

กำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน
ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

นายวัฒนพงศ์ ภูมิโคกรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**STRENGTH OF SILTY CLAY
STABILIZED WITH CALCIUM CARBIDE RESIDUE
AND FLY ASH**

Wattanapong Poomkhokrug

**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 2012**

กำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.มงคล จิรวรรณเดช)

กรรมการ

(ศ. ดร.ฐกิจ ลิ้มปีจันทร์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วัฒนพงศ์ ภูมิโคกรักษ์ : กำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย (STRENGTH OF SILTY CLAY STABILIZED WITH CALCIUM CARBIDE RESIDUE AND FLY ASH)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข , 70 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอัตราส่วนผสมสูงสุดในการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยเพื่อการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากกระบวนการผลิตก๊าซเซซีลีนและโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าตามลำดับ ส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยสามารถใช้เป็นวัสดุประสานได้เนื่องจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีส่วนประกอบของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เป็นจำนวนมาก ในขณะที่เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน ดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถจำแนกได้ 3 โซนได้แก่ Active, Inert และ Deterioration ซึ่งในโซน Active นั้นวัสดุปอซโซลานตามธรรมชาติที่อยู่ในดินมีเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ดังนั้นการเติมเถ้าลอยในโซนนี้จึงไม่ใช่ปัจจัยสำคัญในการเพิ่มกำลัง เถ้าลอยจะช่วยเพิ่มกำลังได้ดีในโซน Inert เถ้าลอยจะช่วยปรับปรุงความแน่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่วนในโซน Deterioration ไม่แนะนำให้ใช้เถ้าลอยเนื่องจากความไม่คงตัว (Unsoundness) ที่เกิดจากการมีแคลเซียมอิสระมากเกินไปมีผลทำให้กำลังลดลง การพัฒนากำลังของดินเหนียวปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยทั้งที่สภาวะแช่น้ำและไม่แช่น้ำ มีพฤติกรรมที่คล้ายกับการปรับปรุงดินเหนียวปนดินตะกอนด้วยซีเมนต์ แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอยสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินแทนที่ซีเมนต์ได้

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

WATTANAPONG POOMKHOKRUG : STRENGTH OF SILTY CLAY

STABILIZED BY CALCIUM CARBIDE RESIDUE AND FLY ASH.

THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 70 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 .calcium carbide residue (CCR) and fly ash (FA) are both waste products from acetylene gas factories and power plants, respectively. The mixture of CCR and FA can produce a cementitious material because the CCR contains a lot of Ca(OH)_2 while the FA is a pozzolanic material. The soil stabilization by the CCR is classified into three zones: active, inert and deterioration. In active, the natural pozzolanic material in the soil is enough for the pozzolanic reaction. Hence, the input of FA in this zone insignificantly improves the strength. The strength in the inert zone can be significantly increased by adding FA. The FA improves the densification and the pozzolanic reaction. The deterioration zone is not recommended in practice even with the input of FA. The unsoundness due to free lime hinders the strength development. The rate of strength development of the CCR and FA stabilized silty clay under soaked and unsoaked conditions are the same and close to that of cement stabilized silty clay. This shows that a mixture of CCR and FA can be used for soil stabilization instead of ordinary Portland cement.

School of Civil Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

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

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำให้คำปรึกษา และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำให้คำปรึกษา และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ดันเส็ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศาสตราจารย์สุขประเสริฐ และคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและแนะนำการทำวิจัย

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับคำปรึกษาและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับเครื่องมือการทดสอบและสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการทำวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดูตลอดจนส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมาจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

วัฒนพงศ์ ภูมิโคกรักษ์

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 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงคุณภาพดิน	4
2.2 โครงสร้างของดินเหนียว	5
2.3 โครงสร้างของดินซีเมนต์	7
2.3.1 ปฏิริยาเมื่อผสมซีเมนต์กับดินและน้ำ	8
2.4 การปรับปรุงดินด้วยปูนขาว	9
2.4.1 ปฏิริยาเมื่อผสมปูนขาวกับดินและน้ำ	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	วิธีดำเนินการวิจัย	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).....	30
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

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การบดอัดดิน	31
3.5.1 การบดอัดของดินไม่ผสมสารเชื่อมประสาน	32
3.5.2 การบดอัดตัวอย่างดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์.....	32
3.5.3 การบดอัดตัวอย่างดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย.....	32
3.6 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, q_u)	33
3.6.1 นำตัวอย่างดินออกจากฟิล์มพลาสติก	33
3.6.2 นำตัวอย่างดินเข้าเครื่องทดสอบ (Unconfined Compression Testing Machine).....	33
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	35
4.1 บทนำ.....	35
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย	35
4.3 กราฟการบดอัดของดินเหนียว.....	39
4.4 ผลการศึกษาการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอน ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย	40
5 บทสรุป.....	50
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป	50
รายการอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	57
ประวัติผู้เขียน	70

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 อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง	20
2.6	เครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างดิน (Kamon, 1979).....	22
3.1	จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการบดอัดดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย	28
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวตัวอย่าง	37
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปนดินตะกอน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย	37
4.3	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินตัวอย่าง	40

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) ถ้าวาลอย (ขยาย 1,000 เท่า).....	19
2.7	อนุภาคถ้าวาลอยหยาบ (a) อายุบ่ม 28 วัน (b) อายุบ่ม 90 วัน (Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., 2005)	25
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	29
3.2	ตัวอย่างการบดอัดก่อนทำการควบคุมความชื้น	33
3.3	เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด.....	34
4.1	การกระจายขนาดของเม็ดดิน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และถ้าวาลอย.....	38
4.2	X-ray Diffraction ของ Hydrated Lime และกากแคลเซียมคาร์ไบด์.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น กับความหนาแน่นแห้ง ที่พลังงานการบดอัด 592.5 และ 2,693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	39
4.4 กราฟการบดอัดดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย	40
4.5 อิทธิพลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว	42
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังอัดแกนเดียวของดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ร้อยละ 5 กับปริมาณเถ้าลอยที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน	43
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังอัดแกนเดียวของดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ร้อยละ 10 กับปริมาณเถ้าลอยที่อายุบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน	44
4.8 Improvement zones (Horpibulsuk et al., 2012).....	45
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวของดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 20 กับ ปริมาณเถ้าลอย ที่อายุบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน	46
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณเถ้าลอย	47
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเหมาะสมกับปริมาณเถ้าลอย	48
4.12 กราฟอัตราส่วนกำลังอัดที่สภาวะแช่น้ำต่อสภาวะไม่แช่น้ำที่ปริมาณเถ้าลอยต่างๆกัน	48

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
G _s	=	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)
<i>q_u</i>	=	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

ดินเป็นวัตุธรรมชาติ 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 กิโลปาสคาล ที่อายุบ่ม 7 วัน (กรมทางหลวง, 2533) อัตราส่วนระหว่างกำลังอัดในสนามต่อกำลังอัดในห้องปฏิบัติการมีค่าประมาณเท่ากับสองเท่า (Horpibulsuk et al., 2006b) ดังนั้นกำลังอัดแกนเดียวในห้องทดลองควรมีค่ามากกว่า 3,500 กิโลปาสคาล

นอกจากปูนซีเมนต์ ปูนขาว(แคลเซียมไฮดรอกไซด์)และวัสดุปอซโซลาน(Pozzolan)สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการปรับปรุงดิน กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุที่เหลือจากการผลิตก๊าซเซทีลินที่อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จากความต้องการใช้ก๊าซเซทีลินที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละปีส่งผลให้กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากและรวดเร็ว กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีคุณสมบัติเป็นด่างสูง ทำให้เกิดปัญหาสภาพแวดล้อมในบริเวณที่ทิ้ง เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า และมีปริมาณมากถึงประมาณ 3 ล้านตัน/ปี เถ้าลอยได้รับการพิสูจน์ว่า สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานทางวิศวกรรมได้ (มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545) งานวิจัย

ในอดีต (ปิณฑานต์กร้ามาตร สุภิชาติ มาตย์ภูธร ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เกฬิศคาร, 2539; สุธี ลิมนชัยพรกุลบุษกร อมรวิทย์ และ ชีระพงษ์ วงษ์เรือง , 2537; สุภิชาติ มาตย์ภูธร, 2541) แสดงให้เห็นว่ามอร์ต้าที่ผลิตจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย มีความสามารถในการใช้รับกำลังอัดในช่วงอายุต้นที่ค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานโครงสร้าง (ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์) แต่ค่ากำลังอัดดังกล่าวสูงเพียงพอต่องานปรับปรุงคุณภาพของดิน การใช้วัสดุเหลือใช้ทั้งสองชนิดนี้มาผลิตเป็นวัสดุประสานทดแทนปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพของดินนอกจากจะช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างแล้ว ยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง โดยจะศึกษาอิทธิพลของปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย และอายุบ่มต่อกำลังอัดในสถานะแช่น้ำและไม่แช่น้ำ

1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ คือ

1.2.1 เพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย เมื่อแปรผันตัวควบคุม (ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม)

1.2.2 เพื่อหาปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์และปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมต่อการพัฒนา กำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนา กำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย โดยแปรผันตัวแปรควบคุม อันได้แก่ ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม ดินที่ใช้ในการศึกษาของงานวิจัยนี้ คือดินเหนียวแปรสภาพจากบริเวณฟาร์ม ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ระดับความลึก 2-3 เมตรจากผิวดิน ดินตัวอย่างมีค่าดัชนีพลาสติกเท่ากับร้อยละ 39.4 ค่าขีดจำกัดเหลวและค่าขีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 62 และ 22.6 จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้จาก บริษัท สาย 5 ผลิตก๊าซ จำกัด จังหวัดนครปฐม และเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในการทดสอบ ปริมาณความชื้นของดินปรับปรุงเท่ากับปริมาณความชื้นเหมาะสม ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่าเท่ากับร้อยละ 5, 10 และ 20 ปริมาณเถ้าลอยแปรผัน

ตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 25 และอายุบ่มทดสอบเท่ากับ 7, 28, 60 และ 90 วัน เมื่อได้อายุบ่มที่กำหนด ตัวอย่างจะนำมาทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ภายใต้สภาวะแห้งและเปียกน้ำ

การศึกษานี้แบ่งได้ 5 ส่วน ดังนี้

1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง กากเคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย

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

1.3.3 ศึกษากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์ที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม

1.3.4 ศึกษากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำโดยการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ทำตามมาตรฐาน ASTM D 2166

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

14.1 ได้ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่อการพัฒนากำลังอัดแกนเดียว

14.2 ได้ทราบถึงปริมาณกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยที่เหมาะสม สำหรับการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของการปรับปรุงคุณภาพดิน

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

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

Hogentogler (1938) ได้กล่าวว่าการปรับปรุงคุณภาพของดินเป็นกระบวนการที่ทำให้ดินตามธรรมชาติมีความทนทานต่อการสึกหรอ และการรับน้ำหนักดีขึ้น วิธีการที่ใช้อาจจะเป็นการบดอัดให้แน่น 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) ในประเทศสวีเดนเทคนิคนี้ได้เข้ามาในประเทศไทยในปี ค.ศ. 1970

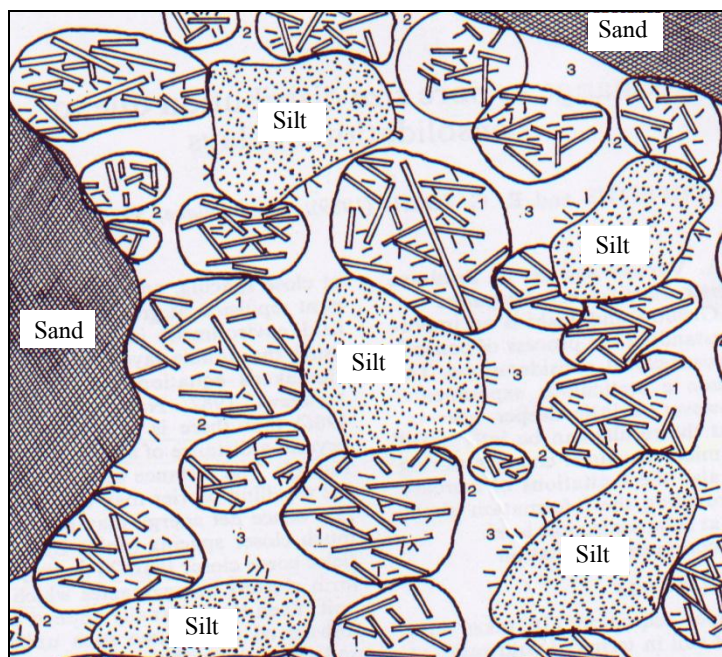
(Okumura, T., and Terashi, M., 1975; Terashi, M., Tanaka, H., and Okumura, T., 1997; Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y., and Honjo, Y., 1981; Suzuki, 1982) DJM Research Group (1984); Chida (1982); Miura (1986) ได้รายงานความสำเร็จของการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานวิศวกรรม ในปี ค.ศ. 1980 และ 1982 หลังจากการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ไม่นานนัก นักวิจัยและวิศวกรหลายท่านได้สร้างทฤษฎีวิธีการวิเคราะห์ และวิธีการออกแบบ

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีปริมาณมากขึ้น ค.ศ. 1930-1939 สหรัฐอเมริกาได้เริ่มศึกษาการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต โดยในปี ค.ศ. 1937 Davis และคณะจากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต ในปี ค.ศ. 1948 ได้มีการใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างเขื่อน Hungry Horse ต่อมาในปี ค.ศ. 1970-1979 ได้เกิดวิกฤติการณ์น้ำมัน ในปี ค.ศ. 1970-1979 ได้มีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงทำให้มีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น และได้มีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวาง เพื่อทำความเข้าใจปฏิกิริยาเคมีของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้น ในปัจจุบันมีการนำเถ้าลอยมาใช้กับงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย เพื่อเป็นการลดต้นทุนของคอนกรีตและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเถ้าลอยทิ้ง นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาการนำเถ้าลอยลิคนัตจากอำเภอแม่เมาะมาผสมในดินสำหรับงานถนน เช่น อนิรุทธ ธิงไชย และ สุเทพ นิ่มนวล(2530); สมชัย กกก้าแหง (2535); Rhee and Yong-Heun (1982) นักวิจัยเหล่านี้พบว่ากำลังอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น (ในช่วง 0-15%) ตามระยะเวลาการบ่ม และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าขีดจำกัดเหลว พิกัดพลาสติก และดัชนีสภาพพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย

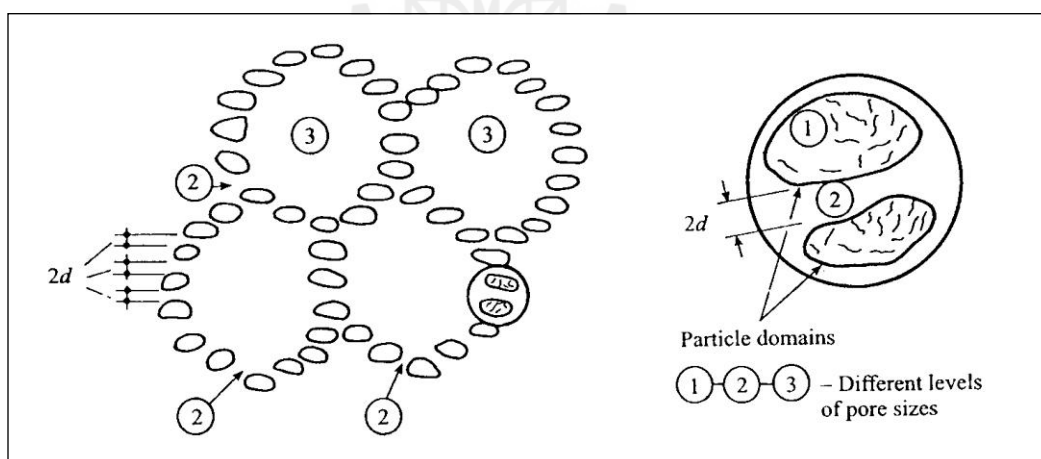
2.2 โครงสร้างของดินเหนียว

Nagaraj, T.S., Vatasala, A., and Srinivasa Murthy, B.R. (1990) สรุปผลการทดลองของ Griffith and Joshi (1989) และแสดงแบบจำลองโครงสร้างของเม็ดดินละเอียดโดยอาศัยทฤษฎีกลุ่มก้อนดิน (Cluster theory) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 ซึ่งขนาดของช่องว่างมีด้วยกัน 3 ระดับ คือ

- 1) ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเหนียวในก้อนดิน (Cluster) มีขนาดน้อยกว่า 0.01 ไมครอน
- 2) ช่องว่างระหว่างก้อนดินสองก้อน มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.03 ไมครอน
- 3) ช่องว่างขนาดใหญ่ภายในกลุ่มของก้อนดิน มีขนาดใหญ่มากกว่า 0.03 ไมครอน

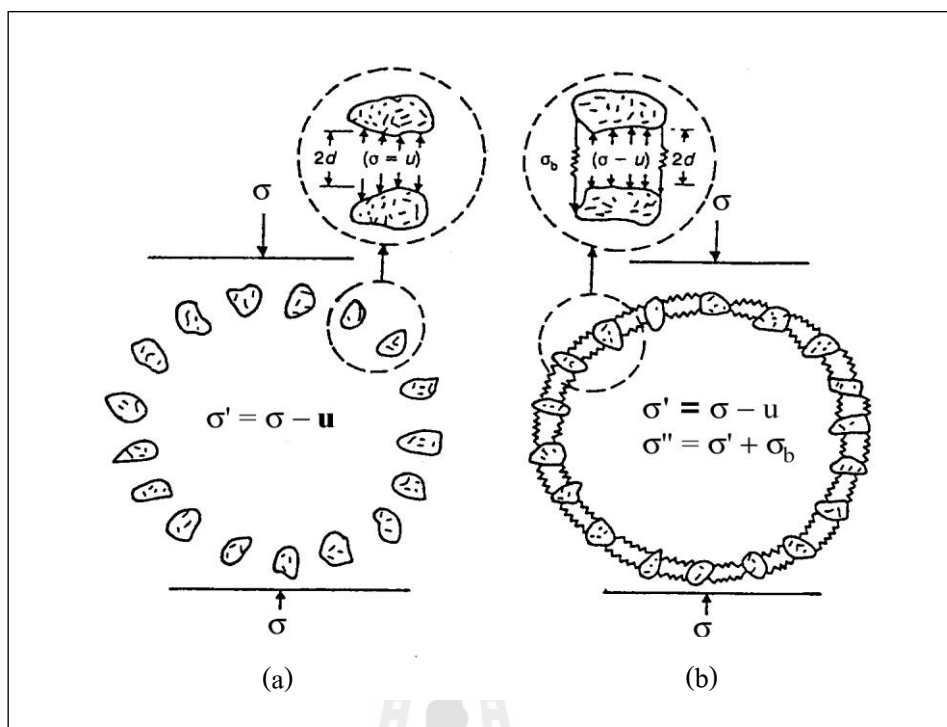


รูปที่ 2.1 การกระจายของช่องว่างในเม็ดดิน (Nagaraj et al., 1990)



รูปที่ 2.2 การจัดเรียงตัวของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj et al. 1990)

Nagaraj et al. (1990); Horpibulsuk S., Bergado, D.T., and Lorenzo, G.A. (2003) ได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ แสดงดังรูปที่ 2.3 รูปที่ 2.3(a) เป็นโครงสร้างของดินที่ปราศจากพันธะเชื่อมประสาน (Cementation) เมื่อผสมซีเมนต์กับดินพันธะเชื่อมประสานจะเชื่อมแฟบริกเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.3(b)

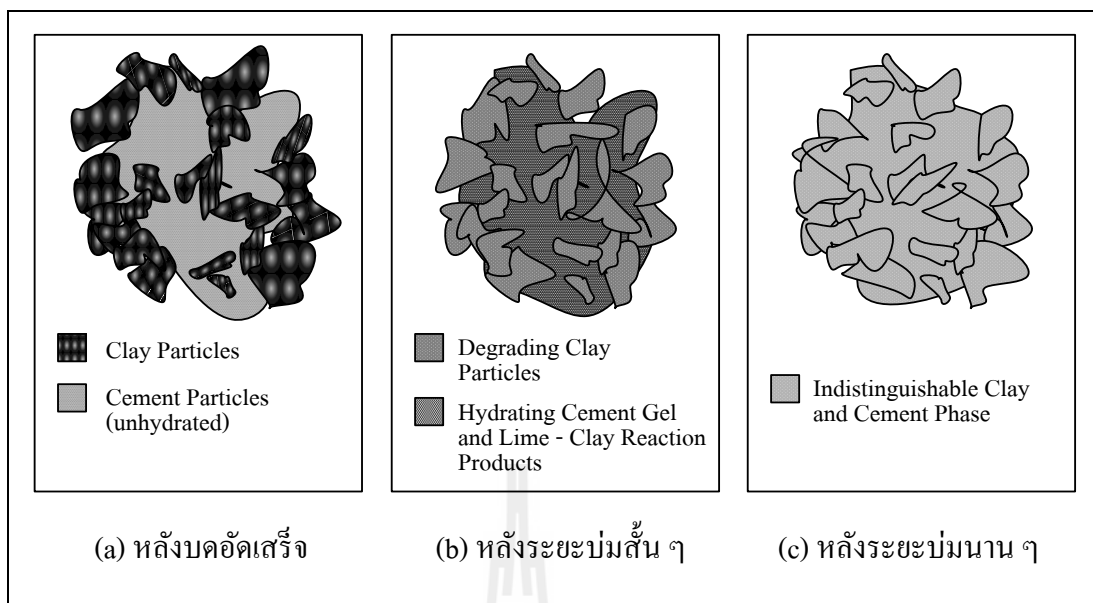


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของดินเหนียว (a) ดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj et al. 1990)

(b) ดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน (Horpibulsuk et al., 2003)

2.3 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell and Jack (1966) ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของดินซีเมนต์โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบในโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เมื่อถูกบดอัด อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.4(a) ในช่วงอายุบ่มอันสั้นอนุภาคของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันกับน้ำ เป็นผลให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อยปูนขาวออกมา ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่ในดินและเกิดการแยกตัว หลังจากนั้นซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.4(b) สำหรับช่วงอายุบ่มยาวนานปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันจะเกิดอย่างสมบูรณ์ ทำให้ซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วทั้งก้อนของดินซีเมนต์ เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.4(c)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell and Jack, 1966)

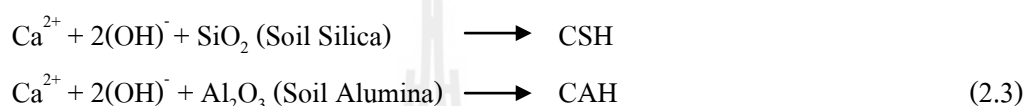
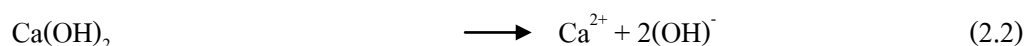
2.3.1 ปฏิริยาเมื่อผสมซีเมนต์กับดินและน้ำ

เมื่อซีเมนต์ผสมกับดินและน้ำจะเกิดปฏิริยาเคมีทำให้ดินมีกำลังเพิ่มขึ้น ซึ่งได้มีการศึกษาและบันทึกไว้โดยนักวิจัยหลายท่าน

Davidson (1961) ได้กล่าวไว้ว่า ปฏิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมซีเมนต์กับดินเหนียวขึ้นจะทำให้ความเป็นพลาสติกของดินลดลง ซึ่งเกิดจากการแยกตัวของ อีออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) ในระหว่างเกิดปฏิริยาไฮเดรชัน ทำให้เม็ดดินยึดเกาะกันเป็นก้อน เนื่องจากแรงยึดเกาะทางเคมีที่มีอยู่ในดิน หรือการยึดเกาะกันระหว่างผิวของอนุภาคซีเมนต์ที่อยู่ใกล้กัน

Lambe, T.W., Mitchaels, A.S., and Moh, Z.C. (1959) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ และอธิบายไว้ว่า ซีเมนต์เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากผลึกของ Tricalcium Silicate, Dicalcium Silicate, Tricalcium Aluminate และ Tetracalcium Aluminate Ferrite เมื่อซีเมนต์ผสมเข้ากับดินและน้ำจะเกิดปฏิริยาไฮเดรชัน ในระหว่างการเกิดปฏิริยา จะได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Hydrated Lime หรือ Calcium Hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แยกตัวออกมา CSH และ CAH มีคุณสมบัติเชื่อมประสานที่ได้จากปฏิริยาหลักของซีเมนต์ นอกจากนี้ Hydrated Lime ที่ได้จะแตกตัวเป็นอีออนของแคลเซียมเข้าไปทำปฏิริยากับ Silica และ Alumina ในแร่ดินเหนียว เกิดสารประกอบ CSH และ CAH ขึ้นมาอีก ปฏิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์และน้ำในมวลดิน จะทำให้ค่า pH ในดินเพิ่มขึ้น ซึ่งเชื่อว่าการเพิ่มขึ้นของ pH เนื่องจากการแตกตัวของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ Hydrated Lime ทำให้ซิลิกาและอลูมินา

ซึ่งเป็นแร่ประกอบในดินเหนียวเกิดการแตกตัวเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของแคลเซียม เกิดวัสดุเชื่อมประสานขึ้นอีก ปฏิกิริยานี้จะต้องใช้เวลานานกว่าจะสมบูรณ์ สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์จะเป็นไปดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)



2.4 การปรับปรุงดินด้วยปูนขาว

สารประกอบปูนขาวมีหลายประเภทดังต่อไปนี้

ประเภทออกไซด์ ได้แก่ CaO และ MgO โดยทั่วไปเรียกว่า Burn Lime หรือ Quick Lime สารประกอบพวกนี้มีปฏิกิริยาไว กัดมือเมื่อชื้น เตรียมได้จากการนำหินปูนและเปลือกหอยมาเผา

ประเภทไฮดรอกไซด์ ได้แก่ Ca(OH)_2 และ Mg(OH)_2 โดยทั่วไปเรียกว่า ปูนขาว หรือ Slaked Lime เตรียมได้โดยการนำหินปูนมาเผาให้เป็นออกไซด์ หรือ Burn Lime เสียก่อน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นก้อนแข็งอยู่ เมื่อเย็นแล้วจึงนำมาพรมน้ำให้ชุ่มออกไซด์ก็จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้ CaO ซึ่งเดิมเป็นก้อนนั้นยุ่ยแตกออกกลายเป็นผงโดยไม่ต้องมีการบดแต่อย่างใด

ประเภทคาร์บอเนต ได้แก่ หินปูน (CaCO_3) และหินโดโลไมต์ [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] ได้มาจากภูเขาหินปูนซึ่งมีอยู่ทั่วไปในประเทศไทย โดยการสกัดแล้วบด เนื่องจากปูนขาวมีหลายชนิดจึงมีการกำหนดมาตรฐานความบริสุทธิ์โดยใช้หินปูนที่บริสุทธิ์เป็นเกณฑ์แสดงในตารางที่ 2.1 โดยกำหนดให้ หินปูน (CaCO_3) เป็นค่ากลางมีความบริสุทธิ์ที่ ร้อยละ 100

ตารางที่ 2.1 Neutralizing value ของปูนบางชนิดเมื่อคิดจากสารประกอบที่บริสุทธิ์

ปูน	Neutralizing value (%)
CaO	179
Ca (OH) ₂	136
CaMg (CO ₃) ₂	109
CaCO ₃	100
CaSiO ₃	68

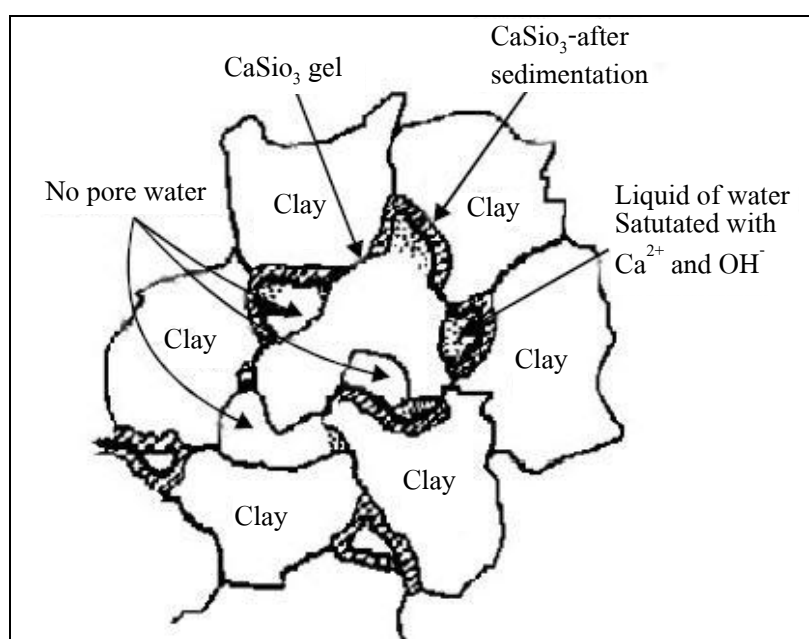
ปูนขาวถูกใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินตั้งแต่สมัยโรมัน (มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545) กรณีในดินเหนียวปริมาณที่ให้อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 5 ถึง 10 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมปูนขาวเข้ากับดิน คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) การแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (Cation Exchange) ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic) และปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน (Carbonation)

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดขึ้นในกรณีใช้ ปูนสุก (Quick Lime) ปูนสุกจะทำปฏิกิริยากับน้ำในดิน ซึ่งปฏิกิริยาจะทำให้ปริมาณน้ำในดินลดลง เกิดการบวมตัวของปูนขาว และเกิดความร้อนขึ้นตามสมการ 2.4



ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน คือ ขบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่ผิวของดินเหนียว เกิดขึ้นเฉพาะในดินเหนียวเท่านั้น เนื่องจากอนุภาคของดินเหนียวเป็นประจุลบ เมื่ออยู่ตามธรรมชาติจะดึงดูดไอออนบวกไว้เป็นจำนวนและสัดส่วนเท่ากับประจุลบที่มีอยู่ ไอออนบวกที่ถูกดึงดูดที่ผิวของดินเหนียว สามารถที่จะถูกไล่ออกโดยไอออนบวกอื่นได้ง่าย ดังนั้นเมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในดินเหนียว แคลเซียม (Ca^{++}) จากปูนขาวจะเข้าไปไล่ที่ไอออนบวกที่ผิวของดินออกมาทำปฏิกิริยาและเกิดสารประกอบใหม่ขึ้นจนอยู่ในสภาวะสมดุลของไอออนบวก และไอออนลบ ผลของปฏิกิริยาการเปลี่ยนสลับ Cation นี้ส่งผลให้โครงสร้างการเชื่อมต่อของแร่ธาตุในดินเหนียวมีประจุลบที่เหลือตกค้างน้อยลงและ Zeta Potential ลดลง (สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน, 2535) ดินเหนียวจะยึดเกาะกันน้อยลง (Aggregate and Flocculate) และค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity) มีค่าลดลงทำให้ง่ายต่อการบดอัด ดังนั้นกำลังอัดและความต้านทานการเสีรูปของดินเหนียวจึงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.5

ปฏิกิริยาปอซโซลาน เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวเมื่อผสมกับน้ำจะเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของน้ำในโพรงสูงขึ้น ความเป็นด่างที่สูงขึ้นจะละลาย ซิลิกาและอลูมินาในดิน ซิลิกาและอลูมินาที่หลอมละลายจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอิสระที่เกิดจากการสลายตัวของปูนขาวรวมตัวเกิดสารประกอบใหม่ CSH และ CAH มีสภาพเป็นเจลมีคุณสมบัติด้านการยึดเกาะที่ดีเหมือนที่เกิดในปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินซีเมนต์



รูปที่ 2.5 Principle of soil stability with lime (Van Impe, 1989)

ปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน เป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวที่หลอมกับ CO_2 ในอากาศในช่องว่างของเม็ดดินเกิดเป็น CaCO_3 (Calcium Carbonate) ซึ่งช่วยการยึดเกาะแต่ไม่แข็งแรงนัก (Van Impe, 1989)

2.4.1 ปฏิกิริยาเมื่อผสมปูนขาวกับดินและน้ำ

เมื่อปูนขาวผสมกับดินและน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้ดินมีกำลังเพิ่มขึ้น ซึ่งได้มีการศึกษา และบันทึกไว้โดยนักวิจัยหลายท่าน

Bell and Coulthard (1990) ศึกษาการปรับปรุงดินเหนียวด้วยปูนขาวพบว่าแร่ธาตุทุกชนิดในดินเหนียวทำปฏิกิริยากับปูนขาว ปฏิกิริยา Cation Exchange ไม่ค่อยมีผลกับดินเหนียวประเภท Kaolinite แต่จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกับดินเหนียวประเภท Montmorillonite หรือดินเหนียวบวมตัวทำให้ค่าดัชนีสภาพพลาสติกลดลงอย่างรวดเร็ว

Hilt and Davidson (1960) กล่าวว่า เมื่อปูนขาวถูกผสมเข้ากับดินเหนียว ปฏิกิริยาแรกที่เกิดขึ้นคือ อีออนทั้งหลายของปูนขาวจะถูกดูดซับโดยแร่ธาตุในดิน และจะไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจนกว่าปฏิกิริยาการดูดซับจะสมดุล กระบวนการนี้เรียกว่า Lime Fixation จุดที่การผสมปูนขาวเข้ากับดินเหนียวแล้วค่าพิกัดพลาสติกไม่เปลี่ยนแปลงจะเรียกว่า Lime Fixation Point

Diamond and Kinter (1966) พบว่าปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกจะเกิดที่ขอบของอนุภาคดินเหนียว ปูนขาวทำให้สภาพความเป็นด่างโดยรอบของอนุภาคดินเหนียวสูงขึ้น และทำให้ละลายซิลิกาและอลูมินาภายในดินเหนียว และเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งจะทำให้เกิดเกิดพันธะเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคดินรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน และพัฒนาการรับกำลังของดิน ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม และจะเกิดได้ดีเมื่อค่า pH ของเหลวในโพรงดินเหนียวมีค่าประมาณ 12.4 ที่สภาวะความเป็นด่างสูงนี้จะทำให้เกิดการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกต (CH) แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรอกไซด์ (C_4AH_{13} และ C_3AH_6) และแคลเซียมซิลิเกตอลูมิเนตไฮดรอกไซด์ (C_2ASH_8)

Ingles (1987) พบว่ากำลังที่ถูกพัฒนาขึ้นเป็นอิทธิพลมาจากปริมาณเจลของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ และปริมาณปูนขาวที่ถูกใช้ไป ปริมาณปูนขาวที่ผสมจะสัมพันธ์กับแร่ธาตุในดินเหนียว กำหนดให้ผสมปูนขาวร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สำหรับร้อยละ 10 ของดินเหนียวในดิน ในธรรมชาติ ปริมาณดินเหนียวในดินโดยทั่วไปมีไม่เกินร้อยละ 80 ดังนั้นจึงไม่ควรผสมปูนขาวเกินร้อยละ 8

ระยะเวลาการบ่มที่นาน และอุณหภูมิที่สูงจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยก็สามารถพัฒนากำลังได้อย่างเห็นได้ชัดในทางตรงกันข้ามหากอุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาปอซโซลานอาจเกิดได้น้อยมาก

Berger (2005) ได้สรุปการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างดินกับปูนขาวแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งได้แสดงขั้นตอน ผลของปฏิกิริยา และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละช่วง

ตารางที่ 2.2 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการปรับปรุงดินด้วยปูนขาว (Berger, 2005)

The Chemical Stages of Lime Stabilization of Soils				
#	Process	Reaction	Effects	Speed
1	Hydration of quicklime (calcium oxide) to calcium hydroxide.	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$	Consumes water & releases heat. Drying action for muddy soils. Required to put lime in a form that reacts with pozzolans.	Fairly fast Sec-Min
2	Saturation of the waters with calcium hydroxide.	$\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Ca}^{+2}\text{aq} + \text{OH}^{-1}\text{aq}$	pH increases. Calcium ion becomes mobile.	Fast Seconds
3	Saturation of ion exchange sites on clay particles with calcium ions. Increase concentration of ions both in pore water and double water layer.	$\text{Ca}^{+2}\text{aq} + \text{Na-clay} \leftrightarrow \text{Na}^{+1}\text{aq} + \text{Ca-clay}$	1) Ca^{+2} occupies cation sites. 2) The ionic double layer thickness decreases. 3) Water bound to clays released from double layers. 4) Clays coagulate and flocculate. 5) The physical properties of clay minerals change.	Fast Seconds in aqueous and minutes in soil environment
4	Alkaline attack on silicate minerals.	$\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{OH}^{-1}\text{aq} \leftrightarrow \text{H}_3\text{SiO}_4^{-1}\text{aq}$	Strong function of pH. $\text{pH} \geq 10.5$	Moderate Min-Hrs
5	Alkaline attack on aluminous minerals form aluminate ion.	$\text{Al}^{+3}\text{-mineral} + 4\text{OH}^{-1}\text{aq} \leftrightarrow \text{Al}(\text{OH})_4^{-1}\text{aq}$	Strong function of pH. $\text{pH} \geq 10.5$	Moderate Min-Hrs
6	Polymerization of silica-complexes, for example:	$\text{Si}_3\text{O}_5(\text{OH})_5^{-3}, \text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_6^{-2}, \text{etc.}$	Preparation for colloid and gel formation preparatory to new mineral precipitation.	Moderate Min-Hrs
7	Formation of hy-drous calcium alu-mino-silicate col-loids & gel as pH stabilizes or drops due to hydroxyl consumption, e.g.:	$\text{H}_3\text{SiO}_4^{-1}\text{aq} + \text{Al}(\text{OH})_4^{-1}\text{aq} \leftrightarrow \text{AlSiO}_2(\text{OH})_5^{-2} + \text{H}_2\text{O}$ $x \text{Ca}^{+2}\text{aq} + \text{AlSiO}_2(\text{OH})_5^{-2} \leftrightarrow (\text{Ca}_x\text{AlSiO}_2(\text{OH})_5)^{-2+2x}$	Presumably pore filling CAH-CSH- like materials. Some strength development	Moderate Hrs-Days
8	Formation of hydrous calcium-aluminosilicate minerals, e.g.:	Chabazite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; Tobermorite, $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$	Strength development requires considerable silica, therefore needs maintenance of high pH.	Slow Days-Weeks- Mos-Yrs

2.5 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้มาจากระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมการเชื่อม กระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน จะนำแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) มาทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็นก๊าซอะเซทิลีน และส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาคือกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยอยู่ในรูปของเหลวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยมากและเป็นปัญหาทางสภาพแวดล้อมเพราะมีความเป็นด่างสูง ปริมาณก๊าซอะเซทิลีนที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของแคลเซียมคาร์ไบด์ สิ่งที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้คือกากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณการผลิตก๊าซอะเซทิลีนและสะสมเพิ่มขึ้นทุกปี

การเตรียมก๊าซอะเซทิลีนทำได้โดย นำหินปูน (CaCO_3) เข้าเตาหลอมซึ่งผลที่ได้คือ Limes (CaO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Payne, 1989)



หลังจากนั้น Limes (CaO) จะทำปฏิกิริยากับถ่านหินในขณะที่อยู่ในเตาหลอม แล้วให้แคลเซียมคาร์ไบด์ออกมาดังสมการที่ 2.6



จากนั้นให้แคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) ทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งจะให้ก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 2.7



2.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์จะอยู่ในรูปของเหลวเนื่องจากผสมกับน้ำ มีลักษณะเหนียว ลื่น มีสีเทาอมขาวขุ่น ภายหลังจากได้ก๊าซอะเซทิลีนแล้ว กากเหล่านี้อาจจะปล่อยลงสู่บ่อพัก เพื่อตกตะกอนและแห้งเองตามธรรมชาติ เมื่อนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปตากแดดจนแห้งแล้วบดจนละเอียด พบว่ารูปร่างของอนุภาคเป็นเหลี่ยมคล้ายปูนซีเมนต์ มีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.3 (ปิติกานต์ กร้ามาตร, สุภิชาติ มาตย์ภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เกฬพิสตาร, 2539)

2.5.2 คุณสมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

จากการศึกษาของปีติสานต์และคณะ (2539) พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 62.09 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ที่มีอยู่ร้อยละ 63.94 มีค่า LOI ที่สูงมากประมาณร้อยละ 32 ค่าซิลิกอนไดออกไซด์ ร้อยละ 2.32 อลูมิเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1.57 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของธาตุอื่นอย่างละเล็กน้อย ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ สุภิชาติ มาตย์ภูธร (2541) กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความเป็นด่างสูงคือมีค่า pH ประมาณ 12 เนื่องจากปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณที่สะสมเพิ่มขึ้นทุกวัน ตามปริมาณการผลิตก๊าซอะเซทิลีนแต่พื้นที่ที่มีจำกัด ดังนั้นการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นที่จะนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ประโยชน์ เพราะว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุประสาน

2.6 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหิน หรือเถ้าลอย (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานหรือโรงไฟฟ้าถ่านหิน มีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) สังกะหรณ์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและอลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร Ca(OH)_2 และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน

มีหน่วยงานวิจัยหลายหน่วยงานได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิงถึงของเถ้าลอยจะมี 2 แห่งด้วยกันคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอย แต่จากการศึกษาของ สมชัย กกก้าแหง (2540) พบว่าคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยลิคนันต์แม่เกาะเป็นได้ทั้ง Class F และ Class C ดังนั้นการจำแนกประเภทของเถ้าลอยโดยอาศัยหลักเกณฑ์ดังกล่าวอาจเกิดข้อโต้แย้งได้ คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงริเริ่มที่จะดำเนินการร่างมาตรฐานเพื่อใช้กับเถ้าลอยและการออกแบบคอนกรีตสำหรับประเทศไทยขึ้น

2.6.1 คุณสมบัติพื้นฐานและทางเคมีของเถ้าลอย

1) ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

American Society for Testing and Material (1995) การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กำหนดไม่เกิน 5 เพราะซัลเฟอร์ มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด ระยะเวลาที่ก่อตัวได้ และยังมีผลเสียต่อกอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต (Sulfate Attack)

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

Chemical Composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ Fe_2O_3) (min%)	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) (max%)	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น (max%)	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) (max%)	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) (max%)	1.5	1.5

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับ เถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, (LOI)) ไว้ไม่เกิน

ร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มาก การควบคุมในด้าน Air Entrainment ของคอนกรีตสดจะทำให้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่ม ในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้ว เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 มาก ปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O Equivalent) มากที่สุดไม่เกิน ร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-Aggregate ขึ้นได้ ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์ มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

2) ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย (Mineralogical Composition)

เมื่ออ่านหินถูกเผา และมีการเย็นตัวของเถ้าลอย การเผาจะทำให้องค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอยด้านการเกิดผลึก (Crystalline) แตกต่างกันไป สำหรับเถ้าลอยลิคนั้นจะมีความเป็น Noncrystalline (Glass) มากกว่าร้อยละ 90% อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ก็ยังคงมีองค์ประกอบของ Crystalline จำพวก Quartz Anhydrite Calcite Hematite Mullite ซึ่งเนื่องต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction จะพบว่าเถ้าลอยจากถ่านลิคนั้นจะมีองค์ประกอบของ Crystalline น้อยกว่าเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัสและแอนทราไซต์ (สมชัย กกกำแหง, 2540)

3) ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) จะได้สารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หลังจากนั้นสารปอซโซลานในเถ้าลอยได้แก่ซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ได้สารใดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ในงานที่เป็นคอนกรีตหลาเมื่อใส่เถ้าลอยลงไปปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ก็จะทำให้คอนกรีตสามารถระบายความร้อนได้ทัน

2.6.2 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย

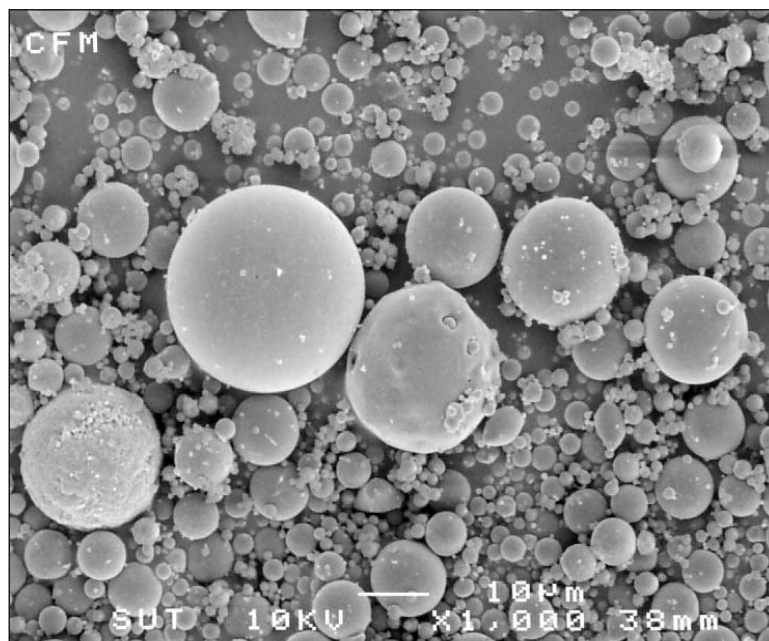
คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของเถ้าลอย สามารถเห็นได้จากพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม แต่คุณสมบัติของเถ้าลอยอาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ เช่นมีการเผาน้ำมันเตาร่วมกับการเผาน้ำมัน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และลดการกัดกร่อน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งาน อาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C-618 ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618

ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
ความละเอียด : ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก (Max%)	34	34
หาคัดนี้กำลัง : โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์		
- 7 วัน (Min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม)	75	75
- 28 วัน (Min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม)	75	75
ความต้องการน้ำ (Max% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม)	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธี Autoclave (Max%)	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement)		
- ความหนาแน่น (Max จากค่าเฉลี่ย%)	5	5
- ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (Max จากค่าเฉลี่ย%)	5	5
Multiple Factor (ผลคูณระหว่าง % LOI กับ % ของปริมาณความชื้นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325)	255	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ต้าที่ 28 วัน (Max% ที่แตกต่างจากตัวควบคุม)	0.03	0.03

1) รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม เมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม ดังรูปที่ 2.6 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเทซึ่งคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้



รูปที่ 2.6 Scanning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอย (ขยาย 1,000 เท่า)

2) ความละเอียด (Fineness)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา Pozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ล้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 mm.) โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieving) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (Blaine Specific Surface-Area Technique) ตามมาตรฐาน ASTM C-204 หรือวิธี Particle Size-Analysis หรือวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม การทดสอบเทอร์บิดิเมตร (Turbidimeter Test) ตาม ASTM C-115 และการใช้ไฮโดรมิเตอร์ โดยการทดสอบทั้งสี่วิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่แตกต่างกันได้มาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทดสอบ โดยผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความพรุนของเถ้าลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมาก แต่จากการทดสอบเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมะ จังหวัดลำปาง การบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าว ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

Sample Type	Specific Gravity	Retained on Sieve 325 (%)	Air Permeability (cm ² /g)	Mean Particle Size (mm)
ซีเมนต์	3.14	4.7	3120	13.0
เถ้าลอย	2.02	37.4	2370	28.5

จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์

3) การหาดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ต้ามาตรฐานที่ไม่ผสมปอซโซลาน โดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้ามาตรฐาน ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

2.7 การใช้เถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานในคอนกรีต

สุทธิ ลิมนชัยพรกุล บุญกร อมรวิทย์ และ ชีระพงษ์ วงษ์เรือง (2537) ศึกษากำลังอัดของวัสดุประสานของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่คัดขนาด โดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) แล้วผสมกันหล่อเป็นมอร์ต้าขนาด 2×2×2 นิ้ว และใช้ส่วนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 30:70 50:50 และ 70:30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วน 30:70 จะให้กำลังอัดที่มากกว่าอัตราส่วนอื่น แต่กำลังอัดในช่วงอายุต้น ๆ จะมีค่อนข้างต่ำและจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น ที่อายุ 120 วัน จะมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 195 กก./ซม² หรือประมาณร้อยละ 43.6 ของกำลังอัดมอร์ต้ามาตรฐาน ซึ่งค่ากำลังอัดที่ได้ยังไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป เนื่องจากอายุช่วงต้น ๆ มีกำลังอัดต่ำมาก

ชรินทร์ นมรัญ (2539) ศึกษาส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์เผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กับเถ้าถ่านหินเพื่อใช้เป็นวัสดุประสาน ผลทดสอบพบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของเพสต์จะน้อยลงเมื่ออุณหภูมิการเผากากแคลเซียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น และมอร์ต้าที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ผสมกับเถ้าถ่านหิน มีค่ากำลังดีที่สุดคือ 206 กก./ซม² หรือประมาณร้อยละ 60 ของกำลังอัดของมอร์ต้ามาตรฐานที่อายุ 60 วัน ซึ่งจากผลดังกล่าว หากใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหินจะต้องเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส

ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตทั่วไปเพราะจะต้องใช้พลังงานสูงในการเผา และมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก และงานวิทยานิพนธ์ของ กฤษ พรหมประเทศ (2541); กิจจา เจริญพัทธ์ (2541); สวัสดิ์นา อินพรอุดม (2541) ศึกษาบล็อกคอนกรีตที่ทำจากส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน จากผลการทำสอบพบว่า บล็อกคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินต่อทรายต่อหินเกร็ดเท่ากับ 0.6:1.4:2.3 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 ให้ค่ากำลังอัดสูงเท่ากับ 27.2 กก./ซม² หรือประมาณร้อยละ 8 ของกำลังอัดของบล็อกคอนกรีตมาตรฐานที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวที่อายุ 60 วัน ซึ่งค่ากำลังอัดบล็อกคอนกรีตที่ใช้วัสดุทั้งสองเป็นวัสดุประสานมีค่าต่ำ และการพัฒนากำลังช้ามากไม่เหมาะ จะใช้ในงานทำบล็อกคอนกรีต

ปิตินันต์ กร้ามาตร สุภิชาติ มาตย์ภูธร ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เสงพิสดาร (2539) ศึกษา กำลังอัดมอร์ต้าที่ได้จากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมกับเถ้าถ่านหิน โดยการหล่อมอร์ต้าขนาด 2×2×2 นิ้ว และหาระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมเปรียบเทียบกับมอร์ต้ามาตรฐานและซีเมนต์เพสต์ ผลการวิจัยพบว่า มอร์ต้าที่ใช้ส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อ เถ้าถ่านหินเท่ากับ 30:70 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์มีกำลังอัดดีที่สุดเท่ากับ 209 กก./ซม² หรือประมาณร้อยละ 37 ของกำลังอัดมอร์ต้ามาตรฐานที่อายุ 90 วัน ส่วนที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัดที่ค่อนข้างต่ำและมีช่วงระยะเวลาการก่อตัวค่อนข้างนานเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ ซึ่งจากค่ากำลังอัดที่ 90 วัน สามารถนำมาใช้ในงาน โครงสร้างหลักได้หากพัฒนากำลังอัดให้อายุในช่วงต้นๆ มีกำลังขึ้นก็จะสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตทั่วไปได้

2.8 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างดิน แสดงในตารางที่ 2.8 เสนอโดย Kamon (1979) ซึ่งใช้ทำการศึกษาด้านรูปร่างของอนุภาคดิน การจัดเรียงของโครงสร้าง และขนาดของโพรงช่องว่าง โดยมีหลักการและข้อจำกัด ในการศึกษาที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.6 เครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างดิน (Kamon, 1979)

	Electro microscope		X-ray diffraction	Polarization microscope	Porosimeter	อื่นๆ
	Scanning type	Transmission type				
หลักการ	จากการสังเกตโดยใช้ Electronic line		ใช้การหักเหของรังสี X-ray	ใช้การสั่นเนื่องจาก การแผ่รังสี	ใช้การแทนที่ของปรอท	คลื่นเสียง การนำไฟฟ้า การนำความร้อน คุณสมบัติของแม่เหล็ก
พิจารณา รูปร่างของอนุภาคดิน	สามารถทำได้	ขนาดอนุภาค เล็กกว่า 5 ไมครอน	ไม่สามารถทำได้	พิจารณาขนาด ตะกอนของ อนุภาคเบื้องต้น	ไม่สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้
การสังเกต อนุภาคดิน	สามารถทำได้	ขนาดอนุภาค เล็กกว่า 5 ไมครอน	ไม่สามารถทำได้	พิจารณาขนาด ตะกอนของ อนุภาคเบื้องต้น	ไม่สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้
พิจารณาการ จัดเรียงของ โครงสร้าง ดิน	สามารถทำได้	สามารถทำได้	สามารถทำได้	สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้	สามารถทำได้
พิจารณา โพรงช่องว่าง	โพรงภายใน และภายนอก อนุภาคดิน	โพรงภายใน และภายนอก อนุภาคดิน	ไม่สามารถทำได้	โพรงภายนอก อนุภาคดิน	พิจารณาการ กระจายตัว ของขนาด โพรง	สามารถ ทำได้บางส่วน

2.8.1 การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เกิดจากการคิดค้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยการประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอนที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำแสงอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นก็จะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับต่อไป ผลที่ได้คือ ภาพของวัตถุหรือตัวอย่างมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า ถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า (กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาสามารถทำกำลังขยายได้เต็มที่ไม่เกิน 3,000 เท่า) และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร (Nanometer) ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงส่องสว่างธรรมดามีกำลังแยกแยะใช้ดูวัตถุเล็กสุดเพียง 0.2 ไมครอน เท่านั้น ในกรณีที่เป็นกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนที่มีอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุประกอบอยู่ด้วยเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนวิเคราะห์ (Analytical Electron Microscope) โดยในการวิเคราะห์ธาตุจะเป็นการวิเคราะห์เฉพาะจุด (Spot Analysis) หรือพื้นที่เล็ก ๆ ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นหัววัด เรียกว่า อิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส (Electron Probe Microanalysis; EPMA) โดยใช้ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยการวัดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray) ซึ่งมีทั้งแบบ Wavelength Dispersive X-ray Spectrophotometry (WDS) และแบบ Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry (EDS) ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Detector, SE) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron Detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้น ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้จะสามารถประกอบอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ได้ทั้งแบบ EDS และ WDS เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยหลักการแยกรังสีตามลำดับพลังงาน

2.8.2 การวิเคราะห์ Thermal Gravimetry Analysis (TGA)

เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และ วิศวะ จักรไพศาล (2542) ได้นำเสนอหลักการหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ โดยใช้วิธี Thermal Gravimetry Analysis พิจารณาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาในอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปที่อุณหภูมิระหว่าง 100-400 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ซึ่งประกอบด้วย ให้น้ำ น้ำในช่องว่าง น้ำดูดซึม และน้ำระหว่างชั้น จะระเหยออกไป แต่เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น สารประกอบในซีเมนต์เพสต์จะสลายตัวเป็นสารประกอบอื่น ที่มีมวลโมเลกุลต่ำลงหรือเป็นธาตุ กล่าวคือ เมื่อซีเมนต์เพสต์ถูกเผาที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะสลายตัว (Decomposition) เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ (2.8)

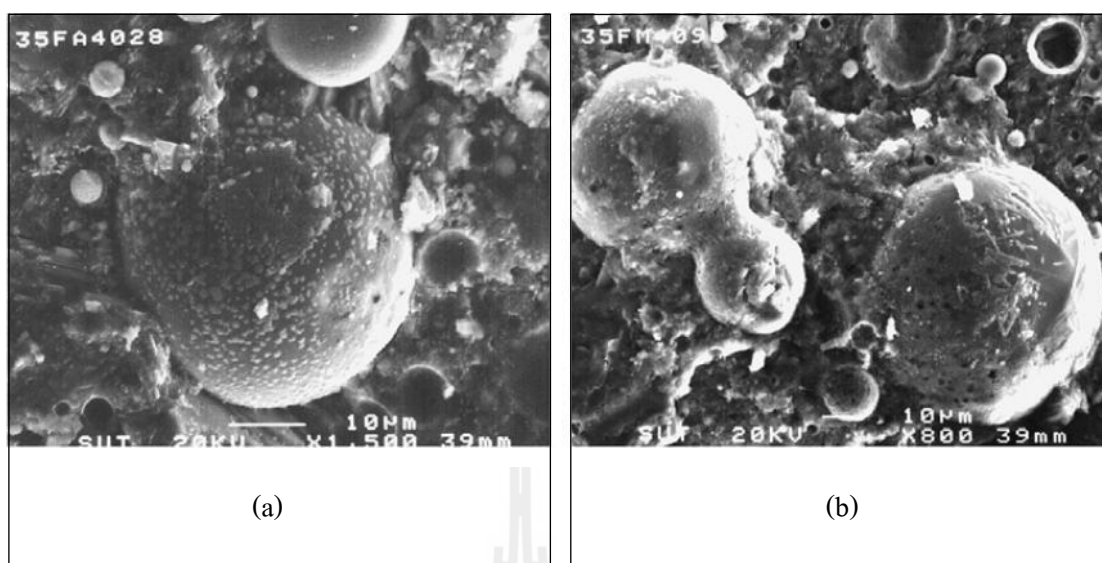


การวิเคราะห์โดยวิธี TGA จะเป็นการวัดปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัว โดยที่น้ำในส่วนนี้ระเหยออกไปคงเหลือแต่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการระเหยของน้ำในส่วนที่เป็น น้ำหนักน้ำที่สูญเสียไป (Weight Loss) ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงจากการวิเคราะห์ด้วย TGA

2.9 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

Delage and Lefebver (1984) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของ Champlian Clay โดยใช้เครื่อง Mercury Intrusion Porosimeter และ Scanning Electron Microscope ทำให้ทราบถึงขบวนการของการบดอัดดิน ได้ทำการแบ่งระดับการอัดปรอทออกเป็น 2 ระดับคือ ในครั้งแรกทำการอัดปรอทโดยให้ปรอทกระจายไปทั่วโพรง จึงทำการลดแรงดันทำให้ปรอทยังคงค้างอยู่ในตัวอย่าง หลังจากนั้นทำการอัดปรอทเป็นครั้งที่สอง โดยอัดให้ปรอทกระจายเต็มโพรงตัวอย่างอย่างไม่จำกัด ความแตกต่างของการอัดปรอททั้ง 2 ระดับจะทำให้มีปริมาณปรอทที่แตกต่างกัน ผลจากการศึกษาสรุปได้ว่า คุณสมบัติโครงสร้างมวลดินของดินเหนียวถูกกำหนดโดยมวลรวมที่อยู่ภายในก้อนดิน (Intra-Aggregate) และมวลรวมที่อยู่ระหว่างก้อนดิน (Inter-Aggregate) ซึ่งมวลรวมจะถูกทำลายได้โดยการแปรสภาพทางกลศาสตร์ และอัตราของโพรงทั้งสองจะไม่ถูกทำลายเมื่ออยู่ในสถานะที่ถูกรบกวน โพรงที่ไม่จำกัดจะถูกหมายถึงโพรงภายในก้อนดิน (Intra-Aggregate) ในขบวนการอัดตัวคายน้ำ แรงดันประสิทธิผลจะเกิดจากโพรงขนาดใหญ่ และโพรงขนาดเล็กภายในก้อนจะไม่มีการอัดตัวและเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม สำหรับการอัดตัวคายน้ำที่เพิ่มขึ้นดัชนีการอัดตัวจะสัมพันธ์กับโพรงขนาดใหญ่

Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T. (2005) ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียดของเถ้านหินต่อปฏิกิริยาปอซโซลานเพสต์ ที่อายุบ่ม 7 28 และ 90 วัน อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์เท่ากับ 80:20 และ 60:40 ด้วยเครื่อง SEM พบว่าเถ้าลอยเกิดรูพรุนและช่องว่างจำนวนมาก และสามารถเห็นผลิตภัณฑ์ไฮดรชันเกาะอยู่บริเวณผิวของเถ้าลอย รูพรุนเกิดจากการถูกกัดกร่อนเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และพบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นหลังจากมีอายุบ่มมากกว่า 7 วัน ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.7 อนุภาคเถ้าลอยหยาบ (a) อายุบ่ม 28 วัน (b) อายุบ่ม 90 วัน
(Chindaprasirt et.al., 2005)

สุขสันต์ หอพิบูลสุข (2549) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimeter พบว่า การผสมวัสดุเชื่อมประสาน ช่วยปรับปรุงโครงสร้างดิน โดยเพิ่มพันธะเชื่อมประสาน และทำให้แฟบrikแน่นขึ้น ช่องว่างภายในดินซีเมนต์เถ้าลอยประกอบด้วยช่องว่างอากาศ (ขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน) ช่องว่างระหว่างก้อนดินซีเมนต์เถ้าลอย (ขนาดระหว่าง 10-0.01 ไมครอน) และช่องว่างภายในก้อนดินซีเมนต์เถ้าลอย (ขนาดเล็กกว่า 0.01 ไมครอน)

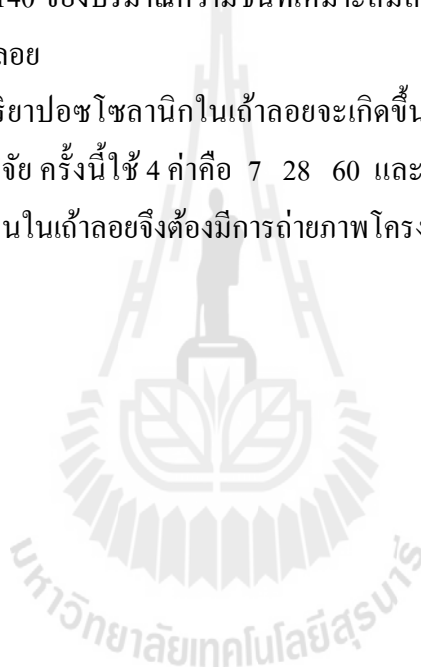
จากการศึกษาที่ผ่านมา สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ว่าการจะใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานแทนที่ซีเมนต์ได้นั้น จะต้องพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นให้ดีขึ้น กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ผ่านการเผาให้กำลังอัดมอร์ต้าที่สูงกว่ากรณีไม่เผา อัตราส่วนที่เหมาะสมที่ให้กำลังอัดมอร์ต้ามากที่สุดคือ 30:70 ได้แก่อัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ 30 เปอร์เซ็นต์ และเถ้าลอย 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวเราไม่อาจแน่ใจได้ว่าเป็นอัตราส่วน หรือวิธีที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวปนดินตะกอน เนื่องจากในดินเหนียวมีแร่ธาตุที่ต่างออกไปจากมอร์ต้า การศึกษาเถ้าลอยในการแทนที่ซีเมนต์ เถ้าลอยช่วยให้ดินซีเมนต์กระจายตัว และไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน เนื่องจากสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระไม่พอทำปฏิกิริยาแสดงว่าถ้ามีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากพออาจทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าลอยได้ซึ่งจากผลการศึกษาเหล่านี้เราสามารถสรุปกำหนดขอบเขตของตัวแปรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ดังต่อไปนี้

1) อัตราส่วนที่เหมาะสมของ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าลอย โดยให้ความสำคัญกับ ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นหลัก อัตราส่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อเถ้าลอยที่ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50 40:60 30:70 20:80 และ 10:90

2) ปริมาณผสมเพิ่มสารเชื่อมประสานในดิน เพื่อต้องการทราบว่าสามารถปรับปรุงกำลังอัดให้ดินได้หรือไม่ งานวิจัยนี้กำหนดอัตราส่วนแทนที่สารเชื่อมประสานในดินในโซนแอคทีฟ

3) ปริมาณน้ำในมวลดิน สำหรับดินทรายควรทำการบดอัดให้อยู่ทางด้านแห้งของปริมาณ น้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด ส่วนในดินเหนียวนั้นต้องบดอัดให้อยู่ทางด้านเปียก ของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด งานวิจัยจะใช้ปริมาณน้ำ 4 ค่า ได้แก่ ร้อยละ 80 100 120 และ 140 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดดินเหนียวผสมกาก แคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

4) การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในเถ้าลอยจะเกิดขึ้นหลังจากตัวอย่างมีอายุบ่มมากกว่า 7 วัน อายุบ่มที่ใช้ในการวิจัย ครั้งนี้ใช้ 4 ค่าคือ 7 28 60 และ 120 วัน และเพื่อต้องการทราบถึง การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในเถ้าลอยจึงต้องมีการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วย



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

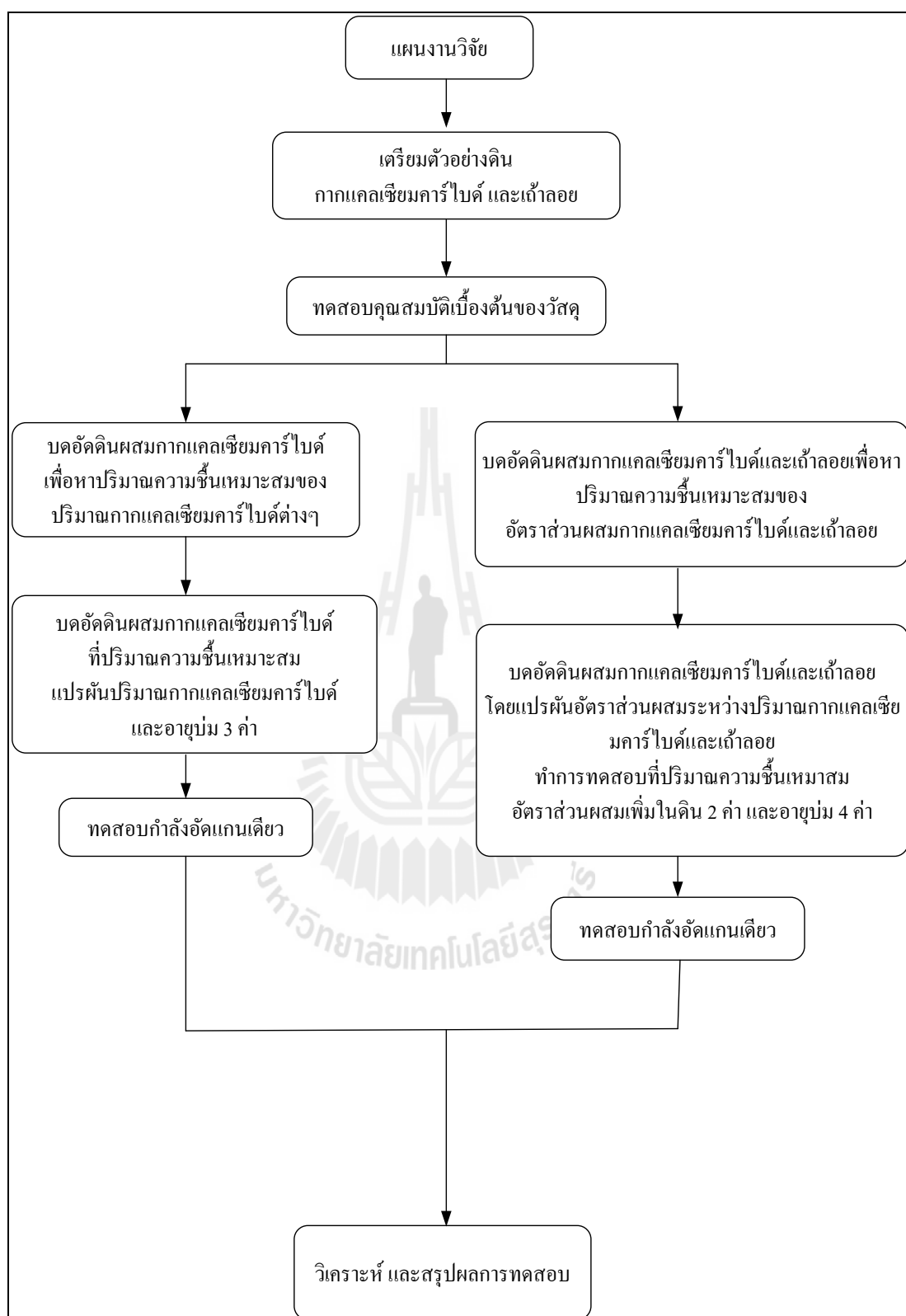
3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นที่จะศึกษาและอธิบายกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินบริเวณฟาร์ม ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เก็บตัวอย่างแบบแปรสภาพที่ความลึก 2-3 เมตร ดินตัวอย่างจะถูกนำมาผสมสารเชื่อมประสาน (กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย) แล้วทำการบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยแปรผันปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์และปริมาณเถ้าลอย เมื่อได้อายุบ่มที่กำหนด (7, 28, 60, 90 วัน) ทำการทดสอบกำลังอัดในสภาวะไม่แช่น้ำและแช่น้ำ จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.1 รูปที่ 3.1 สรุปแผนการทำงานของวิทยานิพนธ์นี้



ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการบดอัดดินเหนียวผสมกากเคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
ปริมาณความชื้น	1	ปริมาณความชื้นเหมาะสม
พลังงานการบดอัด	1	แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)
ปริมาณกากเคลเซียมคาร์ไบด์	3	ร้อยละ 5 10 และ 20
อายุบ่ม	4	7 28 60 และ 120 วัน
อัตราส่วนระหว่างปริมาณกากเคลเซียมคาร์ไบด์ + ปริมาณเถ้าลอย	17	1. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 10:0 2. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 10:3 3. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 10:6 4. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 10:9 5. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 10:12 6. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 10:15 7. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 10:18 8. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 10:21 9. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 10:24 10. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 20:0 11. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 20:3 12. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 20:6 13. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 20:9 14. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 20:12 15. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 20:15 16. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 20:18 17. กากเคลเซียมคาร์ไบด์+เถ้าลอย 20:21
การทดสอบ	2	ทำการทดสอบแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ
จำนวนตัวอย่าง	3	ชุดละ 3 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การเก็บและการเตรียมตัวอย่างดิน

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

ดินที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นดินบริเวณฟาร์ม ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เก็บตัวอย่างในลักษณะแปรสภาพที่ระดับความลึก 2-3 เมตรจากผิวดิน เพื่อให้ได้ดินที่มีลักษณะเหมือนกันและมีการปนเปื้อนน้อยที่สุด จากนั้นตัวอย่างดินจะถูกตากให้แห้ง และทุบด้วยค้อนยางจนมีขนาดประมาณ 1-2 เซนติเมตร และทำการย่อยดินด้วยเครื่องย่อยดินให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำดินที่ผ่านการย่อยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 อีกครั้งหนึ่ง 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 ใช้เทคนิคการผสมเพิ่มเป็นส่วนหนึ่งของน้ำหนักดินแห้ง อัตราส่วนเถ้าลอยในงานวิจัยนี้เท่ากับร้อยละ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 ของน้ำหนักดินแห้ง

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 จี๊ดจำกัดเหลว (Liquid limit)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3.3.6 พิกัดพลาสติก (Plastic limit)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3.3.7 ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของตัวอย่างดิน

ถ่ายภาพขยายกำลังสูง ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด

3.3.8 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างดิน

ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS-932

ดังรูปที่ 3.4

3.4 คุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย

3.4.1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

โดยใช้ขวดทดลอง Le Chatelier ตามมาตรฐาน ASTM C188

3.4.2 ทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย

โดยการห่าน้ำหนักเถ้าลอยที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน)

โดยใช้วิธี Wet Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C430

3.5 การบดอัดดิน

ดินจะถูกบดอัดในแบบทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 33 มม. สูง 71 มม. แบ่งการบดอัดเป็น 5 ชั้น ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Water Content) รวมถึงกราฟการบดอัด (Compaction Curve) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1557 หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยใช้เครื่อง Unconfined Compression Testing Machine ใช้อัตราการกดตัวอย่างร้อยละ 1.0 ของความสูงตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ 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 จากนั้นดำเนินการบดอัดดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์แต่ละปริมาณ (ร้อยละ 5 10 20) ตัวอย่างดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะถูกดันออกจากแบบ ชั่งน้ำหนักและห่อด้วยฟิล์มพลาสติก แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องตามอายุบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน

3.5.3 การบดอัดตัวอย่างดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

หาปริมาณความชื้นเริ่มต้นของดินที่เตรียมไว้ตามมาตรฐาน ASTM D2216 ผสมดินกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำที่ปริมาณความชื้นที่ต้องการ แล้วผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วทำการบดอัด แปรผันความชื้นต่าง ๆ เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละส่วนผสมเช่นเดียวกับการบดอัดดินเหนียวปกติ จากนั้นดำเนินการบดอัดดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม เก็บตัวอย่างดินเหนียวผสมสารเชื่อมประสานไปหาปริมาณความชื้นพร้อมกับทำการบดอัดทุกครั้ง ตัวอย่างดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอยบดอัดจะถูกดันออกจากแบบ นำไปชั่งน้ำหนักและห่อด้วยฟิล์มพลาสติก แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องตามอายุบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการบดอัดก่อนทำการควบคุมความชื้น

3.6 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, q_u)

รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องทดสอบ Unconfined Compression Testing Machine เมื่อได้ตัวอย่างดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยตามระยะบ่มที่ต้องการ นำตัวอย่างดินไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.6.1 นำตัวอย่างดินออกจากฟิล์มพลาสติก

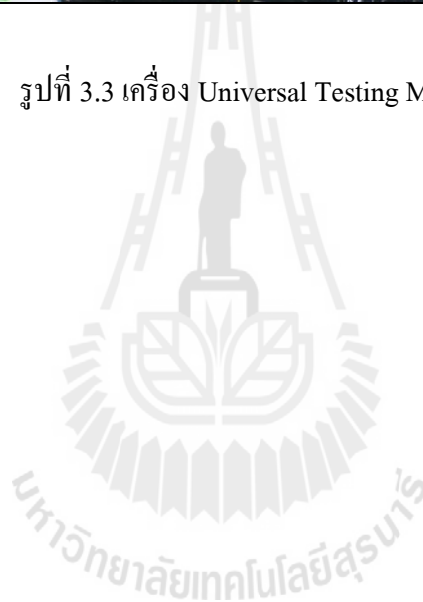
ทำการชั่งน้ำหนัก วัดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางให้ละเอียด 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้ Vernier Caliper

3.6.2 นำตัวอย่างดินเข้าเครื่องทดสอบ Unconfined Compression Testing Machine

ทำการกดตัวอย่างทดสอบด้วยอัตราการกดร้อยละ 1 ของความสูงดินตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งดินตัวอย่างวิบัติ ทำการบันทึกผลการทดสอบในรูปของความเค้นและความเครียดของดิน



รูปที่ 3.3 เครื่อง Universal Testing Machine



บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะเสนอผลทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น และคุณสมบัติทางเคมีของ ดินเหนียวปนดินตะกอน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย ท้ายสุด จะแสดงผลการศึกษากำลัังอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยกรณีไม่แช่น้ำและแช่น้ำ

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างดินเหนียวปนดินตะกอนที่เก็บภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ระดับความลึก 2-3 เมตรจากผิวดิน ในระหว่างการเก็บดินตัวอย่างไม่ปรากฏระดับน้ำใต้ดิน ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 22 ดินดังกล่าวมีปริมาณทราย:ดินตะกอน:ดินเหนียว เท่ากับ 2:45:53 (รูปที่ 4.1) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.76 ค่าขีดจำกัดเหลว และค่าขีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 62 และ 22.63 ตามลำดับ ซึ่งดินเหนียวปนดินตะกอนประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) ด้วยการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified soil classification system (USCS)) ตามลำดับ ผลการทดสอบการบวมตัวอิสระที่เสนอ โดย Prakash and Sridharan (2004) แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวปนดินตะกอนนี้จัดเป็นดินบวมตัวต่ำและมีค่าอัตราส่วนบวมตัวอิสระเท่ากับ 1.4

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท สาย 5 ผลิตภัณฑ์ก๊าซ จำกัด อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม โดยนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์เตรียมด้วยวิธีการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบดด้วยเครื่อง Los Angeles abrasion machine และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับ 2.32 รูปที่ 4.2 แสดงผลทดสอบ X-ray Diffraction ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และปูนขาว ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และปูนขาว (Hydrated Lime) แสดงดังตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์และปูนขาวผลทดสอบมีลักษณะของ XRD ที่

คล้ายกันมาก และกากแคลเซียมคาร์ไบด์มี Ca(OH)_2 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก ปริมาณ Ca(OH)_2 และ CaO ที่สูงนี้บ่งชี้ว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุพอลิไซลัน และ สามารถก่อให้เกิดเป็นพันธะเชื่อมประสานได้ แก้วลอยที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ความถี่เฉพาะเท่ากับ 2.39 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอย ดังตารางที่ 4.2 ผลรวมขององค์ประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของแก้วลอยมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 81.54 (เกินกว่าร้อยละ 10) ดังนั้นแก้วลอยนี้จึงจัดเป็นแก้วลอยที่มีแก้วลอยนี้มีองค์ประกอบของ CaO ก่อนข้างสูง

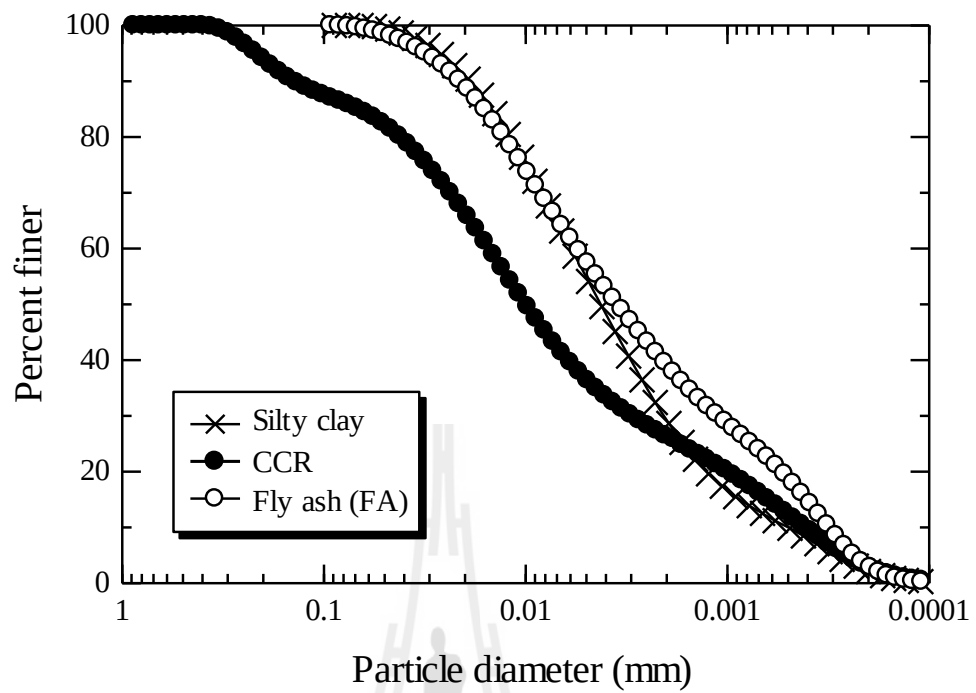


ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวตัวอย่าง

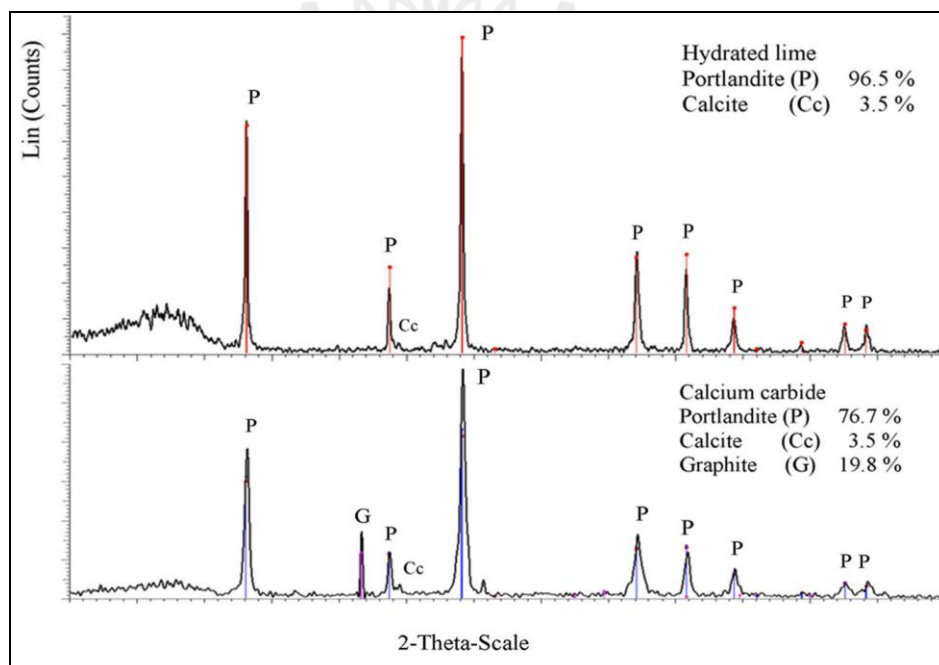
Soil Property	Silty Clay
Physical Properties :	
1. Specific Gravity	2.76
2. Liquid Limit	62%
3. Plastic Limit	22.63%
4. Free Swell Ratio	1.4
Unified Soil Classification	CH

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปนดินตะกอน กากเคลือบซีเมนต์ 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 ₂ O ₃	7.55	24.59	2.55	0.24
Fe ₂ O 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 ₂ O	ND	0.07	ND	ND
K ₂ O	3.17	2.66	7.93	3.3
LOI	3.44	1.23	1.35	1.21



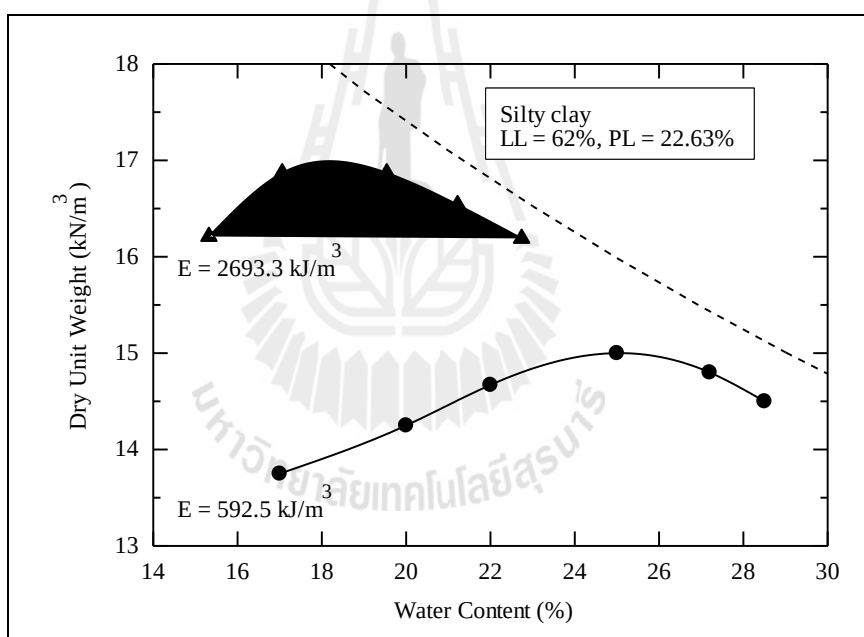
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน กากเคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย



รูปที่ 4.2 X-ray Diffraction ของ Hydrated Lime และกากเคลเซียมคาร์ไบด์

4.3 กราฟการบดอัดของดินเหนียว

รูปที่ 4.3 แสดงผลการบดอัดดินเหนียว ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน (592.5 และ 2,693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) จะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานการบดอัดเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นมีค่าลดลง และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาของนักวิจัยในอดีต (ชัย มุกตพันธ์ และ กาซุโตะ นากาซาวา, 2540; มานะ อภิพัฒนะมนตรี, 2539; Horpibulsuk et al., 2006b) นอกจากนี้ ยังพบอีกว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นหลังปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และมีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกัน และขนานกับเส้นช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ (Zero Air Void) ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างที่ได้จากการบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน แสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น กับความหนาแน่นแห้งที่พลังงานการบดอัด 592.5 และ 2,693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

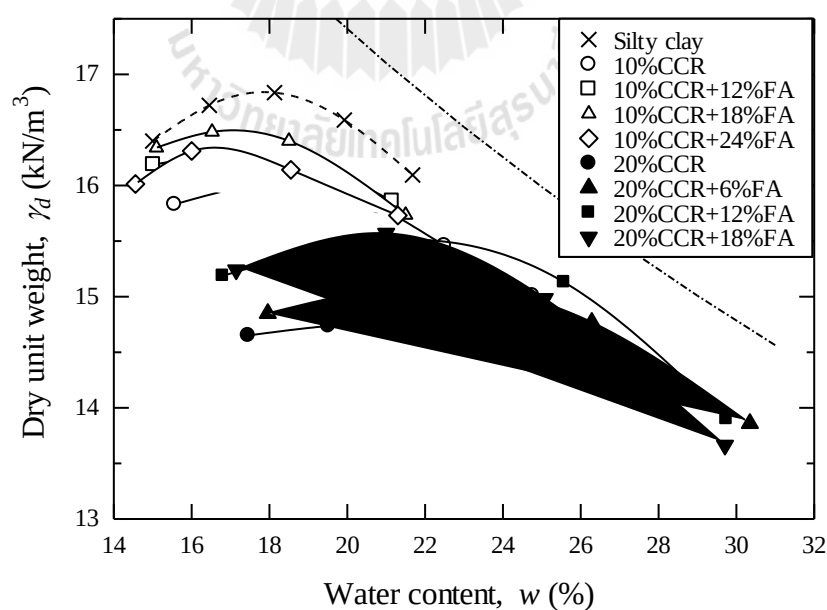
ตารางที่ 4.3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินตัวอย่าง

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 ผลศึกษาการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอน

ผลสมการแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบเมื่อทำการบดอัดดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยที่ส่วนผสมต่างๆกัน พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และค่าความชื้นเหมาะสมมีค่าแตกต่างกัน สามารถแบ่งการพิจารณาได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นอิทธิพลของการผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงเมื่อผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มากขึ้น และค่าความชื้นเหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มากขึ้น ส่วนที่สองเป็นอิทธิพลของการผสมเถ้าลอย ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น

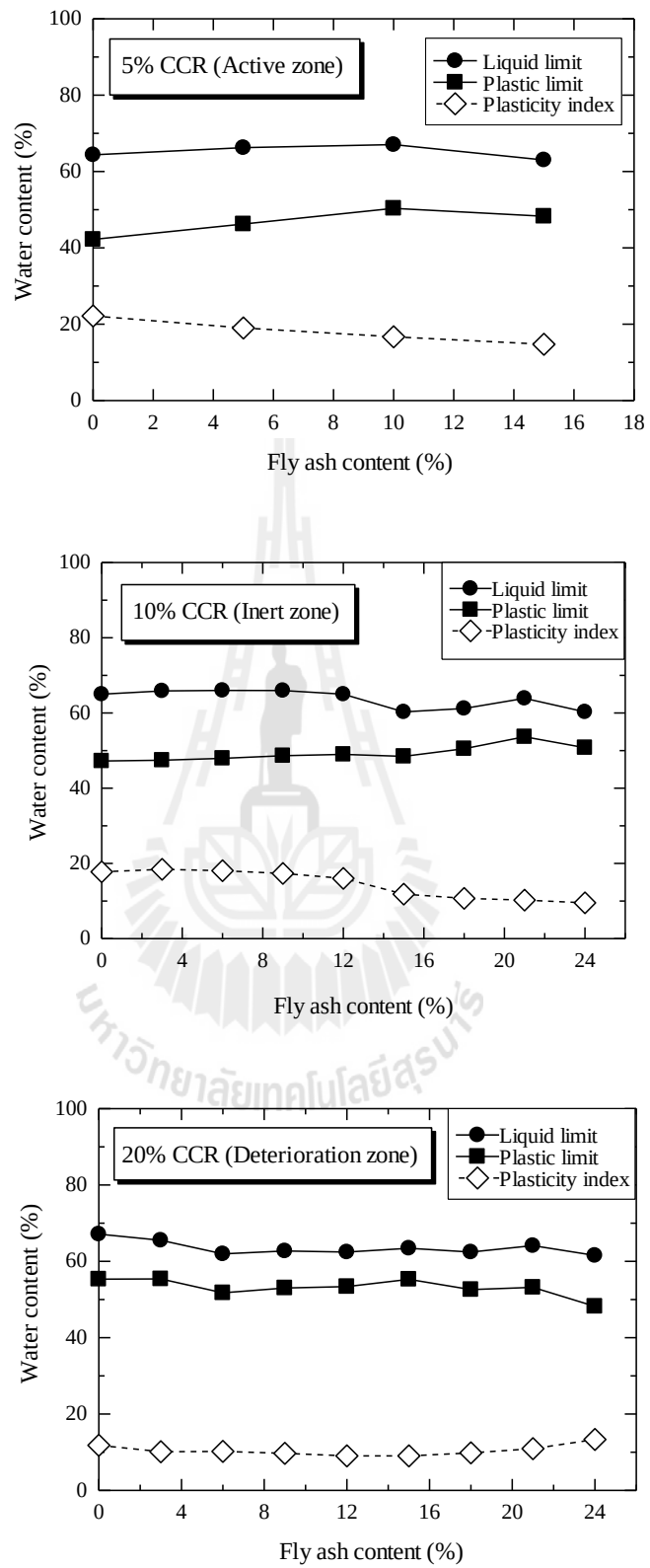


รูปที่ 4.4 กราฟการบดอัดดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

เมื่อพิจารณาอิทธิพลทั้งสองจะพบว่า การผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกับค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และค่าความชื้นเหมาะสม เนื่องจากเมื่อผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ลงในดินจะเกิดปฏิกิริยา Cation Exchange ซึ่งทำให้อนุภาคของดินมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้น เมื่อบดอัดจึงเกิดเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ และส่งผลให้ความหนาแน่นสูงสุดมีค่าลดลง การเติมเถ้าลอยในดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ช่วยเพิ่มความหนาแน่นแห้ง เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่กลมและมีขนาดเล็กกว่าเม็ดดินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าลอยจึงแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้ดีเมื่อทำการบดอัด

รูปที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยต่อพิกัดอัตราเบร็กพิจารณาปริมาณเถ้าลอยที่ร้อยละ 0 สำหรับผลทดสอบทั้งสาม การเพิ่มกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีผลให้พิกัดเหลวเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่พิกัดพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้น จึงมีผลให้ค่าดัชนีพลาสติกลดลงตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ การลดลงของค่าดัชนีพลาสติกเกิดเนื่องจากปฏิกิริยา Cation Exchange ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์บนผิวของดินเหนียว ที่ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ค่าหนึ่ง การเพิ่มเถ้าลอยมีผลให้พิกัดเหลวลดลงเล็กน้อย และพิกัดพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ดัชนีพลาสติกจึงแทบไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น



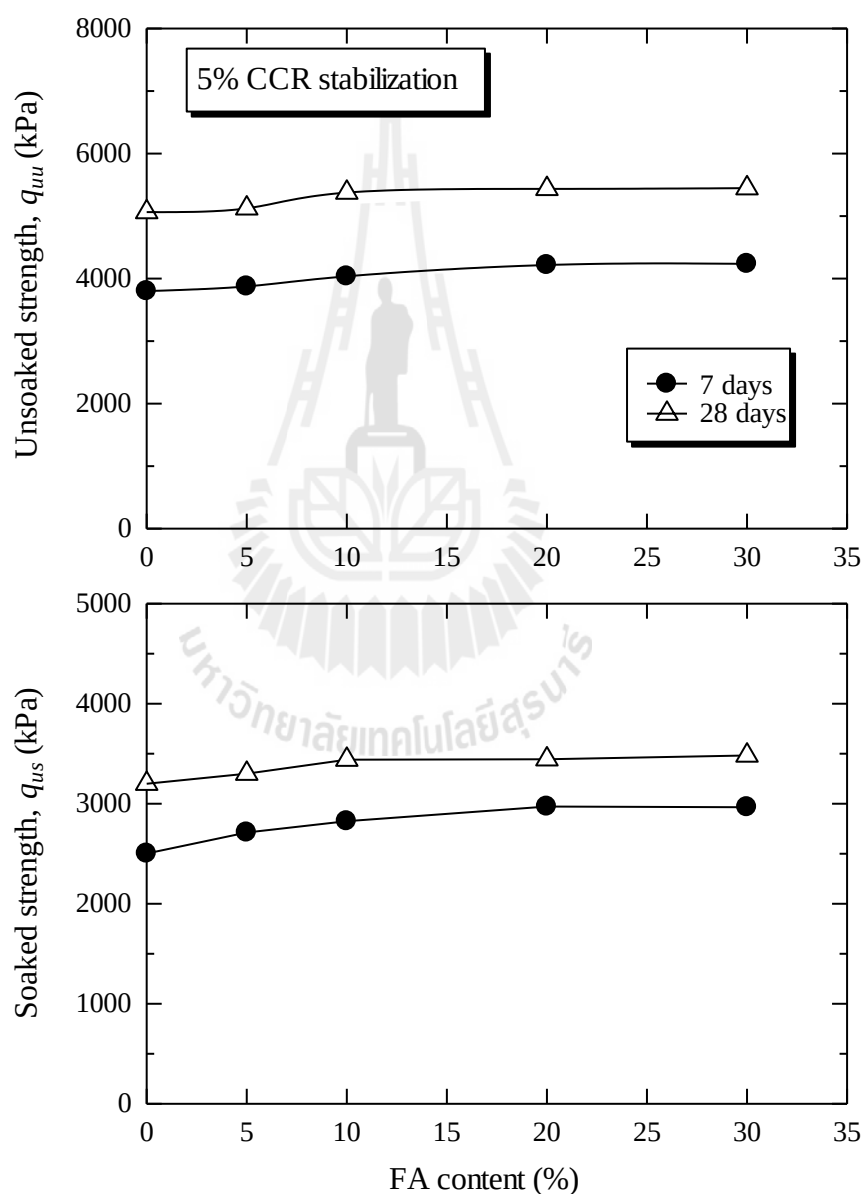


รูปที่ 4.5 อิทธิพลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยต่อค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว

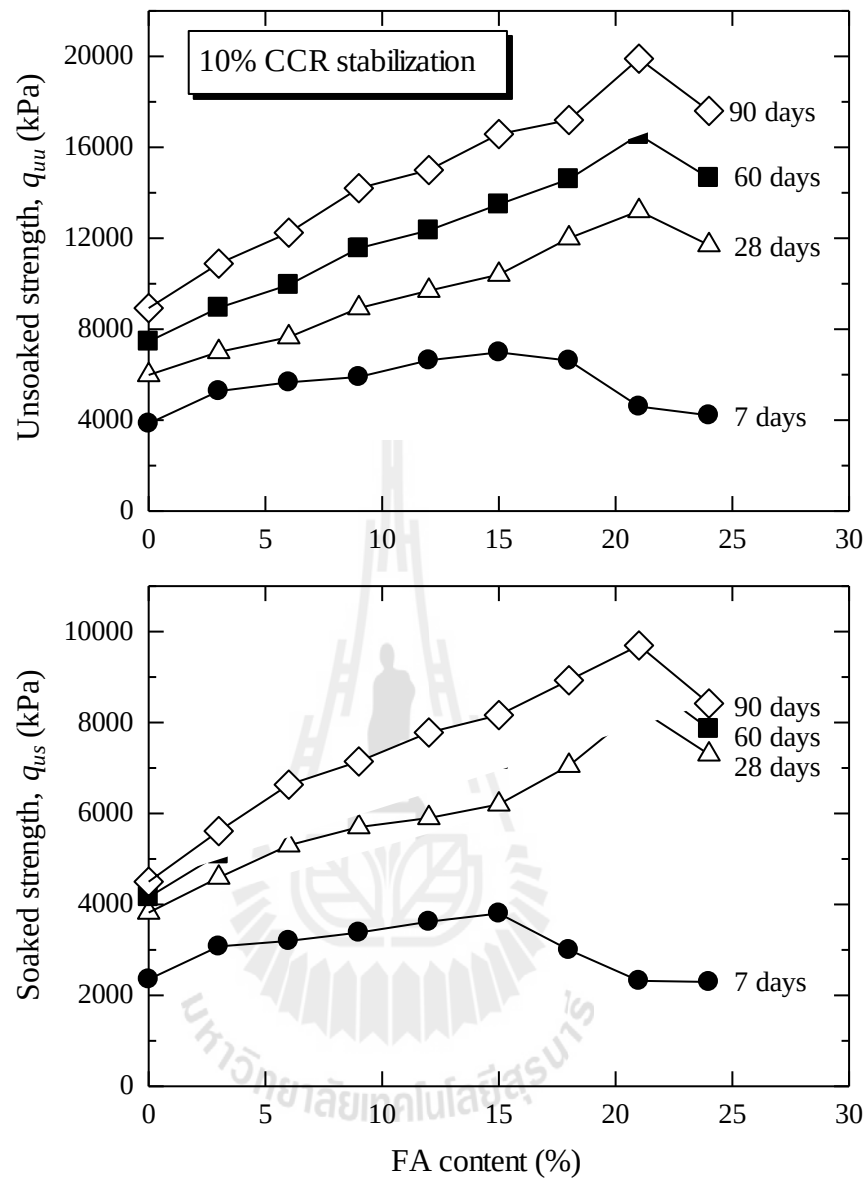
4.5 ผลศึกษากำลั่งอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอน

ผลสมการแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยสถานะไม่แช่น้ำและแช่น้ำ

รูปที่ 4.6 แสดงกราฟกำลั่งอัดแกนเดียวของดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 5 กับเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ อายุบ่ม 7 และ 28 วัน พบว่ากำลั่งอัดของดินจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณเถ้าลอยที่ผสมเพิ่ม โดยกำลั่งอัดเริ่มคงที่ที่ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 10 กำลั่งอัด ในกรณีที่ไม่แช่น้ำมีค่าสูงกว่ากรณีแช่น้ำ



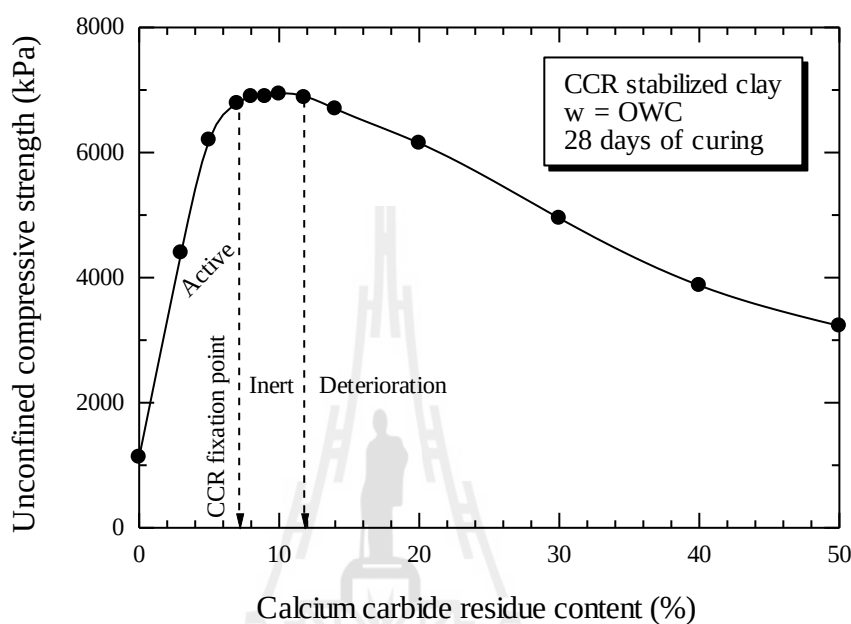
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลั่งอัดแกนเดียวของดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 5 กับปริมาณเถ้าลอย ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวของดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 10 กับ ปริมาณเถ้าลอย ที่อายุบ่ม 7 และ 28, 60 และ 90 วัน

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวของดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 10 กับเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่ผสมเพิ่มจนถึงจุดที่ปริมาณเถ้าลอยที่ร้อยละ 15 กรณีอายุบ่ม 7 วัน และร้อยละ 20 กรณีอายุบ่มมากกว่า 7 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดเริ่มตกลง ซึ่งแตกต่างจากผลทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.6 เนื่องจากกรณีผสมเถ้าลอยกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 5 นั้น กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ผสมเข้ายังอยู่ในโซน Active (แสดงในรูปที่ 4.7) (ไม่เกินค่า CCR Fixation Point) ปริมาณกาก

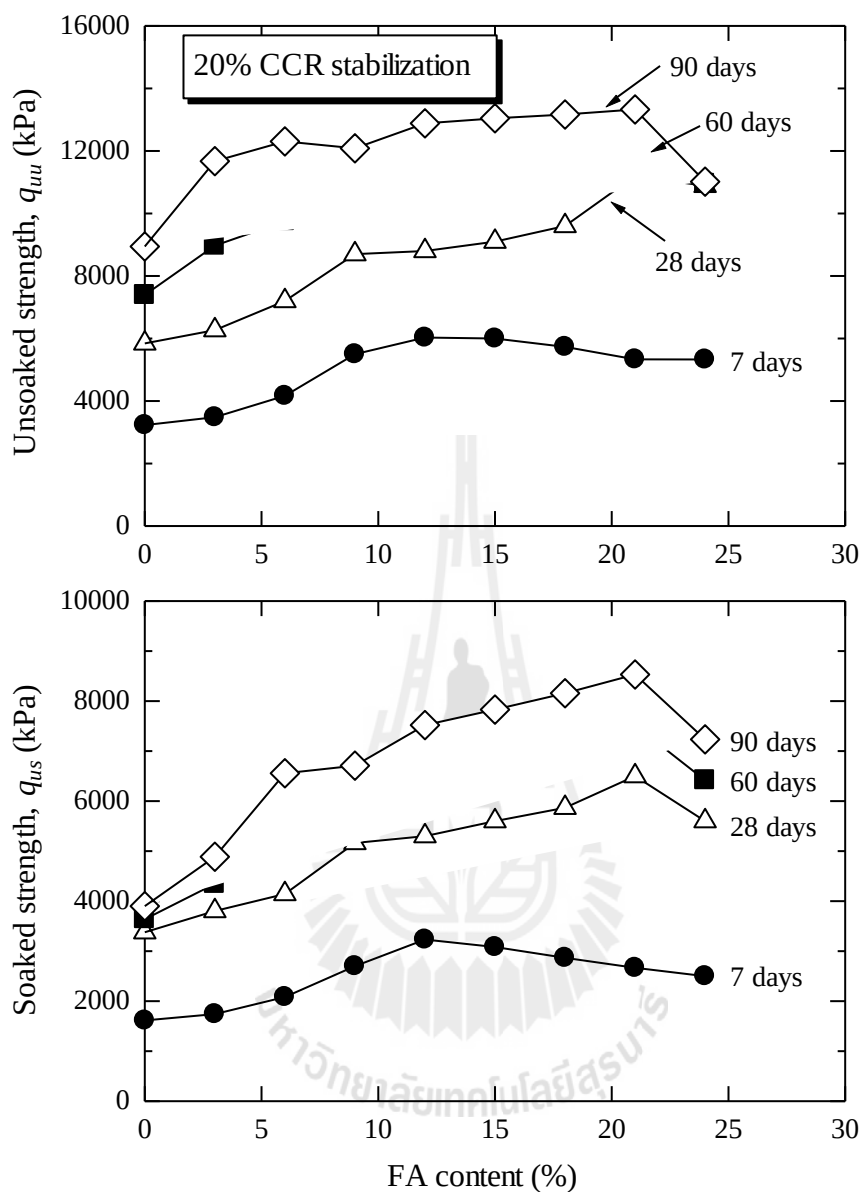
แคลเซียมคาร์ไบด์ในโซนนี้ทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลานในดินจนหมด ไม่เหลือพอที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับเถ้าลอย กำลังอัดที่ได้จึงแทบไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงแตกต่างจากกรณีผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 10 ที่มีปริมาณกากแคลเซียมอิสระมากพอที่จะทำปฏิกิริยากับเถ้าลอย ค่ากำลังอัดสูงสุดจึงอยู่ที่อัตราส่วนผสมเถ้าลอยที่สูงกว่า



รูปที่ 4.8 Improvement zones (Horpibulsuk et al., 2012).

ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสม (ให้กำลังอัดสูงสุด) ที่อายุบ่ม 7 วัน แตกต่างจากปริมาณเถ้าลอยที่อายุบ่มอื่น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดได้ดีขึ้นที่อายุบ่มนาน แต่จะเกิดได้ช้าในช่วงอายุบ่มต้นๆ ดังนั้น ในช่วงอายุบ่ม 7 วัน ปฏิกิริยาเคมียังเกิดไม่เต็มที่ และกำลังอัดแปรผันอย่างมากกับความแน่นของมวลดิน ด้วยเหตุนี้เอง ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมที่อายุบ่ม 7 วัน จึงมีค่าต่ำกว่าที่อายุบ่มอื่น จากรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณากำลังอัดในสถานะไม่แช่น้ำและแช่น้ำ พบว่าแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดของทั้งสองสถานะคล้ายคลึงกัน แต่อิทธิพลของดูดซึมน้ำของตัวอย่างทำให้กำลังอัดที่สถานะแช่น้ำมีค่าน้อยกว่าประมาณร้อยละ 50

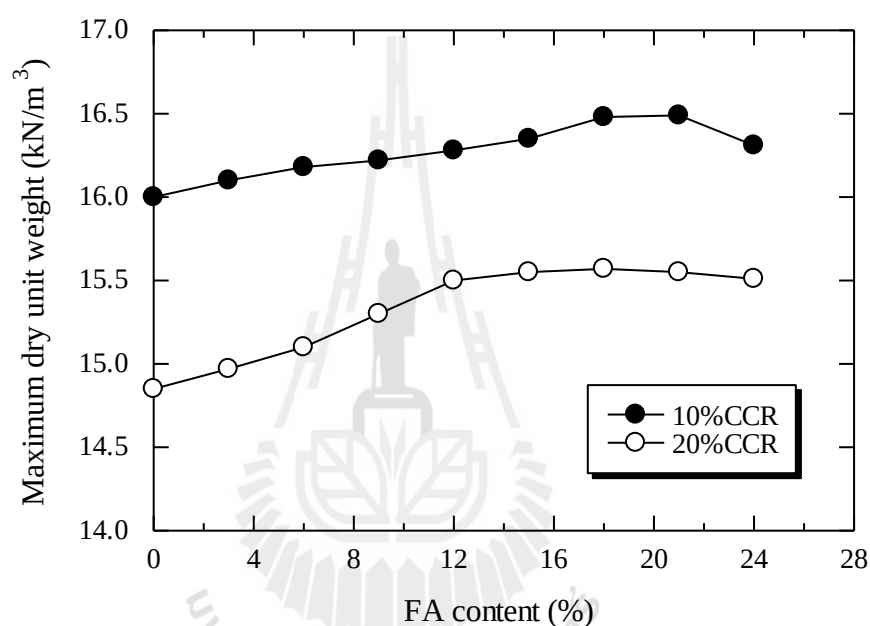
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวของดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 20 กับปริมาณเถ้าลอย ที่อายุบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน แนวโน้มรูปแบบการพัฒนากำลังจะเป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 4.7 แต่ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากอัตราส่วนผสมเพิ่มของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ร้อยละ 20 นั้น อยู่ในช่วง Deterioration ในรูปที่ 4.8 ดังนั้นจึงมีแคลเซียมอิสระที่มากเกินไปจนบางส่วนไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้ค่ากำลังที่ได้มีน้อยกว่าส่วนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ร้อยละ 10 ชัดเจน



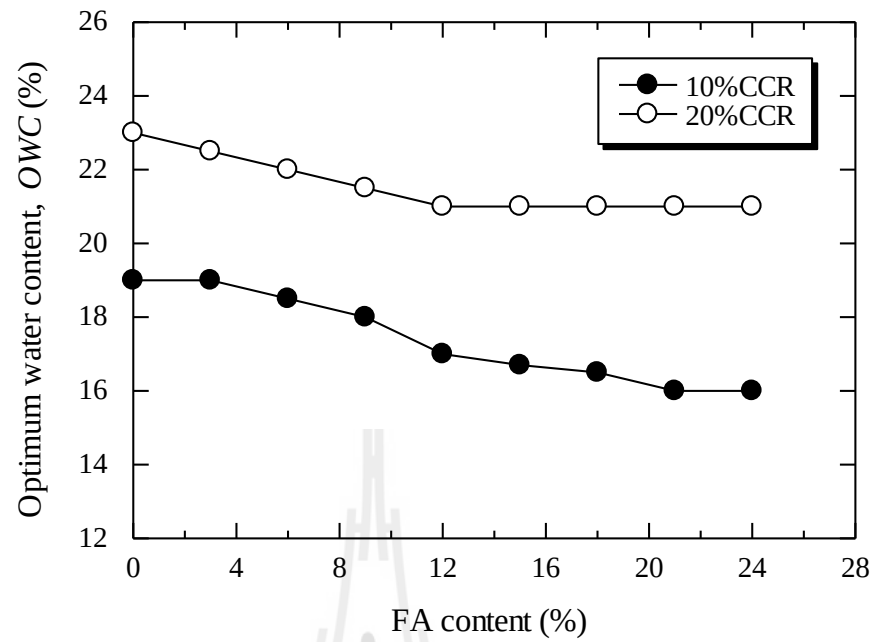
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวของดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 20 กับ ปริมาณเถ้าลอย ที่อายุบ่ม 7 และ 28, 60 และ 90 วัน

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณเถ้าลอย จะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเกิดที่ปริมาณเถ้าลอยประมาณร้อยละ 12 สำหรับปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 10 และ 20 ซึ่งเป็นปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน สูงสุด ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่ากำลังอัดของดินที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ที่อายุบ่มต้นแปรผันอย่างมากกับความหนาแน่นแห้ง สำหรับที่อายุบ่มเกินกว่า 7 วัน ปฏิกริยาพอซ

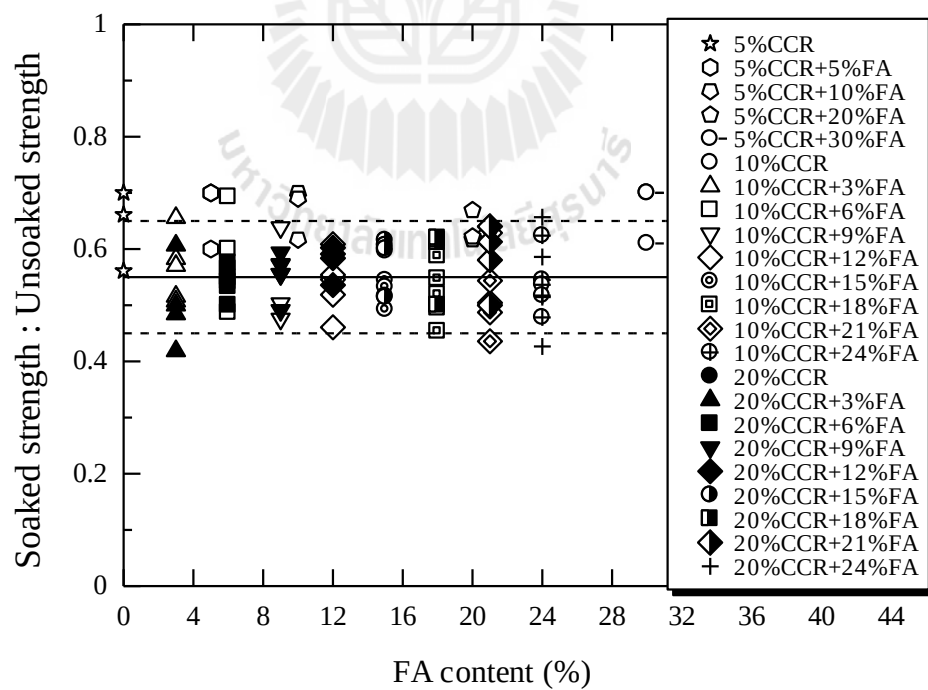
โซลานเกิดขึ้นได้มากตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่อายุบ่มเกินกว่า 7 วัน จึงมีค่าเกินกว่าปริมาณเถ้าลอยเหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน โดยที่ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่อายุบ่มเกินกว่า 7 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 21 ปริมาณเถ้าลอยที่มากเกินไปจะขัดขวางการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างดินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จึงทำให้กำลังอัดของตัวอย่างมีค่าลดลง รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสมกับปริมาณเถ้าลอย จะเห็นได้ว่าผลทดสอบในรูปที่ 4.10 และ 4.11 มีความสอดคล้องกัน กล่าวคือ ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณเถ้าลอย



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเหมาะสมกับปริมาณเถ้าลอย



รูปที่ 4.12 กราฟอัตราส่วนกำลังอัดที่สภาวะแช่น้ำต่อสภาวะไม่แช่น้ำที่ปริมาณเถ้าลอยต่างๆกัน

หากนำผลทดสอบกำลังอัดในสภาวะไม่แช่น้ำมาเปรียบเทียบกับในสภาวะแช่น้ำ จะได้ผล การศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดใน สภาวะแช่น้ำต่อกำลังอัดในสภาวะไม่แช่น้ำ และปริมาณเถ้าลอย กำลังอัดที่สภาวะแช่น้ำในทุกๆ ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์และปริมาณเถ้าลอย มีค่าต่ำกว่ากำลังอัดในสภาวะไม่แช่น้ำ ทั้งนี้ เนื่องจากปริมาณน้ำที่ตัวอย่างดูดซึมเข้าไปจะทำให้อนุภาคของดินเกิดการขยายตัวและส่งผลให้ ความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานลดลง ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนระหว่างกำลังอัด ในสภาวะแช่น้ำต่อกำลังอัดในสภาวะไม่แช่น้ำมีค่าระหว่าง 0.45 ถึง 0.65 ในทุกอายุบ่ม ปริมาณกาก แคลเซียมคาร์ไบด์และปริมาณเถ้าลอย โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.55



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 บทสรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้วิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ประเด็นที่สำคัญของงานวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. กากแคลเซียมคาร์ไบด์มี Ca(OH)_2 สูงถึงร้อยละ 76 ซึ่งสามารถใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวได้ โดยการทำปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง Ca(OH)_2 และวัสดุปอซโซลานธรรมชาติในดินเหนียว
2. การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวแบ่งออกได้ 3 โซน โซนแรก (โซน Active) วัสดุปอซโซลานตามธรรมชาติที่อยู่ในดินมีเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลา ดังนั้น การเติมเถ้าลอยในโซนนี้จึงไม่มีผลต่อการเพิ่มกำลังอัด เถ้าลอยจะช่วยเพิ่มกำลังได้ดินในโซนที่ 2 (โซน Inert) เถ้าลอยจะช่วยปรับปรุงความแน่นและปฏิกิริยาปอซโซลา โซนสุดท้าย (โซน Deterioration) ไม่แนะนำในทางปฏิบัติ เนื่องจากความไม่คงตัว (unsoundness) ที่เกิดจากการมีแคลเซียมอิสระมากเกินไป
3. การพัฒนากำลังของดินเหนียวปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยในสถานะแช่น้ำ มีกำลังอัดน้อยกว่าในสถานะไม่แช่น้ำ เนื่องจากการดูดซึมน้ำทำให้อนุภาคดินเหนียวบวมตัว และมีผลให้ความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานลดลง อัตราส่วนระหว่างกำลังอัดในสถานะแช่น้ำและกำลังอัดในสถานะไม่แช่น้ำมีค่าระหว่าง 0.45 ถึง 0.65 และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.5 สำหรับทุกปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย และทุกอายุบ่ม

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

- 1) งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาแต่เฉพาะพฤติกรรมด้านกำลังอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ดังนั้นควรศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น ความทนทาน การดูดซึมน้ำ และกำลังต้านทานแรงดึง เป็นต้น
- 2) งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยแก้ปัญหาเฉพาะดินเหนียวปนดินตะกอน ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมกับดินชนิดอื่นๆ ที่มีปัญหาด้วย เพื่อให้เข้าถึงอิทธิพลของชนิดดินต่อการพัฒนากำลังอัด

รายการอ้างอิง

- กรมทางหลวง. (2533). มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base). มาตรฐานที่ ทล.-ม. 204/2533.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2536). **คอนกรีตเทคโนโลยี**, กรุงเทพฯ, บริษัท คอนกรีตผสมเสร็จจีแพค.
- ชัย มุกตพันธ์ และ กาฐุโตะ นากาซาวา. (2540). **ปฐพีศาสตร์และวิศวกรรมฐานราก**, กรุงเทพฯ : ดวงกมล.
- ทรงพล บุญมาดี. (2529). ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ CBR ของ ดินลูกรังผสมซีเมนต์. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**. 196 หน้า.
- ปิตินันต์ กร้ามาตร สุภิชาติ มาตย์ภูธร ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เกาฬิศการ. (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). กำลังอัดแกนเดี่ยวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน. (2546). ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์. **วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา**. 25-31 หน้า.
- สุธี ลิมนชัยพรกุล บุญกร อมรวิทย์ และ ชีระพงษ์ วงษ์เรือง. (2537). การศึกษากำลังอัดของวัสดุประสานของกากแคลเซียมคาร์ไบด์. **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**.

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

สมชัย กกกำแหง. (2539). ศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้ประโยชน์. โยธาสาร.

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

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

อนิรุทธิ์ ธงไชย 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 Louisesvilly 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

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา

วัฒนพงศ์ ภูมิโคกรักษ์,ชยกฤต เพชรช่วย และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2553). **กำลังอัดของดินปนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร.12- 14 พฤษภาคม 2555. (ตอบรับแล้ว)





กำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนปรับปรุงด้วย

กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

STRENGTH OF SILTY CLAY STABILIZED

WITH CALCIUM CARBIDE RESIDUE AND FLY ASH

วัณพงศ์ ภูมิโคกรักษ์¹, ชยกฤต เพชรชัย², สุขสันต์ หอทิบุลสุข³

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
nutchong@hotmail.com

² นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
p.chayakrit@gmail.com

³ ศาตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
suksun@g.sut.ac.th

บทคัดย่อ: กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากกระบวนการผลิตก๊าซซีลีนและโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าตามลำดับ ส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยสามารถใช้เป็นวัสดุประสานได้ เนื่องจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีส่วนประกอบของ Ca(OH)_2 เป็นจำนวนมาก ในขณะที่เถ้าลอยเป็นวัสดุปอกโซลัน ดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถจำแนกได้ 3 โซนได้แก่ active, inert และ deterioration ในโซน active นั้นวัสดุปอกโซลันตามธรรมชาติที่อยู่ในดินมีเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาปอกโซลันิก ดังนั้นการเติมเถ้าลอยในโซนนี้จึงไม่ใช่ปัจจัยสำคัญในการเพิ่มกำลัง เถ้าลอยจะช่วยเพิ่มกำลังได้ดีในโซน inert เถ้าลอยจะช่วยปรับปรุงความแน่นและปฏิกิริยาปอกโซลันิก ส่วนในโซน deterioration ไม่แนะนำให้ใช้เถ้าลอยเนื่องจากความไม่คงตัว (unsoundness) ที่เกิดจากการมีแคลเซียมอิสระมากเกินไปมีผลทำให้กำลังลดลง การพัฒนา กำลังของดินเหนียวปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยทั้งที่สภาวะแช่น้ำและไม่แช่น้ำมีพฤติกรรมที่คล้ายกับการปรับปรุงดินเหนียวปนดินตะกอนด้วยซีเมนต์ แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยสามารถที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินแทนที่ซีเมนต์ได้

คำสำคัญ: กากแคลเซียมคาร์ไบด์, เถ้าลอย, ดินเหนียวปนดินตะกอน

¹ ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-4422-4420, E-mail: suksun@g.sut.ac.th



Abstract: Calcium carbide residue (CCR) and fly ash (FA) are both waste products from acetylene gas factories and power plants, respectively. The mixture of CCR and FA can produce a cementitious material because the CCR contains a lot of Ca(OH)_2 while the FA is a pozzolanic material. The soil stabilization by the CCR is classified into three zones: active, inert and deterioration. In active, the natural pozzolanic material in the soil is enough for the pozzolanic reaction. Hence, the input of FA in this zone insignificantly improves the strength. The strength in the inert zone can be significantly increased by adding FA. The FA improves the densification and the pozzolanic reaction. The deterioration zone is not recommended in practice even with the input of FA. The unsoundness due to free lime hinders the strength development. The rate of strength development of the CCR and FA stabilized silty clay under soaked and unsoaked conditions are the same and close to that of cement stabilized silty clay. This shows that a mixture of CCR and FA can be used for soil stabilization instead of ordinary Portland cement.

Keywords: calcium carbide residue, fly ash, silty clay



NCEM 17

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17
9-11 พฤษภาคม 2555 ณ โรงแรม เซ็นทารา แกรนด์แอนคอนเวนชั่นเซ็นเตอร์ อุตรดิตถ์

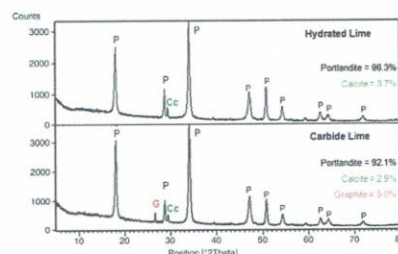
1. บทนำ

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติ ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิด และสภาพแวดล้อม การนำดินมาใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรม จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติให้มีความเหมาะสม ดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือชั้นบนที่ระดับความลึก 0-3 เมตร ส่วนมากเป็นดินเหนียวปนดินตะกอน และดินตะกอนปนทรายที่เกิดจากการพัดพาของลม ดินดังกล่าวนี้มีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำถึงปานกลาง วิธีการปรับปรุงดินวิธีหนึ่งที่เหมาะสม คือการบดอัดดินกับสารเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์และปูนขาว เป็นต้น) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ภายในระยะเวลาอันสั้น การนำดินชนิดนี้ไปใช้ในงานโครงสร้างพื้นฐาน กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานกำลังอัดแกนเดียวของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 1750 กิโลปาสคาล ที่อายุบ่ม 7 วัน [1] ดังนั้นหากต้องการนำดินชนิดนี้ไปใช้งานที่อัตราส่วนกำลังอัดในสนามเป็น 2 เท่าของกำลังอัดในห้องทดลอง [2] กำลังอัดแกนเดียวในห้องทดลองควรมากกว่า 3500 kPa เป็นอย่างน้อย

ในอดีตที่ผ่านมา สารเชื่อมประสานที่ใช้แพร่หลาย คือ ปูนขาว และปูนซีเมนต์ ภายหลังได้มีการนำวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) อื่นมาผสมกับดินเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนค่าก่อสร้าง งานวิจัยนี้จะใช้วัสดุเหลือใช้ปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งคือกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นกากที่เหลือจากการผลิตก๊าซเซทิลีนที่อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จากความต้องการใช้ก๊าซเซทิลีนที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละปี ส่งผลให้ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ดังกล่าวสะสมเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังพบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์มีคุณสมบัติเป็นด่างสูงทำให้เกิดปัญหาสภาพแวดล้อมในบริเวณแหล่งที่ตั้ง เถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากกระบวนการผลิต

กระแสไฟฟ้าได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นวัสดุปอซโซลาน [3]

กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีคุณสมบัติทางเคมี และโครงสร้างคล้ายคลึงกับปูนขาว (Hydrated lime) ดังเห็นได้จากผลการทดสอบ XRD ในรูปที่ 1 [4] ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับดินเหนียวสามารถอ้างอิงได้เช่นเดียวกับปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับดินเหนียว



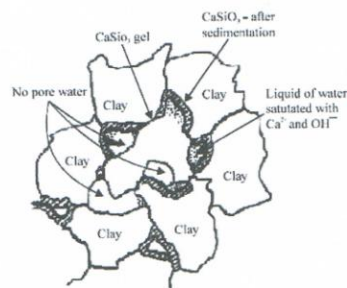
รูปที่ 1 XRD of hydrated lime and calcium carbide
Notation P=Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Cc=Calcite (CaCO_3),
G=Graphite [4]

ปูนขาวถูกใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินตั้งแต่สมัยโรมัน [5] ซึ่งปริมาณที่เหมาะสมสำหรับดินเหนียวจะอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 5 ถึง 10 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมเข้ากับดิน คือ การแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (Cation exchange) ปฏิกิริยาการจับตัวของเม็ดดิน (Flocculation and Agglomeration) และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน คือขบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่ผิวของดินเหนียว เกิดขึ้นเฉพาะในดินเหนียวเท่านั้น เนื่องจากอนุภาคของดินเหนียวเป็นประจุลบเมื่ออยู่ตามธรรมชาติจะดูดซับไอออนบวกไว้เป็นจำนวนและสัดส่วนเท่ากับประจุลบที่มีอยู่ ไอออนบวกที่ถูกดูดซับที่ผิวของดินเหนียวสามารถที่จะถูกไล่ออกโดยไอออนบวกอื่นได้ง่าย ดังนั้นเมื่อผสมปูนขาวเข้ากับดินเหนียว แคลเซียม (Ca^{++}) จากปูนขาวจะเข้าไปไล่ไอออนบวกที่ผิวของดินออกมาทำปฏิกิริยาและเกิดสารประกอบใหม่ขึ้นจนอยู่ในสภาวะสมดุลของไอออนบวก และไอออนลบ [6] ปฏิกิริยาการจับตัวของเม็ดดิน เป็นปฏิกิริยารวมตัว



ที่เกิดที่ผิวและโพรงของดินเหนียวทำให้อนุภาคเล็กๆ รวมตัวเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเกาะกันเป็นกลุ่ม และมีการขัดกันระหว่างเม็ดดินมากขึ้นดังรูปที่ 2 ผลของปฏิกิริยาทั้งสองดังกล่าวทำให้เกิดโพรง และพิกัดหดตัวของดินเหนียวมีค่าลดลง ขณะที่ค่าดัชนีสภาพพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัด และความต้านทานการเสียรูปของดินเหนียวเพิ่มขึ้น ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวเมื่อผสมกับน้ำเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของน้ำในโพรงสูงขึ้น ความเป็นด่างที่สูงขึ้นจะละลายซิลิกาและอลูมินาในดิน ซิลิกาและอลูมินาที่หลอมละลายจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการละลายตัวของปูนขาว [7]

งานวิจัยหลายฉบับทำการศึกษาวัดคุณสมบัติซีเมนต์โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอยเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ในงานโครงสร้าง [8-10] กากแคลเซียมคาร์ไบด์ มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับปูนขาว มอร์ต้าที่ผลิตจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยมีความสามารถในการรับกำลังในช่วงอายุปลายได้คล้ายปูนซีเมนต์ [11]



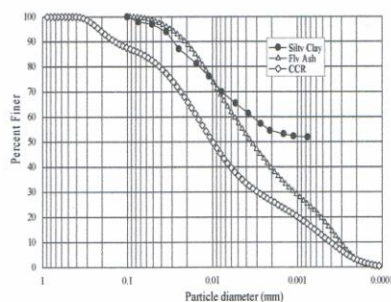
รูปที่ 2 หลักการการปรับปรุงดินด้วยปูนขาว [7]

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ปรับปรุงดินเหนียว อธิบายการพัฒนา กำลังอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย และหาอัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอยที่เหมาะสมในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียว

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

ดินที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นดินเหนียวปนดินตะกอน ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เก็บตัวอย่างในลักษณะแปรสภาพที่ระดับความลึก 2 - 3 เมตรจากผิวดิน เพื่อให้ดินมีลักษณะที่เหมือนกันและมีการปนเปื้อนน้อยที่สุด จากนั้นนำตัวอย่างดินไปผึ่งให้แห้งใช้ค้อนยางทุบดินที่จับตัวกันเป็นก้อนให้แตกตัวออกจากกันโดยให้มีขนาดประมาณ 1 ถึง 2 เซนติเมตร และทำการย่อยดินด้วยเครื่องย่อยดินให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำดินที่ผ่านการย่อยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 อีกครั้งหนึ่ง ดินชนิดนี้จำแนกด้วยระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) เป็นดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกสูง (CH) ความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับ 2.76 พิกัดเหลว และพิกัดพลาสติกเท่ากับร้อยละ 61 และ 22 ตามลำดับ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเมื่อถูกบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 16.9 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 18 กำลังอัดที่สภาวะนี้มีค่าเท่ากับ 1,130 กิโลปาสคาล ค่าอัตราการบวมตัวอิสระ (Free swell ratio) เท่ากับ 1.4 จำแนกได้เป็นการบวมตัวต่ำ ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Capacity, CEC) เท่ากับ 27.6 meq/100g (milliequivalents ต่อ ดินเหนียว 100 กรัม) การกระจายขนาดผละเม็ดดินแสดงดังรูปที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด



รูปที่ 3 การกระจายขนาดคลอของดินเหนียว เถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

2.2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท สาย 5 ผลิตภัณฑ์ก๊าซ จำกัด อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม กากแคลเซียมคาร์ไบด์ถูกเตรียมด้วยวิธีการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นบดด้วยเครื่อง Los Angeles abrasion machine และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับ 2.32 การกระจายขนาดคลอแสดงดังรูปที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปนดิน-ตะกอนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย

Chemical composition (%)	Silty clay	CCR	Fly Ash
SiO ₂	20.10	2.32	45.69
Al ₂ O ₃	7.55	1.57	24.59
Fe ₂ O ₃	32.89	0.16	11.26
CaO	26.15	62.09	9.45
MgO	0.47	0.64	2.87
SO ₃	4.92	0.62	1.57
Na ₂ O	ND	0.02	0.07
K ₂ O	3.17	0.01	2.66
LOI	3.44	32.27	1.23
อื่นๆ	1.31	0.3	0.61

ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในการบดอัดดินเหนียวปนดิน

ตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
ปริมาณความชื้น (ร้อยละของ OWC)	1 ค่า	ปริมาณความชื้นที่ OWC
พลังงานการบดอัด	1 ค่า	บดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน
อายุบ่ม	4 ค่า	7, 28, 60, 90 วัน
ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่ม	3 ค่า	5% 10% และ 20%
อัตราส่วนระหว่างปริมาณกาก-แคลเซียมคาร์ไบด์ต่อปริมาณเถ้าลอย(%)	8 ค่า	0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21,

2.3 เถ้าลอย

เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.39 การกระจายขนาดคลอแสดงดังรูปที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 1

2.4 วิธีทดสอบ

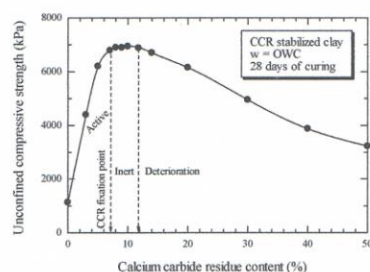
ดินตัวอย่างผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยถูกบดอัดในแบบทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. และสูง 100 มม. ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1557 การศึกษาประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนแรกศึกษาอิทธิพลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อบดอัดดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 50 ส่วนที่สองศึกษาหลักการพัฒนากำลังอัดของดินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย ในช่วงกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เหมาะสม รายละเอียดค่าตัวแปรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2 ตัวอย่างที่ได้จากการบดอัด



จะถูกห่อด้วยพลาสติก และบ่มที่อุณหภูมิห้อง เมื่อได้ตัวอย่างตามระยะเวลาบ่มที่ต้องการ นำตัวอย่างดินไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D2166 อัตราการกดที่ 1.0 มม./นาที

3. ผลการวิจัย

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว และ ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ การพัฒนาของกำลังอัดแกนเดียวถูกจำแนกออกเป็น 3 โซนดังนี้

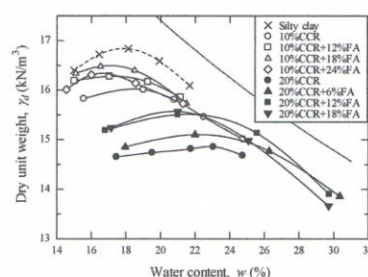


รูปที่ 4 อิทธิพลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อกำลังอัด

ในช่วง Active zone กำลังอัดแกนเดียวจะมีการเพิ่มขึ้นตามปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) โดยปัจจัยที่ทำให้มีกำลังสูงขึ้นเนื่องจากการที่ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ถูกใช้ไปจนหมด ด้วยปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในดินธรรมชาติ ในช่วง Inert zone จะมีการพัฒนากำลังเพียงเล็กน้อยและมีแนวโน้มที่จะลดลง ในช่วง deterioration zone กำลังมีค่าที่ลดลง ในขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ ซึ่งมีผลมาจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีปริมาณมากเกินไปทำให้ไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา

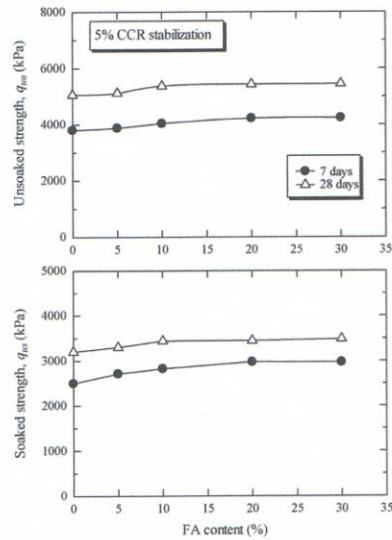
งานวิจัยนี้จะเป็นการอธิบายถึงลักษณะของการปรับปรุงคุณภาพของดินใน 3 โซนโดยการผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยลงไปในดินเหนียวปนดินตะกอน จุดมุ่งหมายที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้คือบทบาทของเถ้าลอยในการปรับปรุงกำลังอัดทั้ง 3 โซน โดยจะ

ใช้วิธีการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวเป็นตัวบ่งบอกถึง การพัฒนากำลังอัดและมีการพิจารณาถึงอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของการแช่น้ำและไม้น้ำแต่ละช่วงเวลา สุดท้ายของรายงานนี้กล่าวถึงกลไกที่ควบคุมการพัฒนา กำลังโดยจะยึดอยู่บนพื้นฐานของผลทดสอบ ซึ่ง มันจะทำให้ง่ายต่อการตัดสินใจที่เหมาะสมของวิศวกร ในการผสมอัตราส่วนทั้งหมดของดิน น้ำ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย

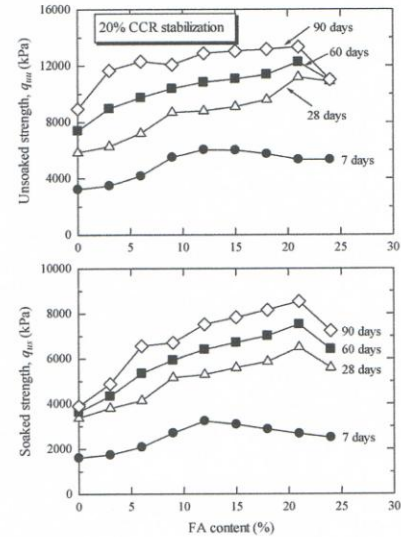


รูปที่ 5 ผลการทดสอบการบดอัดดินผสมเถ้าลอย และ กากแคลเซียมคาร์ไบด์

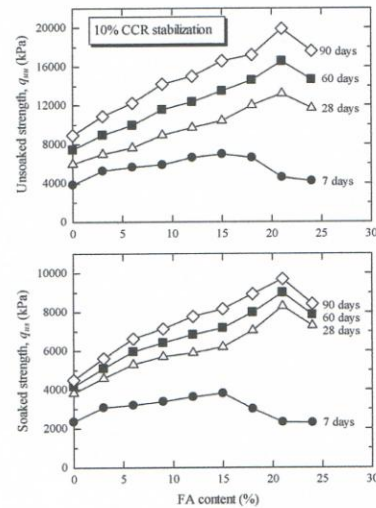
เมื่อทำการบดอัดดินผสมสารเชื่อมประสาน ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลง และปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 การลดลงของหน่วยน้ำหนักแห้งอาจเนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของทั้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของดิน ทำให้หน่วยน้ำหนักต่อปริมาตรลดลง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ยังทำให้ฐานระยะของกราฟการบดอัดกว้างขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้นมีช่วงกว้างขึ้น ผลการทดสอบการบดอัดของดินเหนียวผสม CCR และ FA ที่ปริมาณต่างๆ กัน แสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเหนียวผสม CCR (ไม่มีเถ้าลอย) จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ CCR และมีผลให้ปริมาณความชื้นเหมาะสมเพิ่มขึ้น หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเหนียวผสม FA และ CCR จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ FA



รูปที่ 6 กำลังอัดแบบไม่แช่น้ำและแช่น้ำของดินเหนียว
ผสม CCR และเถ้าลอยใน active zone

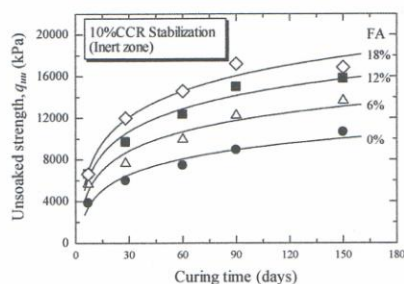


รูปที่ 8 กำลังอัดแบบไม่แช่น้ำและแช่น้ำของดินเหนียว
ผสม CCR และเถ้าลอยใน deterioration zone

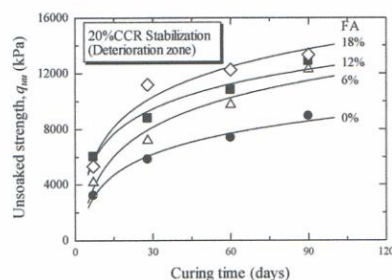


รูปที่ 7 กำลังอัดแบบไม่แช่น้ำและแช่น้ำของดินเหนียว
ผสม CCR และเถ้าลอยใน inert zone

รูปที่ 6-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวแบบไม่แช่น้ำและแช่น้ำของตัวอย่างดินเหนียวผสม CCR และเถ้าลอย ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ใน Active zone, Inert zone และ deterioration zone ตามลำดับ ใน Active zone การเพิ่มเถ้าลอยช่วยปรับปรุงกำลังอัดแกนเดียวเพียงเล็กน้อย ต่างจากใน Inert zone ซึ่งจะมีการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่างมากของกำลังอัดแกนเดียว ที่ระยะเวลาของการบ่มช่วงต้น (น้อยกว่า 7 วัน) ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมคือร้อยละ 15 และที่ระยะเวลากการบ่มนาน (มากกว่า 28 วัน) ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมคือร้อยละ 21 ใน deterioration zone (รูปที่ 8) การพัฒนา กำลังมีค่าน้อยกว่าใน Inert zone



รูปที่ 9 การพัฒนากำลังอัดของดินที่ปรับปรุงด้วย CCR และเถ้าลอยใน inert zone



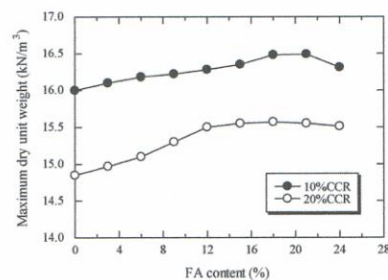
รูปที่ 10 การพัฒนากำลังอัดของดินที่ปรับปรุงด้วย CCR และเถ้าลอยใน deterioration zone

รูปที่ 9-10 แสดงการพัฒนากำลังกับระยะเวลาอัดการบ่มใน inert zone และ deterioration zone ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการพัฒนากำลังทั้ง 2 โซนมีลักษณะ และแสดงได้ด้วย logarithm Function ซึ่งเป็นพฤติกรรมเช่นเดียวกับการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ [14-16] การพัฒนากำลังอัดของดินผสม CCR และเถ้าลอย ตามระยะเวลาการบ่มเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก

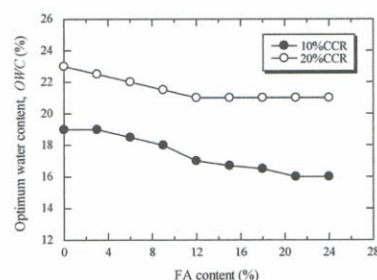
4.อภิปรายผลการทดสอบ

การเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณความชื้นเหมาะสม เมื่อตัวอย่างมีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น (แสดงให้เห็นในรูปที่ 11-12) โดยที่ค่าของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะอยู่ที่

ปริมาณ เถ้าลอยร้อยละ 12 และ 21 สำหรับภาคแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณเถ้าลอยของดินที่ปรับปรุงด้วย CCR และเถ้าลอย



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นเหมาะสมและปริมาณเถ้าลอยของดินที่ปรับปรุงด้วย CCR และเถ้าลอย

การพัฒนากำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณเถ้าลอยใน Active zone มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเพราะวัสดุปอซโซลานิกในดินเหนียวธรรมชาติมีปริมาณเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นปฏิกิริยาปอซโซลานิกใน inert zone แม้ว่า จะมีการเพิ่มขึ้นของ CCR แต่กำลังอัดแทบจะไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง เนื่องจาก CCR ที่เติมเข้าไปมีปริมาณเกินกว่าความสามารถในการทำปฏิกิริยาของดิน เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุทรงกลมและมีส่วนประกอบของวัสดุปอซลาน สามารถช่วยเพิ่มความแน่นและเพิ่มการทำ



ปฏิกิริยา ด้วยเหตุนี้เอง กำลังอัดจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากตามปริมาณเถ้าลอย เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นปฏิกิริยาที่ใช้เวลานาน ความแน่นจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในช่วงอายุบ่มต้น ดังจะเห็นจากปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 12 ซึ่งให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมากที่สุด ปฏิกิริยาปอซโซลานมีอิทธิพลอย่างมากในช่วงอายุบ่มหลัง 7 วัน ดังนั้น ปริมาณปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 21

ตรงกันข้ามกับ inert zone กำลังอัดใน deterioration zone เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย ซึ่งเป็นผลจากปัจจัยทางลบที่เกิดจากความไม่เสถียรของโครงสร้างเมื่อมี Free lime มากเกินไป (Unsoundness due to free lime) แม้ว่ากำลังอัดใน deterioration zone จะมีการพัฒนาบ้างก็ตาม แต่ก็ไม่ได้คุณค่าทางเศรษฐศาสตร์หากเปรียบเทียบกับ inert zone เมื่อพิจารณาปัจจัยทางวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม การปรับปรุงดินด้วย CCR ควรกระทำใน active zone สำหรับกำลังอัดที่ไม่สูงมาก แต่หากต้องการกำลังอัดที่สูง ควรปรับปรุงดินใน inert zone ในทางปฏิบัติ ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมใน inert zone สามารถประมาณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณเถ้าลอย เนื่องจากกำลังอัดที่อายุบ่มต้น (ประมาณ 7 วัน) มักนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างดิน

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การพัฒนากำลังของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยประเด็นที่สำคัญของงานวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุที่มีความเป็นปอซโซลานิกในธรรมชาติสูงคือ มี Ca(OH)_2 สูงถึง 76% ซึ่งสามารถใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวปนดินตะกอนได้
2. ในโซน active นั้นวัสดุปอซโซลานตามธรรมชาติที่อยู่ในดินมีเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ดังนั้นการเติมเถ้าลอยในโซนนี้จึงไม่มีผลต่อ

การเพิ่มกำลังอัด เถ้าลอยจะช่วยเพิ่มกำลังได้ในโซน inert เถ้าลอยจะช่วยปรับปรุงความแน่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่วนในโซน deterioration ไม่แนะนำให้ใช้เถ้าลอยเนื่องจากความไม่คงตัว (unsoundness) ที่เกิดจากการมีแคลเซียมอิสระมากเกินไปผลทำให้กำลังลดลง

3. การพัฒนากำลังของดินเหนียวปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยทั้งที่สภาวะแช่น้ำและไม่แช่น้ำมีพฤติกรรมที่คล้ายกับการปรับปรุงดินเหนียวปนดินตะกอนด้วยซีเมนต์ แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยสามารถที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับทุนสนับสนุนในการทำวิจัย และบริษัทสาย 5 ผลิตภัณฑ์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อวัสดุในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทางหลวง (2533), "มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)", มาตรฐานที่ ทล.-ม. 204/2533
- [2] 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.
- [3] มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์ (2545), "การพัฒนาการใช้ประโยชน์เถ้าลอย-ลิกไนต์ในไทย", หนังสือรางวัลนักเทคโนโลยีดีเด่น ประจำปี พ.ศ.2545 หน้า10-16
- [4] Fabio A.C., Heloisa C.F., Rafael G.P., Maria A.C., Vanderley M.J. (2009), "Carbide lime and industrial hydrated lime characterization", Science Direct, Powder Technology 195, 143-149
- [5] ชัชวาล เศรษฐบุตร (2536), "คอนกรีตเทคโนโลยี", กรุงเทพฯ ,บริษัทคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.



- [6] สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน (2535), "ปฐพีวิทยาเบื้องต้น", ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [7] Van Impe, W.F. (1989), "Soil improvement techniques and their evolution", Balkema.
- [8] สุธี สิมปนชัยพรกุล, บุษกร อมรวิทย์ และ ชีระพงษ์ วงษ์-เรือง (2537), "การศึกษากำลังอัดของวัสดุประสานของกากแคลเซียมคาร์ไบด์", วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร-บัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [9] ชรินทร์ นมรัตน์, วันชัย สะตะ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2545), "ผลกระทบของปริมาณของวัสดุประสานต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหิน ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, 23-25 ตุลาคม, โรงแรมโซฟิเทลราชาอودิด, จ.ขอนแก่น, หน้า MAT-178 ถึง MAT-183
- [10] ปิตินันต์ กร้ามมาตร, สุวิชาติ มาตย์ภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เวงพิสสาร (2539), "การศึกษา กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ผสมเถ้า-ถ่านหิน", วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปีที่ 7 ฉบับที่ 2
- [11] 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
- [12] Consoli, N. C., Prietto, P. D. M., Carraro, J. A. H., and Heineck, K. S. (2001), "Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, September 2001, pp. 775-782
- [13] 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.
- [14] Horpibulsuk, S., Rachan, R., Raksachon, Y., 2009. Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay. Soils and Foundations 49(1), 85-98.
- [15] Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S., 2003. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis. Geotechnique 53(4), 439-444.
- [16] Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Raksachon, Y., Suddepong, A., 2010. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay based on microstructural considerations. Construction and Building Materials 24, 2011-2021



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17
คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
59 หมู่ที่ 1 ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000
โทรศัพท์ 0-4272-5033-5 โทรสาร 0-4272-5034 Web site: ncce17.csc.ku.ac.th



วันที่ 12 เมษายน 2555
เรื่อง ผลการพิจารณาบทความฉบับสมบูรณ์
เรียน นายวัฒนพงศ์ ภูมิโคกรักษ์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเพื่อเข้าร่วมการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

รหัสบทความ	GTE040
ชื่อบทความ	กำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนปรับปรุงด้วย กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย
ชื่อผู้แต่ง	นายวัฒนพงศ์ ภูมิโคกรักษ์

บัดนี้ บทความฉบับสมบูรณ์ของท่านได้ผ่านการพิจารณาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว มีผลการพิจารณา คือ **รับตีพิมพ์บทความลงในเอกสารประกอบการประชุม (Proceedings)**

อนึ่งจดหมายการรับรองการตีพิมพ์บทความฉบับนี้จะไม่สมบูรณ์ หากไม่มีใบประกาศนียบัตรยืนยันการนำเสนอบทความ และท่านสามารถรับเอกสารผลการพิจารณาบทความฉบับสมบูรณ์(ฉบับจริง) ซึ่งจะมอบให้ท่านในงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17 ระหว่างวันที่ 9 – 11 พฤษภาคม 2555 ณ โรงแรมเซ็นทารา แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ อุดรธานี ทั้งนี้สิทธิการนำเสนอบทความของท่านเป็นไปตามประกาศทางเว็บไซต์ <http://ncce17.csc.ku.ac.th/news5.php>

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และทางคณะกรรมการจัดการประชุมขอขอบพระคุณท่านที่ได้เข้าร่วมการประชุมในครั้งนี้ มา ณ โอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ พูนวดีน

ประธานกรรมการอำนวยการ

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17

ประวัติผู้เขียน

นายวัฒนพงศ์ ภูมิโคกรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม 2523 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2548 และเข้าทำงานในบริษัทเอกชนด้านซ่อมแซมโครงสร้างอาคารในจังหวัดนครราชสีมา เป็นเวลา 3 ปี และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2551 โดยคณะศึกษามีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 เรื่อง ซึ่งมีรายละเอียดปรากฏในภาคผนวก ก.

