



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลกระทบของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเล
ที่ถูกขุดลอกด้วยซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในงานทาง
Influence of magnesium sulfite on cement-marine dredged sediments
stabilization as a new material resource for road construction

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิคม

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2559A10802014

สัญญาเลขที่ 133/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลกระทบของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเล

ที่ถูกขุดลอกด้วยซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในงานทาง

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

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กรกฎาคม 2559

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 133/2559

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการปรับปรุงคุณภาพดินโดยสารผสมเพิ่มเพื่อใช้ในการก่อสร้างงานทางเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีประสิทธิภาพสูงสุดมีความจำเป็นต้องเลือกใช้สารผสมเพิ่มที่เหมาะสม เนื่องจากดินต่างชนิดกันมีกลไกการกำเนิดดินและแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบที่แตกต่างกัน อีกทั้งอยู่ในลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศที่ต่างกัน ย่อมตอบสนองต่อปฏิกิริยาเคมีมากน้อยแตกต่างกันด้วย เช่น โครงสร้างทางที่มีดินตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเลเป็นวัสดุมักได้รับอิทธิพลของซัลเฟตไอออนและคลอไรด์ไอออน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ดินบวมตัวสูงเนื่องจากสารประกอบยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดย (i) แปรผันปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อดินตะกอนทะเลโดยน้ำหนักแห้ง คือ 0% 5% และ 10% (ii) แปรผันอัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อดินตะกอนทะเลโดยน้ำหนักแห้ง คือ 0% 2% 4% 6% และ 8% และ (iii) แปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่างดินคือ 0 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ ลดลงตั้งแต่อายุบ่ม 7 วันขึ้นไป และอัตราการลดลงของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวยังมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ดินตะกอนทะเล, แมกนีเซียมซัลเฟต, กำลังรับแรงอัดแกนเดียว, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

Abstract

Nowadays chemical stabilization is a popular technique to improve engineering characteristics of soils for road 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 cement. The variables of interest were (i) concentrations of magnesium sulfate of 0%, 5% and 10%, (ii) Portland cement type I of 0%, 2%, 4%, 6%, and 8% of dry soil 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 from 7 days curing. Moreover, reduction rate of unconfined compressive strength tended to decrease when percent of cement increased.

Keywords: marine sediment, magnesium sulfate, unconfined compressive strength, Portland cement type I

สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ

บทคัดย่อ

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ

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

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปรับปรุงคุณภาพดิน	2/1
2.1.1 การปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil Stabilization) สามารถแบ่งได้หลายวิธี	2/1
2.2 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี	2/1
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีทางเคมี	2/2
2.3.1 คุณสมบัติของดิน (Soil Properties)	2/2
2.3.2 วัสดุผสมเพิ่ม (Stabilizing Agent)	2/2
2.3.3 น้ำ (Water)	2/2
2.3.4 เทคนิคการปรับปรุง (Techniques of Stabilization)	2/2
2.4 คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงหลังจากปรับปรุงคุณภาพ	2/3
2.4.1 คุณสมบัติด้านความเหนียว (Plasticity)	2/3
2.4.2 คุณสมบัติทางด้านการบดอัด (Compaction)	2/3
2.4.3 คุณสมบัติทางด้านกำลัง (Compressive Strength)	2/3
2.4.4 การยึดประสาน (Cementation)	2/3
2.5 วัสดุผสมเพิ่มที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ	2/4
2.5.1 การปรับปรุงดินโดยใช้ซีเมนต์	2/4
2.5.2 การปรับปรุงดินโดยใช้ปูนขาว	2/4
2.5.3 การปรับปรุงดินโดยวัสดุอื่นๆ	2/5
2.6 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์	2/5
2.6.1 ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2/5
2.6.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2/6

2.6.3	กลไกการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์	2/6
2.6.4	โครงสร้างของดินซีเมนต์ภายใต้สภาวะต่างๆ	2/8
2.6.5	ประเภทของดินซีเมนต์	2/9
2.7	ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังของดิน	2/10
2.7.1	ปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบซัลเฟต	2/10
2.7.2	ปฏิกิริยาเคมีของดินซีเมนต์และสารปอซโซลาน	2/11
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2/12
2.8.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนผสมซีเมนต์	2/12
2.8.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์และเถ้าแกลบ	2/12
2.8.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีซัลเฟตผสมเถ้าแกลบ	2/13
2.8.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของซัลเฟตต่อกำลังของดินเหนียวปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์	2/13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย		
3.1	วิธีดำเนินการวิจัย	3/1
3.2	วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	3/3
3.3	อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ	3/3
3.3.1	การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน (ASTM D854)	3/3
3.3.2	การทดสอบหาค่าพิกัดชั้นเหลว (Atterberg's limit)	3/5
3.3.3	การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM D1557)	3/7
3.3.4	การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดิน (ASTM D2166)	3/8
3.3.5	การชะละลายซัลเฟตด้วยวิธี SPLP	3/11
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ		
4.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน	4/1
4.1.1	ค่าขีดพิกัดเหลว ขีดพิกัดพลาสติก และดัชนีพลาสติกของดินตัวอย่าง	4/1
4.1.2	ความถ่วงจำเพาะของดิน	4/1
4.1.3	ความเข้มข้นของซัลเฟต	4/1
4.2	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test)	4/2
4.3	ผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์	4/4
4.4	ผลของระยะเวลาทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ	4/8

ตัวอย่างดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์	
4.5 ผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer	4/10
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 สรุปผลการวิจัย	5/1
5.2 ข้อเสนอแนะ	5/1
ผลงานตีพิมพ์	
รายงานการเงิน	
บรรณานุกรม	
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินตะกอนผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ	4/1
ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของของตัวอย่างดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์	4/4
ตารางที่ 4.3 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนตัวอย่างโดยแปรผันระยะเวลาบ่ม	4/8
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer	4/10

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 โครงสร้างดินเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Prusinski et al., 1999)	2/7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างดินเมื่อเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Prusinski et al., 1999)	2/8
รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างดินซีเมนต์ภายใต้การบดอัด (Mitchell and Jack, 1966)	2/8
รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างดินซีเมนต์ภายใต้การบ่มระยะสั้น (Mitchell and Jack, 1966)	2/9
รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างดินซีเมนต์ภายใต้การบ่มระยะยาว (Mitchell and Jack, 1966)	2/9
รูปที่ 3.1 แผนผังลำดับขั้นตอนการทดสอบ	3/2
รูปที่ 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	3/3
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit)	3/5
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	3/7
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว	3/9
รูปที่ 3.6 เครื่อง Los Angeles	3/9
รูปที่ 3.7 การบ่มตัวอย่างดิน	3/10
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว	3/11
รูปที่ 4.1 จำแนกชนิดของดินตัวอย่างโดยวิธี USCS	4/1
รูปที่ 4.2 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดของตัวอย่างดินตะกอนผสมซีเมนต์ ในอัตราส่วนต่างๆ	4/2
รูปที่ 4.3 ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินตะกอนผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ	4/3
รูปที่ 4.4 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์ เมื่อแปรผันความเข้มข้น ของแมกนีเซียมซัลเฟต	4/5
รูปที่ 4.5 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์เมื่อแปรผันระยะเวลาการบ่ม	4/8
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบ SEM and DEX ของดินตะกอนทะเล (1)	4/11
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบ SEM and DEX ของดินตะกอนทะเล (2)	4/12
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบ SEM and DEX ของดินตะกอนทะเล (3)	4/13

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีในการก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้แหล่งวัสดุธรรมชาติแหล่งเดิมๆ ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการก่อสร้างเริ่มขาดแคลนลง ดังนั้นการเสาะแสวงหาแหล่งวัสดุใหม่เพื่อใช้ทดแทนวัสดุแหล่งเดิมที่กำลังจะหมดไปถือเป็นเรื่องสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งทางเลือกหนึ่งในการแสวงหาแหล่งวัสดุใหม่ คือ การนำวัสดุเหลือใช้ วัสดุที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle aggregate) รวมถึงวัสดุทางธรรมชาติที่มีอยู่ในพื้นที่มาใช้ประโยชน์ อาทิเช่น การนำวัสดุมวลรวมคอนกรีตที่ใช้แล้ว (Recycled concrete aggregate) อิฐดินเหนียวแตก (Crushed clay bricks) มาใช้เป็นวัสดุมวลรวมในโครงสร้างชั้นทาง) Poon and Chan, 2006; Molenaar and Niekerk, 2002; Chini et al., 2001 (การนำเถ้าแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Songsuda and Runglawan, 2013) การนำเถ้าก้นเตาและแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหลือทิ้งจากโรงงานมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังเพื่อใช้เป็นวัสดุในงานทาง (วิเศษและประทีป, 2552; ศราวุธและประทีป, 2552) เป็นต้น

นอกจากวัสดุที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังพบว่าในปัจจุบันมีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจในการนำเอาขยะทางธรรมชาติหรือดินที่ถูกขุดลอกบริเวณชายฝั่งทะเลเพื่อแก้ไขปัญหาคาร์บอนในดินบริเวณชายฝั่งทะเลซึ่งส่งผลเสียต่อการเข้าจอดเทียบเรือเพื่อการขนส่งสินค้า มาใช้ประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมโยธา เกษตรกรรม และอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น (Dubois et al., 2009; Ulbricht, 2002) เช่น การนำดินทรายหรือดินตะกอนที่ถูกขุดลอกบริเวณชายฝั่งทะเลมาใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในงานดินและงานคอนกรีต (Dubois et al., 2009; Zentar et al., 2008; Kozlova et al., 2004; 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 สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง ฯลฯ อาจส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพและทาง (น้ำเค็ม) วิศวกรรมของดินประเภทนี้แตกต่างออกไปจากวัสดุมวลรวมที่ใช้โดยทั่วไปในงานวิศวกรรมได้ เช่น ปริมาณเกลือที่สะสมในมวลดินอาจเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตและเพิ่มความพรุนของคอนกรีต (Gutt and Collin, 1987) หรือปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) ที่ปะปนอยู่ในมวลดินส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและคุณสมบัติการรับแรงเฉือนของดินลดลง (Schmidt, 1965; Holtz and

Krizek, 1970) นอกจากนั้นอิทธิพลขององค์ประกอบทางเคมีต่างๆ 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 ดังนั้นนอกเหนือไปจากการมุ่งเน้นให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำเอาวัสดุเหลือใช้หรือวัสดุทางธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้าง วิศวกรควรพิจารณาเลือกใช้วัสดุอย่างรอบคอบและให้ความสำคัญในเรื่องความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้าง รวมถึงความคงทนต่อสภาวะการใช้งานที่ยาวนานด้วย

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

กลไกการปรับปรุงคุณภาพดินหรือวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ เมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีสารประกอบหลักอยู่ 4 ชนิด คือ C3S, C2S, C3A, C4AF 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 ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีนี้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานและจากความเป็นต่างที่สูงขึ้นเป็นผลทำให้ 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)

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาวและเถ้าถ่านหินซึ่งมีคุณสมบัติทางปอซโซลานิกมีลักษณะกลไกที่ใกล้เคียงกัน คือเมื่อผสมปูนขาวหรือเถ้าถ่านหินในดินจะเกิดการแลกเปลี่ยนกันของไอออนบวก (Cation) ในดินและแคลเซียมจากแคลเซียมออกไซด์ในปูนขาวและเถ้าถ่านหิน ทำให้ความหนาของน้ำในชั้น Double layer บางลงและเกิดการดึงดูดกันของอนุภาคดินเหนียวเป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculation) ส่งผลทำให้ดินลดการบวมตัวและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินดีขึ้น คือ ดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) ลดลง และเพิ่มความสามารถในการระบายน้ำของดิน (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) ที่สูงขึ้นในดินจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ส่งผลทำให้กำลังของดินเพิ่มสูงขึ้น (Nalbantoglu, 2004; Guney et al., 2007; Yong and Ouhadi, 2007; Chen and Lin, 2009)

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเติมสารให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ต่างล้วนแล้วแต่ส่งผลทำให้ดินมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นทั้งสิ้น แต่อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงคุณภาพดินให้มีประสิทธิภาพสูงสุด มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาเลือกใช้สารเคมีที่เหมาะสม เนื่องจากดินที่ต่างชนิดกัน กลไกการกำเนิดดิน ลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศ ตลอดจนแร่ธาตุและสารประกอบในดินที่แตกต่างกัน ย่อมตอบสนองต่อปฏิกิริยาเคมีมากน้อยแตกต่างกันไปด้วย เช่น Horpibulsuk et al. (2012) ทำการศึกษาค่ากำลังการรับแรงของดินเค็ม (Saline clay) ที่มีแหล่งกำเนิดในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ พบว่าค่ากำลังการรับแรงของตัวอย่างดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมระหว่าง clay-water/cement (w/C) มีค่าลดลง ในตัวอย่างดินที่มีอัตราส่วนผสม w/C เท่ากัน ความเข้มข้นของเกลือในตัวอย่างดินที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างดินและซีเมนต์ลดลง นอกจากนั้นยังพบว่าเพื่อเพิ่มกำลังการรับแรงของดินเค็มให้สูงขึ้น การใช้เถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวลทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างดินและซีเมนต์เพิ่มขึ้นได้

นอกเหนือไปจากคุณสมบัติพื้นฐานเฉพาะตัวของดินแต่ละชนิดแล้ว อิทธิพลของสิ่งแวดล้อมที่กระทบต่อโครงสร้างยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เช่น โครงสร้างอาคารหรือโครงสร้างชั้นทางที่ใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ที่อยู่ใกล้บริเวณชายฝั่งทะเล หรือแม้แต่บริเวณบ่อฝังกลบขยะ ล้วนแล้วแต่ได้รับอิทธิพลของซัลเฟตไอออน คลอไรด์ไอออน ไนเตรตไอออน และฟอสเฟตไอออนด้วย จากงานวิจัยในอดีตจำนวนมากได้ทำการศึกษถึงอิทธิพลของซัลเฟตไอออนต่อโครงสร้างคอนกรีตและแสดงให้เห็นว่าซัลเฟตไอออนถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตบวมตัวสูงขึ้นทั้งนี้เป็นผลมาจากการ Ettringite เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี (Mitchell and Dermatas, 1990; Hunter, 1998) แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยถึงอิทธิพลของสารประกอบไอออนต่างๆ ดังกล่าวยังคงมีน้อยในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินประเภท Marine soil ที่ปัจจุบันนิยมใช้เป็นแหล่งวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในโครงสร้างชั้นทาง

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติการรับแรงของดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และศึกษาอิทธิพลของแมกนีเซียมซัลเฟตตลอดจนระยะเวลาปฏิกิริยาเคมีของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเลโดยตัวอย่างดินตะกอนทะเลที่ใช้ในการทดสอบนี้คือดินที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ

ราชา จังหวัดชลบุรี เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในงานทางและงานทางด้านวิศวกรรมโยธา ตลอดจนช่วยแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการกำจัดขยะทางธรรมชาติอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ
2. เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ
3. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ภายในตัวอย่างดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อเผชิญสภาวะความเข้มข้นของซัลเฟตที่อ่อนและระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปโดยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน
4. เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิรา จังหวัดชลบุรี

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ผู้วิจัยจึงออกแบบขอบเขตของโครงการวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติการรับแรงของดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และศึกษาอิทธิพลของแมกนีเซียมซัลเฟตตลอดจนระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล โดยตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้คือดินตะกอนทะเลบริเวณท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิรา จังหวัดชลบุรี และสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. ทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิรา จังหวัดชลบุรี
2. แปรผันปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตในตัวอย่างดินตะกอนทะเลคือ 0% 5% และ 10% และแปรผันอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อดินตะกอนทะเลโดยน้ำหนักแห้งคือ 0% 2% 4% 6% และ 8% และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression

test, UC test) ในทุกๆ อัตราส่วนผสม เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้จะถูกเตรียมโดยจำลองพฤติกรรมเช่นเดียวกับการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง คือการบดอัดแบบสถิตย์ เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่มีความชื้นบดอัดเหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) และมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, $\gamma_{dry, max}$) ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard compaction Test)

3. แปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่างดินในหลายๆ อัตราส่วนผสม (ดังแสดงในข้อที่ 2) คือ 0 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ

4. ภายหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่างดินตะกอนทะเลจะถูกนำมาทดสอบเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ภายในตัวอย่างดินภายหลังการเกิดปฏิกิริยาเคมี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะจำได้รับ

1. สามารถทราบถึงผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตที่เปลี่ยนแปลงไปต่อคุณสมบัติการรับกำลังแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ

2. สามารถทราบถึงผลของระยะเวลาปฏิกิริยาเคมีของแมกนีเซียมซัลเฟตที่เปลี่ยนแปลงไปต่อคุณสมบัติการรับกำลังแรงและความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ

3. สามารถทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ภายในตัวอย่างดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อเผชิญสภาวะความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตที่เปลี่ยนแปลงไป

4. สามารถทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี

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

2.2 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมีเป็นการใช้สารเคมีผสมลงในดินโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรซึ่งพิจารณาได้จากการบวมตัวและการหดตัวของดินปรับปรุงคุณสมบัติในการรับน้ำหนักหรือพฤติกรรมของความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain) ของดิน ปรับปรุงการไหลซึมผ่านของน้ำในดินและเพิ่มความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ สารเคมีหรือวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือปูนซีเมนต์ ปูนขาว หรือเถ้าลอย ซึ่งจะทำให้ดินมีคุณสมบัติตาม

มาตรฐานที่กำหนดไว้และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย สำหรับความเหมาะสมของการเลือกใช้วัสดุผสมเพิ่มนั้นจะต้องคำนึงถึงผลประโยชน์ในการทำงาน การจัดเก็บรักษาและต้องมียุทธศาสตร์ประกอบที่ไม่มีพิษรวมทั้งต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกิดขึ้นด้วย

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีทางเคมี

2.3.1 คุณสมบัติของดิน (Soil Properties)

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

2.3.2 วัสดุผสมเพิ่ม (Stabilizing Agent)

โดยทั่วไปแล้ว วัสดุผสมเพิ่มชนิดเดียวกันที่ผสมในปริมาณที่มากกว่าจะให้กำลังมากกว่าภายใต้เงื่อนไขตัวแปรอื่นคงที่และดินนั้นมีความชื้นเพียงพอต่อการ เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ในทางกลับกันวัสดุผสมเพิ่มต่างชนิดกันย่อมมีผลต่อการพัฒนากำลังของดินด้วยอัตราที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเชื่อมประสาน (Cementations Compounds) รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เมื่อวัสดุผสมเพิ่มนั้นทำปฏิกิริยากับดิน

2.3.3 น้ำ (Water)

น้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี เพราะน้ำจะเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเพิ่มกำลังของดิน ปริมาณความชื้นในดินที่น้อยเกินไปอาจทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปไม่ได้ไม่สมบูรณ์ หรือถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไป น้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยาจะยังคงเหลือกระจุกกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของดินที่แข็งตัวแล้วและเป็นตัวทำให้พื้นผิวลื่นเมื่อมีแรงกระทำเป็นผลทำให้ได้ค่ากำลังของดินต่ำกว่าความเป็นจริง

2.3.4 เทคนิคการปรับปรุง (Techniques of Stabilization)

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

2.4 คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงหลังจากปรับปรุงคุณภาพ

2.4.1 คุณสมบัติด้านความเหนียว (Plasticity)

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

2.4.2 คุณสมบัติทางการบดอัด (Compaction)

เมื่อผสมวัสดุผสมเพิ่มลงไปนดินส่งผลทำให้คุณสมบัติของดินทางการบดอัดเปลี่ยนแปลงไปคือ 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

2.4.3 คุณสมบัติทางการกำลัง (Compressive Strength)

กำลังของส่วนผสม ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ชนิดของดิน ปริมาณและชนิดของวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ ความหนาแน่นของการบดอัด ปริมาณความชื้น ระยะเวลาในการผสม อุณหภูมิในการบ่ม และปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น

2.4.4 การยึดประสาน (Cementation)

ในการบดอัดดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ส่วนประกอบต่างๆ ของซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration ในอัตราที่แตกต่างกันเม็ดดินจะเกิดการเกาะกันเป็นก้อนและสามารถรับแรงอัดได้ การยึดเกาะนี้จะเกิดขึ้นทั้งระหว่างเม็ดดินกับซีเมนต์และซีเมนต์กับซีเมนต์เองซึ่งแยกประเภทสำหรับดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ ดังนี้

2.4.4.1 สำหรับดินเม็ดละเอียดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะสูงกว่าดินเม็ดหยาบเพราะว่าดินเม็ดละเอียดจะมีพื้นที่ผิวและจุดสัมผัสมากกว่า ซีเมนต์จะเป็นตัวช่วยให้การเกาะตัวของเม็ดดินแข็งแรงขึ้น ดังนั้น

นอกจากซีเมนต์จะทำให้ค่าของคุณสมบัติด้านความเหนียวลดลงแล้ว ยังเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนอีกด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเกิดตามผิวเม็ดดินจะไปไล่น้ำที่เกาะอยู่รอบผิวเม็ดดินออกไป และซีเมนต์จะเข้าไปอยู่แทนที่ ทำให้ลดการอ่อนตัวของดินเมื่อน้ำภายนอกซึมเข้าไปอีก

2.4.4.2 สำหรับดินเม็ดหยาบปฏิกิริยาของซีเมนต์จะทำหน้าที่คล้ายกับการผสมคอนกรีต เว้นแต่ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) จะไม่ไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน อนุภาคของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์จะขัดตัวกันด้วย Mechanical Interlock และยึดเกาะกันด้วย Chemical Cementation กรณีของทรายการยึดเกาะกันจะมีตรงบริเวณผิวสัมผัสกัน เมื่อทรายมีการบดอัดแน่นช่องว่างเม็ดทรายจะมีน้อยพื้นที่สัมผัสมีมากขึ้น การยึดเกาะกันจะแข็งแรงขึ้นด้วยแต่ถ้าเป็นทรายที่มีขนาดเดียวกันจะมีพื้นที่สัมผัสน้อย ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะมากกว่าชนิดที่ขนาดคละกันดี

2.5 วัสดุผสมเพิ่มที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ

2.5.1 การปรับปรุงดินโดยใช้ซีเมนต์

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

2.5.2 การปรับปรุงดินโดยใช้ปูนขาว

การเติมปูนขาวลงในดินที่ปนดินเหนียวจะทำให้ความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงสำหรับการบดอัดเดียวกัน ตัวบ่งชี้ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคือปริมาณปูนขาวที่เติมลงไป ในดินเหนียวและปริมาณแร่ธาตุในดินเหนียว โดยกำลังของปูนขาวผสมดินจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น ชนิดของดิน ชนิดของปูนขาวและปริมาณของปูนขาวที่เติมลงไป ในดินเหนียวที่มีกรดโลนิติกปะปนอยู่ผสมกับปูนขาวจะทำให้ได้กำลังต่ำกว่าการผสมกับปูนขาวที่มีแคลเซียมสูงหรือปูนขาวกึ่งเหลว (Bell, 1988)

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

2.5.3 การปรับปรุงดินโดยวัสดุอื่นๆ

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

ยางมะตอย (Bitumen) เป็นสารที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ ซึ่งมีความหนืดที่ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำยาง การใช้ยางมะตอยในการปรับปรุงคุณภาพของดินจะช่วยป้องกันหรือลดการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ทั้งนี้เป็นเพราะยางมะตอยมีสมบัติที่บีบน้ำเมื่อไปเคลือบรอบเม็ดดินก็จะทำให้ความชื้นเข้าไปไม่ได้แต่มีข้อเสียคืออย่างมีความแข็งแรงต่ำถ้าใช้ในปริมาณมากอาจเกิดผลเสียด้านกำลังได้

โมลลาส (Mollas) เป็นกากของเหลือในรูปของเหลวจากอุตสาหกรรมน้ำตาลหรือโรงกลั่นสุรา ใช้เพิ่มความเหนียวให้ดินแต่สามารถถูกชะล้างโดยน้ำฝนได้ง่าย

ยางไม้ลิกนิน เป็นกากของเหลือในรูปของเหลวจากโรงงานกระดาษ ใช้เพิ่มความเหนียวให้กับดินแต่อาจก่อให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะ

โซเดียมคลอไรด์หรือแคลเซียมคลอไรด์ เป็นกากของเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตโซเดียมคาร์บอเนตและฟลูออคาร์บอเนต (ยาสีฟัน) ช่วยในการดูดความชื้นในดินแต่มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีต

2.6 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์

2.6.1 ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM) และ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

- (1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ผลิตใช้มากที่สุดเหมาะสำหรับงานคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษมาก
- (2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับงานที่เกิดความร้อนสูงและทนซัลเฟตปานกลาง

- (3) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ให้กำลังอัดเร็ว (High-Early Strength Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีเม็ดยึดเหนี่ยวมาก ทำให้แข็งตัวเร็วและให้กำลังรับแรงอัดสูงในระยะแรก เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว
- (4) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำที่สุด เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหนา
- (5) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตสูง (Sulfate Resistance Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต ดังนั้นจึงให้กำลังรับแรงอัดช้า และให้ความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

2.6.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ที่เป็นออกไซด์ และจะทำปฏิกิริยาทางเคมีรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในรูปเม็ดปูน ซึ่งสารประกอบดังกล่าวมีด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

- (1) Tricalcium Silicate (C_3S) เป็นสารประกอบที่ให้ความแข็งแรงแก่ปูนซีเมนต์ในระยะแรกสูง ให้ความร้อนสูงเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ
- (2) Dicalcium Silicate (C_2S) เป็นสารประกอบที่ให้ความแข็งแรงแก่ปูนซีเมนต์ในระยะแรกต่ำ แต่จะให้กำลังค่อยๆ สูงขึ้นในภายหลังและให้ความร้อนต่ำเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ
- (3) Tricalcium Aluminate (C_3A) เป็นสารประกอบที่ให้กำลังรับแรงอัดในช่วงแรกเพียงเล็กน้อยและเป็นตัวทำให้ซีเมนต์มอร์ต้าลื่น แต่ซีเมนต์ที่มีสารประกอบตัวนี้มากจะไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ นอกจากนั้นยังทำให้การก่อตัวของมอร์ต้าแข็งเร็วขึ้น
- (4) Tetracalcium Aluminoferrite (C_4AF) เป็นสารประกอบที่ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา ช่วยในด้านความอยู่ตัว และช่วยป้องกันปฏิกิริยาทางเคมีจากสิ่งต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงด้วย

2.6.3 กลไกการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์

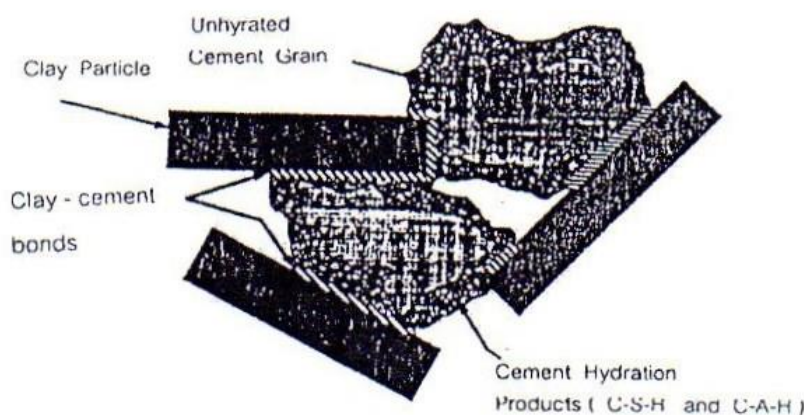
การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ถือเป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางฟิสิกส์-เคมี (Physical-Chemical reactions) ระหว่างซีเมนต์ น้ำ และดิน ซึ่งประกอบด้วย 2 กลไกหลัก ดังนี้

1. ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในช่วงต้น (Primary reaction)

1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction)

เมื่อซีเมนต์ซึ่งมีสารประกอบหลักอยู่ 4 อย่าง คือ C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF รวมตัวกับน้ำ จะเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) และ Released Hydrated Lime ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

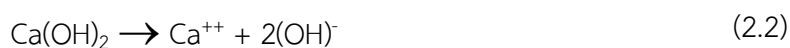
ก่อให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดินมีลักษณะเป็นโครงข่ายต่อเนื่องกัน โครงข่ายดังกล่าวจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับมวลดินหรือวัสดุที่ถูกปรับปรุงและแทรกตัวระหว่างช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ส่งผลทำให้ลดการซึมผ่านของน้ำและการบวมตัวของมวลดิน รวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบๆ อีกด้วย (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างดินเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Prusinski et al., 1999)

1.2 กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange)

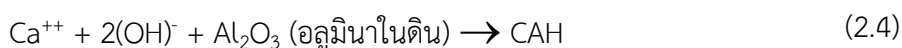
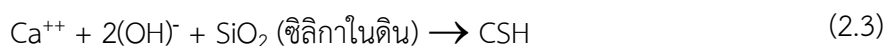
เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนหรือรวมตัวกันของประจุบวก (Cation) บริเวณผิวของเม็ดดิน ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังจากการผสมซีเมนต์ กระบวนการนี้จะส่งผลทำให้ดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) ของดินลดลง ดังแสดงในสมการทางที่ (2.2)

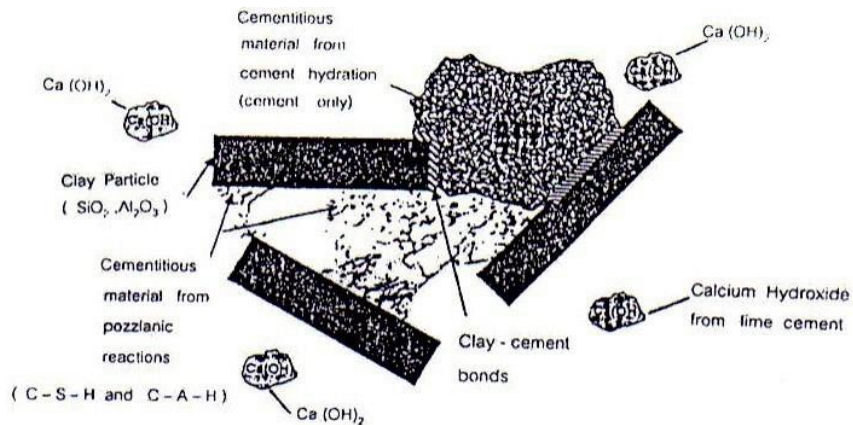


2. ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในช่วงปลาย (Secondary reaction)

2.1 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction)

เป็นกระบวนการที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง Released Hydrated Lime ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิกาและอะลูมินาในดิน ทำให้เกิด CSH และ CAH เพิ่มขึ้นและมีค่าดัชนีกรดต่าง (pH) ลดลง สารประกอบ CSH และ CAH ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีนี้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานและจากความแตกต่างที่สูงขึ้นเป็นผลทำให้ Colloid Gel หรือ Cement Gel ที่ประกอบไปด้วย CSH และ CAH เกิดการรวมตัวกันและยึดเกาะกันเป็นโครงสร้างที่มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น





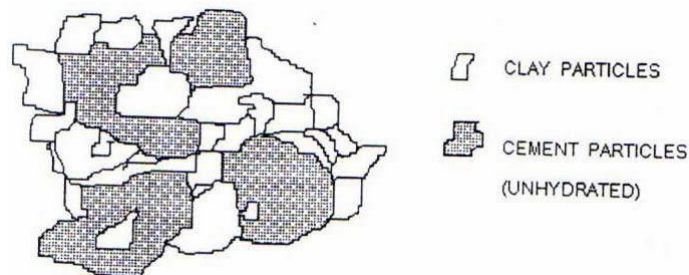
รูปที่ 2.2 โครงสร้างดินเมื่อเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Prusinski et al., 1999)

2.6.4 โครงสร้างของดินซีเมนต์ภายใต้สภาวะต่างๆ

Mitchell and Jack (1966) อธิบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ภายใต้สภาวะต่างๆ สามารถแบ่งได้ 3 ช่วงดังนี้

1. โครงสร้างของดินซีเมนต์ภายใต้การบดอัด

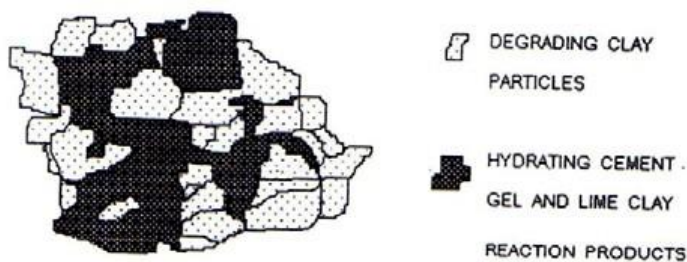
ช่วงเวลานี้เป็นช่วงที่ซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งอนุภาคปูนซีเมนต์ที่ Unhydrated จะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดินดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างดินซีเมนต์ภายใต้การบดอัด (Mitchell and Jack, 1966)

2. โครงสร้างของดินซีเมนต์ภายใต้การบ่มระยะสั้น

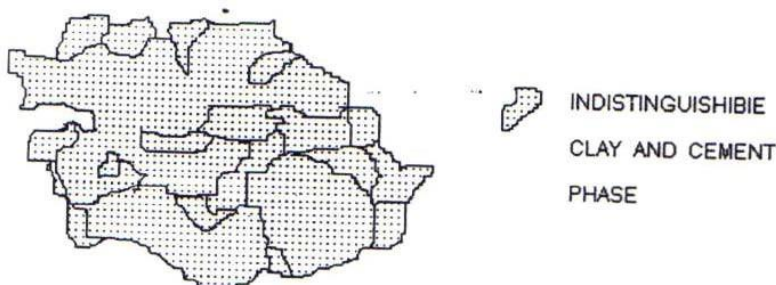
ช่วงเวลานี้อนุภาคของซีเมนต์จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดเป็น Cement Gel แทรกซึมตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และ Released Hydrated Lime เริ่มทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาแผ่กระจายไปตามอนุภาคของดินดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างดินซีเมนต์ภายใต้การบ่มระยะสั้น (Mitchell and Jack, 1966)

3. โครงสร้างของดินซีเมนต์ภายใต้การบ่มระยะยาว

ช่วงเวลานี้อนุภาคของซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้ Cement Gel และขอบเขตการแทรกซึมแผ่กระจายไปทั่วทั้งก้อนของดินซีเมนต์ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างดินซีเมนต์ภายใต้การบ่มระยะยาว (Mitchell and Jack, 1966)

2.6.5 ประเภทของดินซีเมนต์

Portland Cement Association (PCA) ได้จำแนกชนิดของดินซีเมนต์ตามส่วนประกอบหลัก ดังนี้

2.6.5.1 Cement – Modified Soils (CMS)

ปริมาณซีเมนต์น้อยในการปรับปรุงดินซีเมนต์ประเภทนี้เพื่อแก้ไขคุณสมบัติที่ไม่พึงปรารถนาของดินที่มีปัญหาหรือวัสดุที่มีคุณสมบัติต่ำกว่ามาตรฐานให้มีคุณสมบัติเหมาะสมเพียงพอ สำหรับการก่อสร้างไม่ได้ต้องการให้ดินซีเมนต์แข็งขึ้นโดยดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพแล้วจะก่อตัวเป็นก้อนหรือแข็งขึ้นเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามจะยังมีคุณสมบัติหลักเหมือนเดิมอยู่ ระดับของการปรับปรุงคุณภาพขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้และชนิดของดิน คุณสมบัติของดินที่ได้รับการปรับปรุงสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คุณสมบัติด้านความเหนียวของดินลดลง
2. ปริมาณอนุภาคขนาด Silt และ Clay ลดลง
3. เพิ่ม CBR (California Bearing Ratio)

4. เพิ่มกำลังรับแรงเฉือน
5. คุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงปริมาตรลดลง

2.6.5.2 Cement – Treated Base (CTB)

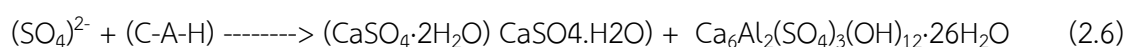
ดินซีเมนต์ประเภทนี้จะต้องออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังรับแรงอัดหรือความแข็งแรงทนทาน ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับดินจะต้องมากพอที่จะทำให้ได้กำลังรับแรงอัดหรือกำลังแบกทานได้ตามที่กำหนด การปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับชั้นพื้นทางสามารถโดยการผสมวัสดุมวลรวมหรือดินกับซีเมนต์ และน้ำตามปริมาณที่ออกแบบไว้แล้วทำการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดและจะต้องมีระยะเวลาการบ่มที่เพียงพอให้ปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะให้ได้ส่วนผสมที่แข็งแรงขึ้นก่อนที่จะปูผิวทางแอสฟัลต์หรือผิวทางคอนกรีตทับด้านบน ปัจจุบันพื้นฐานที่จะควบคุมคุณภาพ มีดังนี้

1. สัดส่วนปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม
2. ปริมาณความชื้นที่เพียงพอ
3. การผสมให้ทั่วถึง
4. การบดอัดที่เพียงพอ
5. ระยะเวลาและวิธีการบ่มที่เหมาะสม

2.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังของดิน

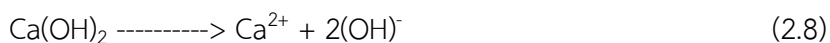
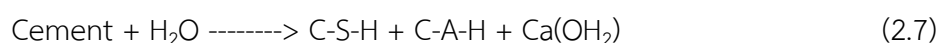
2.7.1 ปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบซัลเฟต

กระบวนการทำปฏิกิริยาของซัลเฟตจะเริ่มจากซัลเฟตไอออนของแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดเป็นยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต (Ettringite) สารประกอบยิปซัมและแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตที่เกิดขึ้นมีปริมาตรจากเดิม 2 เท่า ทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ นอกจากนั้นแมกนีเซียมไอออนจากแมกนีเซียมซัลเฟต จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ซึ่งเมื่อสารประกอบนี้มีปริมาณมากจะก่อให้เกิดการสลายตัวของ C-S-H ทำให้กำลังของดินซีเมนต์ลดลง

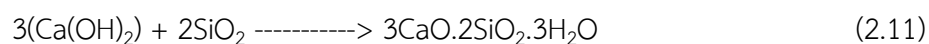


2.7.2 ปฏิกิริยาเคมีของดินซีเมนต์และสารปอซโซลาน

การปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์สามารถอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ เมื่อซีเมนต์ผสมเข้ากับดินและน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต (Ettringite) แยกตัวออกมา สารประกอบสองตัวแรกมีคุณสมบัติเชื่อมประสานที่ได้จากปฏิกิริยาหลักของซีเมนต์ นอกจากนี้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จะแตกตัวเป็นแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และเข้าไปทำปฏิกิริยากับ silica และ alumina ในแร่ดินเหนียวเกิดสารประกอบ (C-S-H) และ (C-A-H) ขึ้นมาอีก แต่จะต้องใช้ระยะเวลานานขึ้นสำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์ดังสมการที่ (2.7) ถึง (2.10) ตามลำดับ



เมื่อนำวัสดุปอซโซลานมาผสม สารประกอบซิลิกา (SiO_2) และอลูมิเนียม (Al_2O_3) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในวัสดุปอซโซลาน จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $2(\text{Ca(OH)}_2)$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำเป็นผลให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-S-H) กับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-A-H) ในดินซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นและทำให้มีกำลังสูงขึ้น การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้



ดังนั้นหากทำการลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สารละลายซัลเฟตต้องการทำปฏิกิริยาด้วย น่าจะเป็นไปได้ที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตปนเปื้อนอยู่จะเท่ากับหรือสูงกว่าดินซีเมนต์ธรรมดา

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนผสมซีเมนต์

เกษม (2541) ทำการศึกษาผลของการผสมปูนซีเมนต์ลงในดินเหนียวอ่อนในห้องปฏิบัติการโดยใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณ 250 300 และ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินที่ถูกปรับปรุงหรือเทียบเป็นร้อยละ 21.9 26.3 และ 30.7 และใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มเพิ่มขึ้น

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์และเถ้ากลบ

อภิชาติ และคณะ (2007) ทำการศึกษากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัดที่ผสมด้วยซีเมนต์และเถ้ากลบ โดยทำการแปรผันปริมาณซีเมนต์ที่ 3%, 5%, และ 7% ของน้ำหนักดินแห้ง แปรผันอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบที่ถูกบดอัดและเถ้ากลบที่ไม่ถูกบดอัดในปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ 40 และ 30, 20 และ บ่มดินตัวอย่างเป็นเวลา 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน พบว่าที่ปริมาณซีเมนต์ค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์จะมีค่าสูงกว่าดินซีเมนต์ผสมเถ้ากลบในช่วงอายุบ่มระหว่าง 7 ถึง 28 วัน หลังจากนั้น อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์จะมีค่าต่ำ และพบว่าที่อายุบ่ม 60 วัน กำลังอัดแกนเดียวของทั้งดินซีเมนต์ผสมเถ้ากลบที่ผ่านการบดและไม่ผ่านการบด ที่ทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบในปริมาณ 20 และ 10 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์เพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าการทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้ดินมีกำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มดินตัวอย่างนานขึ้น

ศุภกิจ และ กมล (2545) ทำการศึกษาถึงผลการปรับปรุงคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) ด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยใช้อัตราการผสมปูนซีเมนต์และปูนขาวเท่ากับ 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

2.8.3 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% กำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลง ปริมาณซีเมนต์ที่ทำให้กำลังแกนเดียวมีค่าสูงสุดในปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 25% ของน้ำหนักแห้ง อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าสูงในช่วงอายุบ่มระหว่าง 7 ถึง 28 วัน หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลง โดยที่กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติ จากการแทนที่เถ้าแกลบในดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟต พบว่า ปริมาณสารเชื่อมประสาน (ซีเมนต์+เถ้าแกลบ) เท่ากับ 10% ของน้ำหนักดินแห้งและอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10% ของน้ำหนักซีเมนต์ที่อายุบ่มน้อยกว่า 28 วัน กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติและที่อายุบ่ม 60 วัน กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าสูงกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า การทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้ดินมีกำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น แต่ต้องใช้เวลาในการบ่มนานขึ้น

2.8.4 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 ผู้วิจัยออกแบบวิธีการดำเนินการวิจัยของโครงการวิจัยโดยเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้คือดินตะกอนทะเลบริเวณท่าเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิราชา จังหวัดชลบุรี โดยสามารถแบ่งงานได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิราชา จังหวัดชลบุรี 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 เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ โดยแปรผันปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อดินตะกอนทะเลโดยน้ำหนักแห้ง คือ 0% 5% และ 10% และแปรผันอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อดินตะกอนทะเลโดยน้ำหนักแห้ง 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, s_u) ในทุกๆ อัตราส่วนผสม ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้จะถูกเตรียมโดยจำลองพฤติกรรมเช่นเดียวกับการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง คือการบดอัดแบบสถิตย์ เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่มีความชื้นบดอัดเหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) และมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, $\gamma_{dry, max}$) ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard compaction Test: ASTM D698)

ส่วนที่ 3 แปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่างดินในทุกๆ อัตราส่วนผสม (ดังรายละเอียดในวิธีการดำเนินการวิจัยส่วนที่ 2) คือ 0 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคุณสมบัติการรับแรงอัดแกนเดียว ค่ากำลังรับแรงเฉือน และความคงทนของดินตะกอนทะเล เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ

ส่วนที่ 4 ภายหลังทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตัวอย่างดินตะกอนทะเลจะถูกนำมาทดสอบเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ภายในตัวอย่างดินภายหลังการเกิดปฏิกิริยาเคมี

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ดินตะกอนจากชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี
2. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
3. แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)
4. น้ำกลั่น



รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

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 (เพื่อไม่ให้น้ำเดือดขวดแก้วจะแตก)
3. ไล่อากาศในน้ำด้วยการต้มน้ำให้เดือดในเตาแผ่นร้อนประมาณ 10 นาที นำขวดแก้วลงจากเตา เติมน้ำกลั่นที่ต้มไล่ฟองอากาศทิ้งไว้แล้วลงในขวดพลาสติกให้เต็มด้วยวิธีกลักน้ำ จุ่มปลายสายยางลงใต้ผิวน้ำ เพื่อไม่ให้อากาศเข้าไปผสมในน้ำอีกและปล่อยให้เย็น ถ้าต้องการให้เย็นเร็วอาจแช่ในอ่างน้ำจมนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 40-50 องศา ตรวจสอบว่าอุณหภูมิของน้ำในขวดพลาสติกเท่ากันทุกระดับหรือไม่ ถ้าไม่เท่ากันให้คลังขวดเอียงไปมาหรือใช้หลอดแก้ววนไปมา
4. แต่งขอบน้ำให้อยู่ที่ขีดบอกปริมาตร 500 มิลลิลิตร สังเกตขอบล่างของโค้งผิวน้ำขีดขวดภายนอกและภายในเหนือผิวน้ำให้ห่าง
5. นำขวดพลาสติกที่ใส่น้ำอยู่ภายในขวดขึ้นชั่ง และวัดอุณหภูมิน้ำตรวจสอบอีกครั้งว่าอุณหภูมิของน้ำในขวดเท่ากันทุกระดับหรือไม่
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 พร้อมกับกลิ้งขวดไปมาหลายรอบทำเช่นนั้นสลับกันไปเรื่อยๆ และคอยสังเกตว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นอีกหรือไม่ ทำจนกระทั่งฟองอากาศหมดไปซึ่งต้องใช้เวลาและความละเอียดในการสังเกต

3. หลังจากไล่ฟองอากาศหมดแล้วทำการเติมน้ำกลั่นให้ระดับท้องน้ำอยู่ที่ขีด 500 มิลลิลิตรพอดี ในการเติมน้ำกลั่นนั้นควรใช้หลอดและปล่อยน้ำกลั่นจากหลอดโดยจุ่มปากหลอดให้อยู่ใต้ระดับน้ำในขวดพ

ลาสเพื่อป้องกันอากาศลงไปอีก แล้วตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องทดสอบจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำในขวดพลาสติกเท่ากับอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิที่ต้องการ (โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์คอยเช็คดูอยู่เสมอ) และคอยสังเกตว่าถ้าระดับในขวดพลาสติกต่ำกว่า ซีต 500 มิลลิลิตร ก็ให้เติมน้ำกลั่นทอน้ำพอดีกับซีตอยู่เสมอ

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

5. นำดินที่อบแห้งแล้วไปชั่งแล้วบันทึกค่า เมื่อลบน้ำหนักภาชนะออกจะได้เป็นน้ำหนักของดินแห้ง

3.3.2 การทดสอบหาค่าพิกัดชั้นเหลว (Atterberg's limit)

3.3.2.1 หาค่าพิกัดเหลวโดยวิธีถ้วยคาซาแกรนด์ (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 (การเคาะครั้งแรกจำนวนครั้งควรจะเป็นประมาณ 40-50 ครั้ง ถ้ามากกว่าให้เพิ่มน้ำอีก แต่ถ้าน้อยกว่าให้ทำให้แห้งลง)
5. ผสมน้ำในดินแล้วทำตามข้อ 3 และ 4 โดยให้มีจำนวนครั้งของการเคาะน้อยลงประมาณ 10 ครั้ง แล้วนำดินไปหาค่าความชื้น 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. นำดินที่เหลือจากการทดสอบขีดพิกัดเหลวมาผึ่งให้หมาดๆ แล้วนำมาปั้นคลึงเป็นแท่งยาวขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร แล้วค่อยๆ คลึงให้เล็กลงจนมีขนาดเท่ากับ 1 หุน (1/8 นิ้ว) แล้วคลึงต่อไปเรื่อยๆ โดยพยายามรักษารูปร่างดังกล่าวจนดินเริ่มแตกปริออก
2. เมื่อดินเริ่มแตก นำดินไปอบหาความชื้น ความชื้นดังกล่าวเรียกว่า Plastic Limit (PL)
3. ทำซ้ำอีกครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

3.3.3 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM D1557)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. โม่ที่ใช้ในการทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว ความสูง 4.584 นิ้ว พร้อมด้วยปลอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเดียวกันและแผ่นฐานสูง 50 มม. (มีปริมาตร 1,000 ซม.³)
2. ค้อนบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานหนัก 10 ปอนด์ ระยะยก 18 นิ้ว
3. แม่แรงสำหรับดันตัวอย่างดินออกจากโม่เหล็กปาดดินสันตรงขนาด 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. กระจบอทวทงท่มีซ้ดแบ่งปริมาตร
10. ซ้อนตักดิน
11. ค้อนยาง
12. กระจบองใส่ตัวอย่างดิน



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

วิธีการทดสอบ

1. นำตัวอย่างดินที่ได้จัดเตรียมไว้มาเทลงในภาตผสมดิน ใช้ค้อนยางทุบดินที่เกาะกันอยู่ออกจากกัน ถ้าตัวอย่างเป็นดินเหนียว ผึ่งให้แห้งแล้วทุบให้ละเอียดหรืออาจใช้เครื่องบดร่อน ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 หนักประมาณ 3-5 กิโลกรัม

2. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของโม่ เพื่อหาปริมาตรของดินในโม่ จากนั้นประกอบ

โมลและแผ่นฐาน พร้อมชั่งน้ำหนัก (ไม่ต้องชั่งปลอกสวม)

3. นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้อย่างน้อย 5 กิโลกรัม โดยเริ่มอัตราส่วนซีเมนต์และผสมน้ำให้มีความชื้นตามค่าที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน

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

5. ใช้ค้อน 10 ปอนด์ บดอัดดินในโมลแต่ละชั้นให้ทั่วทั้งโมล โดยบดอัดชั้นละ 25 ครั้ง โดยให้โม่วางอยู่บนพื้นคอนกรีตเรียบ

6. เมื่อตอกกระทันท์บดอัดครบจำนวนครั้งแล้วถอดปลอกสวมของโมลออก ใช้บรรทัดเหล็กปาดดินส่วนที่สูงเกินปากโมลออก และอุดแต่งผิวดินให้เรียบเสมอปากโมล ใช้แปรงปัดทำความสะอาดดินที่ค้างอยู่นอกโมลแล้วถอดแผ่นฐานออก นำไปชั่งหาน้ำหนักดินในโมล ให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

7. ดันแท่งตัวอย่างดินออกจากโมล แล้วผ่ากลางตามแนวตั้ง เก็บดินตัวอย่างตามแนวผ่าอย่างน้อย 100 กรัม แล้วนำไปชั่งน้ำหนักและนำเข้าในเตาอบเพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นต่อไป

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

9. หาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ทำให้ดินแน่นที่สุดจากการเขียนเส้นกราฟโดยแกนนอนเป็นค่าความชื้นและแกนตั้งเป็นหน่วยน้ำหนักแห้ง

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 สำหรับ

ตัวอย่างดินที่มีมวลมากกว่า 100 กรัม ให้ใช้เครื่องชั่งชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

8. เครื่องมือเบ็ดเตล็ด เครื่องมืออื่นๆ ที่ต้องใช้ คือ เครื่องมือตัดและตกแต่งตัวอย่าง เครื่องทำตัวอย่าง Remolded และกระป๋องอบดิน



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

วิธีการทดสอบ

ก) การเตรียมตัวอย่าง

1. นำตัวอย่างไปผึ่งลมให้พอแห้ง แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เพื่อให้แห้ง
2. นำเข้าเครื่อง Los Angeles เพื่ออบดให้ละเอียดแล้วจึงนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50



รูปที่ 3.5 เครื่อง Los Angeles

3. นำตัวอย่างที่ได้มาผสมกับซีเมนต์และน้ำตามอัตราส่วนการทดสอบ
4. อัดดินตัวอย่างใส่ลงในกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร โดยรองที่ฐานด้วยก้อนทองแดงและกระดาษกรอง โดยแบ่งเป็น 3 ช่วงๆ ละเท่าๆ กันจนดินตัวอย่างหมด
5. กรณีที่ไม่มีการบ่ม ทำตามข้อ 7
6. ในกรณีที่มีการบ่ม นำกระบอกที่มีดินตัวอย่างอยู่ภายในใส่ลงในภาชนะที่มีความสูงมากกว่ากระบอกแล้วจึงคลุมด้วยกระสอบป่าน โดยรักษาอุณหภูมิด้วยวิธีการพรมน้ำพุ่มๆ ทุกๆ วันจนกว่าจะครบอายุบ่ม



รูปที่ 3.6 การบ่มตัวอย่างดิน

7. นำตัวอย่างดินที่ครบอายุบ่ม ถอดกระบอกออกโดยการใช้เครื่องดันตัวอย่างดิน
 8. นำตัวอย่างดินไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียว
- ข) การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวโดยวิธีควบคุมความเครียด
1. วางแท่งตัวอย่างไว้ตรงกลางแผ่นฐานของเครื่องกด แล้วเลื่อนฐานเครื่องกดขึ้นจนกระทั่งผิวบนของแท่งตัวอย่างสัมผัส Proving ring ตั้งหน้าปัดเป็นศูนย์ก่อนเริ่มต้นทดสอบ
 2. ติดตั้ง Dial Gauge ที่ใช้อ่านระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างดิน
 3. เริ่มทดสอบแรงกดแกนเดียว จดแรงกดและระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างทุกๆ 0.1 มิลลิเมตร
 4. เพิ่มแรงกดต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงกดลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่า 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

5. ผ่าตัวอย่างตามแนวตั้ง เก็บดินตัวอย่างตามแนวผ่าอย่างน้อย 100 กรัม นำไปชั่งน้ำหนักและนำเข้าไปในเตาอบเพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นต่อไป

6. เขียนรูปภาพแท่งตัวอย่างที่ทดสอบเสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยแตกร้าววัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนนอน

7. นำค่าแรงกดและระยะหดตัว เขียนลงกราฟโดยให้แรงกดเป็นแกนตั้งและระยะหดตัวเป็นแกนนอน เพื่อหาค่ากำลังรับแรงที่สูงสุด

3.3.5 การชะละลายซัลเฟตด้วยวิธี SPLP

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. กรดซัลฟูริก
2. กรดไนตริก
3. น้ำปราศจากไอออน
4. เครื่องวัด pH
5. เครื่องหมุนเหวี่ยงแบบ rotary end-over-end
6. กระจกกรองใยแก้วที่มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.6 – 0.8 ไมโครเมตร
7. บีมดูดอากาศ
8. กรวย
9. ขวดรูปชมพู

วิธีการทดสอบ

1. นำดินแห้งหนัก 100 กรัม ใส่ลงในขวดสำหรับสกัด
2. เตรียมสารสกัดที่ใช้ในการชะละลายโดยการผสมกรดเข้าด้วยกันระหว่างกรดซัลฟูริกและกรดไนตริกในอัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก
3. นำกรดผสมที่ได้นั้นเติมลงในน้ำปราศจากไอออน เพื่อปรับพีเอชของน้ำปราศจากไอออนให้มีค่าเท่ากับ 4.20 ± 0.05
4. นำสารละลายที่สกัดได้ไปเติมลงขวดสกัด ในอัตราส่วนสารสกัดต่อดินแห้งเท่ากับ 20:1 ปิดฝาให้สนิท
5. นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงแบบ rotary end-over-end ทำการหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30 ± 2 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ± 2 ชั่วโมง
6. นำของผสมที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้วที่มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.6 – 0.8 ไมโครเมตร
7. นำไปตรวจวัดปริมาณซัลเฟตโดยวิธีวัดความขุ่น ตามมาตรฐาน ASTM D516

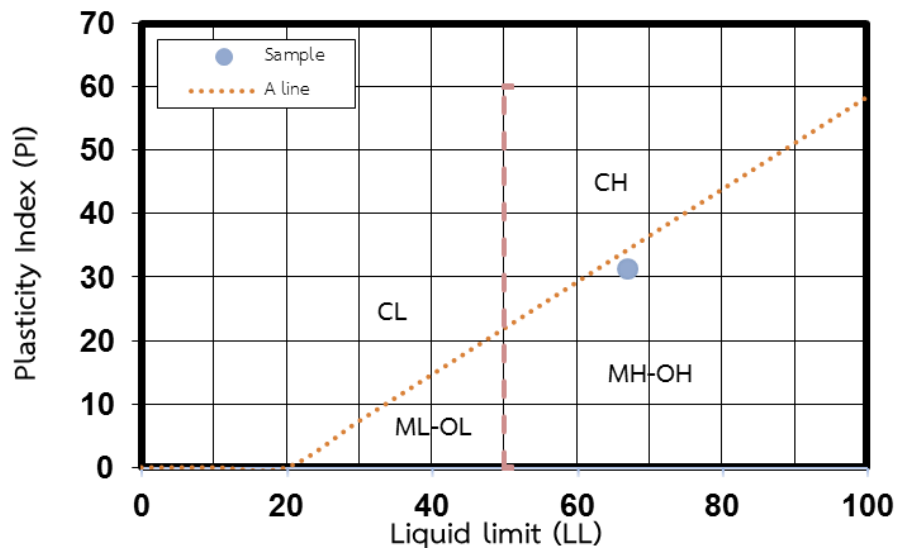
บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

4.1.1 ค่าขีดพิกัดเหลว ขีดพิกัดพลาสติก และดัชนีพลาสติกของดินตัวอย่าง

จากการทดสอบหาค่าพิกัดชั้นเหลวของดินตะกอนทะเล (ASTM D4318 และ D427) พบว่าค่าพิกัดเหลว ค่าพิกัดพลาสติก และค่าดัชนีพลาสติกของดินตะกอนทะเลมีค่าเท่ากับ 67% 35.8% และ 31.2% ตามลำดับ โดยการจำแนกประเภทของดินตามระบบ USCS ดินตัวอย่างจัดเป็นดินตะกอนที่มีสภาพความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity silt, MH) ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 จำแนกชนิดของดินตัวอย่างโดยวิธี USCS

4.1.2 ความถ่วงจำเพาะของดิน

การทดสอบความถ่วงจำเพาะของดิน ASTM D854 ของดินตัวอย่าง พบว่า ดินตัวอย่างมีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.69

4.1.3 ความเข้มข้นของซัลเฟต

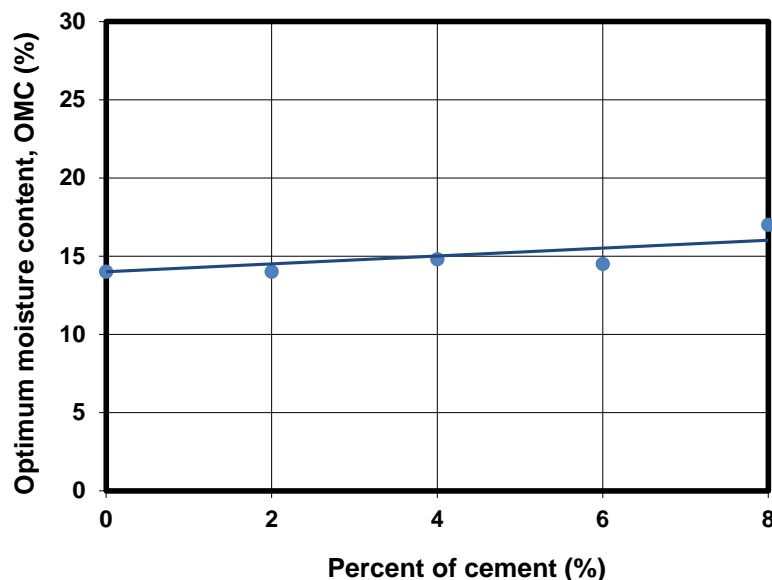
การทดสอบความเข้มข้นของซัลเฟตในดินสามารถทำได้โดยนำดินตัวอย่างไปชะละลายซัลเฟตด้วยกรดซัลฟิวริกผสมกับกรดไนตริกตามวิธี Synthesis Precipitation Leaching Procedure (SPLP) โดยจะได้ออกมาในรูปของสารละลายซึ่งสามารถนำไปวัดปริมาณของซัลเฟตได้ในรูปของค่าความขุ่น

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

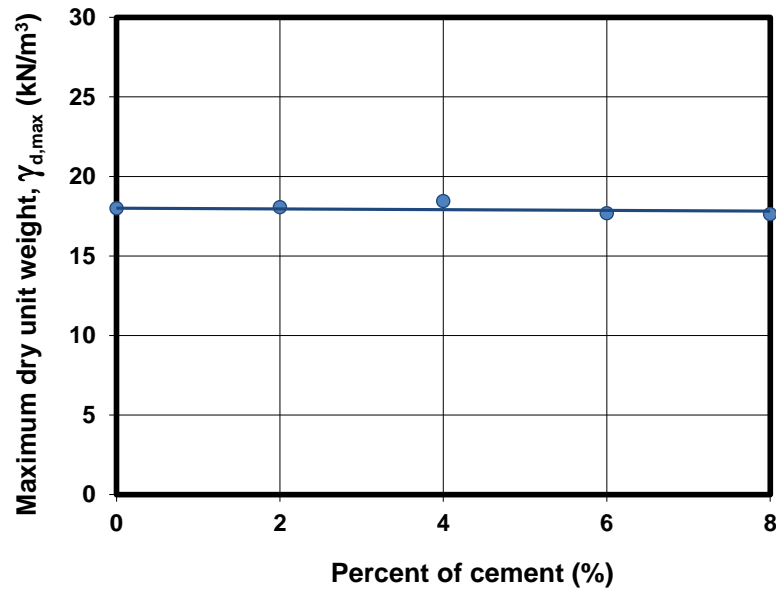
4.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินตะกอนผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ

Cement (%)	Optimum moisture content (OMC) (%)	Maximum dry unit weight ($\gamma_{dry\ max}$) (kN/m ³)
0	14	18
2	14	18.08
4	14.8	18.46
6	14.5	17.7
8	17	17.63



รูปที่ 4.2 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดของตัวอย่างดินตะกอนผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ



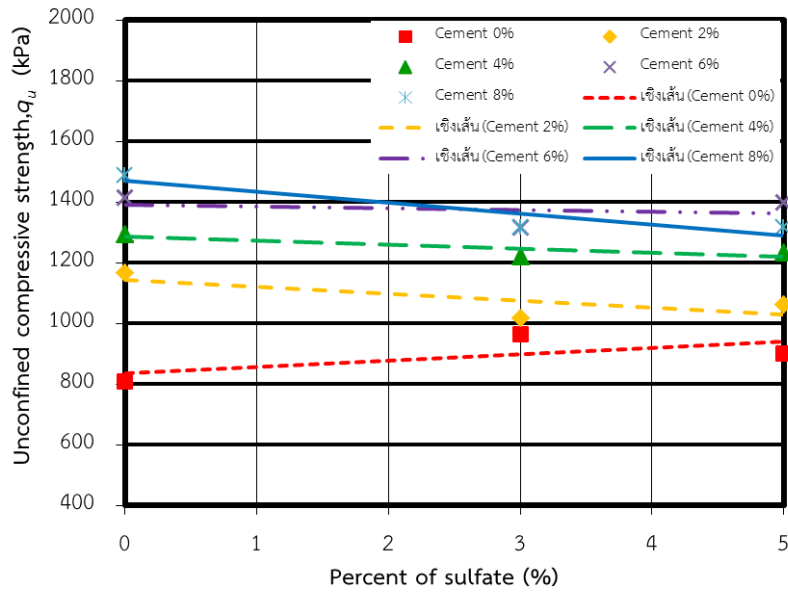
รูปที่ 4.3 ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินตะกอนผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ

ทุกๆ อัตราส่วนผสมของดินตัวอย่างจะถูกนำมาทำการทดสอบบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานเพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1 รูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ พบว่า ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการบดอัดดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 2 พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างมีแนวโน้มคงที่ประมาณ 18 kPa

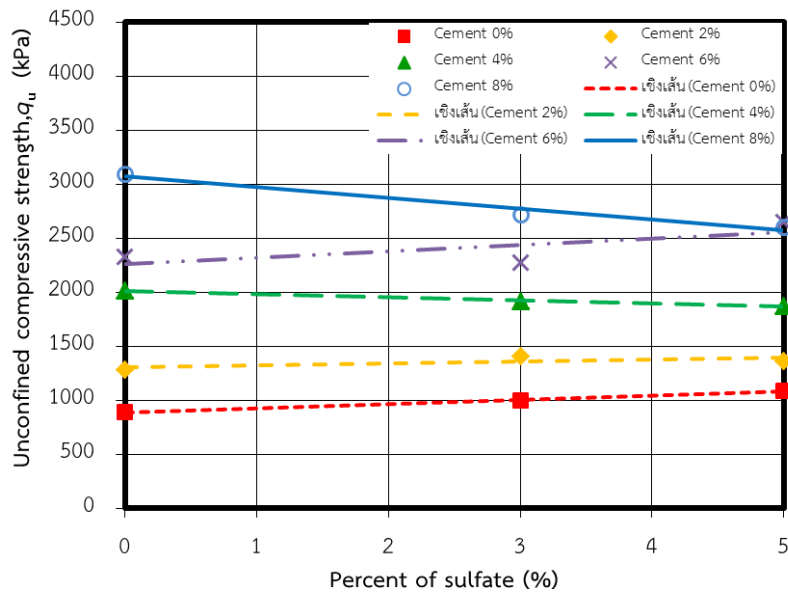
4.3 ผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของของตัวอย่างดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์

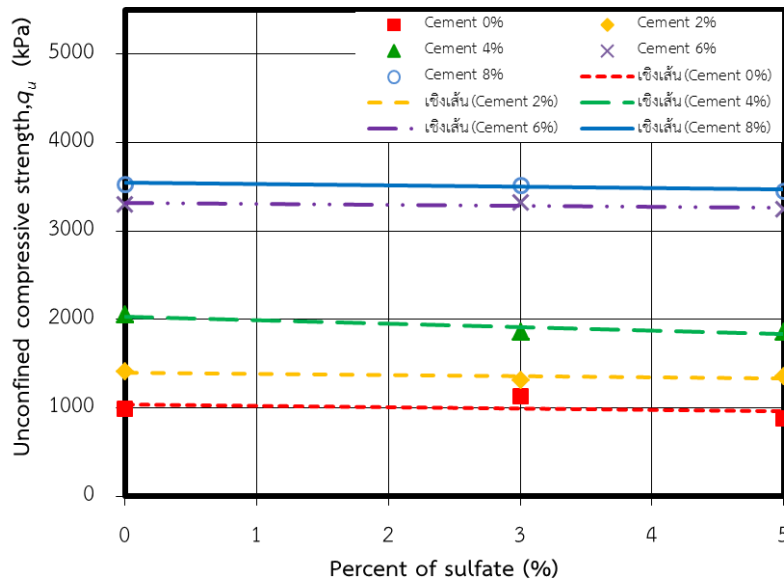
ระยะเวลาบ่ม (day)	ความเข้มข้นของซัลเฟต (%)	อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ (%)				
		0	2	4	6	8
0	0	808.44	1167.62	1295.28	1413.50	1487.08
	3	964.72	1016.85	1222.46	1317.54	1317.15
	5	899.23	1063.42	1233.32	1398.07	1315.66
7	0	889.21	1283.38	2016.59	2328.49	3097.26
	3	997.77	1411.91	1913.10	2274.10	2723.44
	5	1090.56	1366.02	1869.82	2647.92	2607.58
14	0	989.10	1413.11	2055.59	3300.00	3536.86
	3	1128.69	1314.62	1866.17	3322.90	3522.08
	5	883.65	1365.02	1863.98	3245.97	3456.03
28	0	1051.34	1218.25	2875.68	3372.41	4765.74
	3	1071.75	1359.53	2336.70	3687.22	4506.75
	5	943.77	1282.84	2418.74	2976.94	3800.80



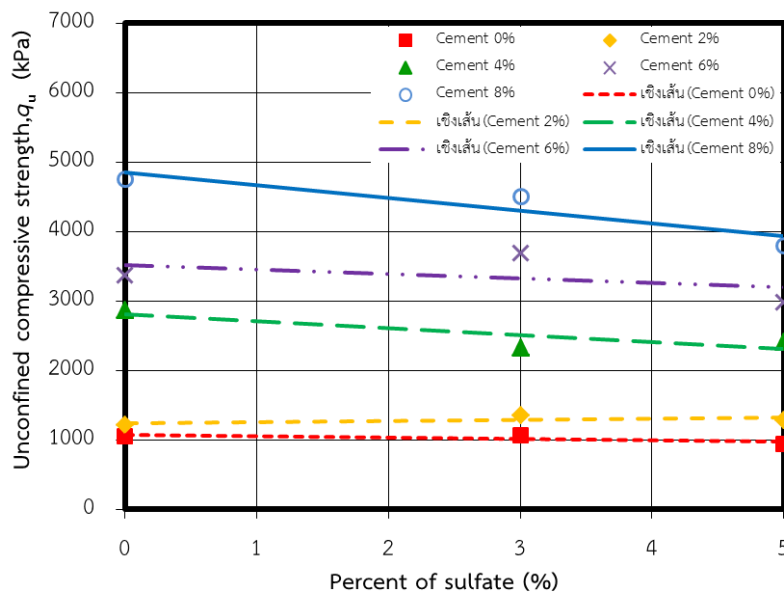
(ก) ระยะเวลาบ่ม 0 วัน



(ข) ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



(ค) ระยะเวลาบ่ม 14 วัน



(ง) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4.4 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์ เมื่อแปรผันความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟต

เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์ ตัวอย่างดินทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm สูง 100 mm ที่ใช้ในการทดสอบนี้ถูกเตรียมที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยแปรผันปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟต คือ 0% 5% และ 10% แปรผันอัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อดินตะกอนทะเลโดยน้ำหนักแห้ง คือ 0% 2% 4% 6% และ 8% และแปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่างดินคือ 0 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.4

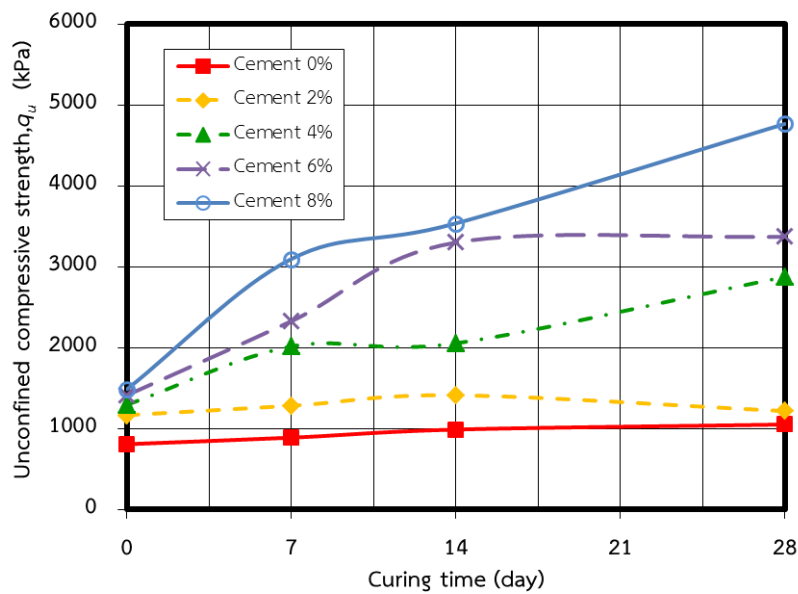
จากรูปที่ 4.4 (ก) แสดงค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่ม 0 วัน และแปรผันปริมาณซีเมนต์ในดินตัวอย่างในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตในดินเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินในสภาพธรรมชาติ (ซีเมนต์ 0%) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์เป็น 2% 4% 6% และ 8% ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง -1.97% ถึง -13.97% และจากรูปที่ 4.4 (ข) ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลง อยู่ในช่วงระหว่าง +22.54% ถึง -16.25% แต่ภายหลังระยะเวลาบ่ม 14 วันและ 28 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟต ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินมีค่าลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง -1.04% ถึง -19.03% ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ค) และ 4.4 (ง) ตามลำดับ

จากผลการทดสอบที่ได้กล่าวได้ว่าภายหลังจากบ่มดินตัวอย่าง 7 วันเป็นต้นไป เมื่ออัตราส่วนซัลเฟตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินลดลง ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาของสารประกอบซัลเฟต โดยซัลเฟตจะเข้าไปจับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ลดการทำปฏิกิริยากับดินลงส่งผลให้กำลังที่ได้ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อภิชาติและคณะ (2550) ที่กล่าวว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะมีค่าสูงในช่วงอายุบ่มระหว่าง 7 ถึง 28 วัน หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลง โดยที่ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศุภกิจและ กมล (2549) ที่กล่าวว่าแนวโน้มของอัตราการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวต่อระยะเวลาบ่มจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น

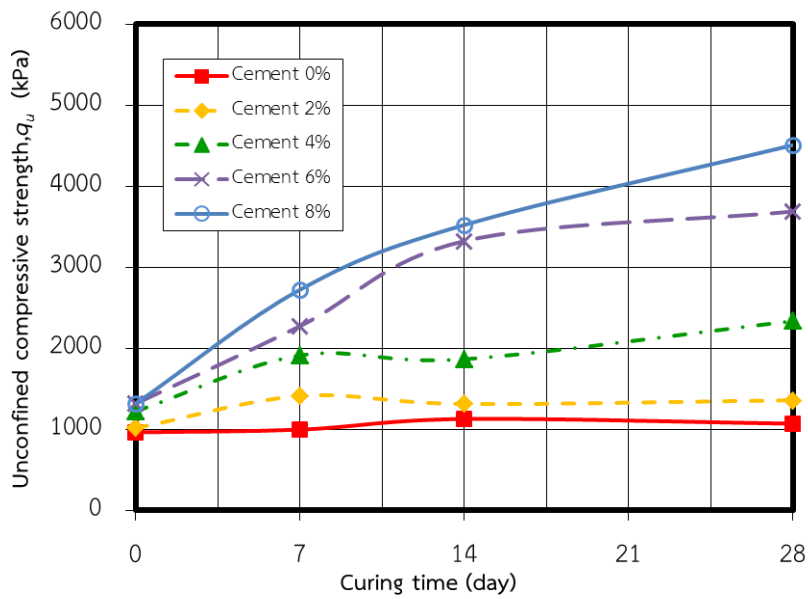
4.4 ผลของระยะเวลาทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซิลิเกตต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์

ตารางที่ 4.3 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนตัวอย่างโดยแปรผันระยะเวลาบ่ม

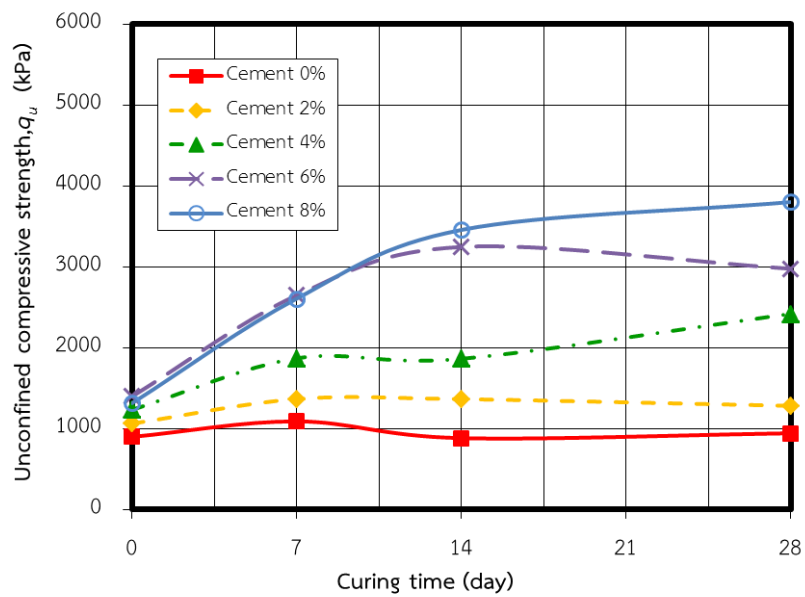
ความเข้มข้นของซิลิเกต (%)	ระยะเวลาบ่ม (day)	อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ (%)				
		0	2	4	6	8
0	0	808.44	1167.62	1295.28	1413.50	1487.08
	7	889.21	1283.38	2016.59	2328.49	3097.26
	14	989.10	1413.11	2055.59	3300.00	3536.86
	28	1051.34	1218.25	2875.68	3372.41	4765.74
3	0	964.72	1016.85	1222.46	1317.54	1317.15
	7	997.77	1411.91	1913.10	2274.10	2723.44
	14	1128.69	1314.62	1866.17	3322.90	3522.08
	28	1071.75	1359.53	2336.70	3687.22	4506.75
5	0	899.23	1063.42	1233.32	1398.07	1315.66
	7	1090.56	1366.02	1869.82	2647.92	2607.58
	14	883.65	1365.02	1863.98	3245.97	3456.03
	28	943.77	1282.84	2418.74	2976.94	3800.80



(ก) แมกนีเซียมซิลิเกต 0%



(ข) แมกนีเซียมซิลิเกต 3%



แมกนีเซียมซิลิเกต (ค) 5%

รูปที่ 4.5 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์
เมื่อแปรผันระยะเวลาการบ่ม

จากรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่ทุกๆ ความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวจะสูงในช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มจะลดลง เนื่องจากสารประกอบไตรแคลเซียมซัลเฟตในซีเมนต์สามารถทำปฏิกิริยาได้รวดเร็วมากในช่วง 14 วันแรก

4.5 ผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer

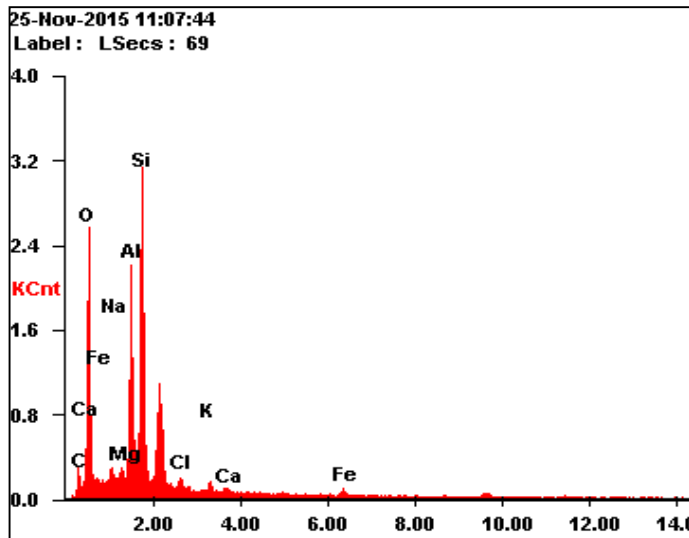
ผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer ของตัวอย่างดินตะกอนทะเลแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer

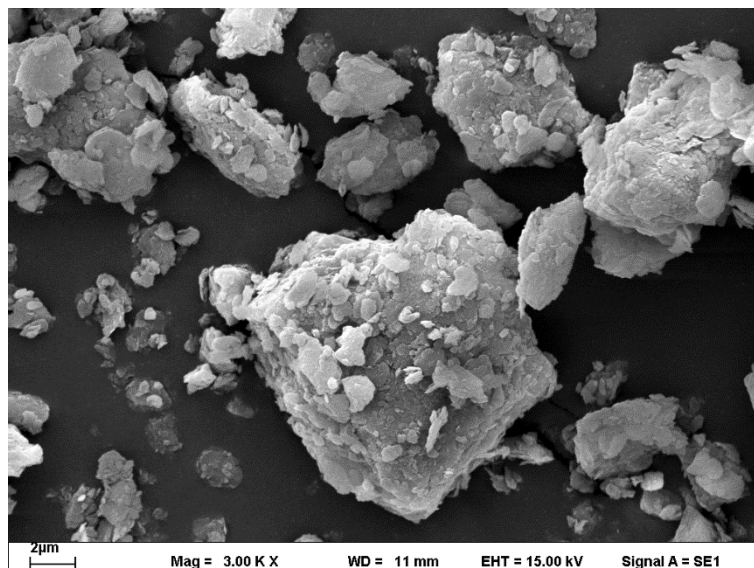
ธาตุ	ดินตะกอนทะเล (ร้อยละ)
F	0.11
Na ₂ O	2.07
MgO	1.34
Al ₂ O ₃	22.19
SiO ₂	63.56
P ₂ O ₅	0.07
SO ₃	0.25
Cl	1.68
K ₂ O	3.04
CaO	1.02
TiO ₂	0.80
V ₂ O ₅	-
Cr ₂ O ₃	0.01
MnO	0.03
Fe ₂ O ₃	3.67
NiO	0.01
CuO	-
ZnO	0.01
Ga ₂ O ₃	0.01
As ₂ O ₃	-
Rb ₂ O	0.04
SrO	0.01

ZrO ₂	0.03
BaO	0.04
PbO	0.01

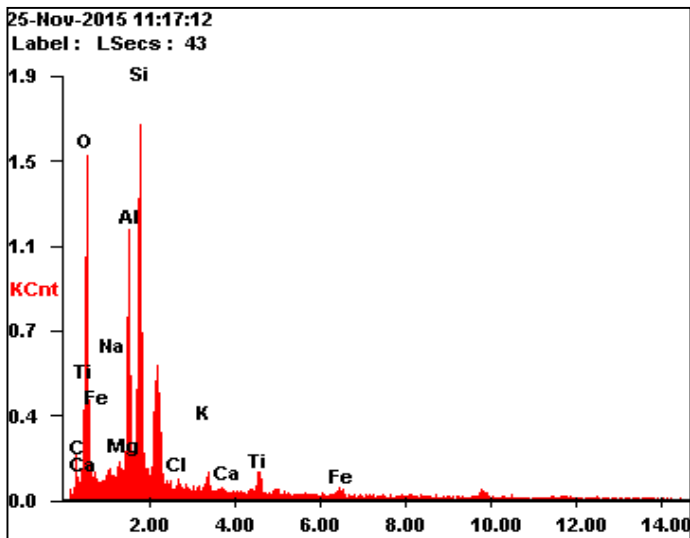
ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscopy และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM and DEX) ของดินตะกอนทะเลแสดงในรูปที่ 4.6-4.8



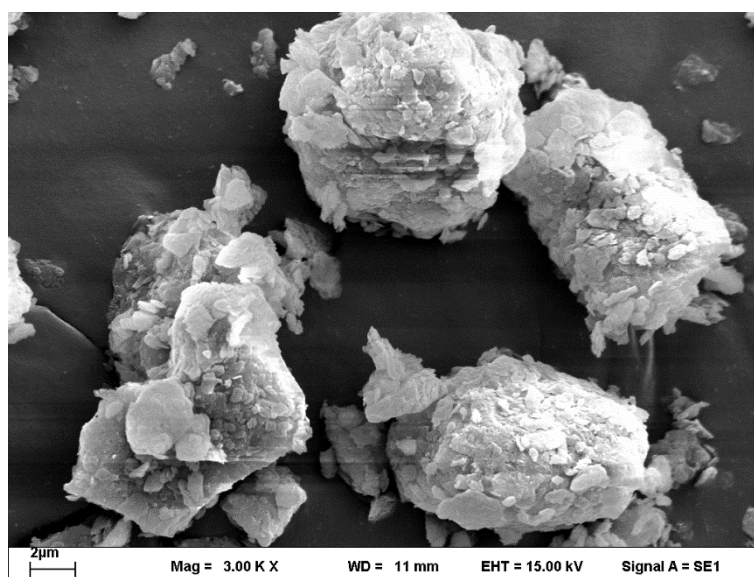
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	16.23	25.07
<i>O</i>	40.52	46.99
<i>Na</i>	01.55	01.25
<i>Mg</i>	01.01	00.77
<i>Al</i>	12.83	08.82
<i>Si</i>	22.37	14.78
<i>Cl</i>	01.29	00.67
<i>K</i>	01.17	00.55
<i>Ca</i>	00.55	00.25
<i>Fe</i>	02.50	00.83



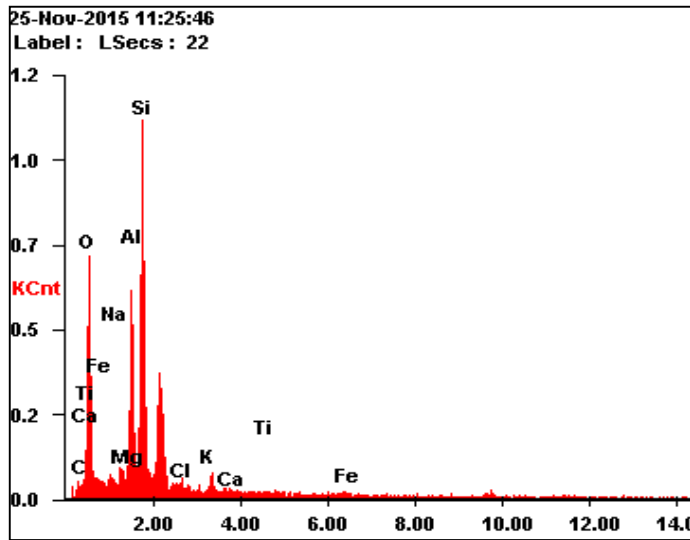
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบ SEM and DEX ของดินตะกอนทะเล (1)



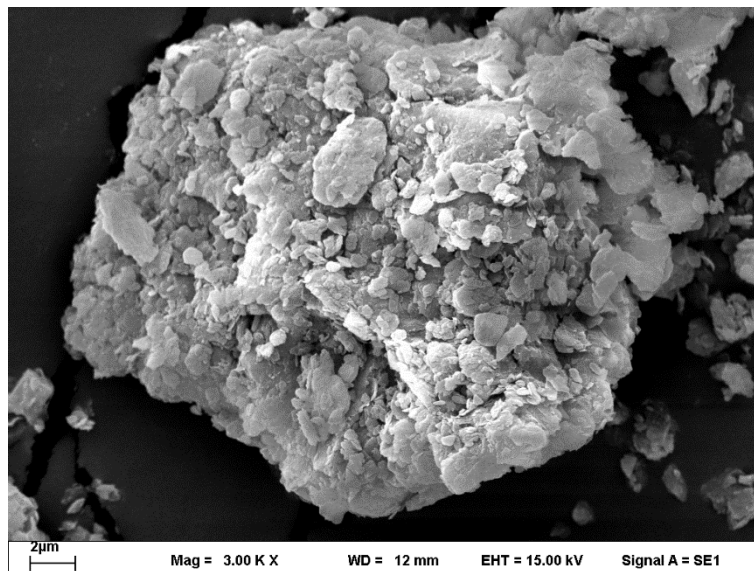
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	17.24	26.70
<i>O</i>	39.38	45.78
<i>Na</i>	02.36	01.91
<i>Mg</i>	01.79	01.37
<i>Al</i>	11.86	08.18
<i>Si</i>	19.53	12.94
<i>Cl</i>	00.55	00.29
<i>K</i>	01.47	00.70
<i>Ca</i>	00.31	00.15
<i>Ti</i>	02.94	01.14
<i>Fe</i>	02.56	00.85



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบ SEM and DEX ของดินตะกอนทะเล (2)



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	14.08	22.65
<i>O</i>	36.78	44.42
<i>Na</i>	02.61	02.19
<i>Mg</i>	02.21	01.76
<i>Al</i>	12.67	09.07
<i>Si</i>	23.83	16.39
<i>Cl</i>	01.58	00.86
<i>K</i>	02.33	01.15
<i>Ca</i>	00.75	00.36
<i>Ti</i>	00.94	00.38
<i>Fe</i>	02.22	00.77



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบ SEM and DEX ของดินตะกอนทะเล (3)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลกระทบของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลด้วยซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุในงานทาง สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ดินตะกอนทะเลจากบริเวณท่าเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรีมีค่าคุณสมบัติขีดพิกต์เหลว ขีดพิกต์พลาสติก และดัชนีพลาสติก มีค่า 67.0% 35.80% และ 31.20% 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 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีเมนต์และอายุบ่ม

5.1.4 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการบดอัดดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

5.1.5 ปริมาณความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนทะเลที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ ลดลงตั้งแต่อายุบ่ม 7 วันขึ้นไป และอัตราการลดลงของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรใช้เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินที่สามารถควบคุมอัตราเร็วที่ใช้ในการกดให้คงที่ได้สม่ำเสมอในการทดสอบ เพื่อความถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น

5.2.2 ควรศึกษาผลของสารละลายชนิดอื่นที่เจือปนในน้ำทะเลเพิ่มเติม เช่น แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น

บรรณานุกรม

ศราวุธ โกวเครือ และ ประทีป ดวงเดือน, “การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากโรงงาน (Improvement of Lateritic Soil by Calcium Carbonate Waste)”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14. สรุสมมนาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี . ระหว่างวันที่13-15 พฤษภาคม 2552

วิเศษ แจ้งจิตร และ ประทีป ดวงเดือน, “การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา (Improvement of Lateritic Soil by Bottom Ash)”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14. สรุสมมนาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. ระหว่างวันที่ 13-15 พฤษภาคม 2552

Bakharev, T. (2005), “Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions”. Cement and Concrete Research. 35, 1233-1246.

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.

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.

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.
- 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.
- 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.
- Limeira J., Agullo L. and Etxeberrir M. (2010), "Dredged marine sand on concrete: an experimental section of a harbor pavement". *Construction Build Material* 24, 863-870.
- 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.
- 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 HazardousMaterials*. 145 (1-2), 58-64.
- Maher, A., Douglas, W.S. and Jafari, F. (2006), "Field placement and evaluation of stabilization dredged material (SDM) form the New York/New Jersey Harbor". *Mar Georesour Geotechnol*. 24, 251-263.
-

- 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.
- Mitchell J.K. and E.L. Jack. (1966), "The fabric of soil-Cement and its formation". In *Proceedings 14th National Conference on Clay and Clay Minerals*. 26.
- Millrath K., Kozlova S., Sjimannovich S. and Meyer C. (2001), "Benefit use of dredged materials I and II progress report prepared for Echo Environmental^l. 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.
- Prusinski J.R. and Bhattacharja S.K. (1999), "Effectiveness of portland cement and lime instabilization clay soils". *Transportation Research Record*.
-

- 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.
- Saussaye, L., Boutouil, M., Baraud, F. and Leleyter, 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.
- 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.
- 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.
- Ulbricht J.P. (2002), "Contaminated sediments: raw materials for brick". Symposium Dredged, Dunkerque, France, October.
- 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). Mechanical behavior and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments. *Resources Conservation and Recycling* 52, 947-954.
-