล้วก็บันทึกค่าอุณหภูมิไว้ หลังจากนั้นนำไปเทใส่ภาชนะโดยต้องเทดินออกให้หมดจนกระทั่งขวดพลาสติกสะอาดเสร็จแล้วจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส โดยทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน

5. นำดินที่อบแห้งแล้วไปชั่งแล้วบันทึกค่า เมื่อลบน้ำหนักภาชนะออกจะได้เป็นน้ำหนักของดินแห้ง

3.3.2 การทดสอบหาค่าพิกัดชั้นเหลว (Atterberg's limit)

3.3.2.1 หาค่าพิกัดเหลวโดยวิธีถ้วยคาซาแกรนดี (Casagrande's cup method) (ASTM D4318)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องเคาะดิน (Casagrande's Cup)
2. มีดปาดร่องดิน (Grooving Tool)
3. ถ้วยผสมดิน
4. มีดปาด (Spatula) ขนาด 10 เซนติเมตร
5. น้ำกลั่น



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit)

วิธีการทดสอบ

1. ร่อนตัวอย่างดินแห้งผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ประมาณ 200 กรัม แล้วนำตัวอย่างดินมาผสมน้ำให้เข้ากัน
2. ใช้มีดปาด (Spatula) ตักดินปาดลงบนถ้วยทองเหลือง (Casagrande's Cup) โดยความหนาของดินตรงกลางประมาณ 10 มิลลิเมตร แล้วบากโดยเครื่องมือบาก (Grooving Tool) ให้เป็นร่องตรงกลาง
3. เคาะถ้วยทองเหลืองด้วยความเร็วสม่ำเสมอ 2 ครั้งต่อวินาที จนกระทั่งดินตอนล่างของรอยบากเคลื่อนเข้าจนบรรจบกัน 12.7 มิลลิเมตร จดบันทึกจำนวนครั้งของการเคาะไว้
4. นำดินบริเวณรอยบากไปหาค่าความชื้น (การเคาะครั้งแรกจำนวนครั้งควรจะประมาณ 40-50 ครั้ง ถ้ามากกว่าให้เพิ่มน้ำอีก แต่ถ้าน้อยกว่าให้ทำให้แห้งลง)
5. ผสมน้ำในดินแล้วทำตามข้อ 3 และ 4 โดยให้มีจำนวนครั้งของการเคาะน้อยลงประมาณ 10 ครั้ง แล้วนำดินไปหาความชื้น ทำเช่นนี้จนได้จำนวนครั้งของการเคาะอย่างน้อย 4 ค่า (จำนวนการเคาะครั้งสุดท้ายควรอยู่ราว 5-10 ครั้ง)
6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเคาะ (N) และค่าความชื้นโดยให้จำนวนการเคาะอยู่ในรูปของ log scale

3.3.2.2 การทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกโดยวิธีการปั้นคลึง (Rolling Method: ASTM D4318)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แผ่นกระจกขนาด 30 x 30 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร
2. ท่อนโลหะขนาด 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว)

วิธีการทดสอบ

1. นำดินที่เหลือจากการทดสอบขีดพิคัดเหลวมาผึ่งให้หมาดๆ แล้วนำมาปั้นคลึงเป็นแท่งยาวขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร แล้วค่อยๆ คลึงให้เล็กลงจนมีขนาดเท่ากับ 1 หุน (1/8 นิ้ว) แล้วคลึงต่อไปเรื่อยๆ โดยพยายามรักษาขนาดดังกล่าวจนดินเริ่มแตกปริออก
2. เมื่อดินเริ่มแตก นำดินไปอบหาความชื้น ความชื้นดังกล่าวเรียกว่า Plastic Limit (PL)
3. ทำซ้ำอีกครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

3.3.3 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM D1557)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. โมลที่ใช้ในการทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว ความสูง 4.584 นิ้ว พร้อมด้วยปลอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเดียวกันและแผ่นฐานสูง 50 มม. (มีปริมาตร 1,000 ซม.³)
2. ค้อนบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานหนัก 10 ปอนด์ ระยะยก 18 นิ้ว
3. แม่แรงสำหรับดันตัวอย่างดินออกจากโมลเหล็กปาดดินสันตรงขนาด 30 ซม.
4. ตะแกรงร่อนดินขนาด เบอร์ 4
5. เครื่องชั่งชนิดอ่านไค้ละเอียดถึง 0.10 กรัม ถึง 10 กิโลกรัม
6. ภาตผสมดิน
7. เครื่องชั่งชนิดอ่านไค้ละเอียดถึง 0.01 กรัม
8. เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 105 ± 5 องศาเซลเซียส
9. กระบอกลงที่มีขีดแบ่งปริมาตร
10. ช้อนตักดิน
11. ค้อนยาง
12. กระจบองใส่ตัวอย่างดิน

วิธีการทดสอบ

1. นำตัวอย่างดินที่ได้จัดเตรียมไว้มาเทลงในภาตผสมดิน ใช้ค้อนยางทุบดินที่เกาะกันอยู่ออกจากกัน ถ้าตัวอย่างเป็นดินเหนียว ผึ่งให้แห้งแล้วทุบให้ละเอียดหรืออาจใช้เครื่องบดร่อน ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 หน้าประมาณ 3-5 กิโลกรัม
2. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของโมล เพื่อหาปริมาตรของดินในโมล จากนั้นประกอบโมลและแผ่นฐาน พร้อมชั่งน้ำหนัก (ไม่ต้องชั่งปลอกสวม)
3. นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้อย่างน้อย 5 กิโลกรัม โดยเริ่มอัตราส่วนซีเมนต์และผสมน้ำให้มี

ความชื้นตามค่าที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน

4. ตักดินใส่โมลที่ประกอบไว้แล้ว โดยประมาณให้ความสูงในแต่ละชั้นเท่าๆ กัน โดยมีจำนวน 5 ชั้น เมื่อบดอัดครบจำนวนชั้นแล้ว ในชั้นสุดท้ายให้ดินพื้นขอบโมลขึ้นไปประมาณ 1-2 ซม.

5. ใช้ค้อน 10 ปอนด์ บดอัดดินในโมลแต่ละชั้นให้ทั่วทั้งโมล โดยบดอัดชั้นละ 25 ครั้ง โดยให้โม่ ลวางอยู่บนพื้นคอนกรีตเรียบ

6. เมื่อตอกกระทันท์บดอัดครบจำนวนครั้งแล้วถอดบล็อกสวมของโมลออก ใช้บรรทัดเหล็กปาดดิน ส่วนที่สูงเกินปากโมลออก และอุดแต่งผิวดินให้เรียบเสมopakโมล ใช้แปรงปัดทำความสะอาดดินที่ค้างอยู่นอกโมลแล้วถอดแผ่นฐานออก นำไปชั่งน้ำหนักดินในโมล ให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

7. ดันแท่งตัวอย่างดินออกจากโมล แล้วผ่ากลางตามแนวตั้ง เก็บดินตัวอย่างตามแนวผ่าอย่างน้อย 100 กรัม แล้วนำไปชั่งน้ำหนักและนำเข้าในเตาอบเพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นต่อไป

8. ใช้ค้อนยางทุบค้อนดินที่เหลือให้แตกออกจนร่วน แล้วผสมน้ำเพิ่มอีก 2 - 3 % คลุกเคล้ากันให้ทั่วสม่ำเสมอ แล้วทำการทดสอบซ้ำตามข้อ 4 ถึง 7 จนกระทั่งน้ำหนักดินในโมลที่ชั่งได้ครั้งสุดท้ายลดลง และอย่างน้อยควรจะเปลี่ยนหรือเพิ่มปริมาณน้ำถึง 5 ครั้ง

9. หาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ทำให้ดินแน่นที่สุดจากการเขียนเส้นกราฟโดยแกนนอนเป็นค่าความชื้นและแกนตั้งเป็นหน่วยน้ำหนักแห้ง



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

3.3.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดิน (ASTM D2166)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องกดใช้กดแท่งดิน
2. เครื่องดันตัวอย่างดิน ใช้ดันแท่งตัวอย่างดินออกจากท่อบาง (Thin Wall Tube)
3. Dial Gauge ใช้วัดได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร หรือ 0.001 นิ้ว สามารถอ่านระยะทางเคลื่อนที่ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 ของความยาวแท่งตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบ
4. Vernier Caliper ใช้วัดขนาดของแท่งตัวอย่าง โดยวัดได้ละเอียด ถึง 0.1 มิลลิเมตรหรือ 0.01 นิ้ว
5. นาฬิกาจับเวลา
6. เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
7. เครื่องชั่งชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม ใช้สำหรับตัวอย่างดินที่มีมวลน้อยกว่า 100 กรัม สำหรับตัวอย่างดินที่มีมวลมากกว่า 100 กรัม ให้ใช้เครื่องชั่งชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
8. เครื่องมือเบ็ดเตล็ด เครื่องมืออื่นๆ ที่ต้องใช้ คือ เครื่องมือตัดและตกแต่งตัวอย่าง เครื่องทำตัวอย่าง Remolded และกระป๋องอบดิน

วิธีการทดสอบ

ก) การเตรียมตัวอย่าง

1. นำตัวอย่างไปผึ่งลมให้พอแห้ง แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เพื่อให้แห้ง
2. นำเข้าเครื่อง Los Angeles เพื่อบดให้ละเอียดแล้วจึงนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50
3. นำตัวอย่างที่ได้มาผสมกับซีเมนต์และน้ำตามอัตราส่วนการทดสอบ
4. อัดดินตัวอย่างใส่ลงในกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร โดยรองที่ฐานด้วยก้อนทองแดงและกระดาษกรอง โดยแบ่งเป็น 3 ช่วงๆ ละเท่าๆ กันจนดินตัวอย่างหมด
5. กรณีที่ไม่มีการบ่ม ทำตามข้อ 7
6. ในกรณีที่มีการบ่ม นำกระบอกที่มีดินตัวอย่างอยู่ในใส่ลงในภาชนะที่มีความสูงมากกว่ากระบอกแล้วจึงคลุมด้วยกระสอบป่าน โดยรักษาอุณหภูมิด้วยวิธีการพรมน้ำพอชุ่มทุกๆ วันจนกว่าจะครบอายุบ่ม
7. นำตัวอย่างดินที่ครบอายุบ่ม ถอดกระบอกออกโดยการใช้เครื่องดันตัวอย่างดิน
8. นำตัวอย่างดินไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียว



รูปที่ 3.4 เครื่อง Los Angeles

ข) การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวโดยวิธีควบคุมความเครียด

1. วางแท่งตัวอย่างไว้ตรงกลางแผ่นฐานของเครื่องกด แล้วเลื่อนฐานเครื่องกดขึ้นจนกระทั่งผิวบนของแท่งตัวอย่างสัมผัส Proving ring ตั้งหน้าปิดเป็นศูนย์ก่อนเริ่มต้นทดสอบ
2. ติดตั้ง Dial Gauge ที่ใช้อ่านระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างดิน
3. เริ่มทดสอบแรงกดแกนเดียว จดแรงกดและระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างทุกๆ 0.1 มิลลิเมตร
4. เพิ่มแรงกดต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงกดลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่า 20 เปอร์เซ็นต์
5. ฝาดตัวอย่างตามแนวตั้ง เก็บดินตัวอย่างตามแนวฝาดอย่างน้อย 100 กรัม นำไปชั่งน้ำหนักและนำเข้าในเตาอบเพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นต่อไป
6. เขียนรูปสภาพแท่งตัวอย่างที่ทดสอบเสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยแตกร้าววัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนนอน
7. นำค่าแรงกดและระยะหดตัว เขียนลงกราฟโดยให้แรงกดเป็นแกนตั้งและระยะหดตัวเป็นแกนนอน เพื่อหาค่ากำลังรับแรงที่สูงสุด



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

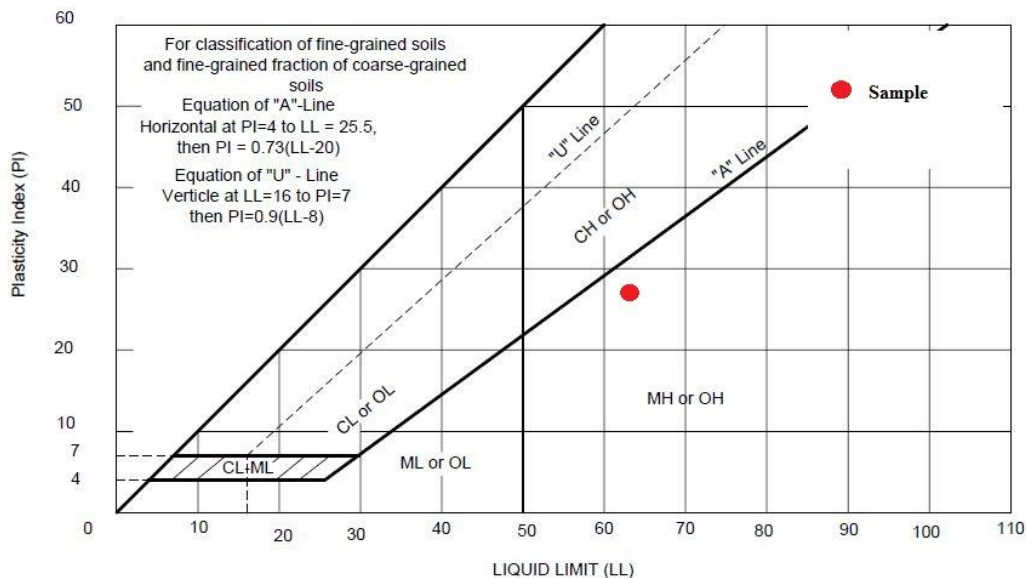
บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

4.1.1 ค่าขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก และดัชนีพลาสติกของดินตัวอย่าง

จากการทดสอบหาค่าขีดจำกัดชั้นเหลวของดินตะกอนทะเล (ASTM D4318 และ D427) พบว่าค่าขีดจำกัดเหลว ค่าขีดจำกัดพลาสติก และค่าดัชนีพลาสติกของดินตะกอนทะเลมีค่าเท่ากับ 64.4% 37.9% และ 26.5% ตามลำดับ โดยการจำแนกประเภทของดินตามระบบ USCS ดินตัวอย่างจัดเป็นดินตะกอนที่มีสภาพความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity silt, MH) ดังแสดงในรูปที่ 4.1



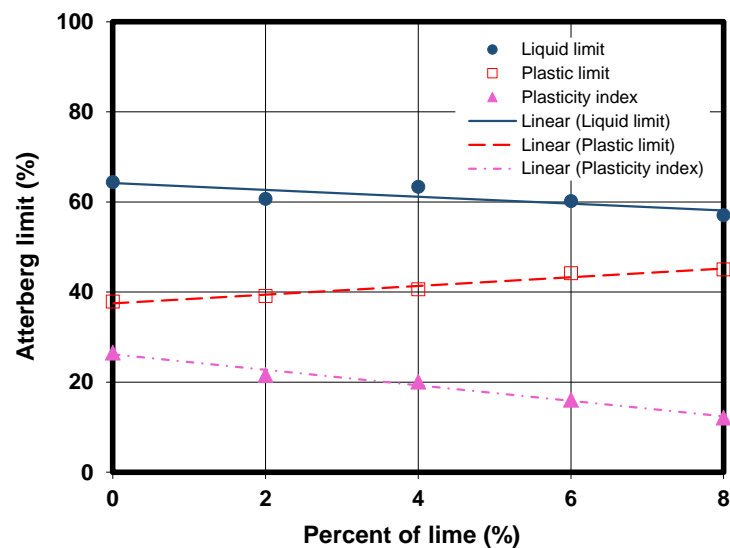
รูป
ที่

รูปที่ 4.1 จำแนกชนิดของดินตัวอย่างโดยวิธี USCS

ตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 แสดงค่าคุณสมบัติที่กั้อัตเตอร์เบิร์กของดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบหาค่าพิกั้อัตเตอร์เบิร์กจากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 พบว่าปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าพิกั้อัตเตอร์เบิร์กลดลงเล็กน้อย ค่าพิกั้อัตเตอร์เบิร์กเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าดัชนีพลาสติกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มปริมาณปูนขาวทำให้ความชื้นในช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีออสสูง เป็นผลทำให้ double layer water หดแคบลงและเกิดการดึงดูดอนุภาคของเม็ดดินเข้าหากันและจับตัวกัน เรียกว่ากระบวนการ Flocculation and Agglomeration ซึ่งมีผลต่อค่าพิกั้อัตเตอร์เบิร์กของดิน (Herrin and Mitchell, 1961)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพิกัดแอดเตอร์เบิร์กของดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ

Lime (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
0	64.42	37.87	26.55
2	60.69	39.10	21.59
4	63.37	40.59	20.10
6	60.21	44.15	16.05
8	57.09	45.00	12.09



รูปที่ 4.2 ค่าพิกัดแอดเตอร์เบิร์กของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ

4.1.2 ความถ่วงจำเพาะของดิน

การทดสอบความถ่วงจำเพาะของดิน ASTM D854 ของดินตัวอย่าง พบว่า ดินตะกอนตัวอย่างมีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.69

4.1.3 ความเข้มข้นของซัลเฟต

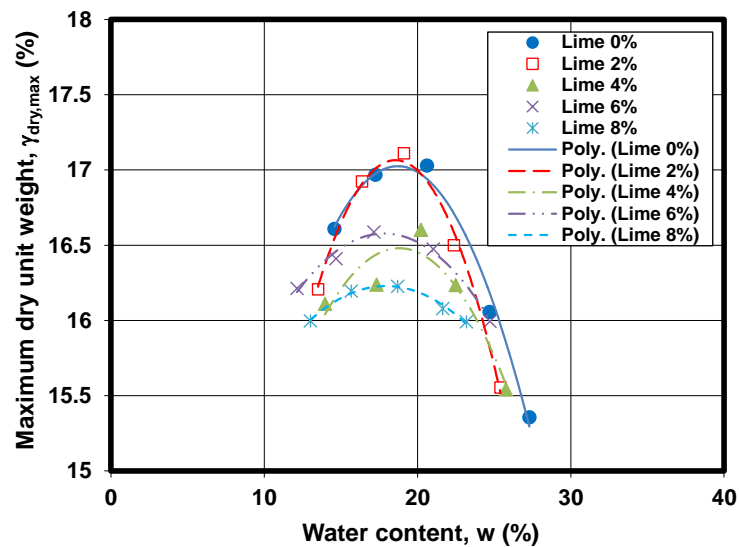
การทดสอบความเข้มข้นของซัลเฟตในดินสามารถทำได้โดยนำดินตัวอย่างไปชะละลายซัลเฟตด้วยกรดซัลฟิวริกผสมกับกรดไนตริกตามวิธี Synthesis Precipitation Leaching Procedure (SPLP) โดยจะได้ออกมาในรูปของสารละลายซึ่งสามารถนำไปวัดปริมาณของซัลเฟตได้ในรูปของค่าความขุ่น

จากการทดสอบหาความเข้มข้นของซัลเฟตโดยใช้วิธีการวัดค่าความชุ่มตามมาตรฐาน ASTM D516 ของดินเหนียวตัวอย่าง พบว่ามีค่าความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำทะเล คือ 2,683 ppm ในดินตัวอย่างสภาพธรรมชาติ 76.5 ppm ในดินตัวอย่างผสมซัลเฟต 3% คือ 447 ppm และในดินตัวอย่างผสมซัลเฟต 5% คือ 851 ppm

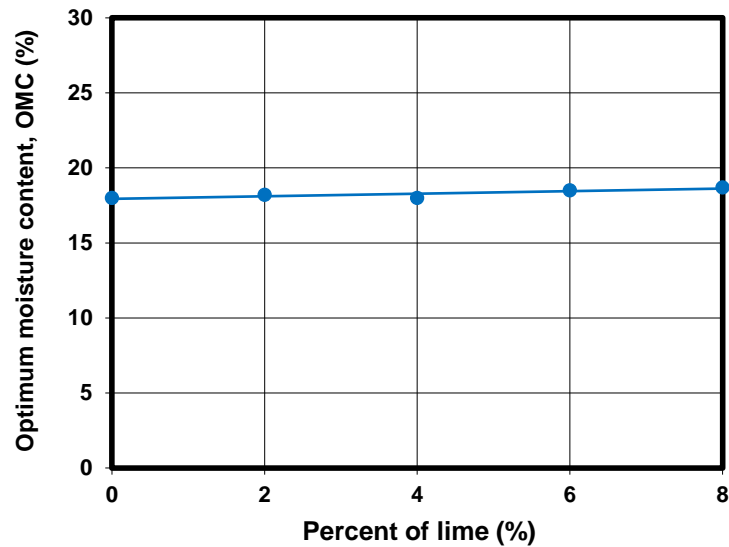
4.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ

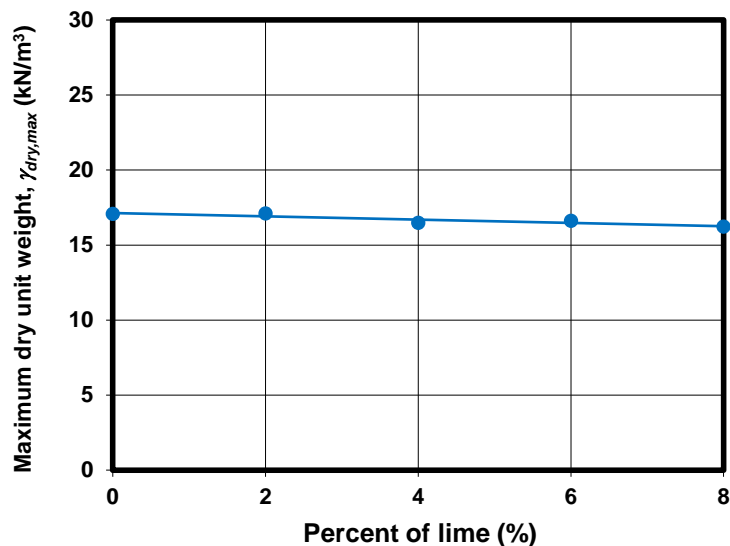
Cement (%)	Optimum moisture content (OMC) (%)	Maximum dry unit weight ($\gamma_{dry\ max}$) (kN/m ³)
0	18	17.08
2	18.2	17.1
4	18	16.48
6	18.5	16.62
8	18.7	16.23



รูปที่ 4.3 กราฟการบดอัดดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.4 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.5 ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ

ทุกๆ อัตราส่วนผสมของดินตัวอย่างจะถูกนำมาทำการทดสอบบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานเพื่อหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด กราฟการบดอัดดินตะกอนผสมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.3 และผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ พบว่า ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการบดอัดดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของปูนขาวที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้ามากที่บริเวณผิวของเม็ดดินและจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ ประกอบกับการหดแคบลงของ double layer water จากอินที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้ต้องการปริมาณความชื้นมากขึ้นเพื่อทำปฏิกิริยา ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hausmann (1990) และจากรูปที่ 4.5 พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างมีแนวโน้มลดลง

เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของปูนขาวน้อยกว่าดินซึ่งเมื่อผสมกันเป็นมวลรวมแล้วจึงส่งผลให้หน่วยน้ำหนักลดลงด้วย

4.3 ผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาว

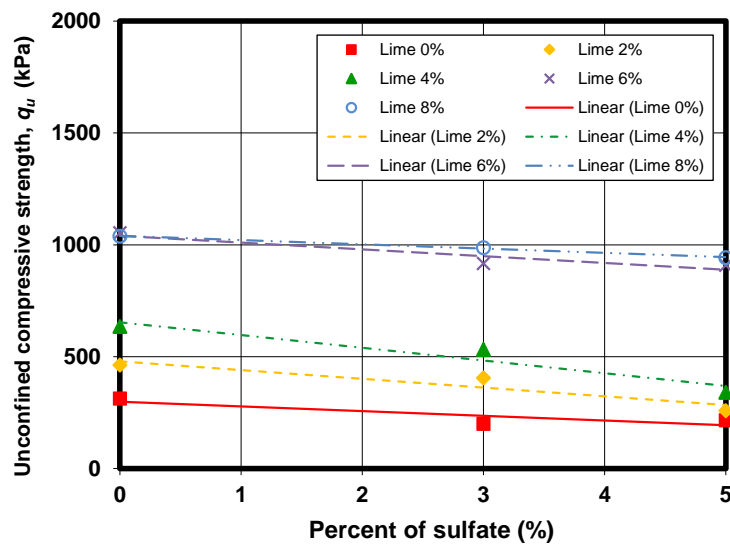
ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาว

ระยะเวลาบ่ม (day)	ปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตต่อน้ำหนักแห้งรวมของส่วนผสม (%)	อัตราส่วนผสมของปูนขาว (%)				
		0	2	4	6	8
0	0	312.45	461.79	634.37	1052.95	1038.04
	3	199.40	404.99	531.34	916.63	986.97
	5	215.01	258.34	340.25	907.86	942.39
7	0	484.60	519.32	1001.18	1390.52	1597.00
	3	284.20	515.147	647.98	1464.19	1383.94*
	5	292.05	489.48	512.04	981.15	1074.75
14	0	493.56	596.91	796.87	1404.85	1785.65*
	3	381.12	474.06	1040.875	1424.66	1637.84
	5	303.64	477.91	699.452	1259.24	1555.39*
28	0	553.70	438.46	911.32	1562.78*	2309.85
	3	362.54	425.07	883.43*	1289.2*	2198.02
	5	404.16	239.42	591.03*	1185.15	2074.56

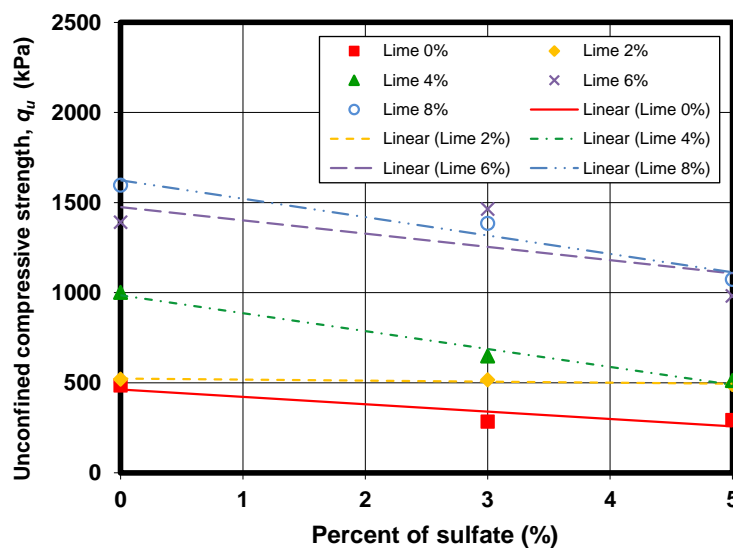
หมายเหตุ: ค่ากำลังอัดแกนเดียวในตารางได้จากค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง 3 ก้อน

* หมายถึง ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ได้จากค่าเฉลี่ย 2 ก้อน

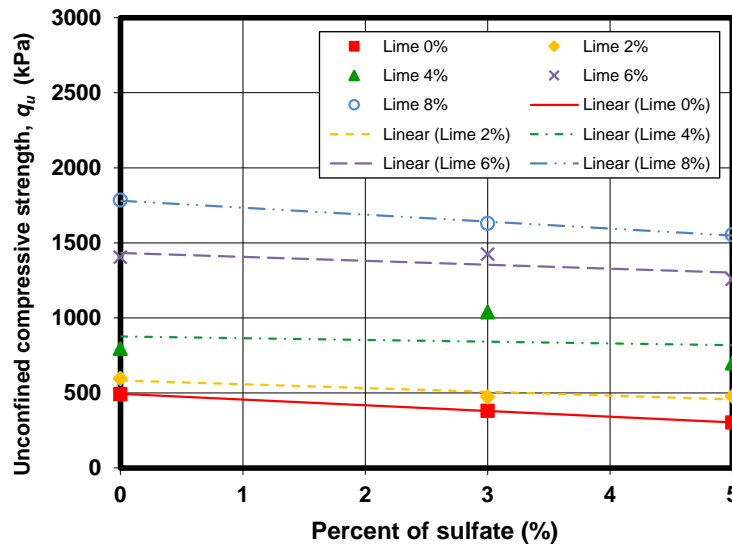
เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลผสมปูนขาว ตัวอย่างดินทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm สูง 100 mm ที่ใช้ในการทดสอบนี้ถูกเตรียมที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยแปรผันปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟต คือ 0% 3% และ 5% แปรผันอัตราส่วนผสมปูนขาวต่อดินตะกอนทะเลโดยน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด คือ 0% 2% 4% 6% และ 8% และแปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่างดินคือ 0 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6



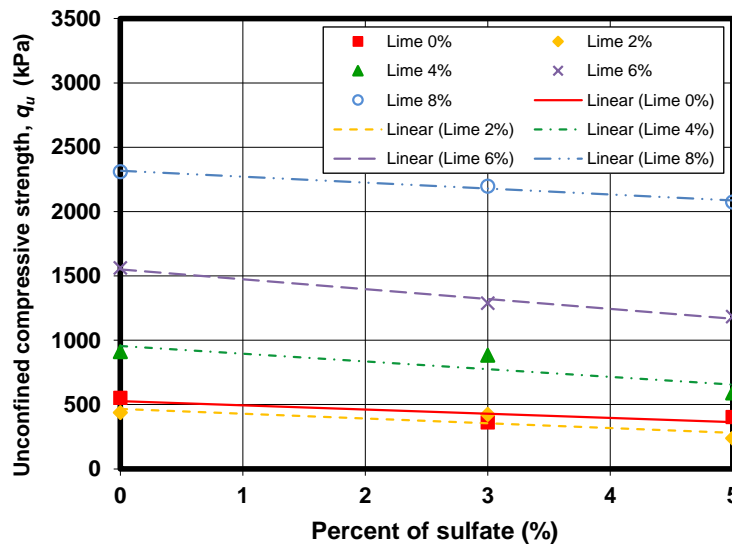
(ก) ระยะเวลาบ่ม 0 วัน



(ข) ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



(ค) ระยะเวลาบ่ม 14 วัน



(ง) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4.6 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลผสมปูนขาว เมื่อแปรผันความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟต

จากรูปที่ 4 (ก)-(ง) แสดงค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มและแปรผันปริมาณปูนขาวในดินตัวอย่างในอัตราส่วนต่างๆ ตามลำดับพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตในดินเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินมีค่าลดลง อยู่ในช่วงระหว่าง -9.1% ถึง -43.5% -5.4% ถึง -44.1% -6.6% ถึง -38.4% และ -9.9% ถึง -45.6% ตามระยะเวลาการบ่ม 0 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบที่ได้นี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาของสารประกอบซัลเฟต โดยซัลเฟตจะ

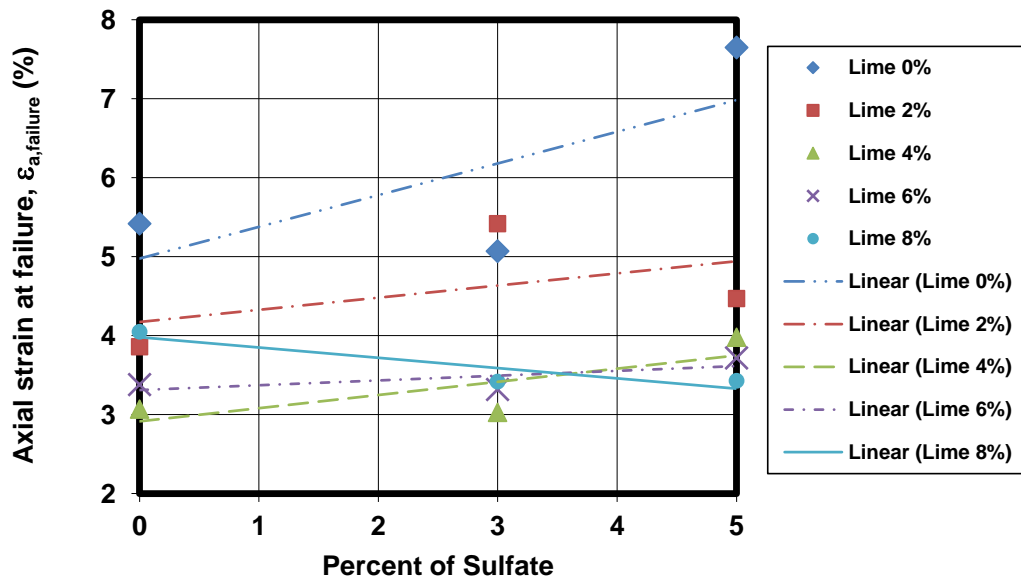
เข้าไปจับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ลดการทำปฏิกิริยากับดินลงส่งผลให้กำลังที่ได้ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อภิชาติและคณะ (2550) ที่กล่าวว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะมีค่าสูงในช่วงอายุบ่มระหว่าง 7 ถึง 28 วัน หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลง โดยที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศุภกิจ และ กมล (2549) ที่กล่าวว่าแนวโน้มของอัตราการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวต่อระยะเวลาบ่มจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น

4.4 ผลของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อค่าความเครียดที่หน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาว
 ตารางที่ 4.4 ค่าความเครียดที่หน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาวโดยแปรผันความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟต

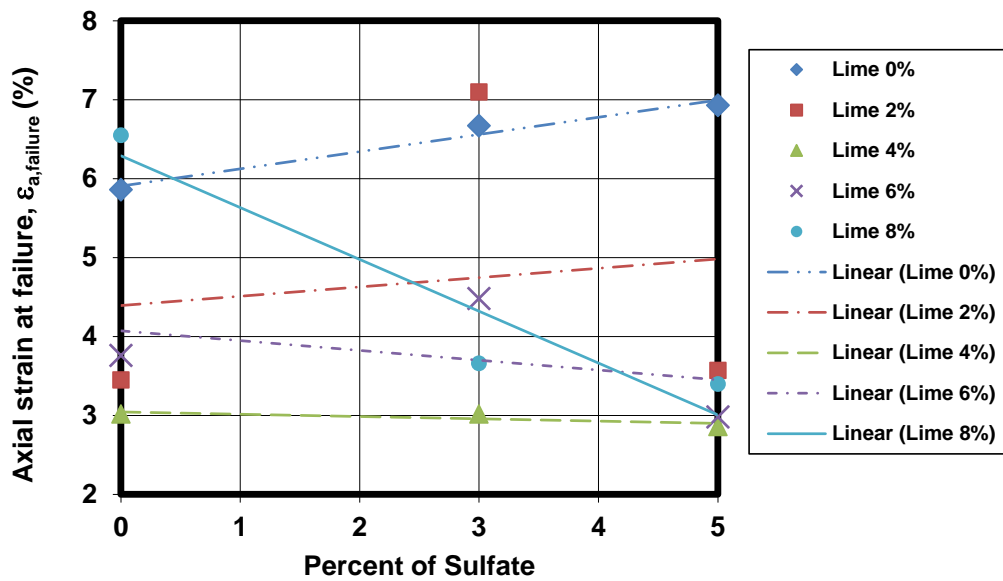
ระยะเวลาบ่ม (day)	ปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตต่อน้ำหนักแห้งรวมของส่วนผสม (%)	อัตราส่วนผสมของปูนขาว (%)				
		0	2	4	6	8
0	0	5.420	3.860	3.070	3.380	4.050
	3	5.070	5.420	3.030	3.320	3.420
	5	7.650	4.470	3.980	3.720	3.430
7	0	5.860	3.450	3.020	3.760	6.550
	3	6.670	7.100	3.020	4.480	3.92*
	5	6.930	3.570	2.860	2.980	3.400
14	0	6.700	2.400	2.850	3.960	3.44*
	3	8.170	2.430	3.320	4.180	5.810
	5	7.420	2.890	3.010	3.940	4.905*
28	0	8.280	2.150	3.360	2.3*	5.480
	3	7.260	1.660	4.735*	4.195*	5.900
	5	7.010	1.780	2.345*	3.160	5.440

หมายเหตุ: ค่าความเครียดที่หน่วยแรงสูงสุดในตารางได้จากค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง 3 ก้อน

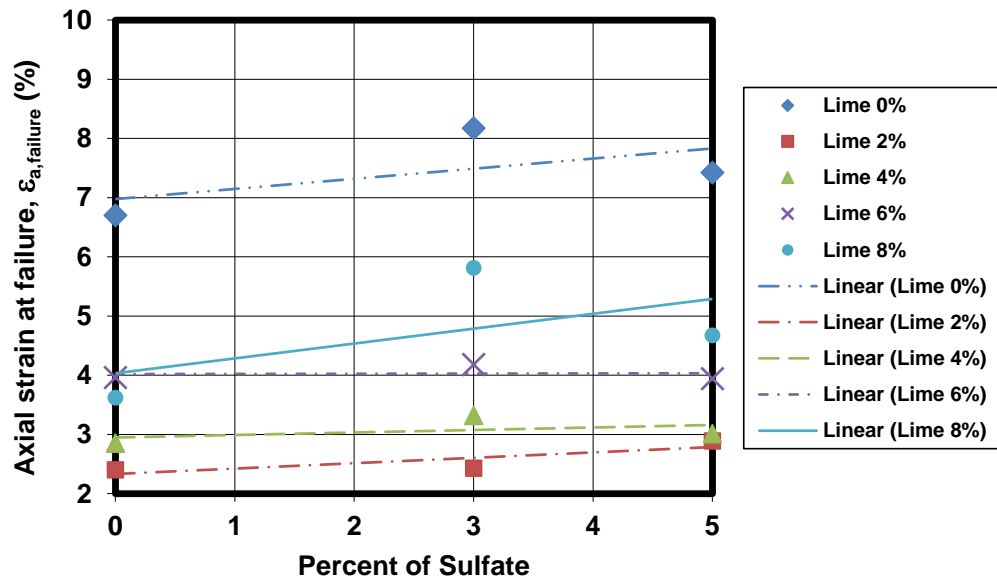
* หมายถึง ค่าความเครียดที่หน่วยแรงสูงสุดที่ได้จากค่าเฉลี่ย 2 ก้อน



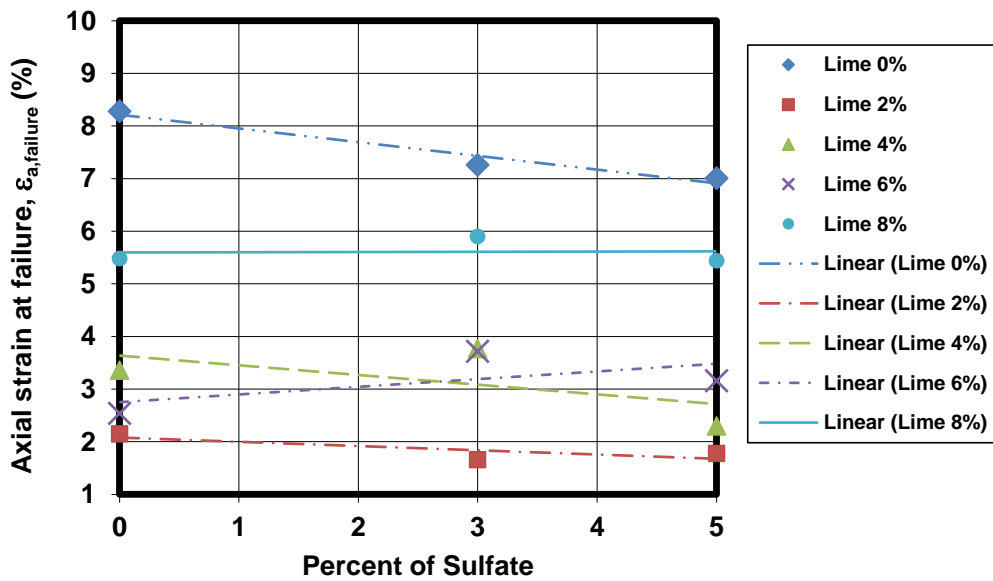
(ก) ระยะเวลาบ่ม 0 วัน



(ข) ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



(ค) ระยะเวลาบ่ม 14 วัน



(ง) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4.7 ค่าความเครียดของดินตะกอนทะเลผสมปูนขาว เมื่อแปรผันความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟต

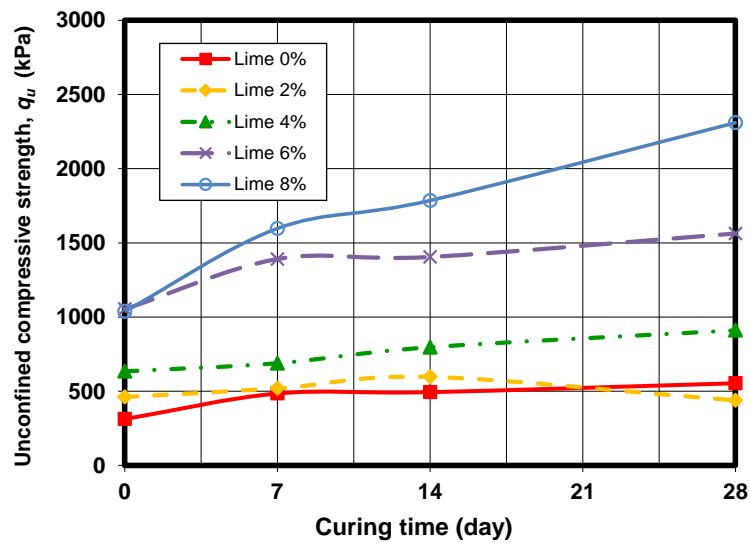
เมื่อพิจารณาผลของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อค่าความเครียดพบว่าในทุก ๆ ระยะเวลาบ่ม จะมีแนวโน้มของค่าความเครียดของดินตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นและลดลงตามปริมาณซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น แตกต่างกัน ดังนี้ ที่ระยะบ่ม วัน 0 (รูป 4.7 (ก) %4 %2 %0 พบว่า ดินตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนขาว (และ %6 ของน้ำหนักส่วนผสมแห้งรวมจะมีแนวโน้มของความเครียดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นดินตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนขาว %8 ของน้ำหนักส่วนผสมแห้งรวม จะมีค่าความเครียดที่ลดลงเมื่อมีปริมาณซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะบ่ม รูป) วัน 74.7 (ข) %2 %0 พบว่า ดินตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนขาว (และ %4 ของน้ำหนักส่วนผสมแห้งรวมจะมีแนวโน้มของความเครียดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นดินตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนขาว %6 และ %8 ของน้ำหนักแห้งจะมีแนวโน้มของความเครียดลดลงเมื่อมีปริมาณซัลเฟตเพิ่มขึ้น ที่ระยะบ่ม รูป) วัน 144.7 (ค) พบว่าดินตัวอย่างที่ผสมปูนขาวในทุกๆ ส่วนผสมของน้ำหนักแห้ง จะมีแนวโน้มของค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ที่ระยะบ่ม 4.7 (ง) %6 พบว่าดินตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนขาว (และ %8 ของน้ำหนักส่วนผสมแห้งรวมจะมีแนวโน้มของความเครียดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นดินตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนขาว %4 %2 %0 ของน้ำหนักส่วนผสมแห้งรวมจะมีแนวโน้มของความเครียดลดลงเมื่อมีปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น และที่ระยะบ่ม รูป) วัน 604.8 (จ) พบว่าดินตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนขาว %4 %2 %0 และ %6 ของน้ำหนักส่วนผสมแห้งรวมจะมีแนวโน้มของความเครียดเพิ่มขึ้นตามปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ยกเว้นดินตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนขาว %8 ของน้ำหนักแห้ง จะมีแนวโน้มของความเครียดที่ลดลงเมื่อมีปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น

ในทุกๆ ระยะเวลาบ่ม ดินตัวอย่างจะมีค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นเมื่อมี สรุปรูปจากกราฟทั้งหมดจะพบว่า) ปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้นซึ่งอาจเกิดจากแมกนีเซียมซัลเฟต $MgSO_4$ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ และสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_2CAH) เกิดเป็นยิปซัม $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ และแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรตหรือ Ettringite ซึ่ง Ettringite สามารถเกิดการขยายตัวได้ทำให้เกิดการบวมตัวขึ้นอาจทำให้ค่าความเครียดสูงขึ้นด้วย แต่ก็จะมีดินตัวอย่างบางตัวที่มีค่าความเครียดลดลงเมื่อมีปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้นเช่นตัวอย่างดินที่มีส่วนผสมของปูนขาว %8 ของน้ำหนักแห้ง ระยะบ่ม) %6 ดินตัวอย่างที่ผสมปูนขาว (วัน 0 และ %8 ของน้ำหนักแห้ง ดินตัวอย่างที่ผสมปูนขาว (วัน 7 ระยะบ่ม) %2 %0 และ %8 ดินตัวอย่างที่ผสมปูนขาว (วัน 28 ระยะบ่ม) ของน้ำหนักแห้ง %4 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งดินตัวอย่างทั้งหมดที่กล่าวมานี้สารซัลเฟตจะไม่ส่งผลให้ดินตัวอย่างมีการบวมตัว จึงทำ (วัน 60 ระยะบ่ม) ให้มีค่าความเครียดลดลงเมื่อมีปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น

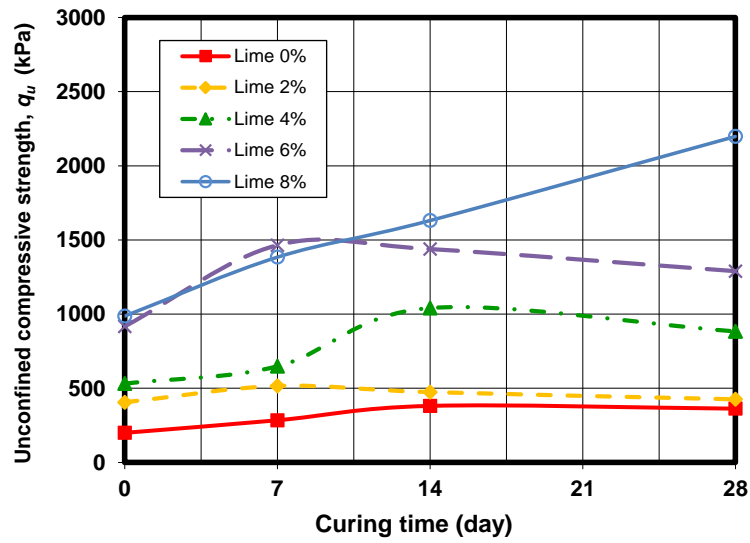
4.5 ผลของระยะเวลาทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาว

ตารางที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินตะกอนผสมปูนขาวโดยแปรผันระยะเวลาการบ่ม

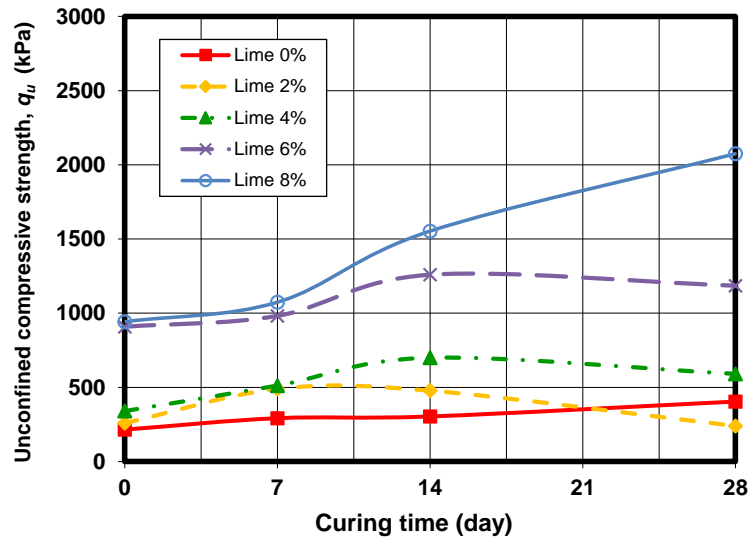
ปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตต่อน้ำหนักแห้งรวมของส่วนผสม (%)	ระยะเวลาบ่ม (day)	อัตราส่วนผสมของปูนขาว (%)				
		0	2	4	6	8
0	0	312.45	461.79	634.37	1052.95	1038.04
	7	484.60	519.32	1001.18	1390.52	1597.00
	14	493.56	596.91	796.87	1404.85	1785.65*
	28	553.70	438.46	911.32	1562.78*	2309.85
3	0	199.40	404.99	531.34	916.63	986.97
	7	284.20	515.147	647.98	1464.19	1383.94*
	14	381.12	474.06	1040.86	1424.66	1637.84
	28	362.54	425.07	883.43*	1289.2*	2198.02
5	0	215.01	258.34	340.25	907.86	942.39
	7	292.05	489.48	512.04	981.15	1074.75
	14	303.64	477.91	699.452	1259.24	1555.39*
	28	404.16	239.42	591.03*	1185.15	2074.56



(ก) แมกนีเซียมซัลเฟต 0%



(จ) แมกนีเซียมซิลิเกต 3%



(ค) แมกนีเซียมซิลิเกต 5%

รูปที่ 4.8 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลผสมปูนขาว
เมื่อแปรผันระยะเวลาการบ่ม

จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่ทุกๆ ความเข้มข้นของแมกนีเซียมซิลิเกต ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกคือ ซิลิกาและอะลูมินาในดินทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนขาว เกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานคือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH)

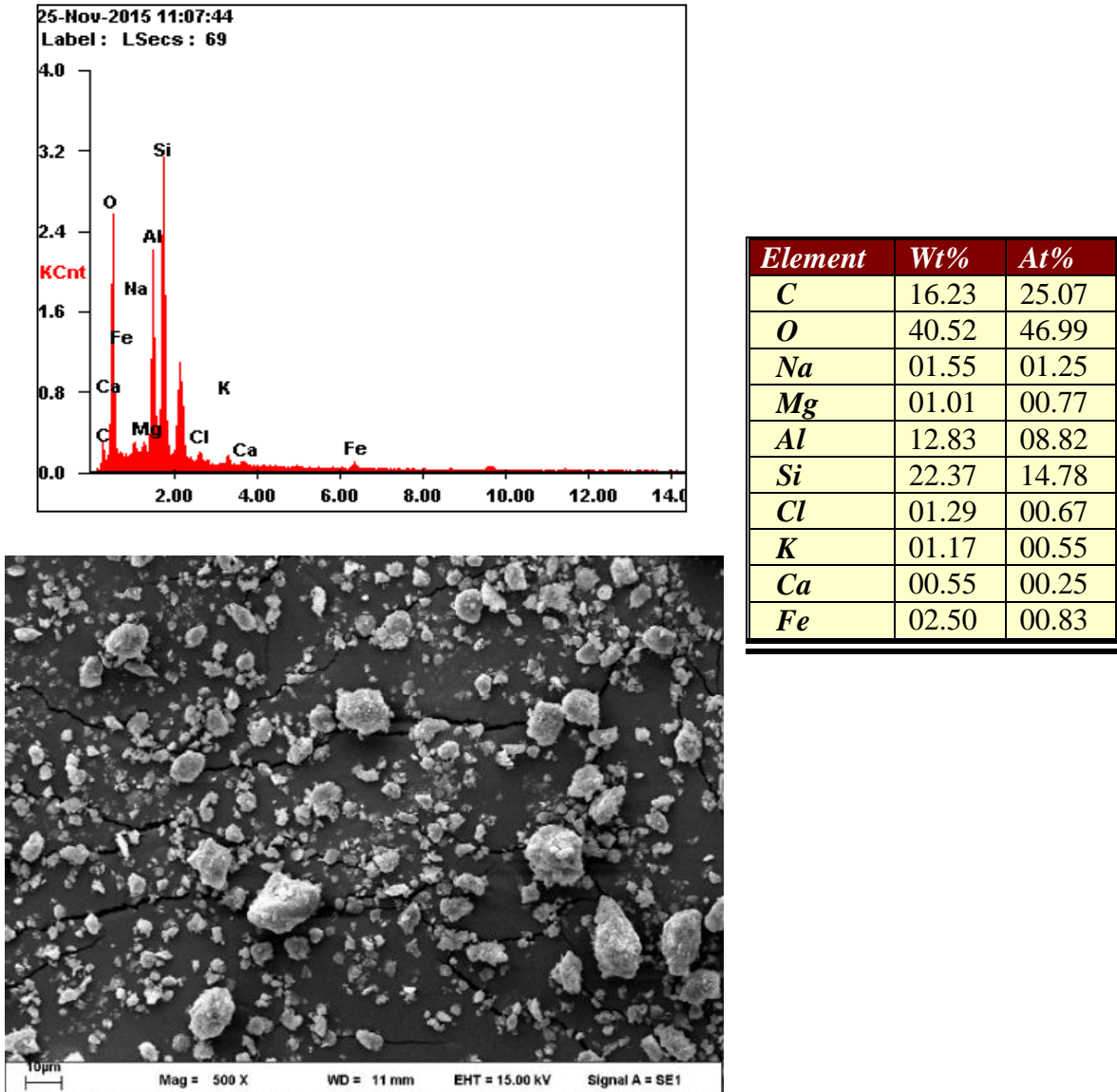
4.6 ผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer

ผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer ของตัวอย่างดินตะกอนทะเลแสดงดังตารางที่ 4.6

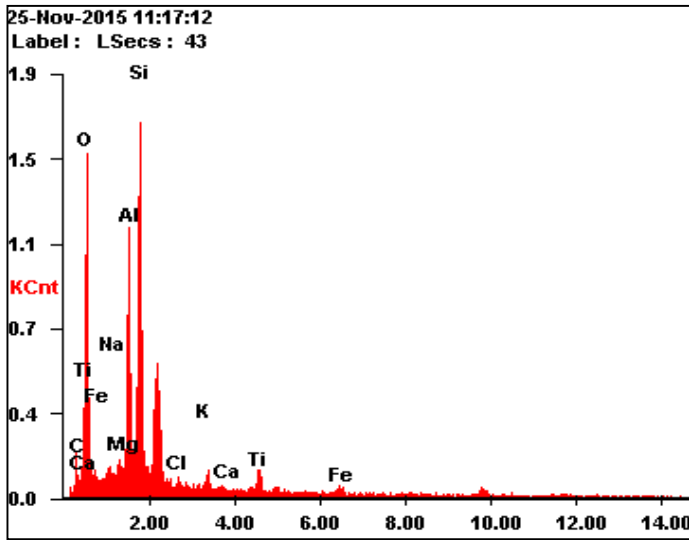
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer

ธาตุ	ดินตะกอนทะเล (ร้อยละ)
F	0.11
Na ₂ O	2.07
MgO	1.34
Al ₂ O ₃	22.19
SiO ₂	63.56
P ₂ O ₅	0.07
SO ₃	0.25
Cl	1.68
K ₂ O	3.04
CaO	1.02
TiO ₂	0.80
V ₂ O ₅	-
Cr ₂ O ₃	0.01
MnO	0.03
Fe ₂ O ₃	3.67
NiO	0.01
CuO	-
ZnO	0.01
Ga ₂ O ₃	0.01
As ₂ O ₃	-
Rb ₂ O	0.04
SrO	0.01
ZrO ₂	0.03
BaO	0.04
PbO	0.01

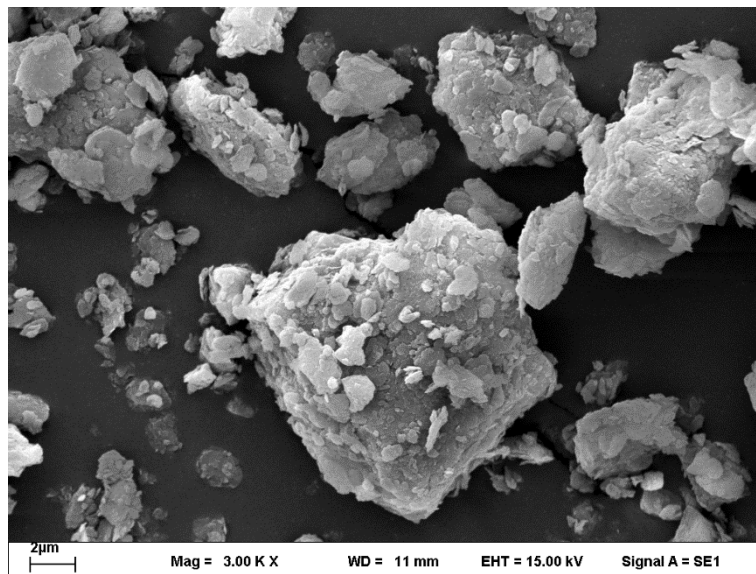
ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscopy และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM and DEX) ของดินตะกอนทะเลแสดงในรูปที่ 4.9-4.10



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบ SEM and DEX ของดินตะกอนทะเล ขยาย 500 เท่า



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	17.24	26.70
<i>O</i>	39.38	45.78
<i>Na</i>	02.36	01.91
<i>Mg</i>	01.79	01.37
<i>Al</i>	11.86	08.18
<i>Si</i>	19.53	12.94
<i>Cl</i>	00.55	00.29
<i>K</i>	01.47	00.70
<i>Ca</i>	00.31	00.15
<i>Ti</i>	02.94	01.14
<i>Fe</i>	02.56	00.85



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบ SEM and DEX ของดินตะกอนทะเล ขยาย 3,000 เท่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลกระทบของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลด้วยปูนขาว เพื่อใช้เป็นวัสดุในงานทาง สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ดินตะกอนทะเลจากบริเวณท่าเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรีมีค่าคุณสมบัติขีดพิกัดเหลว ขีดพิกัดพลาสติก และดัชนีพลาสติก มีค่า 64.4% 37.9% และ 26.5% ตามลำดับ และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.69 จัดเป็นดินตะกอนที่มีสภาพความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity silt, MH) โดยการจำแนกประเภทของดินตามระบบ USCS

5.1.2 ความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำทะเลมีค่า 2,683 ppm ในดินตัวอย่างสภาพธรรมชาติ 76.5 ppm ในดินตัวอย่างที่ผสมซัลเฟต 3% คือ 447 ppm และในดินตัวอย่างที่ผสมซัลเฟต 5% คือ 851 ppm

5.1.3 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนผสมปูนขาวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนขาวและอายุบ่มที่เพิ่มขึ้น

5.1.4 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการบดอัดดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของปูนขาวที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของมวลรวมตัวอย่างมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของปูนขาวน้อยกว่าดิน

5.1.5 ปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนขาวที่อัตราส่วนต่างๆ ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาของสารประกอบซัลเฟตเข้าไปจับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และอัตราการลดลงของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของปูนขาวเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรใช้เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินที่สามารถควบคุมอัตราเร็วที่ใช้ในการกดให้คงที่ได้สม่ำเสมอในการทดสอบ เพื่อความถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น

5.2.2 ควรศึกษาผลของสารละลายชนิดอื่นที่เจือปนในน้ำทะเลเพิ่มเติม เช่น แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น

บรรณานุกรม

- ศุภกิจ นนทนานันท์ (2543), “การปรับปรุงคุณภาพดินกระจายตัวเพื่อใช้ในงานเขื่อนดิน” การปรับปรุงคุณภาพดินและการใช้วัสดุเสริมแรงใยสังเคราะห์.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีร่วมกับสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย.
- Agrela F. Cabrera M. Galvin A.P. Barbudo A. and Ramirez A. (2014), “Influence of the sulphate content of recycled aggregates on the properties of cement-treated granular materials using sulphate-resistant Portland Cement” *Construction and Building materials* 68, 127-134.
- Agrela F. Barbudo A. Ramirez A. Ayuso J. Carvajal M.D. and Jimenez J.R. (2012), “Construction of road sections using recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain”. *Resour Conserv Recycl* 58, 98-106.
- Ahmed S.A. (1981), “Lime treated soil mixture for low-volume road construction in Egypt” *Transportation Research Record*, Washington D.C., National Academy of Sciences.
- Al-Dulaijan, S.U., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M.M., Sharif, A.M., Shameem, M. and Ibrahim, M. (2003), “Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate”. *Cement and Concrete Composites*. 25, 429-437.
- Arunyanak N. (1977), “Lime-cement stabilization on Nong Ngoo Hao Clay” Master Thesis of Engineering, Civil Engineering Program. Chulalongkorn University.
- Chao L.H. and Trong P.H. (2015), “Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks”. *Construction Building Materials* 39, 335-341.
- Bakharev, T. (2004), “Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solution”. *Cement and Concrete Research*. 35, 1233-1246.
- Bakharev, T. (2005), “Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions”. *Cement and Concrete Research*. 35, 1233-1246.
- Balasubramaniam A.S., D.T. Bergado, B.R. Buensuceso and W.C. Yang. (1989), “Strength and deformation characteristics of lime-treated soft clays” *Geotechnical Engineering* 20(1).
-

- Chapman G.P. (1968), "The sea dredged sand gravel industry of Great Britain". Sea-dredged aggregates for concrete. In: Proceeding of Symposium. Sand and gravel association of Great Britain. Buckinghamshire.
- Chen L. and Lin, D.F., (2009), "Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement". Journal of Hazardous Materials. 162 (1), 321–327.
- Chini A.R., Kuo, S.S., Armaghani, J.M. Duxbury, J.P. (2001), "Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track". Trans Res Rec. 127(6), 486-492.
- Davidson D.T., G.L. Pitre, M. Mateos and P.G. Kalankamary. "Moisture-density, moisture-strength and compaction characteristics of cement-treated soil mixture" Highway Research Board.Bull. 353, 1962.
- Diamond S. and E.B. Kinter. (1965), "A rapid method of predicting the portland cement requirement for stabilization of plastic soil" Highway Research Board. Bull. 198.
- Du Y., Li S. and Hayashi S. (1999), "Swelling-shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil". Ning-Liang Highway, China. Engineering Geology. 53 (3–4), 351–358.
- Dubois V., Abriak NE., Zentar R. and Ballivy G. (2009), "The used of marine sediments as a pavement base material". Waste Management 29, 774-782.
- Gutt, W. and Collin, R.J. (1987), "Sea-dredged aggregates in concrete". Watford (UK): Building Research Establishment.
- Herrador R. Perez P. Garach L. and Ordonez J. (2012), "Use of recycled construction and demolition waste aggregate for road course surfacing". Journal of Transportation Engineering 138, 182-190.
- Herrin M. and H. Mitchell. (1961), "Lime soil mixture" Highway Research Board.Bull.304, National Academy of Sciences, Washington D.C.
- Hausamann M.R., (1990), Engineering Principles Ground Modification, Mc Graw-Hill International Editions.
- Holtz R.D. and Krizek R.J. (1970) , "Properties of slightly organic top soils" Journal of the Construction Division, ASCE 96, 29-43, No. CO1.
-

- Horpibusuk, S., Phojan, W., Suddeepong, A., Chinkulkijniwat, A. and Liu, M.D. (2012), "Strength development in blended cement admixed saline clay". *Applied Clay Science*. 55, 44-52.
- Horpibusuk, S., Rachan, R., Suddeepong, A., and Chinkulkijniwat, A. (2011), "Strength development in cement admixed Bangkok Clay: Laboratory and Field investigations". *Soils and Foundations*. 51(2), 239-251.
- Hunter, D. (1988). "Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils". *Journal of Geotechnical Engineering*. 114(2), 150-167.
- Ingles O.G (1970), "Mechanism of clay stabilization with inorganic acids and alkalis" *Australia Journal of Soil Research* Vol. 8, 581-596.
- Jimenez J.R. Ayuso J. Galvin A.P. Lopez M. and Agrela F. (2012), "Use of mixes recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural road". *Construction Building Materials* 34, 34-43.
- Kinuthia J.M., Wild, S. and Jones, G.I. (1999), "Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilised kaolinite". *Applied Clay Science*. 14 (1-3), 27-45.
- Kozlova S., Shimanovich S. and Meyer C. (2004), "Method of treatment of dredged material for benefit use". *United States Patent Application Publication*. Pub. No.: US 2004/0158114A1. August, 12th.
- Laguros J.G. and D.T. Davison. (1963), "Effect of chemicals on soil cement stabilization" *Highway Research Board. Bull.36, National Academy of Sciences*.
- Lambe T.W., Michaels A.S. and Moh Z.C. (1959), "Improvement of soil-cement with Alkali Metal Compounds". *Highway Research Board. Bull.241, National Research Council, Washington D.C., U.S.A., 67-103*.
- Langroudi A. and Yasrobi S. (2009), "A micro-mechanical approach to swelling behavior of unsaturated expansive clays under controlled drainage conditions". *Applied Clay Science*. 45 (1-2), 8-19.
- Limeira J., Agullo L. and Etxeberri M. (2010), "Dredged marine sand on concrete: an experimental section of a harbor pavement". *Construction Build Material* 24, 863-870.
-

- Lin D.F., Lin, K.L., Hung, M.J. and Luo HL. (2007), "Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil". *Journal of Hazardous Materials*. 145 (1–2), 58–64.
- Lucile, S., Mohamed, B., Fabienne, B. and Lydia, L. (2014), "Influence of anions on the geotechnical properties of soils treated with hydraulic binder: Individual and coupling effects". *Construction and Building Materials*. 65, 303-309.
- Maher, A., Douglas, W.S. and Jafari, F. (2006), "Field placement and evaluation of stabilization dredged material (SDM) from the New York/New Jersey Harbor". *Mar Georesour Geotechnol*. 24, 251-263.
- Mateos M. (1964), "Soil lime research at Iowa State University" *Journal of soil Mechanics and Foundation*. 90(SM2), 127-153.
- McCarthy, M.J., Csetenyi, L.J., Sachdeva, A. and Dhir, R.K. (2014), "Engineering and durability properties of fly ash treated lime-stabilised sulphate-bearing soils". *Engineering Geology*. 174, 139-148.
- Mitchell, J.K. and Dermatas, D. (1990), "Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions". *ASTM Specification Technical Publication*. 1135, 41-64.
- Millrath K., Kozlova S., Sjimannovich S. and Meyer C. (2001), "Benefit use of dredged materials I and II progress report prepared for Echo Environmental, Inc., Columbia University, New York, NY.
- Moh Z.C. (1969), "Reaction Soil Mineral with Cement and Chemical" *Highway Research Board. Bull*. 86, 42-46.
- Molenaar A.A.A. and Niekerk, A.A. (2002), "Effect of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound material". *Trans Res Rec*. 1787, 73-82.
- Nalbantoglu Z. (2004), "Effectiveness of Class C fly ash as an expansive soil stabilizer". *Construction and Building Materials*. 18 (6), 377–381.
- Nalbantoglu Z. and Gucbilmez, E. (2001), "Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid environments". *Journal of Arid Environments*. 47 (4), 453–463.
-

- Newman, K. (1968), "Aspects of workability, strength, shrinkage and creep Sea-dredged aggregates for concrete". In: Proceeding of Symposium. Sand and gravel association of great Britain. Buckinghamshire.
- Poon C.S. and Chan D. (2006), "Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base". Construction and Building Materials. 20, 578-585.
- Rajasekaran, G. and Narasimha, R. (1997), "Lime stabilization technique for the improvement of marine clay". Soils and Foundations. 37(2), 97-104.
- Rao B.V., Reddy V. and Muttharam, M. (2001), "The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils". Engineering Geology. 60 (1-4), 223-233.
- Ruenkairergsa T. (1982), "Principle of Soil Stabilization". Group Training in Road Construction. Highway Department of Thailand.
- Ruenkairergsa T. and T. Pimsarn. (1982), "Deep Hole Lime Stabilization for Unstable Clay Shale Embankment" Report.No.MR.75, Department of Highway, Bangkok.
- Saussaye, L., Boutouil, M., Baraud, F. and Leleyter, L. (2014), "Influence of annions on the geotechnical properties of soils treated with hydraulic binder: Individual and coupling effects". Construction and Building Materials. 65, 303-309.
- Schmidt N.O. (1965), "A study of the isolation of organic matter as a variable affecting engineering properties of soil". Thesis presented to the University of Illinois at Urbana, IL, in 1965 in the partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy.
- Sherwood P.T. (1968), "The Properties of Cement Stabilized Materials". Road Research Laboratory. 205.
- Siham K. Fabrice B. and Edine A.N. (2008), "Marine dredge sediments as new material resource for road construction". Waste Management 28, 919-928.
- Songsuda V. and Runglawan, R. (2013), "Chemical stabilization of soft Bangkok clay using the blend of calcium carbide residue and biomass ash". Soils and Foundations. 53(2), 272-281.
-

- Thomson M.R. (1968), "Lime Treated Soil for Pavement Construction", Journal of Highway Division, ASCE 94(6), 249.
- Ulbricht J.P. (2002), "Contaminated sediments: raw materials for brick". Symposium Dredged, Dunkerque, France, October.
- Wang J.W.H., M. Mateos and D.T. Davidson. (1963), "Comparison Effects of Hydraulic, Cacitic and Dolomitic Limes and Cement in Soil Stabilization" Highway Research Board. Bull. 36, National Academy of Sciences.
- Yong R.N. and Ouhadi, V.R. (2007), "Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils". Applied Clay Science. 35 (3-4), 238-249.
- Zentar R., Dubois V. and Abriak NE. (2008). Machanical behavior and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments. Resources Conservation and Recycling 52, 947-954.
-