

การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน
ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และถ่านลอย

นายชยกฤต เพชรช่วย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2553

**STRENGTH DEVELOPMENT IN SILTY CLAY
STABILIZED BY CALCIUM CARBIDE RESIDUE
AND FLY ASH**

Chayakrit Phetchuay

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2010

การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชยกฤต เพชรช่วย : การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย (STRENGTH DEVELOPMENT IN SILTY CLAY STABILIZED BY CALCIUM CARBIDE RESIDUE AND FLY ASH) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 80 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน พร้อมทั้งอธิบายกลไกทางเคมีที่เกิดขึ้น กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการผลิตก๊าซเซเทิลีน อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และมีคุณสมบัติเป็นด่างสูง เถ้าลอยเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า การศึกษานี้แปรผันตัวแปรควบคุม ได้แก่ อัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย อัตราส่วนผสมเพิ่มในดิน ปริมาณความชื้น และอายุบ่ม

ผลการทดสอบพบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดลดลงและปริมาณความชื้นเหมาะสมเพิ่มขึ้น กำลังอัดสูงสุดของแต่ละอัตราส่วนผสมอยู่ที่จุดเหมาะสม ดัชนีสภาพพลาสติกมีค่าลดลงตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และมีค่าประมาณคงที่เมื่อปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เกินร้อยละ 7 ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์นี้คือ Lime Fixation Point ซึ่งเป็นปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด กำลังอัดมีค่าประมาณคงที่ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เมื่อผสมเถ้าลอยในดินที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณเกินร้อยละ 7 แคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าลอย และช่วยเพิ่มกำลังอัดให้กับดินเหนียวปรับปรุง ร่องการกัดกร่อนของเถ้าลอยเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนด้วยภาพถ่ายกำลังขยาย (Scanning Electron Microscope : SEM) ผลทดสอบ Thermal Gravity Analysis แสดงให้เห็นว่าเมื่อผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณเกินกว่าร้อยละ 7 ปฏิกิริยาปอซโซลานมีอิทธิพลอย่างมากต่อการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ปริมาณการใช้ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในช่วงอายุบ่ม 7 ถึง 28 วัน ของดินที่ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยมีมากกว่าดินที่ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์เพียงอย่างเดียว

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

CHAYAKRIT PHETCHUAY : STRENGTH DEVELOPMENT IN SILTY
CLAY STABILIZED BY CALCIUM CARBIDE RESIDUE AND FLY ASH.
THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D.,
80 PP.

STRENGTH DEVELOPMENT/SILTY CLAY STABILIZED/CALCIUM CARBIDE
RESIDUE/FLY ASH

This research investigates the possibility of using calcium carbide residue (CCR) and fly ash (F) to improve strength of a silty clay and explains the chemical mechanism. Calcium carbide residue is waste products remaining from acetylene gas. Fly ash is waste products remaining from power plants. Influential factors studied includes CCR:F ratio, binder content, water content and curing time.

Test results show that the CCR reduces dry unit weight and increases optimum water content of the compacted CCR stabilized silty clay. Maximum strengths of the stabilized clay for all combinations of CCR and F are at the optimum point. Plasticity index decreases with CCR content and almost constant for the CCR contents in excess of 7%. This CCR content is regarded as lime fixation point that provides the highest strength. Below this point, the strength is practically constant. When fly ash is mixed with clay and CCR in excess of 7%, the free Ca(OH)_2 reacts with fly ash (pozzolanic reaction) and increases strength. The etching on fly ash surface due to the pozzolanic reaction is observed from the scanning electron microscope photos. Thermal gravity analysis shows that for CCR content higher than 7%, the pozzolanic reaction plays a

great role on the strength development. Used Ca(OH)_2 between 7 and 28 days of curing of CCR and F stabilized clay is higher than that of CCR stabilized clay.

School of Civil Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้โอกาส ให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำให้คำปรึกษา และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำให้คำปรึกษา และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศาสตร์ สุขประเสริฐ และคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและแนะนำการทำวิจัย

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับคำปรึกษาและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับเครื่องมือการทดสอบและสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการทำวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมาจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

ชยกุลุต เพชรช่วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบข่ายของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทัศนั้วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงคุณภาพดิน	4
2.2 โครงสร้างของดินเหนียว.....	5
2.3 โครงสร้างของดินซีเมนต์	7
2.3.1 ปฏิกริยาเมื่อผสมซีเมนต์กับดินและน้ำ.....	8
2.4 การปรับปรุงดินด้วยปูนขาว.....	9
2.4.1 ปฏิกริยาเมื่อผสมปูนขาวกับดินและน้ำ	11
2.5 กากแคลเซียมคาร์ไบด์	14
2.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์.....	14
2.5.2 คุณสมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์.....	15
2.6 เถ้าลอย.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.1	คุณสมบัติพื้นฐานและทางเคมีของเถ้าลอย	16
2.6.2	คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย	17
2.7	การใช้เถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานในคอนกรีต	20
2.8	เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	21
2.8.1	การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope	22
2.8.2	การวิเคราะห์ Thermal Gravimetry Analysis, TGA.....	23
2.9	ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	24
3	วิธีการดำเนินการวิจัย	27
3.1	บทนำ.....	27
3.2	การเก็บตัวอย่างและเตรียมตัวอย่างดิน.....	30
3.2.1	การเตรียมตัวอย่างดิน	30
3.2.2	กากแคลเซียมคาร์ไบด์.....	30
3.2.3	เถ้าลอย	30
3.3	คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดิน (Basic Property)	30
3.3.1	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น	30
3.3.2	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity).....	31
3.3.3	การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงร่อน	31
3.3.4	การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์	31
3.3.5	ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit)	31
3.3.6	ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)	31
3.3.7	ถ่ายภาพกำลังขยายกำลังสูงของดินตัวอย่าง.....	31
3.3.8	การศึกษาองค์ประกอบของทางเคมีของดินตัวอย่าง	31
3.4	คุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย.....	31
3.4.1	ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย	31
3.4.2	ทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย	31
3.4.3	วิเคราะห์การกระจายของอนุภาค (Particle Size Distribution).....	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.4	ถ่ายภาพขยายกำลังสุดของถ้ำลอย.....	31
3.4.5	การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอย.....	31
3.5	การบดอัดดิน	33
3.5.1	การบดอัดของดินไม่ผสมสารเชื่อมประสาน	33
3.5.2	การบดอัดตัวอย่างดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์.....	33
3.5.3	การบดอัดตัวอย่างดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และถ้ำลอย.....	33
3.6	การทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compressive Strength, q_u)	34
3.6.1	นำตัวอย่างดินออกจากฟิล์มพลาสติก	34
3.6.2	นำตัวอย่างดินเข้าเครื่องทดสอบ (Unconfined Compression Testing Machine).....	34
3.6.3	เก็บตัวอย่างดินหลังทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว	35
3.7	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และถ้ำลอยบดอัด.....	35
3.7.1	การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope.....	35
3.7.2	การวิเคราะห์ Thermal Gravimetry Analysis.....	37
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	39
4.1	บทนำ.....	39
4.2	คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว กากแคลเซียมคาร์ไบด์และถ้ำลอย	39
4.3	กราฟการบดอัดของดินเหนียว.....	43
4.4	ผลการศึกษาการบดอัดและค่ากำลังอัดแกนเดี่ยวดินเหนียว ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์.....	44
4.5	ผลการศึกษาการบดอัดและกำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเหนียวปนดินตะกอน ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และถ้ำลอย	49
4.6	การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาค	56
4.6.1	ภาพถ่ายกำลังขยายดินเหนียวปนดินตะกอน	56
4.6.2	ภาพถ่ายกำลังขยายดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และถ้ำลอย.....	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.3 ผลการศึกษา TGA (Thermal Gravimetry Analysis)	62
5 บทสรุป	63
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป	64
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	71
ประวัติผู้เขียน	80

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	Neutralizing value ของปูนบางชนิดเมื่อคิดจากสารประกอบที่บริสุทธิ์ 10
2.2	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการปรับปรุงดินด้วยปูนขาว (Berger, 2005)..... 13
2.3	ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 16
2.4	ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618..... 18
2.5	ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 20
2.6	เครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างดิน (Kamon, 1979)..... 22
3.1	จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการบดอัดดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์..... 27
3.2	จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการบดอัดดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย 28
3.3	อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารต่างๆ ในซีเมนต์เพสต์ (Decomposition Reaction) 38
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวตัวอย่าง 40
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปนดินตะกอน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย 40
4.3	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินตัวอย่าง 44
4.4	ปริมาณความชื้นเหมาะสม และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ 46
4.5	Ca(OH ₂) (%) จากผลการทดสอบ TGA..... 62

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การกระจายของช่องว่างในเม็ดดิน (Nagaraj, T.S., Vatasala, A., and Srinivasa Murthy, B.R., 1990)..... 6
2.2	การจัดเรียงตัวของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj et al., 1990)..... 6
2.3	โครงสร้างของดินเหนียว (a) ดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj et al., 1990) (b) ดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน (Horpibulsuk, S., Bergado, D.T., and Lorenzo, G.A., 2003)..... 7
2.4	โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell and Jack, 1966)..... 8
2.5	Principle of Soil Stability With Lime (Van Impe, 1989) 11
2.6	Scanning Electron Microscope (SEM) ถัดลอย (ขยาย 1,000 เท่า)..... 19
2.7	อนุภาคถัดลอยหายาบ (a) อายุบ่ม 28 วัน (b) อายุบ่ม 90 วัน (Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., 2005) 25
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 29
3.2	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer) 32
3.3	เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS-932 32
3.4	ตัวอย่างการควบคุมปริมาณความชื้น..... 34
3.5	เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด..... 35
3.6	เครื่อง Iron sputtering device 36
3.7	เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) 36
3.8	เครื่อง Simultaneous TGA Analyzer..... 38
4.1	การกระจายขนาดของเม็ดดิน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และถัดลอย..... 41
4.2	X-ray Diffraction ของ Hydrated Lime และกากแคลเซียมคาร์ไบด์..... 41
4.3	ภาพถ่าย SEM (a) ดินเหนียวตัวอย่าง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (b) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (c) ถัดลอย (F) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า..... 42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	ความสัมพัทธ์ระหว่างปริมาณความชื้น กับความหนาแน่นแห้ง ที่พลังงานการบดอัด 592.5 และ 2,693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร 43
4.5	ความสัมพัทธ์ระหว่าง (a) หน่วยน้ำหนักแห้ง และ (b) กำลังอัดแกนเดียว กับปริมาณความชื้นของดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์..... 45
4.6	อิทธิพลของกากเคลเซียมคาร์ไบด์ต่อค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว 46
4.7	ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (a) ดินเหนียว (b) ดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์ 47
4.8	โซนาการปรับปรุงดินเหนียวปนดินตะกอนด้วยกากเคลเซียมคาร์ไบด์ 48
4.9	กราฟการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย 49
4.10	กราฟการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย 50
4.11	ความสัมพัทธ์ระหว่าง (a) หน่วยน้ำหนักแห้ง และ (b) กำลังอัดแกนเดียว กับปริมาณความชื้นของดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์ (Binder=5%)..... 51
4.12	ความสัมพัทธ์ระหว่าง (a) หน่วยน้ำหนักแห้ง และ (b) กำลังอัดแกนเดียว กับปริมาณความชื้นของดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์ (Binder=10%)..... 52
4.13	อิทธิพลของอายุบ่มกับค่ากำลังอัดแกนเดียว (Binder=5%) 53
4.14	อิทธิพลของอายุบ่มกับค่ากำลังอัดแกนเดียว (Binder=10%) 54
4.15	อิทธิพลของเถ้าลอยต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน 55
4.16	อิทธิพลของเถ้าลอยต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน 55
4.17	อิทธิพลของเถ้าลอยต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 120 วัน 56
4.18	ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวบดอัดภายใต้พลังงาน การบดอัด แบบสูงกว่ามาตรฐาน (a) 0.8 OWC, (b) OWC และ (c) 1.2 OWC (ยุทธนา รักษาชนม์, 2550) 57
4.19	ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยบดอัด อัตราส่วนผสม 70CCR:30F (Binder=10%) ที่ความชื้นต่าง ๆ 58
4.20	ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยบดอัด อัตราส่วนผสม 70CCR:30F (Binder=10%) (a) อายุบ่ม 7 วัน (b) อายุบ่ม 28 วัน 59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ภาพถ่ายขยายโครงสร้างดินที่อัตราส่วน 70CCR:30F	
อายุบ่ม 120 วัน (Binder=10%) 60	
4.22 ภาพถ่ายขยายโครงสร้างของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และถั่วลอ	
ที่อัตราส่วนต่าง ๆ อายุบ่ม 120 วัน (OWC) 61	

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing Material
CAH	Calcium aluminate hydrate
Ca(OH) ₂	Calcium hydroxide
CEC	Cation exchange capacity
cc/g	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
CCR	กากแคลเซียมคาร์ไบด์
CCR+F	ส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าลอย
CCR:F	อัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย
CH	ดินเหนียวที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูง
CSH	Calcium silicate hydrate
<i>F</i>	อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์
Gs	ความถ่วงจำเพาะ
<i>H</i>	ปริมาณ Ca(OH) ₂ จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่อัตราส่วนการแทนที่ใด ๆ
kJ/m^3	กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร
kN/m^3	กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร
kPa	กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
LL	ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit)
<i>m</i>	ปริมาณน้ำ (Moisture Content)
<i>OWC</i>	ปริมาณน้ำเหมาะสม (Molding water content)
PI	ค่าดัชนีสภาพพลาสติก (Plastic Index)
PL	ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)
q_u	กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength)
SEM	Scanning Electron Microscope
<i>T</i>	ปริมาณ Ca(OH) ₂ ของดินซีเมนต์
TGA	Thermal Gravimetry Analysis
USCS	Unified Soil Classification System

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

UCS	Unconfined compressive strength
XRD	X-Ray Diffraction
XRF	X-ray Fluorescence
γ_{dry}	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง (Dry unit Weight)
$\gamma_{d,max}$	หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด (Maximum Dry unit Weight)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติ ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิด และสภาพแวดล้อม การจะนำดินมาใช้ประโยชน์ทางวิศวกรรมบางครั้งจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติให้มีความเหมาะสมดังเช่นดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดินดังกล่าวประกอบด้วยชั้นดิน 2 ชั้น ดินชั้นบนที่ระดับ 0-3 เมตร เป็นดินเหนียวปนดินตะกอนและดินตะกอนปนทรายที่เกิดจากการพัดพาของลม ดินดังกล่าวนี้มีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำถึงปานกลาง กำลังต้านทานแรงเฉือนจะลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ดินชั้นล่างที่ระดับต่ำกว่า 3 เมตร เป็นดินเหนียวแข็ง ประกอบด้วยดินเหนียว ดินตะกอน และทราย มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงและมีการยุบอัดตัวต่ำ วิธีการปรับปรุงดินชั้นบนวิธีหนึ่งที่เหมาะสม หากต้องการนำดินชนิดนี้ไปใช้ในงาน โครงสร้างพื้นฐาน คือ การบดอัดดินด้วยสารเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์และปูนขาว เป็นต้น) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ภายในระยะเวลาอันสั้น กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานกำลังอัดแกนเดียวของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ 1,750 กิโลปาสกาล ที่อายุบ่ม 7 วัน (กรมทางหลวง, 2533) ดังนั้นการนำดินชนิดนี้ไปใช้งานที่อัตราส่วนกำลังอัดในสนามต่อกำลังอัดในห้องปฏิบัติการเท่ากับสอง (Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R., 2006b) กำลังอัดแกนเดียวในห้องทดลองควรมากกว่า 3,500 กิโลปาสกาล เป็นอย่างน้อย

ในอดีตที่ผ่านมาสารเชื่อมประสานที่ใช้ คือ ปูนซีเมนต์ และภายหลังได้มีการนำปูนขาวและวัสดุพอซโซลาน (Pozzolan) อื่นมาผสมกับดินเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนค่าก่อสร้างในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้วัสดุที่ทดแทนการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นกากที่เหลือจากการผลิตก๊าซซีลีเนียมที่อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จากความต้องการใช้ก๊าซซีลีเนียมที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละปีส่งผลให้ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ดังกล่าวเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้พบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์มีคุณสมบัติเป็นด่างสูงทำให้เกิดปัญหาสภาพแวดล้อมในบริเวณที่ทิ้ง เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นส่วนที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง มีเถ้าลอยเหลือประมาณ 3 ล้านตัน/ปี ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นวัสดุพอซโซลาน (มูลนิธิส่งเสริม

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545) ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายฉบับที่ทำการศึกษาการผลิตวัสดุประสานจากการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย (ปิตินันต์กรัมาตกร สุกิชาติ มาศย์ภูธร ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เกาพิศดาร, 2539; สุทธิ ลิมปนชัยพรกุล บุญกร อมรวิทย์ และ ชีระพงษ์ วงษ์เรือง, 2537; สุกิชาติ มาศย์ภูธร, 2541) การศึกษาดังกล่าวพบว่า มอร์ต้าที่ผลิตจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย มีความสามารถในการใช้รับกำลังในช่วงอายุต้นที่ค่อนข้างต่ำจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานโครงสร้างทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ แต่ค่าที่ได้นั้นสูงเพียงพอในการใช้ปรับปรุงคุณภาพของดิน การใช้วัสดุทั้งสองชนิดนี้มาผลิตเป็นวัสดุประสานทดแทนการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพของดินจะช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างและช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ คือ

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน

1.2.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของดินเหนียวที่ได้รับการปรับปรุง ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย เมื่อแปรผันตัวควบคุม (อัตราส่วนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าลอย ปริมาณความชื้น อัตราส่วนผสมเพิ่มในดิน และอายุบ่ม) สัมพันธ์กับผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

1.3 ขอบข่ายของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนา กำลังอัดและ โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวปนดินตะกอนผสม ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย โดยแปรผันตัวแปรควบคุม ดินที่ใช้ในการศึกษา คือ ดินเหนียวแปรสภาพจากบริเวณฟาร์ม ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ระดับความลึก 2-3 เมตรจากผิวดิน ดินตัวอย่างมีค่าดัชนีพลาสติกเท่ากับร้อยละ 39.4 ค่าขีดจำกัดเหลวและค่าขีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 62 และ 22.6 จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้จาก บริษัท สาย 5 ผลิตก๊าซ จำกัด จังหวัดนครปฐม และเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การศึกษาจะแปรผันตัวแปรควบคุม 4 ตัว ได้แก่ อัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ปริมาณความชื้น อัตราส่วนผสมเพิ่มในดิน และอายุบ่ม

การศึกษาครั้งนี้แบ่งได้ 5 ส่วน ดังนี้

1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย

1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติการบดอัดของดินตัวอย่างแบบไม่ผสมสารเชื่อมประสาน เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum Dry Unit weight) และปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content) รวมถึงกราฟการบดอัด (Compaction Curve) ของดิน โดยบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)

1.3.3 ศึกษากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ปริมาณต่าง ๆ ด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม

1.3.4 ศึกษากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ปริมาณความชื้นทางด้านแห้ง และทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ทำตามมาตรฐาน ASTM D 2166

1.3.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย จะทำการดูภาพขยายการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในดินเหนียวผสมสารเชื่อมประสานดังกล่าวด้วยเครื่องมือ Scanning Electron Microscope และการหาปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ด้วยเครื่อง Simultaneous Thermal Gravimetry Analyzer (TGA)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

14.1 ได้ทราบถึงอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยที่เหมาะสม สำหรับการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน

14.2 ได้ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดแกนเดียว และโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงคุณภาพดิน

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่อย่างมากมาย ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดและสภาพแวดล้อม จึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความเหมาะสมกับงานแต่ละประเภท เทคโนโลยีและเทคนิคในการปรับปรุงดินที่ใช้กันในปัจจุบัน ประกอบไปด้วย แนวความคิดพื้นฐานหลักดังนี้ การทำให้แน่น (Densification) การเชื่อมประสาน (Cementation) การเสริมแรง (Reinforcement) การระบาย (Drainage and Consolidation)

แนวความคิดเรื่องการปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นโดยการผสมวัสดุเชื่อมประสานได้เกิดขึ้นเป็นเวลาหลายพันปีมาแล้ว วัสดุเชื่อมประสานที่ใช้กันในยุคแรก คือ ปูนขาวหรือวัสดุปอซโซลาน ซึ่งจะทำให้ค่าดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index, PI) ของดินลดลง และมีผลให้ดินรับแรงอัดได้ดีขึ้น หลังจากนั้น ได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องมาหลายศตวรรษ (Terrel, R.L., Barenberg, E.J., Michell, J.M., and Thomson, M.R., 1979)

Hogentogler (1938) ได้กล่าวว่าการปรับปรุงคุณภาพของดินเป็นกระบวนการที่ทำให้ดินตามธรรมชาติมีความทนทานต่อการสึกหรอ และการรับน้ำหนักดีขึ้น วิธีการที่ใช้ อาจจะเป็นการบดอัดให้แน่น การนำสารผสมมาเติมลงในดิน สารผสมนี้อาจจะอยู่ในรูปของเหลวหรือเป็นผงก็ได้

Mitchell (1982) ได้กล่าวถึงวัตถุประสงค์ในการนำสารเคมีผสมลงในดินก็เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินได้แก่ ควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ปรับปรุงการไหลซึมของน้ำที่ผ่านดินและความทนทานต่อการกัดกร่อนแตกหักของดิน

Cireo, L.T., Davidson, D.T., and David, H.T. (1962) อธิบายว่าการใส่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) ลงในดินจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและโครงสร้างของดิน ดินเกือบทุกชนิดสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ แต่ผลของการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน จะไม่เหมือนกัน ถึงแม้ว่าดินจะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์เหมือนกัน ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้เท่ากันแต่คุณสมบัติทางเคมีต่างกันก็จะมีผลกระทบต่อค่ารับกำลังแรงอัดของดิน (Compressive Strength) ไม่เหมือนกันด้วย แสดงว่าส่วนประกอบทางเคมีจะมีผลเป็นอย่างมากต่อการรับแรงอัดของดินซีเมนต์

Professor Bengt Broms ได้ใช้เสาเข็มปูนขาวในงานฐานรากและงานโครงสร้าง (Broms and Boman, 1975) ในประเทศสวีเดนเทคนิคนี้ได้เข้ามาในประเทศไทยญี่ปุ่นในปลายปี ค.ศ. 1970

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

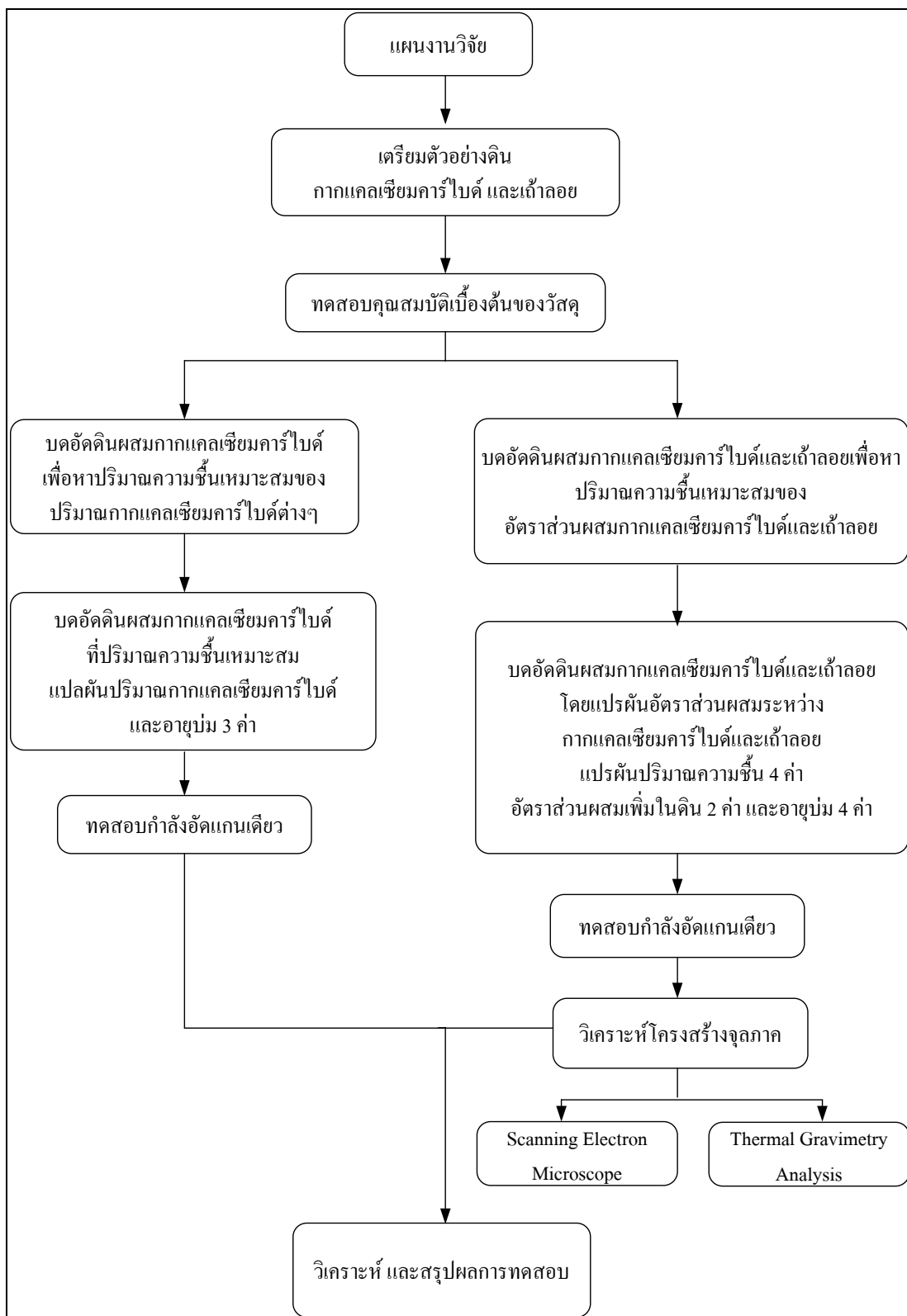
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและอธิบายกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินบริเวณฟาร์ม ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เก็บตัวอย่างแบบแปรสภาพที่ความลึก 2-3 เมตร ดินตัวอย่างจะถูกนำมาผสมสารเชื่อมประสาน (กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย) แล้วทำการบดอัด โดยแปรผันตัวแปรควบคุมต่าง ๆ (อัตราส่วนผสมของสารเชื่อมประสาน ปริมาณความชื้น อัตราส่วนผสมเพิ่มในดิน และอายุบ่ม) และหาค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ที่อายุบ่มต่าง ๆ จากนั้นเก็บตัวอย่างบางส่วนนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย ศึกษาด้วยการดูภาพขยายของโครงสร้างภายในก่อนดินด้วยเครื่องมือ Scanning Electron Microscope และการหาปริมาณของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยเครื่อง Simultaneous TGA Analyzer ผลที่ได้จะนำมาใช้อธิบายกำลังอัดแกนเดียว ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1 และรายละเอียดจำนวนตัวอย่างแสดงในตาราง 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการบดอัดดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
ปริมาณความชื้น	1	ปริมาณความชื้นเหมาะสม ของแต่ละส่วนผสม
พลังงานการบดอัด	1	แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)
อายุบ่ม	3	7 28 และ 120 วัน
ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์	8	ร้อยละ 1 2 3 5 7 8 9 และ 10
จำนวนตัวอย่าง	3	ที่ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ละ 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการบดอัดดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
ปริมาณความชื้น	4	ปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 80 100 120 และ 140 ของปริมาณความชื้นเหมาะสม
พลังงานการบดอัด	1	แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)
อายุบ่ม	4	7 28 60 และ 120 วัน
ปริมาณสารเชื่อมประสาน ที่ผสมเพิ่มในดิน	2	ร้อยละ 5 และ 10
อัตราส่วนระหว่างปริมาณกาก แคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อปริมาณเถ้าลอย	10	1. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 100:0 2. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 90:10 3. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 80:20 4. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 70:30 5. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 60:40 6. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 50:50 7. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 40:60 8. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 30:70 9. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 20:80 10. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 10:90
จำนวนตัวอย่าง	3	ชุดละ 3 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การเก็บและการเตรียมตัวอย่างดิน

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

ดินที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นดินบริเวณฟาร์ม ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เก็บตัวอย่างในลักษณะแปรสภาพที่ระดับความลึก 2-3 เมตรจากผิวดิน เพื่อให้ได้ดินที่มีลักษณะเหมือนกันและมีการปนเปื้อนน้อยที่สุด จากนั้นตัวอย่างดินจะถูกตากให้แห้ง ใช้ก้อนยางทูปดินที่จับตัวกันเป็นก้อนให้แตกตัวออกจากกันโดยให้มีขนาดประมาณ 1-2 เซนติเมตร เพื่อสะดวกในการย่อยดิน ทำการย่อยดินด้วยเครื่องย่อยดินให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำดินที่ผ่านการย่อยร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 อีกครั้งหนึ่ง ดินตัวอย่างที่มีอนุภาคเล็กจะทำให้ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น จากนั้นแบ่งดินใส่ถุงพลาสติก เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

3.2.2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท สาย 5 ผลิตภัณฑ์ก๊าซ จำกัด อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม กากแคลเซียมคาร์ไบด์เตรียมด้วยวิธีการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นบดด้วยเครื่อง Los Angeles abrasion machine และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40

3.2.3 เถ้าลอย

เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 อัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอยในการวิจัยครั้งนี้ ใช้เทคนิคการผสมเถ้าลอยในคอนกรีตวิธีที่ 1 ของ Berry and Malhotra (1980) ใช้เถ้าลอยทดแทนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยน้ำหนักอัตราส่วนแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเถ้าลอยที่ใช้คิดเป็นร้อยละ 0 10 20 30 40 50 60 70 80 และ 90 ของน้ำหนักกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และปริมาณสารเชื่อมประสาน (กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าลอย) ใช้ผสมเพิ่มในดินโดยน้ำหนัก

3.3 คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดิน (Basic property)

คุณสมบัติเบื้องต้นของดินมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ลักษณะทางวิศวกรรม ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานของดินจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด และชนิดของดิน ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินดังนี้

3.3.1 ปริมาณความชื้นเริ่มต้น

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2216

3.3.2 ความถ่วงจำเพาะ

ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854

3.3.3 การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงร่อน

ทดสอบโดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบล้างตามมาตรฐานของ ASTM D422

3.3.4 การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D422-63

3.3.5 ซีดจำกัดเหลว (Liquid limit)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3.3.6 พิกัดพลาสติก (Plastic limit)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3.3.7 ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของตัวอย่างดิน

ถ่ายภาพขยายกำลังสูง ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด

3.3.8 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างดิน

ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างดิน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS-932

ดังรูปที่ 3.4

3.4 คุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย

3.4.1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

โดยใช้ขวดทดลอง Le Chatelier ตามมาตรฐาน ASTM C188

3.4.2 ทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย

โดยการหาค่าหนักเถ้าลอยที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน)

โดยใช้วิธี Wet Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C430

3.4.3 วิเคราะห์การกระจายของอนุภาค (Particle size distribution)

ทำการวิเคราะห์การกระจายของอนุภาคของเถ้าลอย ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser particle size analyzer) ดังรูปที่ 3.2

3.4.4 ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของเถ้าลอย

ถ่ายภาพขยายกำลังสูง ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด

3.4.5 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS-932



รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer)



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS-932

3.5 การบดอัดดิน

ดินจะถูกบดอัดในแบบทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 33 มม. สูง 71 มม. แบ่งการบดอัดเป็น 5 ชั้น ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Water Content) รวมถึงกราฟการบดอัด (Compaction Curve) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1557 หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยใช้เครื่อง Unconfined Compression Testing Machine ใช้อัตราการกดตัวอย่างร้อยละ 1.0 ของความสูงตัวอย่างต่อนาทีจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ การศึกษาจะประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

3.5.1 การบดอัดของดินไม่ผสมสารเชื่อมประสาน

นำตัวอย่างดินเหนียวที่เตรียมไว้มาหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นของดินเหนียวตามมาตรฐาน ASTM D2216 หลังจากนั้นเติมน้ำลงไปดินให้ได้ความชื้นตามความต้องการ แปรผันความชื้นต่าง ๆ เพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Water Content) และกราฟการบดอัด (Compaction Curve) ของดิน นำตัวอย่างดินที่ความชื้นต่าง ๆ ไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

3.5.2 การบดอัดของดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

หาปริมาณความชื้นเริ่มต้นของดินที่เตรียมไว้ตามมาตรฐาน ASTM D2216 หลังจากนั้นผสมดินกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์คลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำจนได้ปริมาณความชื้นที่ต้องการ ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วทำการบดอัด เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละส่วนผสมเช่นเดียวกับการบดอัดดินเหนียวปกติ จากนั้นดำเนินการบดอัดดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่จุดความชื้นเหมาะสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์แต่ละอัตราส่วนตั้งแต้อ้อยละ 0 ถึง 50 ตัวอย่างดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะถูกดันออกจากแบบ ชั่งน้ำหนักและห่อด้วยฟิล์มพลาสติก ดังรูปที่ 3.4 แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องตามอายุบ่ม 7 28 และ 120 วัน

3.5.3 การบดอัดตัวอย่างดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

หาปริมาณความชื้นเริ่มต้นของดินที่เตรียมไว้ตามมาตรฐาน ASTM D2216 ผสมดินกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำที่ปริมาณความชื้นที่ต้องการ แล้วผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วทำการบดอัด แปรผันความชื้นต่าง ๆ เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละส่วนผสมเช่นเดียวกับการบดอัดดินเหนียวปกติ จากนั้นดำเนินการบดอัดดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย แปรผันปริมาณความชื้น 4 ค่าคือ ร้อยละ 80 100 120 และ 140 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เก็บตัวอย่างดินเหนียวผสมสารเชื่อมประสานไปหาปริมาณความชื้นพร้อมกับทำการบดอัดทุกครั้ง ตัวอย่างดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย

บดอัดจะถูกดันออกจากแบบ นำไปชั่งน้ำหนักและห่อด้วยฟิล์มพลาสติก ดังรูปที่ 3.5 แล้วนำไปบ่มที่ อุณหภูมิห้องตามอายุบ่ม 7 28 60 และ 120 วัน



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการควบคุมปริมาณความชื้น

3.6 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, q_u)

รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องทดสอบ Unconfined Compression Testing Machine เมื่อได้ตัวอย่าง ดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยตามระยะบ่มที่ต้องการ นำตัวอย่างดินไปทำการ ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.6.1 นำตัวอย่างดินออกจากฟิล์มพลาสติก

ทำการชั่งน้ำหนัก วัดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางให้ละเอียด 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้ Vernier Caliper

3.6.2 นำตัวอย่างดินเข้าเครื่องทดสอบ Unconfined Compression Testing Machine

ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยใช้อัตราการครื่อยละ 1 ของความสูงดินตัวอย่างต่อนาที จนกระทั่งดินตัวอย่างวิบัติ ทำการบันทึกผลการทดสอบในรูปของความเค้นและความเครียดของดิน

3.6.3 เก็บตัวอย่างดินหลังทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

เพื่อนำไปหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินหลังทำการทดสอบ และตัวอย่างบางก้อนที่สนใจ นำไปทำการวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาคโดยการถ่ายภาพ



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด

3.7 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอยบดอัด

ตัวอย่างดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอยที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวบางส่วนจะถูกนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดิน โดย

3.7.1 การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

ดินตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งจะถูกทำให้แตกจนมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-4 มิลลิเมตร ดินตัวอย่างจะถูกนำไปติดตั้งบนแท่งติดตัวอย่าง หลังจากนั้นจะนำเข้าสู่ขบวนการเคลือบตัวอย่างด้วยเครื่อง Iron sputtering device ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และสุดท้ายเป็นขั้นตอนการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 เครื่อง Iron sputtering device



รูปที่ 3.7 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.7.2 การวิเคราะห์ Thermal Gravimetry Analysis

การเตรียมตัวอย่างตามวิธี Freeze Dry หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (150 ไมครอน) ปริมาณดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบประมาณ 10-20 มิลลิกรัม นำดินตัวอย่างใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างแล้วนำเข้าเตาเผา อุณหภูมิที่ใช้ในการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างตั้งแต่ 50 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อ 1 นาที เครื่อง Simultaneous TGA Analyzer (ดังรูปที่ 3.8) จะบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิ ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 450-580 องศาเซลเซียส ซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสีย เมื่อให้ความร้อนกับตัวอย่างที่อุณหภูมิระหว่าง 450-580 องศาเซลเซียส ผลึก Ca(OH)_2 จะสลายตัวเป็น Calcium Oxide กับน้ำ ดังสมการที่ 3.2



น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากความร้อนส่งผลให้น้ำหนักของก้อนตัวอย่างลดลง ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถประมาณได้จากน้ำหนักที่สูญเสียดังสมการที่ (3.2) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.11 คูณด้วยน้ำหนักที่สูญเสีย (El-Jazairi and Illston, 1977, 1980) การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานสามารถตรวจสอบได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากต่างก็เป็นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน

กราฟของ TG จะแสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักที่จุดยอดของกราฟเป็นช่วง ๆ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของสารก่อนทำการทดสอบ เมื่อมีความร้อนที่เหมาะสม น้ำจะสลายตัวไปทำให้เกิดการลดลงของน้ำหนักทั้งหมด ซึ่งจะหมายความถึง ปริมาณน้ำที่หายไป ดังนั้นจึงสามารถ หาปริมาณ Calcium Hydroxide จากปริมาณน้ำได้ โดยใช้สมการที่ 3.2 การคำนวณจะขึ้นอยู่กับจุดตัดของปริมาณ Calcium Hydroxide ที่สูญเสียโดยอ้างอิงกับปริมาณที่มีค่าคงที่ อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสารต่างๆ ในซีเมนต์เพสต์ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์
(Decomposition Reaction)

ลำดับที่	อุณหภูมิ (°C)	ปฏิกิริยา
1	100	น้ำในช่องว่างระเหย
2	180	การสลายตัวของ CSH
3	350	การสลายตัวของ CSH
4	400	การสลายตัวของ CSH
5	600	การสลายตัวของ Ca(OH)_2
6	700	การสลายตัวของ Ca(OH)_2



รูปที่ 3.8 เครื่อง Simultaneous TGA Analyzer

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะเสนอผลการศึกษากำล้างอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดอัด และดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยบดอัด เริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้น และคุณสมบัติทางเคมีของดินเหนียว กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย จากนั้นจะได้แสดงผลการศึกษากำล้างอัดดินเหนียว ดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย และสุดท้ายจะเสนอผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยบดอัด

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างดินเหนียวปนดินตะกอนที่เก็บภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ระดับความลึก 2-3 เมตรจากผิวดิน ในระหว่างการเก็บดินตัวอย่างไม่ปรากฏระดับน้ำใต้ดิน ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 22.53 ดินดังกล่าวมีปริมาณทราย:ดินตะกอน:ดินเหนียว เท่ากับ 2:45:53 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.74 ค่าขีดจำกัดเหลว และค่าขีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 62 และ 22.6 ดินประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) ด้วยการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified soil classification system (USCS)) ตามลำดับผลการทดสอบการบวมตัวอิสระที่เสนอโดย Prakash and Sridharan (2004) แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวปนดินตะกอนนี้จัดเป็นดินบวมตัวต่ำและมีค่าอัตราส่วนบวมตัวอิสระเท่ากับ 1.4

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท สาย 5 ผลิตภัณฑ์ก๊าซ จำกัด อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม กากแคลเซียมคาร์ไบด์เตรียมด้วยวิธีการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นบดด้วยเครื่อง Los Angeles abrasion machine และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับ 2.32 เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.39 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปนดินตะกอน (Silty Clay) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium

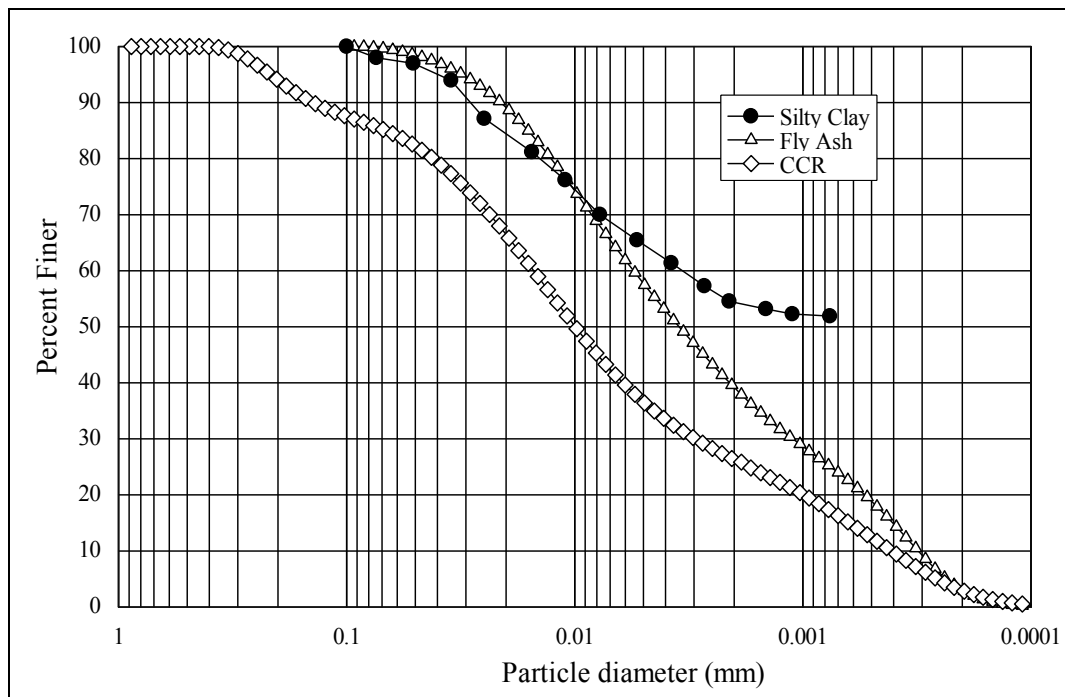
Carbide Residue (CCR)) เถ้าลอย (Fly Ash) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Hydrated Lime) แสดงดังตารางที่ 4.2 ผลรวมของส่วนผสมหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของเถ้าลอยมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 81.54 ดังนั้นเถ้าลอยนี้จึงจัดเป็นเถ้าลอยชั้น F (Class F) ตามมาตรฐาน ASTM C618

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวตัวอย่าง

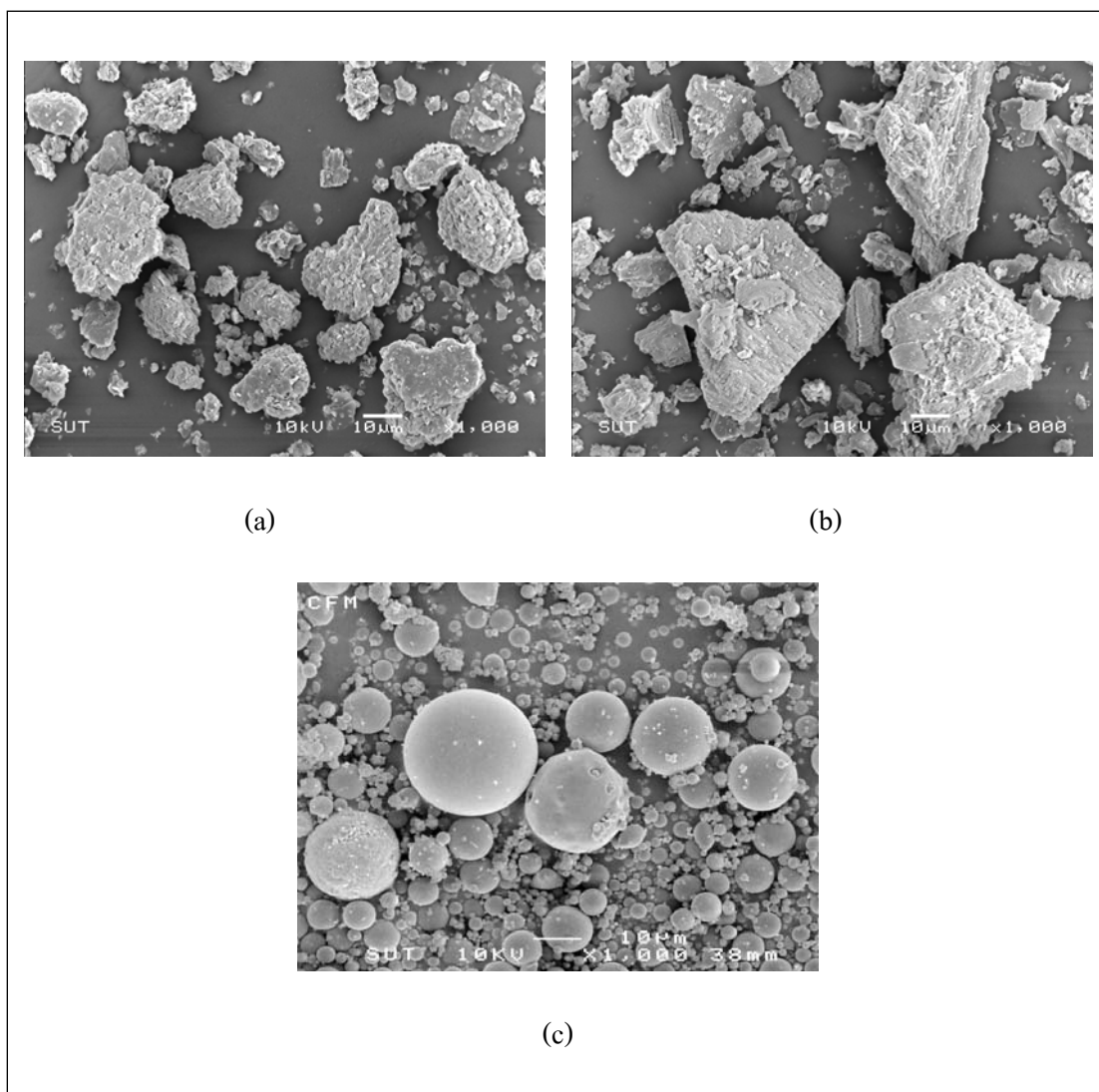
Soil Property	Silty Clay
Physical Properties :	
1. Specific Gravity	2.76
2. Liquid Limit	62%
3. Plastic Limit	22.6%
4. Free Swell Ratio	1.4
Unified Soil Classification	CH

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปนดินตะกอน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย

Chemical Composition (%)	Silty Clay	Fly Ash	CCR	Hydrated Lime
CaO	26.15	12.15	70.78	90.13
SiO_2	20.10	45.69	6.49	1.29
Al_2O_3	7.55	24.59	2.55	0.24
Fe_2O_3	32.89	11.26	3.25	0.49
MgO	0.47	2.87	0.69	0.22
SO_3	4.92	1.57	0.66	0.86
Na_2O	ND	0.07	ND	ND
K_2O	3.17	2.66	7.93	3.3
LOI	3.44	1.23	1.35	1.21



จากรูปที่ 4.1 พบว่าอนุภาคของเม็ดดินเหนียว และเถ้าลอย มีลักษณะใกล้เคียงกัน และมีความละเอียดสูงกว่าอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ รูปที่ 4.2 แสดงผล X-ray Diffraction ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับ Hydrate Lime พบว่ากราฟส่วนโค้งที่แสดงผลแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ของ Hydrated Lime และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ มีลักษณะคล้ายกัน

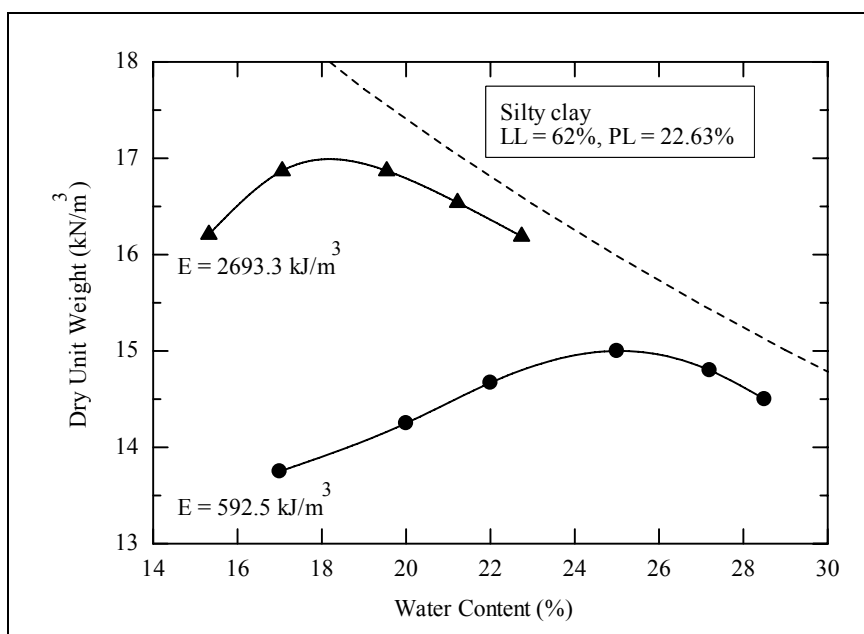


รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM (a) ดินเหนียวตัวอย่าง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า
 (b) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า
 (c) เถ้าลอย (F) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

รูปที่ 4.3 แสดงรูปถ่ายกำลังขยายของดินเหนียว กากเคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope จะเห็นได้ว่าอนุภาคเม็ดดินตัวอย่างจะเกาะเป็นกลุ่มก้อน โดยมีความยาวของเม็ดที่แตกต่างกันอยู่ร่วมกัน อนุภาคของกากเคลเซียมคาร์ไบด์จะมีความยาวเม็ดที่ไม่สม่ำเสมอ และมีลักษณะเป็นเหลี่ยม ขณะที่อนุภาคเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม

4.3 กราฟการบดอัดของดินเหนียว

รูปที่ 4.4 แสดงผลการบดอัดดินเหนียว ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน (592.5 และ 2,693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) จะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานการบดอัดเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นมีค่าลดลง และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาของนักวิจัยในอดีต (ชัย มุกตพันธ์ และ กาซุโตะ นากาซาวา, 2540; มานะ อภิพัฒนะมนตรี, 2539; Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R., 2006) นอกจากนี้ ยังพบอีกว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นหลังปริมาณความชื้นที่เหมาะสม มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกัน และขนานกับเส้นช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ (Zero Air Void) ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างที่ได้จากการบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน แสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น กับความหนาแน่นแห้งที่พลังงานการบดอัด 592.5 และ 2,693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

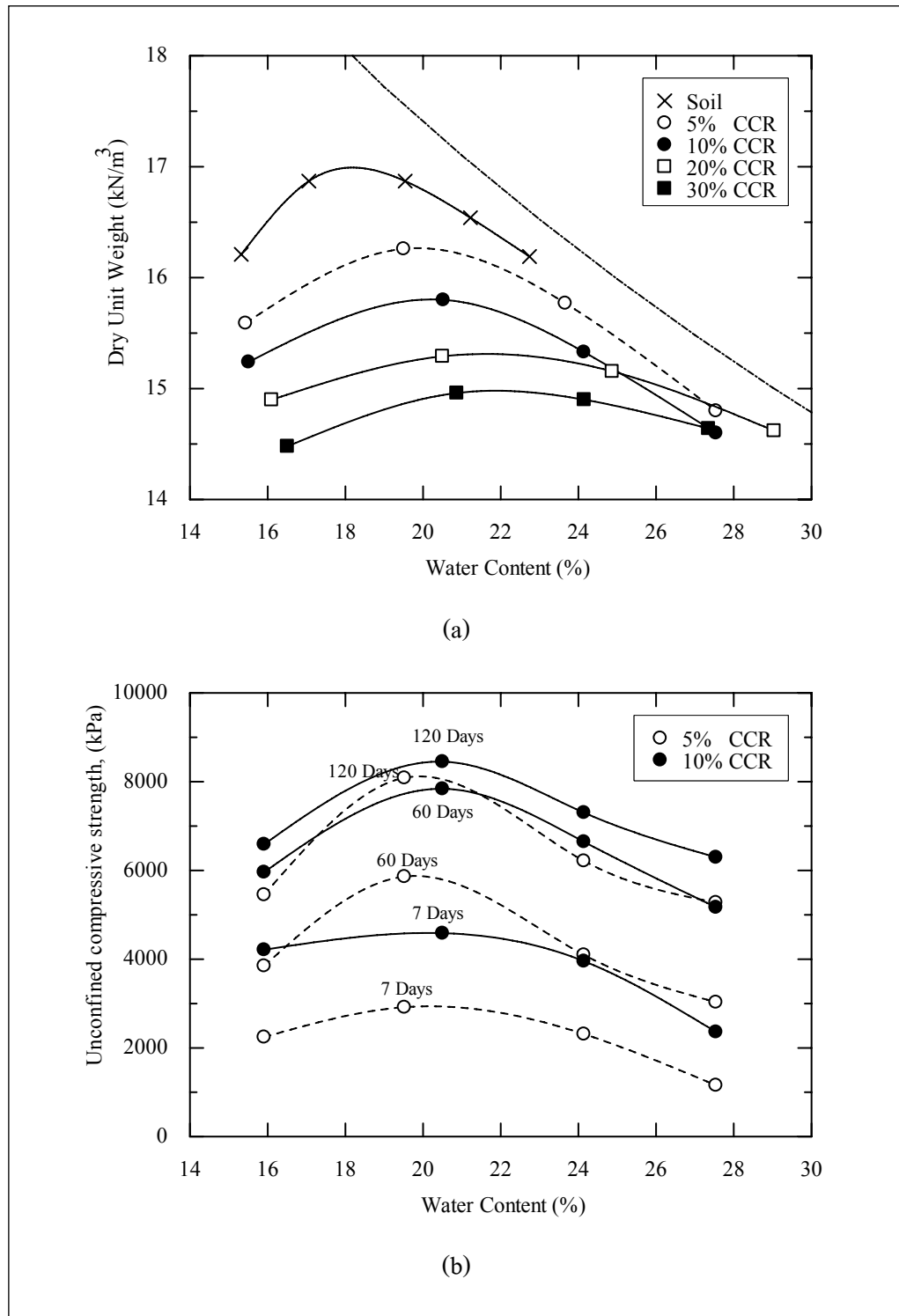
ตารางที่ 4.3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินตัวอย่าง

Energy Per Unit Volume	Silty Clay (CH)	
	OWC (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)
1. Standard Proctor (592.5 kJ/m ³)	25	15
2. Modified Proctor (2,693.3 kJ/m ³)	17.8	17

4.4 ผลศึกษาการบดอัด และค่ากำลังอัดแกนเดียวดินเหนียว

ผลสมกาคเคลเซียมคาร์ไบด์

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้นของดินเหนียวปนดินตะกอนผลสมกาคเคลเซียมคาร์ไบด์ จากกราฟการบดอัดเมื่อทำการบดอัดดินเหนียวผลสมกาคเคลเซียมคาร์ไบด์ ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลงตามปริมาณกาคเคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น และค่าความชื้นเหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกาคเคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น (ตาราง 4.4) ทั้งนี้เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของกาคเคลเซียมคาร์ไบด์ มีค่าน้อยกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของดินทำให้หน่วยน้ำหนักต่อปริมาตรลดลง กาคเคลเซียมคาร์ไบด์ยังทำให้ฐานระฆังของกราฟการบดอัดกว้างขึ้น แสดงให้เห็นค่าความหนาแน่นแห้งที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้นของดินเหนียวผลสมกาคเคลเซียมคาร์ไบด์มีความไวตัวต่อน้ำต่ำกว่าดินเหนียวปกติ พิจารณาผลการทดสอบการบดอัดเมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ความชื้นเดียวกัน อายุบ่ม 7 60 และ 120 วัน ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม หลังจากนั้นค่ากำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ผสมสารเชื่อมประสานที่ความชื้นทางด้านเปียกได้แก่ความชื้นที่ร้อยละ 120 ของความชื้นเหมาะสม มีค่าสูงกว่าความชื้นทางด้านแห้งที่ร้อยละ 80 ของความชื้นเหมาะสม ที่อายุบ่ม 60 และ 120 วัน ส่วนที่อายุบ่ม 7 วัน ค่ากำลังอัดแกนเดียวทางด้านแห้ง และทางด้านเปียกมีค่าใกล้เคียงกัน พฤติกรรมนี้มีปัจจัยมาจากที่อายุบ่ม 7 วัน การบดอัดทางด้านเปียกมีปริมาณน้ำไปล้อมรอบเม็ดดินมากกว่าทางด้านแห้งทำให้ไปขัดขวางการทำปฏิกิริยา Cation Exchange และ Pozzolanic ส่งผลให้พัฒนากำลังได้ช้ากว่าแต่เมื่ออายุบ่มผ่านไปมากขึ้นน้ำในมวลดินทางด้านแห้งเริ่มลดลง ทั้งจากการทำปฏิกิริยาและระเหยออกไปบ้าง ทำให้ไม่มีน้ำปริมาณมากพอที่จะละลายไอออนจากแคลเซียมคาร์ไบด์ ทำให้กำลังอัดทางด้านแห้งพัฒนาได้ช้ากว่าทางด้านเปียกเมื่ออายุบ่มมากขึ้น

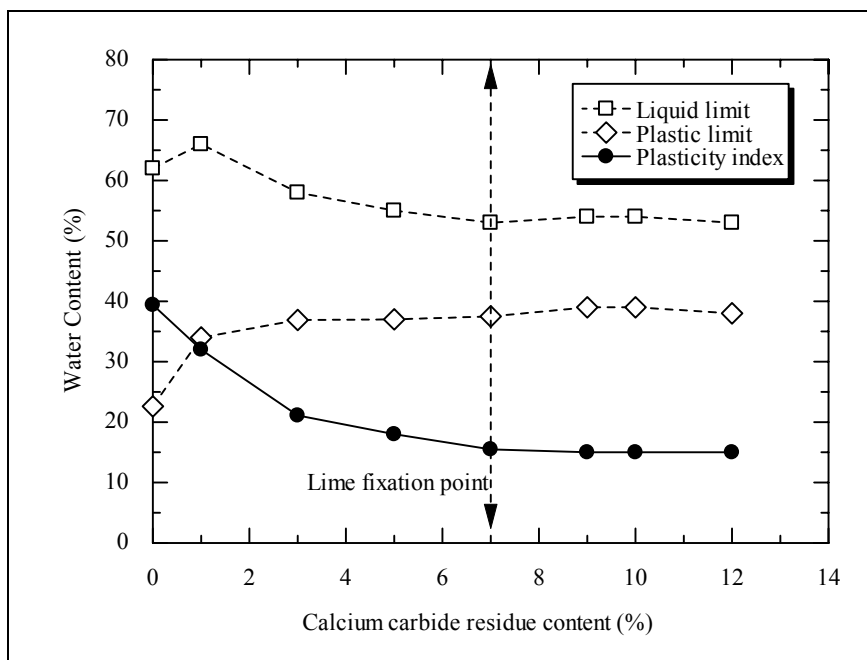


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) หน่วยน้ำหนักแห้ง และ (b) กำลังอัดแกนเดียว กับปริมาณความชื้นของดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์

ตารางที่ 4.4 ปริมาณความชื้นเหมาะสม และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

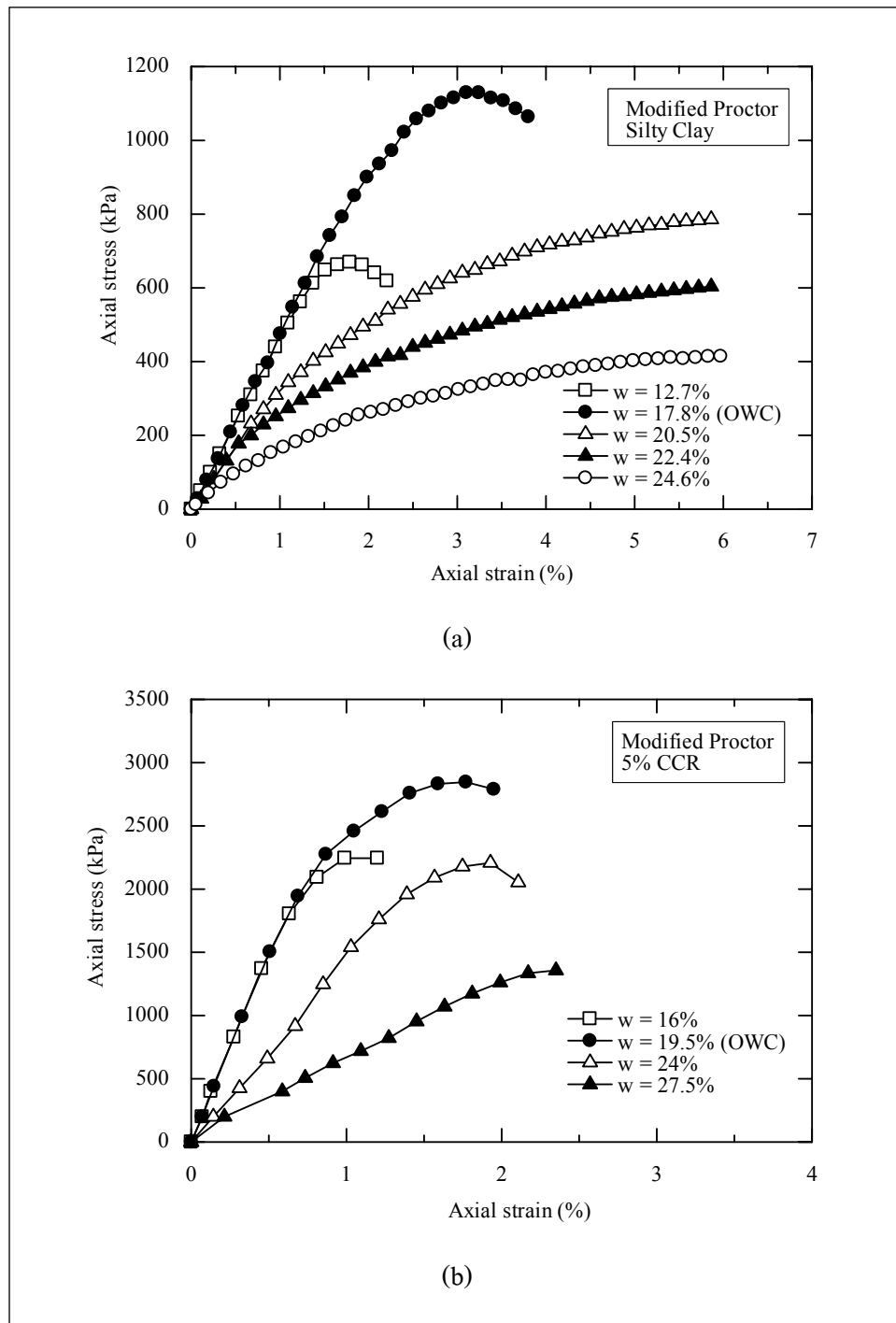
อัตราส่วนผสม	OWC (%)	$\gamma_{d, max}$ (kN/m ³)
5% CCR	19.50	16.26
10% CCR	20.52	15.80
20% CCR	20.50	15.29
30% CCR	20.87	14.96

รูปที่ 4.6 แสดงอิทธิพลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อพิกัดอัตราเบร็ก จะเห็นได้ว่าพิกัดเหลวมีแนวโน้มลดลง และพิกัดพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จึงมีผลให้ค่าดัชนีพลาสติกลดลงตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เมื่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์มากกว่าร้อยละ 7 พิกัดอัตราเบร็กมีค่าประมาณคงที่ การลดลงของค่าดัชนีพลาสติกเกิดเนื่องจากปฏิกิริยา Cation Exchange ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์บนผิวของดินเหนียว การที่ค่าดัชนีพลาสติกมีค่าประมาณคงที่แสดงให้เห็นว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณมากเกินไปที่จะทำปฏิกิริยา Cation Exchange ได้ทั้งหมด ดังนั้นปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ร้อยละ 7 อาจเรียกได้ว่าเป็น Lime Fixation Point (Hilt and Davidson, 1960)

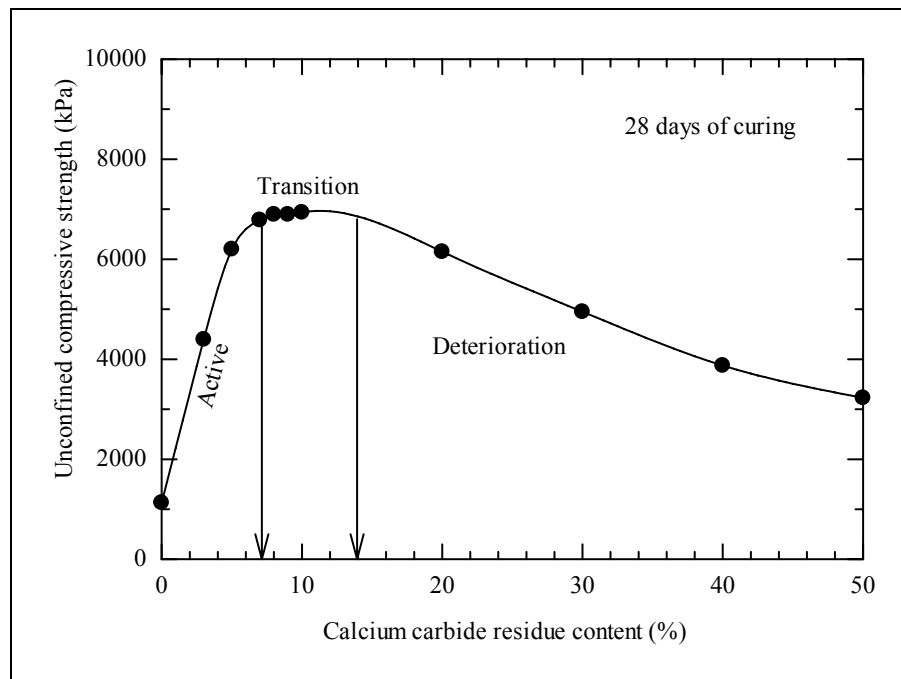


รูปที่ 4.6 อิทธิพลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว

รูปที่ 4.7(a) และ 4.7(b) แสดงอิทธิพลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัดแกนเดียว พบว่าเมื่อผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์เข้ากับดินเหนียวจะช่วยเพิ่มกำลังอัดและความต้านทานการเลี้ยวรูปคืบขึ้นในทุกช่วงความชื้น ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดอยู่ที่ความชื้นเหมาะสม (OWC)



รูปที่ 4.7 ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (a) ดินเหนียว (b) ดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์



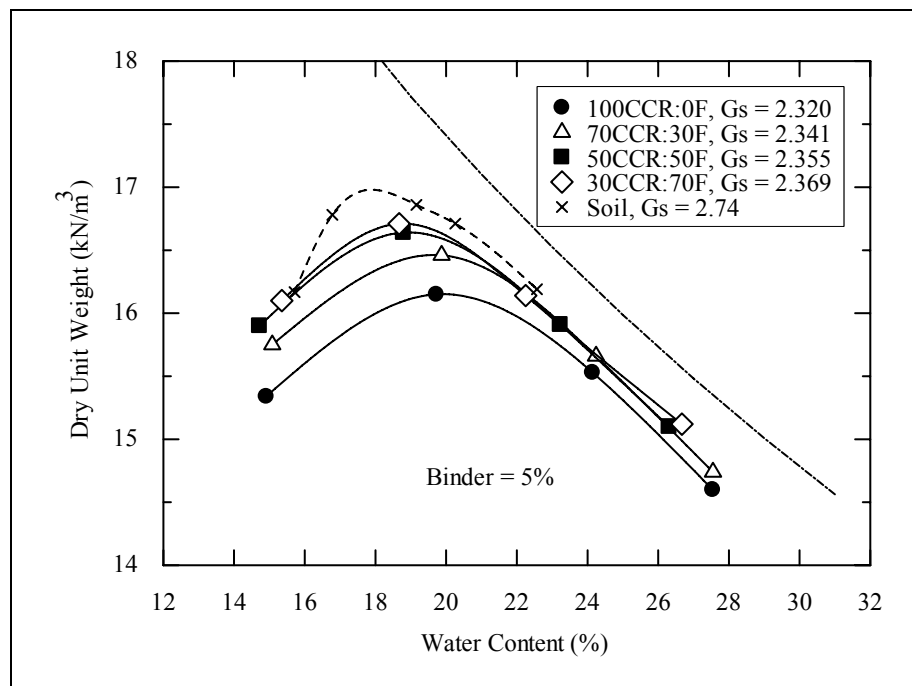
รูปที่ 4.8 โซนการปรับปรุงดินเหนียวปนดินตะกอนด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์

รูปที่ 4.8 แสดงอิทธิพลของปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวที่การบดอัดภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม และที่อายุบ่ม 28 วัน การพัฒนากำลังอัดสามารถแบ่งออกเป็นสามโซน โซนแรกค่ากำลังอัดแกนเดียวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จนสูงสุดที่ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ร้อยละ 7 ในโซนนี้เรียกว่าโซนแอคทีฟ (Active Zone) ถัดจากโซนนี้กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือมีค่าคงที่โซนนี้เรียกว่าโซนเปลี่ยนแปลง (Transition Zone) กำลังอัดจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่าเกินกว่าร้อยละ 14 ในโซนนี้เรียกว่าโซนลดกำลัง (Deterioration Zone) อาจสรุปได้ว่า ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม และพลังงานการบดอัดค่าหนึ่ง การเติมปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในดินเหนียวเกินกว่าโซนแอคทีฟไม่ช่วยให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่จุดเปลี่ยนระหว่าง Active Zone และ Transition Zone เป็นจุดเดียวกับ Lime Fixation Point ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่าเกินกว่าร้อยละ 7 ปริมาณดินเหนียวมีไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์

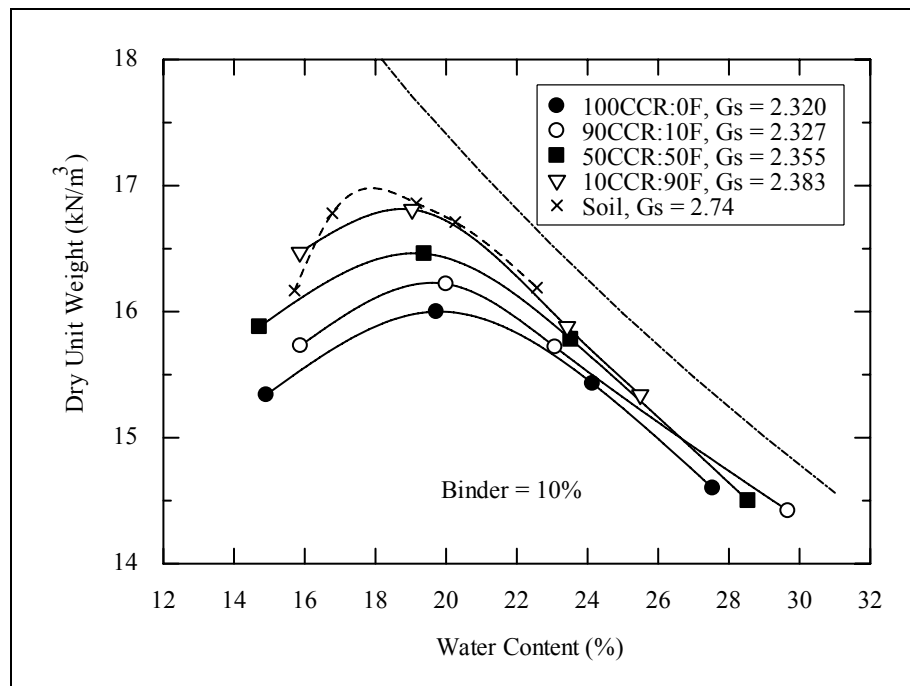
4.5 ผลศึกษาการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอน

ผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

เมื่อทำการบดอัดดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลงตามปริมาณกากเคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น และค่าความชื้นเหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากเคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ทั้งนี้เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของทั้งกากเคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของดินทำให้หน่วยน้ำหนักรวมต่อปริมาตรลดลง กากเคลเซียมคาร์ไบด์ยังทำให้ฐานระฆังของกราฟการบดอัดกว้างขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้นมีช่วงกว้างขึ้น เช่นเดียวกับการบดอัดดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์

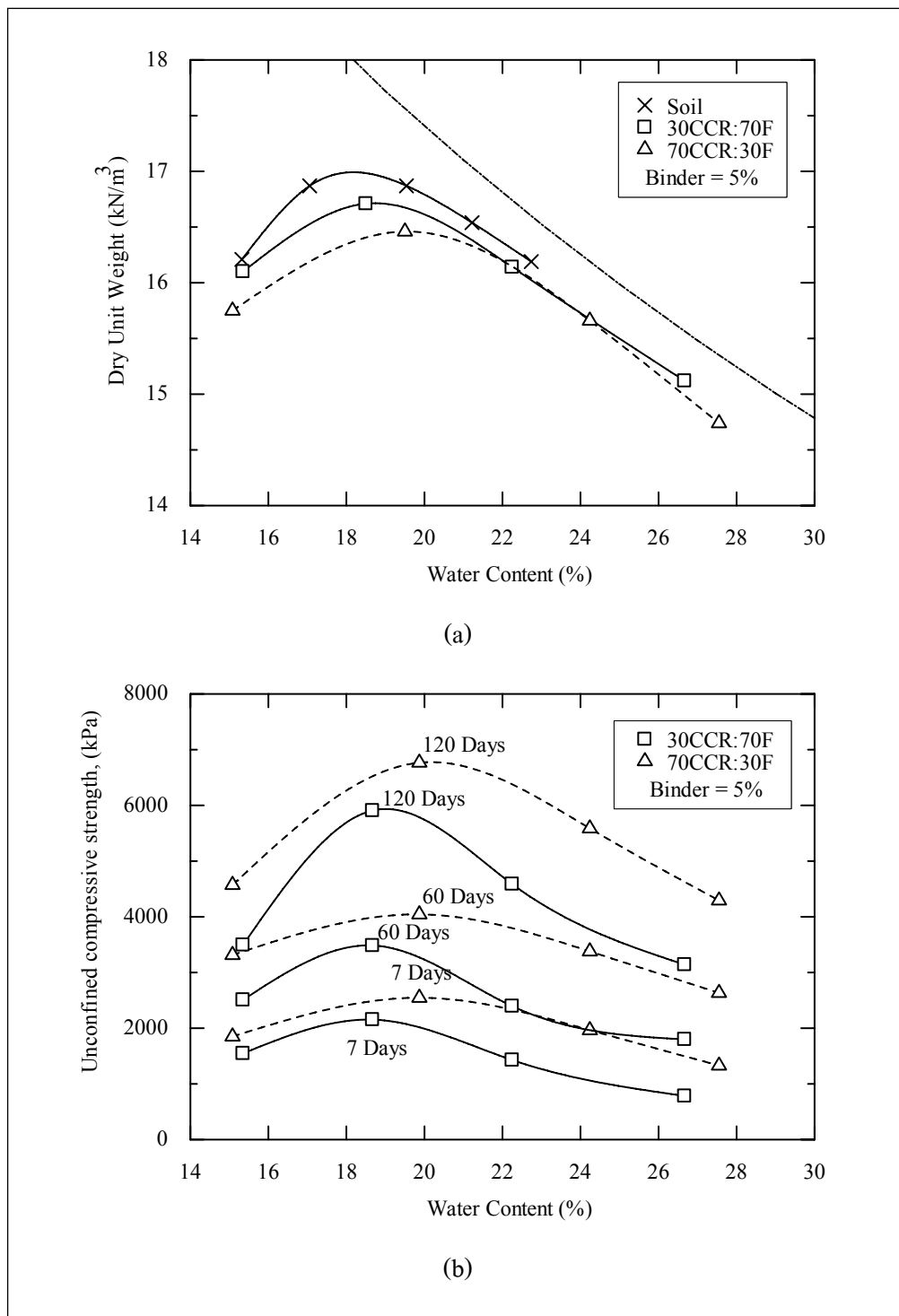


รูปที่ 4.9 กราฟการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

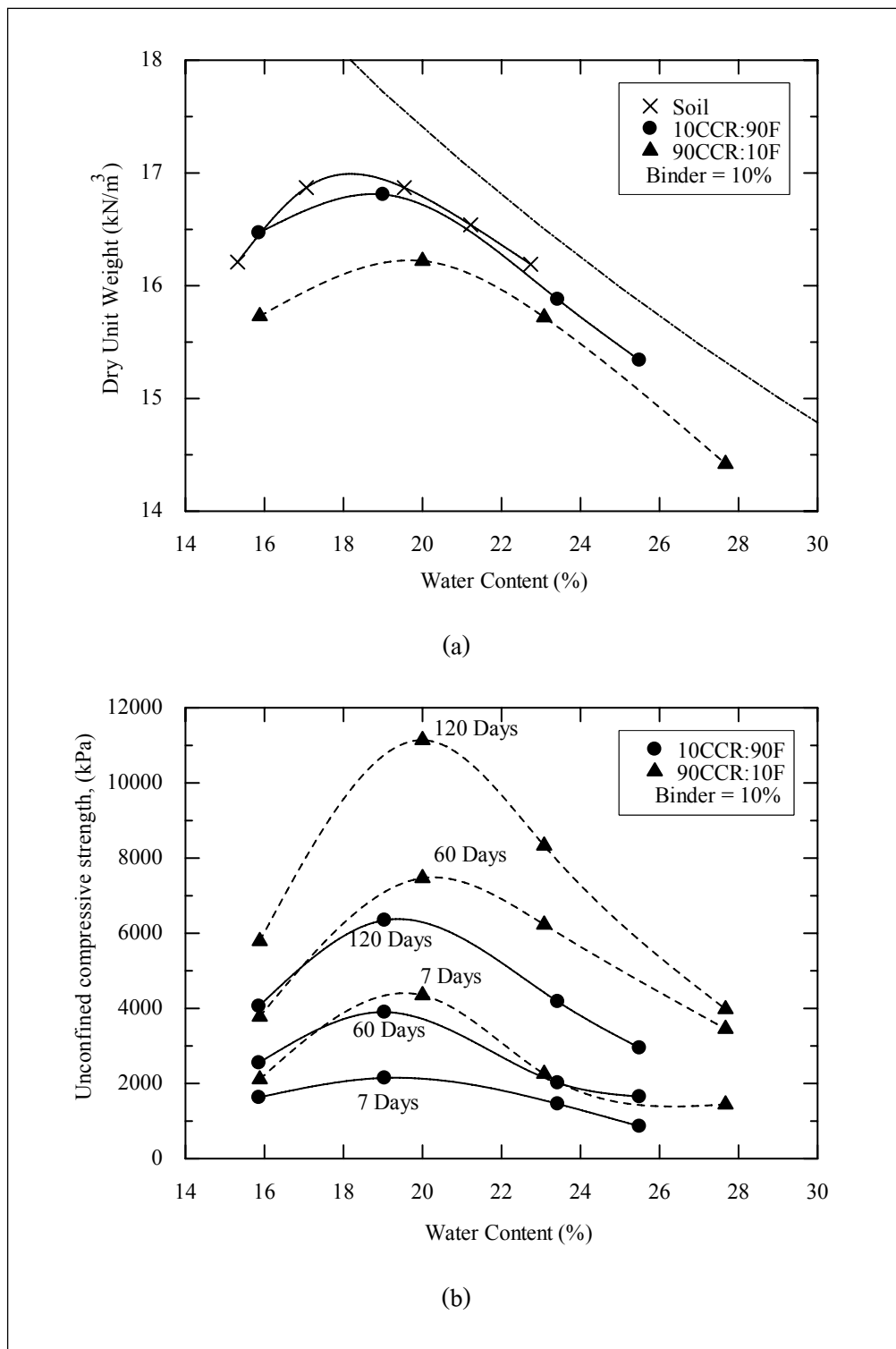


รูปที่ 4.10 กราฟการบดอัดดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงผลการทดสอบการบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆ เทียบกับค่ากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินที่ความชื้นเดียวกัน อายุบ่ม 7 60 และ 120 วัน ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมของทุกส่วนผสม หลังจากนั้นค่ากำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ความชื้นทางด้านเปียกได้แก่ความชื้นที่ร้อยละ 120 ของความชื้นเหมาะสม มีค่าสูงกว่าความชื้นทางด้านแห้งที่ร้อยละ 80 ของความชื้นเหมาะสม ที่อายุบ่ม 60 และ 120 วัน ในทุกอัตราส่วนผสม ส่วนที่อายุบ่ม 7 วัน ค่ากำลังอัดแกนเดียวทางด้านแห้ง และทางด้านเปียกมีค่าใกล้เคียงกัน พฤติกรรมที่เกิดขึ้นนี้เหมือนกับพฤติกรรมของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

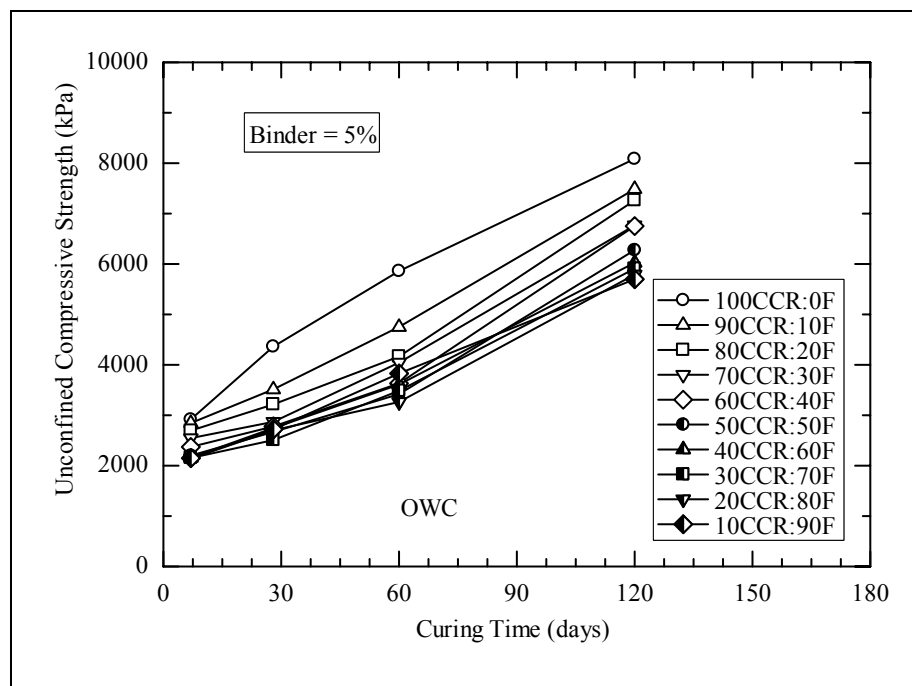


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) หน่วยน้ำหนักแห้ง และ (b) กำลังอัดแกนเดียว กับปริมาณความชื้นของดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์ (Binder=5%)

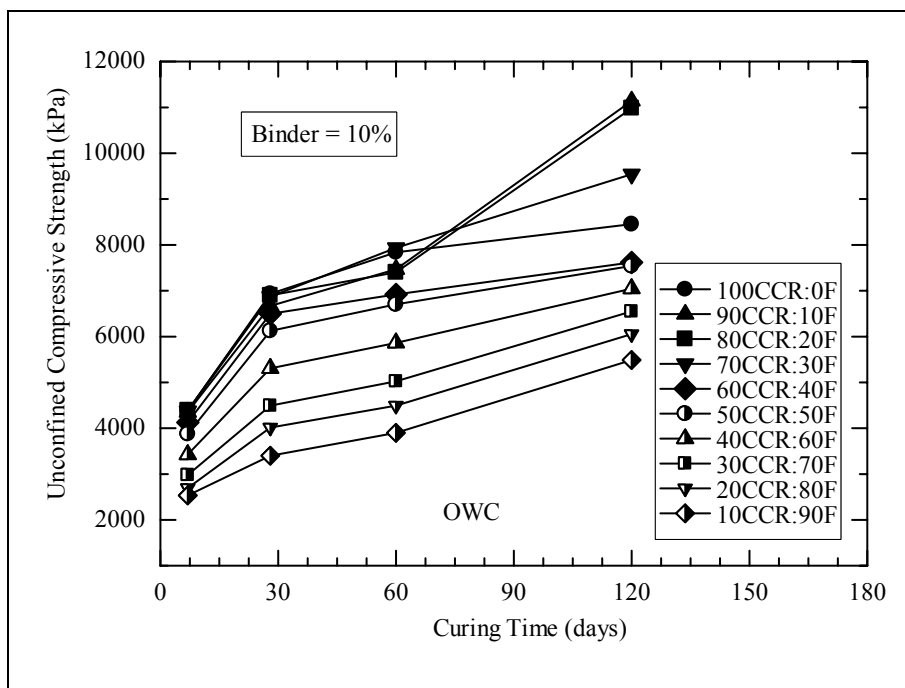


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) หน่วยน้ำหนักแห้ง และ (b) กำลังอัดแกนเดียว กับปริมาณความชื้นของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Binder=10%)

พิจารณาอิทธิพลของอายุบ่มต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนผสมเพิ่มในดินร้อยละ 5 และ 10 โดยแปรผันตามอัตราส่วนผสมต่างๆที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (รูปที่ 4.13 และ 4.14) พิจารณาที่อัตราส่วนผสมเพิ่มร้อยละ 5 ในทุกช่วงอายุบ่ม อัตราส่วนผสม 100CCR:0F ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด เนื่องจากที่อัตราส่วนผสมเพิ่มร้อยละ 5 นี้ยังไม่เกินจุด Lime Fixation Point จึงไม่เหลือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าลอย การผสมเถ้าลอยซึ่งเป็นการเพิ่มซิลิกาและอลูมินาจึงเกินความจำเป็น รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบที่อัตราส่วนผสมเพิ่มร้อยละ 10 พบว่าอัตราส่วนผสม 90CCR:10F 80CCR:20F และ 70CCR:30F ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงกว่าที่อัตราส่วนผสม 100CCR:0F ซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบที่อัตราส่วนผสมเพิ่มร้อยละ 5 มีสาเหตุมาจากที่อัตราส่วนผสมทั้ง 3 ค่านี้มีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์มากกว่าจุด Lime Fixation Point ดังนั้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยา Cation Exchange จึงเหลือพอที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาของเถ้าลอยปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นกับเถ้าลอยจึงช่วยพัฒนากำลังอัดแกนเดียวให้สูงขึ้น

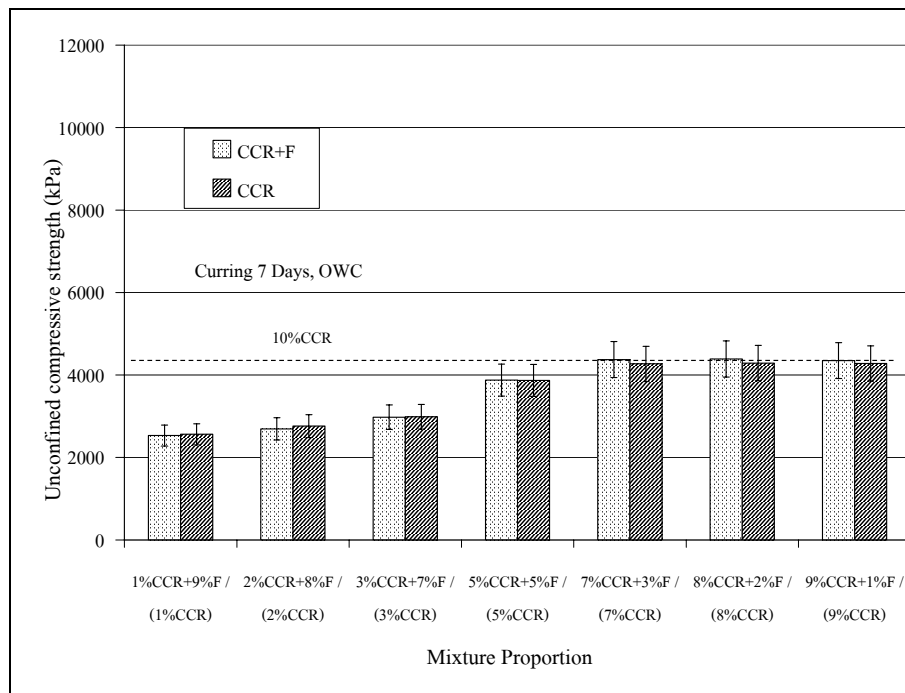


รูปที่ 4.13 อิทธิพลของอายุบ่มกับค่ากำลังอัดแกนเดียว (Binder=5%)

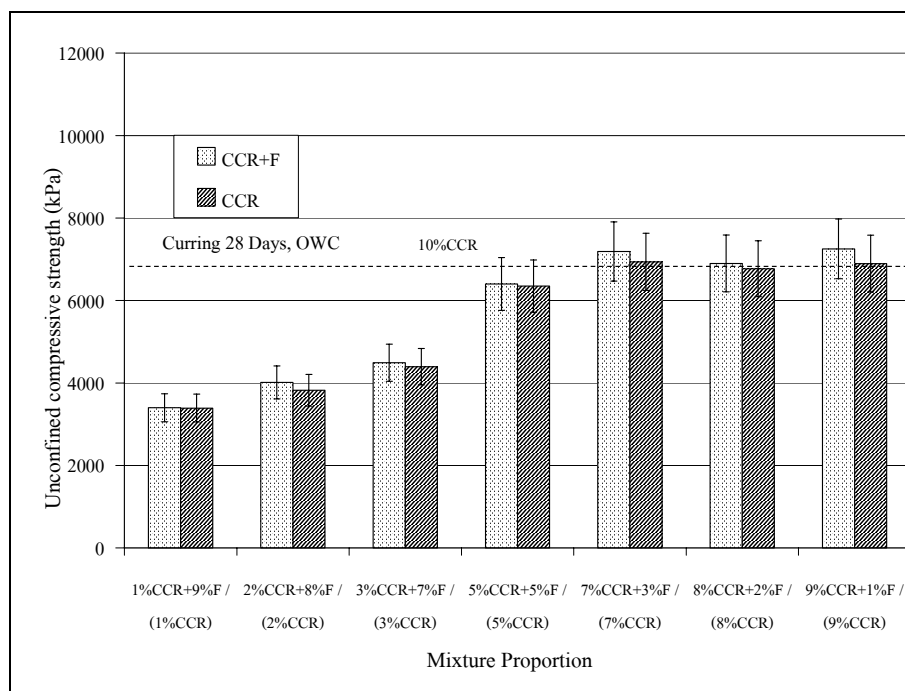


รูปที่ 4.14 อิทธิพลของอายุบ่มกับค่ากำลังอัดแกนเดียว (Binder=10%)

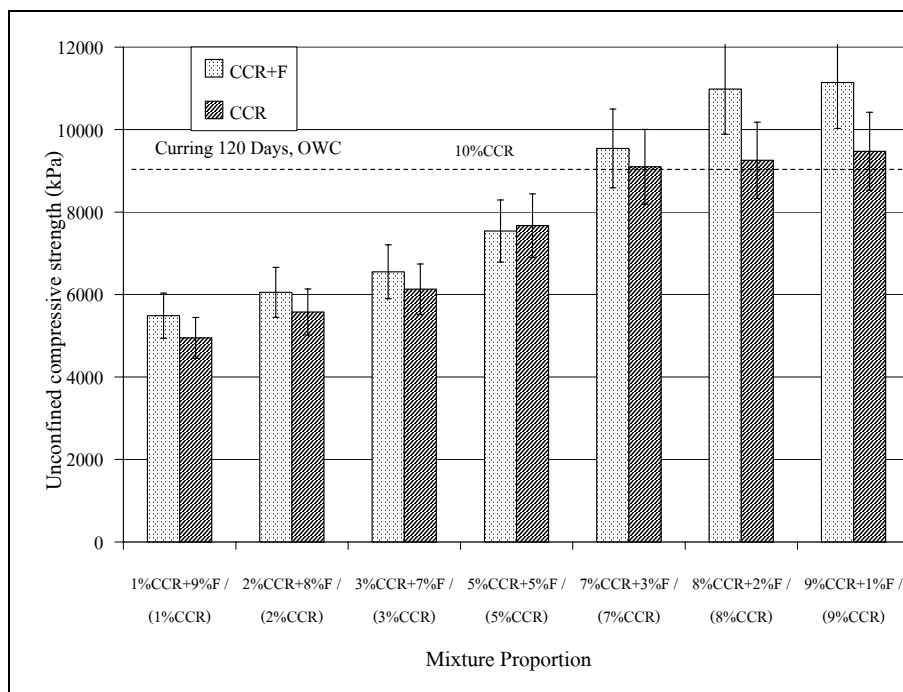
เพื่ออธิบายอิทธิพลของเถ้าลอยต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวและปฏิกิริยาปอซโซลานได้ชัดเจนยิ่งขึ้นพิจารณารูปที่ 4.15 ถึง 4.17 ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวในแต่ละส่วนผสมที่อัตราส่วนผสมเพิ่มร้อยละ 10 ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม รูปทั้งสามแสดงค่ากำลังอัดแกนเดียวของส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าลอย (CCR+F) เปรียบเทียบกับกำลังอัดแกนเดียวที่มีส่วนผสมเฉพาะกากแคลเซียมคาร์ไบด์โดยไม่ผสมเถ้าลอย (CCR) ที่อายุบ่ม 7, 28 และ 120 วัน จากการศึกษาพบประเด็นที่สำคัญ คือ กำลังอัดแกนเดียวของส่วนผสมที่มีเฉพาะกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของส่วนผสมที่มี CCR+F เล็กน้อยในทุกส่วนผสมในช่วงอายุบ่ม 7 วัน โดยความแตกต่างของกำลังอัดแกนเดียวจะเพิ่มขึ้น (CCR+F มีค่ามากกว่า) เมื่อผ่านอายุบ่ม 28 และ 120 วัน อิทธิพลของเถ้าลอยจะมีผลอย่างมากต่อการเพิ่มกำลังอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย เพราะเมื่ออายุบ่มมากขึ้นปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 กรณีไม่ผสมเถ้าลอย อัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณเกินกว่าร้อยละ 7 จะให้ค่ากำลังอัดประมาณคงที่เนื่องจากซิลิกาและอลูมินาในดินมีจำกัด แต่ถ้าผสมเถ้าลอยเข้าไปกำลังอัดจะพัฒนาต่อไปได้อีก เนื่องจากอัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์มากกว่าร้อยละ 7 มีแคลเซียมอิสระมากพอที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าลอย



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของเถ้าลอยต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4.16 อิทธิพลของเถ้าลอยต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 4.17 อิทธิพลของเถ้าลอยต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 120 วัน

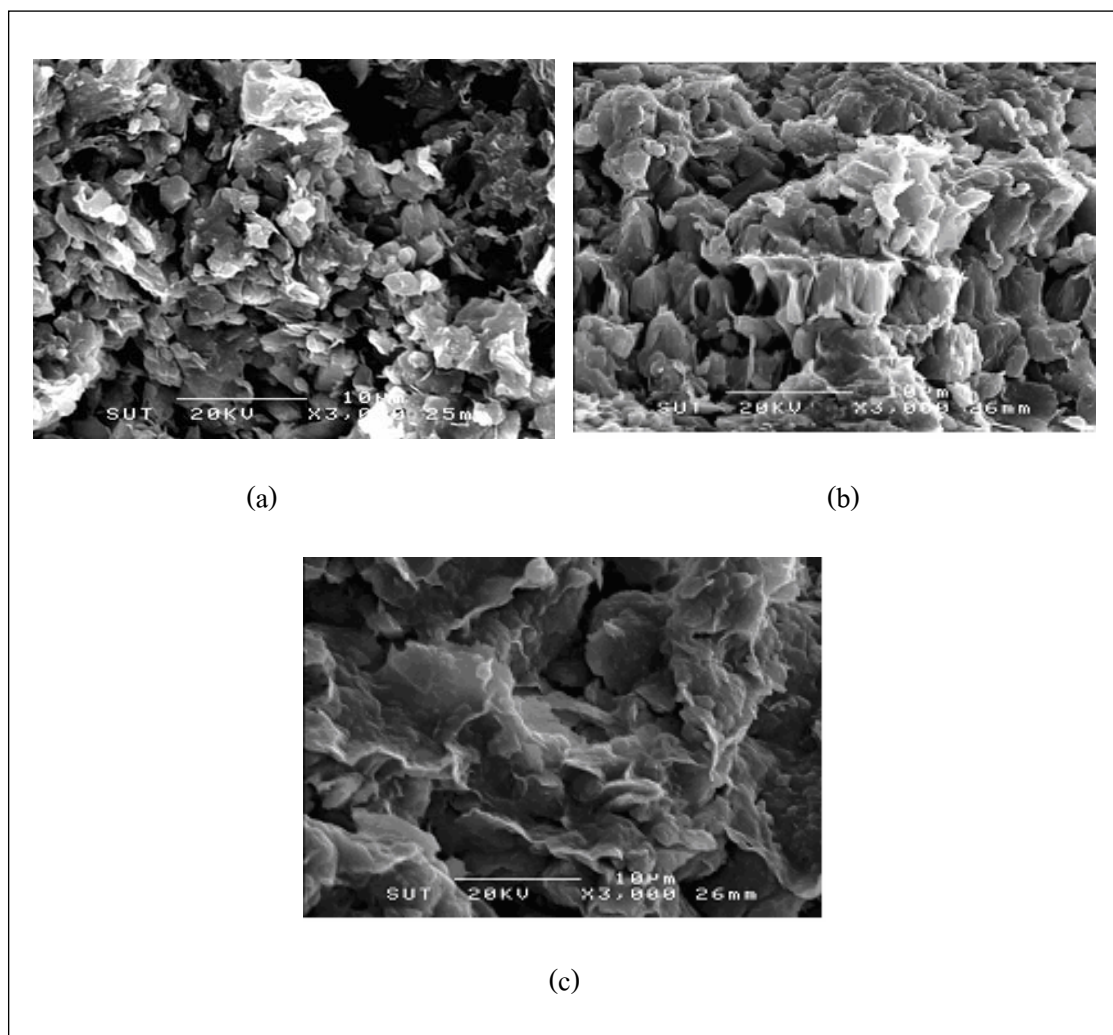
ซึ่งหากพิจารณากำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบที่ร้อยละ 10 พบว่าเถ้าลอยที่ผสมเข้าไปในอัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่ำกว่าร้อยละ 7 ไม่ได้ช่วยพัฒนากำลังอัดอย่างเด่นชัดสังเกตได้จากค่ากำลังอัดอยู่ในช่วงที่ซ้อนทับกันของค่าความคลาดเคลื่อนหรืออาจกล่าวได้ว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระมีปริมาณไม่มากพอที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับเถ้าลอย (ทำปฏิกิริยากับดินเหนียวจนหมด) เถ้าลอยจะช่วยพัฒนากำลังอัดได้ดีในอัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์มากกว่าร้อยละ 7 ที่อายุบ่ม 120 วัน

4.6 การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาค

4.6.1 ภาพถ่ายกำลังขยายดินเหนียวปนดินตะกอน

รูปที่ 4.18 แสดงภาพถ่ายขยายของดินเหนียวบดอัดภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้นระหว่าง 0.8 ถึง 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม รูปที่ 4.18(c) โครงสร้างของดินมีลักษณะเป็นแบบกระจัดกระจาย (Dispersed Structure) แสดงว่าปริมาณความชื้นมีมากพอต่อการพัฒนา Diffusion Double Layer ส่งผลให้เกิดแรงผลักที่สูง ดังนั้นอนุภาคของเม็ดดิน และกลุ่มเม็ดดินจึงสามารถเคลื่อนตัวข้ามกันได้ง่ายเมื่อถูกเหนือน ส่งผลให้กำลังอัดและสติเฟนส์ต่ำ การบดอัดทางด้านหนึ่งของ

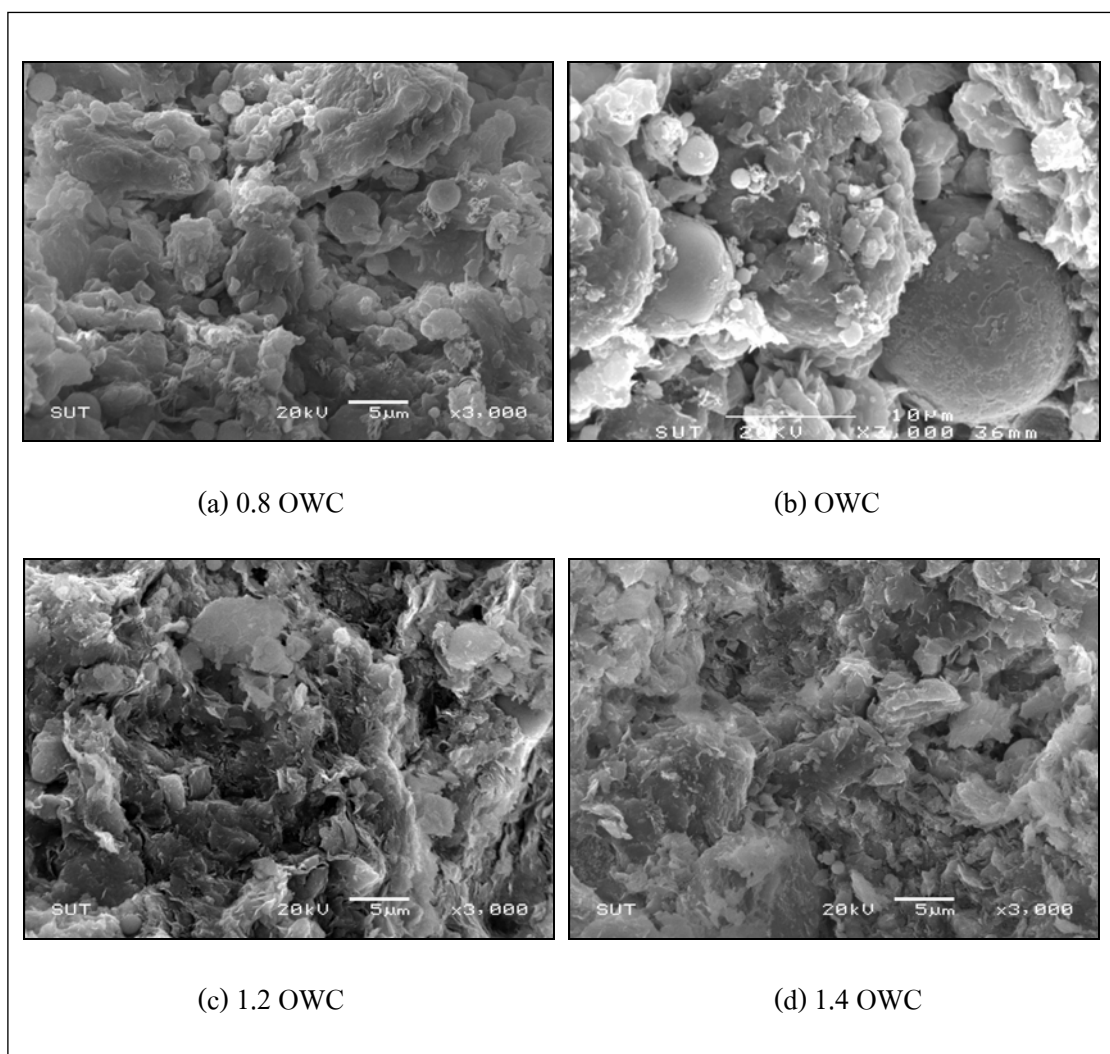
ปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังรูปที่ 4.18(a) ปริมาณความชื้นที่มีไม่มากพอที่จะพัฒนา Diffusion double Layer ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นระยะห่างระหว่างอนุภาคดินจึงมีน้อย ส่งผลให้ โครงสร้างดินมีแนวโน้มเป็นแบบรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Flocculation) ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะเป็นผลรวมของโครงสร้างทั้งสอง ที่สภาวะดังกล่าวดินตัวอย่างแสดงกำลังอัด และสตีเฟนเนสสูงที่สุด



รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวบดอัดภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน
(a) 0.8 OWC (b) OWC และ (c) 1.2 OWC (ยุทธนา รักษาชนม์, 2550)

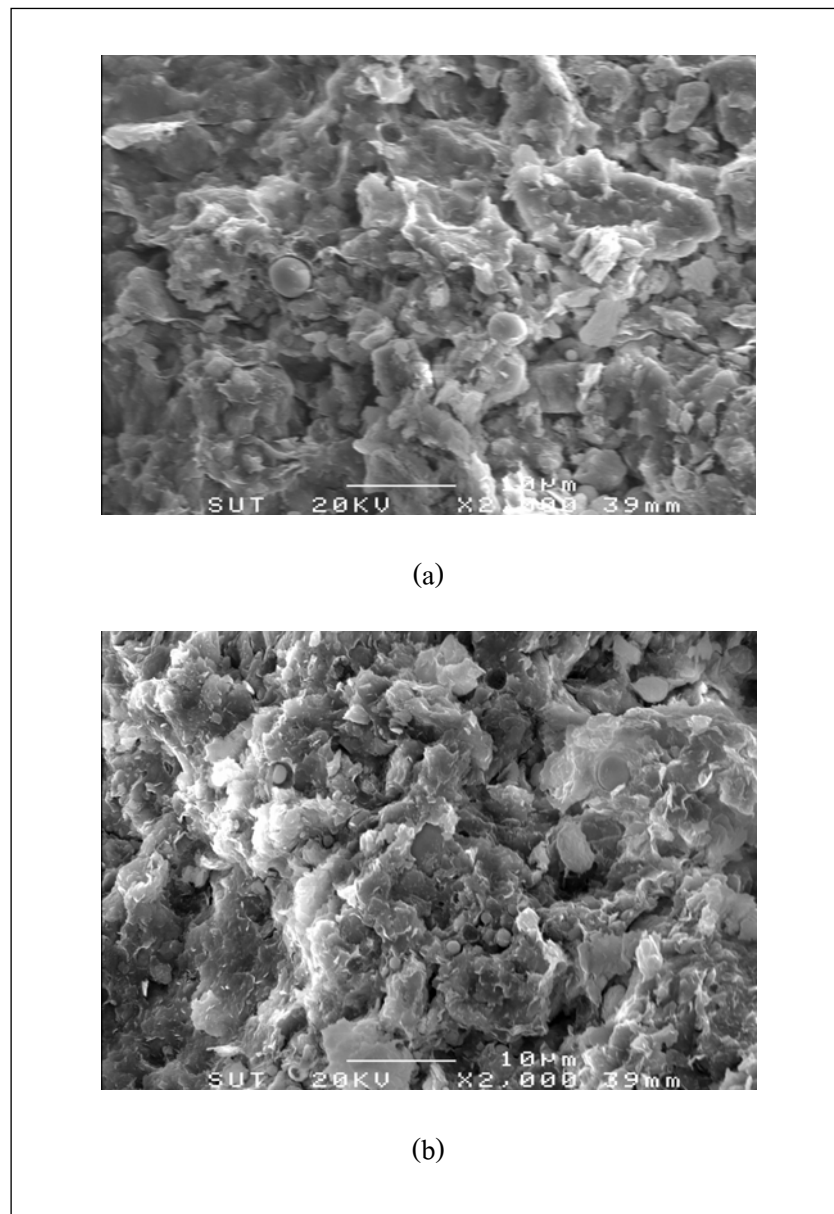
4.6.2 ภาพถ่ายกำลังขยายดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

รูปที่ 4.19 แสดงภาพถ่ายขยายของดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย บดอัดภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้นระหว่าง 0.8 ถึง 1.4 เท่าของ ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) พบว่าลักษณะโครงสร้างของดินที่ความชื้น 0.8 OWC และ 1.2 OWC มีโครงสร้างใกล้เคียงกันผสมผสานระหว่าง โครงสร้างกระจาย (Dispersed Structure) และ โครงสร้างแบบรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Flocculation) ส่วนที่ความชื้นการบดอัด 1.4 OWC มีลักษณะโครงสร้างแบบกระจายชัดเจน ลักษณะของภาพถ่ายใกล้เคียงกันแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น ทำให้ฐานระฆังของกราฟการบดอัดกว้าง (ไม่ไวต่อความชื้น)



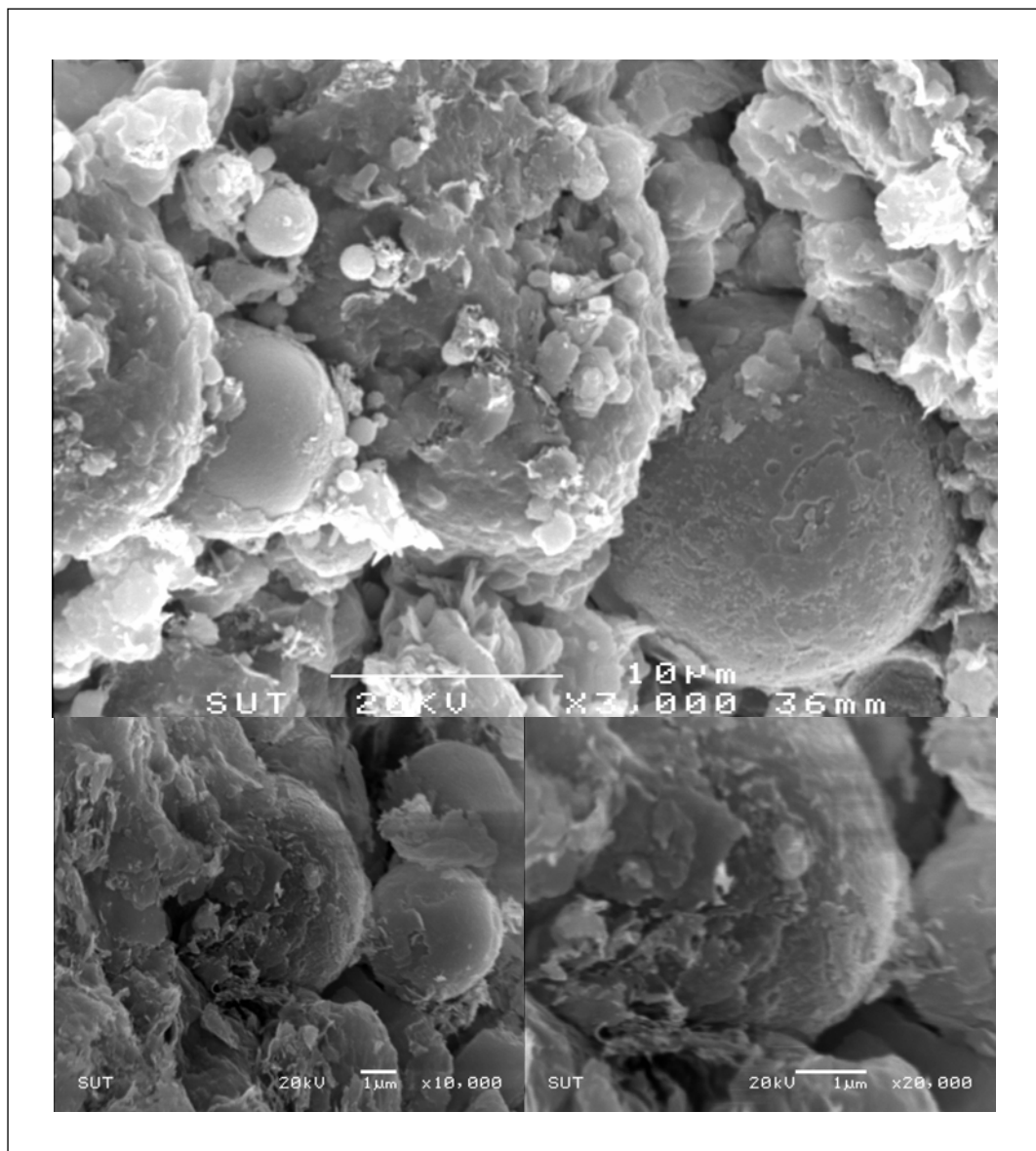
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยบดอัด อัตราส่วนผสม 70CCR:30F (Binder=10%) ที่ความชื้นต่าง ๆ

รูปที่ 4.20 แสดงภาพถ่ายขยายดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยบดอัดที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน จากภาพโครงสร้างของดินมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แสดงว่ากำลังรับแรงอัดที่พัฒนาเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม พัฒนามาจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างดินเหนียวกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยเท่านั้น

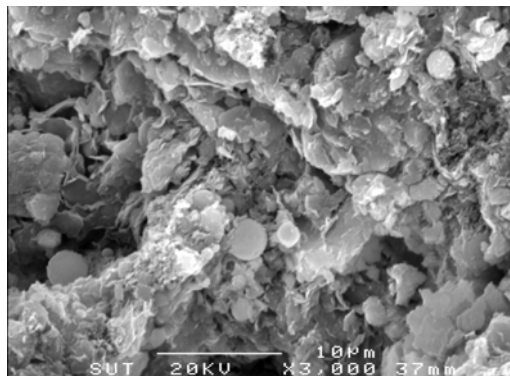


รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยบดอัด
อัตราส่วนผสม 70CCR:30F (Binder=10%)
(a) อายุบ่ม 7 วัน (b) อายุบ่ม 28 วัน

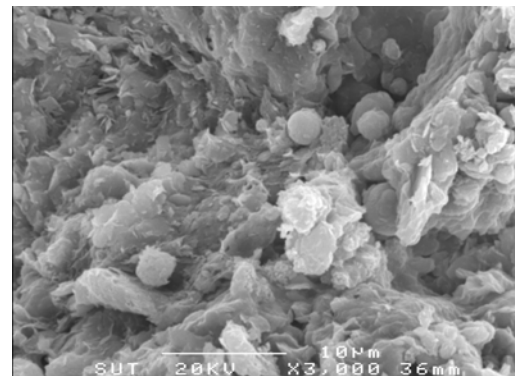
รูปที่ 4.21 แสดงภาพถ่ายขยายถ้ำลอยที่อัตราส่วนผสม 70:30 อายุบ่ม 120 วัน พบผิวของถ้ำลอยเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งแตกต่างจากอัตราส่วนอื่น ๆ แสดงในรูปที่ 4.22 ผลของภาพถ่ายแสดงให้เห็นสอดคล้องกับผลของค่ากำลังอัดแกนเดียว ที่อัตราส่วนอื่น ๆ ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระมีไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับถ้ำลอยจึงไม่เกิดการกัดกร่อนของถ้ำลอย



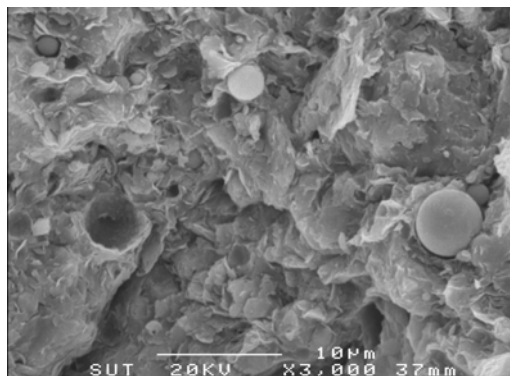
รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายขยายโครงสร้างดินที่อัตราส่วน 70CCR:30F อายุบ่ม 120 วัน (Binder=10%)



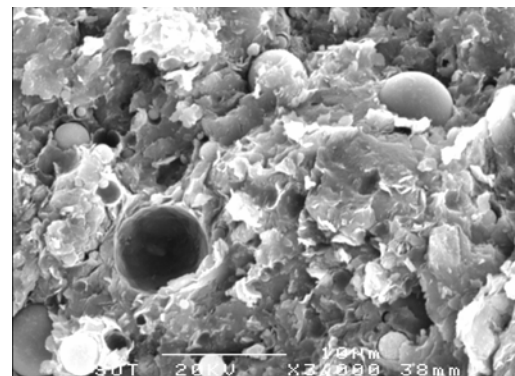
(a) 70CCR:30F (Binder=5%)



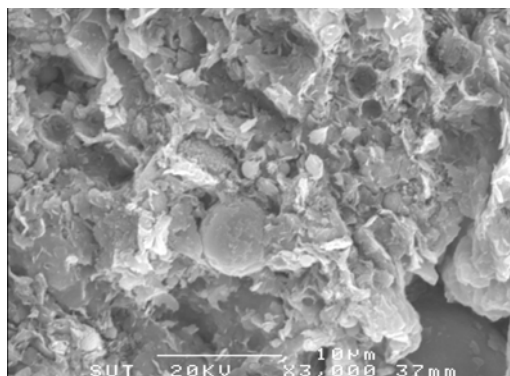
(b) 50CCR:50F (Binder=5%)



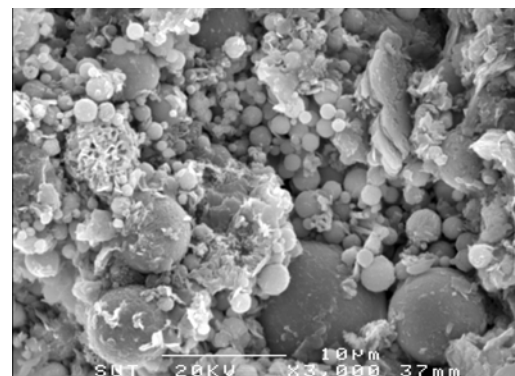
(c) 30CCR:70F (Binder=5%)



(d) 10CCR:90F (Binder=5%)



(e) 50CCR:50F (Binder=10%)



(f) 30CCR:70F (Binder=10%)

รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายขยายโครงสร้างของดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย
ที่อัตราส่วนต่าง ๆ อายุบ่ม 120 วัน (OWC)

4.6.3 ผลการศึกษา TGA (Thermal Gravimetry Analysis)

ผลการศึกษา TGA แสดงดังตารางที่ 4.5 แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลการทดสอบ TGA ของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์อัตราส่วนผสมเพิ่มร้อยละ 1 ถึง 10 (10CCR ถึง 100CCR) ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน พบว่าที่ส่วนผสม 10CCR ถึง 50CCR แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไป (Used) ในช่วง 7 วันถึง 28 วันนั้นลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับส่วนผสม 70CCR ถึง 100CCR เนื่องจากที่ส่วนผสม 10CCR ถึง 50CCR มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระเหลือไม่มากพอที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับซิลิกาและอลูมินาในดิน ส่วนที่สองเป็นผลการทดสอบ TGA ของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยอัตราส่วนผสมเพิ่มร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน พบว่าเมื่อผสมเถ้าลอยเพิ่มทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นน้อยกว่ากรณีไม่ผสมเล็กน้อย เนื่องจากเถ้าลอยเข้าไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พิจารณาที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ส่วนผสม 70CCR:30F 80CCR:20F และ 90CCR:10F แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไป (Used) มีค่าลดลงมากกว่ากรณีแรก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าลอยเพิ่มเติมด้วย ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวในรูปที่ 4.12 และ 4.13

ตารางที่ 4.5 Ca(OH₂) (%) จากผลการทดสอบ TGA

Binder=5%	7 Days	28 Days	Used	Binder=10%	7 Days	28 Days	Used
100CCR	7.54	6.80	0.74	100CCR:0F	7.54	6.80	0.74
90CCR	7.46	6.73	0.73	90CCR:10F	7.60	5.72	1.87
80CCR	7.50	6.70	0.80	80CCR:20F	7.13	5.85	1.28
70CCR	7.65	6.54	1.11	70CCR:30F	7.14	5.94	1.20
50CCR	7.48	6.79	0.69	50CCR:50F	6.29	5.49	0.80
30CCR	7.18	6.65	0.53	30CCR:70F	6.25	5.76	0.49
20CCR	6.21	6.12	0.09	20CCR:80F	5.92	5.82	0.10
10CCR	6.19	6.13	0.06	10CCR:90F	5.89	5.82	0.07

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการผลิตก๊าซเซทีลีน อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นด่างสูง ถ้ำลอยเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า การศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับถ้ำลอยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถเพิ่มคุณสมบัติการรับกำลังและสติฟเนสของดินได้เป็นอย่างดี ค่าการรับกำลังเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าเหมาะสมที่ทำให้กำลังได้มากที่สุดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 7

2) การผสมถ้ำลอยในช่วงปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ร้อยละ 1 ถึง 7 ไม่ได้ช่วยเพิ่มการรับกำลังเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระมีปริมาณไม่มากพอที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน การเพิ่มประสิทธิภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในช่วงปริมาณมากกว่าร้อยละ 7 ทำได้โดยการใช้ถ้ำลอย

3) ปัจจัยในการพัฒนากำลังอัดที่สำคัญอันดับแรก คือ ปฏิกิริยา Cation Exchange ระหว่างดินเหนียวกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ อีออนทั้งหลายของปูนขาวจะถูกดูดซับโดยแร่ธาตุในดิน และจะไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจนกว่าปฏิกิริยาการดูดซับจะสมดุล อันดับต่อมาคือปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นได้ดินนั้นต้องมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระมากพอที่จะทำปฏิกิริยา

4) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยภาพขยายของโครงสร้างดินด้วยเครื่องมือ SEM (Scanning Electron Microscope) ที่อัตราส่วนผสมเพิ่มร้อยละ 10 และอัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อถ้ำลอยที่ 70:30 แสดงให้เห็นว่าถ้ำลอยถูกล้อมรอบด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน และมีร่องรอยการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่ที่อัตราส่วนปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่ำกว่านี้ ร่องรอยการกัดกร่อนบนผิวของถ้ำลอยไม่ปรากฏให้เห็นชัดเจน เนื่องจากปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระไม่มากพอ

5) ภาพถ่ายขยายของโครงสร้างดินด้วยเครื่องมือ SEM แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างดินที่ความชื้น 0.8 OWC OWC และ 1.2 OWC มีลักษณะใกล้เคียงกันซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างโครงสร้างกระจัดกระจาย (Dispersed Structure) และ โครงสร้างแบบรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Flocculation) ดังนั้นการผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยเพิ่มเข้าไปในดินเหนียวปนดินตะกอน จึงมีผลให้ฐานของกราฟการบดอัดกว้างขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าความไวตัวในการทำปฏิกิริยากับน้ำของดินเหนียวลดลง (ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเปลี่ยนแปลงตามความชื้นลดลง)

6) ผลการศึกษา TGA แสดงให้เห็นว่าปริมาณการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในช่วง 7-28 วัน จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์จนถึงจุดที่เหมาะสมประมาณร้อยละ 7 และมีค่าประมาณคงที่ เมื่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณเกินกว่าร้อยละ 7 เนื่องจากแร่ดินเหนียวมีปริมาณไม่มากพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

7) การผสมเถ้าลอยลงในดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จะช่วยเพิ่มปฏิกิริยาปอซโซลานและมีอิทธิพลอย่างมาก เมื่อปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์มากกว่าร้อยละ 7 ซึ่งเกินกว่า Lime Fixation Point อิทธิพลของปฏิกิริยาปอซโซลาน แสดงให้เห็นได้จากผลการทดสอบ TGA ซึ่งปริมาณการถูกใช้ (Used) ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 7-28 วัน ของดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย มีค่ามากกว่าดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

1) งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาแต่เฉพาะความเป็นไปได้ของการรับกำลังอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ดังนั้นควรศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อให้ได้มาตรฐานในการใช้งานประเภทต่างๆ เช่น ความทนทาน การดูดซึมน้ำ และกำลังต้านทานแรงดึง เป็นต้น

2) งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยแก้ปัญหาเฉพาะดินเหนียวปนดินตะกอน ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมกับดินชนิดอื่นๆที่มีปัญหาด้วย เพื่อให้เข้าถึงอิทธิพลของชนิดดินต่อการพัฒนากำลังอัด

รายการอ้างอิง

- กรมทางหลวง. (2533). มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base). มาตรฐานที่ ทล.-ม. 204/2533.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2536). **คอนกรีตเทคโนโลยี**, กรุงเทพฯ, บริษัท คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.
- ชัย มุกตพันธ์ และ กาสุโตะ นากาซาวา. (2540). **ปฐพีศาสตร์และวิศวกรรมฐานราก**. กรุงเทพฯ : ดวงกมล.
- ทรงพล บุญมาดี. (2529). ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ CBR ของ ดินลูกรังผสมซีเมนต์. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**. 196 หน้า.
- ปิติสานต์ กร้ามาตร สุภิชาติ มาตย์ภูธร ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เกาพิศดาร. (2539). การศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหิน. **วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์**. ปีที่ 7 ฉบับที่ 2.
- มานะ อภิพัฒนะมนตรี. (2539). **วิศวกรรมปฐพีและฐานราก**. กรุงเทพฯ: ส่วนตำราสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.
- มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์. (2545). การพัฒนาการใช้ประโยชน์เถ้าลอยลิกไนต์ในไทย. **หนังสือรางวัลนักเทคโนโลยีดีเด่นประจำปี พ.ศ.2545**. หน้า10-16.
- ยุทธนา รักษาชนม์. (2550). กำลังอัดแกนเดี่ยวและโครงสร้างจุดภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน. (2546). ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์. **วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา**. 25-31 หน้า.
- สุธี ลิมนชัยพรกุล บุษกร อมรวิทย์ และ ชีระพงษ์ วงษ์เรือง. (2537). การศึกษากำลังอัดของวัสดุประสานของกากแคลเซียมคาร์ไบด์. **ปริญญาวิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**.

สุภิชาติ มาตย์ภูธร. (2541). ผลกระทบของขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เผาและไม่เผาคู่กำลังอัดของมอร์ตาร์ วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมชัย กกกำแหง. (2539). ศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้ประโยชน์. โยธาสาร.

สมชัย กกกำแหง. (2535). การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2535 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชาูปถัมภ์ 26-29 พฤศจิกายน. 2535.

สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน. (2535). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อนิรุทธ์ ชงไชย และ สุเทพ นิ่มนวล. (2530). การใช้ประโยชน์เถ้าลอยในการเป็นวัสดุสร้างทางหลวง. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Ahemed, S., Lovell, C.W., Jr., and Diamond, S. (1974). Pore size and Strength of compacted clay. **Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE.** Vol. 100. pp.407-425.

American Society for Testing Material (1995). **ASTM C 618-89:Specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete** : ASTM.

Berger, E.A. (2005). Lime application for site and infrastructure construction, **International Building Lime Symposium 2005 Orlando.** Florida. March 9-11, 2005.

Bell, F.G. (1988). Lime stabilization of clay soils: Part 1. Basic principles. **Ground Engineering.** 21(1). pp.10-15.

Bell, F.G., and Coulthard, J.M. (1990). Stabilization of clay soils with lime. *Mun. Eng.*

Bengochea, I. G., Lovell, C. W., and Altschaeffi, A. G., (1979). Pore distribution and permeability of silty clays. **Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE.** Vol.105. pp.839-856.

Berry, E.E., and Malhotra, V.M. (1980). **Fly ash for use in concrete-A Critical Review.** ACI JOURNAL. pp.59-73.

Broms, B.B., and Boman, P. (1975). Lime stabilized column. **Proc. 5th Asian Regional conf. Indian Institute of science.** Bangalore. India. 1. pp.227-234.

Bujang, B.K., Huat, S.M., and Thamer, A.M. (2005). Effect of chemical admixtures on the engineering properties of tropical peat soils. **American Journal of Applied Sciences.**

- Jaturapitakkul, C., and Roongreung, B. (2003). Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**. ASCE. Vol. 15. pp.470-475.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T. (2005). **Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste**. Cement and Concrete Composites. Vol. 27. pp.225-258.
- Cireo, L.T., Davidson, D.T., and David, H.T. (1962). Strength of Soil-Cement Mixture. **Iowa State University conference 41st Annual Section of Highway Research Board**. National Research Council. Washington D.C., U.S.A.
- Clare, K.E., and Pollard, A.E. (1954). The Effect of Curing Temperature the Compressive Strength of Soil-Cement Mixture. **Geotechnique**, Vol. 4. No. 3. pp.97-107.
- Davidson, D.T. (1961). Soil stabilization with Portland cement. **Highway Research Board**:200pp
- Davidson, D.T., Pitre, G.L., Mateos, M., and Kalankamary, P.G. (1962). Moisture-density, Moisture-strength and compaction characteristic of cement- treated soil mixture. **Highway Research Board**. pp.42-63.
- Delage, P., and Lefebvre, G. (1984). Study on the structure of sensitive Champlin clay and of its evolution during consolidation. **Canadian Geotechnical Journal**. Vol.21. pp.21-35.
- Diamond, S., and Kinter, E.B. (1966). Adsorption of calcium hydroxide by montmorillonite and kaolinite. **J. Colloid Interface Sci.**, 22: pp.240-249.
- Fabio, A.C., Heloisa, C.F., Rafael, G.P., Maria, A.C., and Vanderley, M.J. (2009). Carbide lime and industrial hydrated lime characterization. **Science Direct**. Powder Technology 195. pp.143-149.
- Felt, E.J.,(1955) . Factors influencing physical properties of soil-cement mixture. **Highway Research Board. Bulletin**. 108. pp.38-63.
- Griffiths, F.J., and Joshi, R.C. (1989). Change in pore size distribution due to consolidation of clay. **Geotechnique** 39. No. 1. pp.159-167.
- Hilt, G.H., and Davidson, D.T. (1960). Lime fixation of clayey soils. High. Res. Board. Bull. 262. Washington DC. pp.20-32.
- Hogentogler, C.A. (1938). Engineering properties of the Soils. **Mc Graw Hill Book**, New york.

- Horpibulsuk, S., Bergado, D.T., and Lorenzo, G.A. (2003). Compressibility of Cement Admixed Clays at High Water Content. **Geotechnique** 54. No.2. pp.151-154.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S. (2003). Assessment of strength development in cement-admixed high water content clay with Abrams's law as a basic. **Geotechnique** 53. No. 4. pp.439-444.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Bergado, D.T. (2004). Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. ASCE. Vol.130. No.10. pp.1096-1105.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R. (2006). "Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils : Laboratory and field study" **Soils and Foundations**. Vol.46. No.3. pp.351-366.
- Horpibulsuk, S., and Raksachon, Y. (2008). Effect of cement content on strength and microstructure of cement stabilized clay. Research and Development Journal of The Engineering Institute of Thailand.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Raksachon, Y. (2009). Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay. **Soils and Foundation**. Vol.49. No.1.
- Igarashi, S., Bentur, A., and Mindess, S. (1996). Microhardness testing of cementations materials, **Advanced Cement Based Materials**. Vol.4. pp.48-57
- Ingles, O.G., and Metcalf, J.B. (1972). **Soil Stabilization**. Sydney, Butterworths. pp.64-69.
- Ingles, O.H. (1987). Soil stabilization, Chapter 38. In: F.G. Bell (Editor). Ground Engineer's Reference Book. Butterworths, London. 38/1-38/26.
- Kamon, M. (1979). Study on engineering properties of very soft clay and it stabilization, **Doctoral dissertation**, Kyoto University, Kyoto, Japan (in Japanese).
- Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y., and Honjo, Y. (1981). Deep mixing method using cement hardening agent, **Proc. of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Stockholm. pp.721-724.
- Lambe, T.W., Mitchaels, A.S., and Moh, Z.C. (1959). Improvements of Soil-Cement with Alkali Compounds. **Highway Research Board, Bulletin.241**. pp.67-103.

- Lapierre, C., Leroueil, S., and Locat, J. (1990). Mercury intrusion and permeability of Louielsevilly clay, **Canadian Geotechnical Journal**, Vol.27. pp.761-773.
- Leadarand, J.A. (1956). Some Engineering Aspects of Soil-Cement Mixture. **Mid-South Section. ASCE**. April 27. pp.64-69.
- Maclean, D.J., Robinson, P.J.M., and Webb, S.B. (1952). An Investigation of the Stabilization of Heavy Clay Soil with Cement for Road Base Construction. **Road and Road Construction**. Vol. 30. No. 358. pp.287-292
- Maner, A.W. (1952). Curing Soil Cement Base. **Proceeding of Highway Research Board**. Vol. 31. Washington, D.C., National Research Council. pp.540-548
- Metcalf, J.B. (1977). Principle and application of cement and lime stabilization. **Australian Road Research Board**. 20 pp.
- Mindess, S. (1996). Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone, J.C. ed., **RILEM Technical Committee 108-ICC Report. E&FN SPON**. pp.48-63.
- Mitchell, J.K., and Jack, E.K. (1966). **The fabric of soil-cement and its formation**. Clay and Clay Minerals Vol. 26. pp.279-305.
- Michell, J.K. (1982). **Soil improvement state of the art report**. X ICSMFE (Rotterdam) Proc.
- Mitsui, K., Li, Z., Lange, D.A., and Shah, D.P. (1994). Relation between microstructure and mechanical properties of the paste-aggregate interface, **ACI Materials Journal**, Vol.91. No.1. pp.30-39.
- Nagaraj, T.S., Vatasala, A., and Srinivasa Murthy, B.R. (1990). Discussion on " Change in pore size distribution due to consolidation of clay " by Griffiths, F.J. and Joshi, R.C. **Geotechnique** 40. No. 2. pp.303-305.
- Nilo, C.C., Pedro Domingos, M.P., Joao Antonio, H.C., and Karla, S.H. (2001). Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**.
- Ng, S.C. (1966). Cement Stabilization of Lateritic Soil, **Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program**, No. 125, Seato Graduate School of Engineering. pp.55-65.
- Norling, L.T., and Peckard, R.G. (1958). Expeded Short-Cut Test Method for Detetmining Cement Factor for Sandy Soil. **Highway Research Board. Bulletin**. 198. pp.20-31.

- Okamura, T., and Terashi, M. (1975). Deep lime mixing method of stabilization for marine clays, **Proc., 5th Asian Regional conf. on soil Mech. and Found. Engineering**. Bangalore, India. pp.69-75.
- Payne, K.R. (1989). Chemicals from Coal New Process. Critical Report on Applied Chemistry. Volumn 14.
- Reinhold, F. (1955). Elastic Behavior of Soil-Cement Mixtures. **Highway Research Board, Bulletin**. 108. pp.128-137.
- Rhee, Y.H. (1982). Soil Stabilization with lime and Fly Ash, **Master of Engineering Thesis**, Asian Institute Technology.
- Ruennkrairergsa, T. (1982). Principal of Soil Stabilization. **Group Training in Road Construction**. Bangkok , Thailand. pp.17-26.
- Sherwood, P.T. (1958). The effect of Sulphates on Cement Stabilization Clay. **Highway Research Board, Bulletin**. 198. pp.45-54.
- Tateishi, Y. (1997). Geotechnical properties and stability of cut slope surface of Daitom earth, **Doctoral dissertation**. Saga University, Saga, Japan (in Japanese).
- Terashi, M., Tanaka, H., and Okumura, T. (1997). Engineering properties of lime treated marine soils and DMM, **Proc. 6th Asian Reg. Conf. SMFE**. 1. pp.191-194.
- Terrel, R.L., Barenberg, E.J., Michell, J.M., and Thomson, M.R. (1979). **Soil stabilization in pavement structure a user's manual mixture design consideration**. Washington : Government Printing Office.
- Van Impe, W.F. (1989). **Soil improvement techniques and their evolution**. Balkema.
- Washburn, E.W. (1921). Note on a method of determining the distribution of pore sizes in porous materials. **The National Academy of Scienc**, Vol.7. pp.115-116.
- Winterkorn, H.F., and Chandrasekharn, E.C. (1951). Lateritic Soil and Their Stabilization. **Highway Research Board. Bulletin**. 44. pp.10-29.
- Yamaguchi, H. (1992). Changes in pore distribution in isotropic consolidation and drained shear processes of undisturbed peat. **Journal of Geotechnical Engineering, JSCE**. III-19. pp.1-8 (in Japanese with English summary).
- Yamaguchi, H., and Ikenaga, H. (1992). Pore structure of compacted soils, **Journal of Geotechnical Engineering, JSCE**. III-19. pp.35-44 (in Japanese with English summary).

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา

ชยกฤต เพชรช่วย, อภิชาติ คำภาห้ำ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2553). การพัฒนากำล้งอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 12-14 พฤษภาคม 2553.

ชยกฤต เพชรช่วย, อภิชาติ คำภาห้ำ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2553). กลไกการพัฒนากำล้งอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย. วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ. (ตอบรับแล้ว)



การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

STRENGTH DEVELOPMENT IN SILTY CLAY STABILIZED

BY CALCIUM CARBIDE RESIDUE AND FLY ASH

ชยกฤต เพชรช่วย (Chayakrit Phetchuay)¹อภิจิต คำภาหาล้า (Apichit Kumpala)²สุขสันต์ หอทิบูลสุข (Suksun Horpibulsuk)³¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (pom1417@gmail.com)²นักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (d5140299@g.sut.ac.th)³รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (suksun@g.sut.ac.th)

บทคัดย่อ : บทความฉบับนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าลอยในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการผลิตก๊าซอะเซทิลีน อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นด่างสูง เถ้าลอยเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยนำมาทำเป็นวัสดุประสานผสมเพิ่มในดินที่ 5% และ 10% โดยน้ำหนัก การศึกษามีจุดมุ่งหมายเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการปรับปรุงดินดังกล่าว โดยแปรผันตัวแปรควบคุมได้แก่ อัตราส่วนผสมของสารทั้งสองชนิด 10 อัตราส่วน ปริมาณความชื้นที่ 80% 100% 120% 140% ของความชื้นเหมาะสม และอายุบ่มที่ 7, 28, 60 และ 120 วัน วิธีการทดสอบใช้การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวแบบไม่จำกัดขอบเขต ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนผสมที่ให้กำลังอัดมากที่สุดได้แก่อัตราส่วนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 90:10 ที่อัตราส่วนผสมเพิ่ม 10% มีกำลังอัดเท่ากับ 4,500 kPa ที่อายุบ่ม 7 วัน และ 11,500 kPa ที่ 120 วัน

ABSTRACT : This paper investigates the possibility of using calcium carbide residue and fly ash to improve the strength of silty clay. Calcium carbide residue ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) is waste products remaining from acetylean gas. Fly ash is waste products remaining from power plants. The $\text{Ca}(\text{OH})_2$ +fly ash were admixed 5% and 10% by dry weight of soil. The study aim to determine the optional $\text{Ca}(\text{OH})_2$: fly ash for this strength development with clay. The variable parameters are ten mixing ratios of calcium carbide and fly ash, water contents at 80% 100% 120% 140% of optimum water content(OWC). The $\text{Ca}(\text{OH})_2$ +fly ash-clay mixture were compacted under Modified Proctor energy and cured for 7, 28, 60 and 120 days. The unconfine a compression tests on the sample were then carried out. The results showed that the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ +fly ash were admixed 10% at mixing ratio 90:10 were highest strength. The mixing ratio 90:10 gives compressive strength 4,500 kPa at 7 days curing and 11,500 kPa at 120 day curing.

KEYWORDS : Soil cement, Silty clay, Calcium carbide residue and fly ash, Unconfined compressive strength.

1. บทนำ

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติ ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิด และสภาพแวดล้อม การนำดินมาใช้ประโยชน์ทางวิศวกรรมจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติ

ให้มีความเหมาะสม ดังเช่น ดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดินชั้นบนที่ระดับ 0-3 เมตร เป็นดินเหนียวปนดินตะกอน และดินตะกอนปนทรายที่เกิดจากการพัดพาของลม ดินดังกล่าวนี้มีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำถึงปานกลาง วิธีการปรับปรุงดินวิธีหนึ่งที่



เหมาะสม คือ การบดอัดดินด้วยสารเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์ และปูนขาว เป็นต้น) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ภายในระยะเวลาอันสั้น การนำดินชนิดนี้ไปใช้ในงานโครงสร้างพื้นทาง กรมทางหลวง ได้กำหนดมาตรฐานกำลังอัดแกนเดียวของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ 1750 kPa ที่อายุบ่ม 7 วัน [1] ดังนั้นหากต้องการนำดินชนิดนี้ไปใช้งานโครงสร้างพื้นทาง โดยกำหนดค่าความผิดพลาดในห้องทดลองกับการใช้งานจริงที่ 2 เท่าของค่ามาตรฐาน กำลังอัดแกนเดียวในห้องทดลองควรมากกว่า 3500 kPa เป็นอย่างน้อย

ในอดีตที่ผ่านมาสารเชื่อมประสานที่ใช้ คือ ปูนขาวและซีเมนต์ ภายหลังได้มีการนำ วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan) อื่นมาผสมกับดินเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนค่าก่อสร้าง บทความนี้จะใช้วัสดุเหลือใช้ปรับปรุงคุณภาพดินได้แก่ กากแกลบซีเมนต์คาร์ไบด์ และเถ้าลอย กากแกลบซีเมนต์คาร์ไบด์เป็นกากที่เหลือจากการผลิตก๊าซเซซีลินที่อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) จากความต้องการใช้ก๊าซเซซีลินที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละปีส่งผลให้ปริมาณกากแกลบซีเมนต์คาร์ไบด์ดังกล่าวสะสมเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้พบว่ากากแกลบซีเมนต์คาร์ไบด์มีคุณสมบัติเป็นด่างสูงทำให้เกิดปัญหาสภาพแวดล้อมในบริเวณที่ทิ้ง เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นส่วนที่เหลือจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงมีประมาณ 3 ล้านตัน/ปี [2] ส่งผลต่อการกำจัดทิ้ง

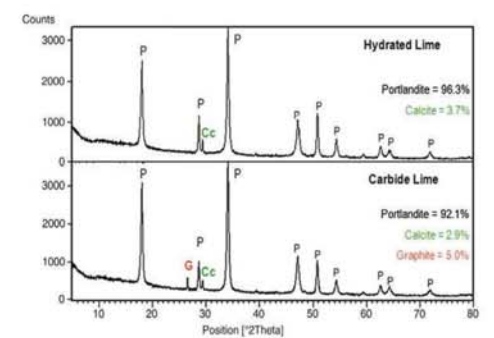
งานวิจัยหลายฉบับทำการศึกษาการผลิตวัสดุประสานแทนซีเมนต์โดยการใช้กากแกลบซีเมนต์คาร์ไบด์ และเถ้าลอย เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ในงานโครงสร้าง (สุธี ลิ้มปิ่นชัยพรกุล และคณะ [3], ชรินทร์ นมรักย์ และคณะ [4] และปิติ สานต์ กร้ามาตร และคณะ [5]) การศึกษาดังกล่าวพบว่ามอร์ต้าที่ผลิตจากกากแกลบซีเมนต์คาร์ไบด์ และเถ้าลอย มีความสามารถในการใช้รับกำลังในช่วงอายุต้นที่ค่อนข้างต่ำจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานโครงสร้างทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์

Fabio A. Cadoso, et al. [6] ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและโครงสร้างระหว่าง กากแกลบซีเมนต์คาร์ไบด์ กับ ปูนขาว (Hydrate lime) พบว่ามีคุณสมบัติคล้ายคลึงกันอย่างมากดังภาพที่ 1.

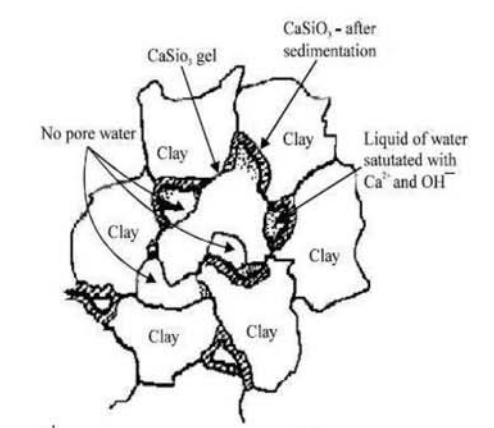
ปูนขาวถูกใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินตั้งแต่สมัยโรมัน [7] กรณีในดินเหนียวปริมาณที่ให้อยู่ในช่วงระหว่าง 5-10% ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมเข้ากับดิน คือ

การแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (Cation exchange)
การตกตะกอน และการรวมตัว (Flocculation and aggregation)

ปฏิกิริยาพอซโซลาน (Pozzolanic)
ปฏิกิริยา Cation exchange และ Flocculation-aggregation เป็นผลลัพธ์ที่เกิดที่ผิวของดินเหนียวทำให้เกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นดังภาพที่ 2. ผลของปฏิกิริยาทำให้ค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกมีค่าลดลง ขณะที่ค่าดัชนีพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเป็นการปรับปรุงกำลังและการเสีรูปร่างของดินเหนียว ส่วนปฏิกิริยาพอซโซลานเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับ ซิลิกาและอลูมินาในดิน [8]



ภาพที่ 1 XRD of hydrated lime and calcium carbide Notation P=Portlandite(Ca(OH)₂ , Cc=Calcite(CaCO₃), G=Graphite



ภาพที่ 2 Principle of soil stability with lime [8]



จากการศึกษาที่ผ่านมา สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับปูนขาว มอร์ต้าที่ผลิตจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยมีความสามารถในการรับกำลังในช่วงอายุปลายได้คล้ายซีเมนต์ ดังนั้นบทความนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุเหลือใช้ทั้งสองมาปรับปรุงคุณภาพดิน และมีจุดมุ่งหมายเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยที่เหมาะสมในการปรับปรุงกำลังอัดของดินดังกล่าว

2. ตัวอย่างวัสดุและวิธีทดสอบ

2.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

ดินที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นดินเหนียวปนดินตะกอนบริเวณภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เก็บตัวอย่างในลักษณะแปรสภาพที่ระดับความลึก 2 - 3 เมตรจากผิวดิน เพื่อให้ดินมีลักษณะที่เหมือนกันและมีการปนเปื้อนน้อยที่สุด จากนั้นนำตัวอย่างดินไปผึ่งให้แห้งใช้ล้อยางหอบดินที่จับตัวกันเป็นก้อนไว้ให้แตกตัวออกจากกันโดยให้มีขนาดประมาณ 1 - 2 เซนติเมตรเพื่อสะดวกในการย่อยดิน ทำการย่อยดินด้วยเครื่องให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำดินที่ผ่านการย่อยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 อีกครั้งหนึ่ง ดินชนิดนี้จำแนกด้วยวิธีเอกภาพ(United Soil Classification System, USCS) จัดอยู่ในประเภท ดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกสูง (CH) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.76 ซึ่ดจำกัดเหลว และพิกติกพลาสติกเท่ากับ 61 และ 22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเมื่อถูกบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 16.9 kN/m^3 ที่ค่าความชื้นเหมาะสมเท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์ มีค่าอัตราการบวมตัวอิสระ(Free swell ratio) เท่ากับ 1.4 จำแนกเป็นการบวมตัวต่ำมาก มีค่า Cation Exchange Capacity (CEC) เท่ากับ $27.6 \text{ me}/100\text{g}$ และมีค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ $1,130 \text{ kPa}$ ที่จุดความชื้นเหมาะสม

2.2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้จาก บริษัท สาย 5 ผลิตภัณฑ์ก๊าซ จำกัด อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม กากแคลเซียมคาร์ไบด์เตรียมด้วยวิธีการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นบดด้วยเครื่อง และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.32

2.3 เถ้าลอย

เถ้าลอย เป็นเถ้าลอยที่ได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.39

2.3 วิธีทดสอบ

ทำการศึกษาคูสมบัติเบื้องต้นของดิน หลังจากนั้นจะนำดินไปบดอัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จากนั้นนำดินผสมสารเชื่อมประสานที่แปรผันอัตราส่วนต่างๆ ไปบดอัดเพื่อหาค่าความชื้นที่เหมาะสมดำเนินการเตรียมตัวอย่างแปรผันค่าความชื้นและตัวแปรอื่นๆ จากค่าความชื้นเหมาะสม ดังแสดงตัวแปรตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ใช้ในการบดอัดดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
ปริมาณความชื้น	4 ค่า	ปริมาณความชื้นที่ 80, 100, 120 และ 140 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณความชื้นเหมาะสม
พลังงานการบดอัด	1 ค่า	บดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน
อายุบ่ม	4 ค่า	7, 28, 60 และ 120 วัน
ปริมาณสารเชื่อมประสานที่ผสมเพิ่มในดิน	2 ค่า	5% และ 10%
อัตราส่วนระหว่างปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อปริมาณเถ้าลอย	10 ชนิด	1. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 100 : 0 2. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 90 : 10 3. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 80 : 20 4. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 70 : 30 5. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 60 : 40 6. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 50 : 50 7. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 40 : 60 8. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 30 : 70 9. กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อ



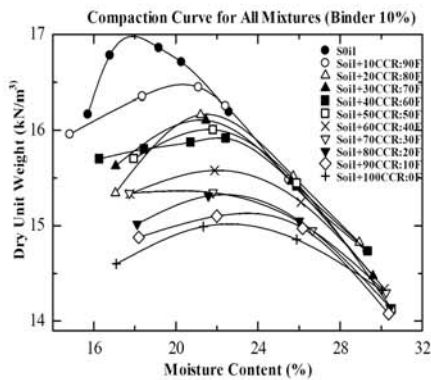
	etailoy 20 : 80 10. กากเคลือบคาร์ไบด์ etailoy 10 : 90
--	---

เมื่อได้ตัวอย่างดินเหนียวผสมกากเคลือบคาร์ไบด์ และ etailoyตามระยะเวลาบ่มที่ต้องการ นำตัวอย่างดินไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)

3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบการบดอัดดินผสมสารเชื่อมประสาน

เมื่อทำการบดอัดดินผสมสารเชื่อมประสาน ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลงตามปริมาณกากเคลือบคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น และค่าความชื้นเหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 3 ทั้งนี้เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของทั้งกากเคลือบคาร์ไบด์ และ etailoyมีค่าน้อยกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของดินทำให้น้ำหนักต่อปริมาตรลดลง



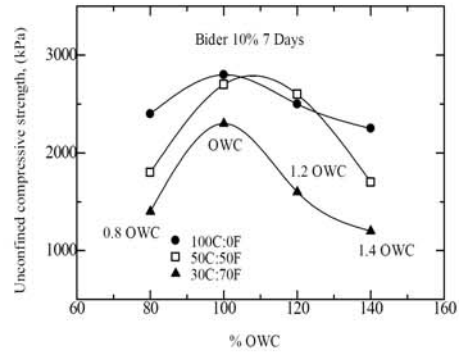
ภาพที่ 3 ผลการทดสอบการบดอัดดินผสมสารเชื่อมประสาน

3.2 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างผสมกากเคลือบคาร์ไบด์และetailoy

3.2.1 อิทธิพลของปริมาณน้ำต่อกำลังอัดแกนเดียว

ภาพที่ 4 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่ผสมสารเชื่อมประสาน ที่ความชื้นในการบดอัดเท่ากับ 80, 100, 120 และ 140 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำที่จุดเหมาะสมอายุบ่ม 7 วัน พบว่า ค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมของแต่ละส่วนผสม หลังจากนั้นค่ากำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณความชื้น

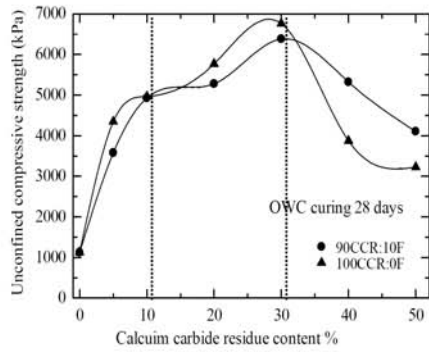
ที่เพิ่มขึ้นนอกจากนี้ยังพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ผสมสารเชื่อมประสานที่ความชื้นทางด้านเปียกได้แก่ความชื้นที่ 120% ของความชื้นเหมาะสมมีค่าสูงกว่าความชื้นทางด้านแห้งที่ 80% ของความชื้นเหมาะสม



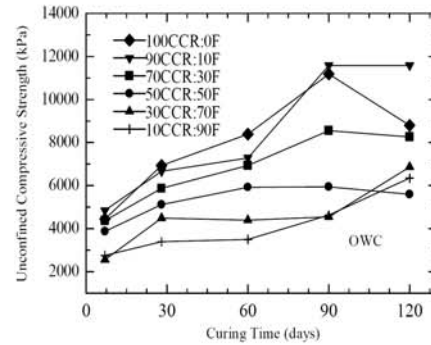
ภาพที่ 4 อิทธิพลของปริมาณน้ำต่อกำลังอัดแกนเดียว

3.2.2 อิทธิพลของปริมาณกากเคลือบคาร์ไบด์กับกำลังอัดแกนเดียว

ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกากเคลือบคาร์ไบด์กับค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ผสมเฉพาะกากเคลือบคาร์ไบด์และ ดินเหนียวที่ผสมกากเคลือบคาร์ไบด์และetailoyที่อัตราส่วน 90C:10F ที่ความชื้นเหมาะสม จะแปรผันตามปริมาณกากเคลือบคาร์ไบด์ที่ผสมเพิ่มเข้าไปสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 โซน คือ โซนแรกเรียกว่า Active zone ในโซนนี้ค่ากำลังอัดแกนเดียวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากเคลือบคาร์ไบด์ ในโซนที่สองอัตราค่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวมีค่าค่อนข้างต่ำโซนนี้เรียกว่า Inert zone ถัดจากโซนนี้ไปเป็น Decline zone ซึ่งกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลง ซึ่งมีผลมาจากปริมาณกากเคลือบคาร์ไบด์มีปริมาณมากเกินไปทำให้ไปขัดขวางการทำปฏิกิริยา



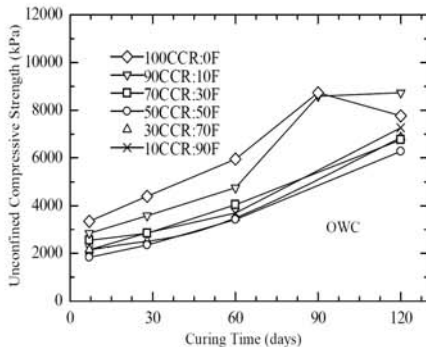
ภาพที่ 5 อิทธิพลของปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อค่ากำลังอัดแกนเดียว



ภาพที่ 7 อิทธิพลของอายุบ่มกับค่ากำลังอัดแกนเดียว(Binder10%)

3.2.3 อิทธิพลของอายุบ่มกับค่ากำลังอัดแกนเดียว

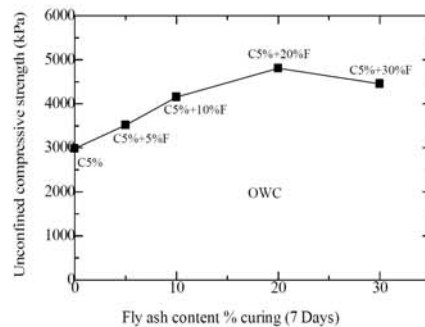
อิทธิพลของ อายุบ่ม กับค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนผสมเพิ่มโคนิน 5% และ10% โดยแปรผันตามอัตราส่วนต่างๆที่ตำแหน่งความชื้นเหมาะสม แสดงในภาพที่ 6 และภาพที่ 7 พบว่าปฏิกิริยาหลักที่ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นมีสองชนิดคือ ปฏิกิริยา Cation exchange และ ปอซโซลาน จะพบว่าเมื่ออายุบ่มมากขึ้นค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้น และพบอีกว่าอัตราส่วนผสม 100C:0F หลังจากอายุบ่ม 90 วันกำลังอัดมีค่าลดลง ส่วนอัตราส่วนผสม 90C:10F และ70C:30F เมื่อผ่านอายุบ่ม 90 วัน กำลังเริ่มคงที่หรือลดลงเล็กน้อย ตรงข้ามกับช่วงอัตราส่วนผสมที่ 10C:90F, 20C:80F และ 30C:70F ที่กำลังอัดแกนเดียวยังมีค่าเพิ่มขึ้นแม้จะผ่านอายุบ่ม 90 วันไปแล้ว



ภาพที่ 6 อิทธิพลของอายุบ่มกับค่ากำลังอัดแกนเดียว (Binder 5%)

3.2.4 อิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยกับค่ากำลังอัดแกนเดียว

ภาพที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าลอยที่ผสมเพิ่มอัตราส่วน 5%-30% ของน้ำหนักรินแห้ง กับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ผสมเพิ่มอัตราส่วนคงที่ 5% ของน้ำหนักรินแห้ง พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเถ้าลอย 20% หลังจากนั้นค่ากำลังอัดเริ่มลดลง



ภาพที่ 8 อิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์คงที่ 5%

4. สรุปผลการทดสอบ

การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าลอยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการผลิตก๊าซเซทิลิน อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มี



คุณสมบัติเป็นค่าสูง ปล่อยให้ผลึกน้ำที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

การผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และปล่อยให้สามารถเพิ่มคุณสมบัติการรับกำลังและสติเฟนของดินได้เป็นอย่างดีซึ่งเห็นได้จากกำลังอัดแกนเดียวสูงสุด ประมาณ 11,500 kPa ที่อัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย 100:0 และ 90:10 โดยอัตราส่วนผสมเพิ่มที่ 10% อายุบ่ม 90 วัน

การทดสอบแบบแทนที่ส่วนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเถ้าลอย ปฏิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นสามารถเห็นได้ชัดเจนเมื่ออายุบ่มมากกว่า 60 วัน โดยต้องมีปริมาณเถ้าลอยที่มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิริยาด้วย สังเกตได้จากอัตราส่วนผสมที่ปริมาณ กากแคลเซียมต่อเถ้าลอยที่ 10C:90F, 20C:80F และ 30C:70F มีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนระหว่างอายุบ่ม 60-120 วัน การทดสอบดังกล่าวนี้ยังพบว่า ค่ากำลังอัดแกนเดียวของกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าลอยไม่สามารถมีค่ามากกว่า กำลังอัดที่ส่วนผสมที่มีเพียงแต่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้ (100C:0F) แสดงว่ากำลังอัดที่ได้จากปฏิริยา Cation exchange มีอิทธิพลมากกว่าปฏิริยาปอซโซลาน ดังนั้นหากต้องการเห็นการพัฒนาปฏิริยาปอซโซลานที่ชัดเจนควรทำการทดลองแบบผสมเพิ่มเถ้าลอยเข้าไปที่อัตราส่วนต่างๆดีกว่าใช้วิธีแทนที่ในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ดังเช่นภาพที่ 8

จากภาพที่ 8 พบว่าปฏิริยาปอซโซลานนั้นอาจจะเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่อายุบ่ม 7 วัน โดยค่ากำลังอัดมากที่สุดอยู่ที่ อัตราส่วนผสม กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย C5%+F20% (1:4) แต่ทั้งนี้ควรใช้การศึกษาด้าน โครงสร้างจุลภาคเพิ่มเติมว่าเกิดปฏิริยาปอซโซลานหรือไม่เพราะเถ้าลอยมีคุณสมบัติเพิ่มการกระจายตัวให้ดีขึ้นด้วยดังนั้นกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นเพราะสาเหตุดังกล่าวนี้ก็ได้

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นปัจจัยในการพัฒนา ค่ากำลังอัดที่สำคัญอันดับแรกคือ ปฏิริยา Cation exchange ระหว่างดินเหนียวกับ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ อันดับต่อมาคือ ปฏิริยาปอซโซลานระหว่าง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย โดยทั้งสองปฏิริยาเกิดขึ้นพร้อมกัน และสามารถเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ดังนั้นอัตราส่วนที่เป็นไปได้ที่จะทำไปใช้ในงานโครงสร้างพื้นทางสามารถเลือกอัตราส่วนได้ดังนี้

กรณีผสมเพิ่ม 5% ได้แก่ 100C:0F และ 90C:10F

กรณีผสมเพิ่ม 10% ได้แก่ 50C:50F, 60C:40F, 70C:30F, 80C:20F, 90C:10F และ 100C:0F

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทสาย 5 ผลิตภัณฑ์ จำกัดที่เอื้อเฟื้อวัสดุในการทดลอง

6. บรรณานุกรม

- [1] กรมทางหลวง, 2533 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) มาตรฐานที่ ทล.-น. 204/2533
- [2] มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545 การพัฒนาการใช้ประโยชน์เถ้าลอยลิกไนต์ในไทย, หนังสือรางวัลนักเทคโนโลยีดีเด่นประจำปี พ.ศ.2545 หน้า10-16
- [3] สุธี ลิ้มปิ่นชัยพรกุล, บุญกร อมรวิทย์ และ ชีระพงษ์ วงษ์เรือง, 2537 การศึกษากำลังอัดของวัสดุประสานของกากแคลเซียมคาร์ไบด์, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [4] ชรินทร์ นมรัตน์, วันชัย สะตะ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2545 ผลกระทบของปริมาณของวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, 23-25 ตุลาคม, โรงแรมโซฟิเทลราชาออดิ, จ.ขอนแก่น, หน้า MAT-178 ถึง MAT-183
- [5] ปิติศักดิ์ กร้ามาทร, สุภิชาติ มาคัยภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เมาพิศสาร, 2539 การศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหิน, วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปีที่7ฉบับที่ 2
- [6] Fabio A. Cardoso, Heloisa C. Fernandes, Rafael G.Pileggi, Maria A. Cincotto, Vanderley M. John, Carbide lime and industrial hydrated lime characterization, Science Direct, Powder Technology 195.(2009) 143-149
- [7] ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536 คอนกรีตเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ ,บริษัท คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.
- [8] Van Impe, W.F.,1989. Soil improvement techniques and their evolution. Balkema.



วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Technical Education Journal King Mongkut's University of Technology North Bangkok

แบบตอบรับบทความเพื่อลงพิมพ์
วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2554

ที่ 7๖/2553

วันที่ ๑0 กันยายน 2553

เรื่อง การรับบทความเพื่อลงพิมพ์ในวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรียน รองศาสตราจารย์ ดร.สุชนันต์ หอพิบูลสุข

ตามที่ท่านได้จัดส่งบทความวิจัย เรื่อง "กลไกการพัฒนากำลังอึดของดินเหนียวบนดินตะกอนผสม
ภาคเค็มเขียมคาร์ไบต์และเถ้าลอย" มาเพื่อพิจารณาเพื่อลงพิมพ์ในวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้า
พระนครเหนือ นั้น ในกรณีนี้ขอเรียนให้ท่านทราบว่ากองบรรณาธิการวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ได้รับบทความของท่านเพื่อลงพิมพ์ในวารสาร ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน
2554

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และขอขอบคุณที่ท่านส่งบทความเพื่อลงพิมพ์ในวารสารวิชาการครุศาสตร์
อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือในครั้งนี้

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วิภาวิวัฒน์)

บรรณาธิการวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ประวัติผู้เขียน

นายชยกฤต เพชรช่วย เกิดเมื่อวันอาทิตย์ที่ 17 ธันวาคม 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนศรีพฤฒา จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2536 ชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนนวมินทราชินูทิศ เตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อปีการศึกษา 2538 และระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2543 และเข้าทำงานในบริษัทเอกชนด้านรับเหมาก่อสร้างอาคาร เป็นเวลา 2 ปี หลังจากนั้นเข้าทำงานในบริษัทเอกชนด้านซ่อมแซมโครงสร้างอาคาร เป็นเวลา 6 ปี และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2551 โดยขณะศึกษามีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ จำนวน 2 เรื่อง ซึ่งมีรายละเอียดปรากฏในภาคผนวก ก.