



# วิทยานิพนธ์

การศึกษากลไกของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลจากการขุดลอก  
ที่ผสมปูนซีเมนต์

**IMPROVEMENT MECHANISMS OF SEABED DREDGED  
SLUDGE STABILIZED WITH CEMENT**

นายธเนศ ทองเดชศรี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษากลไกของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลจากการขุดลอกที่ผสมปูนซีเมนต์

Improvement Mechanisms of Seabed Dredged Sludge Stabilized with Cement

นามผู้วิจัย นายธนศ ทองเดชศรี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

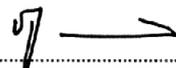
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(  รองศาสตราจารย์สุกกิจ นนทานันท์, D.Eng. )

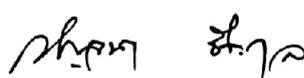
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(  อาจารย์อภินิติ โชติสังกาศ, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

(  รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(  รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 27 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษากลไกของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลจากการขุดลอกที่ผสมปูนซีเมนต์

Improvement Mechanisms of Seabed Dredged Sludge Stabilized with Cement

โดย

นายธนศ ทองเดชศรี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2551

รณศ ทองเดชศรี 2551: การศึกษากลไกของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลจากการขุดลอกที่ผสมปูนซีเมนต์ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนานันท์, D.Eng. 146 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลที่ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟูมและทราย โดยใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลโดยวิธีทางกลศาสตร์ร่วมกับทางเคมี และการทดลองหาอัตราส่วนของสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คุณสมบัติดินตามต้องการ ทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว ตลอดจนกลไกของปฏิกิริยาเคมี โดยทำการวิเคราะห์สารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ และโครงสร้างภายในของดินตะกอนซีเมนต์ ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว โดยใช้เครื่อง X - Ray Diffractometer (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ยังเน้นการศึกษาศักยภาพการนำดินตะกอนทะเลที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ตามแนวคิดทางด้านวิศวกรรมปฏิสิ่งแวดล้อม (Geo - environmental Engineering)

จากผลการศึกษาพบว่าดินตะกอนซีเมนต์ของทุกอัตราส่วนผสมจะมีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน - 14 วัน) และจะคงที่ในระยะยาว (28 วัน - 90 วัน) การทดสอบการหดตัวให้ผลเช่นเดียวกับการทดสอบกำลัง ส่วนความชื้นน้ำมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยที่อายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน - 28 วัน) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในระยะยาว (90 วัน) จากการผสมซิลิกาฟูมแทนซีเมนต์บางส่วน (5% - 15%) พบว่าการพัฒนากำลังเพิ่มมากขึ้น และการหดตัวลดลงอย่างชัดเจน ส่วนความชื้นน้ำมีแนวโน้มเช่นเดียวกับดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม นอกจากนี้ การเติมทรายละเอียด (5% - 15%) ในดินตะกอนเป็นผลทำให้ดินมีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้น และมีการหดตัวลดลงอย่างมากที่อายุการบ่มระยะสั้น และคงที่ในระยะยาว ส่วนความชื้นน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์โดย XRD พบการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารต่างๆที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา โดยสังเกตพบการลดลงของ  $C_3S$  และการเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์หลัก เช่น CSH และ Ettringite ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนากำลัง จากการวิเคราะห์ Rate of reaction พบว่าการเติมซิลิกาฟูมช่วยเร่งอัตราการทำปฏิกิริยาเคมี ส่วนการเติมทรายมีส่วนช่วยปรับปรุงโครงสร้างดินตะกอน ทำให้ w/c ratio อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเคมีและทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสสำหรับสารผลิตภัณฑ์ให้ยึดเกาะกับอนุภาคของดิน นอกจากนี้ภาพถ่าย SEM ที่อายุการบ่มต่างๆแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ร่วมกับ XRD สามารถใช้อธิบายกลไกของปฏิกิริยาเคมี ที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆของดินตะกอนซีเมนต์ได้ จากการศึกษาสรุปได้ว่าดินตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสัดส่วนผสมที่เหมาะสมมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับงานวิศวกรรมปฏิได้

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

16 / พค. / 2551

Thanet Thongdetsri 2008: Improvement Mechanisms of Seabed Dredged Sludge Stabilized with Cement. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Supakij Nontananandh, D.Eng. 146 pages.

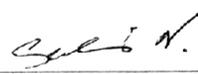
The research attempted to study improvement mechanisms of seabed dredged sludge stabilized with cement, sand and silica fume using a combination of mechanical and chemical techniques. The aim of the experiment was to optimize the amount of proper stabilizer content of mixture for sludge properties that was hope for. Another aim was also to study engineering properties of improved sludge and mechanisms of chemical reaction, and to investigate compounds and products from chemical reaction and microstructure of sludge - cement in short - term and long - term by X - Ray Diffractometer (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM). Besides, this research also investigated potential of improved sludge as construction materials with the concept of Geo - environmental Engineering.

Results of study showed that for all mixtures strengths of sludge - cement rapidly increased at short-term (3days - 14 days) but to steady state in long - term (28 days - 90 days). A similar trend is also observed for shrinkage. Permeability slightly decreased in short curing time (7 days - 28 days) but trend to slightly increase in long curing time (90 days). When cement was replaced by silica fume (5% - 15%) the strength development appear to increase markedly, and decrease shrinkage. A similar trend was observed for permeability as non silica fume mixture. Besides, additional sand in mixture (5% - 15%) results in increasing strength development and shrinkage reduction in short curing time but to steady state in long - term. Permeability also increased with curing time.

From XRD analysis result, it was found that there were changes in relative substance involved with chemical reaction, also observed decrease in  $C_3S$  and increase in CSH and Ettringite during the strength development. From the rate of reaction analysis, it was showed that additive silica fume help to accelerate chemical reaction. Another additive sand help to improve strong matrix structure of sludge - cement due to w/c ratio are optimized for better chemical reaction, and sand are nuclei for reaction products. In addition, alteration of sludge - cement structure is observed by SEM micrograph with curing time. The combination of XRD result and SEM micrograph can explain mechanisms of chemical reaction related to sludge - cement properties. It can be concluded that improved sludge with proper mixture has potential as construction material for geotechnical engineering.



Student's signature



Thesis Advisor's signature

16 / May / 2008

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ศุภกิจ นนทนันทน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความอนุเคราะห์อย่างยิ่งในการให้คำแนะนำปรึกษาสำหรับการค้นคว้าวิจัยและตรวจแก้วิทยานิพนธ์ โดยให้ความเมตตาอย่างสูงในการอบรมสั่งสอน ทั้งยังชี้แนะแนวทางสว่างในการดำเนินชีวิต อันเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยในอนาคต พร้อมกันนี้ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ก่อโชค จันทรวงกูร ประธานกรรมการสอบ รวมถึง อ.ดร.วิวัฒน์ แสงเทียน ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้ที่มีค่ายิ่ง อันจะเป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคต

พร้อมกันนี้ใคร่ขอขอบคุณ คุณสมชาย สุนันต์ขจรกุล ที่อนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่างดินตะกอนขุดลอกจากทะเลสำหรับการศึกษานี้ ขอขอบคุณ คุณศุภนิสา ขวัญบุญบำเพ็ญ ที่ให้ความอนุเคราะห์ต่อเหล็กซึ่งเป็นวัสดุของแบบหล่อดินสำหรับการทดสอบความชื้นน้ำ และขอขอบคุณ คุณชวลิต เรืองประโคน ที่ให้ความอนุเคราะห์ชิลิกาฟูมในการศึกษา นอกจากนี้ ขอขอบคุณ คณะเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนขอขอบคุณเพื่อนๆ และรุ่นพี่-รุ่นน้อง สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพีทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณประกิต แก้วเคารพ และคุณอักษรเพชร สุขสิริถาวรกุล ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนกรุณาให้ร่วมใช้ทุนสนับสนุนในการทดสอบ XRD และ SEM บางส่วน อีกทั้งขอขอบคุณเป็นพิเศษสำหรับ คุณรุจินันท์ เอื้อพิทักษ์สกุล ซึ่งคอยเป็นกำลังใจและช่วยเหลือในงานวิจัยเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ส่งเสริมและสนับสนุนทุนการศึกษาระดับมหาบัณฑิต ตลอดจนทุนสนับสนุนงานวิจัยบางส่วน รวมถึงขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อปรีชา - คุณแม่อุไรวรรณ ทองเดชศรี และคุณยายแก้ว จักรใจวงศ์ พร้อมทั้งญาติๆทุกคน ที่ได้อบรมสั่งสอนเลี้ยงดูด้วยความรักความอบอุ่นมาโดยตลอด อีกทั้งยังให้การสนับสนุนและมอบกำลังใจให้เสมอมา จนทำให้การเรียนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ชเนศ ทองเดชศรี

พฤษภาคม 2551

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	18
อุปกรณ์	18
วิธีการ	19
ผลและวิจารณ์	26
สรุปและข้อเสนอแนะ	121
สรุป	121
ข้อเสนอแนะ	123
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	124
ภาคผนวก	127
ภาคผนวก ก X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์	128
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์	134

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	11
2	ตารางการจำแนกสารชนิดต่างๆ	16
3	คุณสมบัติทางกายภาพของดินตะกอนทะเลขุดก่อนการปรับปรุงคุณภาพ	27
4	ปริมาณความหนาแน่นของแร่ดินเหนียวชนิดต่างๆในดินตะกอนทะเลขุดก่อนการปรับปรุงคุณภาพ	28
5	ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเล	30
6	ตารางสรุปอัตราส่วนผสมต่างๆของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนขุดจากทะเล	31
7	กำลังรับแรงอัดของดินตะกอนผสมซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	32
8	ค่าความชื้นน้ำเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมต่างๆที่อายุการบ่มต่างๆ	37
9	ค่าการหดตัวเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมต่างๆที่อายุการบ่มต่างๆ	42
10	กำลังรับแรงอัดของดินตะกอนผสมซีเมนต์และซิลิกาฟูมที่อายุการบ่มต่างๆ	46
11	ค่าความชื้นน้ำเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมในอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่อายุการบ่มต่างๆ	49
12	ค่าการหดตัวเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมในอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่อายุการบ่มต่างๆ	52
13	กำลังรับแรงอัดของดินตะกอนผสมซีเมนต์และทรายที่อายุการบ่มต่างๆ	54
14	ค่าความชื้นน้ำเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายในอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่อายุการบ่มต่างๆ	58
15	ค่าการหดตัวเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายในอัตราส่วนผสมต่างๆที่อายุการบ่มต่างๆ	60

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	กำลังรับแรงอัด ปริมาณสารตั้งต้น $C_3S$ และสารผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาเคมีของดินตะกอนซีเมนต์ สำหรับ Mix-1, Mix-2 และ Mix-3 ที่ความชื้นในดินก่อนผสม 109% ที่อายุการบ่มต่างๆ	65
17	กำลังรับแรงอัด ปริมาณสารตั้งต้น $C_3S$ และสารผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาเคมีของดินตะกอนซีเมนต์ สำหรับ Mix-4, Mix-5 และ Mix-6 ที่ความชื้นในดินก่อนผสม 138% ที่อายุการบ่มต่างๆ	66
18	กำลังรับแรงอัด ปริมาณสารตั้งต้น $C_3S$ และสารผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาเคมีของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม Mix-5, Mix-7, Mix-8 และ Mix-9 ที่อายุการบ่มต่างๆ	75
19	กำลังรับแรงอัด ปริมาณสารตั้งต้น $C_3S$ และสารผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาเคมีของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-2 และ Mix 10 ที่อายุการบ่มต่างๆ	80
20	อัตราการทำปฏิกิริยาของ $C_3S$ ตามวันหลังจากการผสม	85

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แบบจำลองการทำงานของเครื่องมือลดปริมาณน้ำในมวลดิน	9
2	การลดปริมาณน้ำในดินบนเรือขุดลอก	10
3	การลดปริมาณน้ำในดินโดยใช้แรงดันในห้องปฏิบัติการ	10
4	ปฏิกิริยาเคมีระหว่างดินและสารเชื่อมประสานที่ทำให้เกิดความแข็งแรง	12
5	การเปรียบเทียบระหว่างการพัฒนากำลังกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา $C_3S$ ที่ปริมาณสารปรับปรุง 6%	13
6	การเปรียบเทียบระหว่างการพัฒนากำลังกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา $C_3S$ ที่ปริมาณสารปรับปรุง 9%	13
7	แสดงแบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ $C_3S$ ในการปรับปรุงด้วยผงกากโลหะมีความสัมพันธ์กับกำลัง	14
8	กราฟแสดงรูปแบบ X-ray Diffraction ของตัวอย่างดินที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ $200 \text{ kg/m}^3$ ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน	15
9	ภาพของสารผลิตภัณฑ์จากการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน โดย SEM	17
10	ภาพของสารผลิตภัณฑ์จากการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน โดย SEM	17
11	แสดงขั้นตอนการวิจัย	19
12	การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับทดสอบ	21
13	การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม	23
14	ผลการทดสอบ XRD ของดินตะกอนทะเลตามธรรมชาติ	28
15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 109% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	34
16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	34

### สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	35
18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นน้ำกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 109% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	37
19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นน้ำกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	38
20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นน้ำกับปริมาณซีเมนต์ของดินตะกอนซีเมนต์ที่มีความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 109% ที่อายุการบ่มต่างๆ	40
21	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นน้ำกับปริมาณซีเมนต์ของดินตะกอนซีเมนต์ที่มีความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ที่อายุการบ่มต่างๆ	40
22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำกับ w/c ratio ของดินตะกอนซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	41
23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง การหดตัวกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 109% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	43
24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	43
25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับปริมาณซีเมนต์ของดินตะกอนซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	44
26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง การหดตัวกับ w/c ratio ของดินตะกอนซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	44
27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่มตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	47
28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณซิลิกาฟุ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่มที่อายุการบ่มต่างๆ	48

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นน้ำกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสม ซิลิกาฟุ่มตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	50
30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำกับปริมาณซิลิกาฟุ่มของดินตะกอนซีเมนต์ ผสมซิลิกาฟุ่มที่อายุการบ่มต่างๆ	51
31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ ผสมซิลิกาฟุ่ม ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	53
32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับปริมาณซิลิกาฟุ่มของดินตะกอนซีเมนต์ ผสมซิลิกาฟุ่มที่อายุการบ่มต่างๆ	53
33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับอายุการบ่ม ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	55
34	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณทราย ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย ที่อายุการบ่มต่างๆ	56
35	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสม ทรายตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	58
36	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นน้ำกับปริมาณทรายของดินตะกอนซีเมนต์ ผสมทรายที่อายุการบ่มต่างๆ	59
37	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสม ทรายตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	61
38	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับปริมาณทรายของดินตะกอนซีเมนต์ผสม ทรายที่อายุการบ่มต่างๆ	61
39	เครื่องทดสอบ X-ray Diffraction (XRD) และอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง	62
40	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-3 จากการทดสอบ XRD	64
41	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-4 จากการทดสอบ XRD	64
42	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้น $C_3S$ กับอายุการบ่มของดินตะกอน ซีเมนต์สำหรับทุกอัตราส่วนผสม	67

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
43	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้น $C_3S$ กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นก่อนผสม 109%	68
44	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้น $C_3S$ กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นก่อนผสม 138%	68
45	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์รวมทุกอัตราส่วนผสม	69
46	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ รวมทุกอัตราส่วนผสม	70
47	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 109% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	71
48	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 109% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	71
49	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	73
50	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ	73
51	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม Mix-8 จากการทดสอบ XRD	74
52	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้น $C_3S$ กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนผสมต่างๆ	76
53	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม	78
54	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม	78

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
55	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-10 จากการทดสอบ XRD	79
56	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้น $C_3S$ กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย	81
57	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย	83
58	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย	83
59	กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดและอัตราการทำปฏิกิริยาของ $C_3S$ กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นก่อนผสม 109%	86
60	กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดและอัตราการทำปฏิกิริยาของ $C_3S$ กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นก่อนผสม 138%	87
61	กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดและอัตราการทำปฏิกิริยาของ $C_3S$ กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม	88
62	กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดและอัตราการทำปฏิกิริยาของ $C_3S$ กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย	89
63	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite	91
64	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH	92
65	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite	92
66	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH ตาม w/c ratio ของดินตะกอนซีเมนต์	93

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
67	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณสารผลึกภักดิ์ Ettringite ตาม w/c ratio ของดินตะกอนซีเมนต์	94
68	เครื่องทดสอบ Scanning Electron Microscope	95
69	ภาพการทดสอบSEMของดินตะกอนทะเลก่อนและหลังการลดปริมาณน้ำด้วยวิธีทางกลตามความชื้นในดินต่างๆ	97
70	ภาพการทดสอบSEMของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	98
71	ภาพการทดสอบSEMของชิลิกาฟูม	99
72	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1	102
73	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-2	103
74	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-3	104
75	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-4	107
76	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-5	108
77	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-6	109
78	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมชิลิกาฟูม Mix-7	112
79	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมชิลิกาฟูม Mix-8	113
80	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมชิลิกาฟูม Mix-9	114
81	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-10	117
82	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-11	118
83	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-12	119
<b>ภาพผนวกที่</b>		
ก1	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1 จากการทดสอบ XRD	129
ก2	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-2 จากการทดสอบ XRD	129
ก3	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-3 จากการทดสอบ XRD	130

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก4	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-4 จากการทดสอบ XRD	130
ก5	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-5 จากการทดสอบ XRD	131
ก6	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-6 จากการทดสอบ XRD	131
ก7	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม Mix-7 จากการทดสอบ XRD	132
ก8	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม Mix-8 จากการทดสอบ XRD	132
ก9	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม Mix-9 จากการทดสอบ XRD	133
ก10	X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-10 จากการทดสอบ XRD	133
ข1	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1 ที่อายุการบ่มต่างๆ	135
ข2	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-2 ที่อายุการบ่มต่างๆ	136
ข3	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-3 ที่อายุการบ่มต่างๆ	137
ข4	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-4 ที่อายุการบ่มต่างๆ	138
ข5	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-5 ที่อายุการบ่มต่างๆ	139
ข6	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-6 ที่อายุการบ่มต่างๆ	140
ข7	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม Mix-7 ที่อายุการบ่มต่างๆ	141
ข8	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม Mix-8 ที่อายุการบ่มต่างๆ	142
ข9	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม Mix-9 ที่อายุการบ่มต่างๆ	143
ข10	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-10 ที่อายุการบ่มต่างๆ	144
ข11	ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-11 ที่อายุการบ่มต่างๆ	145

**สารบัญญภาพ (ต่อ)**

**ภาพผนวกที่**

**หน้า**

ข12 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-12 ที่อายุการบ่มต่างๆ 146

## การศึกษากลไกของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลจากการขุดลอกที่ผสม ปูนซีเมนต์

### Improvement Mechanisms of Seabed Dredged Sludge Stabilized with Cement

#### คำนำ

ปัจจุบันเศรษฐกิจของประเทศไทยเจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความต้องการในการขนส่งสินค้ามีมากขึ้น โดยเฉพาะการขนส่งทางทะเล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาร่องน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้การเดินเรือขนส่งสินค้ามีความปลอดภัยและสะดวก

เรือสินค้าและเรือประเภทต่างๆ ที่ใช้เส้นทางเดินเรือเข้ามาบริเวณอ่าวไทย ที่จะเข้ามาในแม่น้ำเจ้าพระยา จะนำเรือผ่านร่องน้ำสันดอนเจ้าพระยา ซึ่งแต่เดิมร่องน้ำนี้ถูกออกแบบให้มีความกว้าง 100 เมตร ในทางตรง และ 200 เมตร ในทางโค้ง โดยมีความลึก - 8.5 เมตร (รทก.) รวมความยาว 19 กิโลเมตร และอีกร่องน้ำมีความกว้าง 100 เมตร ความลึก - 5.5 เมตร (รทก.) ความยาว 16 กิโลเมตร จากนั้นมีการปรับปรุงและขยายความกว้างของร่องน้ำนี้โดยเพิ่มความกว้างเป็น 150 เมตร (การทำเรือแห่งประเทศไทย, 2542) ซึ่งจะเห็นได้ว่าร่องน้ำดังกล่าวถูกพัฒนาให้สามารถรองรับความต้องการการใช้ร่องน้ำเพื่อการเดินเรือมากขึ้น นอกจากนี้ยังต้องมีการขุดลอกดิน เพื่อรักษาร่องน้ำให้อยู่ในสภาพใช้งานได้เสมอ เนื่องจากกระแสน้ำจะพัดพาให้ดินตะกอนในร่องน้ำ ทำให้อ่างน้ำตื้นเขิน เป็นอุปสรรคต่อการเดินเรือ

การขุดลอกพื้นที่ เพื่อจัดทำแนวร่องน้ำเข้าท่าเรือ มี 2 ขั้นตอน ในการเคลื่อนย้ายดินตะกอนจากพื้นที่ร่องน้ำ โดยเรือขุดแล้วดูดตะกอนขึ้นมาเก็บไว้ในเรือ และการทิ้งดินตะกอนทะเลซึ่งทั้ง 2 ขั้นตอนที่ก่อให้เกิดการเพิ่มปริมาณตะกอนและสารแขวนลอยในน้ำ การเพิ่มความขุ่นของน้ำ การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ร่องน้ำ ในกรณีทิ้งดินตะกอนในทะเล จะเกิดการทับถมของดินตะกอน หากกรณีทิ้งดินตะกอนบริเวณชายฝั่ง อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะอุทกวิทยาของพื้นที่ เช่น ทิศทางการไหลของน้ำบนผิวดิน และการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมุทรศาสตร์ชายฝั่ง การฟุ้งกระจายของสารอาหารและสารเป็นพิษ การเปลี่ยนแปลงปริมาณของพืชและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่บนท้องน้ำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพธรรมชาติของสิ่งแวดล้อมที่กล่าวมาข้างต้น จะมีความรุนแรงจนก่อให้เกิดผล กระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมมากเพียงใด ขึ้นอยู่กับระดับของการเปลี่ยนแปลง สถานภาพ และความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรสิ่งแวดล้อมก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นประเด็นหลัก ได้แก่ ผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ ระบบนิเวศน์ของสิ่งมีชีวิตในน้ำ การประมง การท่องเที่ยว เป็นต้น

สำหรับประเทศไทยกรณีศึกษาที่มีการขุดลอกตะกอนในงานก่อสร้าง ยกตัวอย่างเป็นกรณีศึกษาไว้โดย วรากร เมื่อพ.ศ.2540 เป็นกรณีของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ต่อเรือแหลมฉบัง ที่ใช้ตะกอนขุดลอกจากบริเวณพื้นที่ท่าเรือ เป็นพื้นที่รวมถึง 100 เอเคอร์ รวมปริมาณการขุดลอกมากถึง 1,500,000 ลูกบาศก์เมตร

นอกจากนั้นในประเทศไทยได้มีการขุดลอกดิน โดยกรมการขนส่งทางน้ำและพาณิชยนาวี (2548) เพื่อรักษาร่องน้ำ 81 ร่องน้ำในปีงบประมาณ 2548 เป็นปริมาณถึง 8,339,692 ลูกบาศก์เมตร ในการขุดลอกลำน้ำสำหรับเส้นทางเดินเรือ ปริมาณดินตะกอนที่มากดังกล่าวอาจจะก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้หากมีการจัดการที่ไม่เหมาะสม ในประเทศต่างๆ ได้มีนักวิจัยหลายกลุ่ม เช่น US Army Corps of Engineer (1987) , Tresselt et al. (1998), Nontananandh et al. (2004) ได้เสนอแนวคิดทางด้านวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อม (Geo - environmental Engineering) โดยการนำของเสีย เช่น แก๊สลอยลิกไนต์ หรือตะกอนที่ขุดจากทะเลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ใหม่ นอกจากจะเป็นการแก้ปัญหาอันจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังสามารถใช้เป็นแหล่งวัสดุทางเลือกอีกทางหนึ่งสำหรับงานก่อสร้างอีกด้วย

เนื่องจากตะกอนเป็นดินที่ขุดลอกมาจากใต้ทะเลจึงจัดได้ว่าเป็นดินอ่อนมาก โดยส่วนใหญ่พบว่าปริมาณน้ำในมวลดินมาก บางแห่งอาจมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติมากถึง 200% - 300% มีกำลังที่ต่ำมาก อีกทั้งยังมีการหดตัวสูง จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติให้ได้ตามเกณฑ์ก่อนที่จะนำไปใช้งาน ดังที่เสนอโดย Kamon and Nontananandh (1990)

ในปัจจุบันการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยการใช้ซีเมนต์เป็นเทคนิคที่ยอมรับกันโดยแพร่หลายว่าสามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน ให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเหมาะกับการนำไปใช้งาน ดังจะเห็นได้จากการก่อสร้างในงานต่างๆ เช่น การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ (Soil-Cement Column) ด้วยวิธี Deep Mixing Method ในงานก่อสร้างถนนและ

งานขุดคลองระบายน้ำบนดินอ่อนหรือการก่อสร้างกำแพงกันดิน (Diaphragm wall) โดยใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ด้วยวิธี Jet Grouting Method หรือการผสมดิน-ซีเมนต์แล้วทำการบดอัดในงานบ่อฝังกลบขยะ เป็นต้น โดยวิธีต่างๆจะถูกนำไปเลือกใช้ให้เหมาะสม เพื่อให้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการในแต่ละงาน

ในประเทศไทย ได้ใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์มาหลายทศวรรษ แต่การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนก็ยังถือว่าเป็นเรื่องใหม่ โดยจากงานวิจัยที่ศึกษาร่วมกับประกิต (2549) พบว่าการผสมซีเมนต์กับดินตะกอน จะทำให้กำลังของดินตะกอนเพิ่มขึ้น ส่วนความสามารถในการซึมน้ำและการหดตัวจะลดลงตามปริมาณซีเมนต์ที่ผสมและอายุการบ่ม อย่างไรก็ตามกลไกที่ดินตะกอนมีการพัฒนากำลัง ตลอดจนคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่นๆที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการใช้เทคนิคนี้มาปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนเป็นหัวข้องานวิจัยใหม่ ยังคงต้องการการค้นหาคำตอบต่อไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนและการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานทำการปรับปรุงคุณภาพโดยจะเลือกอัตราส่วนผสมของสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม ตลอดจนศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่สำคัญ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ความซึมน้ำและการหดตัว โดยเน้นการวิเคราะห์คุณสมบัติดังกล่าวทั้งในระยะสั้นและระยะยาว นอกจากนี้งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาโครงสร้างและสารผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของดินตะกอนผสมซีเมนต์ โดยการประยุกต์ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) และ X – ray Diffractometer (XRD) เพื่ออธิบายถึงกลไกของการเกิดปฏิกิริยาจากการปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งเชื่อว่าความเข้าใจในกลไกการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์อย่างลึกซึ้ง จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับการนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้ดียิ่งขึ้น

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินตะกอนทะเลจากการขุดลอกและการนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้าง ตามแนวความคิดทางด้านวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อม (Geo - environmental Engineering)
2. เพื่อยืนยันเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนที่ขุดลอกจากทะเล โดยวิธีทางกลและทางเคมี
3. เพื่อเลือกอัตราส่วนผสมของสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมมาทำการปรับปรุงคุณภาพดิน ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด
4. เพื่อศึกษากลไกของการปรับปรุงดินตะกอนทะเลจากการขุดลอก ในด้านการพัฒนากำลังและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมอื่นๆ เช่น ความชื้นน้ำ โดยเน้นการวิเคราะห์คุณสมบัติดังกล่าวทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

## ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาและยืนยันเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนด้วยวิธีทางกลและทางเคมี โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานหลัก และใช้ทราย และซิลิกาฟูม เป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงโครงสร้างดิน สำหรับดินตะกอนที่ใช้ในการศึกษานี้ทำการเก็บตัวอย่างจากการขุดลอกร่องน้ำเข้าท่าเรือกรุงเทพ ร่องที่ 2 จ.สมุทรปราการ ในช่วงระหว่างเดือนตุลาคม 2548 และพฤษภาคม 2549
2. ศึกษาและวิเคราะห์กลไกการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอน โดยใช้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) และ X - ray Diffractometer (XRD) ร่วมกับผลจากการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ กำลังอัด ความชื้นน้ำ และการหดตัว โดยเน้นการวิเคราะห์กลไกดังกล่าวทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

## การตรวจเอกสาร

### 1. ตะกอนจากการขุดลอกร่องน้ำ (Dredged Materials)

Kamon and Nontananandh (1990) ได้สำรวจดินตะกอนจากอ่าวโอซากาหรือที่เป็นที่รู้จักกันดีโดยทั่วไปคือ ดินตะกอน (Hedoro) ในญี่ปุ่น ที่มีความชื้นตามธรรมชาติประมาณ 200 - 300% และอาจจะถึง 400 - 500% สำหรับชั้นตะกอนส่วนบน จากการสังเกตด้วยสายตาพบว่า มีสีเทาเข้ม มีซากเศษเปลือกหอยปะปนอยู่ และมีกลิ่นของซากสิ่งมีชีวิต มีคุณสมบัติการหดตัวสูงซึ่งส่งผลกระทบต่อในเรื่องการเปลี่ยนแปลงปริมาตร หลังจากการจำแนกดินด้วยวิธี USCS แล้วพบว่าจัดอยู่ในกลุ่มดินเหนียวปนสารอินทรีย์ (OH) ที่มีความเป็นพลาสติกสูง โดยมีขีดจำกัดของเหลว (Liquid limit, LL) 110.6% ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) 35.6% ความชื้นในมวลดินเริ่มต้น ( $w_p$ %) อยู่ในช่วง 100% - 110% และมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, Gs) เท่ากับ 2.739

Nontananandh (1990) พบว่าคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของตะกอนจากการขุดลอกจาก Hedoro มีเปลี่ยนแปลงไปตามแร่ดินเหนียว (Clay Minerals) ที่ประกอบอยู่ในตะกอนจากการขุดลอกและตำแหน่งของการขุดลอก ผลจากการศึกษาด้วยการวิเคราะห์ XRD แสดงให้เห็นว่า แร่ที่พบในตะกอนจากการขุดลอกจากทะเลสาบ Hedoro ประกอบด้วย Quartz, Feldspar และสารประกอบในแร่ดินเหนียว ได้แก่ Montmorillonite, Kaolinite, Halloysite และ Amorphous

จากการศึกษาการขุดลอกจากทะเลสาบ Kasumigaura ซึ่งมีปริมาณการตกตะกอนประมาณ 6 มม. ต่อปี ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและอากาศโดยตะกอนจะก่อให้เกิดก๊าซพิษกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตะกอนจากการขุดลอกยังสามารถส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอีกหากไม่มีการจัดพื้นที่ทิ้งตะกอนอย่างเหมาะสม องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของตะกอนจากการขุดลอกในทะเลสาบ Kasumigaura เป็นวัสดุที่ไม่เป็นอันตรายและมีศักยภาพที่จะใช้เป็นวัสดุทางวิศวกรรมปฐพี โดยการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีด้วยซีเมนต์อย่างเหมาะสม (Nontananandh, 1990 อ้างถึง Japan Institute of Construction Engineering, 1988)

## 2. การแก้ปัญหาของดินตะกอนโดยคำนึงถึงแนวความคิดทางด้านวิศวกรรมปฏิสิ่งแวดล้อม (Geo-environmental Engineering)

ปัจจุบันความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทำให้เกิดความเจริญในการพัฒนาประเทศ ในด้านต่างๆ หากทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงถูกใช้ไปอย่างขาดความเอาใจใส่และความรับผิดชอบเท่าที่ควร จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา ซึ่งปัญหาสิ่งแวดล้อมก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่สำคัญ ดังจะสังเกตเห็นประเทศต่างๆ ในระดับแนวหน้าของโลกเคยประสบปัญหา และเริ่มตระหนักในการให้ความเอาใจใส่ด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ตะกอนจากการขุดลอกก็เป็นเรื่องที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรงหากไม่มีการจัดการที่ดีพอ ในมุมมองกลับกัน การนำของเสียกลับมาสร้างประโยชน์ใหม่ เป็นการแสวงหาแหล่งวัสดุทางเลือกอีกทางหนึ่งสำหรับงานก่อสร้าง ดังในตัวอย่างที่จะกล่าวต่อไป

ในสหรัฐอเมริกา US Army Corps of Engineer (1987) ได้กล่าวถึงการใช้ประโยชน์ของดินตะกอนจากการขุดลอกว่า มีสถานที่ก่อสร้างมากกว่า 1,300 แห่ง ในอเมริกาเหนือ มีการใช้ประโยชน์จากตะกอนจากการขุดลอก ได้แก่ การพัฒนาที่อยู่อาศัย การบำรุงรักษาชายหาด สวนสาธารณะหรือสถานที่พักผ่อนหย่อนใจ การเพาะปลูก ป่าไม้ การจัดการขยะ การปรับปรุงแนวชายฝั่ง การควบคุมการกัดเซาะ เป็นต้น การนำเอาดินตะกอนดังกล่าวมาใช้ในงานก่อสร้างนั้น มีหลายพื้นที่ที่มีประโยชน์ทางด้านระบบนิเวศ เนื่องจากความจำเป็นในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในพื้นที่นั้นและเป็นการทดแทนสถานที่ในการทิ้งดินตะกอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานที่ทิ้งดินตะกอนในแหล่งน้ำเปิด เป็นการเพิ่มคุณค่าของชายฝั่งทะเลและพื้นที่ทางน้ำ แนวความคิดทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมจึงมีผลต่อการเลือกนำดินตะกอนมาใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้าง ดังนั้นดินตะกอนจากการขุดลอกนี้จึงถือเป็นแหล่งดินที่มีคุณค่า ที่จะเป็นอีกทางเลือกสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง

ประเทศนอร์เวย์เป็นอีกประเทศหนึ่งที่ประสบกับปัญหามลพิษในชายฝั่งทะเล ซึ่งเป็นปัญหาหลักทางสิ่งแวดล้อม ในปี 2003 ชายฝั่ง Trondheim ใช้งบประมาณถึง 56 ล้านบาท ในการปรับปรุงดินตะกอนไม่บริสุทธิ์ 5 แสนลูกบาศก์เมตร ให้สะอาดและมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยดินตะกอนจากการขุดลอกจะถูกผสมกับซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อขนย้ายไปยังเขื่อนกันคลื่น และมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำดินตะกอนนี้มาใช้เป็นแหล่งวัสดุในการสร้างพื้นที่แผ่นดินใหม่ได้ (Experts in Team, 2004)

ในเยอรมนี Tresselt et al. (1998) ได้มีความพยายามในการศึกษาการนำเอาดินตะกอนท่าเรือมาใช้เป็นวัสดุกันซึมปกคลุมในงานบ่อฝังกลบขยะ โดยใช้ดินตะกอนจากท่าเรือของเมืองฮัมบวร์ค ประเทศเยอรมนี มาปรับปรุงคุณภาพและเก็บในที่น้ำท่วมไม่ถึง เพื่อนำไปปกคลุมบ่อฝังกลบขยะเหนือบนชั้นทรายระบายน้ำ ซึ่งผลการสำรวจในสนามเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านชลศาสตร์ ในเรื่องดุลยภาพของน้ำ (water balance) และคุณภาพของน้ำ จากวัสดุที่ปกคลุมบ่อฝังกลบขยะที่ Francop ในเมืองฮัมบวร์ค พบว่าระบบที่ใช้ในการปกคลุมบ่อฝังกลบขยะ รวมถึงดินตะกอนที่ใช้กันซึมของน้ำมีประสิทธิภาพสามารถควบคุมการไหลซึมได้

### 3. การปรับปรุงคุณภาพดิน

Hausmann (1990) กล่าวว่าในการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อใช้เป็นฐานรากหรือวัสดุทางวิศวกรรมปฐพีนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินทางวิศวกรรมดังนี้

1. เพิ่มความสามารถในการรับกำลัง
2. ลดการเสีรูปร่าง (Distortion) ภายใต้ความเครียด (เพิ่ม Stress-Strain Modulus)
3. ลดความสามารถในการยุบตัว (Compressibility)
4. ควบคุมการเกิดการหดตัวและบวมตัว
5. ควบคุมความชื้นน้ำ
6. ป้องกันความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมีซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม (Freezing/Thawing, Wetting/Drying)
7. ลดการเกิด Liquefaction
8. ลดความแปรปรวนของดินที่นำมาใช้

ในการปรับปรุงคุณภาพดินสามารถแบ่งเทคนิคในการปรับปรุงคุณภาพดินออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

1. เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินเชิงกล (Mechanical Modification) เป็นการเพิ่มความหนาแน่น (Soil Density) ด้วยการใช้แรงกระทำหรือการบดอัด (Compaction) เพื่อลดปริมาตรของช่องว่างของอากาศในมวลดิน โดยปริมาตรของเนื้อดินและความชื้นยังคงเดิม

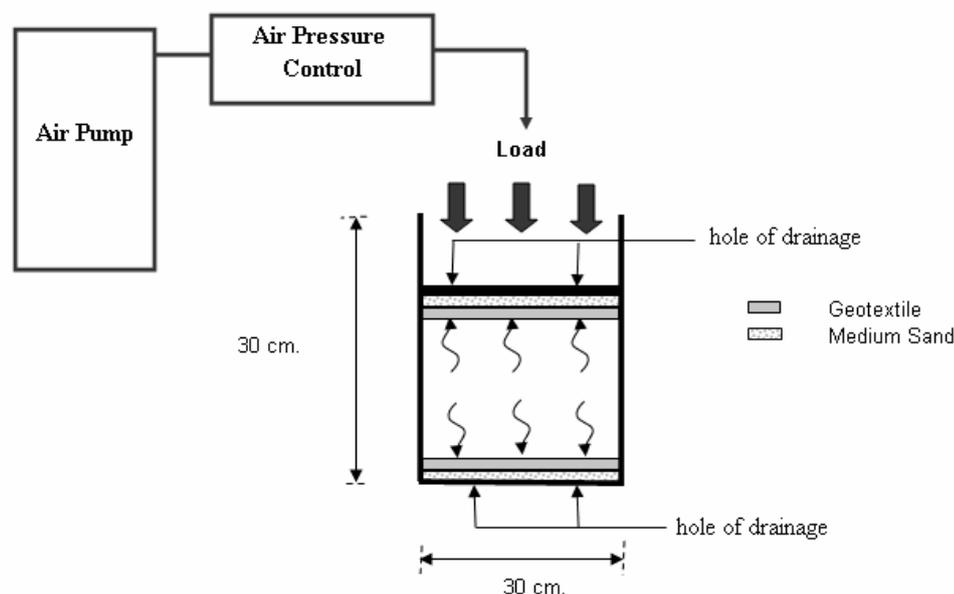
2. เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินวิธีทางไฮดรอลิก (Hydraulic Modification) เป็นการนำน้ำออกจากมวลดิน (Dewatering) สำหรับมวลดินละเอียด การระบายน้ำออกทำได้ช้า ดังนั้นจึง Dewatering โดยการ Consolidation หรือ ใช้ Preload ช่วยเร่งกระบวนการ

3. เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินเชิงกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Modification) เป็นการใช้สารผสมเพิ่ม หรือ วัสดุผสม (Additive) เช่น กากจากอุตสาหกรรม (Industrial By-Products) วัสดุเหลือทิ้ง (Waste Materials) เม็ดกรวดทราย (Granular Materials) สารประเภทซีเมนต์ (Cementitious Materials) และ สารเคมีอื่นๆ เพื่อปฏิกิริยากับดิน หรืออาจจะเป็นการฉีดน้ำปูนลงไปดิน (Grouting) รวมถึงการให้ความร้อนหรือความเย็นเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบในดิน

4. เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเสริมกำลัง (Modification by inclusions and confinement) เป็นปรับปรุงเสถียรภาพโดยการเสริมกำลังรับแรงดึงให้ดินด้วยการใช้เส้นใย (Fiber) ตาข่าย (Mesh) การยึด (Nailing and Anchor) และการสร้างกำแพงกันดิน (Retaining) ซึ่งเป็นการเสริมแรงด้านข้าง (Confinement) ให้ลาดดิน

### 3.1. การปรับปรุงคุณสมบัติของดินตะกอนโดยวิธีทางกล (Mechanical Modification)

Suksiritawonkul (2007) ได้ทำการปรับปรุงดินตะกอนทะเลเพื่อเป็นวัสดุในการก่อสร้าง โดยเน้นไปเป็นวัสดุการทาง ได้ทำการประดิษฐ์เครื่องมือลดปริมาณน้ำในดินโดยใช้แรงดัน ดังภาพที่ 1 ซึ่งจากดินที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูงมากถึง 190% - 300% จนลดปริมาณน้ำลงเหลือ 180%, 160% และ 140% ตามลำดับ โดยทดลองผสมกับซีเมนต์ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 150, 175, 200, 225 และ 250 kg/m<sup>3</sup> พบว่าจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแล้วได้ส่วนผสมที่ใกล้เคียงกับข้อกำหนดในการออกแบบถนนของกรมทางหลวง คือปริมาณน้ำในมวลดิน 160% และปริมาณปูนซีเมนต์ 200 kg/m<sup>3</sup> จากนั้นได้ทำการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเติมทรายละเอียด เพื่อปรับรูปร่างขนาดและเพิ่มความหนาแน่น ให้ดินมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น โดยได้ทดลองเติมทรายที่ปริมาณ 20% และ 40% โดยน้ำหนัก หลังจากการทดสอบด้านกำลังแล้วพบว่าที่ปริมาณทราย 20% มีความเหมาะสมที่จะนำมาปรับปรุงโครงสร้างของดินตะกอนทะเลเพื่อเป็นวัสดุในการก่อสร้างทาง



ภาพที่ 1 แบบจำลองการทำงานของเครื่องมือลดปริมาณน้ำในมวลดิน

ที่มา: Suksiritawonkul (2007)

จากศึกษาวิจัยร่วมกับ Kaewkaorop (2007) ในเบื้องต้นจะทำการเก็บตัวอย่างดินตะกอนที่ขุดลอกเก็บมาด้วยเรือขุดลอก ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างดินตะกอนจากทะเลจากเรือขุดลอกบริเวณอ่าวไทย จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นดินที่มีปริมาณความชื้นในดินสูงมากถึง 200% - 300% ได้ตัวอย่างดินแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample) โดยใช้ถังมีชั้นทรายระบายน้ำใส่ดินตะกอนแล้วใช้น้ำหนักกดทับเพื่อทำการลดปริมาณน้ำลงบางส่วนบนเรือขุดลอก แสดงดังภาพที่ 2 เนื่องจากตัวอย่างดินตะกอนที่เก็บมาใหม่ๆจะมีน้ำเป็นส่วนประกอบค่อนข้างมาก จนปริมาณความชื้นในดินลดลงเหลือประมาณ 150% - 190% จากนั้นก็จะทำการลดปริมาณน้ำส่วนเกินลง (Dewatering) ในห้องทดลองด้วยวิธีทางกล แสดงดังภาพที่ 3 โดยใช้แรงดันกดประมาณ  $0.168 \text{ kg/cm}^2$  บีบให้น้ำระบายออกจากมวลดินผ่านชั้นทราย ให้ได้ปริมาณน้ำในมวลดินที่ต้องการจะทำการทดสอบจากการทดลองทำการทดสอบลดน้ำสามารถลดปริมาณความชื้นในดินลงได้เท่ากับ 138% และ 109% ตามลำดับ ต่อมาได้ทำการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงวัสดุเป็นชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบขยะ



**ภาพที่ 2** การลดปริมาณน้ำในดินบนเรือขุดลอกในสนาม  
ที่มา: Kaewkaorop (2007)



**ภาพที่ 3** การลดปริมาณน้ำในดินโดยใช้แรงดันในห้องปฏิบัติการ  
ที่มา: Kaewkaorop (2007)

### 3.2. การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนโดยวิธีทางเคมี (Chemical Stabilization)

จากการทดลองในเบื้องต้น ดินตะกอนทะเลที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูม ในอัตราส่วนผสมต่างๆที่ปริมาณความชื้นของดินก่อนผสม 138% ผสมด้วยปูนซีเมนต์ 150, 200 และ 250 kg/m<sup>3</sup> และที่ปริมาณความชื้นของดินก่อนผสม 108% ผสมด้วยปูนซีเมนต์ 100, 125 และ 150 kg/m<sup>3</sup> โดยบ่มเก็บไว้เป็นระยะเวลา 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ก่อนนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่ากำลังของดินที่ปรับความชื้นและผสมปูนซีเมนต์สามารถพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นน้ำของดินยังมีค่าลดลงตามอายุการบ่ม เมื่อใช้สัดส่วนผสมของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) อยู่ในช่วง 5.5 - 6.5

#### 4. กลไกการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์

มีนักวิจัยหลายท่านได้ให้ความสนใจและศึกษาปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เนื่องจากเป็นหัวใจสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี โดยเทคโนโลยีของการปรับปรุงด้วยวิธีนี้ถูกพัฒนาไปกับเทคโนโลยีของคอนกรีตสมัยใหม่ ซึ่งมีการพยายามปรับปรุงโดยใช้วัสดุต่างๆมาทดแทนปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้ อีกทั้งอาจยังต้องการคุณสมบัติเพิ่มเติมอีกบางประการให้ดีขึ้น เช่น กำลัง ความชื้นน้ำ การหดตัว การยุบตัว เป็นต้น ดังนั้น นักวิจัยหลายท่านจึงพยายามค้นหาคำตอบในการอธิบายถึงพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาในการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ เพื่อความเข้าใจและเป็นแนวทางในการออกแบบให้ดินที่ปรับปรุงคุณภาพมีคุณสมบัติตรงตามที่ต้องการอย่างแท้จริง

โดยทั่วไปเป็นที่ทราบกันดีว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท I ประกอบไปด้วย tricalcium silicates ( $C_3S$ ) หรือ Alite, dicalcium silicates ( $C_2S$ ) หรือ Belite, tricalcium aluminate ( $C_3A$ ) and tetracalcium aluminoferrite ( $C_4AF$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักสำคัญในปูนซีเมนต์ ที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาและการพัฒนากำลังของสารประกอบ เมื่อน้ำในมวลดินเข้าไปผสมกับซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน สารประกอบเกิดการก่อตัวขึ้นได้สารผลิตภัณฑ์ที่สำคัญคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ Ettringite และมีการคายความร้อนออกมา โดยปริญาและชั้ (2549) ได้สรุปคุณสมบัติของแต่ละสารประกอบเปรียบเทียบตามตารางที่ 1

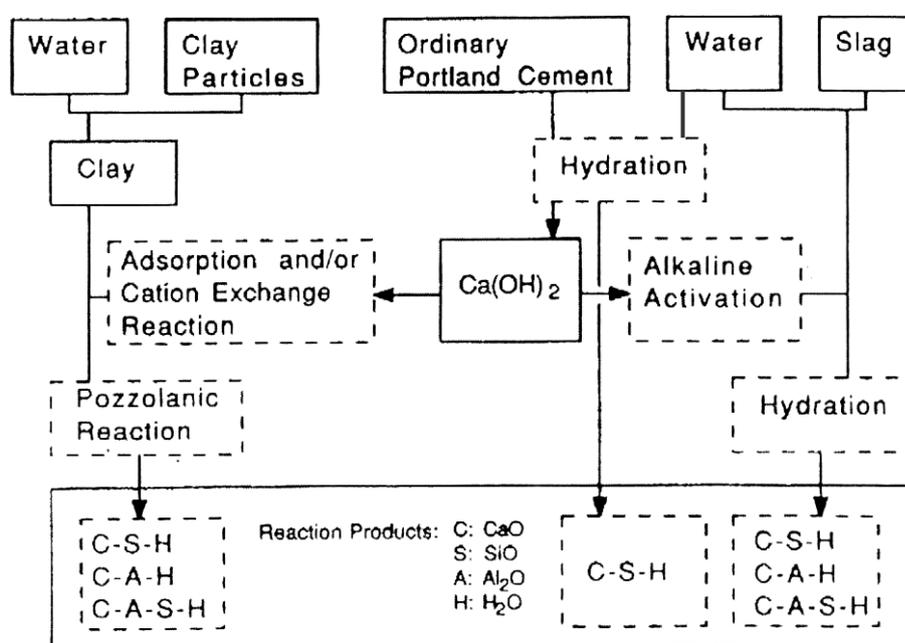
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	สารประกอบ			
	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วกว่า (นาที)
การพัฒนากำลัง	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1 วัน)	เร็วมาก (1 วัน)
กำลังประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

ที่มา: ปริญาและชั้ (2549)

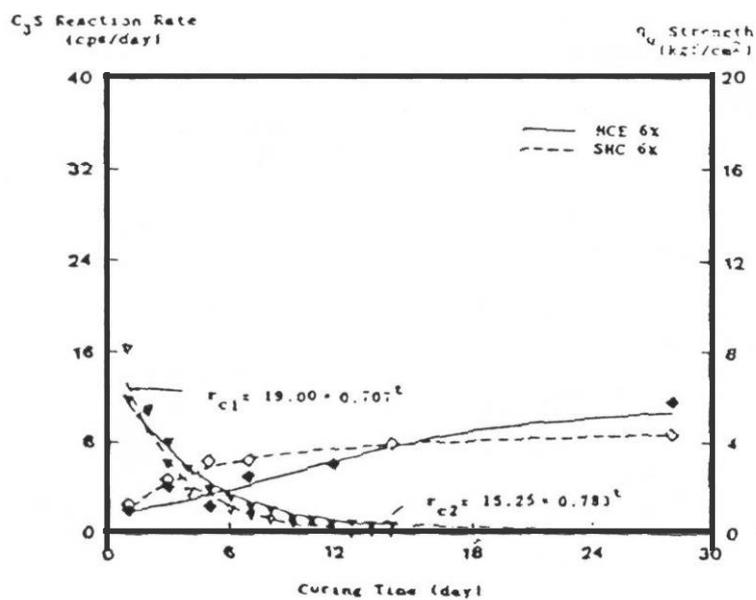
วัสดุปอซโซลาน เช่น ซิลิกาฟูม ใถ่ลอย ผสมไปพร้อมกับปูนซีเมนต์ จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้น ซึ่งซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สารผลิตภัณฑ์ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งมีความสามารถในการยึดประสานและให้ความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยปกติปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ

กระบวนการทางเคมีในการเกิดสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา Hydration และ Pozzolanic เสนอโดย Saitoh et al. (1985) แสดงดังภาพที่ 4



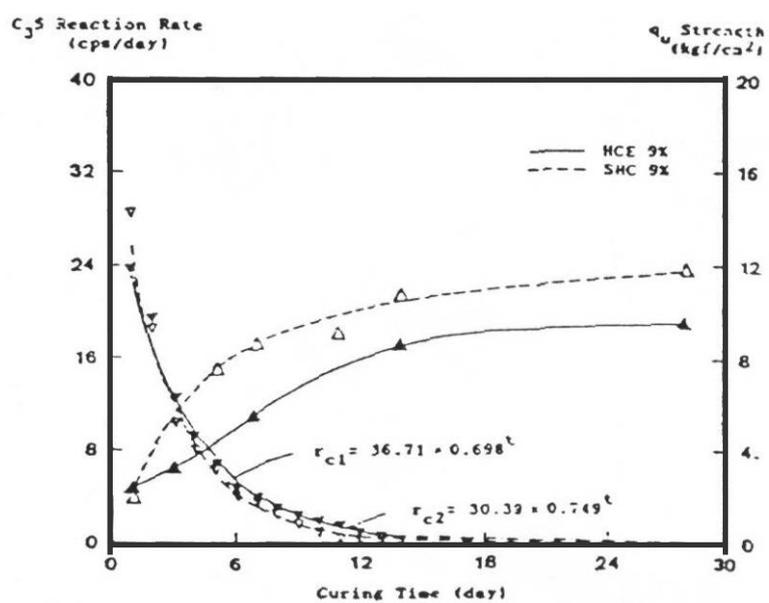
ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาเคมีระหว่างดินและสารเชื่อมประสานที่ทำให้เกิดความแข็งแรง  
ที่มา: Saitoh et al. (1985)

Nontananandh (1990) ได้ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ tricalcium silicate ( $\text{C}_3\text{S}$ ) โดยใช้ X-ray Diffraction ในการวิเคราะห์ดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และกากโลหะ (slag) ซึ่งพบว่ามีความถี่ที่สูงกว่าการปรับปรุงด้วยซีเมนต์อย่างเดียวและได้ข้อสรุปว่าการเติมผงกากโลหะจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของ  $\text{C}_3\text{S}$  ผลปรากฏว่าความถี่เพิ่มขึ้นทั้งระยะสั้นและระยะยาวดังแสดงในภาพที่ 5 และ 6 โดยแสดงแบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{S}$  ดังภาพที่ 7



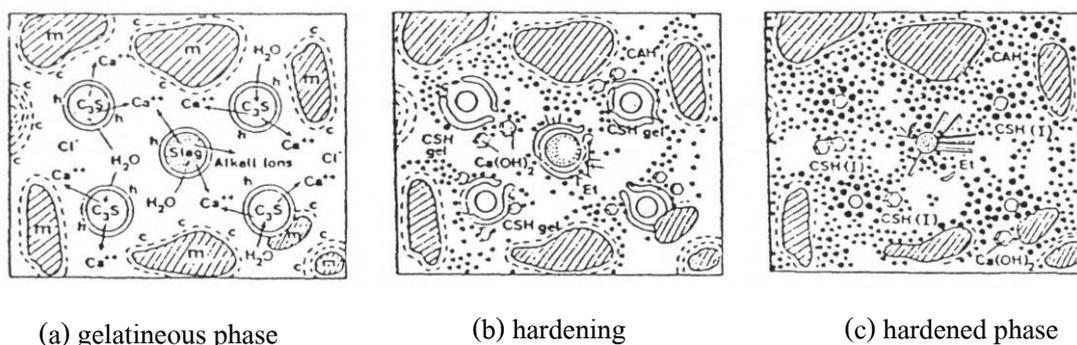
ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบระหว่างการพัฒนากำลังกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา  $C_3S$  ที่ปริมาณสารปรับปรุง 6%

ที่มา: Nontananandh (1990)



ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบระหว่างการพัฒนากำลังกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา  $C_3S$  ที่ปริมาณสารปรับปรุง 9%

ที่มา: Nontananandh (1990)



ภาพที่ 7 a, b และ c แสดงแบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ  $C_3S$  ในการปรับปรุงด้วยผงกากโลหะที่มีความสัมพันธ์กับกำลัง

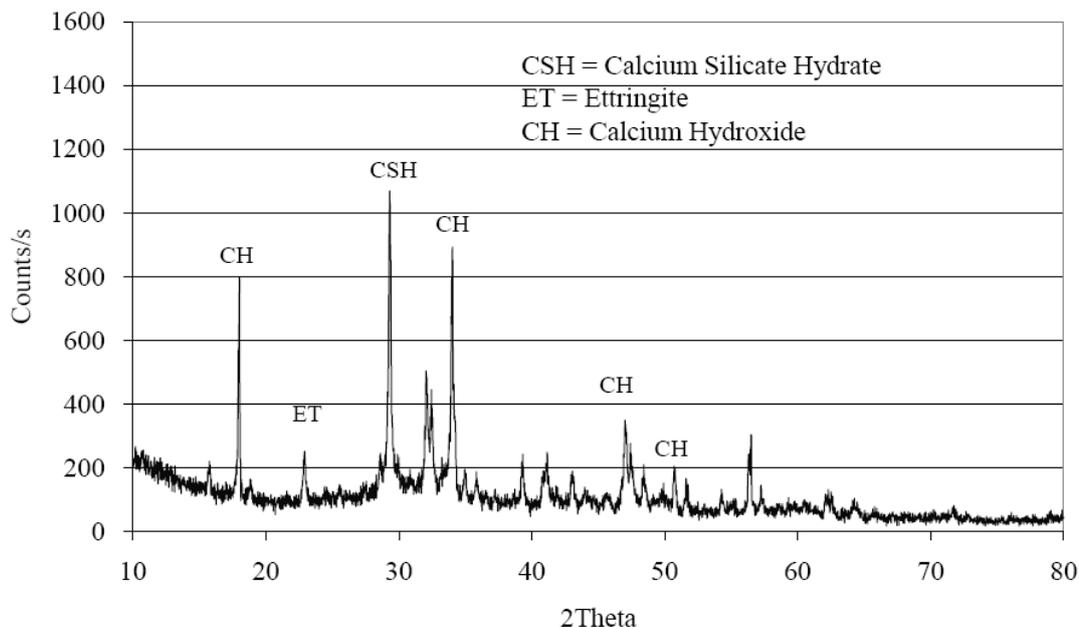
หมายเหตุ เมื่อ c คืออนุภาคดินเหนียว m คือวัสดุ h คือ ไฮดรอกไซด์ฟิล์มและ Et คือ Ettringite

ที่มา: Nontananandh (1990)

กมล (2545) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนโดยใช้ซีเมนต์และปูนขาว พบว่าเมื่อนำดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) ที่มีปริมาณความชื้นสูงถึง 93.5% โดยมีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง  $0.08 - 0.21 \text{ kg/cm}^2$  มาผสมซีเมนต์และปูนขาวที่ปริมาณ 100, 150, 200 และ  $250 \text{ kg/m}^3$  โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสานเท่ากับ 0.8 จากนั้นทำการทดสอบหาค่ากำลังของดินโดยวิธีการทดสอบกำลังอัดรับแรงอัดแกนเดียว ที่อายุการบ่ม 4, 7, 14, 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ได้ผลว่าดินผสมซีเมนต์ มีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในระยะแรก ตั้งแต่เริ่มผสมจนถึง 28 วัน และหลังจากนั้นกำลังจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในระยะยาว เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังเพิ่มขึ้นด้วย

Nontananandh et al. (2004) ได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังของดินเหนียวอ่อนจากทะเลที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย พบว่าจากการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนซึ่งเก็บมาจากบริเวณจังหวัดสมุทรปราการ เป็นดินเหนียวอ่อน ซึ่งมีความชื้นตามธรรมชาติสูงถึง 63.53% มีค่า Plasticity Index เท่ากับ 53.10 %, Liquid Limit เท่ากับ 85.80% โดยมีกำลังที่ต่ำมากเพียง  $0.07 - 0.10 \text{ kg/cm}^2$  เท่านั้น และจากการทดลองนำมาปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยที่ได้มาจากโรงงานผลิตน้ำมันพืชแล้วปรากฏว่ากำลังของดินซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยดังกล่าว โดยมีแนวโน้มที่มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์และลดปริมาณเถ้าลอยลงเป็นสัดส่วนกัน รวมไปถึงผลเนื่องจากการบ่มในอายุของดินซีเมนต์ที่มากขึ้น จะส่งผลให้มีการพัฒนาของกำลังที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงสร้างส่วนย่อยภายในอนุภาคของดิน

ซีเมนต์และการเกิดของปฏิกิริยาต่างๆอันได้แก่ ปฏิกิริยา Hydration และปฏิกิริยา Pozzolanic เป็นต้น พบว่าเมื่อที่อายุการบ่มมากขึ้นการเกิดสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาต่างๆ เช่น CSH และ Ettringite มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 8 ทำให้โครงสร้างของดินซีเมนต์มีความแข็งแรงมากขึ้น



ภาพที่ 8 กราฟแสดงรูปแบบ X-ray Diffraction ของตัวอย่างดินที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วย ซีเมนต์  $200 \text{ kg/m}^3$  ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน

ที่มา: Nontananandh et al. (2004)

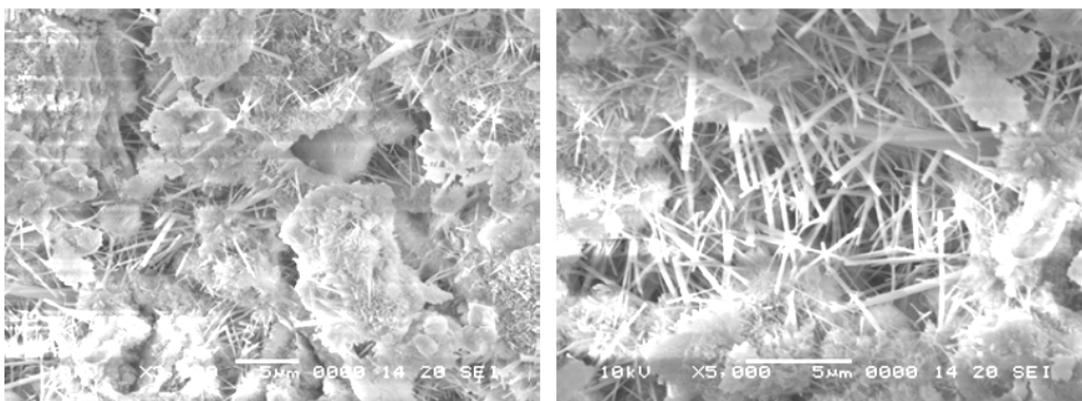
สำหรับการจำแนกสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีและแร่ธาตุที่สำคัญของดินจะได้ค่า d-spacing (Å) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางการจำแนกสารชนิดต่างๆ

Identifying materials	d-spacing (Å)
Illite	2.98, 1.50, 1.38
Kaolinite	7.13, 3.56, 2.40, 1.63
Montmorillonite	4.46, 2.56, 1.29
Quartz	4.26, 2.46, 2.28, 2.24, 1.82, 1.54
Calcium Silicate Hydrate, CSH	3.00-3.02
Calcium Hydroxide, Ca(OH) <sub>2</sub>	4.90, 2.62, 1.92, 1.79
Ettringite	3.88 (9.70, 5.60)
Tricalcium Silicate (C <sub>3</sub> S)	3.50
Dicalcium Silicate (C <sub>2</sub> S)	7.30, 4.90
Tricalcium Aluminate (C <sub>3</sub> A)	2.70

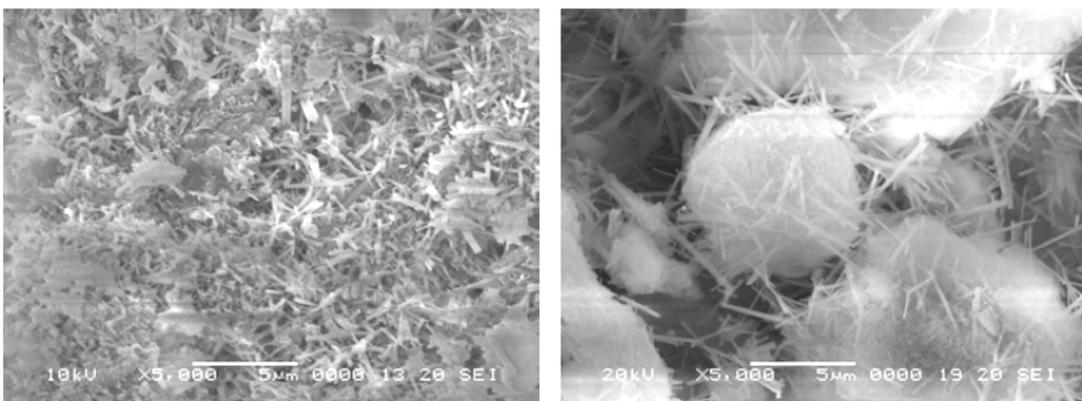
ที่มา: Nontananandh (1990), Boonyong (2004)

Yoobanpot (2004) ได้ศึกษาโครงสร้างของดินเหนียวอ่อนที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์โดย การประยุกต์ใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) กับดินอ่อนกรุงเทพที่ได้รับการปรับปรุง หลังจากการทดสอบกำลังและความชื้นน้ำผลปรากฏว่าได้พบสารผลิตภัณฑ์ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Ettringite และ CaCO<sub>3</sub> มีความสัมพันธ์กับการพัฒนากำลัง โดยรูปร่างของ CSH และ Ettringite และอนุภาคของดินสากันอยู่เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงและมีช่องว่างระหว่าง อนุภาคลดลง ดังภาพที่ 9 และ 10 เป็นผลทำให้มีกำลังสูงขึ้นและความชื้นลดต่ำลง และยังพบอีกว่า เมื่อผสมแล้วลอยเข้าไปแทนที่ของซีเมนต์บางส่วน ส่งผลให้มีค่าความชื้นน้ำที่ลดลงเมื่อมีระยะเวลา การบ่ม 90 วัน



**ภาพที่ 9** ภาพของสารผลึกที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาบ่ม 14 วันโดย SEM

ที่มา: Yoobanpot (2004)



**ภาพที่ 10** ภาพของสารผลึกที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาบ่ม 14 วันโดย SEM

ที่มา: Yoobanpot (2004)

## อุปกรณ์และวิธีการ

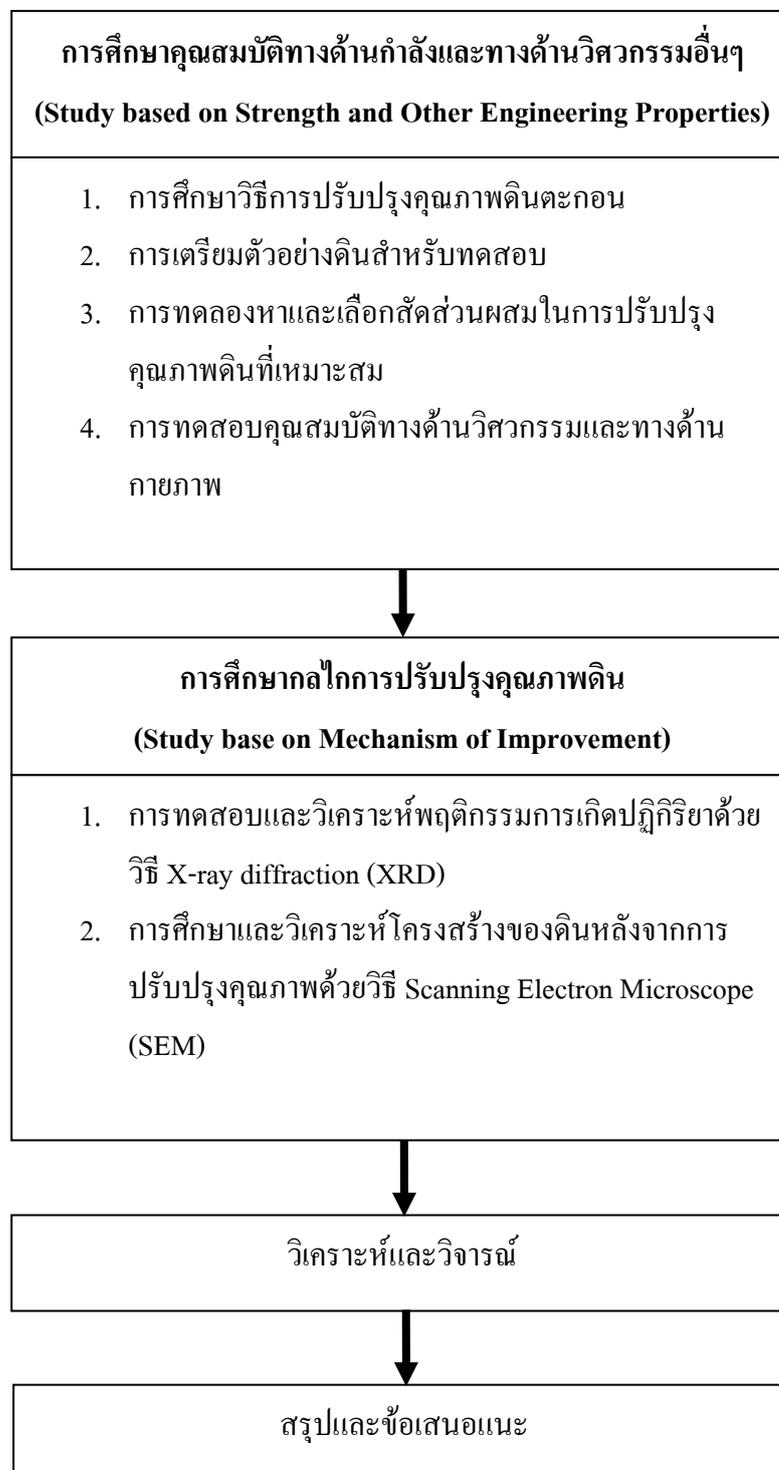
### อุปกรณ์

1. เครื่องผสมดิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 cm สูง 40 cm
2. แบบหล่อทรงกระบอกกลวง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 5 cm สูง 10 cm สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)
3. แบบหล่อทรงกระบอกกลวง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 9.6 cm สูง 11 cm สำหรับการทดสอบความซึมน้ำ (Permeability Test)
4. แบบหล่อครึ่งวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ยาว 13.5 cm สำหรับการทดสอบการหดตัว (Shrinkage Test)
5. เครื่องมือทดสอบ Unconfined Compression
6. เครื่องมือทดสอบค่าความซึมน้ำ
7. เวอร์เนีย
8. เครื่องชั่ง
9. ตู้อบดิน
10. เครื่องทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JEOL JSM-5600LV
11. เครื่องทดสอบ X – ray Diffractometer (XRD) รุ่น Philips X’Pert Diffractometer

### วัสดุทดสอบ

1. ดินตะกอนทะเลจากการขุดลอก (Seabed Dredged Materials) เป็นตัวแทนของดินตะกอนทะเลที่ได้จากการขุดลอกท้องทะเล บริเวณร่องเดินเรือในอ่าวไทย จังหวัดสมุทรปราการ
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง
3. ทรายละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 200
4. ซิลิกาฟูม

## วิธีการ



ภาพที่ 11 แสดงขั้นตอนการวิจัย

การศึกษาวิจัยได้แบ่งขั้นตอนการวิจัยดังแสดงในแผนภูมิภาพที่ 11 ดังนี้

### 1. การศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอน

ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนจากรายงาน บทความทางวิชาการ วารสาร และสิ่งตีพิมพ์อื่นๆ รวมทั้งวิทยานิพนธ์ในเรื่องที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ มาเปรียบเทียบกับการทดลองวิจัยในเบื้องต้นที่ได้ทำการศึกษามาแล้ว

### 2. การทดลองหาสัดส่วนผสมในการปรับปรุงคุณภาพดินที่เหมาะสม

จากตัวอย่างดินที่ทดลองผสมกับสารเชื่อมประสาน ด้วยการใช้ซีเมนต์ และสารผสมเพิ่ม ซึ่งได้แก่ ทรายและซิลิกาฟูม จะทำการเลือกสัดส่วนผสมที่ดีที่สุด โดยจะพิจารณาคูณสมบัติทางด้าน กำลัง ความชื้นน้ำ และการหดตัว ของอัตราส่วนผสม Mix-1 ถึง Mix-12 มาทำการศึกษาหาปริมาณน้ำในดินและปริมาณสารเชื่อมประสาน ที่ทำให้มีคุณสมบัติทางด้านกำลัง ความชื้นน้ำ และการหดตัว ที่ดีที่สุด

### 3. การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับทดสอบ

ในเบื้องต้นจะนำดินตะกอนที่เก็บมาจากในสนามหลังจากการลดความชื้นในมวลดินทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการแล้ว มาทำการผสมดินกับสารเชื่อมประสานและน้ำ ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ตามมาตรฐาน JSF 821 - 2000 ด้วยเครื่องผสมดิน ใช้เวลาในการผสมประมาณ 5 นาที เมื่อผสมจนคลุกเคล้ากันดีแล้ว จึงนำไปบรรจุในแบบหล่อทรงกระบอกกลวงเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 5 cm สูง 10 cm สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) และแบบหล่อทรงกระบอกกลวงเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 9.6 cm สูง 11 cm สำหรับการทดสอบความชื้นน้ำ (Permeability Test) และแบบหล่อ (mould) ครึ่งวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ยาว 135 cm สำหรับการทดสอบการหดตัว (Shrinkage Test) จากนั้นนำตัวอย่างห่อด้วยพลาสติก เพื่อเก็บรักษาความชื้นและนำไปบ่มที่ห้องเก็บความชื้นเพื่อรอทดสอบตามอายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วันต่อไป



(a) เครื่องผสมดิน



(b) การบรรจุดินลงในแบบหล่อ  
สำหรับทดสอบความชื้นน้ำ



(c) การบรรจุดินลงในแบบหล่อ  
สำหรับทดสอบกำลัง



(d) การห่อรักษาความชื้นตัวอย่างดิน  
สำหรับทดสอบความชื้นน้ำ



(e) การห่อรักษาความชื้นตัวอย่างดิน  
สำหรับทดสอบกำลัง

ภาพที่ 12 การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับทดสอบ

#### 4. การทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมและทางด้านกายภาพ

##### 4.1. กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)

ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 2166 - 91 ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของดิน โดยนำตัวอย่างดินเข้าเครื่องทดสอบ จากนั้นทำการกดตัวอย่างในแนวดิ่ง โดยไม่มีแรงรัดรอบ ที่อัตราการกดคงที่อยู่ที่ความเร็ว 0.500 mm/min บันทึกค่าแรงกดที่ใช้ และการหดตัวที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จะได้กำลังของดินตัวอย่างที่ทดสอบ

##### 4.2. การทดสอบหาค่าความซึมน้ำ (Permeability Test)

ทดสอบตัวอย่างที่อายุการบ่มตามกำหนด โดยให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2434-68 ใช้วิธีทดสอบระดับน้ำคงที่ ที่ความดันคงที่  $2 \text{ kg/cm}^2$

##### 4.3. การทดสอบการหดตัวโดยทำการทดสอบการหดตัวแนวเส้น (Linear Shrinkage Test, $L_s$ )

ทดสอบตามมาตรฐาน BS 1377 โดยเมื่อถึงกำหนดอายุการบ่มใช้ดินตัวอย่างที่เตรียมในแบบหล่อครึ่งวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ยาว 135 mm มาทำการวัดความยาว บันทึกค่าไว้ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาวัดความยาวอีกครั้งแล้วบันทึกค่า จากค่าที่ได้ทำการแปลงค่าเป็นการหดตัวที่ทำการวัดเชิงปริมาตร (Volumetric shrinkage test,  $S_v$ ) ได้จากสมการ

$$S_v = 1 - (1 - L_s)^3 \quad (1)$$



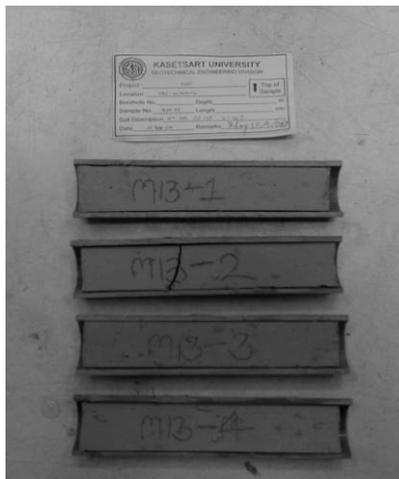
(a) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว



(b) ตัวอย่างดินหลังการทดสอบกำลัง



(c) การทดสอบการหดตัวเชิงเส้นก่อนการอบ



(d) การทดสอบการหดตัวเชิงเส้นหลังการอบ



(e) การทดสอบความชื้นน้ำ

ภาพที่ 13 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

## 5. การศึกษากลไกของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอน

จากตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ทำการทดสอบแรงอัดแล้ว จะทำการเก็บตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบ XRD และ SEM โดยตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ SEM จะเก็บชิ้นส่วนเล็กๆบริเวณรนาบเนื้อที่พังของตัวอย่างทดสอบแรงอัด และตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ XRD จะทำการขูดตัวอย่างดินให้เป็นเศษชิ้นเล็กๆ และทำการบดให้เป็นผง จากนั้นตัวอย่างที่เตรียมมาทดสอบ

### 5.1 X – ray Diffraction Analysis (XRD)

เป็นการทดสอบโดยการฉายรังสีเอ็กซ์ (ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 40 kV และกระแสไฟฟ้า 30 mA และความเร็วในการสแกน 2 degrees / min) เพื่อวิเคราะห์สารประกอบของผลึกต่าง ๆ ในตัวอย่างทดสอบ ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ จากตัวอย่างที่เตรียมไว้ตามอัตราส่วนผสมและอายุการบ่มต่างๆ โดยทำการเตรียมตัวอย่างผงลงในแบบหล่อโลหะ จากนั้นนำเข้าเครื่อง XRD จากนั้นนำผลมาวิเคราะห์หาสารองค์ประกอบของตัวอย่าง ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพที่อายุการบ่มต่างๆ

### 5.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

เป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง (ที่ความต่างศักย์ 20 kV และกระแสไฟฟ้า 20 mA) เพื่อสำรวจโครงสร้างของดินและการเกิดสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีด้วยภาพถ่าย โดยใช้ตัวอย่างหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ตามอัตราส่วนผสมและอายุการบ่มต่างๆที่เตรียมไว้ จากนั้นจะนำรูปภาพโครงสร้างของดินซีเมนต์ มาวิเคราะห์และอธิบายกลไกการปรับปรุงคุณภาพดินให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

## 6. วิเคราะห์ วิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

นำผลการทดสอบ XRD และ SEM มาทำการวิเคราะห์ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลักที่สำคัญ และหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ตามอัตราส่วนผสมและอายุการบ่มต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับกราฟพัฒนากำลัง ตลอดจนคุณสมบัติทางด้านความชื้นน้ำและการหดตัว โดยเน้นการวิเคราะห์คุณสมบัติดังกล่าวทั้งในระยะสั้นและระยะยาว เพื่ออธิบายกลไกการปรับปรุงคุณภาพของดินตะกอนขุดจากทะเล

### มาตรฐานการทดสอบ

ASTM D 2216 - 92 มาตรฐานการทดสอบจำนวนหาปริมาณน้ำในมวลดินและหิน

ASTM D 2166 - 91 มาตรฐานการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

(Unconfined Compressive Strength)

ASTM D 2434 - 68 มาตรฐานการทดสอบความซึมน้ำ (Permeability test)

BS 1377 มาตรฐานการทดสอบการหดตัวแนวเส้น (Linear shrinkage test)

JSF 821 - 2000 มาตรฐานการเตรียมตัวอย่างและการบ่มตัวอย่างโดยปราศจากการบดอัด

### สถานที่ทำการวิจัย

1. ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

2. ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมวัสดุ สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

### ระยะเวลาในการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้ เริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2549 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2551

## ผลและวิจารณ์

### คุณสมบัติทางด้านกายภาพของดินตะกอนทะเล

จากผลการศึกษาร่วมกับ ประภิต (2007) พบว่าดินตะกอนขุดจากทะเลโดยธรรมชาติอยู่ในสถานะน้ำโคลน มีสีน้ำตาลออกเทา มีกลิ่นสารอินทรีย์และเกลือ ซึ่งมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content) สูงมากถึงประมาณ 200% - 300% ค่าความหนาแน่นรวมเท่ากับ  $1.27 \text{ T/m}^3$  และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 - 2.72 จากการทดสอบ Atterberg Limits พบว่าค่า Liquid Limit (LL) เท่ากับ 99.64% - 101.69% ค่า Plastic Limit (PL) เท่ากับ 35.81% - 37.95% ค่า Shrinkage Limit (SL) 18.67% และค่า Plasticity Index (PI) เท่ากับ 63.79 สำหรับการกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution) ซึ่งพบว่าส่วนประกอบดินตะกอนทะเลมีปริมาณอนุภาคของทราย 2% - 5% อนุภาคของดินตะกอนทราย 25% - 30% และอนุภาคของดินเหนียว 60% - 65%

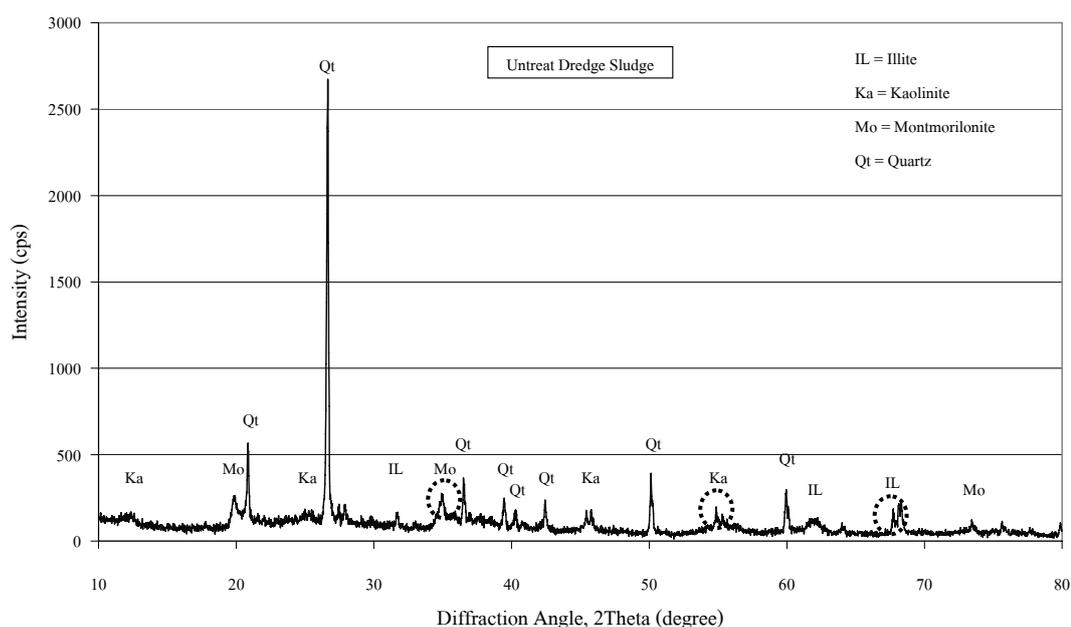
จากผลการทดสอบทางกายภาพสามารถจำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification (USCS) และระบบ AASHTO ได้เป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) และเป็นดินกลุ่ม A-7-5 ซึ่งมีค่า GI เท่ากับ 20 ตามลำดับ ซึ่งจัดว่าเป็นดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง มีสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก มักมีกำลังต่ำ และการยุบตัวสูง คุณสมบัติทางกายภาพของดินตะกอนทะเลก่อนการปรับปรุงคุณภาพสรุปได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของดินตะกอนทะเลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

Soil Classification (USCS)	CH
Soil Classification (AASHTO)	A - 7 - 5
Sand (smaller than 0.475 mm. and larger than 0.075 mm.), %	2 - 5
Silt (smaller than 0.075 mm. and larger than 0.002 mm.), %	25 - 30
Clay (smaller than 0.002 mm.), %	60 - 65
Natural Water Content ( $w_n$ ), %	200 - 300
Bulk Density ( $\gamma$ ), $t/m^3$	1.27
Specific Gravity (Gs)	2.62 - 2.72
Liquid Limit (LL), %	99.64 - 101.69
Plastic Limit (PL), %	35.81 - 37.95
Shrinkage Limit (SL), %	18.67
Plasticity Index (PI)	63.79

ที่มา: Kaewkaorop (2007)

จากการวิเคราะห์ XRD ของดินตะกอนทะเลตามธรรมชาติก่อนการปรับปรุงคุณภาพ ดังแสดงในภาพที่ 14 พบว่ามีสารประกอบทางเคมีที่หลากหลาย แต่สารประกอบหลักคือ สารประกอบของซิลิกาในรูปของ ควอตซ์ (quartz) และแร่ดินเหนียวที่สำคัญ ได้แก่ Montmorillonite, Illite และ Kaolinite ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกัน โดยที่ Montmorillonite มีปริมาณมากที่สุด รองลงมา คือ Illite และ Kaolinite ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4



ภาพที่ 14 ผลการทดสอบ XRD ของดินตะกอนทะเลตามธรรมชาติ

ตารางที่ 4 ปริมาณแร่ดินเหนียวชนิดต่างๆในดินตะกอนทะเลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ จากการทดสอบ XRD

แร่ดินเหนียว	ปริมาณ (cps)	ตำแหน่งที่ตรวจวัด (Å)
Montmorillonite	275	2.56
Illite	237	1.38
Kaolinite	197	1.63

## คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

### 1. การปรับปรุงดินตะกอนทะเลด้วยวิธีทางกล: กระบวนการบีบน้ำ (Dewatering Process)

Nontananandh et al. (2007) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเล เพื่อเป็นวัสดุชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบขยะ จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าดินตะกอนทะเลตามธรรมชาติ มีความชื้นในดินสูงมาก หากจะนำดินตะกอนทะเลไปปรับปรุงทางเคมีให้ได้คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต้องการ จะต้องมีการปรับลดปริมาณน้ำ ให้มีความชื้นในดินที่เหมาะสมก่อนการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ( $w_i = 1.4 \text{ LL} - 1.1 \text{ LL}$  หรือประมาณ 140% - 110%) จึงได้ใช้เครื่องมือแบบไม้ซับซ้อน ทำการบีบน้ำในสนามและในห้องปฏิบัติการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณน้ำส่วนเกินในดินตะกอนทะเล และเพื่อปรับปริมาณน้ำในดินให้เหมาะสมก่อนการผสม ตามลำดับ จากการลดปริมาณน้ำในสนามสามารถลดปริมาณน้ำส่วนเกินลงเหลือ 150% - 190% ดังแสดงในตารางที่ 5

งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาดินตะกอนที่ได้รับการบีบน้ำ จนมีความชื้นเริ่มต้นก่อนผสมซีเมนต์เท่ากับ 160%, 138% และ 109% มาทำการตรวจสอบโครงสร้างของดินด้วยภาพถ่าย SEM และนำดินตะกอนที่มีความชื้น 138% และ 109% มาทดลองผสมซีเมนต์ เพื่อศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาซึ่งจะได้กล่าวถึงในส่วนต่อไป

จากการศึกษาพบว่าวิธีการบีบน้ำสามารถทำให้เกิดความประหยัดและมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากการลดปริมาณน้ำในดินจะสามารถลดปริมาณซีเมนต์ในอัตราส่วนผสม เพื่อให้การผสมดินตะกอนซีเมนต์ได้ค่า w/c ratio ตามความเหมาะสม ที่จะทำให้ได้คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต้องการ ดังนั้น การบีบน้ำ (Dewatering) จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลที่มีความชื้นสูงมากๆ ก่อนการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี

ตารางที่ 5 ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเล

ขั้นตอนที่	กระบวนการ	วัตถุประสงค์	ผลสำเร็จ
1	การลดปริมาณน้ำ ในสนาม	เพื่อลดปริมาณน้ำส่วนเกิน ในดินตะกอนทะเล	ปริมาณน้ำลดลง เหลือ 150% - 190%
2	การลดปริมาณน้ำ ในห้องปฏิบัติการ	เพื่อปรับปริมาณน้ำในดินให้ เหมาะสมก่อนการผสม	ปริมาณน้ำลดลง เหลือ 110% - 140%
3	การผสมด้วยซีเมนต์	เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทาง กายภาพและทางวิศวกรรม ให้ ได้ตามเกณฑ์ที่ต้องการ	ได้คุณสมบัติตาม เกณฑ์ที่ต้องการ ยกเว้นการหดตัว

ที่มา: Nontananandh et al. (2007)

## 2. การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลด้วยวิธีการทางเคมี: การผสมซีเมนต์และสารผสมเพิ่มอื่นๆ

จากงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยทำการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเพื่อตรวจสอบระดับการปรับปรุงคุณภาพดินและศึกษาถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกลไกการปรับปรุงคุณภาพดิน ได้แก่ คุณสมบัติทางด้านกำลัง โดยการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ), คุณสมบัติทางด้านความซึมน้ำ (Permeability) และคุณสมบัติทางด้าน การหดตัว (Shrinkage) ของดินตะกอนทะเลที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ และส่วนผสมเพิ่มอื่นๆ เช่น ซิลิกาฟุ้งและทราย ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 6 ตามอายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน จากนั้นได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมที่อายุการบ่ม 90 วัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติในระยะยาว

การศึกษานี้ได้แบ่งกลุ่มของอัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนผสม Mix-1, Mix-2 และ Mix-3 คือ ดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์ที่มีความชื้นในดินก่อนผสม 109% ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำถึงปานกลางคือ มีปริมาณซีเมนต์ 100, 125 และ 150  $\text{kg/m}^3$  ตามลำดับ และอัตราส่วนผสม Mix-4, Mix-5 และ Mix-6 คือ ดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์ที่มีความชื้นในดินก่อนผสม 138% ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีปริมาณซีเมนต์ปานกลางถึงสูงคือ มีปริมาณซีเมนต์ 150, 200 และ 250  $\text{kg/m}^3$  ตามลำดับ

ส่วนซิลิกาฟุ้งถูกใช้เป็นส่วนผสมแทนซีเมนต์บางส่วน ได้แก่ อัตราส่วนผสม Mix-7, Mix-8 และ Mix-9 คือ ดินตะกอนทะเลขุดที่มีความชื้นในดินก่อนผสม 138% ผสมกับซีเมนต์ในปริมาณ  $200 \text{ kg/m}^3$  และการผสมซิลิกาฟุ้งแทนซีเมนต์บางส่วนด้วยปริมาณซิลิกาฟุ้งเท่ากับ 5%, 10% และ 15% ของปริมาณซีเมนต์ ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีอัตราส่วนผสมของดินตะกอนทะเลซึ่งมีความชื้นในดินก่อนผสม 109% ทำการผสมทรายละเอียดเป็นปริมาณ 5%, 10% และ 15% ของปริมาณดิน ผสมซีเมนต์ในปริมาณ  $125 \text{ kg/m}^3$  ได้แก่ อัตราส่วนผสม Mix-10, Mix-11 และ Mix-12 ตามลำดับ

**ตารางที่ 6** ตารางสรุปอัตราส่วนผสมต่างๆของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนขุดจากทะเล

Mix No.	Cement Content ( $\text{kg/m}^3$ )	Silica Fume Content (% of Cement)	Sand Content (% of dry weight)	Initial Water Content (%)	w/c ratio
Mix-1	100	0	0	109	7.364
Mix-2	125	0	0	109	5.891
Mix-3	150	0	0	109	4.909
Mix-4	150	0	0	138	5.139
Mix-5	200	0	0	138	3.854
Mix-6	250	0	0	138	3.083
Mix-7	200	5	0	138	3.854
Mix-8	200	10	0	138	3.854
Mix-9	200	15	0	138	3.854
Mix-10	125	0	5	109	5.847
Mix-11	125	0	10	109	5.395
Mix-12	125	0	15	109	4.954

## 2.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์

### 2.1.1 การพัฒนากำลังของดินตะกอนผสมซีเมนต์

จากการทดลองผสมดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1, Mix-2 และ Mix-3 ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่ความชื้นในดินก่อนผสมเท่ากับ 109% โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงเท่ากับ 100, 125 และ 150 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ เมื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) ที่อายุการบ่มต่างๆสามารถสรุปดังตารางที่ 7 และพบว่า

Mix-1 ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 และ 90 วัน ปรากฏว่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 1.00, 1.20, 1.47 และ 2.09 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

Mix-2 ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 และ 90 วัน ปรากฏว่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 2.21, 2.67, 3.42 และ 4.85 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

Mix-3 ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 และ 90 วัน ปรากฏว่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 2.70, 3.97, 5.01 และ 5.10 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

ตารางที่ 7 กำลังรับแรงอัดของดินตะกอนผสมซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

อัตราส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (kg/cm <sup>2</sup> )				
	อายุการบ่ม (วัน)				
	3	7	14	28	90
Mix-1	N/A	1.00	1.20	1.47	2.09
Mix-2	N/A	2.21	2.67	3.42	4.85
Mix-3	N/A	2.70	3.97	5.01	5.10
Mix-4	2.91	4.92	5.59	6.40	8.85
Mix-5	4.25	6.11	7.01	11.25	12.06
Mix-6	8.01	10.61	13.77	14.02	19.89

นอกจากนี้ จากผลการทดลองผสมดินตะกอนซีเมนต์ Mix-4, Mix-5 และ Mix-6 ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่ความชื้นในดินก่อนผสมเท่ากับ 138% โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงเท่ากับ 150, 200 และ 250 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ เมื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) ที่อายุการบ่มต่างๆพบว่า

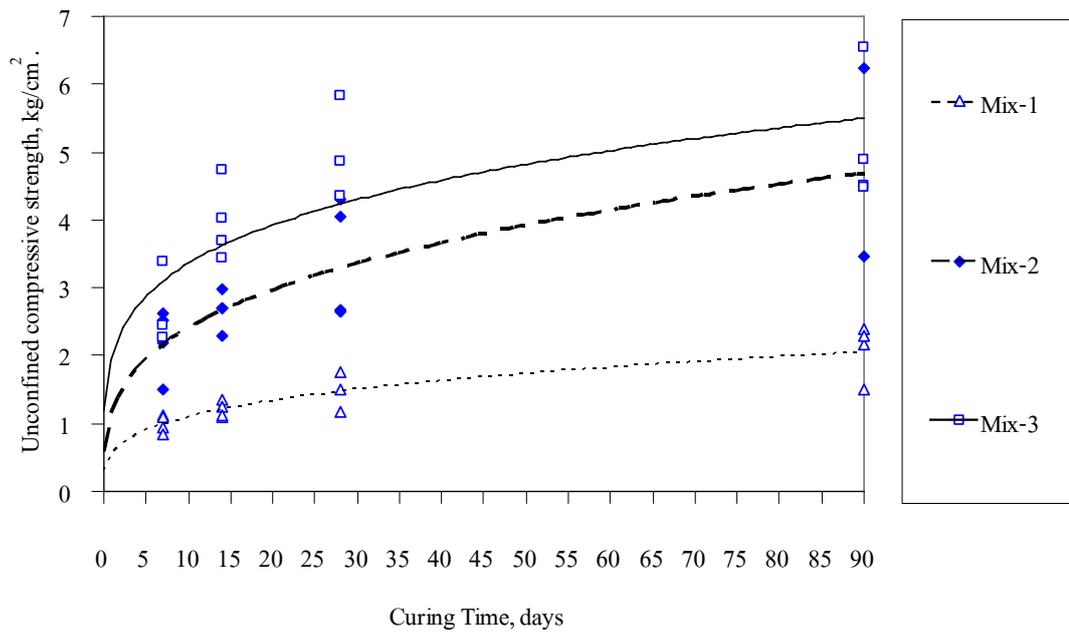
Mix-4 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์เท่ากับ 2.91, 4.92, 5.59, 6.40 และ 8.85 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

Mix-5 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์เท่ากับ 4.25, 6.11, 7.01, 11.25 และ 12.06 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

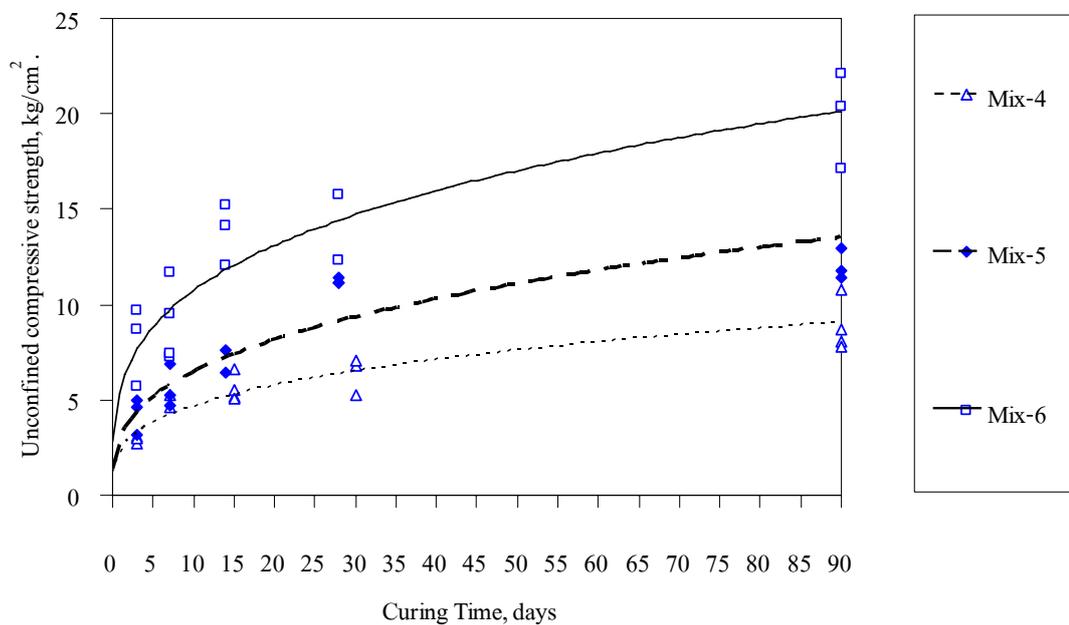
Mix-6 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์เท่ากับ 8.01, 10.61, 13.77, 14.02 และ 19.89 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) ของดินตะกอนซีเมนต์พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มทุกอัตราส่วนผสม โดยกำลัง ( $q_u$ ) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มน้อยๆ (อายุการบ่ม 3 วัน ถึง 14 วัน) ขณะที่กำลังจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆที่อายุการบ่มที่มากขึ้น (อายุการบ่ม 14 วัน ถึง 90 วัน) ดังแสดงในภาพที่ 15 และภาพที่ 16

ดังนั้น จากการศึกษาการพัฒนากำลังของดินตะกอนผสมซีเมนต์เพิ่มเติมที่ช่วงอายุการบ่มระยะยาว (90 วัน) ผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษากมล (2545) และ Nontananandh et al. (2004) คือการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มระยะต้น และมีแนวโน้มคงที่ที่อายุการบ่มระยะยาว นอกจากนี้ดินซีเมนต์จะมีกำลังมากขึ้น เมื่อปริมาณซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมมากขึ้น



ภาพที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 109% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

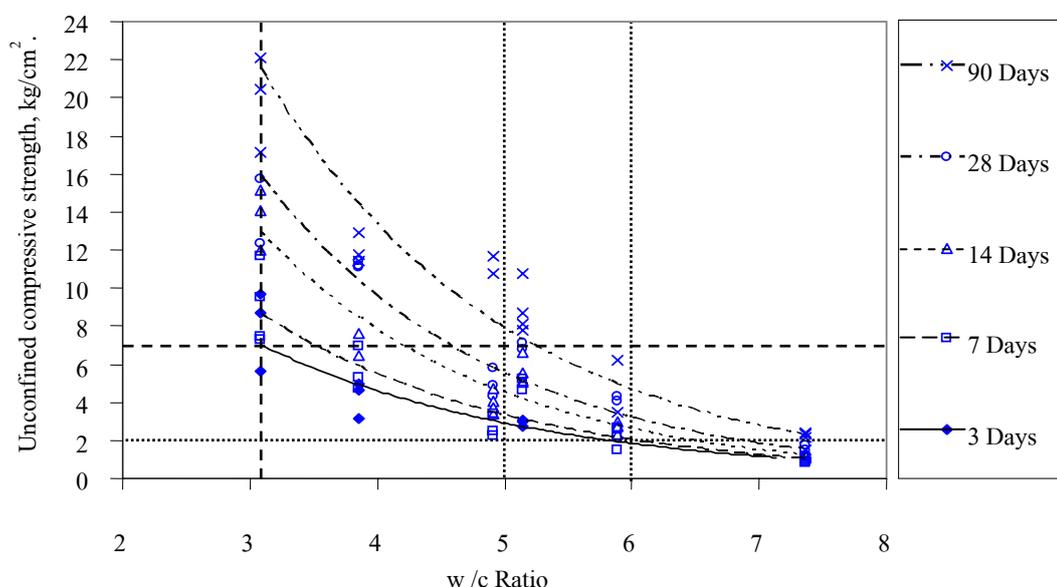


ภาพที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

จากงานวิจัยของ Suksiritawonkul (2007) ได้ศึกษาดินตะกอนซีเมนต์ที่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง (Subbase) ของถนน ต้องมีค่า Unconfined Compressive Strength ( $q_u$ ) ที่อายุการบ่ม 7 วัน เท่ากับ  $7 \text{ kg/cm}^2$  เป็นอย่างน้อย และจากงานวิจัยของ Keawkaorop (2007) พบว่าข้อกำหนดของการปรับปรุงดินตะกอนด้วยซีเมนต์ เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุของชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะจะต้องมี Unconfined Compressive Strength ( $q_u$ ) ไม่น้อยกว่า  $2 \text{ kg/cm}^2$

จากผลการศึกษาคูณสมบัติทางด้านกำลัง พบว่า ความสัมพันธ์ของกำลังกับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) ของดินตะกอนซีเมนต์ แสดงในภาพที่ 17 สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อ w/c ratio มีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากำลัง ( $q_u$ ) ของดินตะกอนซีเมนต์จะมีแนวโน้มลดต่ำลง ที่อายุการบ่มต่างๆ

ดังนั้น จากผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่มีค่า w/c ratio ประมาณ 3 หรือน้อยกว่า มีคุณสมบัติทางด้านกำลังผ่านเกณฑ์ของวัสดุรองพื้นทางในงานถนน และดินตะกอนซีเมนต์ที่มีค่า w/c ratio น้อยกว่า 6 มีศักยภาพที่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุของชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้ ซึ่งค่า w/c ratio ทั้งสองค่าดังกล่าวมีความใกล้เคียงกับค่า w/c ratio ที่นำเสนอโดย Suksiritawonkul (2007) และ Keawkaorop (2007) ในงานวิจัยก่อนหน้านี้



ภาพที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

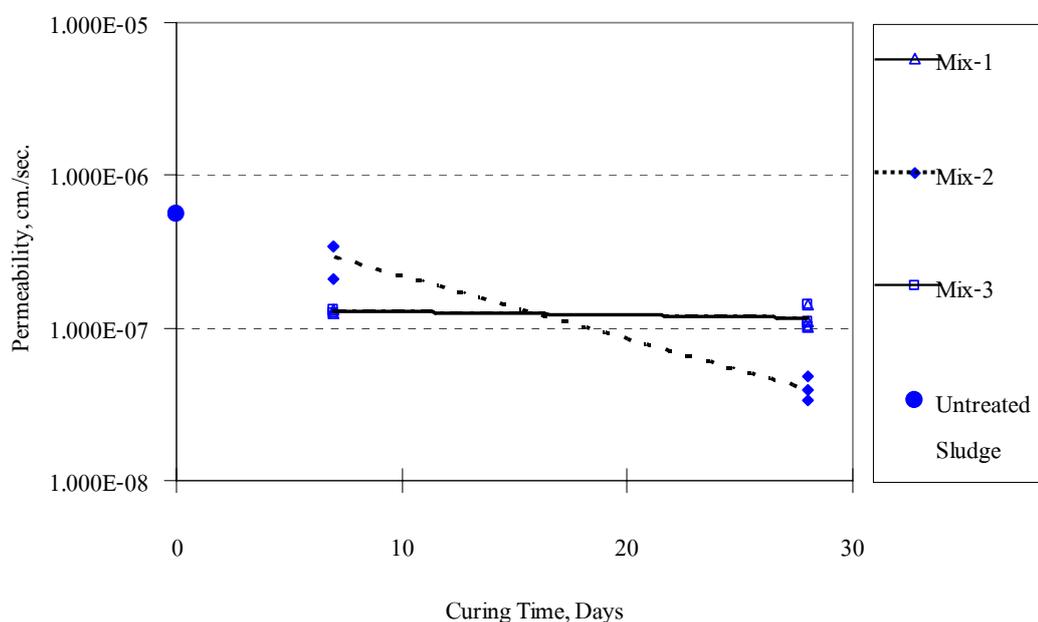
### 2.1.2 ผลการทดสอบความชื้นน้ำของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์ (Permeability tests)

จากผลการทดสอบความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์ที่มีความชื้นในดินก่อนผสมต่ำ ( $w_i = 109\%$ ) และมีปริมาณซีเมนต์ต่ำถึงปานกลาง ( $100 - 150 \text{ kg/m}^3$ ) ได้แก่ Mix-1, Mix-2 และ Mix-3 ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 8 โดยพบว่าทุกอัตราส่วนผสมมีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำลดต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินก่อนการปรับปรุงซึ่งมีค่าเท่ากับ  $5.538 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$  และจากการพิจารณาตามอายุการบ่มจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำดินตะกอนซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุการบ่มที่มากขึ้น โดยเฉพาะ Mix-2 มีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำลดลงถึง 10 เท่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 7 วัน เป็น 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 18

นอกจากนี้ยังพบว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่มีความชื้นในดินก่อนผสมสูง ( $w_i = 138\%$ ) และมีปริมาณซีเมนต์ปานกลางถึงสูง ( $150 - 250 \text{ kg/m}^3$ ) ได้แก่ Mix-4, Mix-5 และ Mix-6 ที่อายุการบ่มระยะสั้น คือที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ตามผลการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 8 สำหรับทุกอัตราส่วนผสม มีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำลดต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินก่อนการปรับปรุง เช่นเดียวกันกับดินตะกอนซีเมนต์ที่มีความชื้นในดินก่อนผสมต่ำ และมีปริมาณซีเมนต์ต่ำถึงปานกลาง แต่จากการศึกษาเพิ่มเติมที่อายุการบ่มระยะยาว (90 วัน) ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์ทุกอัตราส่วนผสม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินก่อนการปรับปรุงด้วยซีเมนต์

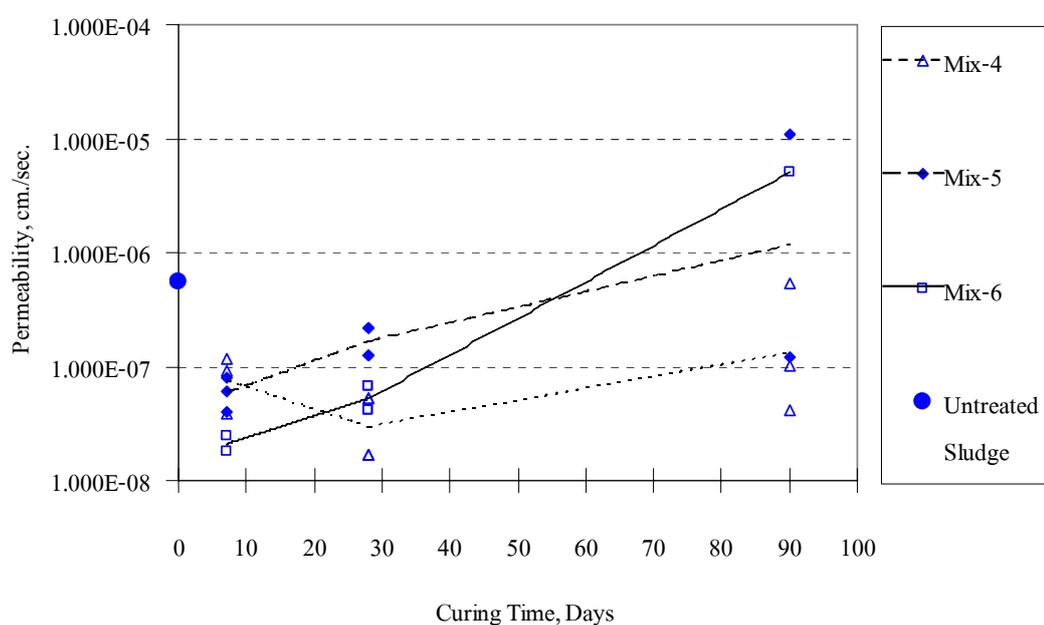
ตารางที่ 8 ค่าความซึมน้ำเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่อายุการบ่มต่างๆ

อัตราส่วนผสม	ความซึมน้ำ (cm/sec)		
	อายุการบ่ม (วัน)		
	7	28	90
Mix-1	$1.296 \times 10^{-7}$	$1.177 \times 10^{-7}$	N/A
Mix-2	$2.978 \times 10^{-7}$	$4.026 \times 10^{-8}$	N/A
Mix-3	$1.296 \times 10^{-7}$	$1.177 \times 10^{-7}$	N/A
Mix-4	$8.280 \times 10^{-8}$	$3.432 \times 10^{-8}$	$2.243 \times 10^{-7}$
Mix-5	$6.000 \times 10^{-8}$	$1.708 \times 10^{-7}$	$5.605 \times 10^{-6}$
Mix-6	$2.112 \times 10^{-8}$	$5.414 \times 10^{-8}$	$5.032 \times 10^{-6}$



ภาพที่ 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความซึมน้ำกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 109% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำกับอายุการบ่มดังแสดงในภาพที่ 19 พบว่าที่อายุการบ่มระยะสั้น เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 7 วัน เป็น 28 วัน ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำดินตะกอนซีเมนต์ส่วนใหญ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีเพียงแต่อัตราส่วนผสม Mix-4 ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีแนวโน้มลดลง แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำดินตะกอนซีเมนต์ทุกอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออายุการบ่มเพิ่มจาก 28 วัน เป็น 90 วัน

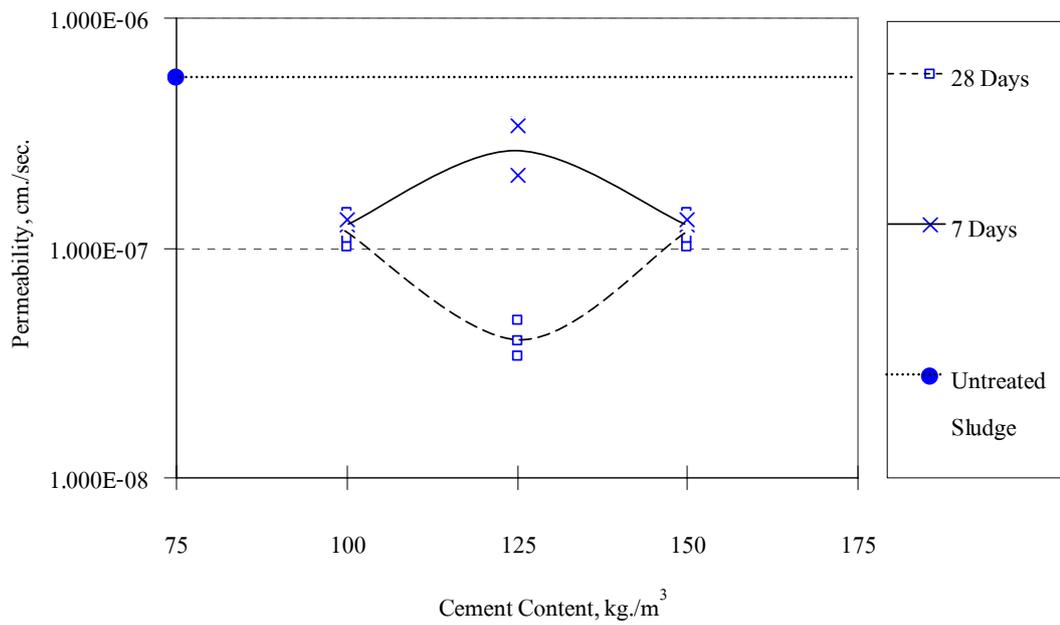


ภาพที่ 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

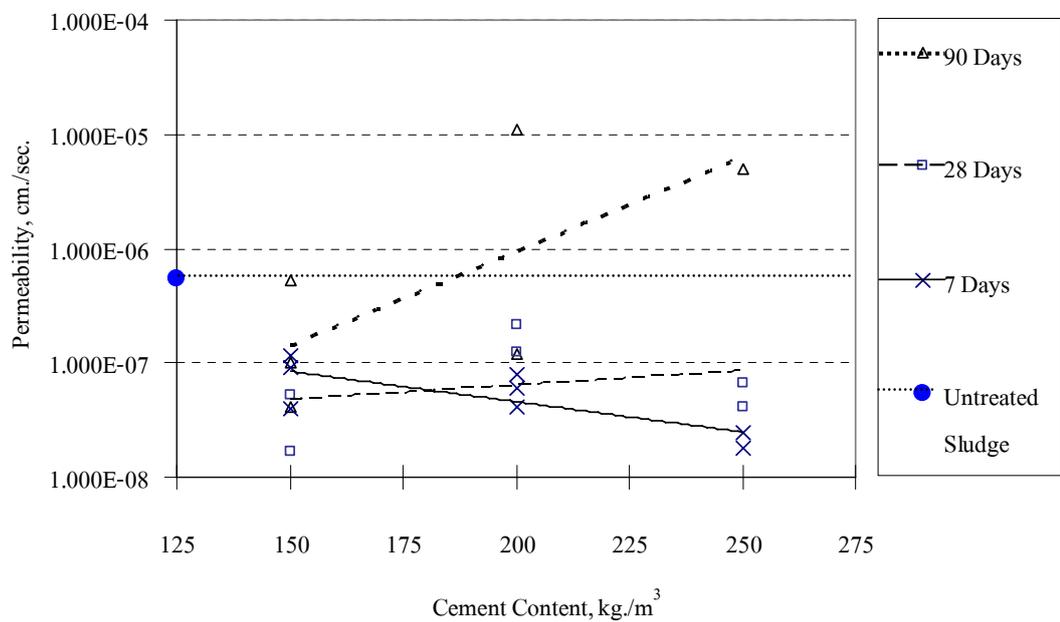
จากผลการทดสอบโดย Nontananandh et al. (2007) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณซีเมนต์ ที่อายุการบ่มต่างๆที่ปริมาณซีเมนต์ต่ำถึงปานกลาง ดังภาพที่ 20 พบว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน โดยมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงประมาณ 2-5 เท่า

อย่างไรก็ตาม สำหรับดินตะกอนซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ปานกลางถึงสูง ได้ผลปรากฏว่าที่อายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แต่ในทางกลับกันที่อายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) ปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่อายุการบ่ม 90 วัน เมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ จาก  $150 \text{ kg/m}^3$  ไปเป็น  $250 \text{ kg/m}^3$  ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 20 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 21

ดังนั้น จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า นอกจากปริมาณซีเมนต์ที่จะมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำแล้ว ยังอาจมีการปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำอีกด้วย เช่น การที่อนุภาคดินจับตัวเป็นก้อนระหว่างกระบวนการบีบน้ำ (Dewatering Process) การเกิดสารผลึกกัณฑ์ในเนื้อดินและโครงสร้างดินซีเมนต์ที่เกิดขึ้น อาจมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์เช่นกัน ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนต่อไป



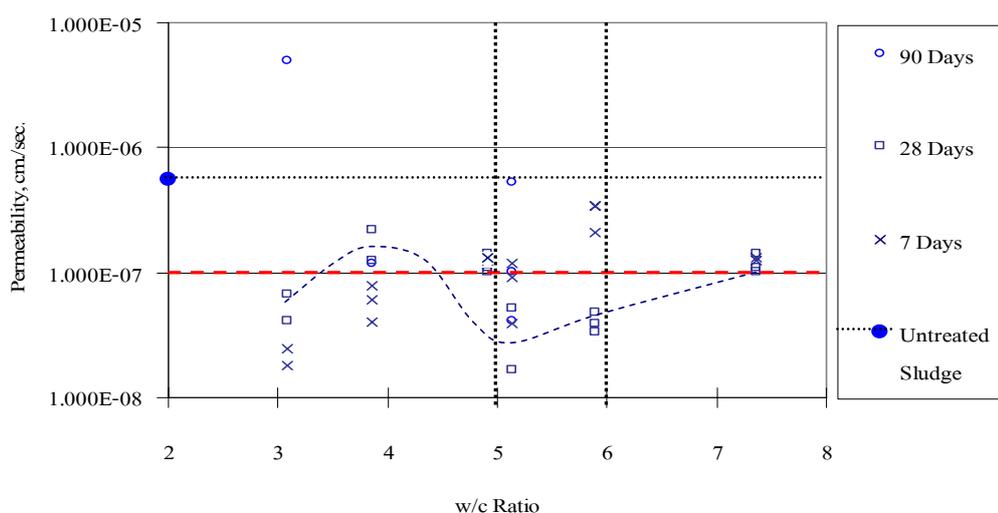
ภาพที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความซึมน้ำกับปริมาณซีเมนต์ของดินตะกอนซีเมนต์ ที่มีความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 109% ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความซึมน้ำกับปริมาณซีเมนต์ของดินตะกอนซีเมนต์ ที่มีความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ที่อายุการบ่มต่างๆ

จากการศึกษาโดย Keawkaorop (2007) พบว่าการปรับปรุงดินตะกอนด้วยซีเมนต์ เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุของชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะจะต้องมีความชื้นน้ำต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ คือ ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำต่ำกว่า  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec ซึ่งจากการศึกษานี้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำ กับ w/c ratio ของดินตะกอนซีเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 22 พบว่าจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ เมื่อ w/c ratio เพิ่มขึ้น ที่อายุการบ่ม 7 วัน ค่าความชื้นน้ำจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย (เพิ่มสูงกว่า  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec เล็กน้อย) แต่ที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่าความชื้นน้ำมีแนวโน้มคงที่ (ต่ำกว่า  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec เล็กน้อย) โดยทั้งที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน มีค่าความชื้นน้ำต่ำกว่าดินตะกอนก่อนการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ( $5.538 \times 10^{-7}$  cm/sec) ส่วนที่อายุการบ่ม 90 วัน แม้ว่าจะมีค่าความชื้นน้ำโดยรวมสูงกว่าดินตะกอนก่อนการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ( $5.538 \times 10^{-7}$  cm/sec) แต่ก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อ w/c ratio เพิ่มขึ้น

ที่อายุการบ่ม 28 วัน สามารถแบ่งได้ 3 ช่วง คือ w/c ratio < 4 (ค่าความชื้นน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมาก), w/c ratio 4 - 5 (ค่าความชื้นน้ำลดลงอย่างมาก) และ w/c ratio > 5 (ค่าความชื้นน้ำเพิ่มขึ้นตาม w/c ratio) ดังนั้น พบว่าดินตะกอนซีเมนต์มีศักยภาพที่จะสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุของชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้ (ค่าความชื้นน้ำ <  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec) โดยเฉพาะที่ w/c ratio ประมาณ 5 - 6 มีความเหมาะสมนำไปใช้งานดังกล่าว แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว (90 วัน) อาจต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้มีความชื้นน้ำมีค่าที่ดีขึ้น



ภาพที่ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำกับ w/c ratio ของดินตะกอนซีเมนต์ ที่อายุการบ่มต่างๆ

### 2.1.3 ผลการทดสอบการหดตัวของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์ (Shrinkage Test)

จากการทดสอบหาค่าการหดตัวเชิงเส้น (Linear Shrinkage Test) ของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์ ตามมาตรฐาน BS 1377 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric Shrinkage) ได้ผลการทดลองสรุปดังตารางที่ 9 พบว่าเมื่อนำดินตะกอนทะเลผสมกับซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมต่างๆ จะมีค่าการหดตัวลดลงจากดินตะกอนธรรมชาติอย่างชัดเจน

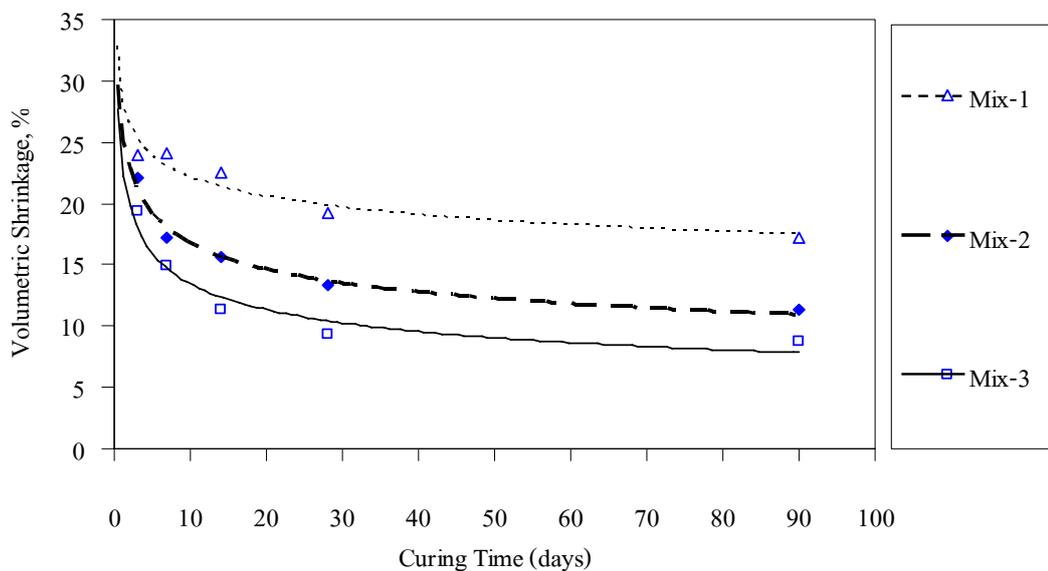
จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบการหดตัวตามอายุการบ่ม แสดงให้เห็นว่าเมื่ออายุการบ่มมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการหดตัวมีแนวโน้มลดลงทุกอัตราส่วนผสม ทั้งดินตะกอนซีเมนต์ที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำ (109%) และดินตะกอนซีเมนต์ที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง (138%) โดยที่อายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน ถึง 14 วัน) ค่าการหดตัวจะมีค่าลดต่ำลงค่อนข้างเร็ว และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ที่อายุการบ่มระยะยาว (28 วัน ถึง 90 วัน) แสดงว่าในช่วงต้นดินตะกอนซีเมนต์มีการทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องรวดเร็ว มีอัตราการทำปฏิกิริยาลดลงตามอายุการบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังของดินตะกอนซีเมนต์ ดังภาพที่ 23 และภาพที่ 24

ตารางที่ 9 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่อายุการบ่มต่างๆ

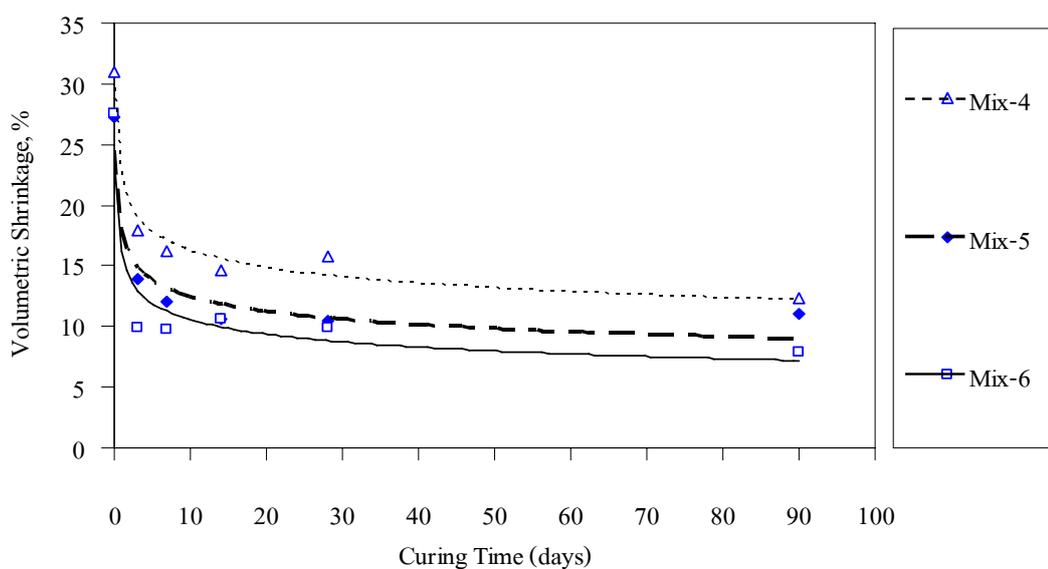
อัตราส่วนผสม	การหดตัว (%)					
	อายุการบ่ม (วัน)					
	0	3	7	14	28	90
Mix-1	N/A	23.887	24.062	22.497	19.231	17.172
Mix-2	N/A	22.089	17.215	15.679	13.311	11.302
Mix-3	N/A	19.395	14.952	11.346	9.272	8.765
Mix-4	31.045	17.934	16.280	14.625	15.798	12.312
Mix-5	27.206	13.921	12.043	10.600	10.402	10.997
Mix-6	27.539	9.935	9.778	10.623	9.881	7.852

หมายเหตุ ค่าการหดตัวของดินตะกอนทะเลก่อนการปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 61.539%

จากการศึกษาการหดตัวที่อายุการบ่มระยะยาวเพิ่มเติม (90 วัน) จะทำให้การหดตัวมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลการทดสอบเบื้องต้นในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (0 วัน ถึง 28 วัน)

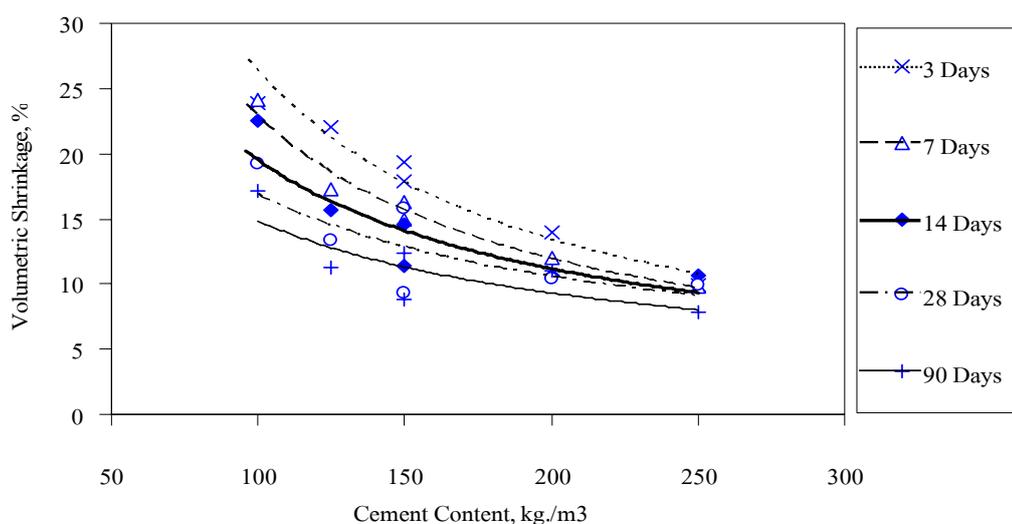


ภาพที่ 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 109% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

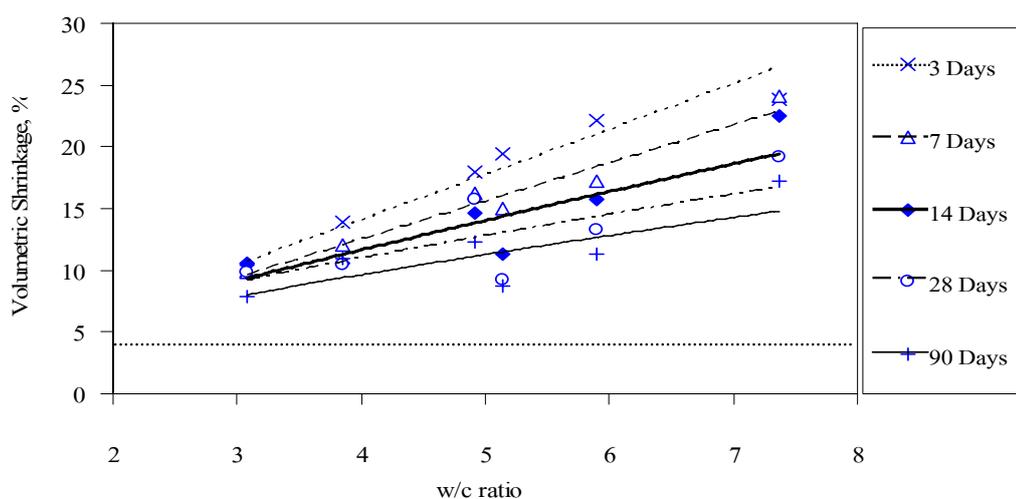


ภาพที่ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวกับปริมาณซีเมนต์พบว่าที่อายุการบ่มต่างๆ การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ ส่งผลให้ค่าการหดตัวมีแนวโน้มลดลง ดังภาพที่ 25 นอกจากนี้ อาจพิจารณาได้อีกนัยหนึ่งคือ เมื่อนำค่าการหดตัวมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) จะพบว่าค่าการเพิ่มค่าอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) ส่งผลทำให้ค่าการหดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทุกอายุการบ่ม ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับปริมาณซีเมนต์ของดินตะกอนซีเมนต์ ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับ w/c ratio ของดินตะกอนซีเมนต์ ที่อายุการบ่มต่างๆ

ทั้งนี้สาเหตุที่การหดตัวมีค่าลดลงแตกต่างกันค่อนข้างมากอย่างชัดเจน อันเนื่องมาจากปริมาณน้ำในดินที่แตกต่างกัน และการเกิดปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์ที่มีปริมาณต่างกัน ดังที่ได้กล่าวถึงในการศึกษาของ Kamon and Nontananandh (1991) จะสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดินลดลง เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น และที่ปริมาณสารเชื่อมประสานมากขึ้น ปริมาณความชื้นในดินลดลงมากขึ้นด้วย กล่าวคือเมื่อปริมาณซีเมนต์มีมากกว่า จึงสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้มากกว่า ทำให้ปริมาณน้ำในดินลดลงอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้แต่ละอายุการบ่ม ดินตะกอนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนผสมของซีเมนต์มากกว่า มีศักยภาพที่จะสามารถลดค่าการหดตัวลงได้รวดเร็วกว่าและมากกว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนผสมของซีเมนต์น้อยกว่า ในปริมาณน้ำในดินที่เท่ากัน

จากงานวิจัยของ Kaewkaorop (2007) กล่าวถึงข้อกำหนดในการออกแบบชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบขยะจะต้องมีค่าการหดตัวไม่เกิน 4 % แต่จากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่าค่าการหดตัวของดินตะกอนซีเมนต์ยังคงมีค่าการหดตัวเกินจากเกณฑ์ที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามผลจากการทดลองพบว่า เมื่อค่า w/c ratio ลดลง ค่าการหดตัวมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน ดังนั้น จึงอาจต้องทำการทดสอบค่าการหดตัวของดินซีเมนต์ในช่วงของ w/c ratio ที่น้อยกว่า 3 หรืออาจใช้สารเชื่อมประสานอื่นๆผสมเพิ่ม เพื่อลดการหดตัวให้เป็นไปตามเกณฑ์ดังกล่าว

## 2.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์และซิลิกาฟูม

### 2.2.1 การพัฒนากำลังของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์และซิลิกาฟูม

จากการทดลองได้นำซิลิกาฟูมเป็นสารผสมเพิ่มทดแทนซีเมนต์บางส่วน โดยนำดินตะกอนทะเลที่มีความชื้นเริ่มต้น 138% ผสมกับปริมาณสารเชื่อมประสาน (ซีเมนต์และซิลิกาฟูม) 200 kg/m<sup>3</sup>เมตร ซึ่งมีปริมาณซิลิกาฟูม 0%, 5%, 10% และ 15% ของปริมาณซีเมนต์ ได้แก่ Mix-5, Mix-7, Mix-8 และ Mix-9 ตามลำดับ มาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) ที่อายุการบ่มต่างๆ สามารถสรุปดังตารางที่ 10 พบว่า

Mix-5 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์เท่ากับ 4.25, 6.11, 7.01, 11.25 และ 12.06 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

Mix-7 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์เท่ากับ 4.54, 6.19, 7.87, 11.24 และ 11.23 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

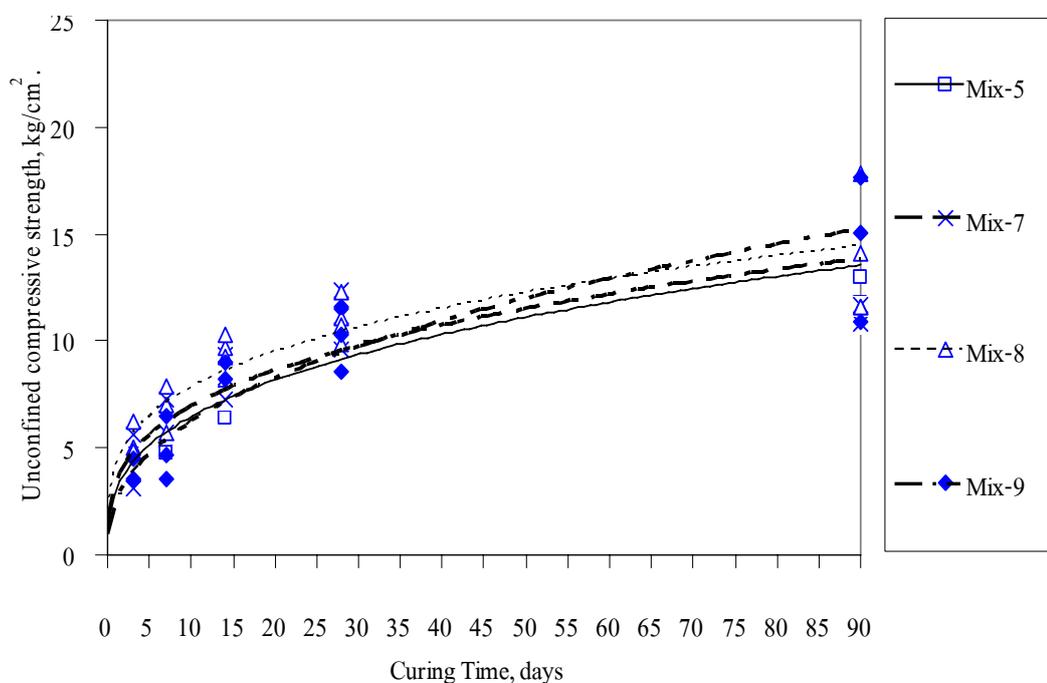
Mix-8 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์เท่ากับ 5.36, 6.85, 9.37, 10.97 และ 13.80 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

Mix-9 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์เท่ากับ 3.84, 4.93, 7.92, 10.16 และ 14.53 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

ตารางที่ 10 กำลังรับแรงอัดของดินตะกอนผสมซีเมนต์และซิลิกาฟูมที่อายุการบ่มต่างๆ

อัตราส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (kg/cm <sup>2</sup> )				
	อายุการบ่ม (วัน)				
	3	7	14	28	90
Mix-5	4.25	6.11	7.01	11.25	12.06
Mix-7	4.54	6.19	7.87	11.24	11.23
Mix-8	5.36	6.85	9.37	10.97	13.80
Mix-9	3.84	4.93	7.92	10.16	14.53

ภาพที่ 27 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ทุกอัตราส่วนผสม เช่นเดียวกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์เพียงชนิดเดียว โดยกำลัง ( $q_u$ ) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มน้อยๆ (3 วัน ถึง 14 วัน) ขณะที่กำลังจะเพิ่มขึ้นช้าลง ที่อายุการบ่มที่มากขึ้น (14 วัน ถึง 90 วัน) จากผลการทดสอบพบว่าซิลิกาฟุ่มมีผลต่อกำลังของดินตะกอนซีเมนต์ คือเมื่อใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นสารผสมเพิ่มเติมแทนซีเมนต์ให้ผลปรากฏว่าที่อายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน - 14 วัน) กำลังของดินตะกอนซีเมนต์มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนที่อายุการบ่มระยะยาว (14 วัน - 90 วัน) ดินตะกอนซีเมนต์ที่ผสมซิลิกาฟุ่มมีกำลังที่สูงกว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่ผสมด้วยซีเมนต์เพียงชนิดเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าที่อายุการบ่ม 90 วัน ปริมาณซิลิกาฟุ่มที่ผสมมากขึ้นส่งผลให้ดินตะกอนซีเมนต์มีกำลังสูงขึ้นด้วย

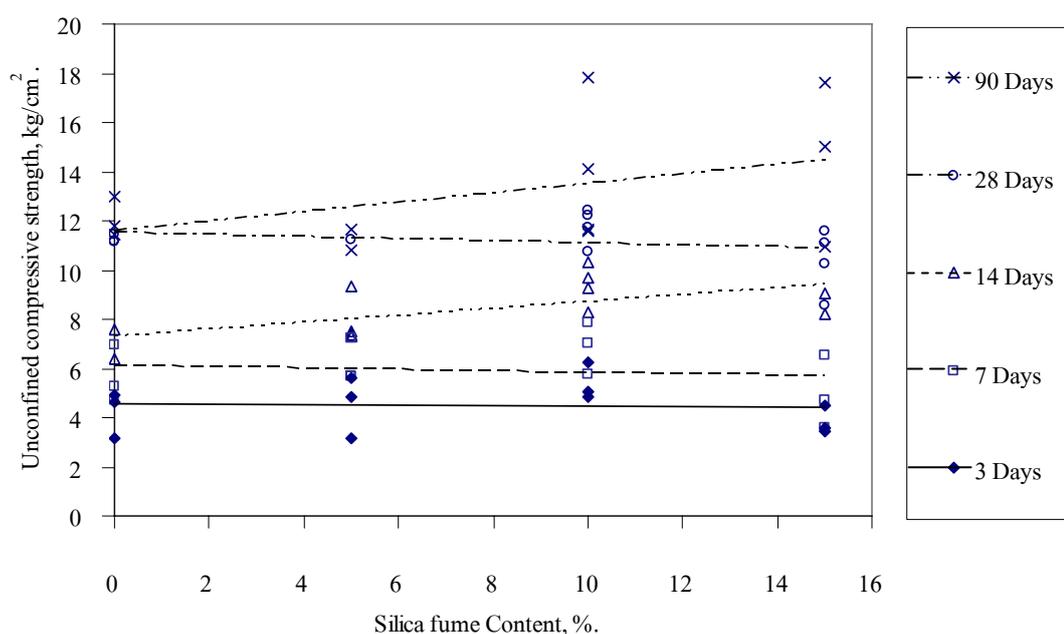


ภาพที่ 27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่มตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

นอกจากนั้นยังพบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังที่อายุการบ่มระยะสั้น มีความแตกต่างจากที่อายุการบ่มระยะยาวเล็กน้อย คือที่อายุการบ่มระยะสั้น Mix-9 มีการพัฒนา กำลังที่ช้ากว่าอัตราส่วนผสมอื่นๆ แต่ในทางกลับกันที่อายุการบ่มระยะยาว Mix-9 มีการพัฒนา กำลังที่สูงขึ้นกว่าอัตราส่วนผสมอื่นๆ ดังนั้น จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า นอกจากซิลิกาฟุ่มจะเป็น

สารช่วยเร่งให้เกิดกำลังในช่วงอายุการบ่มระยะสั้นแล้ว ยังมีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ที่อายุการบ่มระยะยาวอีกด้วย โดยช่วยทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์และसान โครงสร้างในดินตะกอนซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกับ Nontananandh et al. (2004) ที่ใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในดินซีเมนต์ ส่งผลให้มีกำลังที่สูงมากขึ้น ที่อายุการบ่มระยะยาว

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิกาฟุ้งกับการพัฒนา กำลัง แสดงในภาพที่ 28 พบว่าการเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ้งในดินตะกอนซีเมนต์มากขึ้น ส่งผลให้กำลังมีค่าแตกต่างกันในแต่ละอายุการบ่ม โดยที่อายุการบ่มช่วงต้น (3 วัน ถึง 28 วัน) โดยอัตราส่วนผสมส่วนใหญ่จะมีกำลังลดต่ำลงเล็กน้อย แต่การเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ้งมากขึ้น จะมีกำลังที่เพิ่มมากขึ้นในระยะยาว (90 วัน) เป็นการสนับสนุนแนวคิดของการเพิ่มปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้น เมื่อปริมาณซิลิกาฟุ้งในดินตะกอนซีเมนต์มีมากขึ้น



ภาพที่ 28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณซิลิกาฟุ้งของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ้งที่อายุการบ่มต่างๆ

## 2.2.2 ความชื้นน้ำของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์และซิลิกาฟูม

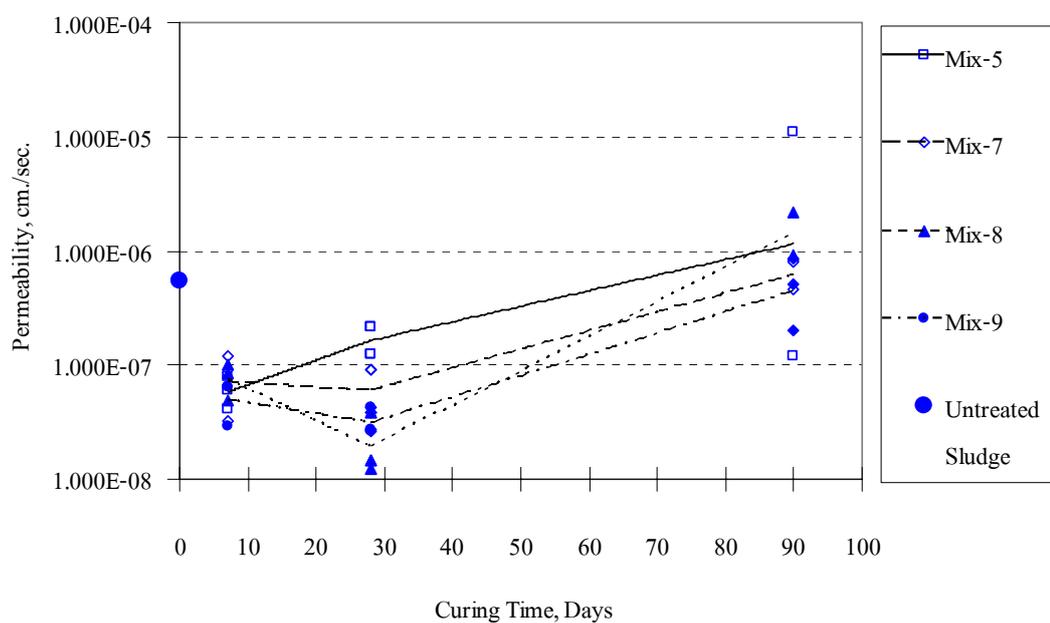
จากผลการทดสอบความชื้นน้ำ (permeability tests) ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมแทนซีเมนต์บางส่วน (Mix-7, Mix-8 และ Mix-9) ที่อายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน และ 28 วัน) ดังแสดงในตารางที่ 11 พบว่าทุกอัตราส่วนผสมมีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำลดลงจากค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินก่อนการปรับปรุง เช่นเดียวกับดินตะกอนซีเมนต์ที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ และหากเปรียบเทียบกับดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมซิลิกาฟูมแทนซีเมนต์บางส่วน (Mix-5) ได้ผลปรากฏว่าดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมแทนซีเมนต์บางส่วนมีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำต่ำกว่า โดยเฉพาะที่อายุการบ่ม 28 วัน จะลดลงต่ำกว่า Mix-5 อย่างเห็นได้ชัดเจน แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว (90 วัน) ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์ ทั้งที่ผสมและไม่ได้ผสมซิลิกาฟูม ทุกอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

ตารางที่ 11 ค่าความชื้นน้ำเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่อายุการบ่มต่างๆ

อัตราส่วนผสม	ความชื้นน้ำ (cm/sec)		
	อายุการบ่ม (วัน)		
	7	28	90
Mix-5	$6.000 \times 10^{-8}$	$1.708 \times 10^{-7}$	$5.605 \times 10^{-6}$
Mix-7	$8.109 \times 10^{-8}$	$6.526 \times 10^{-8}$	$6.371 \times 10^{-7}$
Mix-8	$7.820 \times 10^{-8}$	$2.188 \times 10^{-8}$	$1.545 \times 10^{-6}$
Mix-9	$5.276 \times 10^{-8}$	$3.176 \times 10^{-8}$	$5.229 \times 10^{-7}$

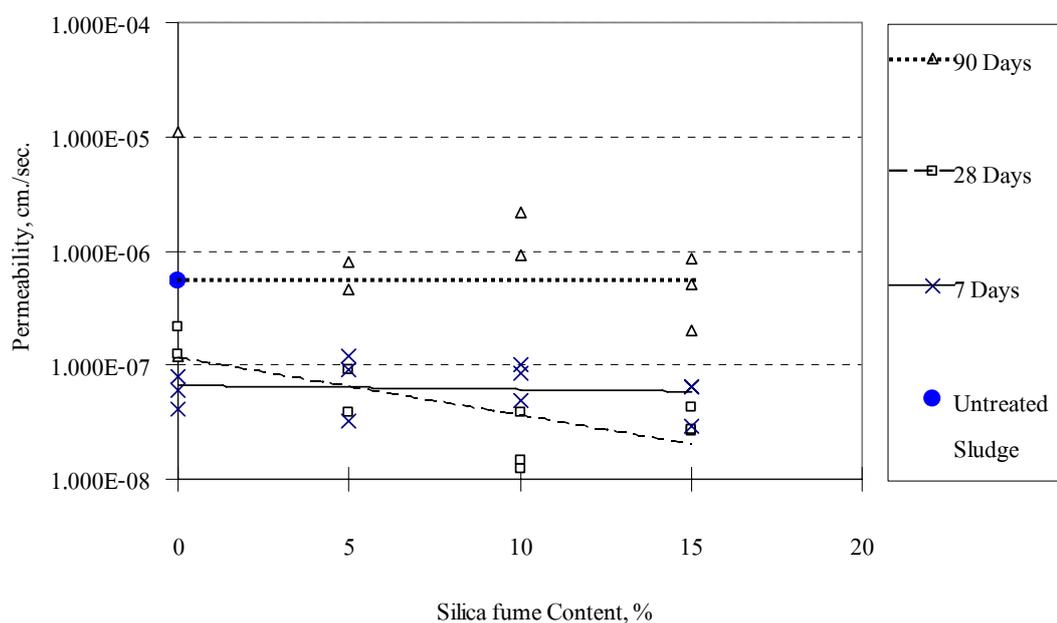
หมายเหตุ ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินตะกอนก่อนการปรับปรุงเท่ากับ  $5.379 \times 10^{-7}$  cm/sec

จากการพิจารณาผลการทดสอบความชื้นน้ำ เมื่ออายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น พบว่าที่อายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน เป็น 28 วัน) ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำดินตะกอนซีเมนต์ผสมซีลีกาฟุ่มแทนซีเมนต์บางส่วนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว (28 วัน เป็น 90 วัน) จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำดินตะกอนซีเมนต์ผสมซีลีกาฟุ่มแทนซีเมนต์ส่วนใหญ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 8 - 10 เท่า โดยจะมีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกับผลของการปรับปรุงดินตะกอนทะเลด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ดังแสดงภาพที่ 29



ภาพที่ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสม ซีลีกาฟุ่มตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณซิลิกาฟุ้ง ที่อายุการบ่มต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 30 ได้พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ้งมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีแนวโน้มคงที่หรือลดลงเล็กน้อย โดยเฉพาะที่อายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน ถึง 28 วัน) หากพิจารณาที่อายุการบ่มระยะยาว (90 วัน) ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำยังคงมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินตะกอนทะเลที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพทางเคมี



ภาพที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำกับปริมาณซิลิกาฟุ้งของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ้งที่อายุการบ่มต่างๆ

### 2.2.3 การหดตัวของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซัลโฟกาฟูม

จากการทดสอบหาค่าการหดตัวเชิงเส้น (Linear Shrinkage Test) ของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์ผสมซัลโฟกาฟูมแทนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric Shrinkage) ผลการทดลองสรุปดังตารางที่ 12 พบว่าเมื่อนำดินผสมกับซีเมนต์ที่ผสมซัลโฟกาฟูมมาผสมในอัตราส่วนผสมต่างๆ จะมีค่าการหดตัวลดลงมากกว่าดินตะกอนธรรมชาติและดินตะกอนผสมซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมซัลโฟกาฟูม

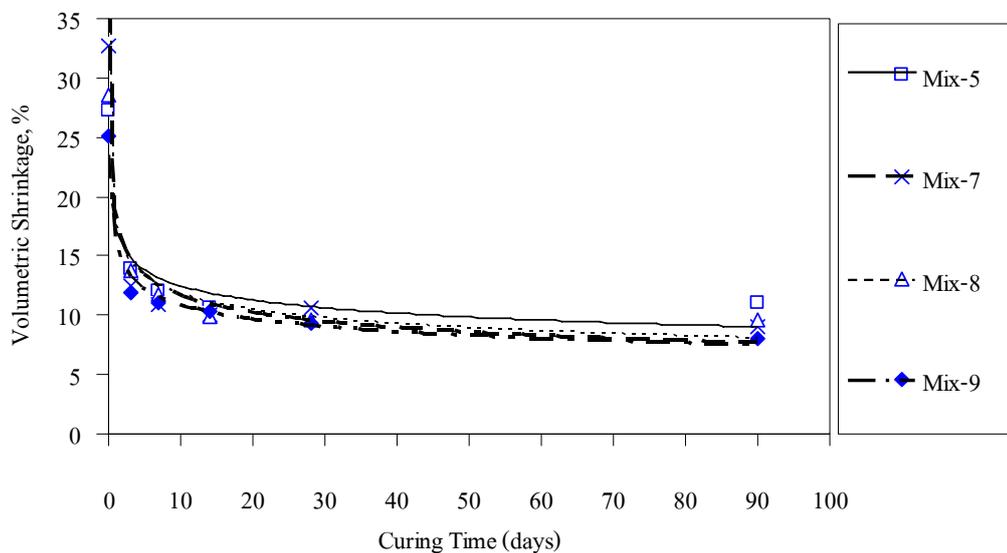
ตารางที่ 12 ค่าการหดตัวเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซัลโฟกาฟูมในอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่อายุการบ่มต่างๆ

อัตราส่วนผสม	การหดตัว (%)					
	อายุการบ่ม (วัน)					
	0	3	7	14	28	90
Mix-5	27.206	13.921	12.043	10.600	10.402	10.997
Mix-7	32.678	12.495	10.896	9.981	10.674	8.981
Mix-8	28.491	13.785	11.743	9.920	9.580	9.583
Mix-9	25.165	11.847	11.055	10.367	9.352	8.029

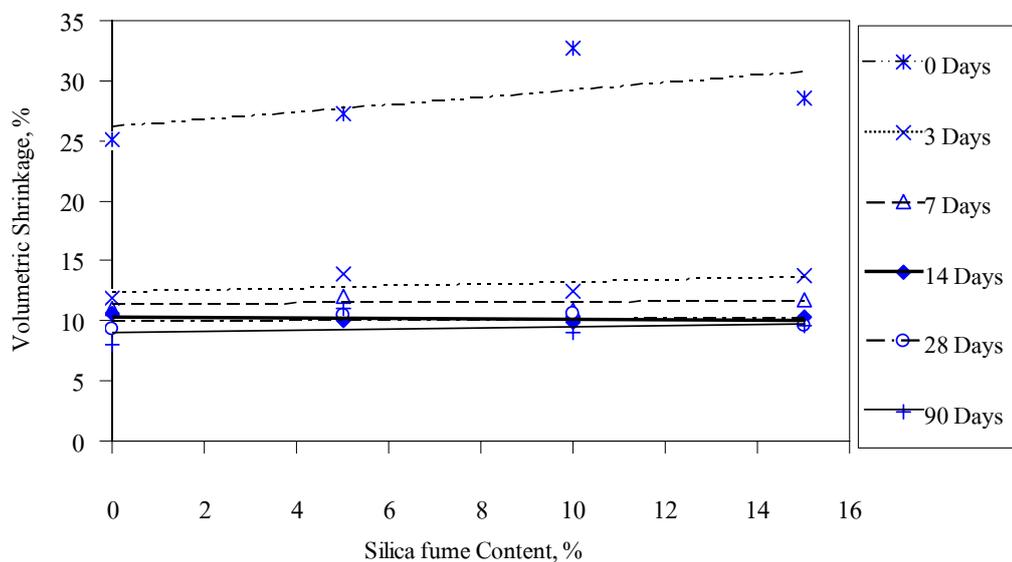
หมายเหตุ ค่าการหดตัวของดินตะกอนทะเลก่อนการปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 61.539%

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบการหดตัวที่อายุการบ่มต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 31 พบว่าเมื่อเพิ่มอายุการบ่มมากขึ้น ค่าการหดตัวมีแนวโน้มลดลงทุกอัตราส่วนผสม ทั้งดินตะกอนซีเมนต์ที่ผสมและไม่ได้ผสมซัลโฟกาฟูม โดยที่อายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน ถึง 7 วัน) ค่าการหดตัวจะมีค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ที่อายุการบ่มระยะยาว (14 วัน ถึง 90 วัน) แสดงว่าในช่วงต้นดินตะกอนซีเมนต์มีการทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องรวดเร็ว มีอัตราการทำปฏิกิริยาลดลงตามอายุการบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซัลโฟกาฟูม ซึ่งได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้ว อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาโดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหด

ตัวกับปริมาณซิลิกาฟุ้งที่อายุการบ่มต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ้งที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลทำให้ค่าการหดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างชัดเจนแต่อย่างใด ดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ้ง ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ



ภาพที่ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับปริมาณซิลิกาฟุ้งของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ้งที่อายุการบ่มต่างๆ

## 2.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์และทราย

### 2.3.1 การพัฒนากำลังของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์และทราย

จากผลการทดสอบดินตะกอนซีเมนต์ไม่ผสมทราย (Mix-2) และดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-10, Mix-11 และ Mix-12 ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่ความชื้นในดินก่อนผสมเท่ากับ 109% โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงเท่ากับ  $125 \text{ kg/m}^3$  และเติมทราย 0%, 5%, 10% และ 15% ของปริมาณดินตามลำดับ เมื่อทดสอบกำลัง  $q_u$  ที่อายุการบ่มต่างๆ สามารถสรุปดังตารางที่ 13 พบว่า

Mix-2 ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์เท่ากับ 2.21, 2.67, 3.42 และ  $4.85 \text{ kg/cm}^2$  ตามลำดับ

Mix-10 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์เท่ากับ 1.78, 2.86, 3.43, 4.27 และ  $6.52 \text{ kg/cm}^2$  ตามลำดับ

Mix-11 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์เท่ากับ 1.28, 2.70, 3.39, 3.88 และ  $5.81 \text{ kg/cm}^2$  ตามลำดับ

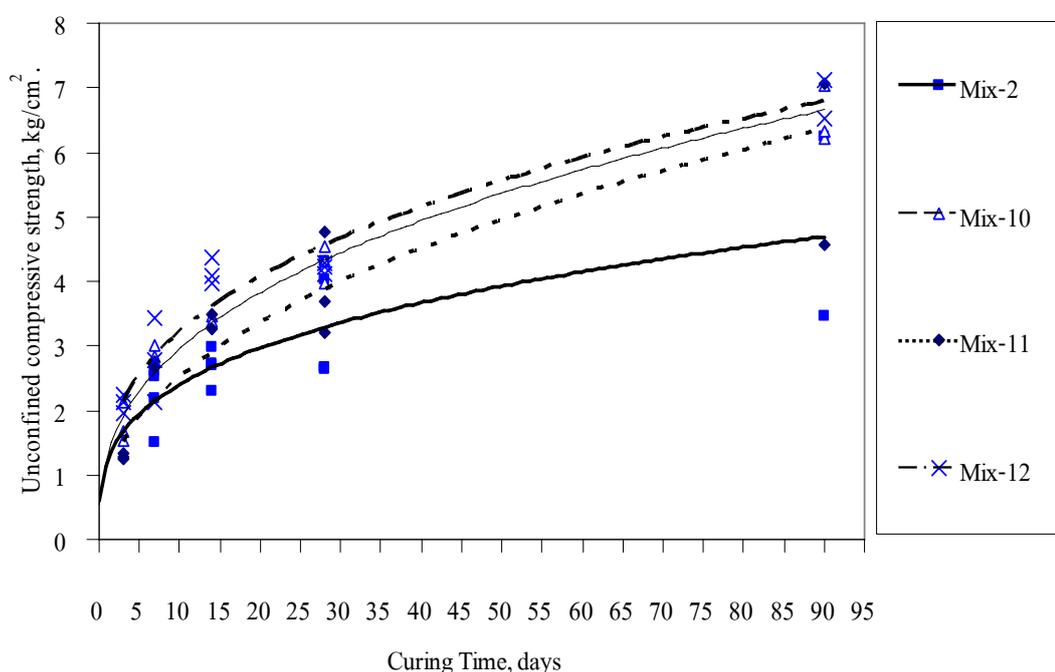
Mix-12 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่ากำลังเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์เท่ากับ 2.11, 2.78, 4.15, 4.21 และ  $6.83 \text{ kg/cm}^2$  ตามลำดับ

ตารางที่ 13 กำลังรับแรงอัดของดินตะกอนผสมซีเมนต์และทรายที่อายุการบ่มต่างๆ

อัตราส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )				
	อายุการบ่ม (วัน)				
	3	7	14	28	90
Mix-2	N/A	2.21	2.67	3.42	4.85
Mix-10	1.78	2.86	3.43	4.27	6.52
Mix-11	1.28	2.70	3.39	3.88	5.81
Mix-12	2.11	2.78	4.15	4.21	6.83

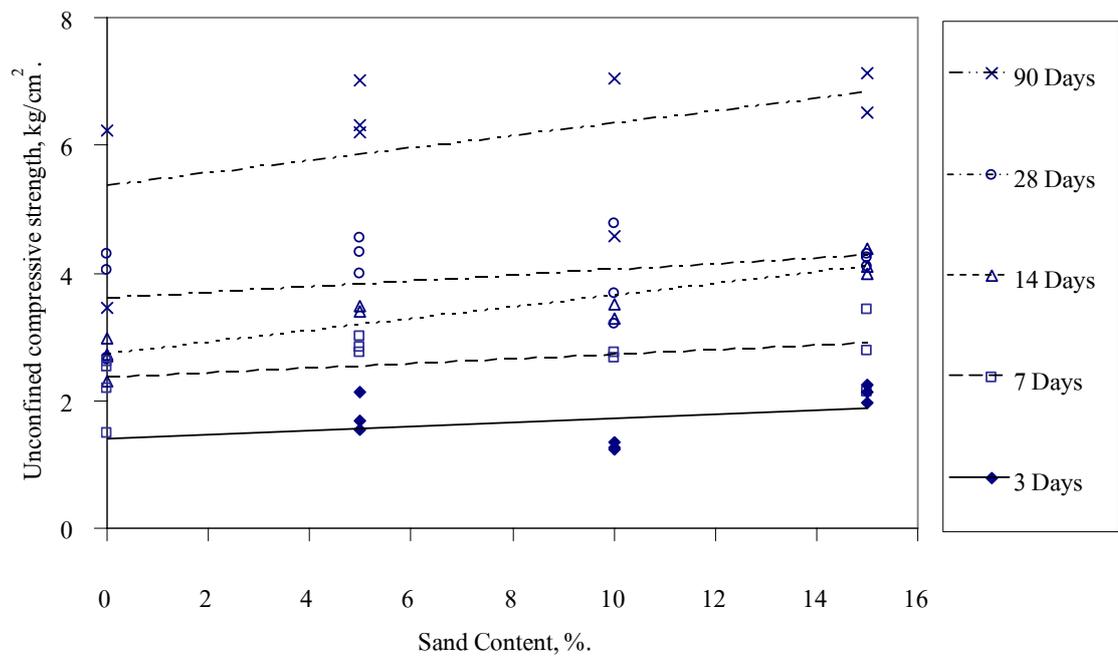
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย พบว่า ค่า Unconfined Compressive Strength ( $q_u$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มทุกอัตราส่วนผสม โดยกำลัง ( $q_u$ ) จะเพิ่มขึ้นมากอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มน้อยๆ (3 วัน ถึง 14 วัน) ขณะที่กำลังจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างช้าๆที่อายุการบ่มที่มากขึ้น (14 วัน ถึง 90 วัน) ดังแสดงในภาพที่ 33 จะเห็นได้ว่าดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายมีแนวโน้มการพัฒนากำลังมีลักษณะคล้ายกับดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ผสมทราย ทั้งนี้เชื่อว่าเป็นผลมาจากดินซีเมนต์มีความชื้นเริ่มต้นที่ลดลง ทำให้ค่า w/c ratio มีค่าลดต่ำลง ดังจะได้กล่าวถึงต่อไปในเรื่องกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ดังนั้น จากการศึกษาการพัฒนากำลังของดินตะกอนผสมซีเมนต์เพิ่มเติมในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น ผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Suksiritawonkul (2007) คือการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่อายุการบ่มระยะสั้น และจากการศึกษานี้พบว่าที่อายุการบ่มระยะยาว (90 วัน) กำลังจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



ภาพที่ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับอายุการบ่ม ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปริมาณทรายกับผลของการพัฒนา กำลัง ดังแสดงในภาพที่ 34 พบว่าการเพิ่มปริมาณทรายในดินตะกอนซีเมนต์มากขึ้น ส่งผลให้กำลัง มีค่าคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่อายุการบ่มต่างๆ



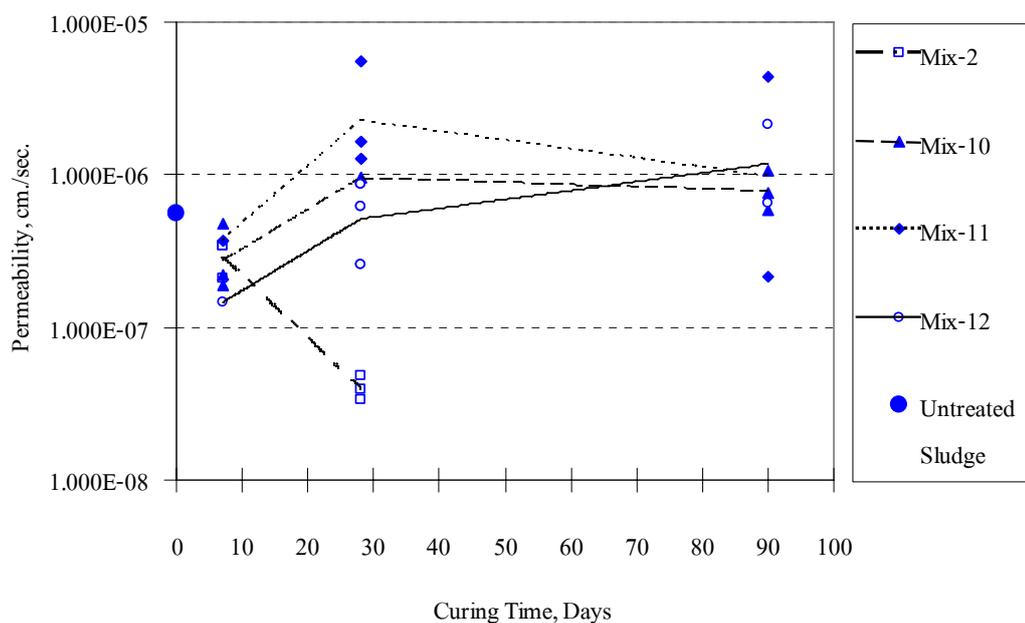
ภาพที่ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณทราย ของดิน ตะกอนซีเมนต์ผสมทราย ที่อายุการบ่มต่างๆ

### 2.3.2 ความชื้นน้ำของดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์และทราย

จากผลการทดสอบความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายได้แก่ Mix-10, Mix-11 และ Mix-12 ดังแสดงในตารางที่ 14 ที่อายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) พบว่าทุกอัตราส่วนผสมมีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำลดต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพเพียงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ผลปรากฏว่าค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย (ประมาณ 4 - 5 เท่า) ที่ทุกอัตราส่วนผสม และหากเปรียบเทียบกับดินตะกอนซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมเดียวกันโดยไม่ได้ผสมทราย (Mix-2) พบว่าดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายมีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำสูงกว่า (ประมาณ 10 - 15 เท่า) นอกจากนี้ยังพบว่าที่อายุการบ่มระยะยาว (90 วัน) ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย ทั้งที่อัตราส่วนทราย 5% และ 10% มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่อัตราส่วนผสมทราย 15% ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงขึ้นจากที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณ 10 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 35

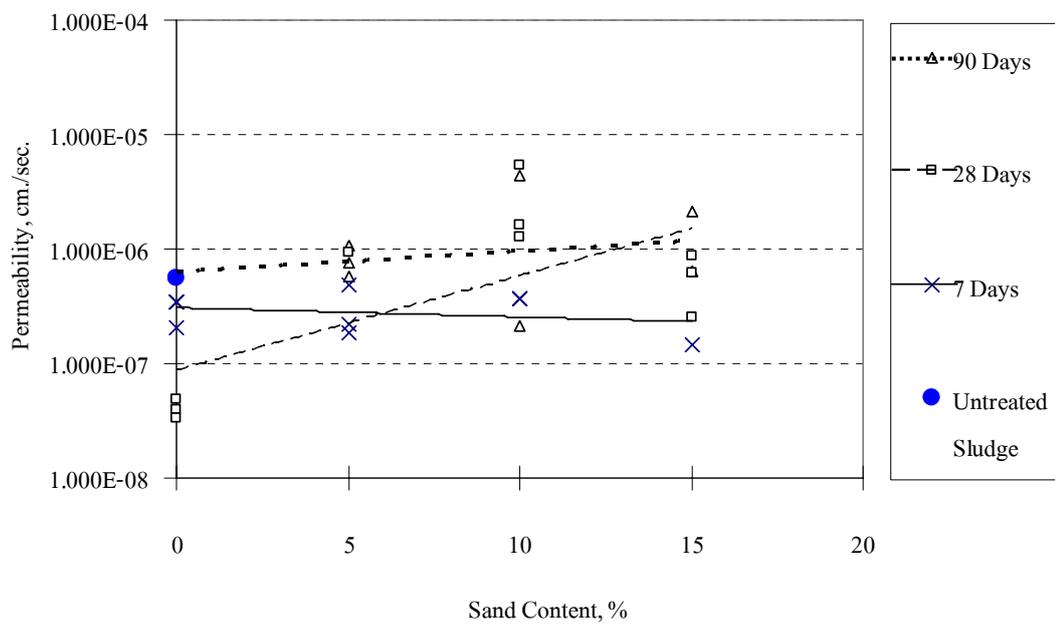
ตารางที่ 14 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่อายุการบ่มต่างๆ

	ความชื้นน้ำ (cm/sec)		
	อายุการบ่ม (วัน)		
อัตราส่วนผสม	7	28	90
Mix-2	$2.978 \times 10^{-7}$	$4.026 \times 10^{-8}$	N/A
Mix-10	$2.951 \times 10^{-7}$	$9.459 \times 10^{-7}$	$8.020 \times 10^{-7}$
Mix-11	$3.722 \times 10^{-7}$	$2.795 \times 10^{-6}$	$2.313 \times 10^{-6}$
Mix-12	$1.457 \times 10^{-7}$	$5.779 \times 10^{-7}$	$1.398 \times 10^{-6}$



ภาพที่ 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำกับปริมาณทรายที่ผสมในดินตะกอนซีเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 36 พบว่า ที่อายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) เมื่อเพิ่มปริมาณทรายทำให้ความชื้นน้ำมีค่าคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) เมื่อเพิ่มปริมาณทราย ค่าความชื้นน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เชื่อว่าเกิดจากผลของการผสมทรายลงในดินซีเมนต์ แม้ว่าทำให้มีขนาดคละที่ดีขึ้น แต่การที่ดินตะกอนซีเมนต์มีขนาดคละที่ใหญ่ขึ้น โครงสร้างภายในดินจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคทรายบางส่วนที่แทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคดินเหนียวที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและไม่ได้ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียส ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีค่าความชื้นน้ำที่สูงขึ้น ตามลำดับ



ภาพที่ 36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นน้ำกับปริมาณทรายของดินตะกอนซีเมนต์ผสม ทรายที่อายุการบ่มต่างๆ

### 2.3.3 การหดตัวของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย

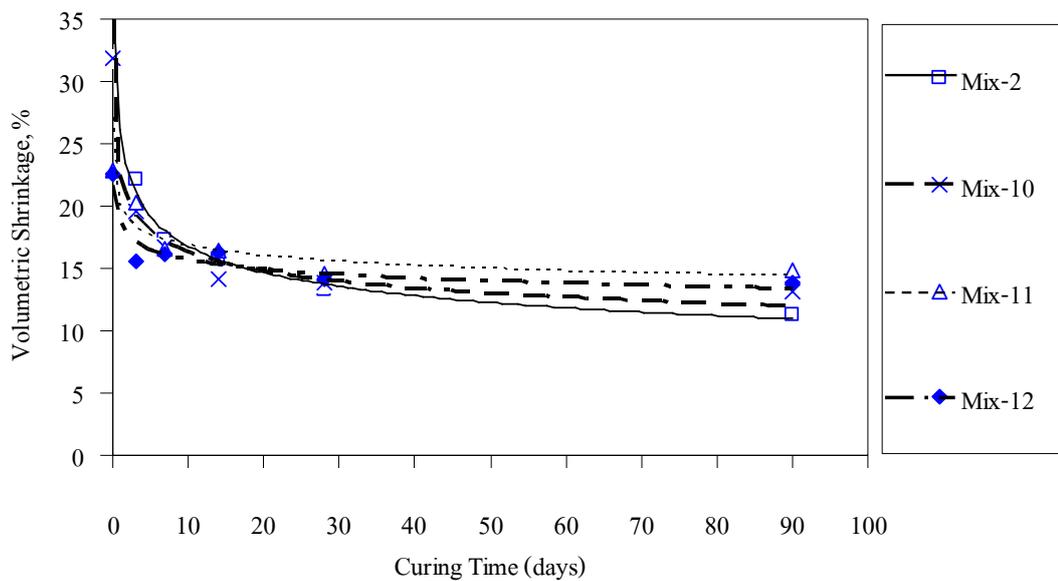
จากการทดสอบหาค่าการหดตัวเชิงเส้น (Linear Shrinkage Test) ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย โดยการแปลงค่าเป็นการหดตัวเชิงปริมาตร พบว่าเมื่อนำดินตะกอนซีเมนต์ที่ผสมทรายในอัตราส่วนผสมต่างๆ พบว่าค่าการหดตัวลดลงจากค่าการหดตัวของดินตะกอนธรรมชาติ ตามผลการทดลองสรุปดังตารางที่ 15

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบการหดตัวตามอายุการบ่ม แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอายุการบ่มมากขึ้น ค่าการหดตัวมีแนวโน้มลดลงทุกอัตราส่วนผสมทั้งดินตะกอนซีเมนต์ที่ผสมและไม่ได้ผสมทราย ค่าการหดตัวจะมีค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มระยะสั้น 3 วัน ถึง 7 วัน โดยเฉพาะ Mix-12, Mix-11 และ Mix-10 จะมีค่าการหดตัวลดลงต่ำกว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทราย (Mix-2) แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว 14 วันถึง 90 วัน ซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทราย (Mix-2) มีแนวโน้มลดต่ำลงและต่ำกว่า Mix-10, Mix-11 และ Mix-12 ประมาณ 2% - 3% ที่อายุ 90 วัน ดังแสดงในภาพที่ 37 และภาพที่ 38

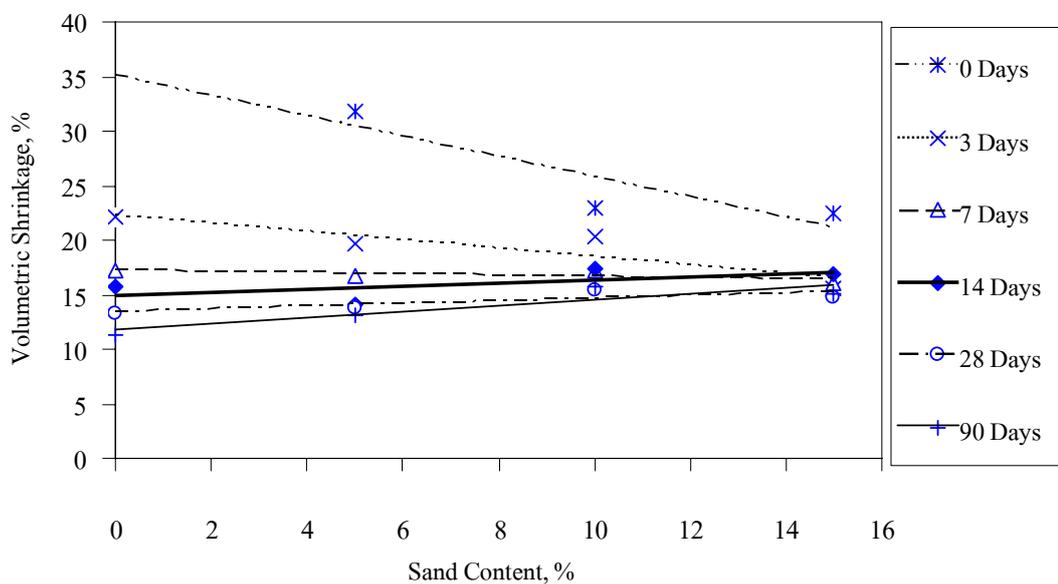
**ตารางที่ 15** ค่าการหดตัวเฉลี่ยของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายในอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่อายุการบ่มต่างๆ

อัตราส่วนผสม	การหดตัว (%)					
	อายุการบ่ม (วัน)					
	0	3	7	14	28	90
Mix-2	N/A	22.089	17.215	15.679	13.311	11.302
Mix-10	31.847	19.634	16.756	14.145	13.845	13.153
Mix-11	22.870	20.274	16.590	16.393	14.557	14.834
Mix-12	22.535	15.616	16.079	16.346	14.178	13.794

**หมายเหตุ** ค่าการหดตัวของดินตะกอนทะเลก่อนการปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 61.539%



ภาพที่ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายตามอัตราส่วนผสมต่างๆ



ภาพที่ 38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับปริมาณทรายของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายที่อายุการบ่มต่างๆ

## กลไกการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ จากปฏิกิริยาเคมีของดินตะกอนทะเลหลังการปรับปรุงคุณภาพ

งานวิจัยในส่วนนี้มีเป้าหมายเพื่อทำให้เกิดความเข้าใจในปฏิกิริยาเคมีของดินซีเมนต์ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญที่สามารถนำไปอธิบายกลไกของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลได้ โดยเน้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นและการเกิดสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมีของดินตะกอนซีเมนต์ด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD) ภาพที่ 39 แสดงเครื่องทดสอบและอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างสำหรับดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์และสารผสมเพิ่ม ได้แก่ ซิลิกาฟูมและทราย ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่อายุการบ่มต่างๆ การวิเคราะห์ XRD จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบในดินตะกอนซีเมนต์ที่สัดส่วนผสมต่างๆและที่อายุการบ่มต่างๆ ที่ตำแหน่ง d - spacing ต่างๆกัน โดยสารตั้งต้นของปฏิกิริยา คือ  $C_3S$  (3.50 Å) และสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา ได้แก่ CSH (3.02 Å) และ Ettringite (3.88 Å)

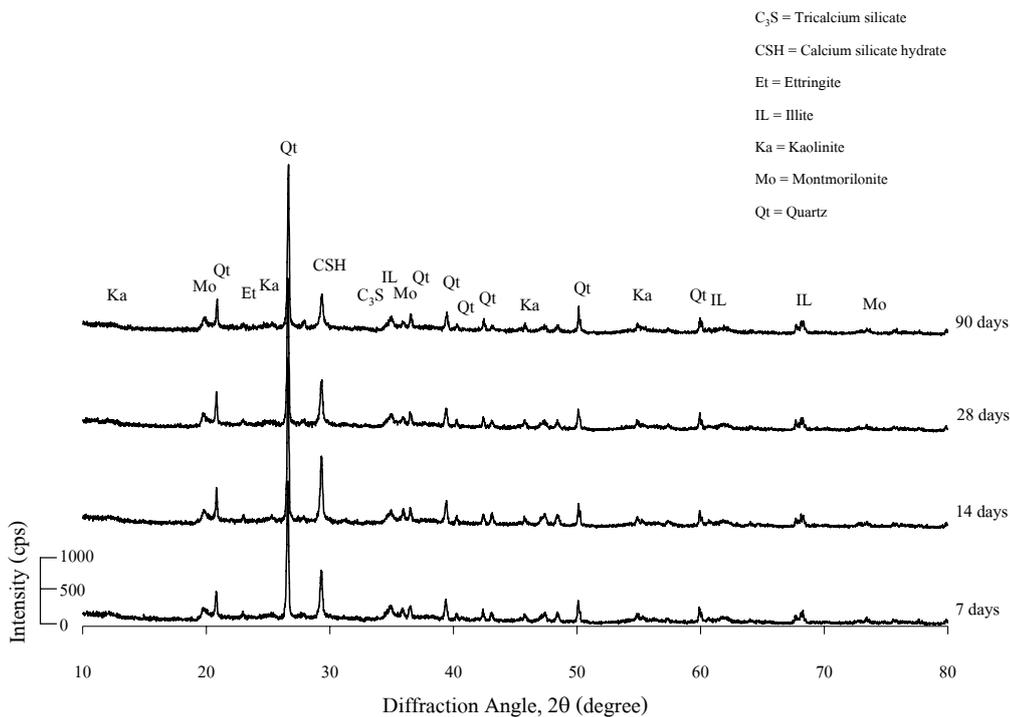


ภาพที่ 39 เครื่องทดสอบ X-ray Diffraction (XRD) และอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง

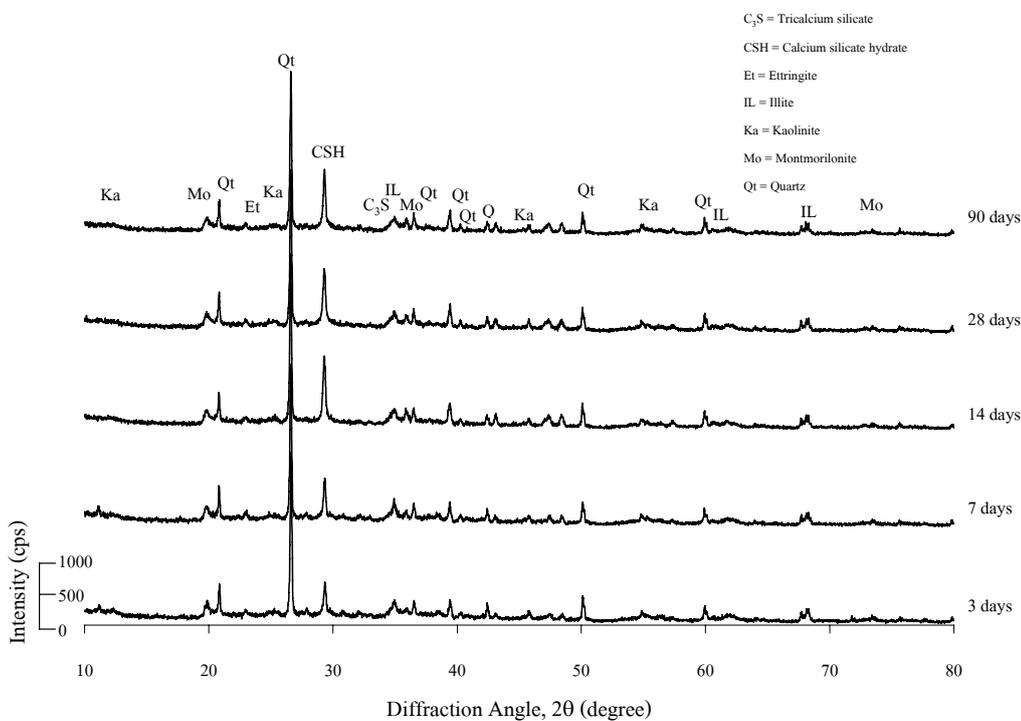
## 1. ผลการทดสอบ XRD ของดินตะกอนซีเมนต์

จากผลการวิเคราะห์ XRD ของดินตะกอนทะเลที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมซีเมนต์ จะสามารถพบสารผลิตภัณฑ์หลัก เช่น CSH และ Ettringite เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ดังแสดงในภาพที่ 40 (รูปแบบ XRD ของกลุ่มดินซีเมนต์ที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำ มีปริมาณซีเมนต์ต่ำถึงปานกลาง) และภาพที่ 41 (รูปแบบ XRD ของกลุ่มดินซีเมนต์ที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง มีปริมาณซีเมนต์ปานกลางถึงสูง) ทั้งนี้รูปแบบ XRD ของอัตราส่วนผสมอื่นๆ สามารถดูได้ที่ภาคผนวก

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารต่างๆ ได้แก่ การลดลงของ  $C_3S$  และการเพิ่มขึ้นของ CSH - Ettringite จะเห็นได้ชัดเจนว่ามีความสัมพันธ์กับปริมาณซีเมนต์ และปริมาณน้ำในอัตราส่วนผสม ซึ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์โดยตรง โดยทำให้คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยเฉพาะการพัฒนากำลัง สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 16 และ 17 จะสามารถเห็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารต่างๆกับการพัฒนา กำลัง เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น และจากการสังเกตรูปแบบ XRD ของดินตะกอนซีเมนต์พบว่ามี การเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบ XRD ของดินตะกอนธรรมชาติ โดยจะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้จากการเพิ่มขึ้นของ CSH และ Ettringite ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kamon and Nontananandh (1990, 1991)



ภาพที่ 40 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-3 จากการทดสอบ XRD



ภาพที่ 41 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-4 จากการทดสอบ XRD

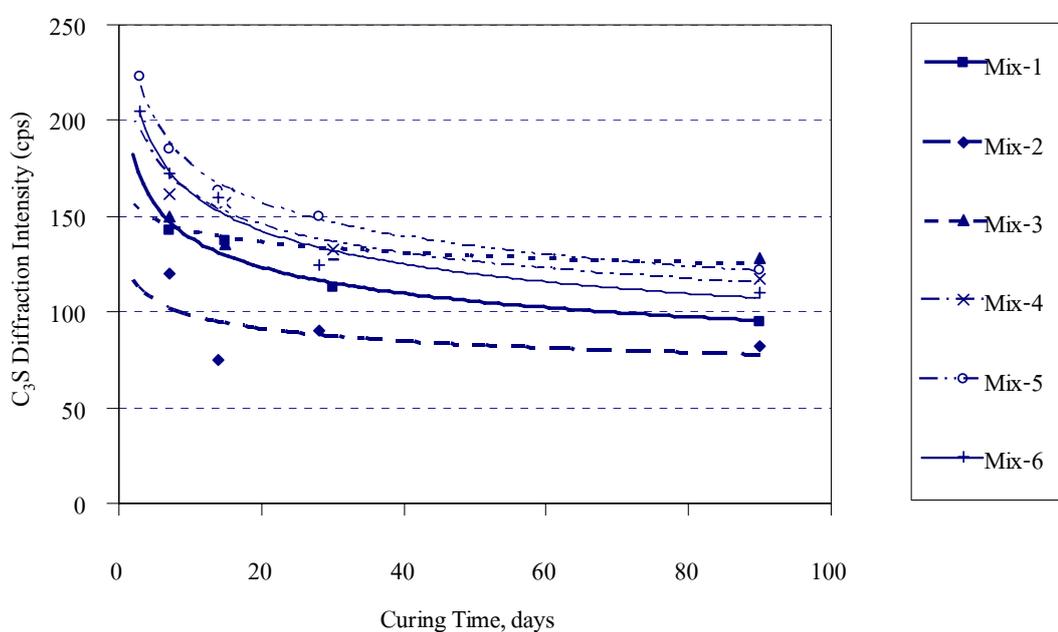
**ตารางที่ 16** กำลังรับแรงอัด ปริมาณสารตั้งต้น  $C_3S$  และสารผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาเคมีของดินตะกอนซีเมนต์สำหรับ Mix-1, Mix-2 และ Mix-3 ที่ความชื้นในดินก่อนผสม 109% ที่อายุการบ่มต่างๆ

Mix No.	Curing Time (days)	$C_3S$ Intensity (cps)	CSH Intensity (cps)	Ettringite Intensity (cps)	$q_u$ ( $kg/cm^2$ )
Mix-1	3	N/A	N/A	N/A	N/A
	7	143	838	240	1.00
	14	137	715	208	1.20
	28	113	667	188	1.47
	90	95	693	210	2.09
Mix-2	3	N/A	N/A	N/A	N/A
	7	191	234	254	2.21
	14	119	154	149	2.67
	28	143	226	258	3.42
	90	130	798	262	4.85
Mix-3	3	N/A	N/A	N/A	N/A
	7	150	868	225	2.70
	14	135	1143	230	3.97
	28	130	825	217	5.01
	90	128	855	213	5.10

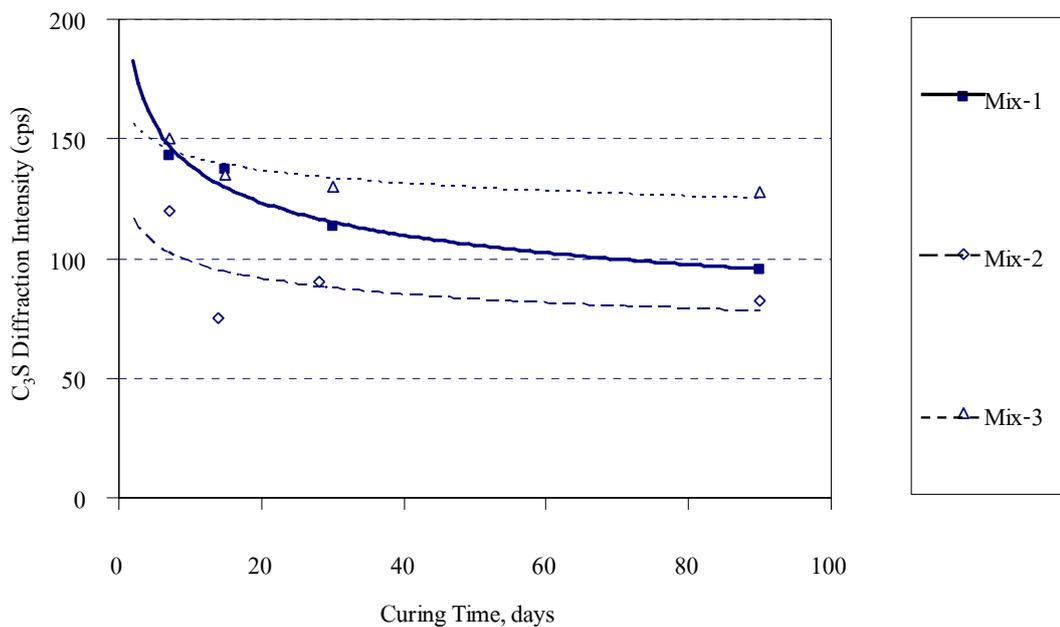
ตารางที่ 17 กำลังรับแรงอัด ปริมาณสารตั้งต้น  $C_3S$  และสารผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาเคมีของดินตะกอนซีเมนต์สำหรับ Mix-4, Mix-5 และ Mix-6 ที่ความชื้นในดินก่อนผสม 138% ที่อายุการบ่มต่างๆ

Mix No.	Curing Time (days)	$C_3S$ Intensity (cps)	CSH Intensity (cps)	Ettringite Intensity (cps)	$q_u$ ( $kg/cm^2$ )
Mix-4	3	202	662	237	2.91
	7	162	773	278	4.92
	14	157	1160	225	5.59
	28	133	1020	233	6.40
	90	117	1055	230	8.85
Mix-5	3	223	727	257	4.25
	7	185	1023	263	6.11
	14	163	1120	225	7.01
	28	150	1103	310	11.25
	90	122	950	232	12.06
Mix-6	3	205	667	295	8.01
	7	172	923	235	10.61
	14	160	932	268	13.77
	28	125	975	240	14.02
	90	110	973	237	19.89

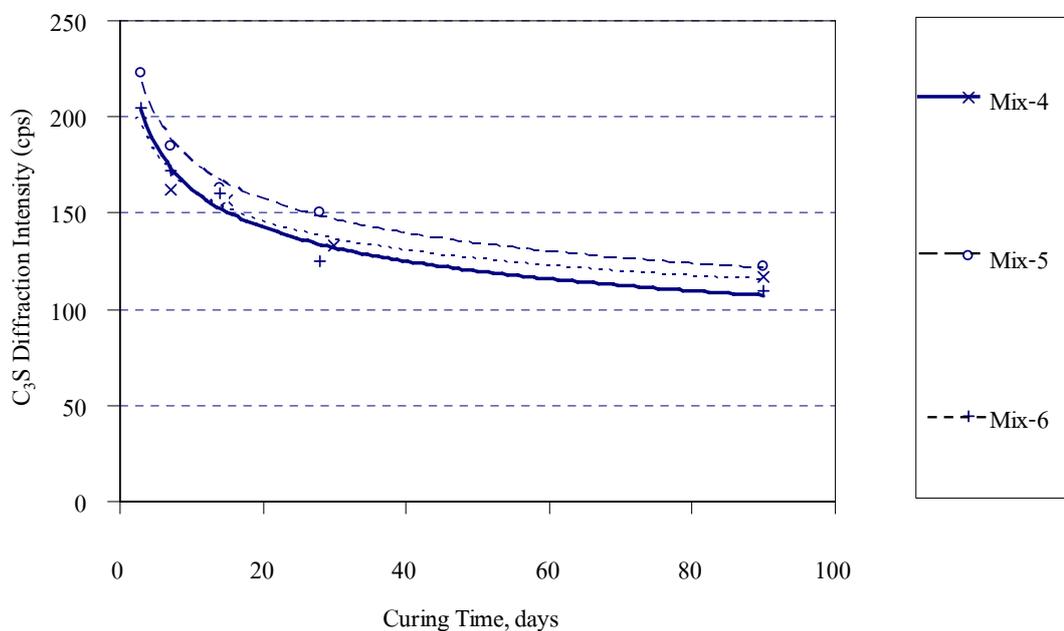
จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ  $C_3S$  กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1, Mix-2, Mix-3, Mix-4, Mix-5 และ Mix-6 ดังแสดงในภาพที่ 42, 43 และ 44 พบว่าปริมาณ  $C_3S$  ลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นทุกอัตราส่วนผสม โดยในช่วงอายุการบ่มช่วงต้น  $C_3S$  จะมีการลดลงในปริมาณที่ค่อนข้างมาก แต่ในช่วงอายุการบ่มที่มากขึ้น อัตราการลดลงของ  $C_3S$  จะลดลงและเข้าสู่สภาวะคงที่ นอกจากนี้ยังพบว่าสารตั้งต้น  $C_3S$  มีปริมาณเริ่มต้นไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์เริ่มต้นของแต่ละอัตราส่วนผสม โดยอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ปานกลางถึงสูง (Mix-4, Mix-5 และ Mix-6) จะมีปริมาณ  $C_3S$  สูงกว่าอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำถึงปานกลาง (Mix-1, Mix-2 และ Mix-3) ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้น  $C_3S$  กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสม



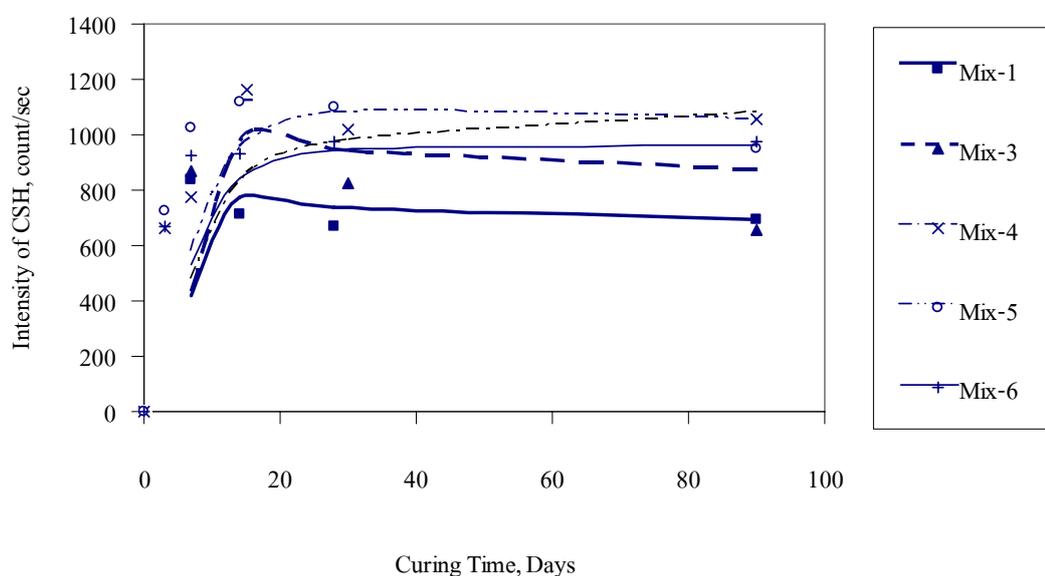
ภาพที่ 43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้น  $C_3S$  กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ ที่ความชื้นก่อนผสม 109%



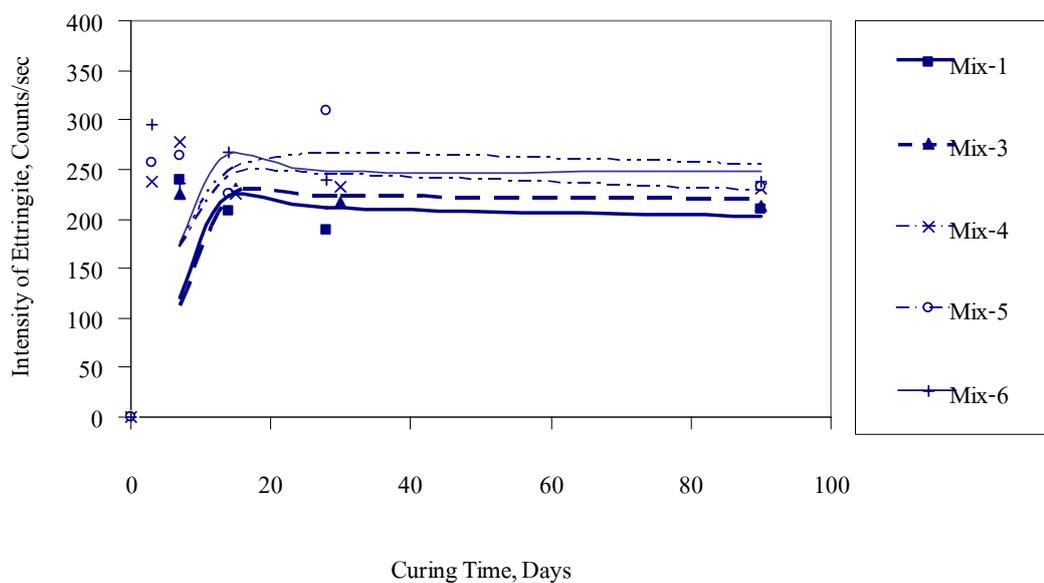
ภาพที่ 44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้น  $C_3S$  กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ ที่ความชื้นก่อนผสม 138%

จากภาพที่ 45 พบว่า ดินตะกอนซีเมนต์แต่ละอัตราส่วนจะมีปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH ที่แตกต่างกัน โดยในช่วงอายุการบ่มน้อยๆ กลุ่มของอัตราส่วนผสมที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าและมีปริมาณซีเมนต์ต่ำถึงปานกลาง (Mix-1 และ Mix-3) จะมีแนวโน้มของการเกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH ที่น้อยกว่ากลุ่มของอัตราส่วนผสมที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่าและมีปริมาณซีเมนต์ปานกลางถึงมาก (Mix-4 , Mix-5 และ Mix-6) ยกเว้นอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ที่ใกล้เคียงกันจะมีปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH ที่ใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงอายุการบ่มระยะยาว กลุ่มของอัตราส่วนผสมที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าและมีปริมาณซีเมนต์น้อยกว่า (Mix-1 และ Mix-3) จะมีปริมาณ CSH ที่น้อยกว่ากลุ่มของอัตราส่วนผสมที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่าและมีปริมาณซีเมนต์มากกว่า (Mix-4 , Mix-5 และ Mix-6) ทุกอัตราส่วนผสม

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite กับอายุการบ่ม มีความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ของสารผลิตภัณฑ์ CSH กับอายุการบ่ม คือ ในทุกๆช่วงอายุการบ่ม ปริมาณ Ettringite ของอัตราส่วนผสมที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าและมีปริมาณซีเมนต์น้อยกว่า (Mix-1 และ Mix-3) จะมีปริมาณ Ettringite ที่ต่ำกว่ากลุ่มของอัตราส่วนผสมที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่าและมีปริมาณซีเมนต์มากกว่า (Mix-4, Mix-5 และ Mix-6) ทุกอัตราส่วนผสม ดังภาพที่ 46

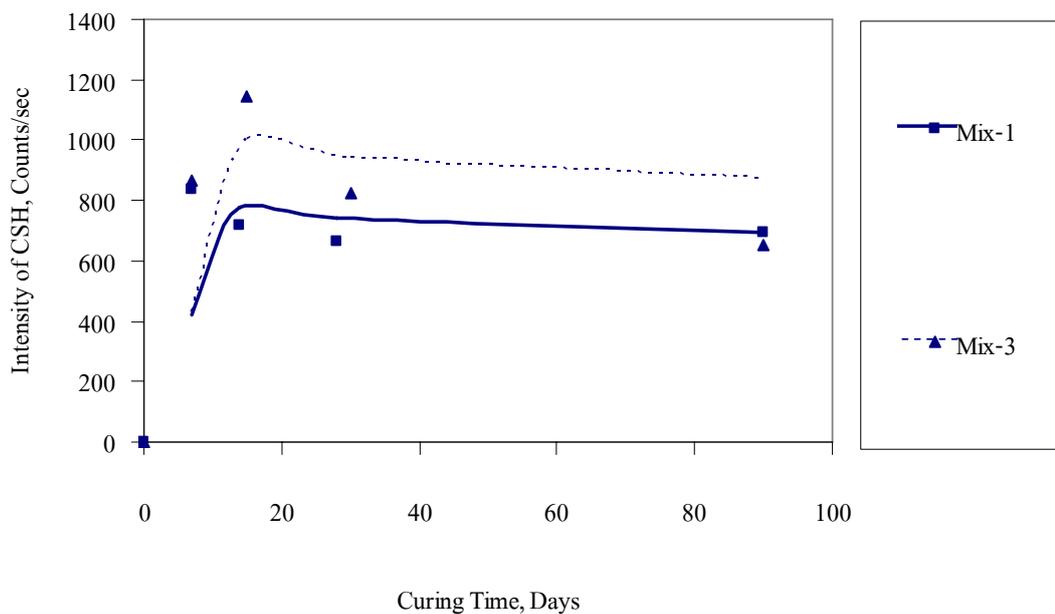


ภาพที่ 45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH กับอายุการบ่ม ของดินตะกอนซีเมนต์รวมทุกอัตราส่วนผสม

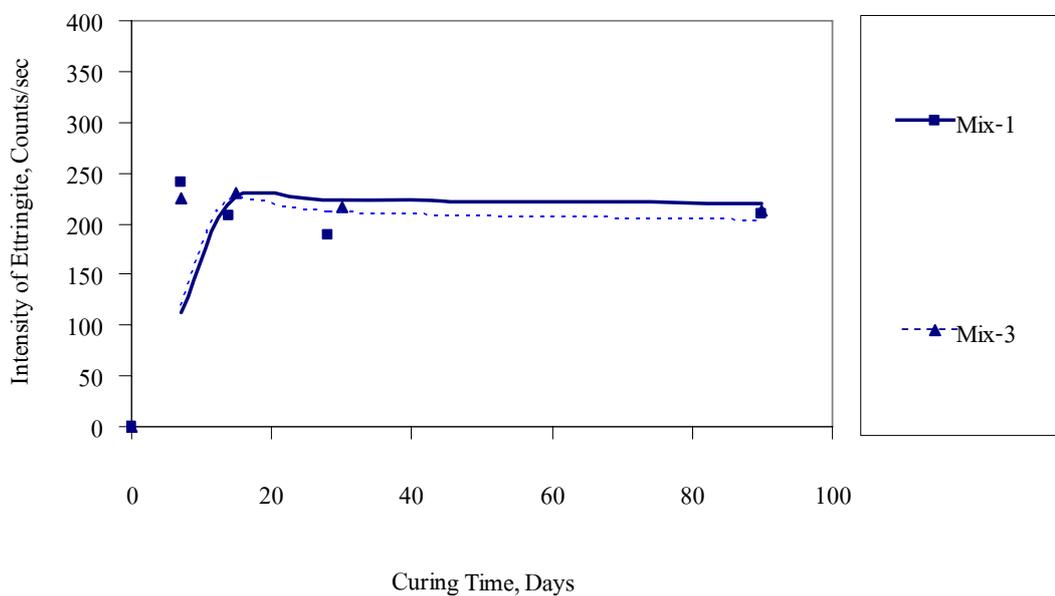


ภาพที่ 46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite กับอายุการบ่ม ของดินตะกอนซีเมนต์ รวมทุกอัตราส่วนผสม

เมื่อพิจารณาดินตะกอนซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ Mix-1 และ Mix-3 ซึ่งมีความชื้นในดินก่อนผสม 109% และปริมาณซีเมนต์  $100 \text{ kg/m}^3$  และ  $150 \text{ kg/m}^3$  ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนผสมของดินตะกอนซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์มากกว่า (Mix-3) จะมีปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH ที่มากกว่าอัตราส่วนผสมของดินตะกอนซีเมนต์ที่มีปริมาณซีเมนต์น้อยกว่า (Mix-1) ตามอายุการบ่ม แต่ทั้งสองอัตราส่วนผสมจะมีปริมาณ Ettringite ที่ใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 47 และ 48



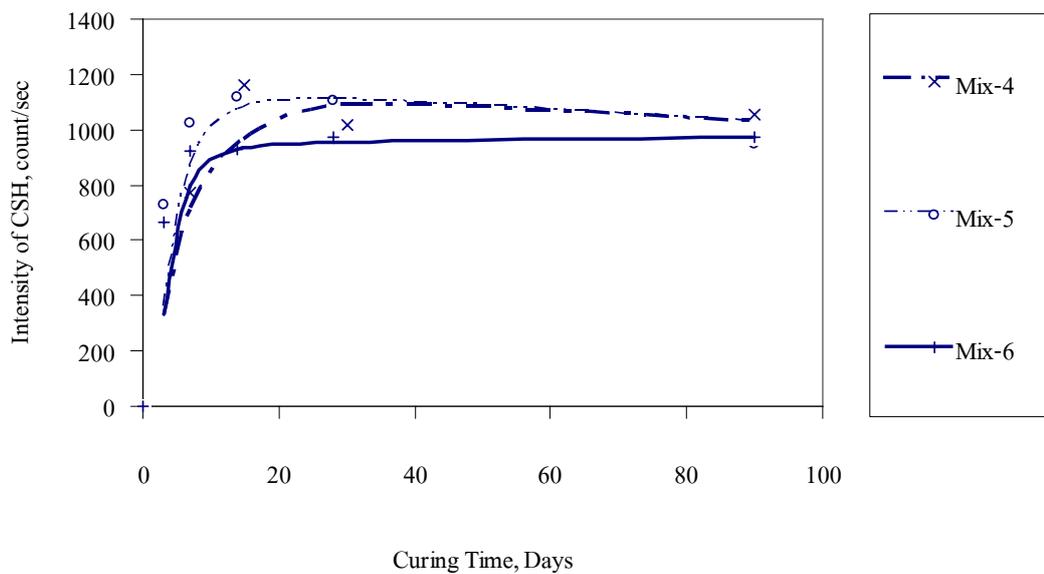
ภาพที่ 47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 109% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ



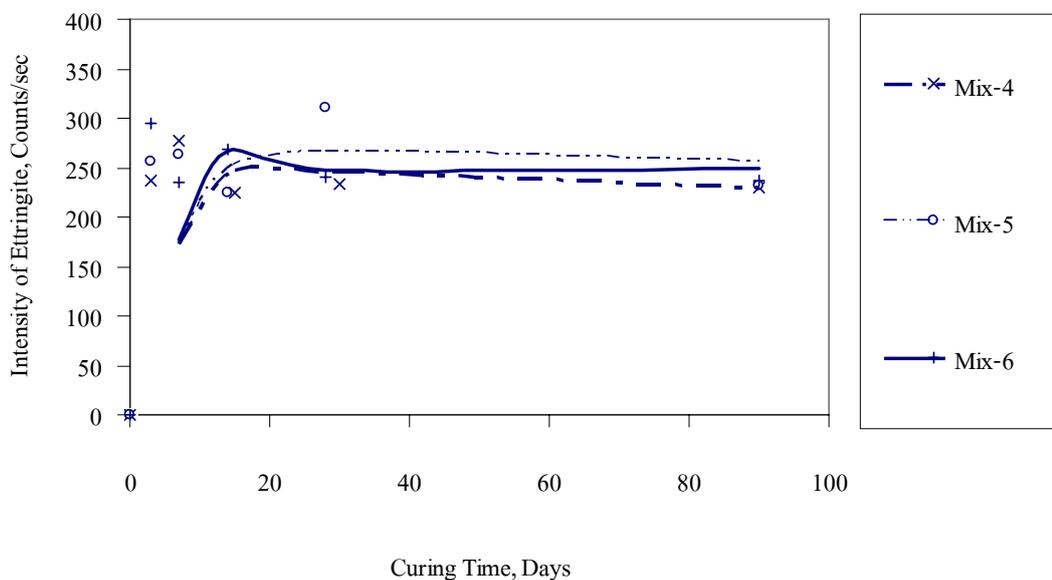
ภาพที่ 48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 109% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

จากการศึกษาเมื่อพิจารณาดินตะกอนซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ Mix-4 , Mix-5 และ Mix-6 ซึ่งมีความชื้นในดินก่อนผสม 138% และปริมาณซีเมนต์ 150 kg/m<sup>3</sup> ,200 kg/m<sup>3</sup> และ 250 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน ถึง 14วัน) ปริมาณ CSH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ทุกอัตราส่วนผสม โดยที่ Mix-5 มีแนวโน้มสูงกว่า Mix-6 และ Mix-4 ตามลำดับและจะมีแนวโน้มคงที่ ที่ช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน ถึง 90วัน) ดังภาพที่ 49 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ Ettringite มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ที่อายุการบ่มระยะสั้น และจะมีแนวโน้มคงที่ ที่อายุการบ่มระยะยาว เช่นเดียวกับ CSH ดังภาพที่ 50

ดังนั้น จากผลการศึกษาปริมาณผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite ของดินตะกอนซีเมนต์ สามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีผลสอดคล้องกับผลการทดสอบด้านกำลัง คือ ที่อายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน - 14 วัน) จะเกิดสารผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว และจะคงที่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น (28 วัน - 90 วัน) ส่งผลให้กำลังเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น และจะคงที่ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น โดยการศึกษานี้มีผลไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยที่เสนอโดย Boonyong (2004)



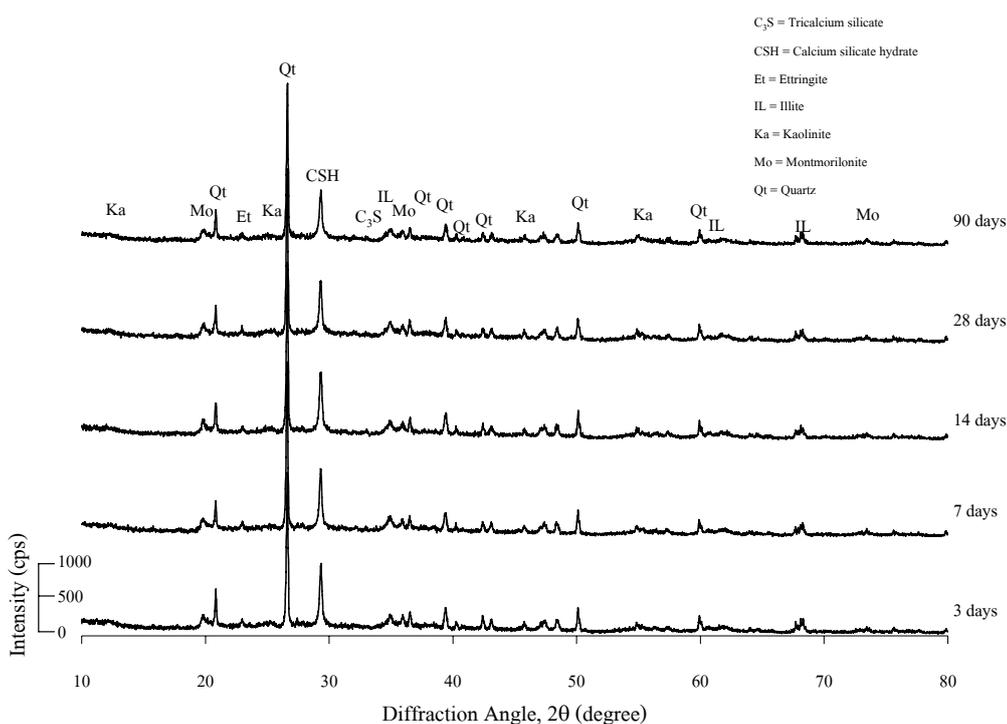
ภาพที่ 49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ



ภาพที่ 50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นก่อนผสม 138% ตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

## 2. ผลการทดสอบ XRD ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม

จากผลการวิเคราะห์ XRD ของดินตะกอนทะเลที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมซีเมนต์และซิลิกาฟูม จะสามารถพบสารประกอบต่างๆ ได้แก่ CSH และ Ettringite เช่นเดียวกับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ภาพที่ 51 แสดงรูปแบบ XRD ของกลุ่มดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอายุการบ่มเปรียบเทียบกับการพัฒนากำลัง ตารางที่ 18 แสดงปริมาณสารตั้งต้นหลัก  $C_3S$  ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก ได้แก่ CSH และ Ettringite ซึ่งสามารถสังเกตเห็นความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของ  $C_3S$  และการเพิ่มขึ้นของ CSH - Ettringite ตามการเพิ่มขึ้นของกำลัง เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kamon และ Nontananandh (1990, 1991)

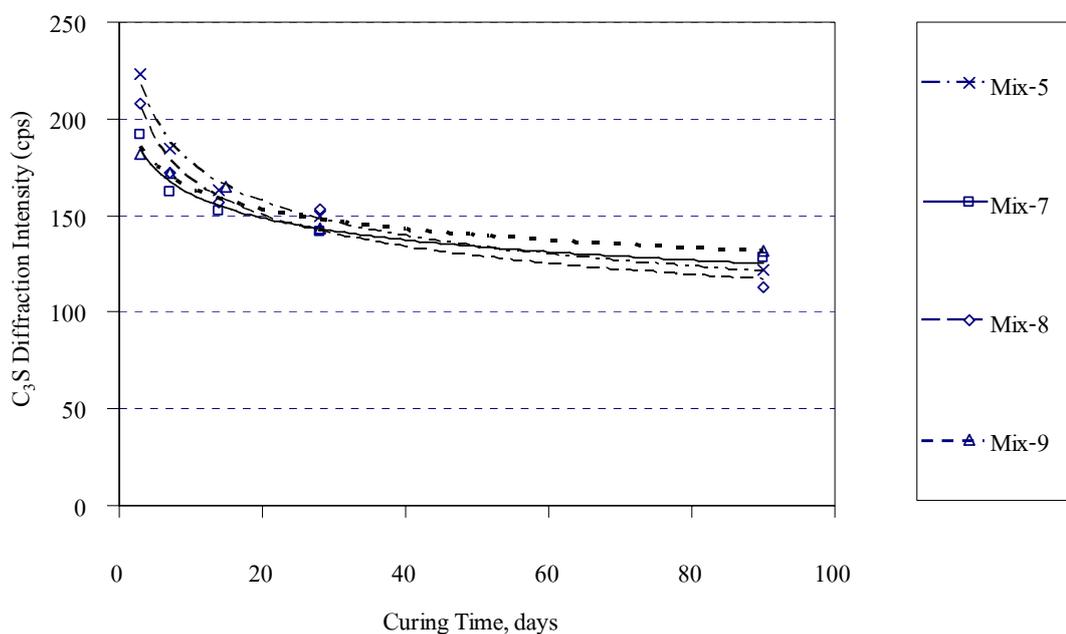


ภาพที่ 51 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม Mix-8 จากการทดสอบ XRD

ตารางที่ 18 กำลังรับแรงอัด ปริมาณสารตั้งต้น  $C_3S$  และสารผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาเคมีของดิน  
ตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม Mix-5, Mix-7, Mix-8 และ Mix-9 ที่อายุการบ่มต่างๆ

Mix No.	Curing Time (days)	$C_3S$ Intensity (cps)	CSH Intensity (cps)	Ettringite Intensity (cps)	$q_u$ ( $kg/cm^2$ )
Mix-5	3	223	727	257	4.25
	7	185	1023	263	6.11
	14	163	1120	225	7.01
	28	150	1103	310	11.25
	90	122	950	232	12.06
Mix-7	3	192	838	250	4.54
	7	162	1135	253	6.19
	14	152	1122	252	7.87
	28	142	913	248	11.24
	90	128	903	208	11.23
Mix-8	3	208	1117	262	5.36
	7	172	1078	273	6.85
	14	157	1072	245	9.37
	28	153	982	292	10.97
	90	113	887	233	13.80
Mix-9	3	182	908	258	3.84
	7	172	950	228	4.93
	14	165	1123	258	7.92
	28	143	1028	260	10.16
	90	132	935	220	14.53

หากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ  $C_3S$  กับอายุการบ่ม ของดินตะกอนซีเมนต์ผสม ซิลิกาฟูม ดังภาพที่ 52 พบว่าปริมาณ  $C_3S$  ลดลง เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นสำหรับทุกอัตรา ส่วนผสม โดยในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น  $C_3S$  จะมีอัตราการลดลงในปริมาณที่ค่อนข้างมาก และเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น อัตราการลดลงของ  $C_3S$  จะน้อยลงและเข้าสู่สภาวะคงที่ เช่นเดียวกับดิน ตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมซิลิกาฟูม แต่จะสังเกตอัตราการลดลงของ  $C_3S$  ที่มากกว่าและรวดเร็วกว่า



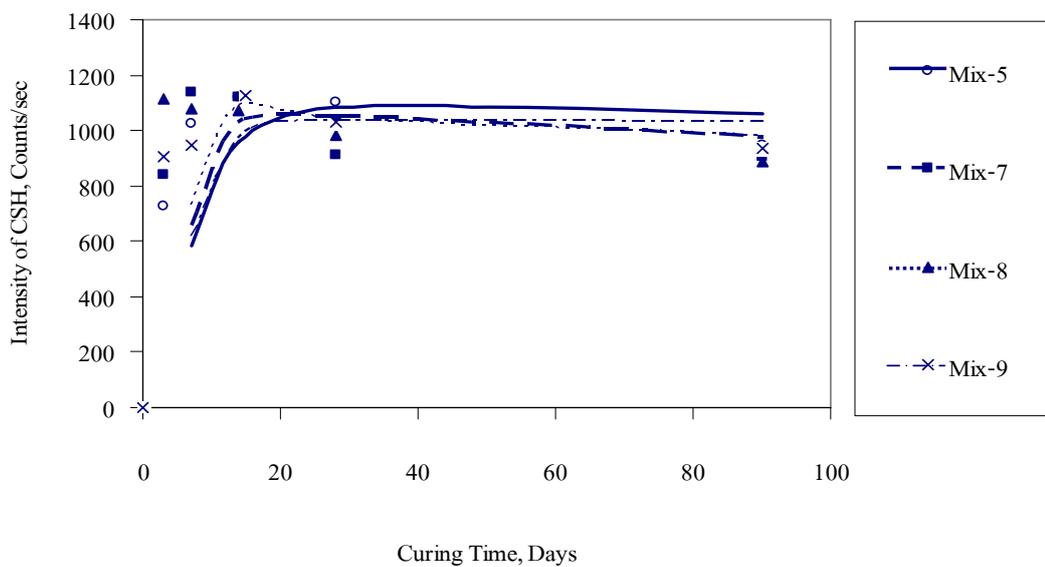
ภาพที่ 52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้น  $C_3S$  กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

จากการวิเคราะห์ดินตะกอนซีเมนต์ผสมซีลีกาฟุ่มด้วยวิธี X-ray Diffraction ได้ ความสัมพันธ์ของการเกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite ตามอายุการบ่ม พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน - 14 วัน) ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากอย่างรวดเร็ว โดยมี แนวนอน้ำเพิ่มสูงขึ้นกว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมซีลีกาฟุ่ม (Mix-5) แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว (28 วัน - 90 วัน) ปริมาณการเกิด CSH ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซีลีกาฟุ่ม มีแนวนอน้ำคงที่ และมี ปริมาณการเกิด CSH ใกล้เคียงหรือต่ำกว่าดินตะกอนซีเมนต์ไม่ผสมซีลีกาฟุ่มเล็กน้อย ดังภาพที่ 53

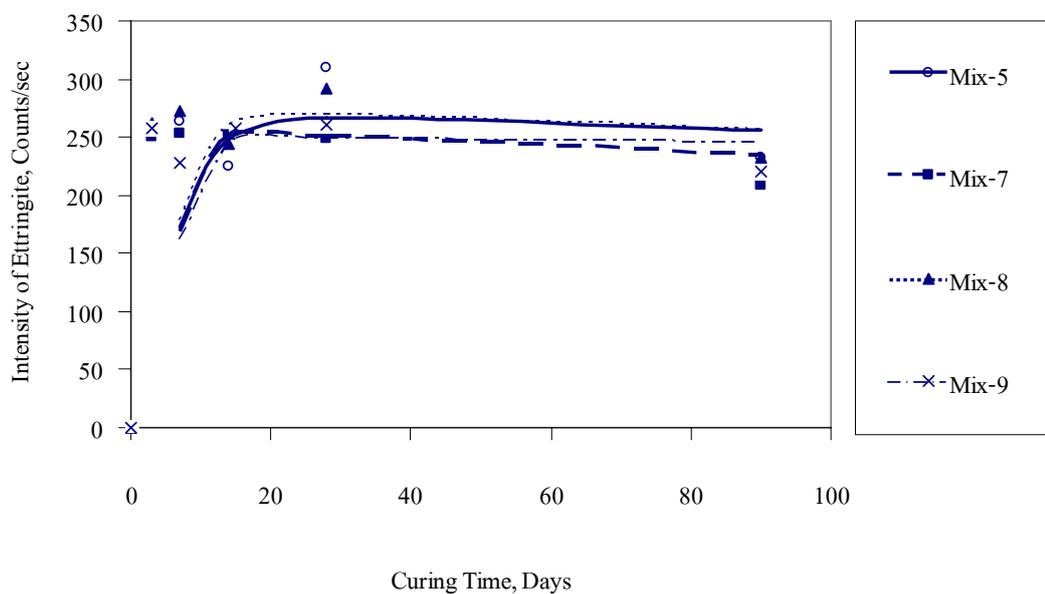
หากพิจารณาปริมาณการเกิดสารผลิตภัณฑ์ Ettringite ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซีลีกาฟุ่ม พบว่ามีแนวนอน้ำใกล้เคียงกับการเกิดปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH คือ ในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน ถึง 14 วัน) ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite ในมีแนวนอน้ำการเกิดเป็นจำนวนมากและจะคงที่ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นเกิน 28 วัน ดังภาพที่ 54

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ซีลีกาฟุ่มเป็นสารผสมแทนซีเมนต์ สามารถช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์เป็นปริมาณมากอย่างรวดเร็ว ที่อายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน - 14 วัน) ส่งผลให้กำลังมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่อายุการบ่มระยะยาว (28 วัน - 90 วัน) การผสมซีลีกาฟุ่มในดินตะกอนซีเมนต์ ยังมีผลทำให้ปริมาณสารตั้งต้นลดลงอีกเล็กน้อยในบางส่วนผสม ซึ่งเป็นผลทำให้กำลังพัฒนาอย่างต่อเนื่องในระยะยาว โดยผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Saitoh et al. (1985)

นอกจากนี้ ค่าการหดตัวที่ลดน้อยลง ที่อายุการบ่มช่วงต้นๆ เชื่อว่าเป็นผลต่อเนื่องมาจากซีลีกาฟุ่มมีส่วนเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีเช่นกัน จึงทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite ซึ่งมี ส่วนช่วยเสริมโครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์ให้แข็งแรงและหนาแน่นอย่างรวดเร็ว ในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น ทำให้โครงสร้างภายในดินแข็งแรงสามารถรักษาปริมาตรให้คงที่ ปริมาณน้ำในช่องว่างในมวลดินจำนวนมากได้ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นตั้งแต่ช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยา จึงส่งผลให้การหดตัวมีค่าต่ำกว่าดินตะกอนธรรมดาหรือดินตะกอนที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวอย่างรวดเร็ว และค่าการหดตัวจะค่อยๆคงที่ที่อายุการบ่มระยะยาว



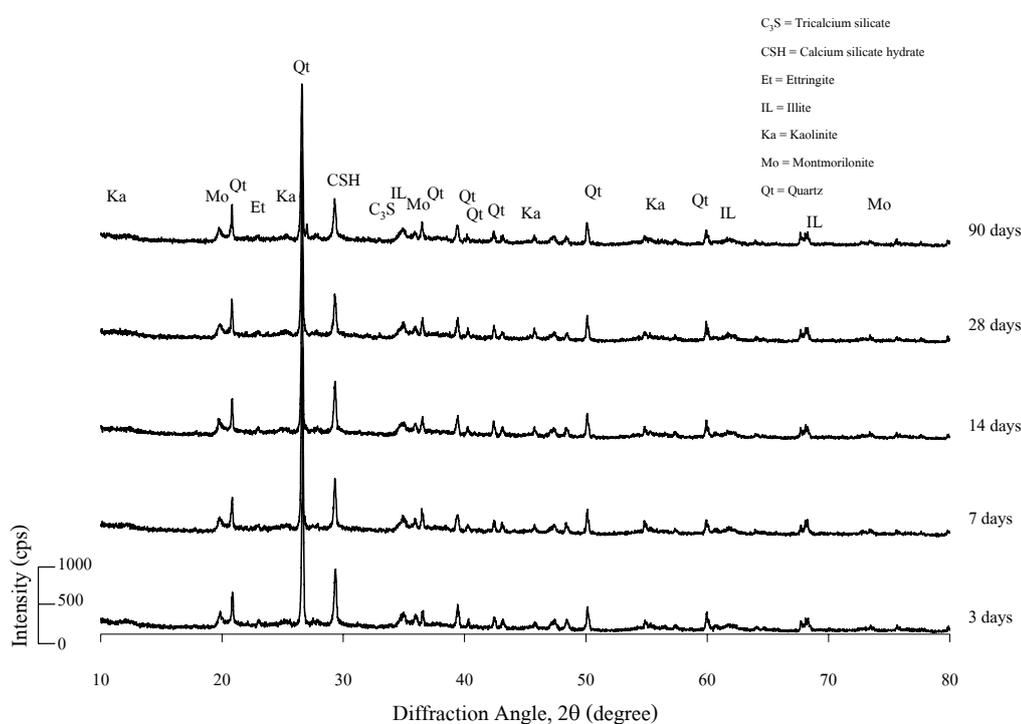
ภาพที่ 53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH กับอายุการบ่ม ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซีลิกาฟูล์ม



ภาพที่ 54 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite กับอายุการบ่ม ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซีลิกาฟูล์ม

### 3. ผลการทดสอบ XRD ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย

จากผลการวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของดินตะกอนทะเลที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมซีเมนต์และทราย จะปรากฏสารประกอบต่างๆ ได้แก่  $C_3S$ , CSH และ Ettringite เช่นเดียวกับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และการผสมซิลิกาฟุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 55 ซึ่งเป็นตัวแทนรูปแบบ XRD ของกลุ่มดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย และสามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงสารต่างๆ ตามอายุการบ่ม เปรียบเทียบกับการพัฒนากำลัง ดังแสดงในตารางที่ 19

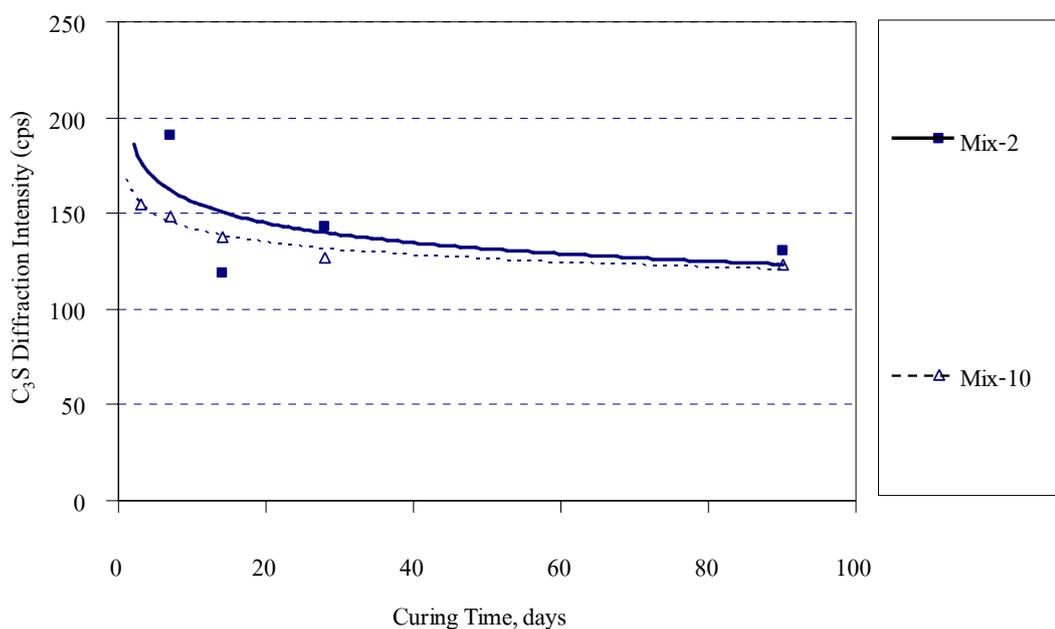


ภาพที่ 55 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-10 จากการทดสอบ XRD

ตารางที่ 19 กำลังรับแรงอัด ปริมาณสารตั้งต้น  $C_3S$  และสารผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาเคมีของดิน  
ตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-2 และ Mix 10 ที่อายุการบ่มต่างๆ

Mix No.	Curing Time (days)	$C_3S$ Intensity (cps)	CSH Intensity (cps)	Ettringite Intensity (cps)	$q_u$ (kg/cm. <sup>2</sup> )
Mix-2	3	N/A	N/A	N/A	N/A
	7	191	234	254	2.21
	14	119	154	149	2.67
	28	143	226	258	3.42
	90	130	798	262	4.85
Mix-10	3	155	803	222	1.78
	7	148	913	203	2.87
	14	138	928	217	3.43
	28	127	782	215	4.28
	90	123	767	202	6.72

จากการวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย พบว่าปริมาณ  $C_3S$  ลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น โดยที่อายุการบ่มระยะสั้น  $C_3S$  จะมีการลดลงในปริมาณที่ค่อนข้างมาก แต่ที่อายุการบ่มมากขึ้น การลดลงของ  $C_3S$  จะค่อนข้างน้อยลงและคงที่มากขึ้น เช่นเดียวกับดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทราย สามารถสังเกตได้ชัดเจนว่าดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายจะมีปริมาณการลดลงของ  $C_3S$  ที่มากกว่าและรวดเร็วกว่า ที่อายุการบ่มระยะสั้น แต่จะมากกว่าเพียงเล็กน้อย ที่อายุการบ่มระยะยาว ดังแสดงในภาพที่ 56

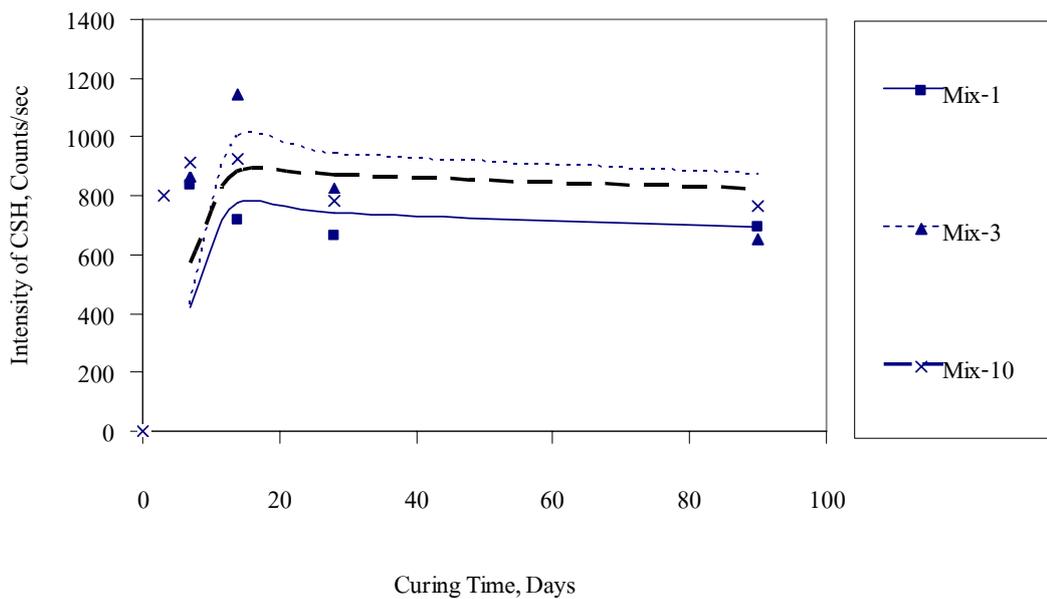


ภาพที่ 56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้น  $C_3S$  กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย

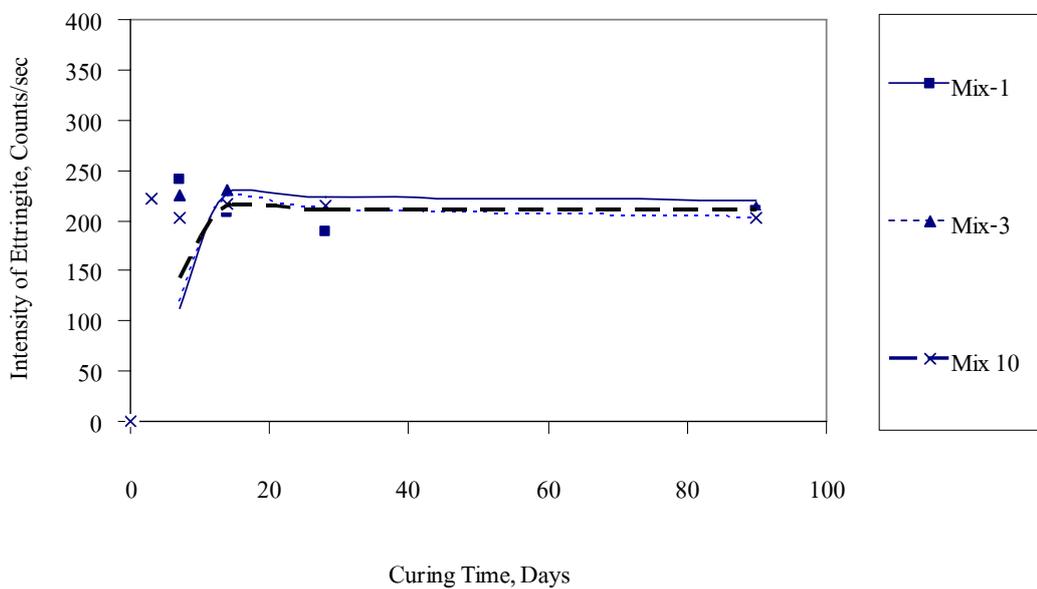
จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite ตามอายุการบ่มในดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน - 14 วัน) ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของ  $C_3S$  โดย CSH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าแตกต่างจากกลุ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทราย ตามปริมาณซีเมนต์ที่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์มากกว่าจะเกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH ที่มากกว่า แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว (28 วัน - 90 วัน) ปริมาณการเกิด CSH ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย มีแนวโน้มคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 57

นอกจากนั้นยังสังเกตได้ว่า ที่ช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน - 14 วัน) ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ Ettringite เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของ CSH ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของ  $C_3S$  โดย Ettringite มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทราย แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว (28 วัน - 90 วัน) ปริมาณการเกิด CSH ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย มีแนวโน้มคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 58

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ทรายเป็นสารผสมเพิ่มที่แตกต่างจากซิลิกาฟูม คือไม่ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยา และไม่ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างจากดินตะกอนทะเลที่ผสมซีเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่ที่อายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน - 14 วัน) ส่งผลให้กำลังมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามลำดับ และที่อายุการบ่มเพิ่มขึ้น ปริมาณสารผลิตภัณฑ์จะเกิดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการเติมทราย แม้ว่าจะไม่ช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้นและเร็วขึ้น แต่ทรายจะสามารถช่วยเสริมโครงสร้างของดิน โดยทรายจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสให้สารผลิตภัณฑ์ยึดเกาะได้ดีขึ้น ทำให้โครงสร้างของดินมีความแข็งแรงมากขึ้น ตรงกับผลการศึกษาของ Suksiritawonkul (2007)



ภาพที่ 57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลึกกันท์ CSH กับอายุการบ่ม ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย



ภาพที่ 58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารผลึกกันท์ Ettringite กับอายุการบ่ม ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย

#### 4. ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นจากปฏิกิริยาเคมีของดินตะกอนหลังปรับปรุงคุณภาพกับการพัฒนากำลัງ

Nontananandh (1990) ได้กล่าวถึงสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์ Tricalcium silicate ( $C_3S$ ) คือสารประกอบหลักในซีเมนต์ ซึ่งมีอิทธิพลที่สำคัญต่อซีเมนต์มอร์ตาร์ และคอนกรีต รวมไปถึงการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยสารผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจาก  $C_3S$  ก็คือ CSH ซึ่งจะเป็นสารให้กำลัງหลังการแข็งตัว ดังนั้น อัตราการทำปฏิกิริยา (Reaction Rate) ของ  $C_3S$  จะมีผลโดยตรงต่อกลไกการพัฒนากำลัງของซีเมนต์ ดังนั้น การศึกษานี้จึงได้ทำการวิเคราะห์อัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  สามารถสรุปอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  ตามวันหลังจากการผสม ดังแสดงในตารางที่ 20

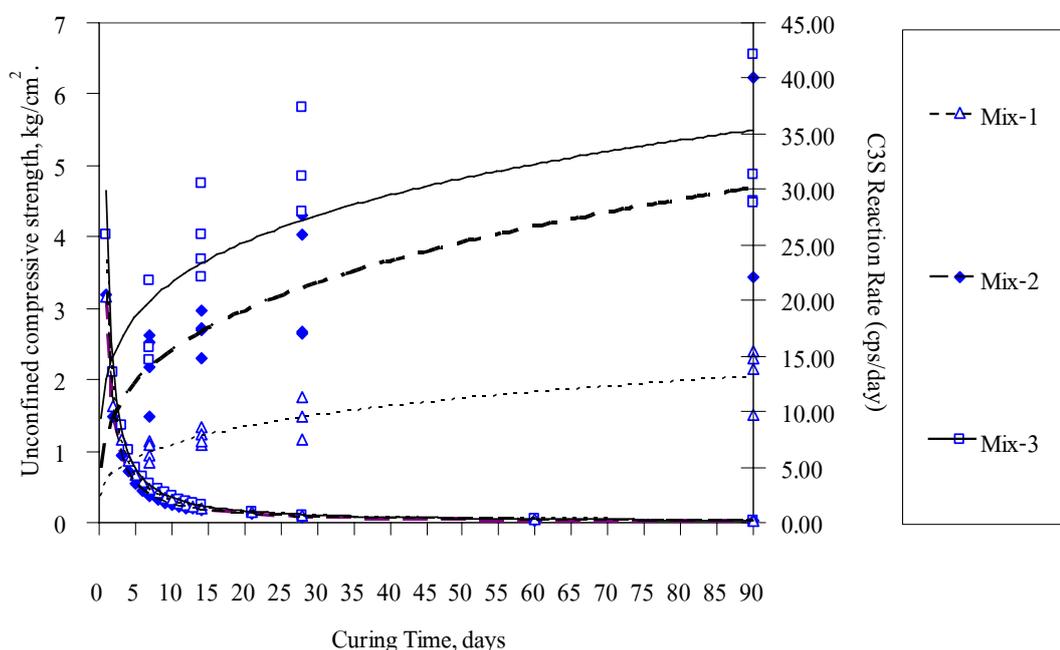
จากผลการวิเคราะห์  $C_3S$  พบว่าดินตะกอนซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมีอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  ที่เร็วมาก ที่อายุหลังการผสมช่วงต้น โดยเฉพาะวันแรกและวันที่สองจะมีอัตราการใช้  $C_3S$  ในปฏิกิริยาที่สูงมาก และจะค่อยๆ ลดลงหลังจากอายุหลังการผสมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับการพัฒนากำลัງที่เพิ่มขึ้นมาอย่างรวดเร็ว ที่อายุการบ่มช่วงต้น และจะคงที่ ที่อายุการบ่มมากขึ้น เป็นไปตามคุณสมบัติของสารประกอบของซีเมนต์ จากชัยและปริญญา (2549) ที่ระบุว่าสารตั้งต้นของปฏิกิริยา  $C_3S$  จะมีอัตราเร็วในการทำปฏิกิริยาในหน่วยเวลาเป็นชั่วโมง และเป็นสารที่สามารถให้กำลัງที่สูงในหน่วยเวลาเป็นวัน ประมาณ 1 - 3 วัน นอกจากนั้นจะสังเกตได้ว่า ชนิดและปริมาณสารเชื่อมประสานที่ใช้ในการปรับปรุงจะมีผลต่ออัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  เช่นกัน

ตารางที่ 20 อัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  ตามวันหลังจากการผสม

Number of day after mixing		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	21	28	60	90
Mix No.	Stabilizer content ( $kg/m^3$ )	Reaction Rate of $C_3S$ ( $r_c$ , cps/day)																	
Mix-1	C100	20.36	10.56	7.47	5.57	4.23	3.59	3.01	2.66	2.30	2.07	1.83	1.64	1.49	1.35	0.89	0.64	0.27	0.17
Mix-2	C125	20.57	9.62	5.97	4.58	3.49	2.91	2.45	2.13	1.78	1.61	1.48	1.33	1.22	1.12	0.73	0.54	0.23	0.14
Mix-3	C150	25.88	13.47	8.73	6.49	4.94	4.14	3.47	3.06	2.63	2.32	2.07	1.90	1.70	1.58	0.98	0.69	0.28	0.18
Mix-4	C150	25.50	13.53	9.36	6.95	5.23	4.37	3.75	3.20	2.83	2.43	2.19	2.02	1.84	1.69	1.06	0.78	0.30	0.20
Mix-5	C200	27.80	17.73	11.81	8.81	6.87	5.35	4.47	3.96	3.39	2.97	2.74	2.43	2.18	2.02	1.27	0.89	0.37	0.23
Mix-6	C250	31.11	19.38	13.33	9.79	7.33	5.89	4.95	4.08	3.56	3.11	2.84	2.56	2.30	2.09	1.27	0.91	0.37	0.23
Mix-7	C200SF5%	25.78	9.16	6.25	4.90	3.80	3.16	2.59	2.28	2.02	1.81	1.64	1.49	1.30	1.22	0.79	0.57	0.25	0.16
Mix-8	C200SF10%	21.82	13.00	7.64	6.18	4.77	3.96	3.39	2.84	2.49	2.25	2.01	1.83	1.66	1.52	0.96	0.68	0.27	0.18
Mix-9	C200SF15%	18.33	7.88	5.63	4.51	3.43	2.85	2.38	2.06	1.79	1.59	1.43	1.31	1.22	1.11	0.72	0.45	0.21	0.15
Mix-10	C125S5%	11.73	5.33	3.60	2.68	2.15	1.87	1.50	1.28	1.13	1.00	0.91	0.85	0.78	0.71	0.46	0.33	0.15	0.10

#### 4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้น $C_3S$ กับการพัฒนากำลังของดินตะกอนซีเมนต์

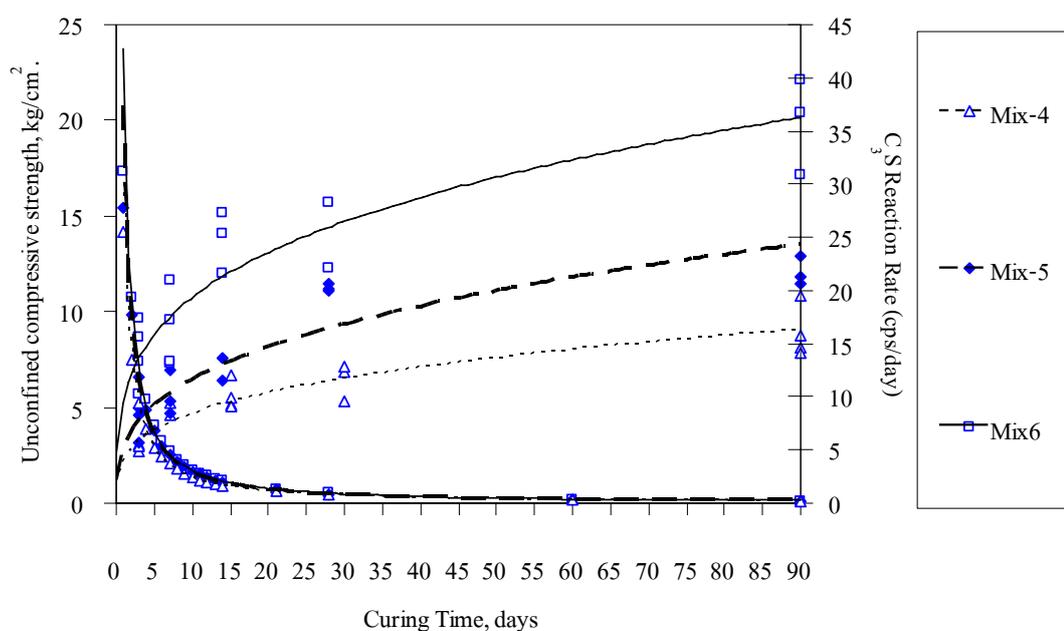
จากการศึกษาปริมาณ  $C_3S$  ที่ใช้ในปฏิกริยานั้น สามารถวิเคราะห์โดยผลจาก XRD แล้วนำไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณของ  $C_3S$  และอัตราการทำปฏิกริยาของ  $C_3S$  กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมต่างๆ โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับกำลัง ได้ผลปรากฏว่า ดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1, Mix-2 และ Mix-3 มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มระยะสั้น และจะค่อยๆคงที่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกำลังที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มระยะสั้น และจะค่อยๆคงที่ที่อายุการบ่มระยะยาว และจากการวิเคราะห์อัตราการทำปฏิกริยาของ  $C_3S$  พบว่าที่อายุการบ่มช่วงต้นๆ อัตราการทำปฏิกริยาของ  $C_3S$  มีอัตราเร็วที่สูง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกำลัง คือทำให้ดินตะกอนซีเมนต์เกิดกำลังที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะค่อยๆลดอัตราการเกิดของกำลังลงตามอายุการบ่ม โดยจะสอดคล้องกับอัตราการทำปฏิกริยาของ  $C_3S$  ที่อายุการบ่มมากขึ้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอัตราการทำปฏิกริยาของ  $C_3S$  นั้นมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งตรงกับลักษณะการเกิดปฏิกริยา Hydration ของปูนซีเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 59



ภาพที่ 59 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดและอัตราการทำปฏิกริยาของ  $C_3S$  กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นก่อนผสม 109%

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้น  $C_3S$  กับอายุการบ่มพบว่ามีความสัมพันธ์กับกำลังของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-4, Mix-5 และ Mix-6 เช่นเดียวกันกับอัตราส่วนผสม Mix-1, Mix-2 และ Mix-3 ที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ คือเมื่อสารตั้งต้น  $C_3S$  ถูกใช้ไปในปฏิกิริยา ส่งผลให้มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Mix-6 จะพบว่าการลดลงของปริมาณ  $C_3S$  และอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมากกว่าอัตราส่วนผสมอื่นๆ ทุกอายุการบ่ม จึงส่งผลทำให้เกิดการพัฒนากำลังที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วตามลำดับ

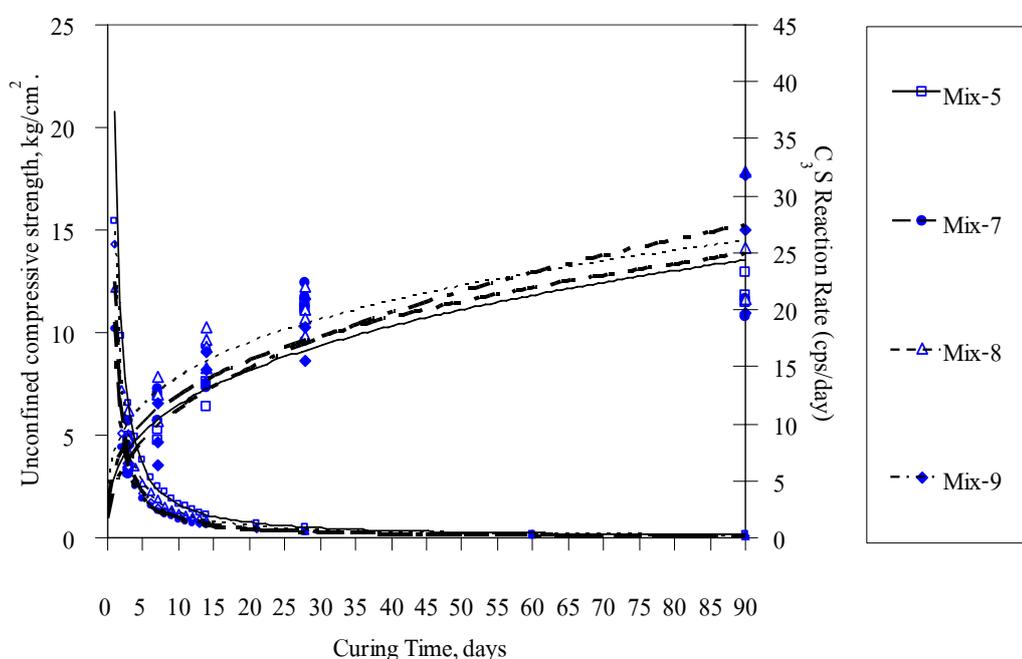
ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าการลดลงของสารตั้งต้น  $C_3S$  หรืออัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  จะส่งผลให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH ทำให้ดินตะกอนซีเมนต์มีการพัฒนากำลังที่สูงขึ้นที่อายุการบ่มต่างๆ โดยเฉพาะในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน ถึง 14 วัน) ดังภาพที่ 60



ภาพที่ 60 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดและอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ที่ความชื้นก่อนผสม 138%

#### 4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้น $C_3S$ กับการพัฒนากำลังของดินตะกอนซีเมนต์ผสม ซิลิกาฟูม

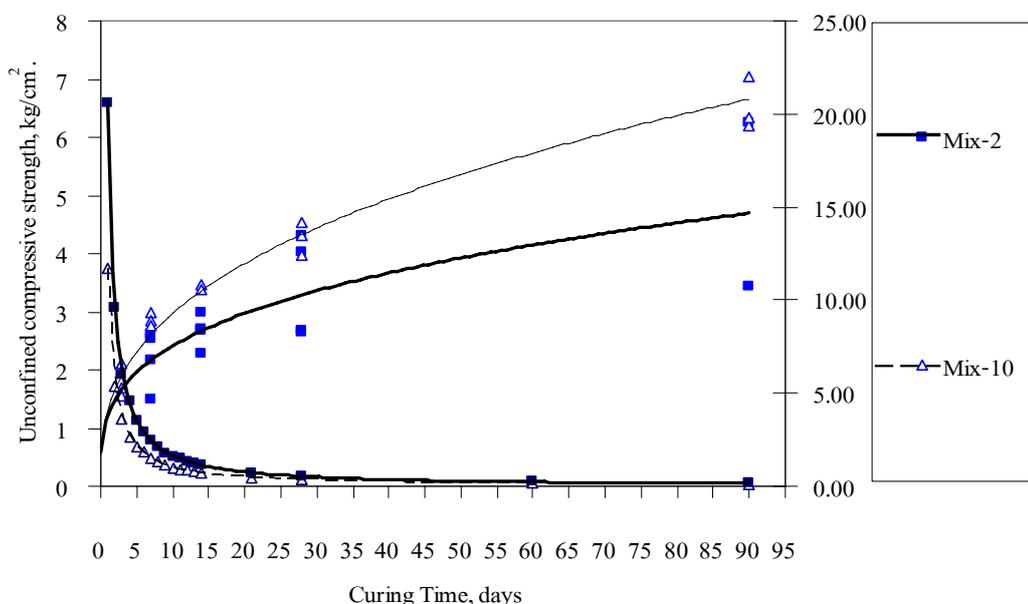
จากการศึกษาต่อไปยังพบว่า เมื่อนำดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม มาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  ที่เพิ่มขึ้น และปริมาณ  $C_3S$  ที่ลดลง ได้ผลปรากฏว่า ดินตะกอนซีเมนต์มีแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มของอัตราการทำปฏิกิริยา (การลดปริมาณของสารตั้งต้น  $C_3S$  ลง) ทำให้กำลังเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้จากการสังเกตการลดลงของปริมาณ  $C_3S$  ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม ซึ่งลดลงอย่างรวดเร็วและมากกว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมซิลิกาฟูม (Mix-5) โดยในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน ถึง 28 วัน) ทำให้เกิดการพัฒนากำลังของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมอย่างรวดเร็วและมากกว่าดินตะกอนที่ผสมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยา Hydration ของปูนซีเมนต์ร่วมกับการเร่งการเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ของซิลิกาฟูมในระยะสั้น อย่างไรก็ตามที่อายุการบ่มระยะยาว 28 วันขึ้นไป ดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมยังคงมีการพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  ที่ยังคงดำเนินอยู่ ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ของซิลิกาฟูมในระยะยาว ดังแสดงในภาพที่ 61



ภาพที่ 61 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดและอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม

#### 4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้น $C_3S$ กับการพัฒนากำลังของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย

จากการศึกษา เมื่อนำดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย มาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  ที่เพิ่มขึ้น ได้ผลปรากฏว่า ดินตะกอนซีเมนต์มีแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มของอัตราการทำปฏิกิริยา  $C_3S$  ทำให้กำลังเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้จากภาพที่ 62 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (3 วัน - 14 วัน) ทำให้เกิดการพัฒนากำลังของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายอย่างรวดเร็วและมากกว่า Mix-2 ที่ไม่ได้ผสมทราย อย่างไรก็ตามที่อายุการบ่มระยะยาว (28 วัน - 90 วัน) ดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย มีการพัฒนากำลังในอัตราที่ช้าลง สอดคล้องกับการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  ที่ดำเนินอยู่อย่างช้า และยังคงพบได้ถึงแม้ว่าดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย จะมีกำลังที่สูงกว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ผสมทรายก็ตาม อัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  ไม่รวดเร็วมากนัก ทั้งนี้เชื่อว่าเป็นผลมาจาก เมื่อผสมทรายเพิ่มให้ดินตะกอนซีเมนต์ จะช่วยทำให้โครงสร้างภายในของดินตะกอนซีเมนต์มีความแข็งแรงขึ้น ทำให้มีกำลังที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากทรายไม่ได้เป็นสารผสมเพิ่มในลักษณะเดียวกับซิลิกาฟูมที่ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยา แต่การเติมทรายถูกใช้เพื่อปรับปรุงการหดตัว ดังนั้น การเติมทรายจะเป็นการปรับความชื้นในดินเริ่มต้นให้ลดลง จึงมีส่วนทำให้กำลังเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่เริ่มต้น

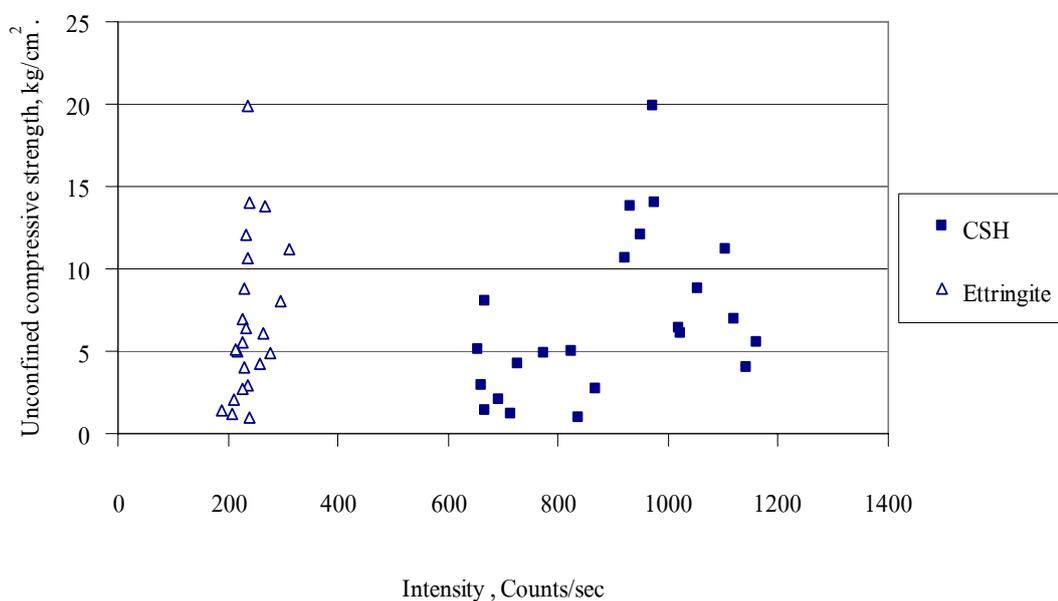


ภาพที่ 62 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดและอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  กับอายุการบ่มของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย

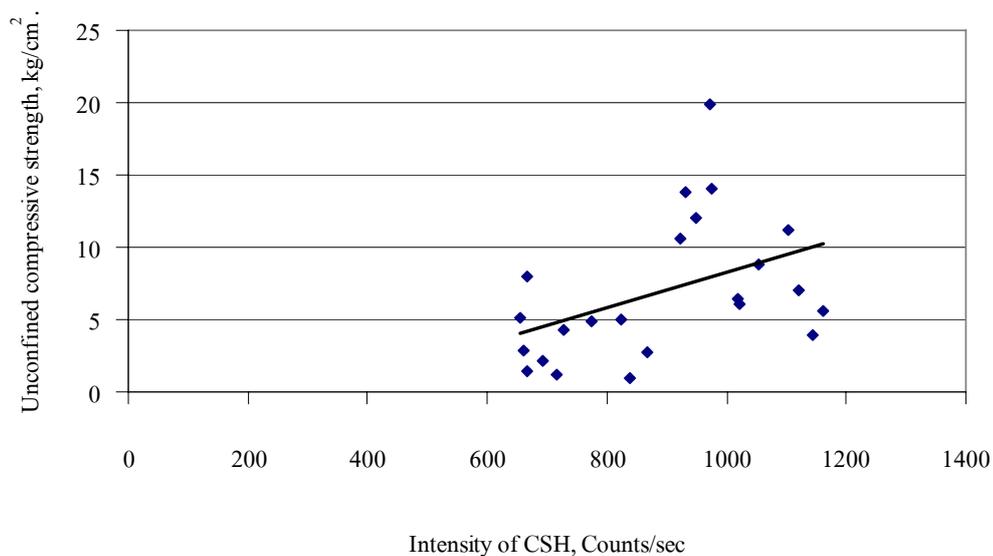
นอกจากนี้ยังพบว่า การหดตัวจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อทำการผสมทรายที่มากขึ้น แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว ดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ผสมทรายมีการหดตัวที่ลดลงต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเกิดมาจากสาเหตุที่ว่า ที่อายุการบ่มระยะสั้นเป็นช่วงการเกิดปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์ทำให้ทรายเข้ามาช่วยเสริมโครงสร้างของดิน ทำให้ w/c ratio ลดต่ำลง ดังนั้น การเติมทรายจึงมีผลทำให้การหดตัวลดลง แต่ที่อายุการบ่มระยะยาวดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทราย อาจมีค่าการหดตัวลดต่ำกว่า ดินตะกอนซีเมนต์ที่ผสมทรายได้ ทั้งนี้เชื่อว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่ผสมทรายมีปริมาณน้ำที่มากกว่า แทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของสารผลิตภัณฑ์กับอนุภาคดินที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณน้ำจำนวนมากถูกใช้ในปฏิกิริยาเคมี จึงทำให้เกิดช่องว่างที่ส่งผลให้เกิดการหดตัวที่มากกว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ผสมทราย ตามลำดับ

## 5. ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีกับการพัฒนากำลังของดินตะกอนซีเมนต์

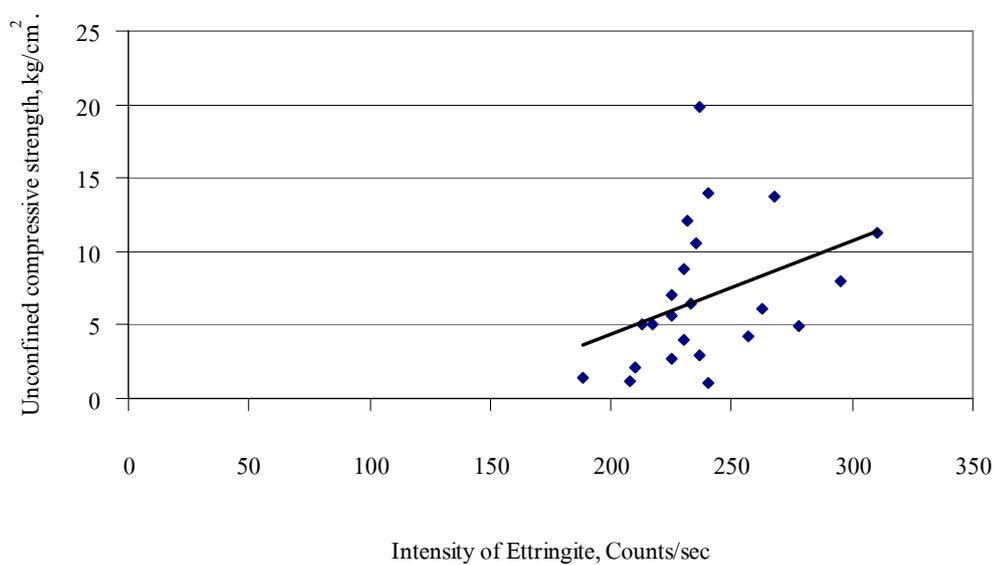
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและการวิเคราะห์ผล XRD ตัวอย่างดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1 ,Mix-2 ,Mix-3 ,Mix-4 ,Mix-5 และ Mix-6 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน เมื่อพิจารณา ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีของดินตะกอนซีเมนต์ ได้แก่ CSH และ Ettringite พบว่า กำลังและสารผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีความสัมพันธ์กัน โดยมีแนวโน้มของกำลังเพิ่มขึ้น เมื่อสารผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดมีปริมาณเพิ่มขึ้น ดังปรากฏในภาพที่ 63 - 65 ซึ่งปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH จะมีค่าอยู่ระหว่าง 662 counts/sec ถึง 1,160 counts/sec ซึ่งจะมีค่ามากกว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ Ettringite ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 188 counts/sec ถึง 310 counts/sec โดยส่งผลให้กำลังมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.00 kg/cm<sup>2</sup> จนถึง 14.02 kg/cm<sup>2</sup> ทั้งนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า สารผลิตภัณฑ์ CSH ซึ่งมีปริมาณมากกว่า จะเป็นสารที่ช่วยทำให้เกิดกำลัง ส่วนสารผลิตภัณฑ์ Ettringite จะเป็นสารที่ช่วยทำให้ปริมาณน้ำในดินตะกอนซีเมนต์ลดลง



ภาพที่ 63 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite

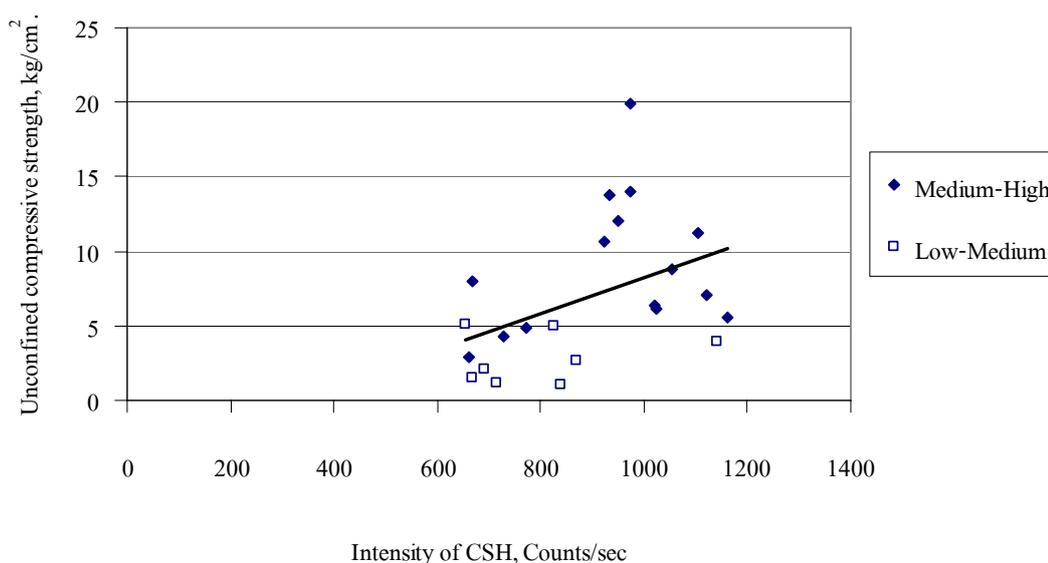


ภาพที่ 64 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณสารผลึกภัณฑ์ CSH

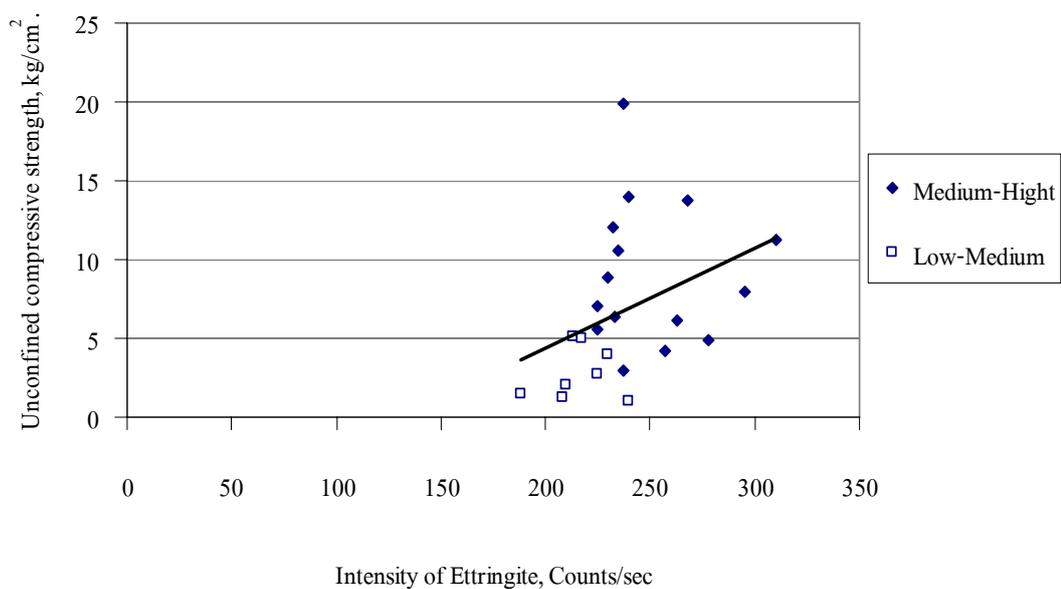


ภาพที่ 65 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณสารผลึกภัณฑ์ Ettringite

เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ แคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรต (CSH) และเอททริงไทท์ (Ettringite) โดยแบ่งช่วงปริมาณความชื้นในดินก่อนผสมซีเมนต์ ระหว่างตัวอย่างดินตะกอนซีเมนต์ที่มีความชื้นในดินก่อนการปรับปรุงน้อยถึงปานกลาง และปานกลางถึงมาก จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่มีความชื้นในดินก่อนการปรับปรุงน้อยถึงปานกลาง มีกำลัง และปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite โดยเฉลี่ยต่ำกว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่มีความชื้นในดินก่อนการปรับปรุงปานกลางถึงมาก ดังแสดงในภาพที่ 66 และ 67 ทั้งนี้ถึงแม้ว่าจะมี w/c ratio ที่เท่ากันก็ตาม แต่จะมีปริมาณ  $C_3S$  ที่แตกต่างกัน เนื่องจากดินซีเมนต์ที่มีปริมาณความชื้นในดินมาก จะมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้อัตราส่วนที่มีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าสามารถเกิดปฏิกิริยา Hydration ได้มากกว่า จึงเกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite ได้มากกว่า ดังนั้น จึงส่งผลให้กำลังเพิ่มมากขึ้น ตามลำดับ



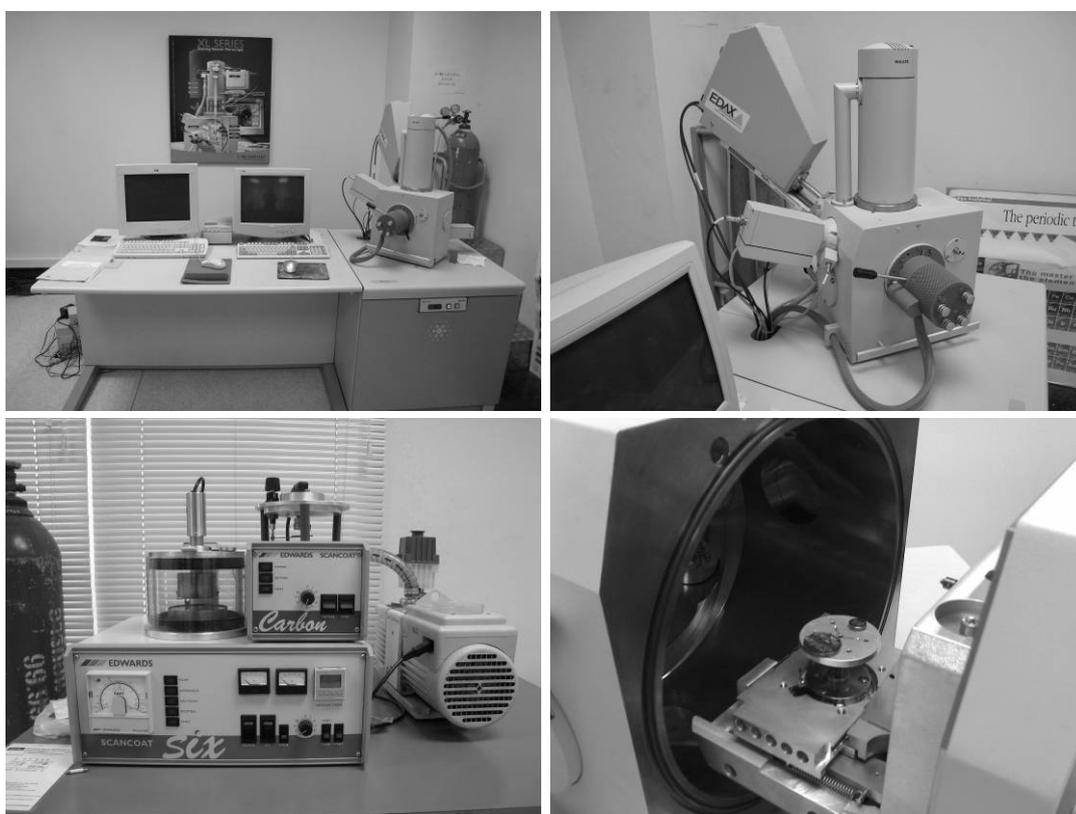
ภาพที่ 66 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH ตาม w/c ratio ของดินตะกอนซีเมนต์



ภาพที่ 67 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) กับปริมาณสารผลึกภัณฑ์ Ettringite ตาม w/c ratio ของดินตะกอนซีเมนต์

**ผลการศึกษาโครงสร้างของสารเชื่อมประสานและดินตะกอนทะเล  
ก่อน-หลังการปรับปรุงคุณภาพ โดย Scanning Electron Microscope (SEM)**

การศึกษาวิจัยในส่วนนี้เน้นการสังเกตพฤติกรรมของโครงสร้างดินซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากดินตะกอนทะเล ซึ่งเกิดสารผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาของซีเมนต์ ได้แก่ CSH ซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่นเกล็ดเล็กๆ และ Ettringite ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งคล้ายเข็มและเกิดการสานตัวของสารผลิตภัณฑ์กับอนุภาคของดินตะกอนทะเล อีกทั้งยังศึกษาลักษณะและพฤติกรรมของสารเชื่อมประสาน-สารผสมเพิ่มที่ใช้ปรับปรุงดินตะกอนซีเมนต์ เพื่อยืนยันผลจากการทดสอบ XRD และสร้างความเข้าใจในกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์มากยิ่งขึ้น รวมไปถึงพฤติกรรมของโครงสร้างภายในดินที่มีผลต่อคุณสมบัติความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์ โดยทำการศึกษาภาพถ่ายจาก Scanning Electron Microscope (SEM) ที่มีกำลังขยายสูงมาก ทำการถ่ายภาพที่สามารถสังเกตเห็นสารผลิตภัณฑ์ที่สำคัญและลักษณะโครงสร้างของดินอย่างชัดเจน โดยใช้เครื่อง SEM ในการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 68

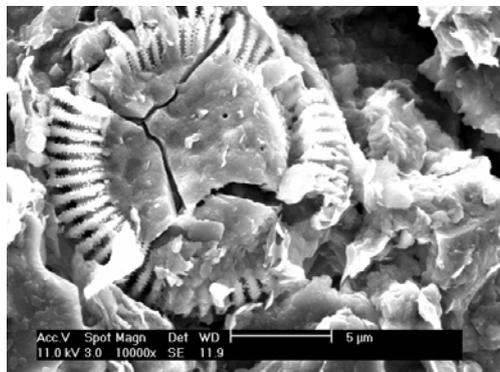


ภาพที่ 68 เครื่องทดสอบ Scanning Electron Microscope

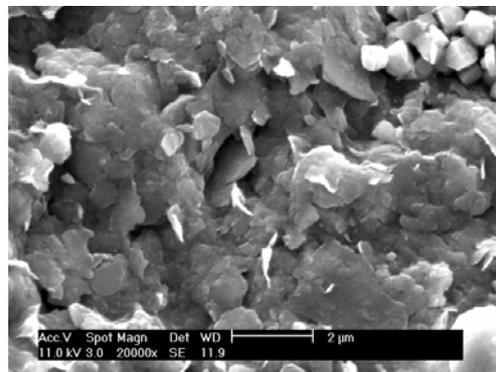
จากการศึกษาของ Yoobanpot (2004) โครงสร้างเนื้อดินของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (ดินตะกอนทะเล) ด้วยภาพถ่ายจาก SEM ได้ผลปรากฏว่าเนื้อดินประกอบด้วยอนุภาคดินที่มีรูปร่างเป็นเกล็ดเล็กๆ โดยเนื้อดินที่รูปร่างลักษณะเช่นนี้ จะมีคุณสมบัติการยุบตัวที่สูงในสถานะที่มีแรงกระทำคงที่ ทั้งนี้รูปร่างของแผ่นเนื้อดินนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียวที่พบในดิน นอกจากนี้ยังพบไคอะตอม ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตเล็กๆที่อาศัยอยู่ในทะเลปะปนอยู่ในเนื้อดินด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากภาพถ่าย SEM ในงานวิจัยนี้ พบว่าดินตะกอนขุดจากทะเลตามธรรมชาติก่อนการลดปริมาณน้ำ ที่ความชื้นในดินประมาณ 209% เมื่อทดสอบด้วย SEM จะสังเกตเห็นว่าโครงสร้างเนื้อดินมีลักษณะเป็นเกล็ดเล็กๆ ทั้งนี้ยังพบไคอะตอมปะปนอยู่ในเนื้อดินอีกด้วย ดังภาพที่ 69 (a) - (b) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Yoobanpot (2004) ดังที่กล่าวมาแล้ว

จากการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลด้วยกระบวนการลดปริมาณน้ำ ซึ่งเป็นวิธีการทางกล พบว่าโครงสร้างของเนื้อดินหลังการลดปริมาณน้ำที่ความชื้นในดินประมาณ 160% และ 109% มีการเปลี่ยนแปลงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเนื้อดินจับตัวกันเป็นก้อนและมีความแน่นมากขึ้น เมื่อมีการลดปริมาณน้ำมากขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 69 (c) - (d) และ 69 (e) - (f) ตามลำดับ นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าดินตะกอนธรรมชาติที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ไม่ปรากฏพบผลึกของสารผลึกภัณฑ์ เช่น CSH หรือ Ettringite

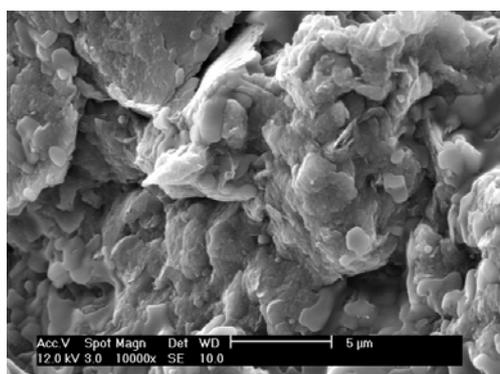
## 1. ดินตะกอนขุดจากทะเล



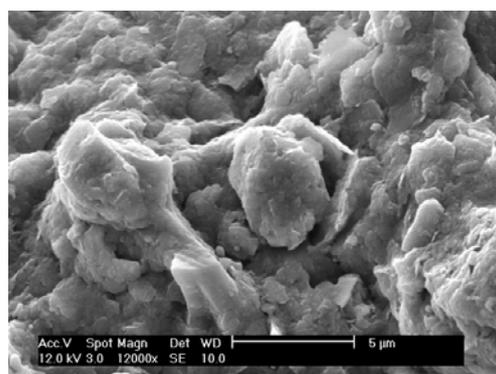
(a) ดินตะกอนก่อนการลดปริมาณน้ำ ( $w_f \sim 209\%$ ) (กำลังขยาย 10,000 เท่า)



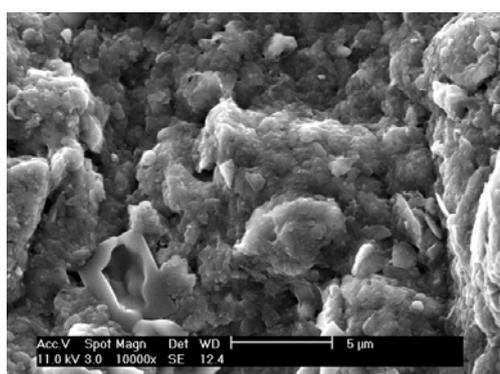
(กำลังขยาย 20,000 เท่า)



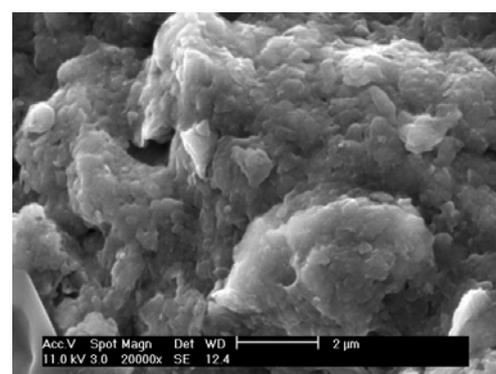
(c) ดินตะกอนหลังการลดปริมาณน้ำ ( $w_f \sim 160\%$ ) (กำลังขยาย 10,000 เท่า)



(กำลังขยาย 12,000 เท่า)



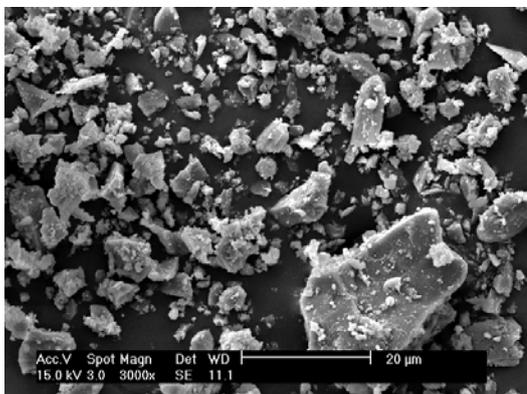
(e) ดินตะกอนหลังการลดปริมาณน้ำ ( $w_f \sim 109\%$ ) (กำลังขยาย 10,000 เท่า)



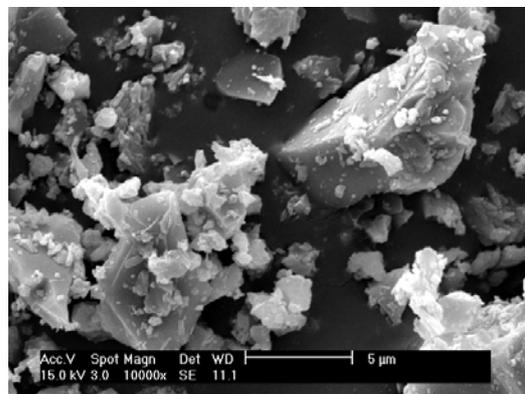
(กำลังขยาย 20,000 เท่า)

ภาพที่ 69 ภาพการทดสอบ SEM ของดินตะกอนทะเลก่อนและหลังการลดปริมาณน้ำด้วยวิธีการกลตามความชื้นในดินต่างๆ

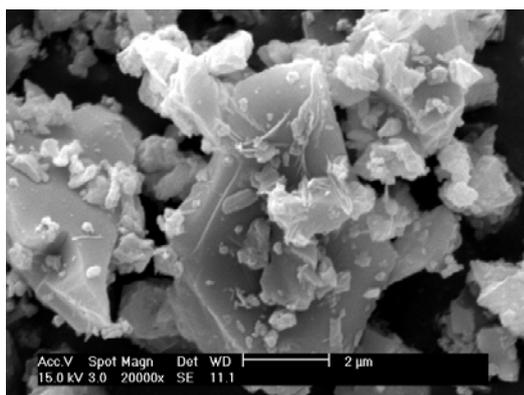
## 2. ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1



(a) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1  
(กำลังขยาย 3000 เท่า)



(b) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1  
(กำลังขยาย 10000 เท่า)

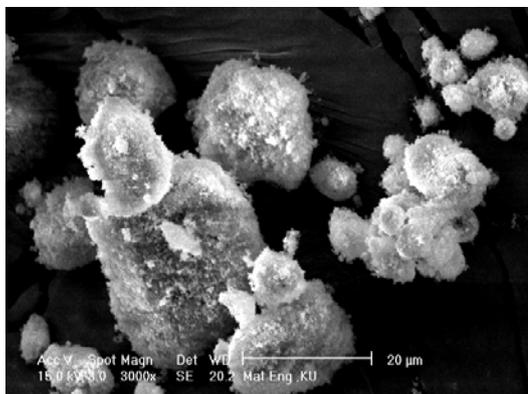


(c) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1  
(กำลังขยาย 20000 เท่า)

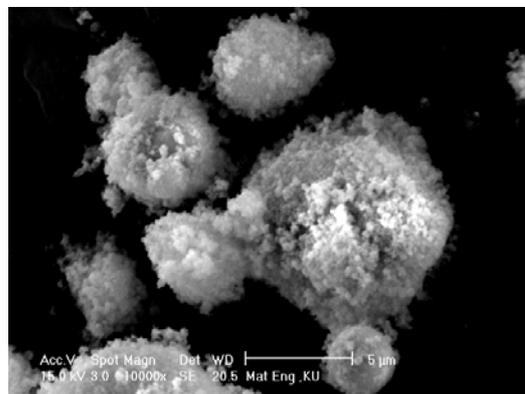
### ภาพที่ 70 ภาพการทดสอบSEMของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1

ภาพที่ 70 แสดงภาพ SEM ของเนื้อซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ที่ใช้เป็นสารปรับปรุงคุณภาพในการศึกษานี้ พบว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคมมีขนาดแตกต่างกัน (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 15  $\mu\text{m}$ ) พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ภาพ SEM ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบ SEM ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ของ Yoobanpot (2004)

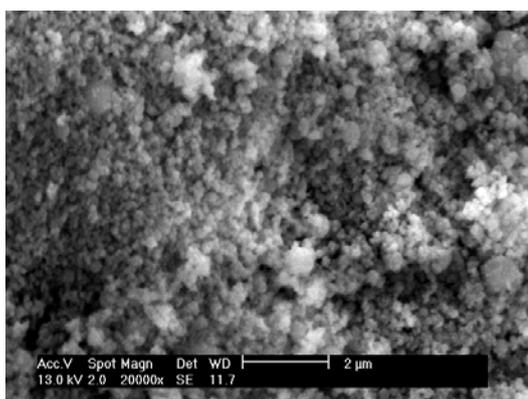
### 3. ซิลิกาฟุ้ง



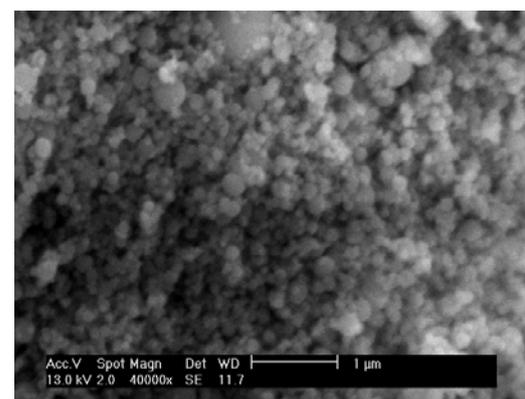
(a) ซิลิกาฟุ้ง (กำลังขยาย 3000 เท่า)



(b) ซิลิกาฟุ้ง (กำลังขยาย 10000 เท่า)



(c) ซิลิกาฟุ้ง (กำลังขยาย 20000 เท่า)



(d) ซิลิกาฟุ้ง (กำลังขยาย 40000 เท่า)

#### ภาพที่ 71 ภาพการทดสอบSEMของซิลิกาฟุ้ง

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) หรือ ไมโครซิลิกา (Micro silica) ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการรีดักชันจากควอร์ต (Quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอน โดยซิลิกาฟุ้งที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา จากการศึกษาค้นคว้าโดยใช้ ภาพถ่ายจาก SEM ดังภาพที่ 71 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าอนุภาคของซิลิกาฟุ้งมีรูปร่างกลมมนและมีขนาดเล็กมาก (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $0.1 \mu\text{m}$ ) ที่ไม่เป็นผลึกจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน การที่ซิลิกาฟุ้งมีอนุภาคที่เล็กมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวที่สูงมาก จึงต้องการปริมาณน้ำที่ใช้ในปฏิกิริยาเพื่อการหล่อลื่นพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงชันด้วย (American Concrete Institute, 2000)

#### 4. ดินตะกอนทะเลขุดผสมซีเมนต์

จากวิเคราะห์โครงสร้างภายในเนื้อดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1, Mix-2 และ Mix-3 โดยภาพถ่าย SEM ได้ผลปรากฏว่าดินตะกอนซีเมนต์ทุกอัตราส่วนผสม เนื้อดินมีโครงสร้างที่มีความแน่นขึ้นมากกว่าดินตะกอนก่อนปรับปรุงด้วยซีเมนต์ โดยเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นดินมีความแน่นมากขึ้นเล็กน้อย ดังนั้น การเกิดสารผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาเคมี และการสานโครงสร้างภายในดินให้แข็งแรงขึ้น ส่งผลให้ความชื้นน้ำลดต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาโดย Yoobanpot (2004)

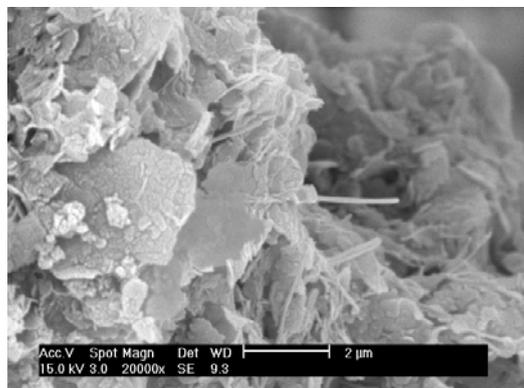
ภาพที่ 72 (a) - (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1 ในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า CSH ซึ่งมีรูปร่างเป็นเกล็ดเล็ก ๆ และ Ettringite ซึ่งมีรูปร่างเป็นแท่งเข็ม กระจายตัวอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง และที่อายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) จะสังเกตว่า CSH ปกคลุมค่อนข้างชัดเจนโดยจะสานรวมกับเนื้อดินตะกอนและสารผลิตภัณฑ์อื่นๆ กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดิน

ภาพที่ 73 (a) - (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-2 สังเกตพบว่าที่อายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) Mix-2 จะมีความแน่นต่ำกว่า Mix-1 และ Mix-3 เล็กน้อย และจะพบ Ettringite ในปริมาณที่ต่ำกว่า Mix-1 และ Mix-3 กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดินอย่างเบาบาง เช่นเดียวกับที่อายุการบ่มระยะยาว (90 วัน) จะสังเกตพบว่า CSH ปกคลุมพื้นผิวของโครงสร้างดิน โดยเกิดขึ้นมาเป็นจำนวนที่น้อยกว่า Mix-1 ทำให้ดินตะกอนซีเมนต์ Mix-2 โดยรวมมีความแน่นต่ำกว่า Mix-1 แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าที่อายุการบ่ม 28 วัน โครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-2 จะมีความแน่นโดยรวมมากกว่า Mix-1 และ Mix-3

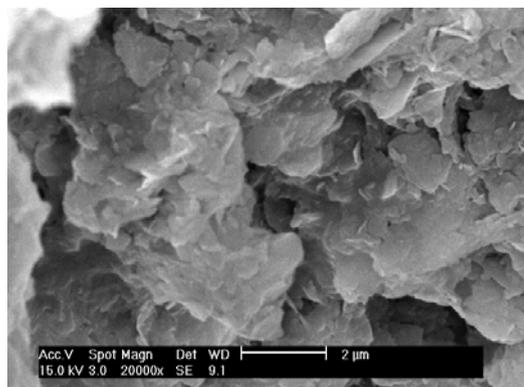
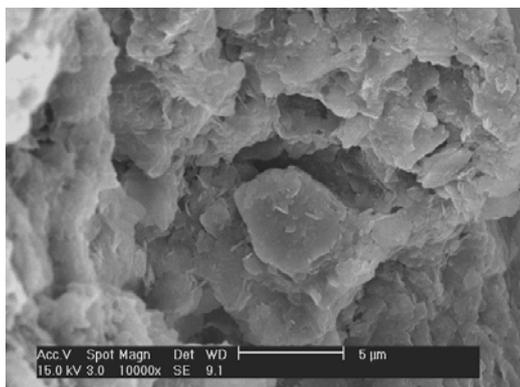
ภาพที่ 74 (a) - (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-3 พบว่าโครงสร้างดินตามอายุการบ่มมีความคล้ายคลึงกับ Mix-1 และเมื่อเปรียบเทียบกับ Mix-2 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณ CSH และ Ettringite จะพบในปริมาณที่มากกว่า Mix-2 โดยในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) จะพบ CSH และ Ettringite อยู่เป็นจำนวนที่ใกล้เคียงกับ Mix-1 กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดิน แต่ช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) จะพบ CSH เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากปกคลุมพื้นผิวของโครงสร้างดิน โดยจะสานรวมกับเนื้อดินตะกอนและสารผลิตภัณฑ์อื่นๆ กระจายตัวอยู่ทั่วไปในโครงสร้างดิน เช่นเดียวกับ Mix-1

ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์ด้วย SEM (Scanning Electron Microscope) ทำให้เห็นภาพสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์ภายในโครงสร้างดิน พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น การที่ความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์ลดต่ำกว่าดินตะกอนก่อนการปรับปรุงคุณภาพ เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์ภายในมวลดิน ได้แก่ CSH ซึ่งมีลักษณะเป็นเกล็ดเล็กๆ และ Ettringite ซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นแท่งเข็ม ปกคลุมกระจายอยู่ภายในโครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์ ทำให้ช่องว่างในมวลดินมีปริมาณลดลง ดินตะกอนซีเมนต์มีความแน่นขึ้น แต่ในช่วงอายุการบ่มระยะยาว การที่ค่าความชื้นน้ำไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic อย่างอ่อนๆ ทำให้การเกิดสารผลิตภัณฑ์ ได้แก่ CSH ภายในโครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์ที่ใกล้เคียงกัน ความแน่นของโครงสร้างดินจึงไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

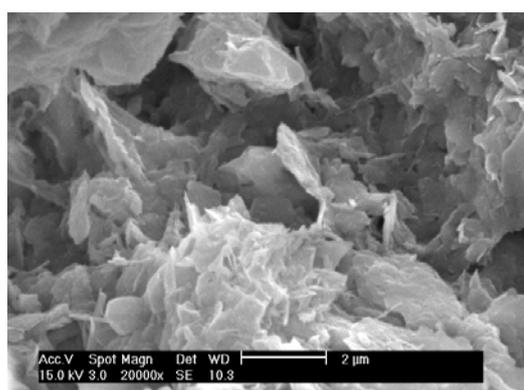
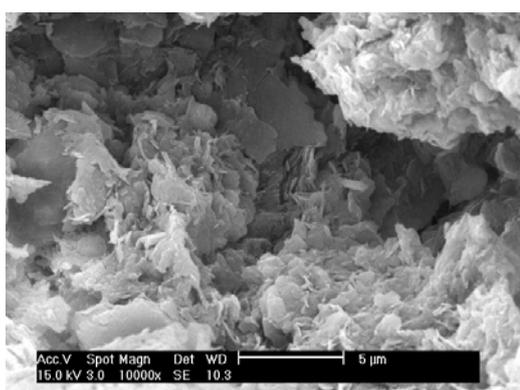
## 4.1 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Mix-1



(a) 7 วัน



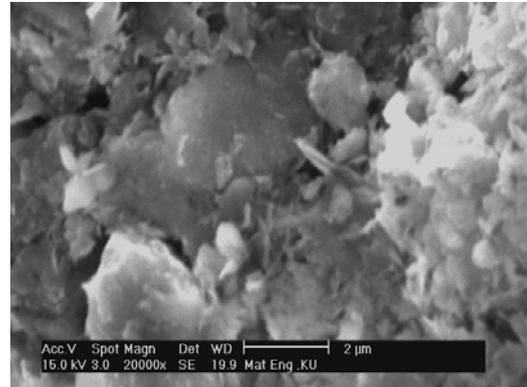
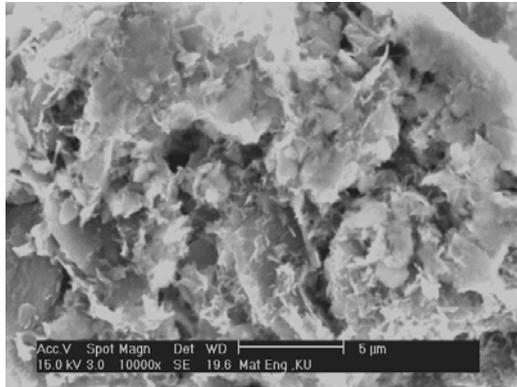
(b) 28 วัน



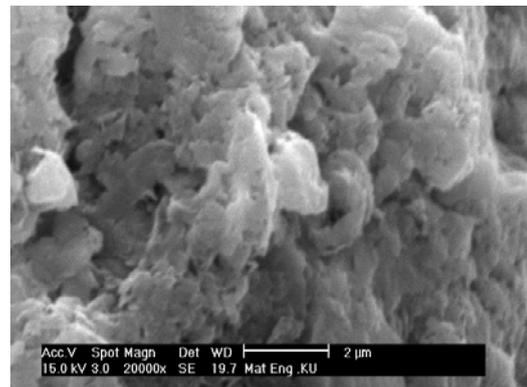
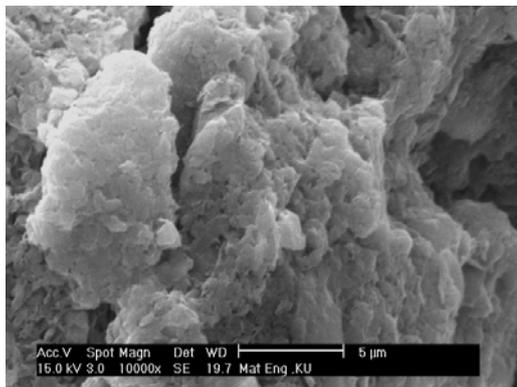
(c) 90 วัน

ภาพที่ 72 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1

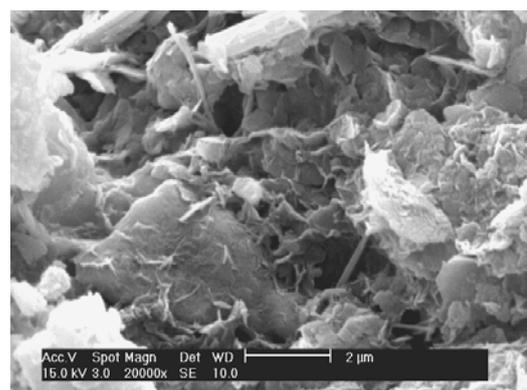
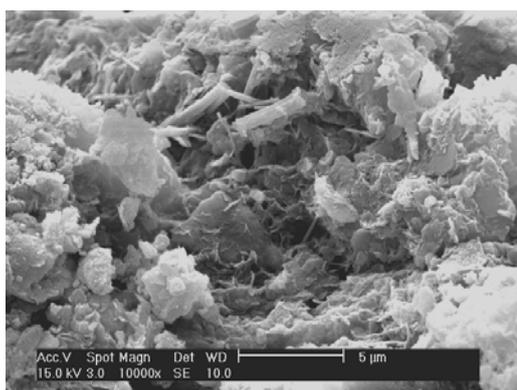
## 4.2 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Mix-2



(a) 7 วัน



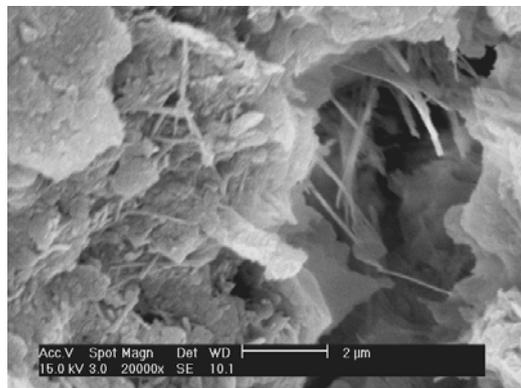
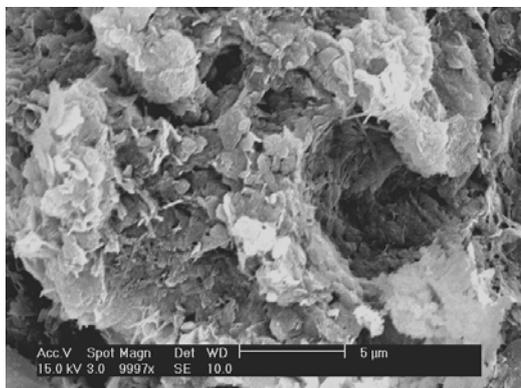
(b) 28 วัน



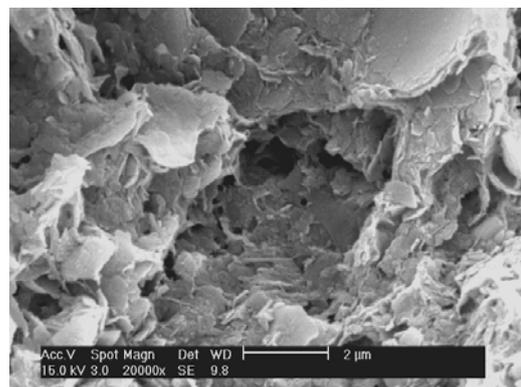
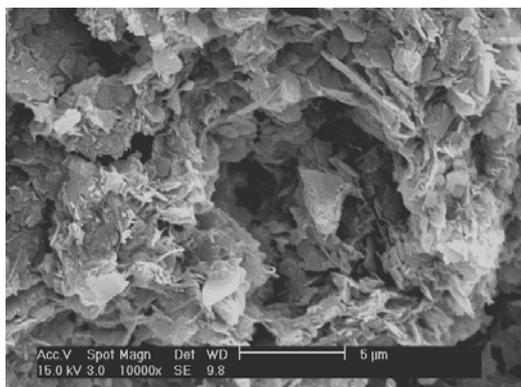
(c) 90 วัน

ภาพที่ 73 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-2

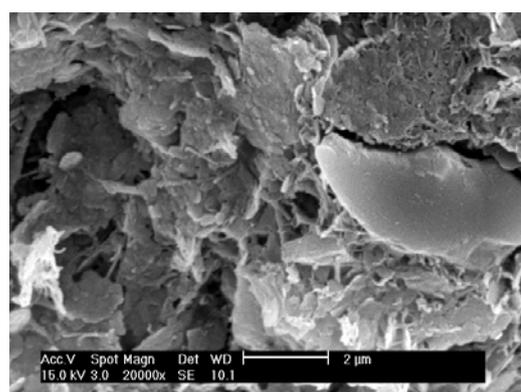
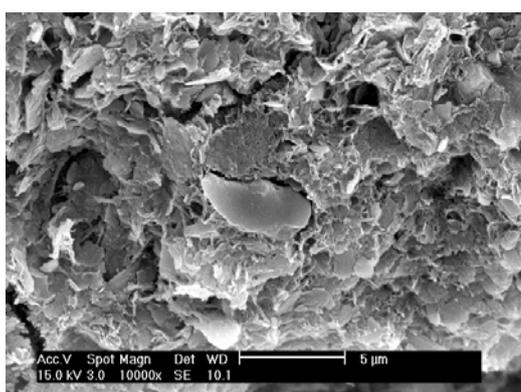
## 4.3 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Mix-3



(a) 7 วัน



(b) 28 วัน



(c) 90 วัน

ภาพที่ 74 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-3

จากภาพถ่าย SEM ในการวิเคราะห์โครงสร้างภายในเนื้อดินตะกอนซีเมนต์ Mix-4, Mix-5 และ Mix-6 ได้ผลปรากฏว่าดินตะกอนซีเมนต์ทุกอัตราส่วนผสมมีโครงสร้างที่มีความแน่นมากกว่าดินตะกอนก่อนปรับปรุงด้วยซีเมนต์ โดยเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นดินมีความแน่นมากขึ้นเล็กน้อย เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1, Mix-2 และ Mix-3

ภาพที่ 75 (a) - (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-4 พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) จะพบสารผลิตภัณฑ์ ได้แก่ CSH ซึ่งมีรูปร่างเป็นเกล็ดเล็กๆ และ Ettringite ซึ่งมีรูปร่างเป็นแท่งเข็ม กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดินเป็นจำนวนมาก และช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) จะสังเกตว่ายังจะพบ Ettringite อยู่ในปริมาณที่มาก โดยจะพบมากกว่า Mix-1, Mix-2 และ Mix-3 นอกจากนี้ยังพบ CSH กระจายตัวอยู่ทั่วไปในโครงสร้างดินเป็นจำนวนมากเช่นกัน ซึ่งจะผสมผสานรวมกับเนื้อของดินตะกอนและสารผลิตภัณฑ์อื่นๆ

ภาพที่ 76 (a) - (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-5 พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) เนื้อดินมีความแน่นใกล้เคียงกับ Mix-4 โดยจะพบ CSH และ Ettringite ปกคลุมพื้นผิวของโครงสร้างดินเป็นจำนวนมาก และช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) จะสังเกตว่ายังจะพบ CSH และ Ettringite อยู่ในปริมาณที่มากเช่นกัน โดยจะพบมากกว่า Mix-4 เพียงเล็กน้อย จึงทำให้โครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์มีความแน่นไม่แตกต่างจาก Mix-4 มากนัก

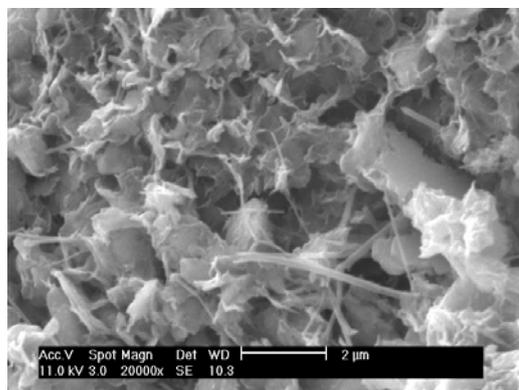
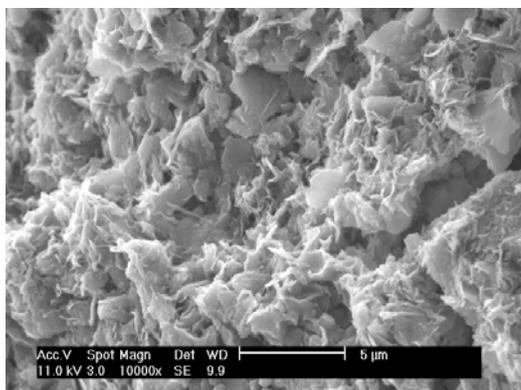
ภาพที่ 77 (a) - (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-6 พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) เนื้อดินมีความแน่นที่มากกว่า Mix-4 และ Mix-5 เล็กน้อย โดยจะพบ CSH และ Ettringite ปกคลุมพื้นผิวของโครงสร้างดินเป็นจำนวนมาก และช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) จะสังเกตว่ายังจะพบ CSH และ Ettringite อยู่ในปริมาณที่มากเช่นกัน โดยจะพบมากกว่า Mix-4 และ Mix-5 เพียงเล็กน้อย จึงทำให้โครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์มีความแน่นไม่แตกต่างจาก Mix-4 และ Mix-5 มากนัก

ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์ด้วย SEM ทำให้เห็นภาพความแน่นของโครงสร้างภายในมวลดิน พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น การที่ความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์ลดต่ำกว่าดินตะกอนก่อนการปรับปรุงคุณภาพ เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์ในมวลดิน ได้แก่ CSH และ Ettringite ปกคลุมกระจายอยู่ภายในโครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์ ทำให้โครงสร้างดินมีความแน่นมากขึ้น แต่ในช่วงอายุ

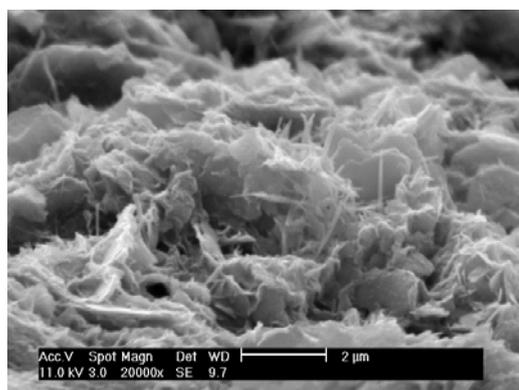
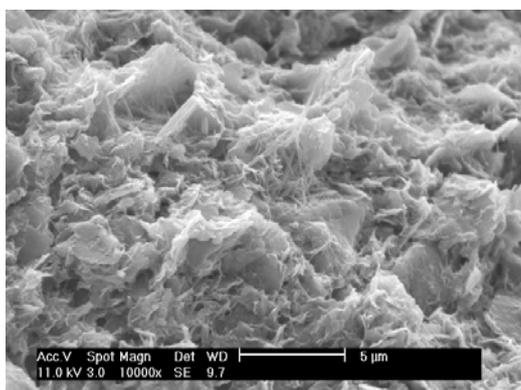
การบ่มระยะยาว การที่ค่าความชื้นน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เชื่อว่าเกิดจากการหดตัวของดินตะกอนซีเมนต์ เนื่องจากดินตะกอนซีเมนต์กลุ่มนี้มีปริมาณน้ำในดินก่อนการผสมเป็นปริมาณมาก จึงมีน้ำอยู่ในโพรงของอนุภาคดินซีเมนต์เป็นจำนวนมาก เมื่อถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาเคมีมากขึ้น ทำให้เกิดช่องว่างในมวลดินมากขึ้น จึงทำให้ความชื้นน้ำมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดทั้งปฏิกิริยา Hydration ในระยะสั้น และปฏิกิริยา Pozzolanic ในระยะยาว ได้มากขึ้น ดังจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากภาพถ่าย SEM พบสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite ที่มากขึ้น ทำให้โครงสร้างดินมีความแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ความชื้นน้ำลดลง ที่อายุการบ่มระยะสั้น แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว ความชื้นน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เชื่อว่าอาจเป็นผลเนื่องมาจากปัจจัยอื่นๆ เช่น การที่อนุภาคดินจับตัวกันเป็นก้อนระหว่างกระบวนการบีบอัดน้ำ ดังจะเห็นได้จากภาพ SEM ของดินตะกอนธรรมชาติเมื่อผ่านกระบวนการบีบอัดน้ำที่มีปริมาณความชื้นลดลง จะมีการจับตัวของอนุภาคเป็นก้อนมากขึ้น

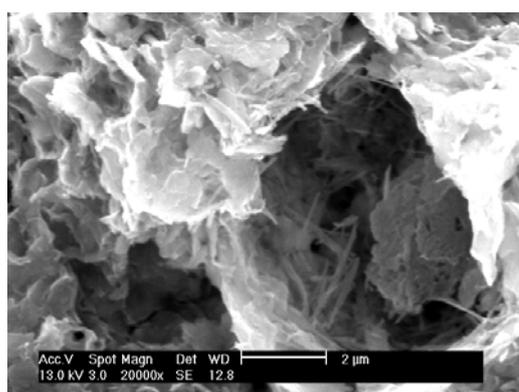
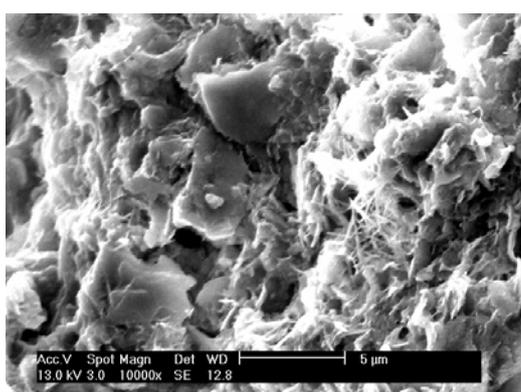
## 4.4 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Mix-4



(a) 7 วัน



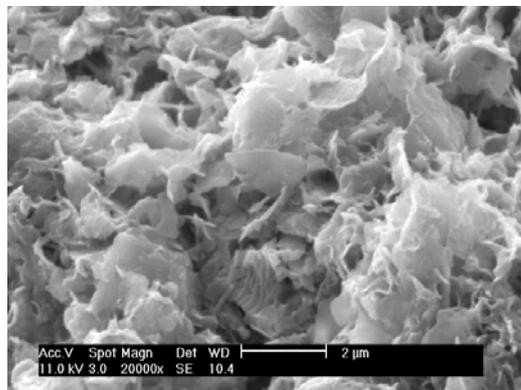
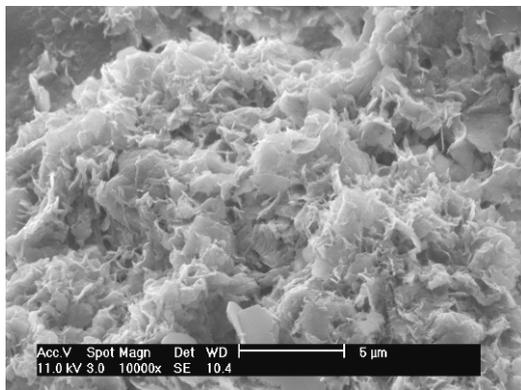
(b) 28 วัน



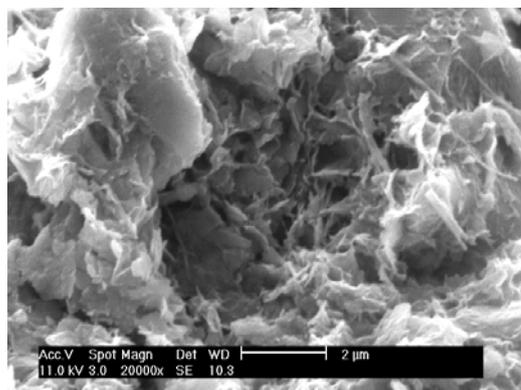
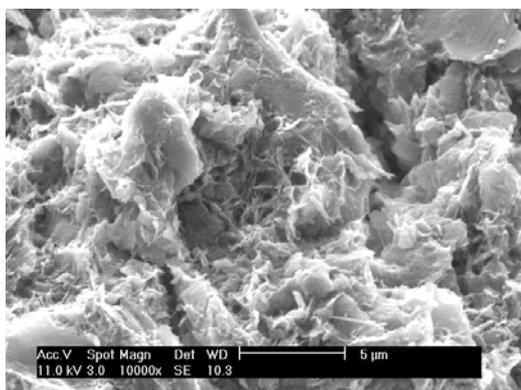
(c) 90 วัน

ภาพที่ 75 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-4

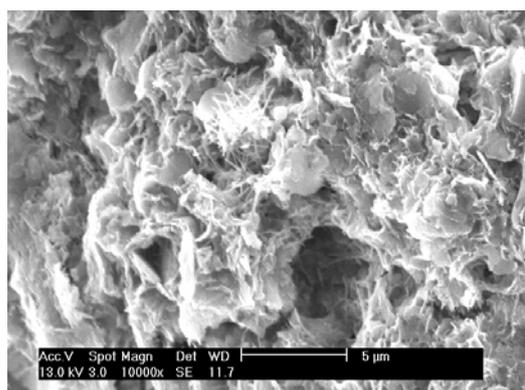
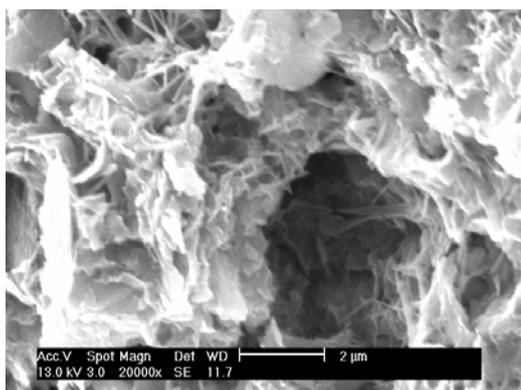
## 4.5 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Mix-5



(a) 7 วัน



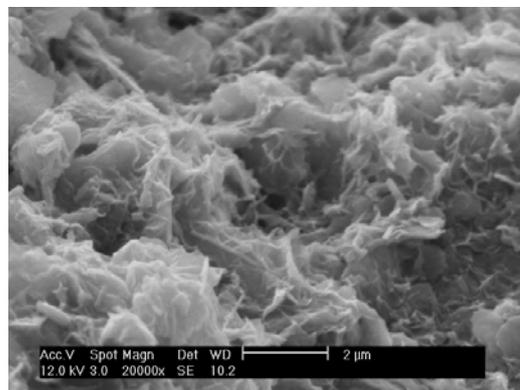
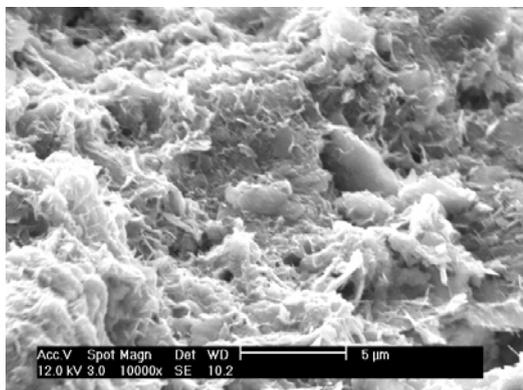
(b) 28 วัน



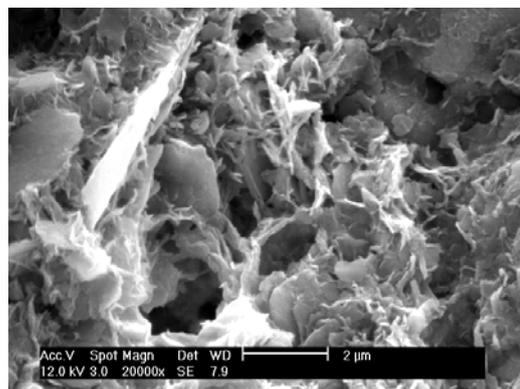
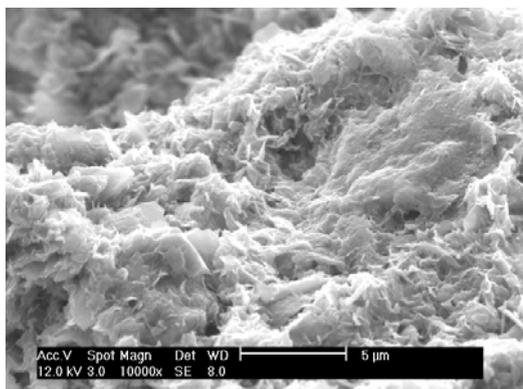
(c) 90 วัน

ภาพที่ 76 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-5

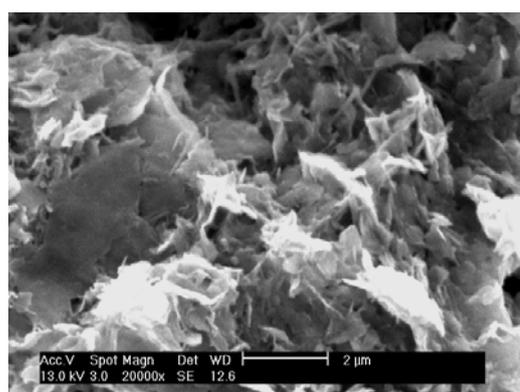
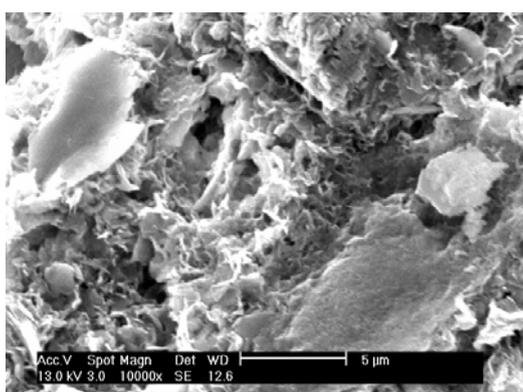
## 4.6 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Mix-6



(a) 7 วัน



(b) 28 วัน



(c) 90 วัน

ภาพที่ 77 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-6

## 5. ดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม

จากภาพถ่าย SEM ในการวิเคราะห์โครงสร้างภายในเนื้อดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม Mix-7, Mix-8 และ Mix-9 ได้ผลปรากฏว่าดินตะกอนซีเมนต์ทุกอัตราส่วนผสม เนื้อดินมีโครงสร้างที่มีความแน่นขึ้นมากกว่าดินตะกอนก่อนปรับปรุงด้วยซีเมนต์และดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้แทนที่ด้วยซิลิกาฟูมที่มีอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ที่เท่ากัน (Mix-5) โดยเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 7 วัน เป็น 28 วัน โครงสร้างดินมีความแน่นมากขึ้น เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1 ถึง Mix-6 แต่ที่อายุการบ่ม 90 วันในบางอัตราส่วนผสม จะสังเกตเห็นการสลายตัวของ Ettringite ในปริมาณมาก ทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ในโครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์

ภาพที่ 78 (a) - (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-7 พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) จะพบสารผลิตภัณฑ์ ได้แก่ CSH และ Ettringite กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดินเป็นจำนวนมาก และช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) จะสังเกตเห็นว่าจะพบ Ettringite อยู่ในปริมาณที่มาก โดยจะพบมากกว่า Mix-1 ถึง Mix-6 ทั้งอายุการบ่มระยะสั้นและระยะยาว นอกจากนี้ที่อายุการบ่มระยะยาวยังพบ CSH ปกคลุมพื้นผิวของโครงสร้างดินเป็นจำนวนมาก เช่นเดียวกับ Ettringite โดยจะผสมผสานรวมกันกับเนื้อของดินตะกอน เป็นโครงสร้างที่มีปริมาณช่องว่างในดินสูงขึ้นซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารผลิตภัณฑ์ Ettringite

ภาพที่ 79 (a) - (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-8 พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) เนื้อดินมีความแน่นที่มากกว่า Mix-7 เล็กน้อย โดยจะพบ CSH และ Ettringite กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดินเป็นจำนวนมาก และช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) จะสังเกตเห็นว่าจะพบ Ettringite อยู่ในปริมาณที่มากเช่นกัน โดยจะพบในปริมาณที่ไม่แตกต่างจาก Mix-7 จึงทำให้โครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์มีความแน่นไม่แตกต่างจาก Mix-7 มากนัก นอกจากนี้ยังพบ สารผลิตภัณฑ์ CSH เป็นปริมาณที่มากขึ้นและมากกว่า Mix-7 เพียงเล็กน้อย

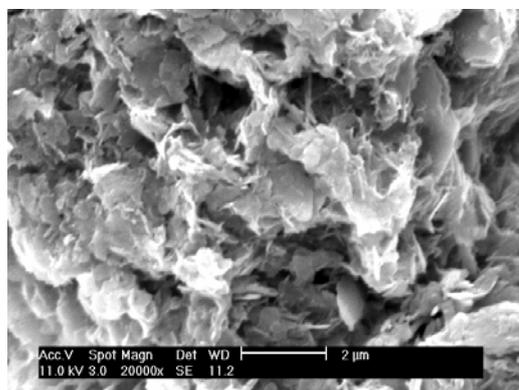
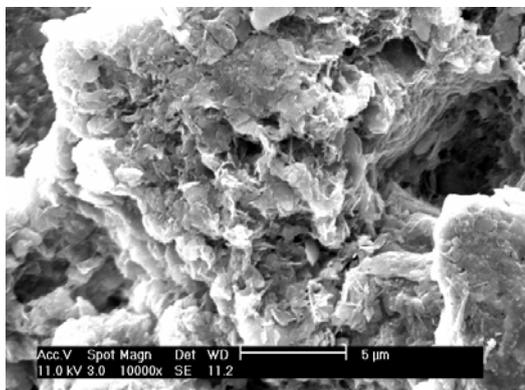
ภาพที่ 80 (a) - (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-9 พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) เนื้อดินมีความแน่นที่แตกต่างจาก Mix-7 และ Mix-8 โดยจะพบ CSH และ Ettringite กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดินเป็นจำนวนมาก ซึ่งมากกว่า Mix-7 และ Mix-8 พอสมควร จะส่งผลให้เกิดช่องว่างในมวลดินที่มีขนาดใหญ่ และช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) จะสังเกตเห็นว่าจะพบ Ettringite อยู่ในปริมาณที่มากเช่นกัน โดยจะพบมากกว่า Mix-7 และ Mix-8

จึงทำให้โครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์มีความแน่นมากกว่า Mix-7 และ Mix-8 และจะสามารถสังเกตสารผลิตภัณฑ์ CSH เป็นปริมาณมากและมากกว่าอัตราส่วนผสมอื่นๆ ปกคลุมกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างดิน

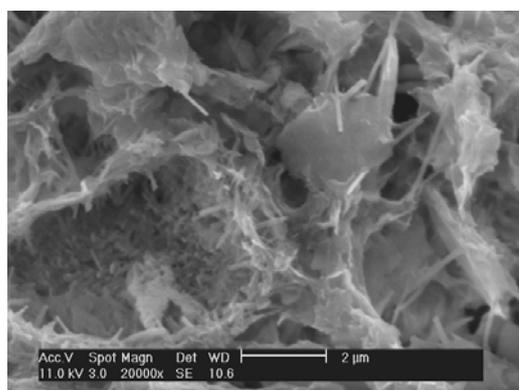
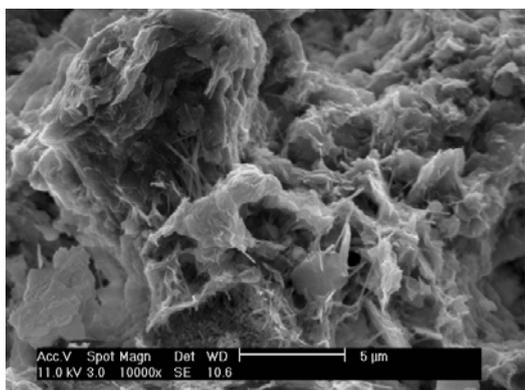
จากผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม ทำให้เห็นภาพโครงสร้างภายในมวลดิน พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น จากการสังเกตด้วยตาเปล่าจะปรากฏสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite กระจายอยู่ภายในโครงสร้างดินค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณซิลิกาฟูมมากที่สุดถึง 15% คือ Mix-9 จะเกิด Ettringite ซึ่งมีรูปร่างเป็นแท่งอยู่ในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก และจะพบได้น้อยลงในอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณซิลิกาฟูมน้อยลง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของ Mix-9 ลดต่ำกว่าอัตราส่วนผสมอื่นๆ แต่ในช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน) จากการสังเกตโครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมยังพบสารผลิตภัณฑ์ CSH เป็นปริมาณที่มากขึ้นและมากกว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมซิลิกาฟูม (Mix-5) ส่งผลให้มีความชื้นน้ำต่ำกว่า Mix-5 จึงเชื่อได้ว่ามีสาเหตุมาจากการเกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite ในมวลดิน ทำให้ช่องว่างในมวลดินลดปริมาณลง เนื้อดินตะกอนมีความแน่นขึ้น ทำให้ความชื้นน้ำลดต่ำลงไปด้วย แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว (90 วัน) การที่ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เชื่อว่าเกิดจากการหดตัวของดินตะกอนซีเมนต์ ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้ว จึงทำให้ความชื้นน้ำมีค่าสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากช่องว่างภายในโครงสร้างของดินจะมีปริมาณมากขึ้น

ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมด้วย SEM ทำให้เห็นภาพความแน่นของโครงสร้างภายในมวลดิน พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น การที่ความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์ลดต่ำกว่าดินตะกอนก่อนการปรับปรุงคุณภาพ เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์ในมวลดิน ได้แก่ CSH และ Ettringite กระจายอยู่ทั่วไปภายในโครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์ ทำให้โครงสร้างดินมีความแน่นมากขึ้น แต่ในช่วงอายุการบ่มระยะยาว ถึงแม้ว่าจะเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยก็ตาม แต่การที่ค่าความชื้นน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เชื่อว่าเกิดจากการหดตัวของดินตะกอนซีเมนต์ เนื่องจากดินตะกอนซีเมนต์กลุ่มนี้ที่ปริมาณน้ำในดินก่อนการผสมเป็นปริมาณมาก จึงมีน้ำถูกกักอยู่ในโพรงของอนุภาคดินซีเมนต์เป็นจำนวนมาก เมื่อถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาเคมี ทำให้เกิดช่องว่างในมวลดินเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความชื้นน้ำมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ตามลำดับ

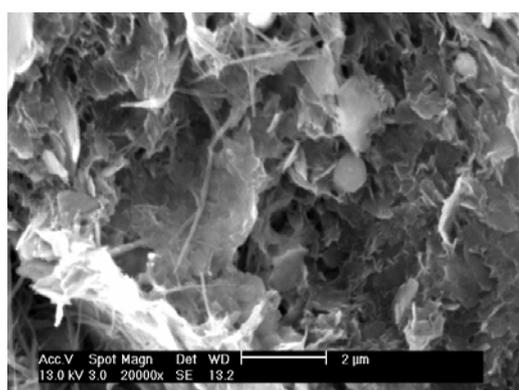
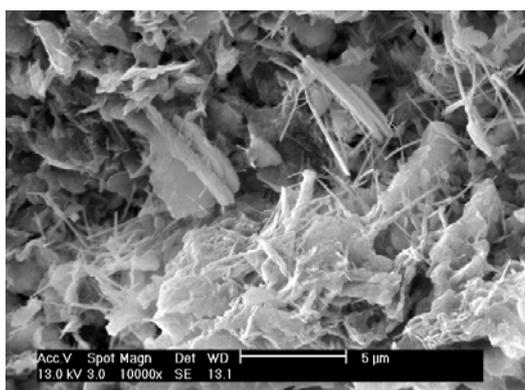
## 5.1 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Mix-7



(a) 7 วัน



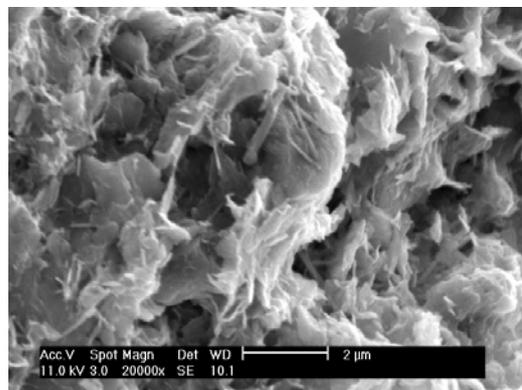
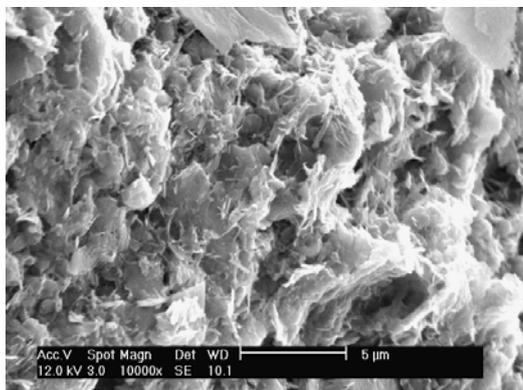
(b) 28 วัน



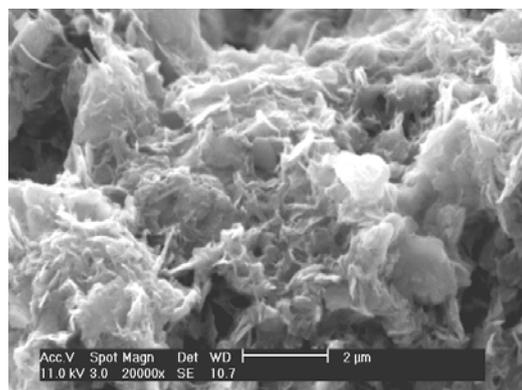
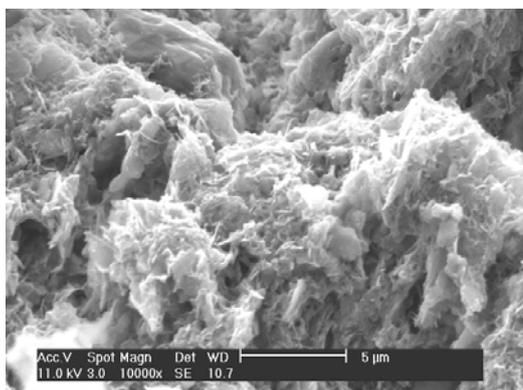
(c) 90 วัน

ภาพที่ 78 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมชิลิกาฟุ่ม Mix-7

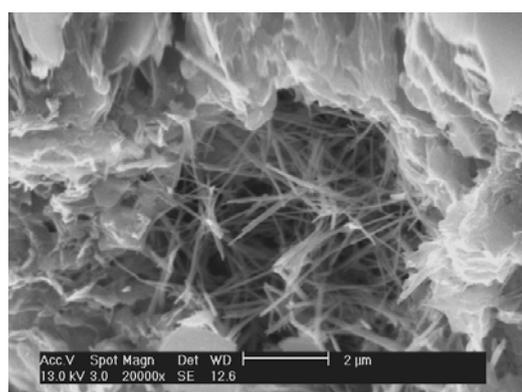
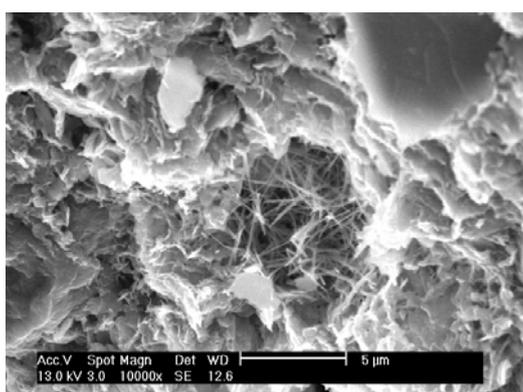
## 5.2 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Mix-8



(a) 7 วัน



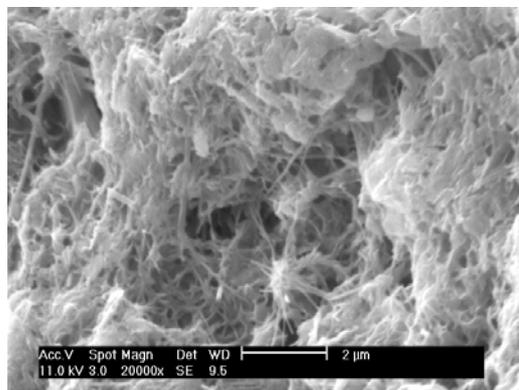
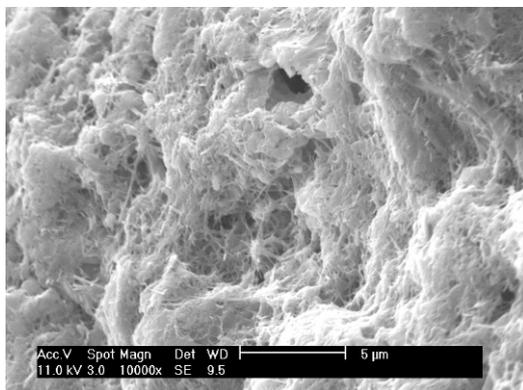
(b) 28 วัน



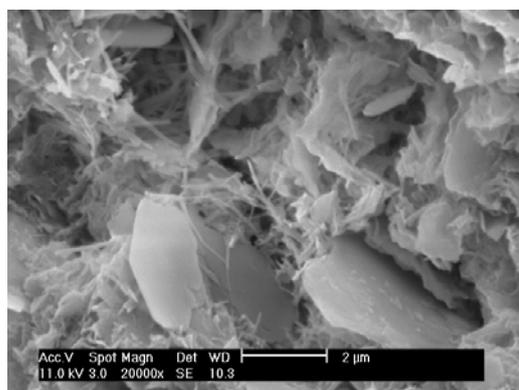
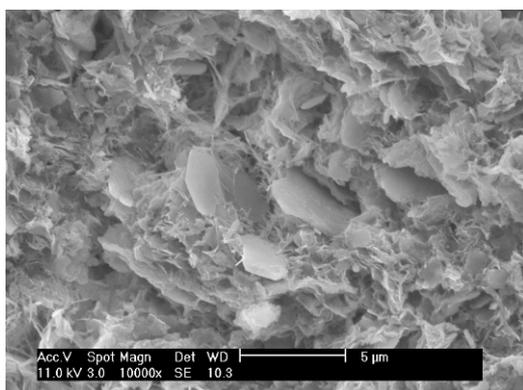
(c) 90 วัน

ภาพที่ 79 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม Mix-8

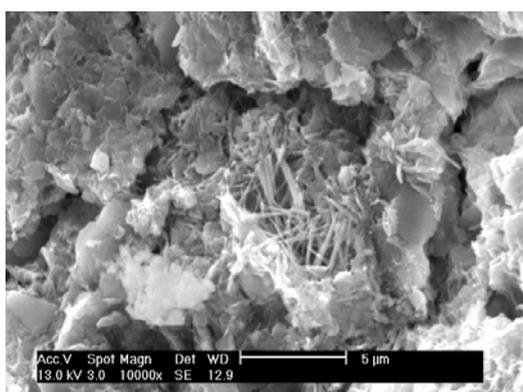
### 5.3 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Mix-9



(a) 7 วัน



(b) 28 วัน



(c) 90 วัน

ภาพที่ 80 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมชิลิกาฟูล์ม Mix-9

## 6. ดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย

จากภาพถ่าย SEM ในการวิเคราะห์โครงสร้างภายในเนื้อดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-10, Mix-11 และ Mix-12 ได้ผลปรากฏว่าดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายทุกอัตราส่วนผสม เนื้อดินมีโครงสร้างที่มีความแน่นขึ้นมากกว่าดินตะกอนก่อนปรับปรุงด้วยซีเมนต์ แต่มีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทรายที่มีอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ที่เท่ากัน (Mix-2) ซึ่งจะพบอนุภาคทรายกระจายตัวอยู่ทั่วไปภายในโครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์ โดยเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 7 วัน เป็น 28 วัน โครงสร้างดินมีความแน่นมากขึ้น เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1 ถึง Mix-6 และที่อายุการบ่ม 90 วันอัตราส่วนผสมต่าง จะสังเกตเห็น Ettringite เป็นปริมาณที่น้อยกว่าดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทราย มีเพียง CSH ที่จะสามารถพบได้ในปริมาณที่ไม่แตกต่างจากดินตะกอนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทรายมากนัก แต่โดยภาพรวมทำให้ดินตะกอนทะเลที่ผสมทรายเกิดโครงสร้างเนื้อดินที่มีความแน่นขึ้น

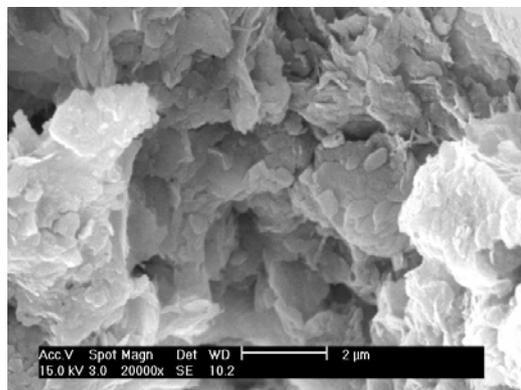
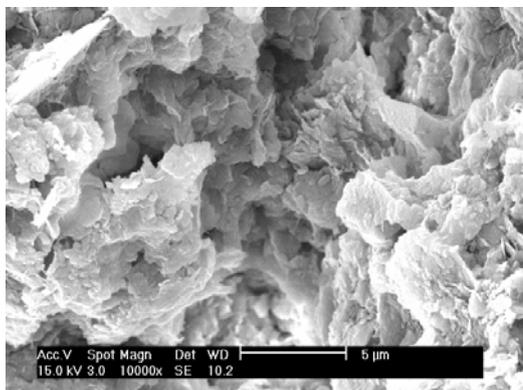
ภาพที่ 81 (a) - (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-10 พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) จะพบสารผลึกหลัก ได้แก่ CSH และ Ettringite กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดินเป็นจำนวนน้อย และช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) จะพบ CSH กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดินเป็นจำนวนไม่มากนัก โดยจะจับตัวผสมผสานกับสารผลึกหลักอื่นๆแทรกปะปนกับเนื้อดินตะกอน

ภาพที่ 82 (a) - (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-11 พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) จะพบสารผลึกหลัก ได้แก่ CSH และ Ettringite กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดินเป็นจำนวนน้อยเช่นเดียวกับ Mix-10 และช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) จะพบ CSH กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดินเป็นจำนวนไม่มากนัก ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกับ Mix-11 โดยจะจับตัวผสมผสานกับสารผลึกหลักอื่นๆรวมกันกับเนื้อดินตะกอน

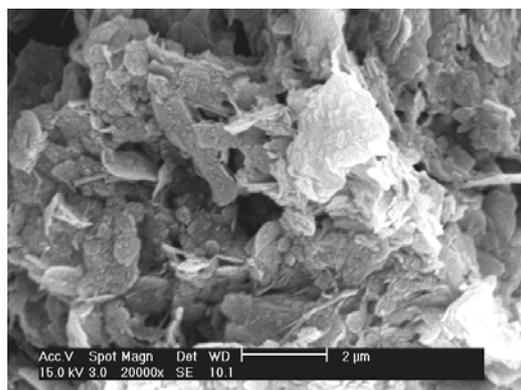
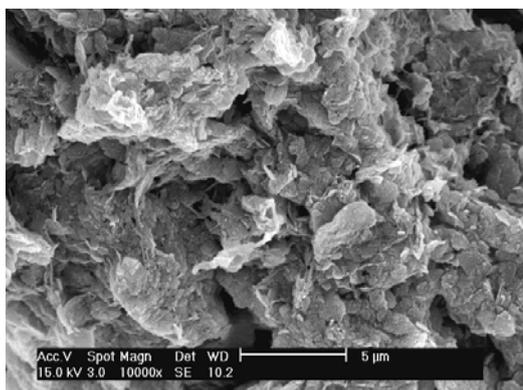
ภาพที่ 83 (a) - (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-12 พบว่าในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) จะพบสารผลึกหลัก ได้แก่ CSH และ Ettringite กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดินเป็นปริมาณที่มากกว่า Mix-10 และ Mix-11 เพียงเล็กน้อย และช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) จะพบ CSH กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดินเป็นที่มากกว่า Mix-10 และ Mix-11 เช่นเดียวกัน โดยจะจับตัวผสมผสานกับเนื้อดินตะกอนปนอยู่ในโครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์

ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายด้วย SEM ทำให้เห็นภาพความแน่นของโครงสร้างภายในมวลดิน พบว่าอนุภาคทรายทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสให้สารผลิตภัณฑ์ต่างๆ ยึดเกาะได้ดีขึ้น โดยในช่วงอายุการบ่มระยะสั้น (7 วัน) การที่ความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์ไม่แตกต่างจากดินตะกอนก่อนการปรับปรุงคุณภาพมากนักโดยจะลดต่ำลงเพียงเล็กน้อย ดังจะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์ในมวลดิน ได้แก่ CSH และ Ettringite ที่เกิดขึ้นเป็นปริมาณไม่มาก โดยกระจายอยู่ทั่วไปภายในโครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์ แต่ในช่วงอายุการบ่มระยะยาว (28 วัน และ 90 วัน) ถึงแม้ว่าจะเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic แต่เป็นเพียงการเกิดปฏิกิริยาอย่างอ่อนๆ เท่านั้น อย่างไรก็ตามการที่ค่าความชื้นน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เชื่อว่าเกิดจากการผสมทรายที่เพิ่มมากขึ้น อนุภาคดินจะมีขนาดละเอียดที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณผิวของอนุภาคทรายบางส่วนที่แทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคดินเหนียวที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและไม่ได้ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียส มีผลทำให้ค่าความชื้นน้ำของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทรายเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย ดังที่กล่าวมาแล้ว

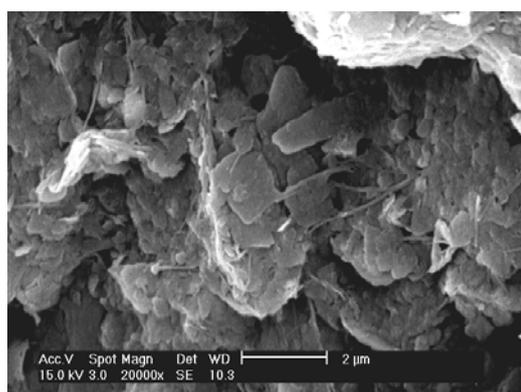
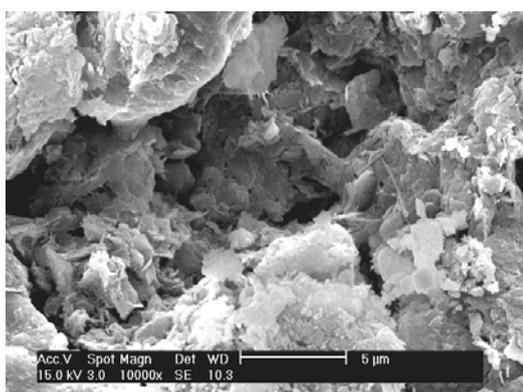
## 6.1 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Mix-10



(a) 7 วัน



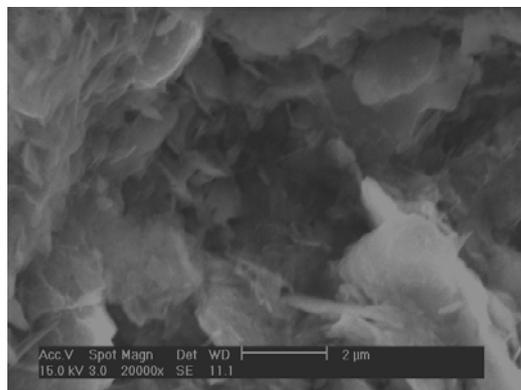
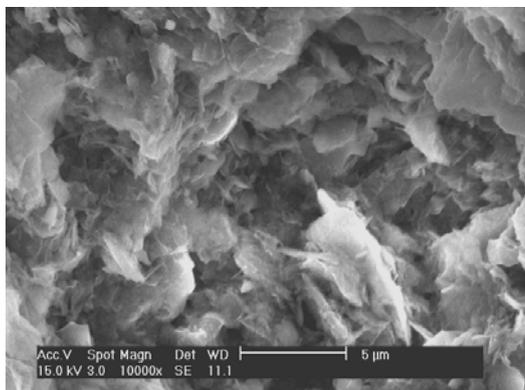
(b) 28 วัน



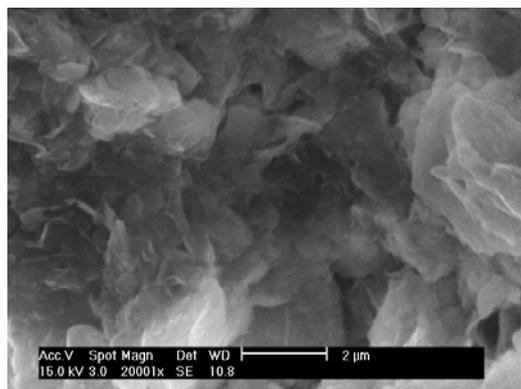
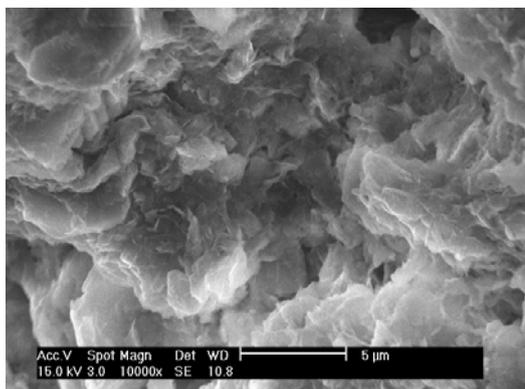
(c) 90 วัน

ภาพที่ 81 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-10

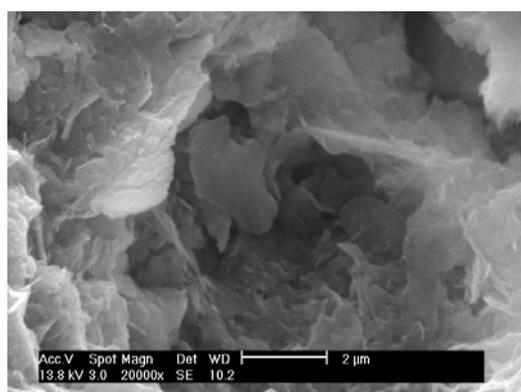
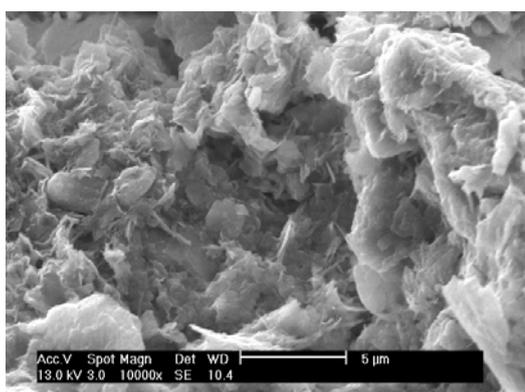
## 6.2 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Mix-11



(a) 7 วัน



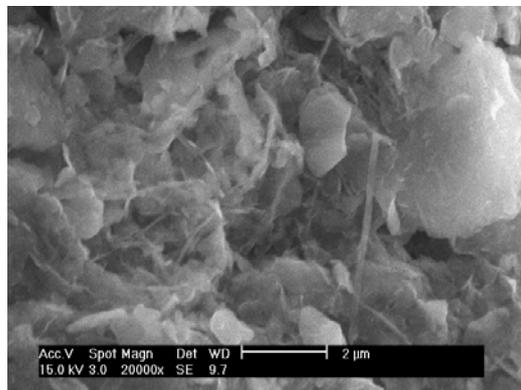
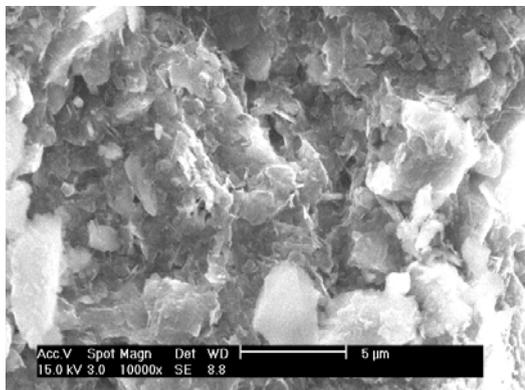
(b) 28 วัน



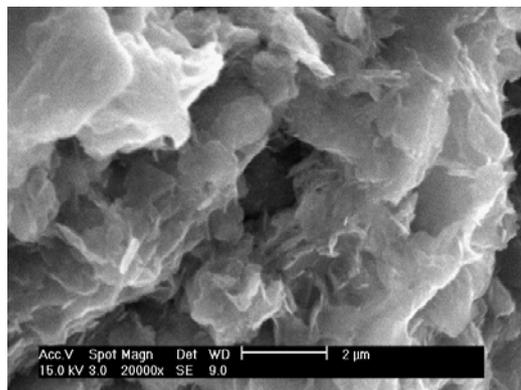
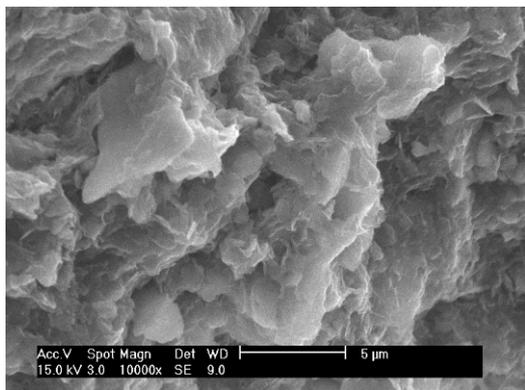
(c) 90 วัน

ภาพที่ 82 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-11

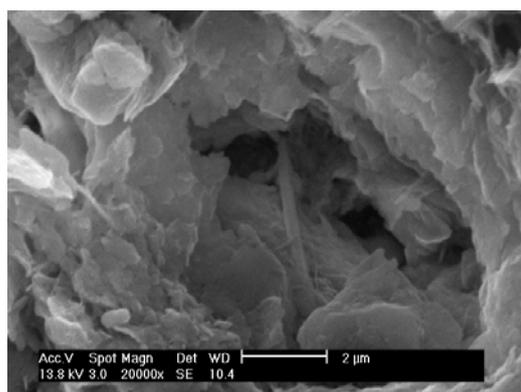
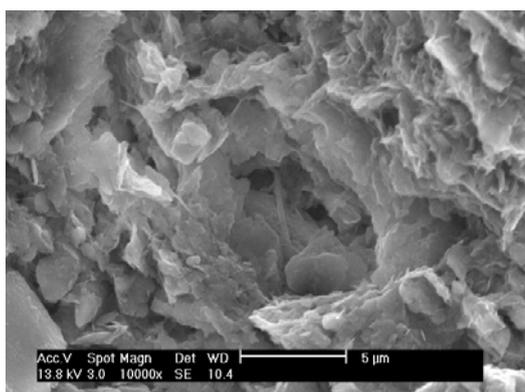
## 6.3 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Mix-12



(a) 7 วัน



(b) 28 วัน



(c) 90 วัน

ภาพที่ 83 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-12

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงกลไกของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลจากการขุดลอกที่ผสมซีเมนต์ ซึ่งใช้ซิลิกาฟูมและทรายเป็นสารผสมเพิ่ม โดยได้ทำการศึกษาคูสมบัติทางด้านกำลัง ความชื้นน้ำและการหดตัว ที่อายุการบ่มต่างๆ โดยการใช้เครื่องมือ X - ray Diffractometer (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ในการวิเคราะห์กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี จากการสังเกตสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของดินตะกอนซีเมนต์ ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ซึ่งผลสรุปของการศึกษานี้สรุปได้ ดังนี้

1. การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลด้วยการใช้ซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานในช่วงระหว่าง w/c ratio เท่ากับ 3.083 - 7.364 สามารถปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเล โดยกำลังจะเพิ่มขึ้น (อยู่ในช่วง  $1.00 \text{ kg/cm}^2$  -  $19.89 \text{ kg/cm}^2$ ) การหดตัวลดลง (อยู่ในช่วง 7.852 % - 24.062 %) และความชื้นน้ำที่ลดลง (อยู่ในช่วง  $5.605 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$  -  $2.112 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ )

2. การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลด้วยการใช้ซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมแทนบางส่วนเป็นสารเชื่อมประสาน โดยใช้ซิลิกาฟูมอยู่ในช่วง 5 % - 15 % ของปริมาณซีเมนต์ สามารถปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเล โดยกำลังจะเพิ่มขึ้น (อยู่ในช่วง  $3.84 \text{ kg/cm}^2$  -  $14.53 \text{ kg/cm}^2$ ) การหดตัวลดลง (อยู่ในช่วง 8.029 % - 32.678 %) และความชื้นน้ำที่ลดลง (อยู่ในช่วง  $1.545 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$  -  $5.276 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ )

3. การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลผสมทรายเพิ่ม โดยเติมทรายอยู่ในช่วง 5 % - 15 % ของน้ำหนักดินตะกอน และใช้ซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน สามารถปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเล โดยกำลังจะเพิ่มขึ้น (อยู่ในช่วง  $1.28 \text{ kg/cm}^2$  -  $6.83 \text{ kg/cm}^2$ ) การหดตัวลดลง (อยู่ในช่วง 13.153 % - 31.847 %) และความชื้นน้ำที่เพิ่มขึ้น (อยู่ในช่วง  $1.457 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$  -  $5.743 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ )

4. จากการศึกษาพบว่าดินตะกอนทะเลจากการขุดลอก หลังผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทั้งเทคนิคทางกลและทางเคมีร่วมกันแล้ว สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม ให้มีศักยภาพที่จะสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างตามแนวทางวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อม (Geo - environmental Engineering) ได้

5. การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลที่มีความชื้นสูงมากด้วยการบีบน้ำ (Dewatering) ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ สามารถลดน้ำส่วนเกินและปรับปริมาณน้ำให้เหมาะสม (1.1 - 1.4 LL) ก่อนที่จะนำไปปรับปรุงด้วยวิธีทางเคมี ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเมื่อผสมปูนซีเมนต์หรือสารผสมเพิ่มที่เหมาะสมจะทำให้ได้คุณสมบัติดินตามต้องการ

6. จากการศึกษาพบว่าสัดส่วนของปริมาณน้ำในดินตะกอนทะเลก่อนการปรับปรุงคุณภาพ กับปริมาณซีเมนต์ (w/c ratio) เป็นปัจจัยสำคัญต่อการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีด้วยการผสมซีเมนต์ ซึ่งจะเป็นค่าที่สามารถใช้ประเมินคุณสมบัติในการเลือกอัตราส่วนผสมของดินตะกอนซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางวิศวกรรมตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งานเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

7. จากผลการศึกษาพบว่าค่า w/c ratio ประมาณ 3 หรือน้อยกว่า มีศักยภาพใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางในงานถนน โดยกำลังที่อายุการบ่ม 7 วันมีค่ามากกว่า  $7 \text{ kg/cm}^2$  ส่วนที่ w/c ratio ประมาณ 5 - 6 มีศักยภาพที่จะสามารถใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้ เนื่องจากสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติทางด้านกำลังให้มีค่ามากกว่า  $2 \text{ kg/cm}^2$  และความซึมน้ำต่ำกว่า  $10^{-7} \text{ cm/sec}$  ยกเว้นค่าการหดตัวจะต้องทำการศึกษาสัดส่วนผสมเพื่อให้มีค่าไม่เกิน 4 % ต่อไป

8. จากงานวิจัยนี้ได้ใช้ซิลิกาฟูม ซึ่งเป็นวัสดุประเภทปอซโซลาน (Pozzolan) ผสมแทนซีเมนต์บางส่วน เพื่อลดปริมาณซีเมนต์และปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น โดยสามารถสรุปได้ว่าซิลิกาฟูมแทนซีเมนต์ไม่เกิน 10 % ทำให้การพัฒนากำลังเพิ่มมากขึ้น ( $q_u = 13.80 \text{ kg/cm}^2$  ที่ 90 วัน) และมีศักยภาพลดการหดตัวให้น้อยลง (9.583 % ที่ 90 วัน) ส่วนความซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยที่อายุการบ่มไม่เกิน 28 วัน ( $k = 2.188 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ )

9. การเติมทรายละเอียดในดินตะกอนทะเลผสมซีเมนต์ เพื่อเสริมโครงสร้างดินให้แข็งแรงขึ้นและปรับปรุงคุณสมบัติด้านการหดตัวที่ดีขึ้น จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าการเติมทราย 15 % ทำให้การพัฒนากำลังเพิ่มมากขึ้น ( $q_u = 6.83 \text{ kg/cm}^2$  ที่ 90 วัน) และมีศักยภาพลดการหดตัวให้น้อยลง (13.794 % ที่ 90 วัน) ส่วนความชื้นน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่อายุการบ่มไม่เกิน 28 วัน ( $k = 5.779 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ )

10. จากการศึกษากลไกการปรับปรุงคุณภาพด้วยการวิเคราะห์ X - ray Diffraction (XRD) พบว่าการเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH และ Ettringite จากปฏิกิริยา Hydration และ Pozzolanic ของซีเมนต์ มีความสอดคล้องกับการลดลงของ  $C_3S$  ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญในปฏิกิริยา โดยส่งผลต่อโครงสร้างภายในดินตะกอนซีเมนต์และการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ได้แก่ กำลัง ความชื้นน้ำและการหดตัว โดยเฉพาะการพัฒนากำลังที่มากขึ้นและรวดเร็ว ที่อายุการบ่มระยะสั้น และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือคงที่ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นในระยะยาว สอดคล้องกับการเกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite (จากปฏิกิริยา Hydration) เป็นปริมาณมากในระยะสั้น และเข้าสู่สภาวะคงที่ในระยะยาว (จากปฏิกิริยา Pozzolanic)

11. การใช้ซิลิกาฟุ้งผสมแทนซีเมนต์บางส่วน นอกจากจะเป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่อายุการบ่มระยะสั้นแล้ว ยังส่งผลในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมในระยะยาวด้วย ทั้งนี้สามารถสังเกตได้ที่อายุการบ่มระยะสั้น มีอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  ที่มากและรวดเร็วกว่าดินตะกอนที่ผสมซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยา Hydration และ Pozzolanic และยังคงมีอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่อายุการบ่มระยะยาว ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยา Pozzolanic โดยตรง ส่งผลให้กำลังเพิ่มมากขึ้น ความชื้นน้ำและการหดตัวลดลงอย่างรวดเร็วในระยะสั้น และกำลังเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย ความชื้นน้ำและการหดตัวลดลงเล็กน้อยหรือคงที่ในระยะยาว

12. จากการเติมทรายละเอียดในส่วนผสมของดินตะกอนซีเมนต์ พบว่าเป็นการช่วยเสริมโครงสร้างของดินตะกอน ทั้งยังทำให้ค่า w/c ratio ลดลง ส่งผลให้การพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นมาก โดยเฉพาะในระยะสั้น แต่จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงอายุการบ่มระยะยาว และทำให้การหดตัวลดลงมากเช่นกัน นอกจากนั้นที่อายุการบ่มระยะสั้น ความชื้นน้ำคงที่หรือลดลงเล็กน้อย แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทรายเพิ่ม

14. จากการศึกษารูปภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีความสอดคล้องกับผลจาก XRD ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสารผลึกกันได้อย่างชัดเจน โดยการเกิดสารผลึกกัน CSH (รูปร่างเป็นเกล็ดเล็กๆ) และ Ettringite (รูปร่างเป็นแท่ง) สานตัวปกคลุมพื้นผิวดินตะกอนซีเมนต์ ทำให้โครงสร้างดินตะกอนซีเมนต์แน่นขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับความชื้นน้ำจะมีค่าลดลงที่อายุการบ่มระยะสั้น แต่ที่อายุการบ่มระยะยาว สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสารผลึกกันทั้งสองไม่มาก

15. การเติมทรายในดินตะกอนผสมซีเมนต์ อนุภาคทรายจะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างดินตะกอน โดยทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสสำหรับให้สารผลึกกันต่างๆ ยึดเกาะได้ดีขึ้น ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้กำลังเพิ่มขึ้นและการหดตัวที่ลดลง ส่วนความชื้นน้ำจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคทรายบางส่วนที่แทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคดินเหนียวที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและไม่ได้ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียส ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเพิ่มมากขึ้น

### ข้อเสนอแนะ

1. การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเลด้วยการผสมผสานระหว่างวิธีทางกลและทางเคมี จะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลัง ลดการหดตัว และลดความชื้นน้ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่งานทางวิศวกรรมส่วนใหญ่ต้องการ อย่างไรก็ตาม การลดการหดตัวและความชื้นน้ำในระยะยาว ยังจำเป็นต้องหาเทคนิควิธีการที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของวัสดุในระยะยาว เช่น การทดลองเลือกใช้สารเชื่อมประสานอื่นๆ หรือการทดลองหาอัตราส่วนผสมใหม่โดยใช้สารผสมเพิ่ม เป็นต้น

2. จากการทดสอบ XRD และ SEM เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเรื่องของการเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างลึกซึ้งและแม่นยำ อาจต้องมีการทดสอบในช่วงเริ่มต้นสั้นของปฏิกิริยาหลังจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเชื่อมประสานอย่างละเอียด เนื่องจากช่วงเวลาการเกิดปฏิกิริยาของซีเมนต์จะเกิดขึ้นมากและดำเนินไปอย่างรวดเร็วในทันทีหลังการผสมสารเชื่อมประสาน

3. ในอนาคต หากมีการนำดินตะกอนมาใช้งานจริง ควรมีการประดิษฐ์เครื่องมือบีบน้ำหนักเรือชุดลอกตะกอนให้มีปริมาณความชื้นตามต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้ทันที

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กมล อมรฟ้า. 2545. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ซีเมนต์และปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- การทำเรือแห่งประเทศไทย. 2542. **Feasibility and Design Second Navigation channel for access to Bangkok Port.** Thailand.
- กรมการขนส่งทางน้ำและพาณิชยนาวี. 2548. ผลการปฏิบัติงานขุดลอกร่องน้ำชายฝั่งทะเล. แหล่งที่มา: <http://www.md.go.th/plan/document/sea48.pdf>, 15 ธันวาคม 2549.
- ปริญญา จินดาประเสริฐและชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2549. **Cement Pozzolan and Concrete.** สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.
- วารสาร ไร่เรียง. 2540. Land Reclamation on Soft Clay: Case Study in Thailand, น. 113 - 128. **วิศวกรรมปฐพีเพื่อสิ่งแวดล้อม ครั้งที่ 1.** วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- American Concrete Institute. 2000. **ACI 234R-96 Guide for the Use of Silica Fume in Concrete.** ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Michigan.
- Boonyong, S. 2004. **Strength Development of Soft Marine Clay Stabilized with Fly Ash Cement.** M.S. Thesis, Kasetsart University.
- Experts in Team 2004, Team 3, village 22. 2004. **Importance of Public Awareness of Dredging in Trondheim Harbour.** Norwegian University of science and technology. Trondheim.
- Hausmann. 1990. **M.R. Engineering principles of ground modification.** McGraw-Hill, Sydney.

- Kaewkaorop, P. 2007. **Stabilization of Seabed Dredged Material for Landfill Liners**. M.S. Thesis, Kasetsart University.
- Kamon, M. and S. Nontananandh. 1990. Contribution of Stainless - Steel Slag to the Development of Strength for Seabed Hedoro. **Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Soil and Foundations** 30 (4): 63 - 72.
- \_\_\_\_\_. 1991. Combining Industrial Wastes with Lime for Soil Stabilization. **Journal of Geotechnical Engineering** 117 (1): 1 - 17.
- Mitchell, J.K. 1976. **Fundamentals of Soil Behavior**. John Wiley & Sons Inc, New York.
- Nontananandh, S. 1990. **Industrial Waste Utilization as Construction Material by Chemical Stabilization**. Doctoral Thesis, Kyoto University.
- Nontananandh, S. et al. 2004. Strength Development of Soft Marine Clay Stabilized with Cement and Fly Ash. **The Kasetsart Journal** 38 (4): 539 - 552.
- \_\_\_\_\_. 2007. Stabilization of Seabed Dredged Materials, pp. 406 - 410. **The 12<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering**. Naresuan University, Phitsanulok.
- Saitoh, S. et al. 1985. Hardening of Soil Improvement by Deep Mixing Method. **Proc. of the 11<sup>th</sup> ISCMFE**, San Francisco 3: 1745 - 1748.
- Suksiritawonkul, A. 2007. **Stabilization of Seabed Dredged Sludge as Construction Materials**. M.S. Thesis, Kasetsart University.
- Tresselt, K. et al. 1998. Harbour sludge as barrier material in landfill cover systems. **Science Direct, Water Science and Technology**. 37 (6-7): 307 - 313.

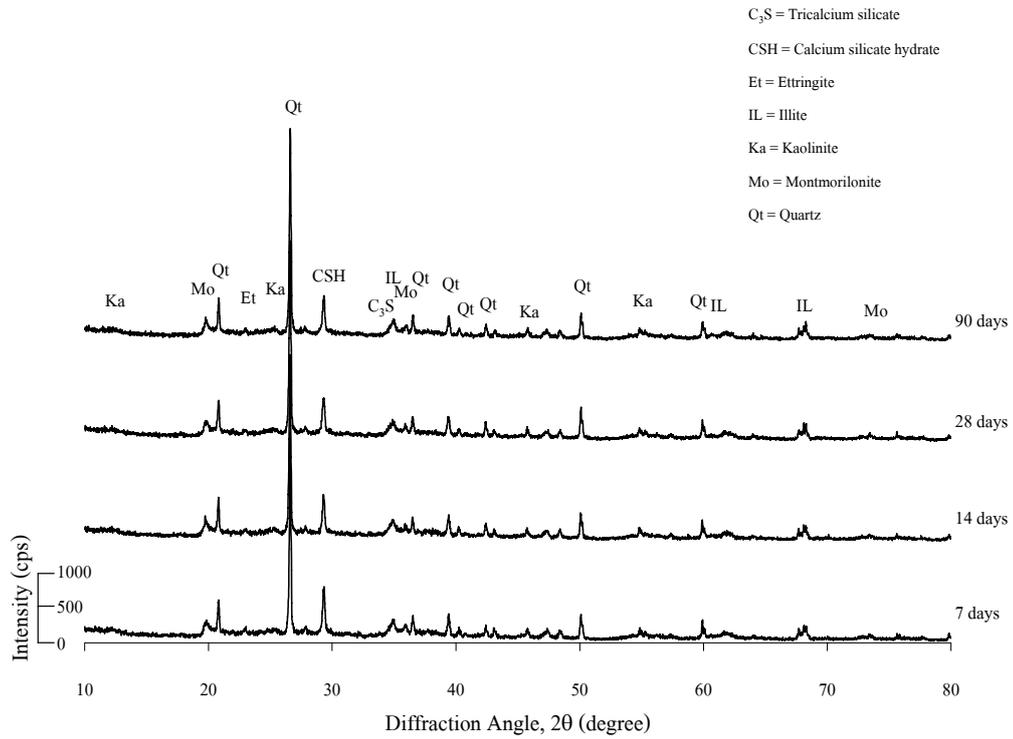
US Army Corps of Engineer. 1987. **Beneficial Uses of Dredged Material**. Engineering and design Manual , Washington, D. C.

Yoobanpot, T. 2004. **Microscopic Investigation on The Cement Stabilized Soft Bangkok**. M.S. Thesis, Kasetsart University.

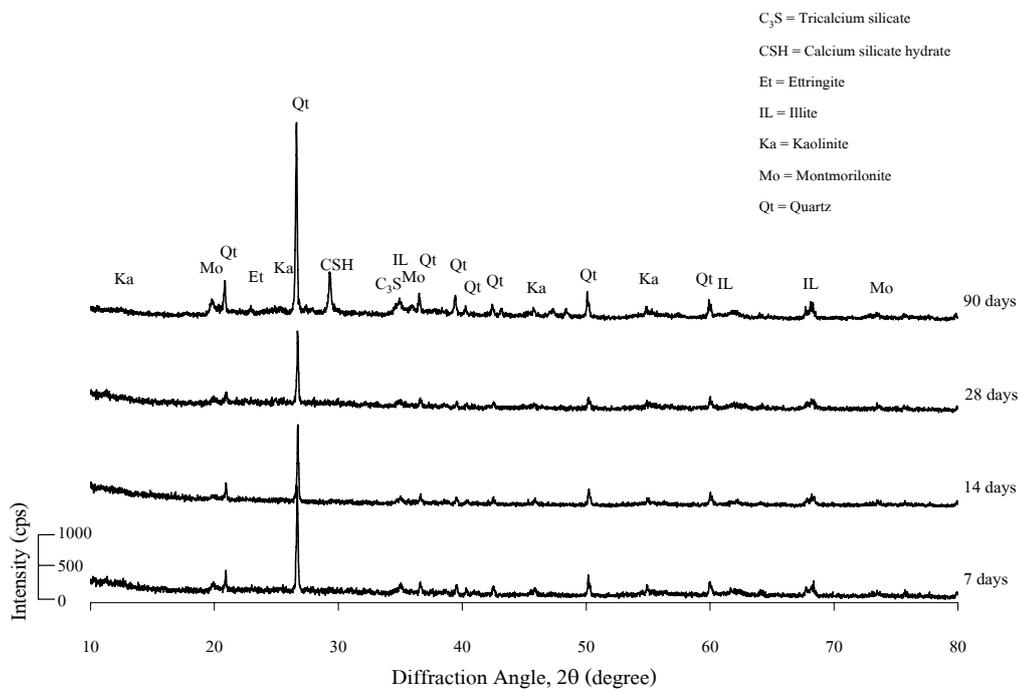
**ภาคผนวก**

**ภาคผนวก ก**

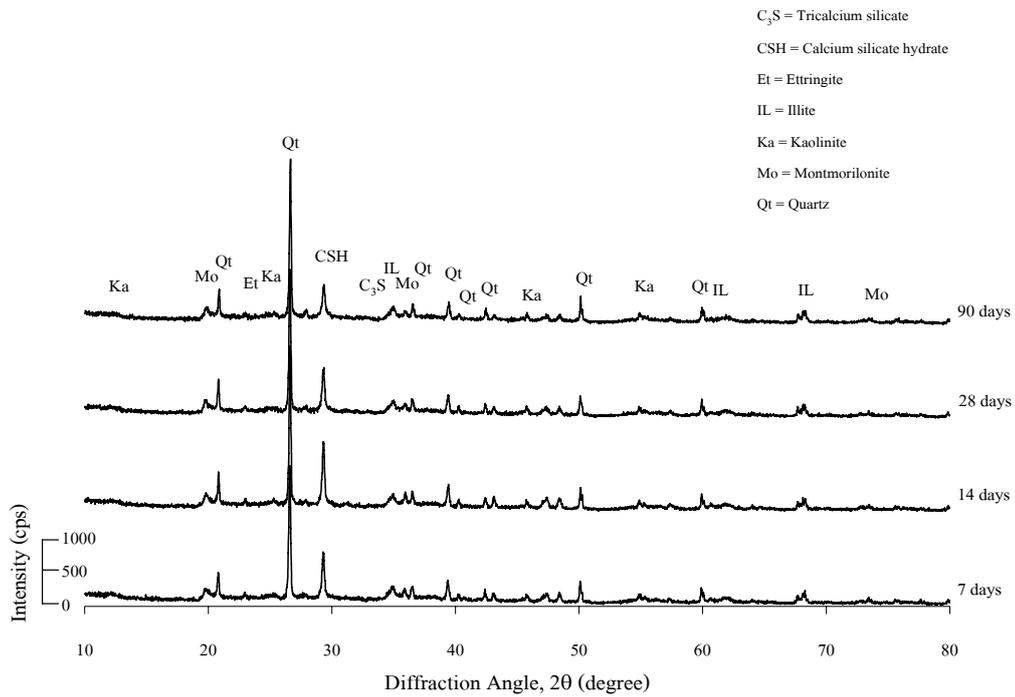
X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์



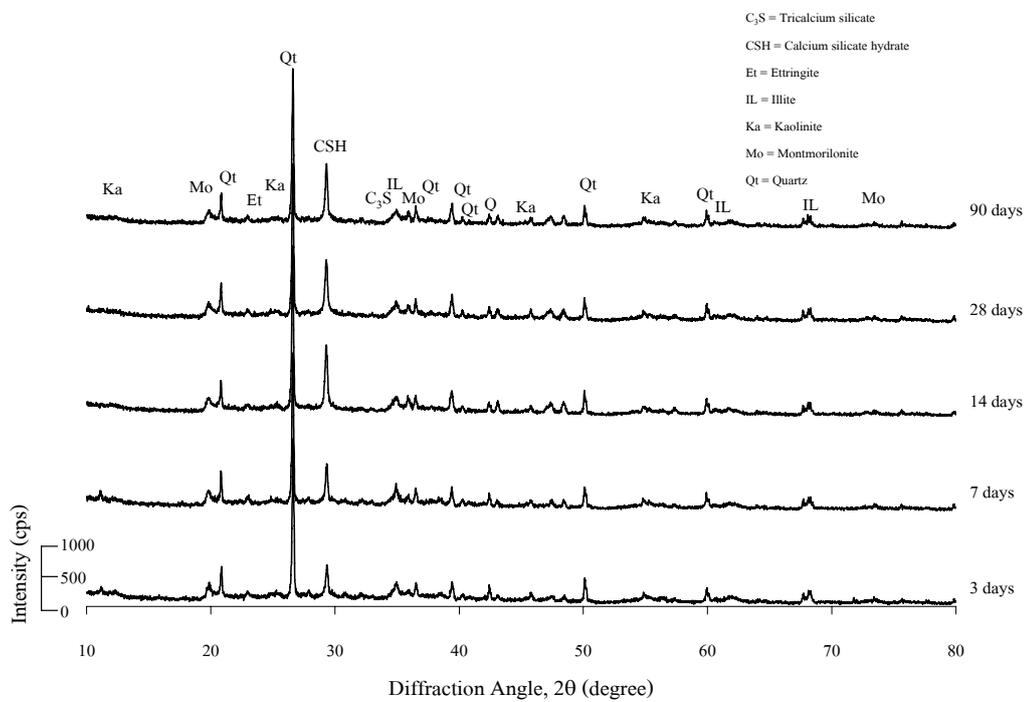
ภาพผนวกที่ ก1 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1 จากการทดสอบ XRD



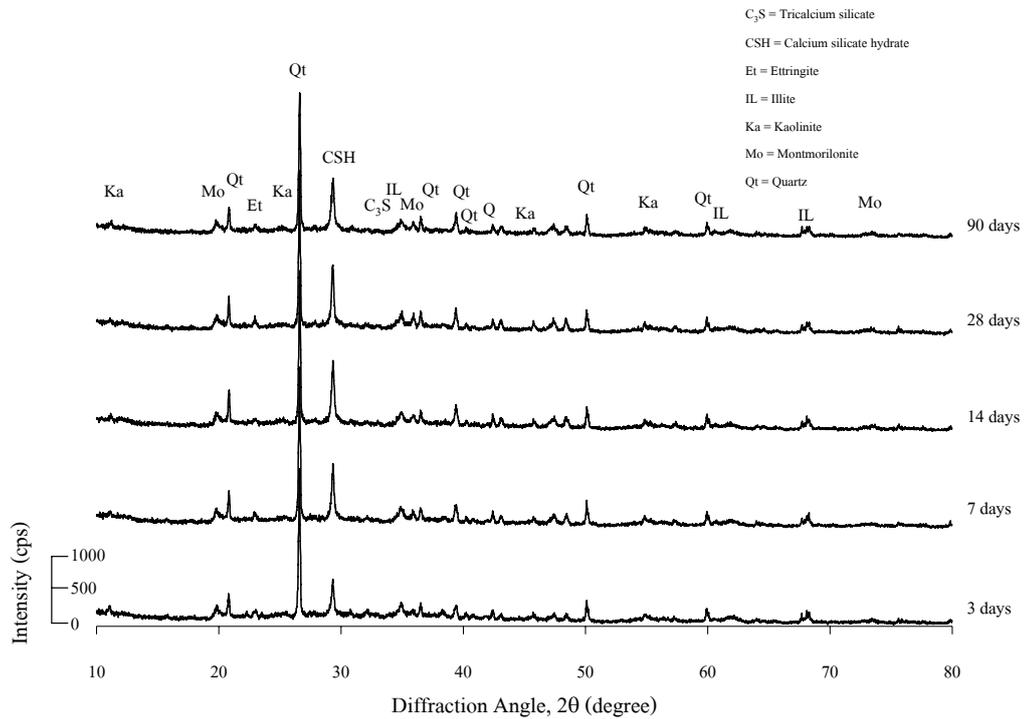
ภาพผนวกที่ ก2 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-2 จากการทดสอบ XRD



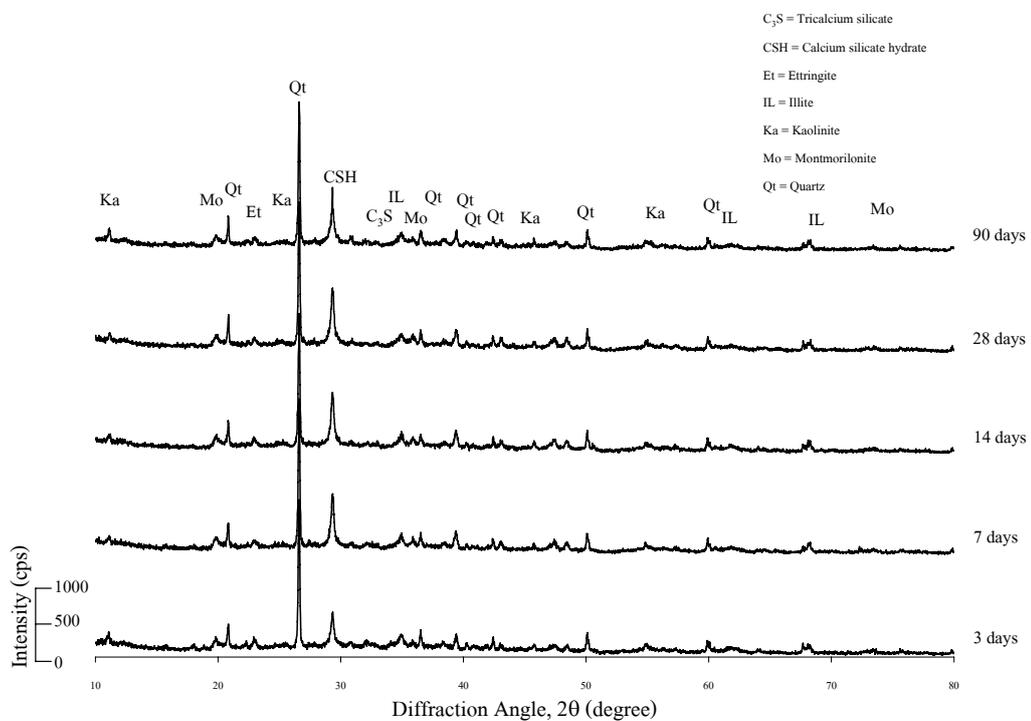
ภาพผนวกที่ ก3 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-3 จากการทดสอบ XRD



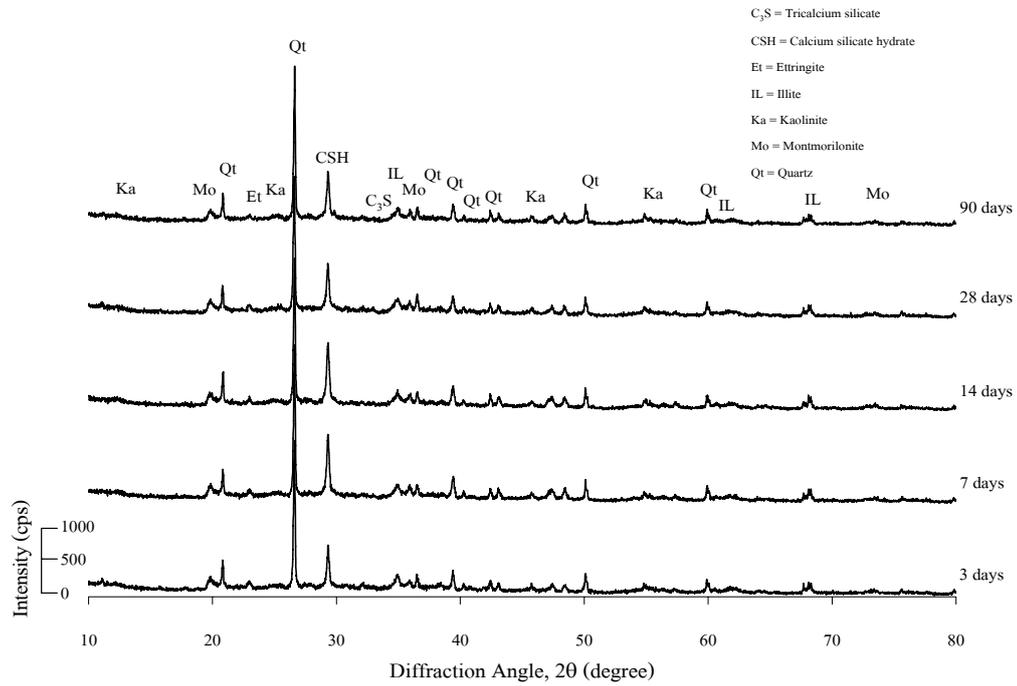
ภาพผนวกที่ ก4 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-4 จากการทดสอบ XRD



ภาพผนวกที่ ก5 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-5 จากการทดสอบ XRD

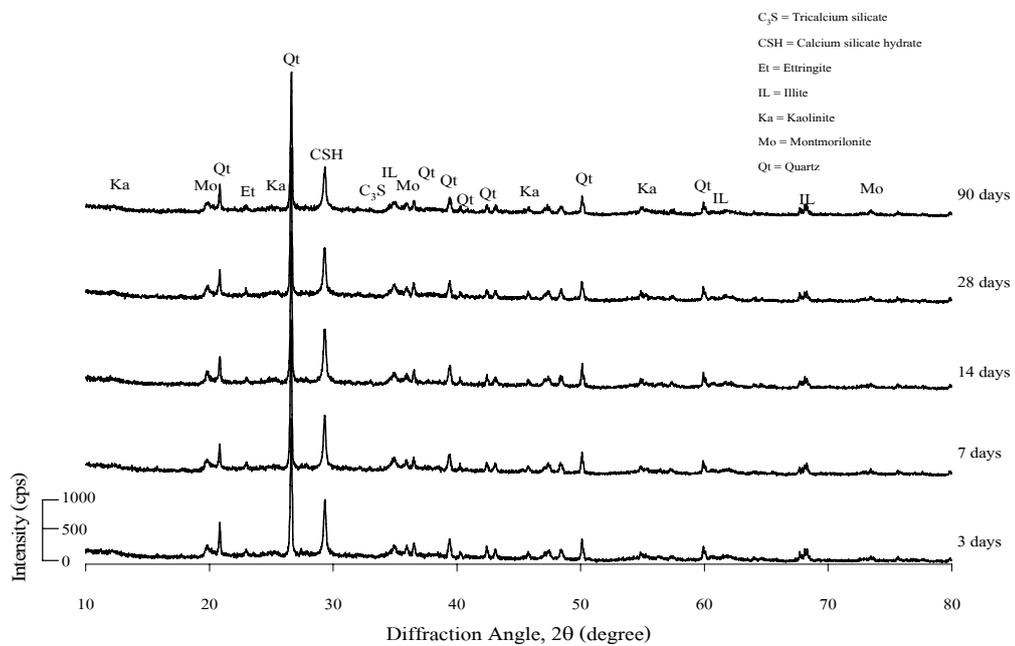


ภาพผนวกที่ ก6 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-6 จากการทดสอบ XRD



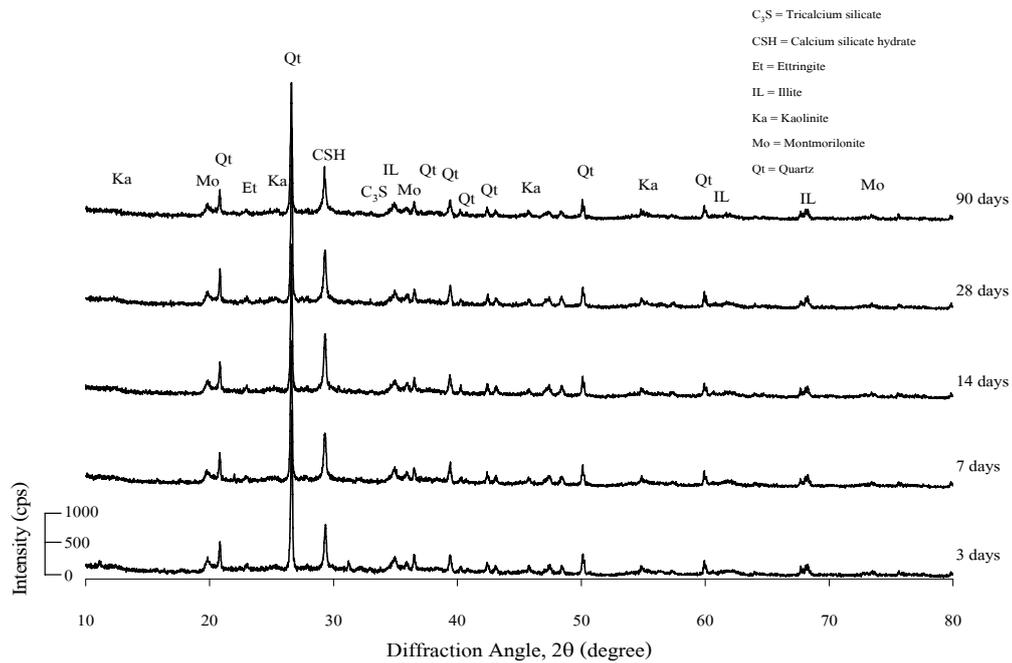
ภาพผนวกที่ ก7 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม Mix-7

จากการทดสอบ XRD



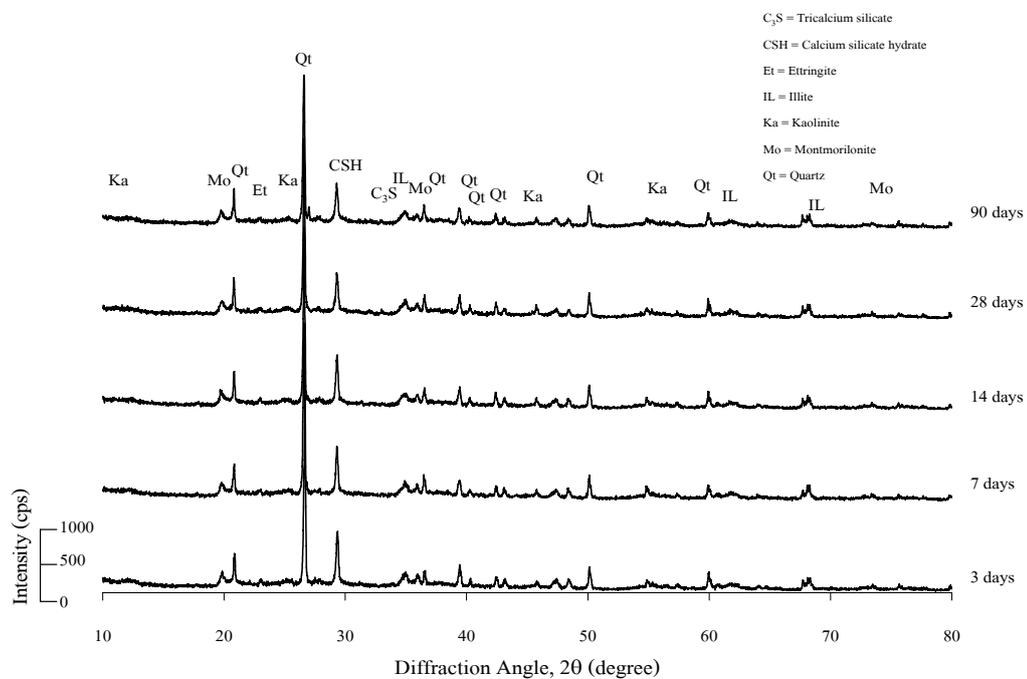
ภาพผนวกที่ ก8 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม Mix-8

จากการทดสอบ XRD



ภาพผนวกที่ ก9 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม Mix-9

จากการทดสอบ XRD



ภาพผนวกที่ ก10 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-10

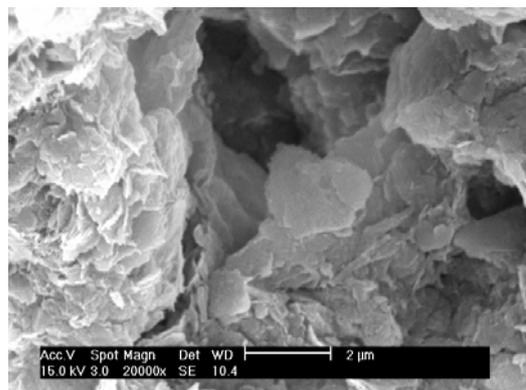
จากการทดสอบ XRD

**ภาคผนวก ข**

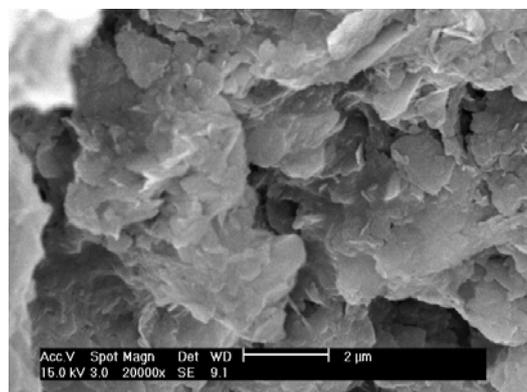
**ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์**



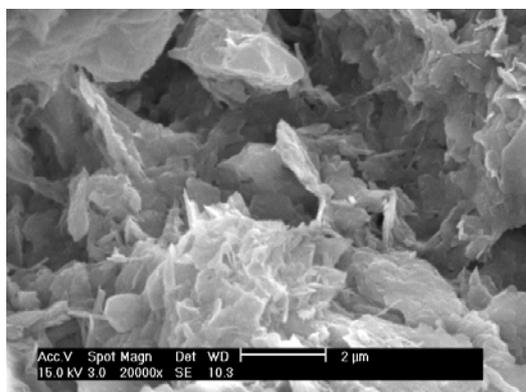
(a) 7 วัน



(b) 14 วัน

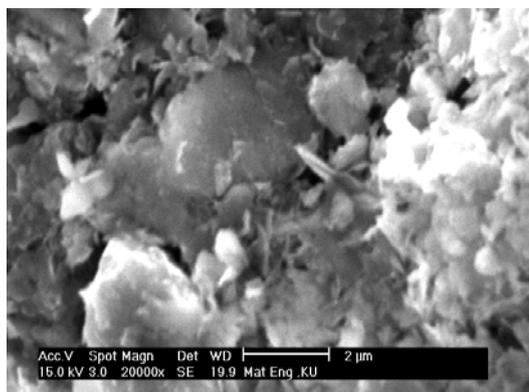


(c) 28 วัน

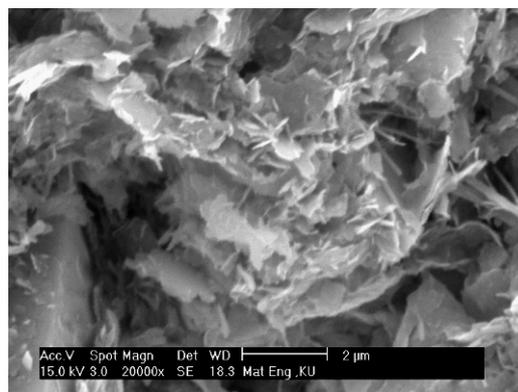


(d) 90 วัน

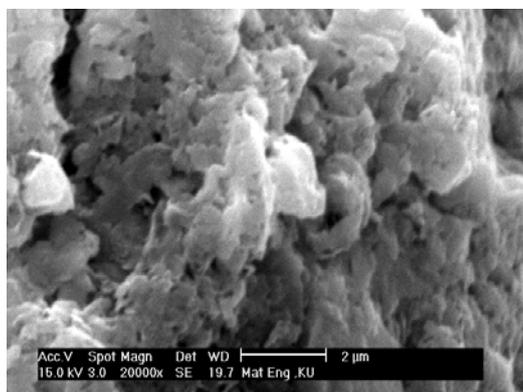
ภาพผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-1 ที่อายุการบ่มต่างๆ



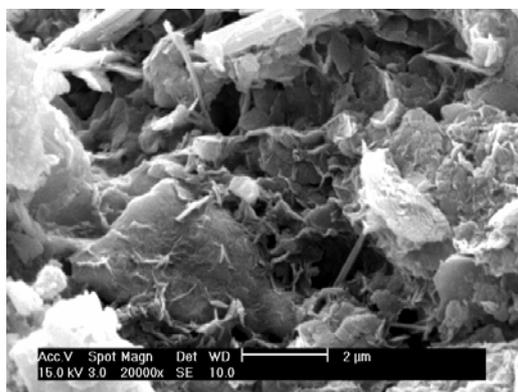
(a) 7 วัน



(b) 14 วัน

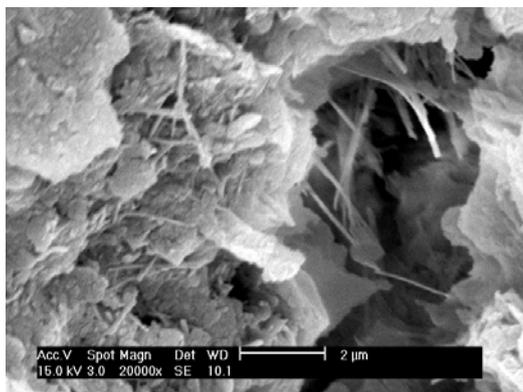


(c) 28 วัน

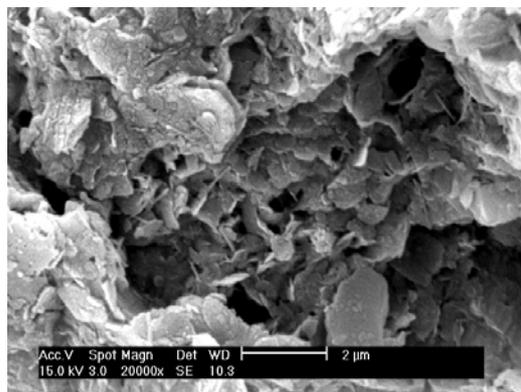


(d) 90 วัน

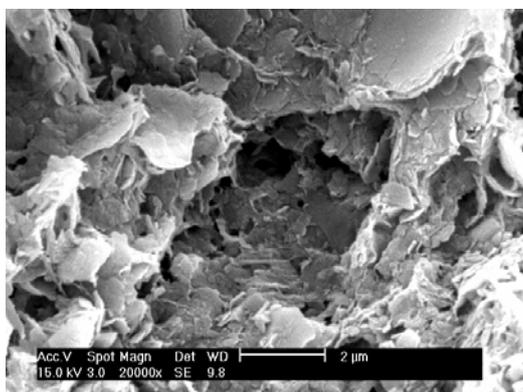
ภาพผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-2 ที่อายุการบ่มต่างๆ



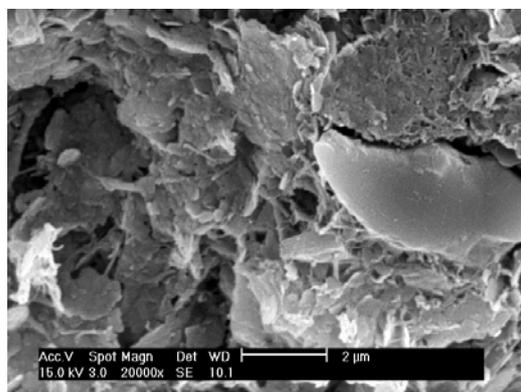
(a) 7 วัน



(b) 14 วัน

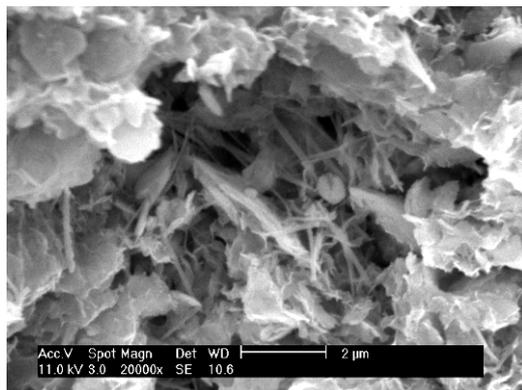


(c) 28 วัน

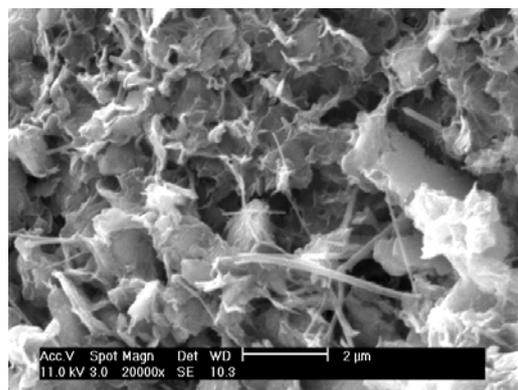


(d) 90 วัน

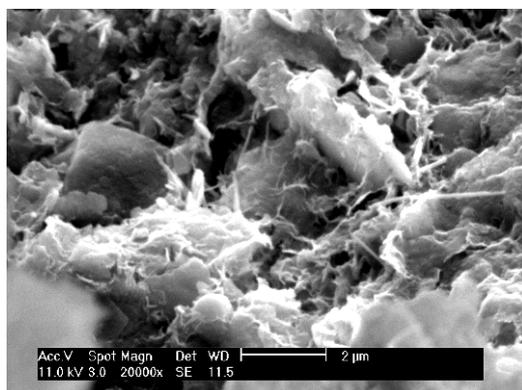
ภาพผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-3 ที่อายุการป่มต่างๆ



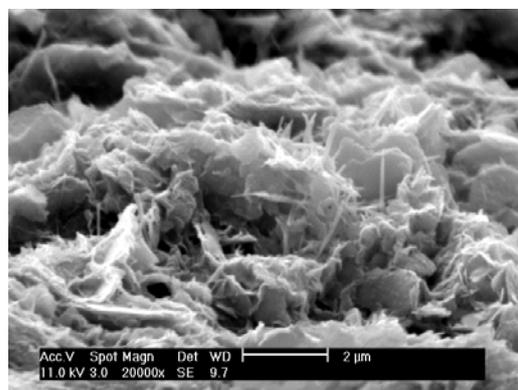
(a) 3 วัน



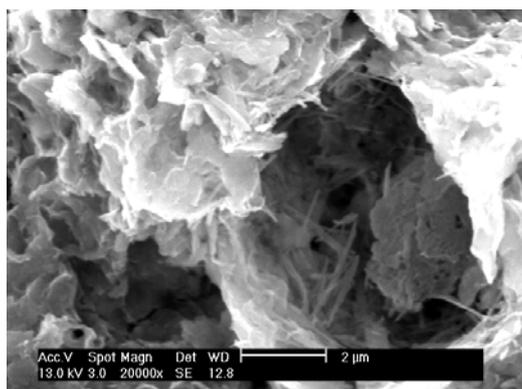
(b) 7 วัน



(c) 14 วัน

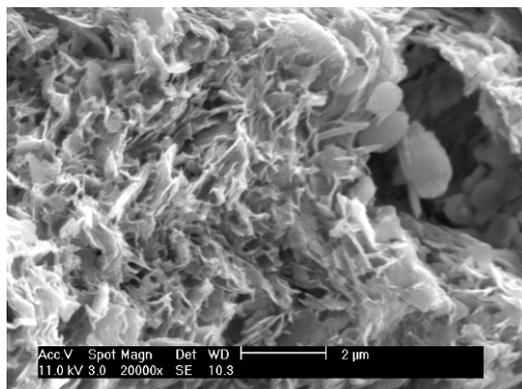


(d) 28 วัน

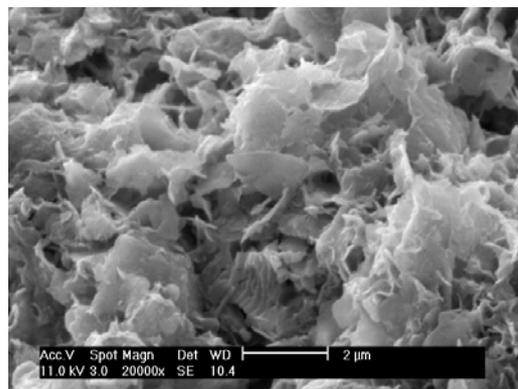


(e) 90 วัน

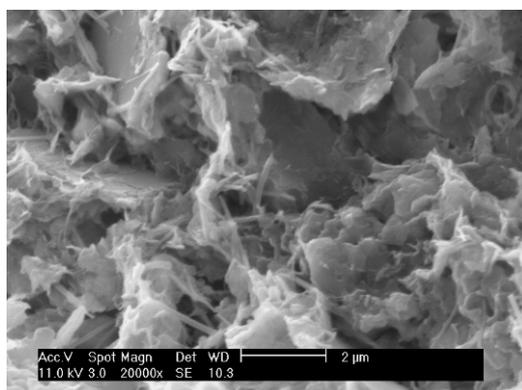
ภาพผนวกที่ ข4 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-4 ที่อายุการบ่มต่างๆ



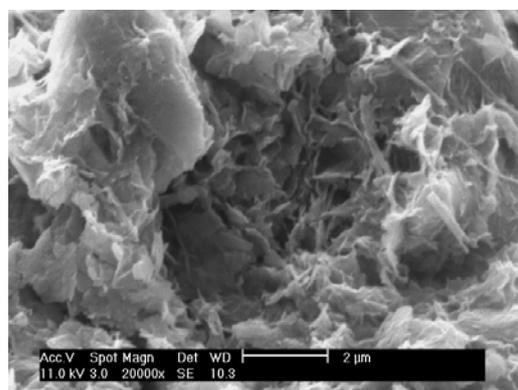
(a) 3 วัน



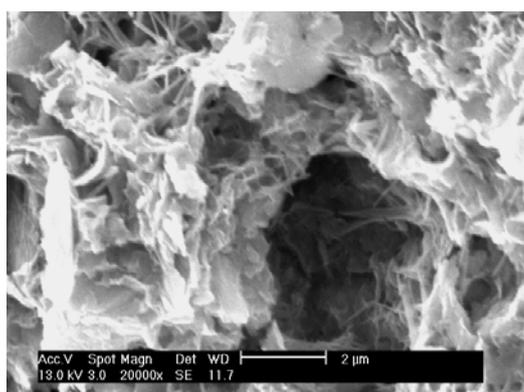
(b) 7 วัน



(c) 14 วัน

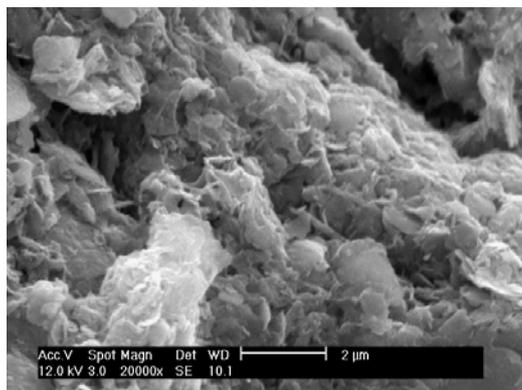


(d) 28 วัน

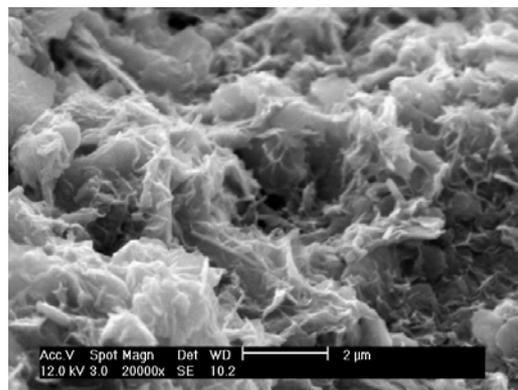


(e) 90 วัน

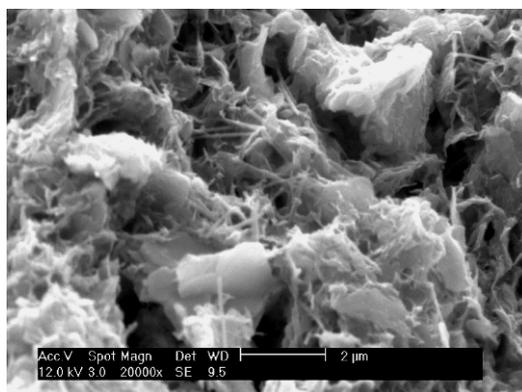
ภาพผนวกที่ ข5 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-5 ที่อายุการบ่มต่างๆ



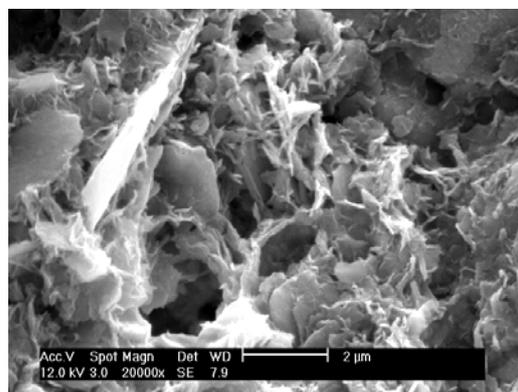
(a) 3 วัน



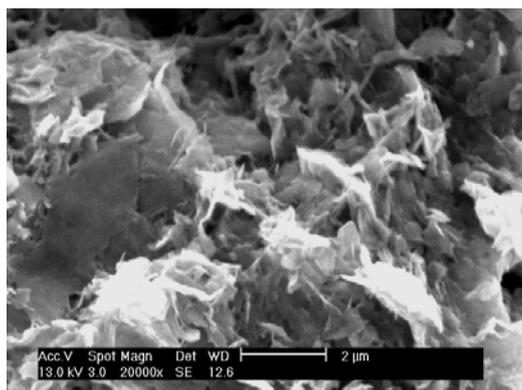
(b) 7 วัน



(c) 14 วัน

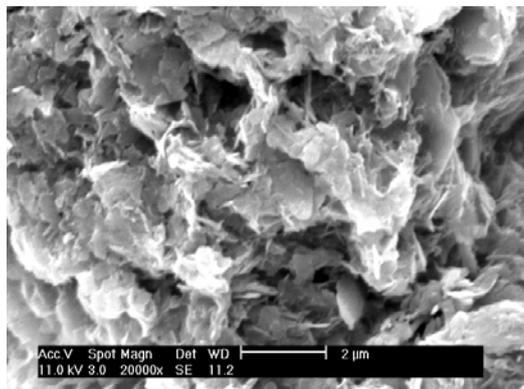


(d) 28 วัน

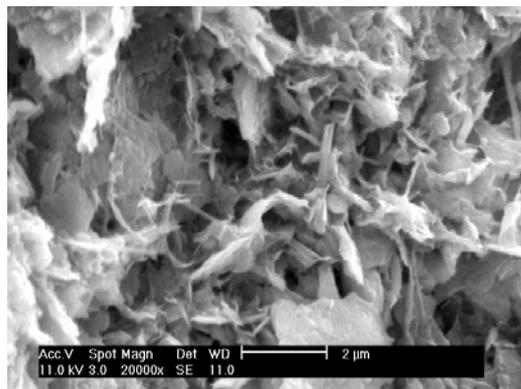


(e) 90 วัน

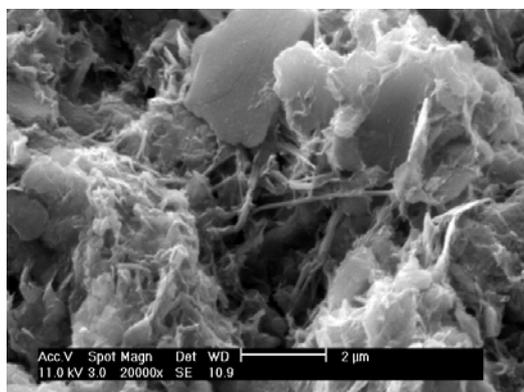
ภาพผนวกที่ ๖ ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ Mix-6 ที่อายุการปมต่างๆ



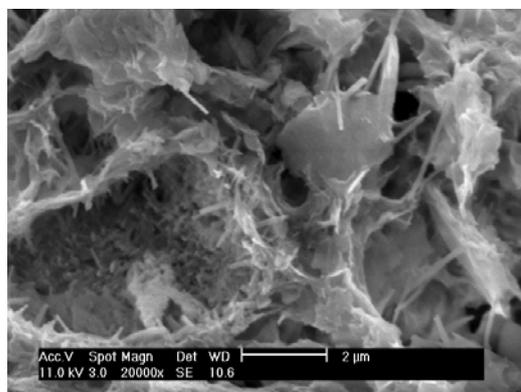
(a) 3 วัน



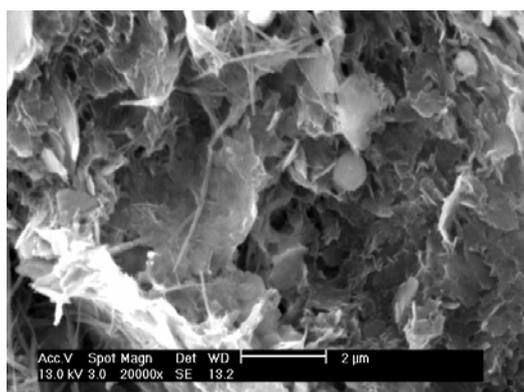
(b) 7 วัน



(c) 14 วัน

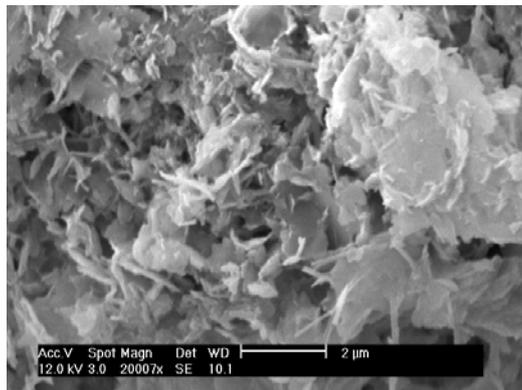


(d) 28 วัน

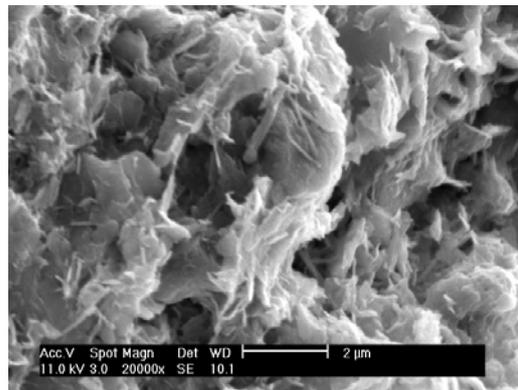


(e) 90 วัน

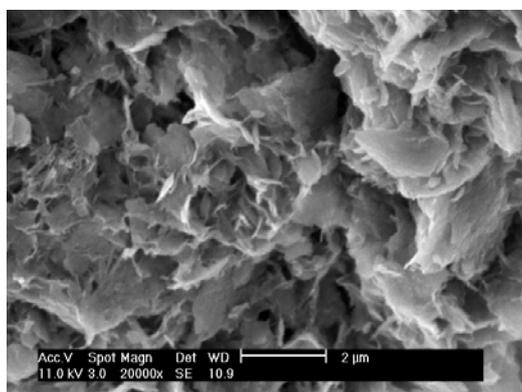
ภาพผนวกที่ 7 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมชิลิกาฟูน Mix-7 ที่อายุการบ่มต่างๆ



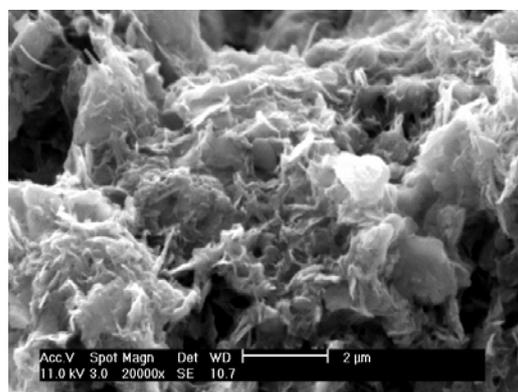
(a) 3 วัน



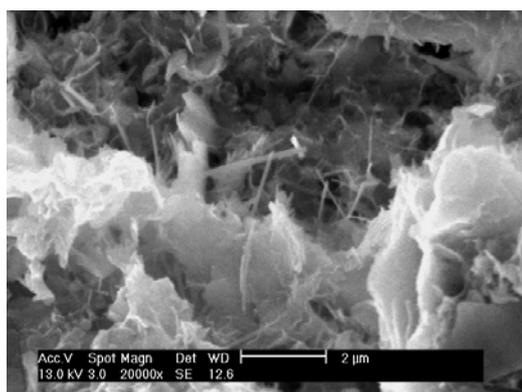
(b) 7 วัน



(c) 14 วัน

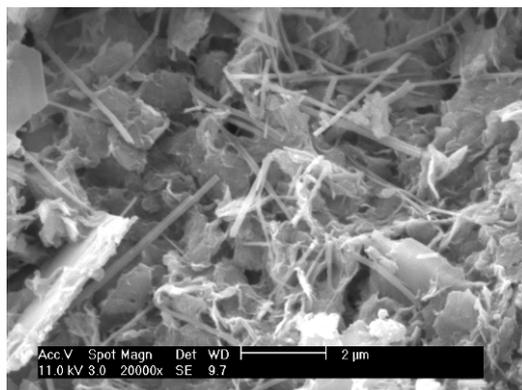


(d) 28 วัน

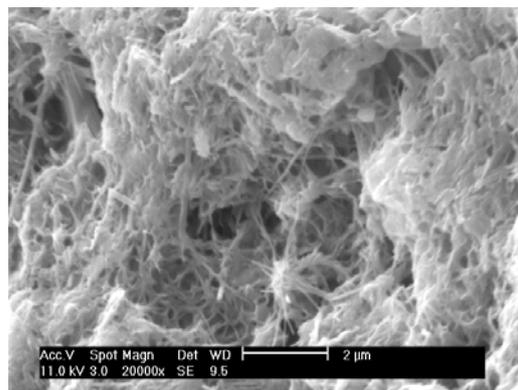


(e) 90 วัน

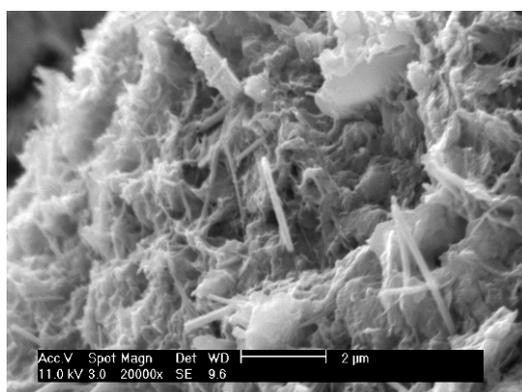
ภาพผนวกที่ ข8 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม Mix-8 ที่อายุการบ่มต่างๆ



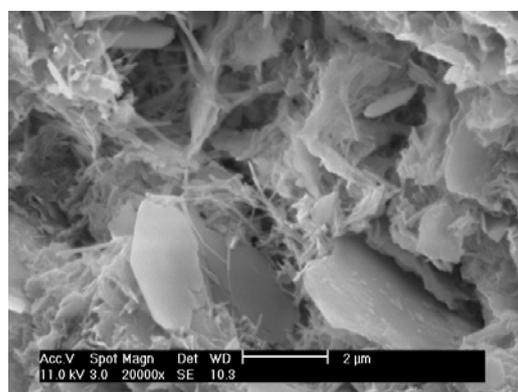
(a) 3 วัน



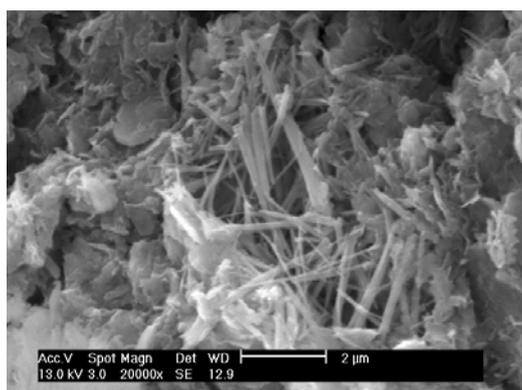
(b) 7 วัน



(c) 14 วัน

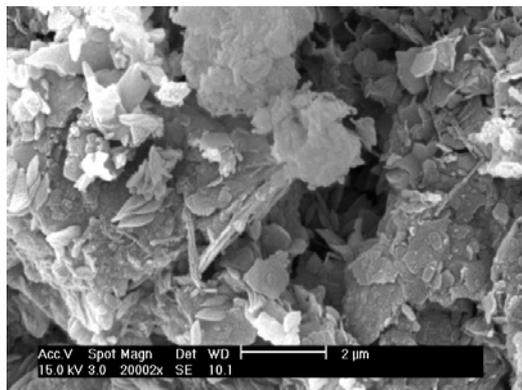


(d) 28 วัน

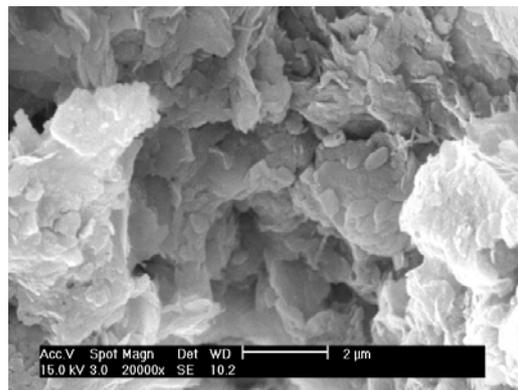


(e) 90 วัน

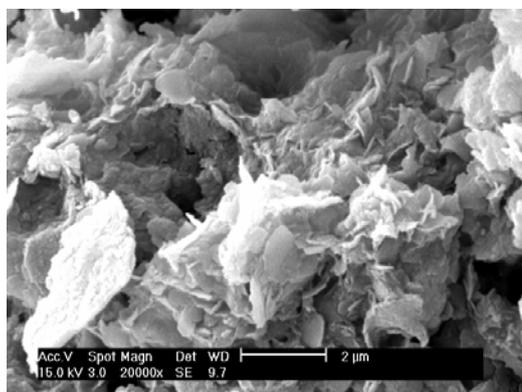
ภาพผนวกที่ ๖๑ ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมซีลีกาฟุ่ม Mix-9  
ที่อายุการบ่มต่างๆ



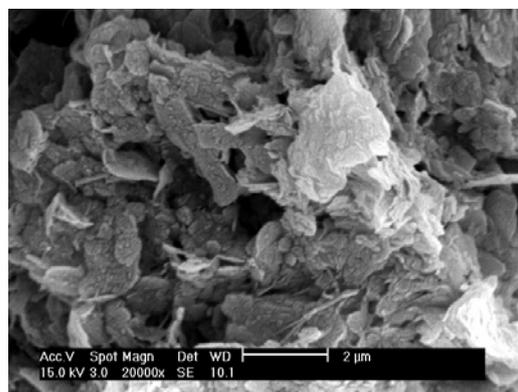
(a) 3 วัน



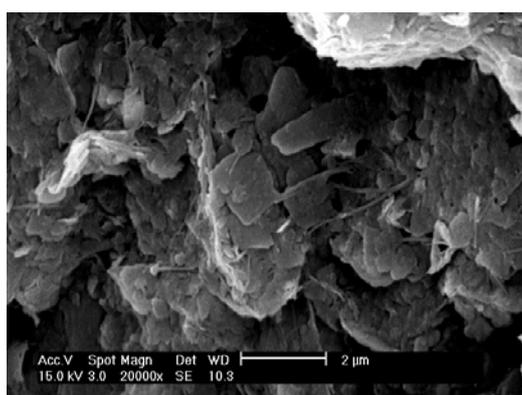
(b) 7 วัน



(c) 14 วัน

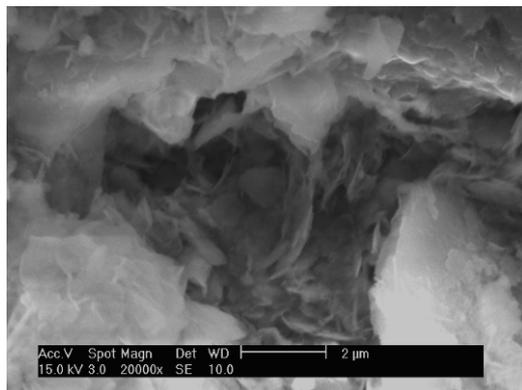


(d) 28 วัน

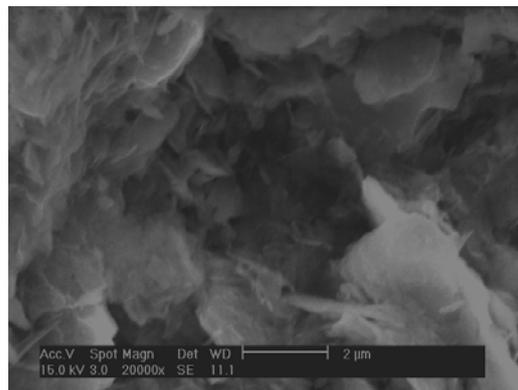


(e) 90 วัน

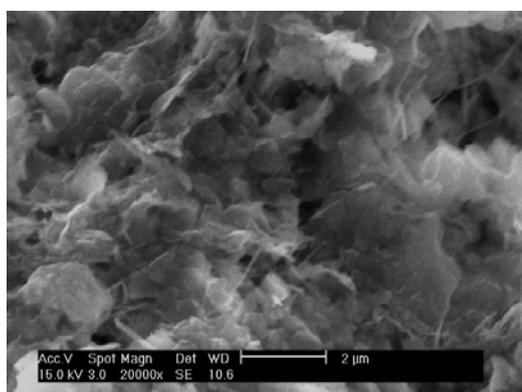
ภาพผนวกที่ 10 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-10 ที่อายุการบ่มต่างๆ



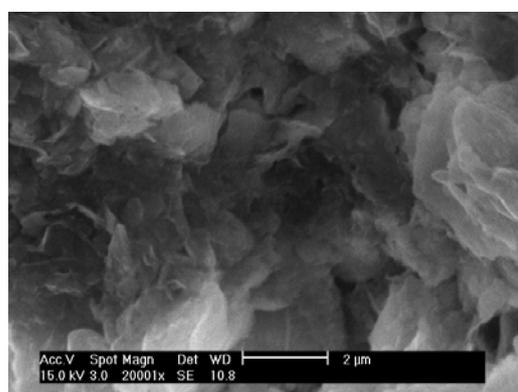
(a) 3 วัน



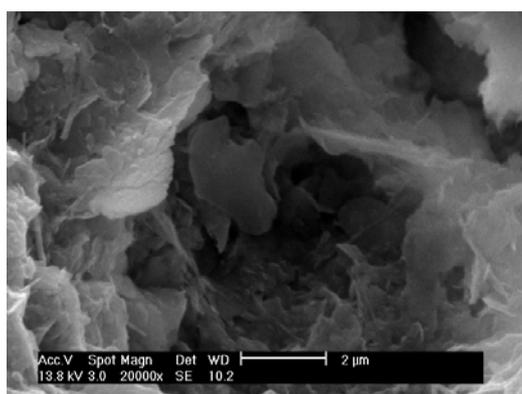
(b) 7 วัน



(c) 14 วัน

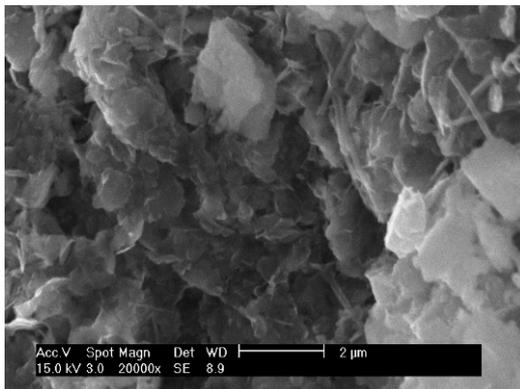


(d) 28 วัน

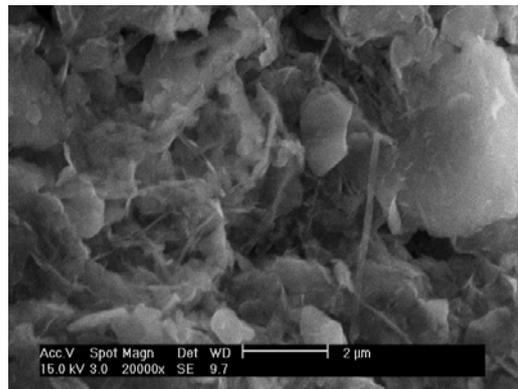


(e) 90 วัน

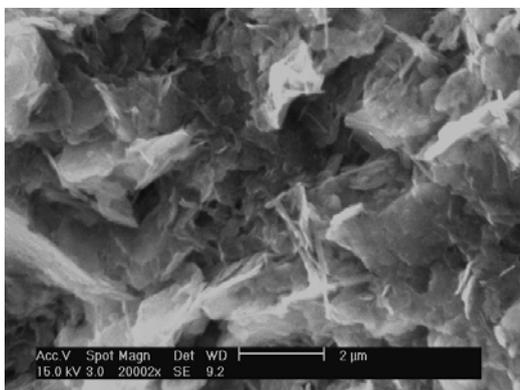
ภาพผนวกที่ ข11 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-11 ที่อายุการบ่มต่างๆ



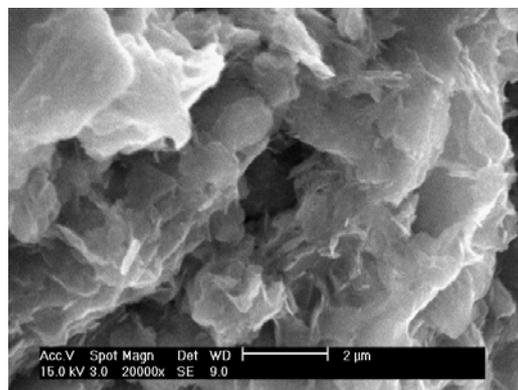
(a) 3 วัน



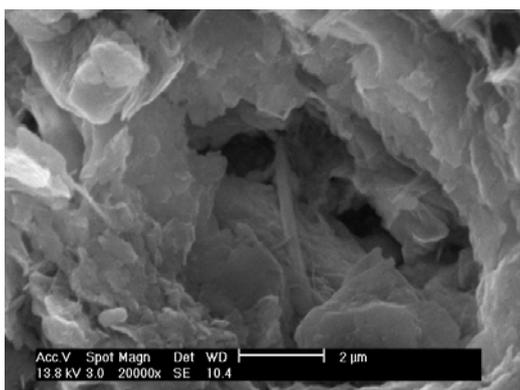
(b) 7 วัน



(c) 14 วัน



(d) 28 วัน



(e) 90 วัน

ภาพผนวกที่ ข12 ผลการทดสอบ SEM ของดินตะกอนซีเมนต์ผสมทราย Mix-12 ที่อายุการบ่มต่างๆ

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายธนศ ทองเดชศรี
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 21 ตุลาคม 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดพะเยา
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยนเรศวร วิทยาเขตพะเยา
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	เยาวชนดีเด่นแห่งชาติ ด้านการศึกษาและวิชาการ ประจำปี 2547
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนพัฒนาบุคลากรมหาวิทยาลัยนเรศวร วิทยาเขต สารสนเทศพะเยา