

กำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์
ผสมเถ้าลอยบดอัด

นายยุทธนา รักษาชนม์

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2551

**UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH AND
MICROSTRUCTURE OF COMPACTED
CEMENT-FLY ASH STABILIZED CLAY**

Yutthana Raksachon

**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 2008**

กำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเกล็ดลอยบดอัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ

(ผศ. ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ยุทธนา รักษาชนม์ : กำลังอัดแกนเดี่ยวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสม
เถ้าลอยบดอัด (UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH AND MICROSTRUCTURE
OF COMPACTED CEMENT-FLY ASH STABILIZED CLAY) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 98 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษา กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด โดยแปรผัน
ตัวแปร 4 ตัว ได้แก่ อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์ ปริมาณความชื้น อายุบ่ม และ ความละเอียดของ
เถ้าลอย และอธิบายกำลังอัดสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคของดิน ซึ่งศึกษาด้วย Scanning Electron
Microscope (SEM), Mercury Intrusion Porosimeter Test (MIP) และ Thermal Gravimetry
Analysis (TGA) จากผลการวิเคราะห์ SEM พบว่า เถ้าลอยจะถูกล้อมรอบด้วยผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์
แต่ผิวของเถ้าลอยยังคงมีลักษณะเรียบและกลม ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาเถ้าลอยในงานคอนกรีต
ผิวของเถ้าลอยจะถูกกัดกร่อนซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก แสดงว่าเถ้าลอยใน
ดินซีเมนต์แทบจะไม่ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก กำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะ
ได้รับการอิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว ผลการศึกษา MIP แสดงให้เห็นอิทธิพลเถ้าลอย
ในดินซีเมนต์ เถ้าลอยจะช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคดินซีเมนต์ทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมด
เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนแทนที่ และอิทธิพลของการกระจายตัวมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดสามารถอธิบาย
ได้จากผลการศึกษา TGA ปริมาณ Ca(OH)_2 จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่ปูนซีเมนต์ ดังนั้นเรา
สามารถสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแปรผันตามอิทธิพลร่วม (ปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์
และการกระจายตัว) อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์จะถูกควบคุมด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ ขณะที่
อิทธิพลของการกระจายตัวถูกควบคุมด้วยปริมาณเถ้าลอย (อัตราส่วนแทนที่) กำลังอัดที่อัตราส่วน
แทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม สำหรับทุก ๆ อายุ
บ่ม ทั้งเถ้าลอยหยาบและเถ้าลอยละเอียดมีค่าสูงสุด เนื่องจากอิทธิพลร่วมมีความเหมาะสม ทำให้มี
ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) สูงที่สุด

สาขาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

YUTTHANA RAKSACHON : UNCONFINED COMPRESSIVE
STRENGTH AND MICROSTRUCTURE OF COMPACTED
CEMENT-FLY ASH STABILIZED CLAY. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 98 PP.

UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH AND MICROSTRUCTURE OF
COMPACTED CEMENT-FLY ASH STABILIZED CLAY

This present research investigates strength development in cement-fly ash stabilized clay with four factors : replacement ratio, water content, curing time, fly ash fineness from microstructural considerations. The microstructural analysis is carried out using Scanning Electron Microscope (SEM), Mercury Intrusion Porosimeter Test (MIP) and Thermal Gravimetry Analysis (TGA). SEM photos show that some of the Surfaces of fly ash particles are coated with layers of amounts of hydration products. However, they are still smooth. It is thus concluded that pozzolanic reaction is minimal. This finding is different from concrete technology where the precipitation in the pozzolanic reaction is indicated by the etching on fly ash surface. MIP results show that fly ash improves the strength of cement stabilized clay as a dispersing material. It disperses large clay-cement clusters into small clusters, hence, the increase in reactive surface. Dispersion effect on the cementitious products is illustrated by TGA results. Induced Ca(OH)_2 by dispersion increases with replacement ratio and fly ash fineness. To conclude, strength development is controlled by cementitious products due to combined effect: hydration and dispersion. Cementitious products due to hydration are governed by cement content, while cementitious products due to dispersion by fly ash content and fineness. Water content of 1.2OWC and 10%

replacement ratio are regarded as the effective mixing condition for the stabilization, exhibiting the highest cementitious products.

School of Civil Engineering

Academic Year 2008

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษาชี้แนะแนวทางการเขียนและช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวัชรเดช อาจารย์ ดร.ทนงศักดิ์ พิศาลสิน อาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำการทำวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ ที่กรุณาให้การแนะนำและตรวจรูปแบบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดูตลอดจนส่งเสริมการศึกษา รวมถึงภรรยา และลูก ๆ ที่ให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมาอีกทั้งขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ยุทธนา รักษาชนม์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (อังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ต
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบข่ายของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปรัชสน่วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์	4
2.2 โครงสร้างของดินซีเมนต์	5
2.3 ถ้ำลอยและส่วนประกอบทางทางเคมีของถ้ำลอย	6
2.4 ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของถ้ำลอยและปฏิกิริยาทางเคมี	8
2.5 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของถ้ำลอย	9
2.5.1 รูปร่างของถ้ำลอย	10
2.5.2 ความละเอียด	11
2.5.3 การหาค่าดัชนีกำลัง.....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6	เทคนิคการทดแทนเถ้าลอยในงานคอนกรีต.....	12
2.6.1	ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน.....	12
2.6.2	ใช้เป็นมวลละเอียดเพิ่มในคอนกรีต.....	12
2.6.3	ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์และใช้เป็นมวลรวมละเอียด.....	12
2.7	การศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ	13
2.7.1	กำลังอัด.....	13
2.7.2	ความละเอียด.....	14
2.7.3	การต้านทานการกัดกร่อน.....	14
2.8	ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์	15
2.8.1	ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์	15
2.8.2	ปริมาณดินเหนียวและชนิดของแร่ดินเหนียว	20
2.8.3	การผสมและการบดอัด	22
2.8.4	การบ่ม	25
2.8.5	สารผสมร่วม	27
2.9	โครงสร้างจุลภาค	28
2.10	เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	33
2.10.1	การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope	34
2.10.2	การทดสอบด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimeter	34
2.10.3	การวิเคราะห์ Thermal Gravimetry Analysis, TGA	35
2.10.4	ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก	36
2.11	ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	36
2.12	บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน	38
2.12.1	กำลังต้านทางแรงเฉือนของดิน.....	38
2.12.2	การอัดตัวคายน้ำ.....	38
2.12.3	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.1	บทนำ.....	42
3.2	การเก็บและการเตรียมตัวอย่างดิน	45
3.2.1	การเตรียมตัวอย่างดิน	45
3.2.2	ปูนซีเมนต์	45
3.2.3	เถ้าลอย	45
3.3	คุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง.....	45
3.3.1	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น.....	45
3.3.2	ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)	46
3.3.3	การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน โดยใช้ตะแกรงร่อน.....	46
3.3.4	การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน โดยใช้ไฮโดรมิเตอร์.....	46
3.3.5	ขีดจำกัดเหลว (liquid limit).....	46
3.3.6	ขีดจำกัดพลาสติก (plastic limit)	46
3.4	คุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย.....	46
3.4.1	ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย	46
3.4.2	ทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย	46
3.4.3	วิเคราะห์การกระจายของอนุภาค (Particle Size distribution).....	46
3.4.4	ถ่ายภาพขยายกำลังสูงสุดของเถ้าลอย	46
3.4.5	หาลูกประกอบทางเคมีของเถ้าลอย	46
3.5	การบดอัดดิน	48
3.5.1	การทดสอบการบดอัดของดินไม่ผสมซีเมนต์	48
3.5.2	การทดสอบการบดอัดของดินผสมซีเมนต์ และการหาปริมาณ ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม	48
3.5.3	การบดอัดตัวอย่างดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย.....	49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6	การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, q_u).....	50
3.6.1	นำตัวอย่างดินออกจากฟิล์มพลาสติก.....	50
3.6.2	นำตัวอย่างดินเข้าเครื่องทดสอบ (Unconfined Compression Testing Machine).....	50
3.6.3	เก็บตัวอย่างดินหลังทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว	50
3.7	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด.....	51
3.7.1	Freeze drying	51
3.7.2	การทดสอบด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimeter	52
3.7.3	การทดสอบ Thermal Gravimetry Analysis	54
3.7.4	การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope, (SEM).....	55
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด	57
4.1	บทนำ.....	57
4.2	คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย.....	57
4.3	กราฟการบดอัดของดินเหนียวที่ไม่ผสมซีเมนต์	61
4.4	ผลศึกษาการบดอัดและแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์	62
4.5	ผลศึกษาการบดอัดและแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย	66
4.6	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	71
4.6.1	ภาพถ่ายขยายดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์	71
4.6.2	ภาพถ่ายขยายดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย	72
4.6.1	การกระจายขนาดโพรง	77
4.6.1	ผลการศึกษา TGA.....	80
4.7	การพัฒนากำลังอัดดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเทียบกับเวลา	85
5	บทสรุป	88
5.1	สรุปผลการวิจัย	88
5.1.1	กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด.....	88
5.1.2	ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป	89

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง	90
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	97
ประวัติผู้เขียน	98

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-6187
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533 – 25418
2.3	ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-61810
2.4	ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง12
2.5	กำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน (ทรงพล บุญมาดี, 2529)20
2.6	เครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างดิน (Kamon, 1979)33
3.1	จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการบดอัดดินเหนียวผสมซีเมนต์43
3.2	จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการบดอัดดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย44
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง58
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปนดินตะกอน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย.....58
4.3	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินตัวอย่าง62
4.4	คุณสมบัติพื้นฐานของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนแทนที่ต่าง ๆ67
4.5	กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่าง ๆ70
4.6	Ca(OH) ₂ ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ C: F = 90:10 ที่อายุบ่ม 7 วัน80
4.7	Ca(OH) ₂ ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่าง ๆ82

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell and Jack, 1966)6
2.2	Scanning Electron Microscope (SEM) ใกล้องย (ขยาย 1,000 เท่า)11
2.3	อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Felt, 1955)16
2.4	อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay (Felt, 1955)16
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์ (Metcalf, 1977)17
2.6	เปรียบเทียบกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Soil 2a-6) และ Silty Clay Loam (Soil 4d) ผสมซีเมนต์ประเภท 1 และประเภท 3 เมื่อผสมเสร็จแล้วทดสอบทันที (Felt,1955)17
2.7	ขอบเขตปฏิสัมพันธ์ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ (Horpibulsuk, S. et al., 2003)18
2.8	กราฟกำลังอัดแกนเดียวสัมพันธ์กับปริมาณซีเมนต์ (Katkan, W., 2004)19
2.9	อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อค่า Modulus of Elasticity ของดินซีเมนต์ (Reinhold, 1955)21
2.10	อิทธิพลของแรงแดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ (Davidson et al., 1962)21
2.11	อิทธิพลของแรงแดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ (Davidson et al., 1962)22
2.12	ผลของระยะเวลาที่ใช้ผสมต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Felt, 1955)23
2.13	การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้ระยะเวลาการบดอัดนานขึ้น (Ingles and Metcalf, 1972)24
2.14	อิทธิพลของความหนาแน่นต่อกำลังอัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (Felt, 1955)25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิที่ใช้บ่มดินซีเมนต์ (Clare and Pollard, 1954)	26
2.16 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Leadabrand, 1956)	26
2.17 อิทธิพลของปริมาณปูนขาวต่อกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ (Maclean et al., 1952)	27
2.18 ชนิดของโครงสร้างดินเหนียว (Yong and Warkentin, 1966, 1975)	28
2.19 โครงสร้างดินที่ตะกอนที่เกิดจากผลกระทบของไฟฟ้าเคมี (Lambe, 1958).....	29
2.20 การเข้าแทนที่และการรวมตัวของอนุภาคและช่องว่างชนิดต่างๆ	30
2.21 การกระจายของช่องว่างในเม็ดดิน (Nagaraj et al., 1990)	31
2.22 การจัดเรียงตัวของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj, 1990)	32
2.23 โครงสร้างของดินเหนียว (a) ดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj, 1990) (b) ดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน (Horpibulsuk, S. et al., 2003)	32
2.24 หลักการของการวัดขนาดของช่องว่างในเม็ดดิน	35
2.25 อนุภาคถ้ำลอยหายาบ (a) อายุบ่ม 28 วัน (b) อายุบ่ม 90 วัน (Chindapasirt, P., 2005)	37
2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล (Horpibulsuk, S. et al., 2004)	39
2.27 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียว กรุงเทพไร้พันธะเชื่อมประสาน (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน , 2546)	39
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียว ไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน , 2546)	40
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer).....47
3.3	กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope)47
3.4	เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS – 93248
3.5	ตัวอย่างการควบคุมปริมาณความชื้น49
3.6	เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด50
3.7	การเตรียมตัวอย่าง Freeze dry51
3.8	เครื่อง Freeze dry52
3.9	เครื่อง Iron sputtering device53
3.10	เครื่อง Scanning Electron Microscope, (SEM)53
3.11	เครื่อง Mercury Intrusion Porosimeter54
3.12	เครื่อง Simultaneous TGA Analyzer56
4.1	การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย59
4.2	ภาพถ่าย SEM (a) ดินตัวอย่าง ที่กำลังขยาย 3000 เท่า (b) PC ที่กำลังขยาย 500 เท่า (c) Original Fly Ash (OFA) ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ (d) Classified Fly Ash (CFA) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า60
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น กับความหนาแน่นแห้ง ที่พลังงาน การบดอัด 592.5 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร61
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดกับปริมาณความชื้นของดิน ซีเมนต์63
4.5	ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวซีเมนต์64
4.6	ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวซีเมนต์64
4.7	โชนการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์65
4.8	กราฟการบดอัดดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียด ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 60 วัน68
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียด ที่อัตราส่วนการแทนที่ 80: 20 ที่อายุบ่มต่าง ๆ69
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนการแทนที่ ที่อายุบ่มต่าง ๆ70
4.12	(a) ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัด ที่ <i>OWC</i> ภายใต้พลังงาน การบดอัดแบบมาตรฐาน และ (b) ดินตัวอย่างไม่บดอัด71
4.13	ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัดภายใต้ พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน72
4.14	อนุภาคเถ้าลอยหยาบ (a) อายุบ่ม 28 วัน และ (b) อายุบ่ม 90 วัน (Chindapasirt, P., 2005)73
4.15	ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 28 วัน74
4.16	ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 60 วัน75
4.17	ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่ม 28 วัน76
4.18	ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่ม 60 วัน77
4.19	การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อายุบ่มต่าง ๆ78
4.20	การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 60 วัน79
4.21	การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดกับเวลา86

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing Material
CAH	Calcium aluminate hydrate
Ca(OH) ₂	Calcium hydroxide
cc/g	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
C:F	อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอย
CFA	Classified fly ash
CH	ดินเหนียวที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูง
CSH	Calcium silicate hydrate
D_{50}	median particle size
F	อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์
H	ปริมาณ Ca(OH) ₂ จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่อัตราส่วนการแทนที่ใด ๆ
kJ/m^3	กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร
kPa	กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
LL	ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit)
m	ปริมาณน้ำ (Moisture Content)
MIP	Mercury Intrusion Porosimeter
OFA	Original fly ash
OWC	ปริมาณน้ำเหมาะสม (Molding water content)
PC	Portland cement
PI	ดัชนีพลาสติก (Plastic Index)
PL	ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)
q_u	กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength)
SEM	Scanning Electron Microscope
T	ปริมาณ Ca(OH) ₂ ของดินซีเมนต์
TGA	Thermal Gravimetry Analysis

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

USCS	Unified Soil Classification System
UTM	Universal Testing Machine
w/C	ปริมาณน้ำในมวลดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (Soil – water/cement ratio)
γ_{dry}	หน่วยน้ำหนักดินแห้ง (Dry unit Weight)
$\gamma_{d,max}$	หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด (Maximum Dry unit Weight)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา

การเพิ่มกำลังอัดของดินด้วยการผสมปูนซีเมนต์ได้ทำกันมานานแล้ว และภายหลังได้มีการนำปูนขาวและวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) อื่นมาผสมกับดินเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนค่าก่อสร้าง วัสดุปอซโซลานที่เป็นที่ยอมรับในงานโครงสร้างทั่วไปโดยเฉพาะในประเทศไทย ได้แก่ เถ้าลอย มีการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ มาใช้ในการผสมคอนกรีต เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์มีอย่างแพร่หลาย งานวิจัยหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นถึงข้อดีในการใช้เถ้าลอย (ปริญญา จินดาประเสริฐ (2547), สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล และคณะ (2540), Owens (1979), Jaturapitakkul, C. (1999), Chindaprasirt, P. et al. (2001) Chindaprasirt, P. et al. (2004), Thumasujarit, K. and Tangtermsirikul, S. (2004) แต่การนำเถ้าลอยมาใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ในงานดินซีเมนต์ยังมีไม่มากนัก

ผลการศึกษาของดินซีเมนต์ส่วนใหญ่ (Kamon and Bergado (1992), Kamaluddin and Balasubramaniam (1995) และ Horpibulsuk, S. et al. (1999)) สามารถให้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของดินซีเมนต์กับสัดส่วนของซีเมนต์ ความชื้น และพลังงานการบดอัด แต่ไม่มีคำอธิบายว่า ซีเมนต์และพลังงานการบดอัดเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดินอย่างไร

Horpibulsuk, S. et al. (2004) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ 2 อย่างได้แก่ สารเชื่อมประสาน (Cementation bond) และลักษณะการจัดเรียงตัวของกลุ่มเม็ดดิน (Fabric) เป็นตัวควบคุมกำลังอัด การศึกษาโครงสร้างจุลภาคจะช่วยให้สามารถสร้างงานวิจัยได้ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น วิธีการทำนายพฤติกรรมทางวิศวกรรม (การอัดตัวคายน้ำและกำลังอัด) ของดินซีเมนต์ที่เสนอโดย Horpibulsuk, S. et al. (2003) , Lorezo and Bergado (2004) และ Horpibulsuk, S. et al. (2005 และ 2006) เป็นต้น

Nontananandh, S. et al. (2005) ได้ทำการศึกษาของโครงสร้างดินซีเมนต์ที่อายุบ่มต่าง ๆ โดยอาศัยภาพถ่ายจุลภาคของดินซีเมนต์ได้ถูกเริ่มในประเทศไทย โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ของซีเมนต์ทำให้โครงสร้างดินแน่นขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลง และกำลังอัดสูงขึ้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น สุขสันต์ หอพิบูลสุข และคณะ (2549) และ Horpibulsuk, S. et al. (2006) ทำการศึกษากำลังอัดสัมพันธ์กับขนาดของช่องว่างของดินซีเมนต์เถ้าลอย โดยทำการทดสอบการ

กระจายขนาดของช่องว่างด้วยปรอท (Mercury Intrusion Porosimeter Test) และการดูภาพขยายด้วยกล้องส่องกราด (Scanning Electron Microscope) พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์แฉ่ำลดยแปรผันตามขนาดของช่องว่างของก้อนดินซีเมนต์แฉ่ำลย แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาเหล่านี้ยังขาดความสมบูรณ์ เนื่องจากยังขาดการทดสอบ Thermal Gravimetry Analysis ซึ่งสามารถบอกปริมาณสารเชื่อมประสานในรูปของผลิตภัณฑ์ทางเคมี ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

การศึกษากำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมแฉ่ำลย และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของดินด้วย Scanning Electron Microscope, Mercury Intrusion Porosimeter Test และ Thermal Gravimetry Analysis ทำให้ทราบปริมาณสารเชื่อมประสาน ขนาดและปริมาตรรวมของโพรง และจะช่วยให้สามารถอธิบายการพัฒนาำลังอัดได้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนแฉ่ำลยที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในดินซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มกำลังอัดดินซีเมนต์ผสมแฉ่ำลย โดยมีวัตถุประสงค์รองดังนี้

1.2.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดและโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของดินเหนียวซีเมนต์ผสมแฉ่ำลยบดอัด เมื่อแปรผันตัวแปรควบคุม (อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์ ปริมาณความชื้น อายุบ่ม และ ความละเอียดของแฉ่ำลย)

1.2.2 สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคของดิน

1.3 ขอบข่ายของงานวิจัย

การศึกษากำลังอัดแกนเดียว และโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมแฉ่ำลยบดอัดในครั้งนี้ต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมแฉ่ำลยที่เกิดขึ้นจากสารเชื่อมประสาน (ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์) และขนาดและปริมาตรรวมของโพรง ของดินซีเมนต์ผสมแฉ่ำลยดินที่ใช้ในการศึกษา คือ ดินเหนียวแปรสภาพจากบริเวณอาคารสุรนิเวศน์ 9 ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ระดับความลึก 3.00 - 4.00 เมตร จากผิวดิน ดินตัวอย่างมีค่าดัชนีพลาสติกเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ (อภิชาติ คำภาหาล้า, 2548) จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง สารเชื่อมประสาน (ซีเมนต์ผสมแฉ่ำลย) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายล้าง และแฉ่ำลยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การศึกษาจะแปรผันตัวแปรควบคุม 4 ตัวได้แก่ อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์ ปริมาณความชื้น อายุบ่ม และ ความละเอียดของแฉ่ำลย

1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง ปูนซีเมนต์ และ เถ้าลอย

1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติการบดอัดของดินตัวอย่างแบบไม่ผสมสารเชื่อมประสาน และผสมสารเชื่อมประสาน เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum Dry Unitweight) และหาปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content) รวมถึงกราฟการบดอัด (Compaction Curve) ของดินโดยบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) และ แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)

1.3.3 ศึกษาหาปริมาณสารเชื่อมประสานของดินซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากผลการศึกษากำลังอัดแกนเดียว วิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)

1.3.4 ศึกษา กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย โดยการผสมดินเข้ากับปริมาณสารเชื่อมประสานดินซีเมนต์ที่เหมาะสม และแปรผันอัตราส่วนปริมาณสารเชื่อมประสานโดยการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ใช้เถ้าลอยในการผสม 2 ขนาด ได้แก่ เถ้าลอยหยาบ (Original Fly Ash) และ เถ้าลอยละเอียด (Fineness Fly Ash) ปริมาณน้ำใช้ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ทำการบดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน นำตัวอย่างไปบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิเมื่อบ่มตัวอย่างได้อายุบ่มตามกำหนด นำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine จนกระทั่งตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยวิบัติทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ และนำตัวอย่างก่อนดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่สนใจไปทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

1.3.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย จะประกอบด้วย การดูภาพขยายการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยด้วยเครื่องมือ Scanning Electron Microscope การหาขนาดและปริมาณช่องว่างด้วยเครื่องมือ Mercury Porosimetry Analyzer และ การหาปริมาณของผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ด้วยเครื่อง Simultaneous Thermal Gravimetry Analyzer

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงอัตราส่วนของเถ้าลอยที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม ทำให้ลดค่าใช้จ่ายงานก่อสร้างดินซีเมนต์

1.4.2 ได้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบนพื้นฐานของผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์

แนวความคิดเรื่องการปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นโดยผสมกับวัสดุอื่นได้เกิดขึ้นมาหลายพันปีแล้ว Terrel et al. (1979) บันทึกไว้ว่าเมื่อประมาณ 5,000 ปีก่อน ได้มีการผสมดินกับปูนขาวหรือกับสาร Pozzolans สารนี้จะทำให้ค่าดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index, PI) ของดินลดลง ซึ่งส่งผลให้ดินรับแรงอัดได้สูงขึ้น และแนวทางนี้ได้ถูกนำมาใช้ปฏิบัติสืบต่อกันมาหลายศตวรรษ

Portland Cement Association (1959) ได้มีการบันทึกไว้ว่า Development Department ของ Portland Cement Association ในปี 1935 ได้ศึกษาค้นคว้าจนได้ส่วนผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์กับดินหลาย ๆ ชนิด และจากการศึกษานั้นได้เสนอวิธีทดสอบและระเบียบวิธีการก่อสร้างที่ให้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือรูปแบบของวิธีการทดสอบสำหรับดินซีเมนต์ที่ได้พัฒนาขึ้น ได้แก่ Moisture - Density, Wet - Dry Test และ Freeze - Thaw Test เป็นต้น วิธีการทดสอบต่าง ๆ เหล่านี้ ต่อมาได้ถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานการทดสอบของ American Society for Testing Material (ASTM) ในปี 1944 และ American Association of State Highway Officials (AASHTO) ในปี 1945

Davidson (1961) กล่าวถึงวิวัฒนาการของดินซีเมนต์ไว้ว่า กิจการรับเหมาก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับการสร้างถนนในเมือง Sarasota มลรัฐ Florida ได้ก่อตั้งในปี 1915 น่าจะเป็นการเริ่มต้นครั้งแรกในโลกเกี่ยวกับถนนดินซีเมนต์ จากหลักฐานพบว่าถนน Oak ได้ถูกสร้างขึ้นจากการขุดเอาดิน shell จากอ่าวเม็กซิโกมาผสมกับทรายและซีเมนต์ แล้วนำส่วนผสมที่ได้มาโยกเกลี่ยและบดอัดด้วยรถบดไอน้ำขนาด 10 ตัน วิธีดังกล่าวเป็นวิธีการก่อสร้างที่ไม่เป็นไปตามแผนที่วางเอาไว้ตอนแรกเนื่องจากเครื่องผสมคอนกรีตเสียหาย Davidson (1961) ยังได้กล่าวถึงรายงานของ Mills (1935 และ 1936) ว่าในปี 1932 South California State Highway Department ได้ทำการศึกษาค้นคว้าส่วนผสมของดินและซีเมนต์ภายใต้การดูแลของ Dr. C.H. Morefield การทดลองหลายเรื่องได้ถูกพัฒนาขึ้นในปี 1933 และ 1934 และได้รายงานผลการทดสอบว่า ดินกับซีเมนต์เป็นวัสดุที่สามารถผสมเข้ากันได้ดี และสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางที่มีราคาถูกลงได้

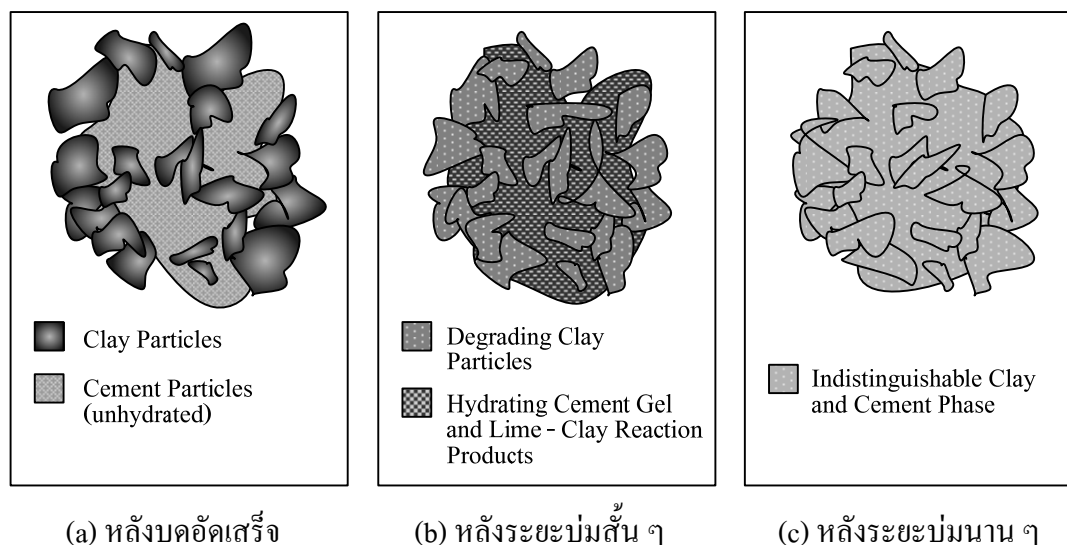
Terrel et al. (1979) and Davidson (1961) ได้บันทึกตรงกันว่า เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองของ South California State Highway หน่วยงาน Bureau of Public Roads และ Portland

Cement Association ได้ร่วมมือกันก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ยาว 1.5 ไมล์ ใกล้กับเมือง Johnsonville ขึ้นในปี 1935 ถนนสายนี้ต่อมากลายเป็นที่รู้จักกันว่าเป็น โครงการแรกของวิศวกรรมถนนดินซีเมนต์

Davidson (1961) ได้รายงานความสำเร็จของ South California State Highway ทำให้อีกหลายรัฐของสหรัฐอเมริกา นำวิธีนี้ไปใช้ ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ดินซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ก่อสร้างสนามบินจำนวนมาก ระหว่างปี 1941 ถึง 1944 มีปริมาณการใช้มากถึง 22 ล้านตารางหลา แม้ในช่วงนั้นจะมีการก่อสร้างถนนปริมาณน้อย แต่หลังสงครามโลกยุติ การก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ก็กลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง นอกเหนือจากการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์แล้ว ยังมีการใช้ดินซีเมนต์เป็นชั้นรองพื้นทางของถนนคอนกรีต ไหล่ทางของถนน ที่จอดรถ คลังเก็บสินค้า และ ทำเป็นชั้นรองพื้นอ่างเก็บน้ำ และ คูคลอง นอกจากการใช้ถนนดินซีเมนต์จะแพร่หลายในสหรัฐอเมริกาแล้วยังมีการนำไปใช้ในประเศอังกฤษ แอฟริกาใต้ ตะวันออกกลาง อเมริกาใต้ และ เยอรมัน ในเวลาต่อมา

2.2 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell and Jack (1966) ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของดินซีเมนต์โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบในโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อถูกบดอัดอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1(a) ในช่วงอายุบ่มอันสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันกับน้ำ เป็นผลให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อยปูนขาวออกมา ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่ในดินและเกิดการแยกตัว หลังจากนั้นซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1(b) สำหรับช่วงอายุบ่มยาวนานปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันจะเกิดอย่างสมบูรณ์ทำให้ซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วทั้งก้อนของดินซีเมนต์ เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.1(c)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell and Jack, 1966)

2.3 เถ้าลอยและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอย หรือเถ้าถ่านหิน (fly ash หรือ pulverized fuel ash) ได้จากการเผ่าถ่านหินในโรงงาน โรงไฟฟ้าถ่านหิน เถ้าลอยจะถูกคัดจับไว้ด้วยตัวคัดจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล มีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (pozzolan) ตั้งเพราะที่ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกา และ อลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้ง และป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร Ca(OH)_2 และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (cementitious substance) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และช่วงเวลาของการเผา ดังนั้นคุณภาพ และความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน

ก่อนที่จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมี และทางกายภาพของเถ้าลอย ควรทราบกฎเกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต มีหน่วยงานวิจัยหลายหน่วยงานได้กล่าวถึงคุณสมบัติ และข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิงถึงจะมี 2 แห่งด้วยกันคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมี และทางกายภาพของเถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพ และคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้งาน

American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence แก่ล่อยทั่วไปประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผา และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา มาตรฐาน ASTM C-618 แยกแ่ล่อยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และ เหล็ก ในแ่ล่อยโดยที่ Class F และ Class C ต้องมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าแ่ล่อยสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กำหนดไม่ให้เกิน 5 เพราะซัลเฟอร์มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด ระยะเวลาก่อตัวได้ และยังมีผลเสียต่อกอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

Chemical Composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ 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 (LOI)), max %	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของ โซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5

ความชื้นของแ่ล่อยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับแ่ล่อย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในแ่ล่อยหากมี LOI มาก การควบคุมในด้าน air entrainment ของคอนกรีตสดจะทำให้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่มในคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วแ่ล่อยจากโรงไฟฟ้า

จะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 ปริมาณอัลคาไลในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O Equivalent) มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะถ้าลอมมีปริมาณ CaO สูง จะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ alkali-aggregate ขึ้นได้ ถ้าต้องการนำลอมที่มีปริมาณอัลคาไลมากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยา จะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของลอมลิกไนต์แม่เมาะ พ.ศ. 2433 - 2541 คุณสมบัติโดยทั่วไป มีปริมาณออกไซด์ของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณ CaO จะสูงกว่าร้อยละ 10 ปริมาณ LOI ต่ำมาก คือน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือ ปริมาณ Fe_2O_3 จะสูงกว่าลอมแหล่งอื่นที่มีอยู่ในประเทศไทย ส่วนมากจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของลอมแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533 - 2541

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2534	42.8	23.3	14.0	10.5	2.4	0.8	2.3	3.9	0.7
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2536	43.1	20.0	13.2	13.0	2.7	1.3	2.4	2.6	0.6
2537	52.8	18.0	8.5	13.3	1.4	0.9	2.0	2.8	0.3
2538	40.6	22.8	12.8	14.4	2.5	0.7	2.0	2.8	0.9
2539	40.6	23.6	13.0	13.0	2.5	1.2	3.0	2.4	0.7
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2541	37.3	22.1	14.4	11.4	2.7	1.1	2.7	2.5	0.1

2.4 ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของลอม และปฏิกิริยาทางเคมี

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ (2542) เมื่อถ่านหินถูกเผา และมีการเย็นตัวลงของลอม การเผาจะทำให้องค์ประกอบทางแร่วิทยาของลอมด้านการเกิดผลึก (crystalline) แตกต่างกันไป สำหรับลอมลิกไนต์จะมีความไม่เป็นผลึก (glass) มากกว่าร้อยละ 90 อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ก็ยังคงมีองค์ประกอบของ crystalline จำพวก quartz anhydrite calcite hematite และ mullite ซึ่งเกี่ยวข้องการเกิดปฏิกิริยา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X - ray diffraction จะพบว่า

ละลายจากถ่านลิกไนต์จะมีองค์ประกอบของ crystalline น้อยกว่าละลายจากถ่านหินบิทูมินัสและแอนทราไซต์

คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมเริ่มต้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ ได้สารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และ Hydrated Lime หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) สารประกอบสองตัวแรกมีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสานที่ได้จากปฏิกิริยาหลักของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จะแตกตัวเป็น Ca^{2+} หลังจากนั้น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จะเข้าทำปฏิกิริยา pozzolanic กับสารปอซโซลานในเถ้าลอยได้แก่ซิลิกาออกไซด์ (2SiO_2) และ อลูมินาออกไซด์ ($2\text{Al}_2\text{O}_3$) ได้สารประกอบ CSH และ CAH ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ในงานที่เป็นคอนกรีตหลามเมื่อใส่เถ้าลอยลงไปปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ก็จะทำให้คอนกรีตสามารถระบายความร้อนได้ทันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในสมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ (Hydration of Portland cement)



ปฏิกิริยาระหว่าง $\text{Ca}(\text{OH})_2$ กับเถ้าลอยลิกไนต์ (Pozzolanic reaction)



อย่างไรก็ตาม กลไกในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะซับซ้อนกว่าการนำสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยตรง Lane and Best (1982) พบว่าเถ้าลอยจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงแรก แต่จะหน่วงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต อัลคาไลน์ และ แคลเซียม ในเถ้าลอย

2.5 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย

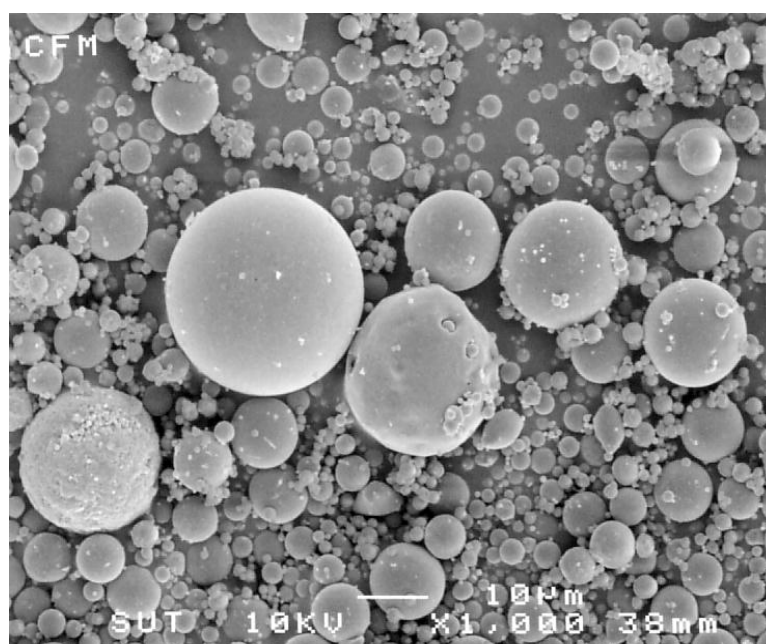
คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของเถ้าลอย สามารถเห็นได้จากพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (fly ash concrete) แต่คุณสมบัติของเถ้าลอยอาจเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ เช่นมีการเผาน้ำมันเตาร่วมกับการเผาถ่านหิน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และลดการกัดกร่อน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งาน อาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C-618 ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618

ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
ความละเอียด : ส่วนข้างตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก, Max %	34	34
หาดัชนีกำลัง : 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
- ส่วนที่ล้างบนตะแกรงเบอร์ 325 Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
Mutiple Factor (ผลคูณระหว่าง % LOI กับ % ของปริมาณที่ล้างตะแกรงเบอร์ 325)	255	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ต้าที่ 28 วัน Max% ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03

2.5.1 รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน มีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม เมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม ดังรูปที่ 2.2 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบ และทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเท คอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้



รูปที่ 2.2 Scanning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอย (ขยาย 1,000 เท่า)

2.5.2 ความละเอียด (Fineness)

ขนาด หรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา pozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนด ปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 ไมโครเมตร) 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 แต่จากการทดสอบเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าว ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

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

จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์

2.5.3 การหาดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ต้ามาตรฐานที่ไม่ผสมปอชโซลานโดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้ามาตรฐาน ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน เพื่อแสดงถึงอัตราการเกิดหรือความไวในการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอย

2.6 เทคนิคการทดแทนเถ้าลอยในงานคอนกรีต

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดและคุณสมบัติอื่น ๆ ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยคือ เทคนิคการผสมเถ้าลอยในคอนกรีต (Berry, E.E and Malhotra, V.M., 1980) ซึ่งมี 3 วิธีดังนี้

2.6.1 ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน

การทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยนั้นมีการทดแทนโดยน้ำหนักและการทดแทนโดยปริมาตร จากการทดลองพบว่า การทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:1 นั้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในช่วงสามเดือนแรกต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่กำลังอัดเมื่ออายุหนึ่งปีจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

2.6.2 ใช้เป็นมวลละเอียดเพิ่มในคอนกรีต

การใช้เถ้าลอยเป็นมวลละเอียดเพิ่มในคอนกรีตจะเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มสารเชื่อมประสานในคอนกรีตซึ่งจะทำให้กำลังอัดตั้งแต่อายุสามเดือนขึ้นไปมีค่าเพิ่มมากขึ้น

2.6.3 ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์และใช้เป็นมวลรวมละเอียด

การทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและใช้เถ้าลอยเป็นมวลรวมละเอียดเพิ่มด้วยนี้ หากต้องการให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีกำลังอัดในช่วงแรกเท่ากับคอนกรีตธรรมดา ปริมาณ

เถ้าลอยและปูนซีเมนต์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยรวมกันจะต้องมากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตธรรมดา

2.7 การศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ

2.7.1 กำลังอัด

บุรฉัตร นัทรวิระ และพิชัย นิमितยงสกุล (2538) ได้นำเถ้าลอยโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะมาทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วันของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแม่เมาะ โดยให้เถ้าลอยแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 15, 25 และ 35 และใช้อัตราส่วนผสมวัสดุซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก การไหลของมอร์ต้ากำหนดที่ร้อยละ 105 ถึง 115 จากการทดลองพบว่ามอร์ต้าผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อายุเริ่มแรกจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังต่ำกว่ามอร์ต้าธรรมดา ค่ากำลังอัดในช่วงยาวจะมากกว่ากำลังอัดของมอร์ต้าธรรมดา

วิศวะ จักรไพศาล และชัยโรจน์ จักรไพศาล (2540) ได้นำเถ้าลอยแม่เมาะมาทำการศึกษาคุณสมบัติที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง (High Performance concrete : คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง มีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็ว สามารถใช้งานได้สะดวกและมีคุณภาพดีกว่าคอนกรีตธรรมดา) โดยใช้วิธีวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักจากการเผาในอุณหภูมิสูง (Thermal Gravimetry Analysis, TGA) ซึ่งเป็นการทดสอบทางเคมีเพื่อหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ และหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีผลต่อกำลังอัด จากนั้นนำผลที่ได้มาเป็นแนวในการหาปริมาณของเถ้าลอยแม่เมาะที่เหมาะสมเมื่อนำมาแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีต โดยตัวอย่างที่ทำการศึกษาคือคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมด้วยเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0 - 35 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และใช้อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.26 - 0.32 หรือใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ระหว่าง 0.30 - 0.50 ผลที่ได้จากการศึกษาและทดสอบพบว่า สาเหตุที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีกำลังอัดที่สูงขึ้นเนื่องจากเกิดสารประกอบที่เพิ่มแรงอัด (แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต) เพิ่มขึ้น (ดูสมการที่ (2.1) - (2.3)) โดยปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย จะมีค่ามากกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ธรรมดาร้อยละ 5 ที่อายุบ่ม 28 วัน และร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56 วัน แสดงว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดเพิ่มขึ้นตามเวลา นอกจากนั้นยังพบอีกว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีกำลังอัดดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันโดยตรงกับปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก และจากผลของการศึกษาจะได้ว่าปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 15 - 25 ของปูนซีเมนต์

2.7.2 ความละเอียด

สมิทร ส่งพิริยะกิจ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2538) ได้ศึกษาถึงผลของความละเอียดของเถ้าลอยแม่เมาะที่มีผลต่อคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยเถ้าลอยที่ใช้แทนปูนซีเมนต์จะมีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, และ 35 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์และทำการทดสอบการก่อตัว การไหล และกำลังอัดที่ 1, 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน จากผลการทดลองพบว่าการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์มีผลทำให้ระยะเวลาการก่อต่อเพิ่มขึ้น และค่าการไหลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดมากขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าพัฒนาเร็วขึ้น

ทิน เกตุรัตนบวร และคณะ (2541) ได้นำเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาแยกขนาดด้วยเครื่อง Air Classified และนำเถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.8 ไมครอนมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อใช้ทำคอนกรีตกำลังสูงในการศึกษาจะใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อคงปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ให้มีค่าเท่ากับ 0.26 และมีค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ใกล้เคียงกันซึ่งมากกว่า 5 เซนติเมตร ผลการทดสอบกำลังอัดพบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทำให้กำลังอัดโดยรวมดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย โดยเริ่มให้กำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยตั้งแต่อายุ 17 วันขึ้นไป ซึ่งมีกำลังอัดเทียบเป็นร้อยละ 113 ถึง 115 ของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยที่อายุ 365 วัน

Chindaprasirt, P. et.al. (2005) ได้ศึกษาคุณสมบัติปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยคัดขนาด ผลการศึกษาพบว่าการพัฒนากำลังอัดระยะต้นของมอร์ต้าที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยมีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิกไม่เกิดในระยะต้น ประกอบกับการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์จะทำให้ปฏิกิริยาของปูนลดลง เมื่อมีระยะเวลานานขึ้นการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิก การแทนที่เถ้าลอยในซีเมนต์พอเหมาะในช่วง 0-40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นสามารถชดเชยปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ ตลอดจนเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูง จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นและทำให้กำลังอัดระยะปลายสูงขึ้นมาก

2.7.3 การต้านทานการกัดกร่อน

สมหมาย สว่างกิจ และคณะ (2535) ได้ทดลองนำเถ้าลอยจากประเทศสหรัฐอเมริกาและเถ้าลอยแม่เมาะมาผสมในปูนซีเมนต์มอร์ต้าในอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และกำหนดให้ค่าอัตราส่วนของน้ำต่อสารเชื่อมประสานมีค่า 0.50 ทำการหล่อเป็นก้อนทดสอบรูปลูกบาศก์ และนำไปแช่ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตรต่อลิตร วัตุน้ำหนักที่หายไป

ในช่วงเวลา 7 และ 21 วัน ที่อยู่แช่ในกรด การทดลองพบว่าชนิดของเถ้าลอยไม่มีผลต่อการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตมากนัก และคอนกรีตที่มีเถ้าลอยผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดมากกว่าคอนกรีตธรรมดา

ทิน เกตุรัตน์บวร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2540) ได้นำเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาแยกขนาดอนุภาคออกเป็น 4 ขนาดด้วยเครื่องแยกขนาด (Air Classifier) จากนั้นนำไปผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักในมอร์ต้า ควบคุมให้มีการไหลแผ่อยู่ระหว่าง 101 ถึง 115 เพื่อทดสอบกำลังอัดและความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 126 วัน จากผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคเท่ากันพบว่าตัวอย่างมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าตัวอย่างที่มีเถ้าลอยผสมอยู่ร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เถ้าลอยที่มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) น้อยกว่าจะสามารถทนต่อการกัดกร่อน เนื่องจากกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าการใช้เถ้าลอยที่มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์สูงกว่า

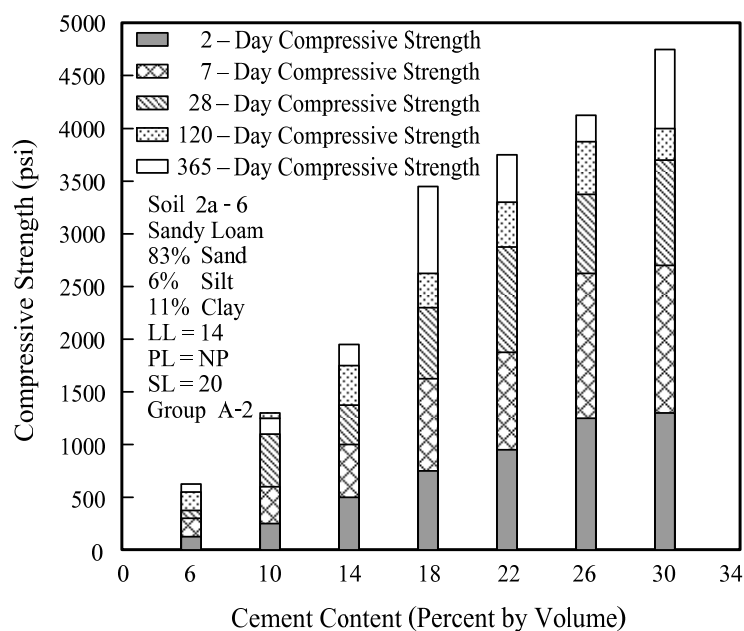
2.8 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

2.8.1 ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์

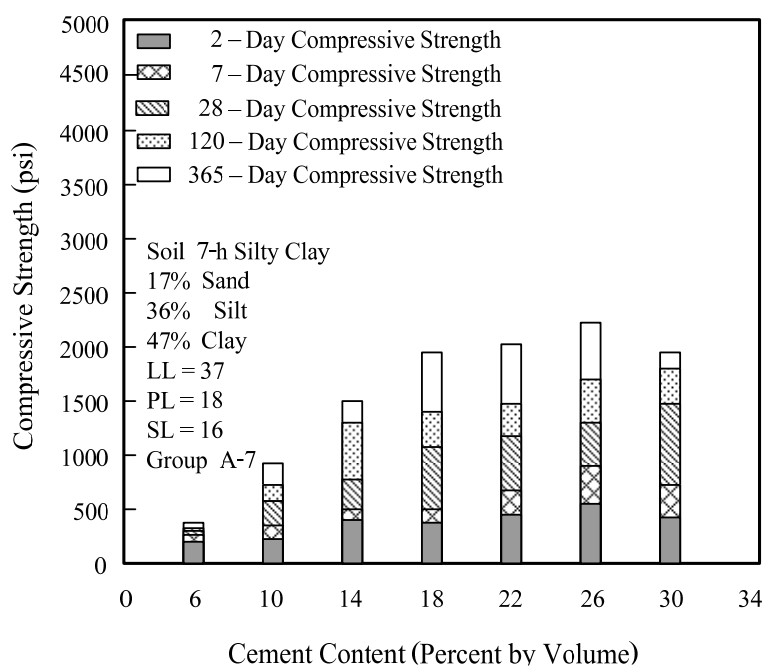
Ruenkrairergsa, T. (1982) อธิบายว่า ปัจจัยหลักที่มีต่อคุณภาพของดินซีเมนต์ คือ ปริมาณซีเมนต์ เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นกำลังอัดของดินซีเมนต์ก็จะเพิ่มขึ้น และอัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเบื้องต้นของดินด้วย โดยดินซีเมนต์ที่มีมวลเม็ดหยาบมากกว่าจะมีค่าเพิ่มสูงกว่าดินซีเมนต์ที่มีมวลเม็ดละเอียดกว่า

Felt (1955) ได้นำดิน Sandy Loam และ Silty Clay มาผสมกับซีเมนต์ โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ 6 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร นำมาทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 5 ค่า ตั้งแต่ 2 วัน ถึง 1 ปี ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม และดินที่มีดินเหนียวในปริมาณสูงกว่าจะมีกำลังอัดต่ำกว่าดินที่มีดินเหนียวต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Metcalf (1977) ซึ่งสรุปว่า ปริมาณซีเมนต์มีผลโดยตรงกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ โดยเฉพาะกับดินเม็ดหยาบ โดยกำลังอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ แต่สัดส่วนการเพิ่มจะแตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของดิน ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ Felt (1955) ยังได้ทดลองหาอิทธิพลของซีเมนต์ประเภทหนึ่ง และซีเมนต์ประเภทสามต่อกำลังอัดของดินสองชนิด คือ Sandy Loam และ Silty Clay Loam ผลการศึกษา

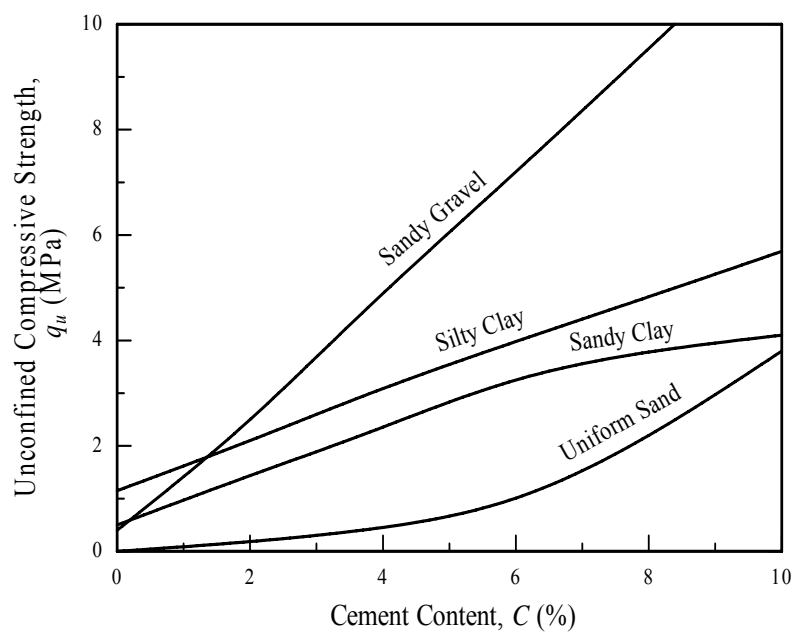
แสดงในรูปที่ 2.6 และสรุปว่า ดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทสามมีกำลังอัดสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มเดียวกัน



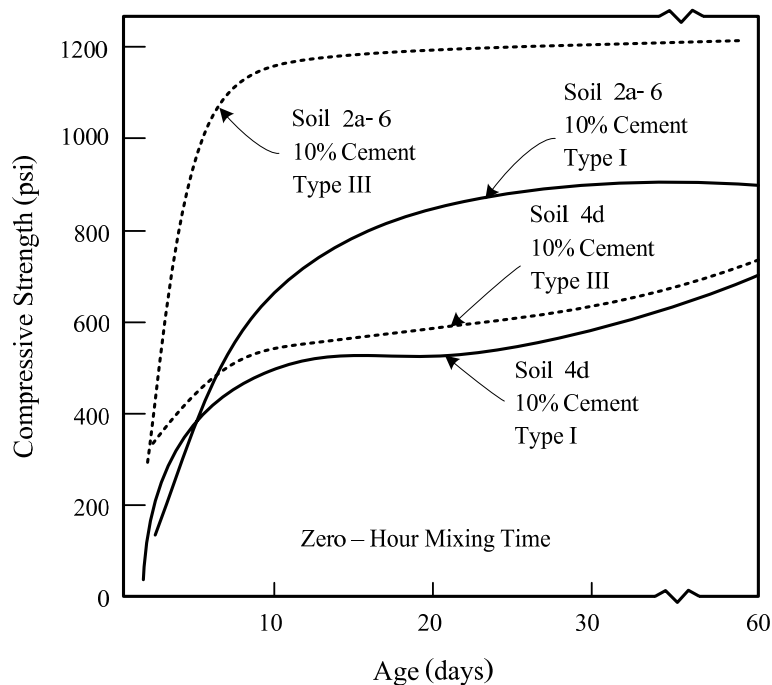
รูปที่ 2.3 อิทธิพลปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Felt, 1955)



รูปที่ 2.4 อิทธิพลปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay (Felt, 1955)

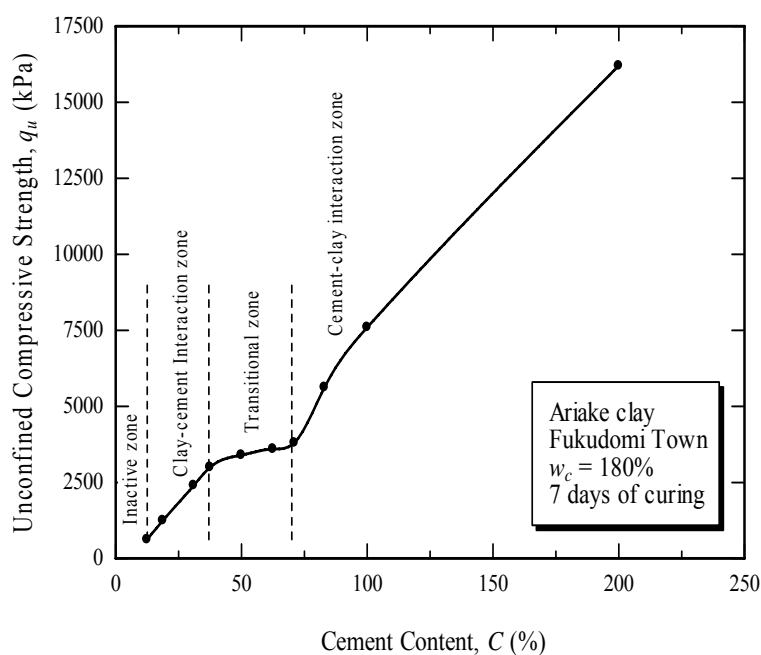


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์ (Metcalf, 1977)



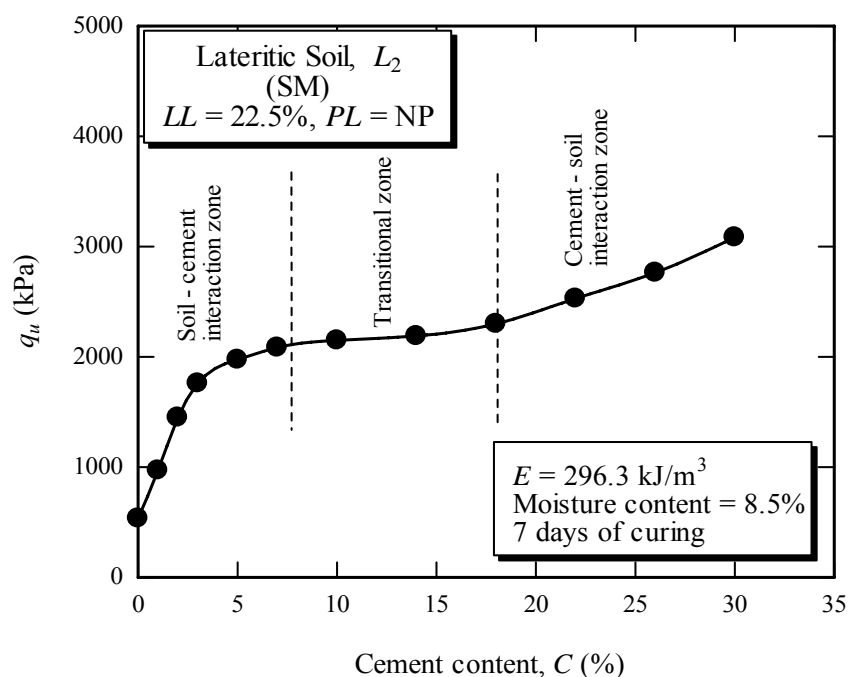
รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Soil 2a-6) และ Silty Clay Loam (Soil 4d) ผสมซีเมนต์ประเภท 1 และประเภท 3 เมื่อผสมเสร็จแล้วทดสอบทันที (Felt, 1955)

Horpibulsuk, S. et al. (2003) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียว (Ariake clay) ที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง และพบว่าสำหรับดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินตัวอย่างแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.7 กราฟของกำลังอัดแกนเดียว สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรกซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำ ๆ เรียกว่า Clay - cement interaction zone ในช่วงนี้กำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ ช่วงที่สองกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าค่อนข้างคงที่ โซนนี้เรียกว่า Transitional zone และถัดจากช่วงนี้ไปเป็น Cement - clay interaction zone ซึ่งกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าสูงเพิ่มขึ้นอีก นอกจากนี้ Horpibulsuk, S. et al. (2003) ยังพบอีกว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (Clay - water/cement ratio, w_c/C) เท่านั้น แต่การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือ ไม่ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำ และต้องการพลังงานการบดอัดเพื่อให้มวลดินรวมกันเป็นก้อนดินซีเมนต์



รูปที่ 2.7 ขอบเขตปฏิสัมพันธ์ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ (Horpibulsuk, S. et al., 2003)

Katkan, W. (2004) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรัง (SM) ที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำ พบพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณซีเมนต์มีลักษณะที่คล้ายกับเส้นกราฟที่ศึกษาโดย Horpibulsuk, S. et al. (2003) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟกำลังอัดแกนเดียวสัมพันธ์กับปริมาณซีเมนต์ (Katkan, W., 2004)

ทรงพล บุญมาดี (2529) ได้ทำการศึกษากำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัดด้วยพลังงานแบบมาตรฐาน และแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ปริมาณซีเมนต์ 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 2.5 สรุปได้ว่า กำลังอัดของดินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม โดยที่กำลังอัดจะมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุบ่ม 7 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มของกำลังอัดจะลดลง

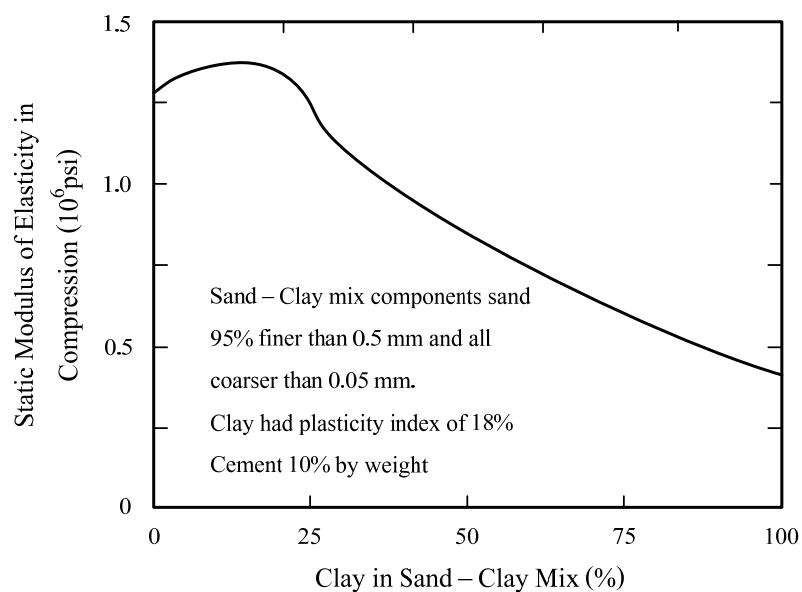
ตารางที่ 2.5 กำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน (ทรงพล บุญมาดี 2529)

พลังงาน บดอัด	ปริมาณ ซีเมนต์, %	กำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน เทียบกับกำลังอัดของดินที่ไม่ผสมซีเมนต์, %				
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
มาตรฐาน	1	66	68	66	67	77
	3	240	333	544	603	725
	5	603	711	799	944	1252
	7	653	755	836	1100	1252
สูงกว่า มาตรฐาน	1	5	5	15	15	15
	3	7	100	112	145	220
	5	182	259	302	330	365
	7	254	348	382	445	557

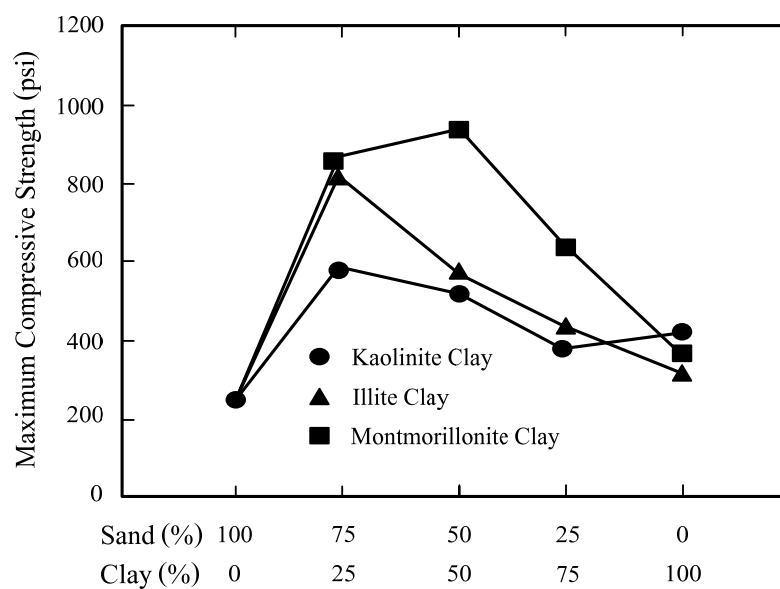
2.8.2 ปริมาณดินเหนียวและชนิดของแร่ดินเหนียว

Reinhold (1955) ได้นำเอาทรายมาผสมกับดินเหนียวและซีเมนต์ โดยเปลี่ยนปริมาณดินเหนียวที่ใช้ผสมตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของกำลังอัดกับปริมาณดินเหนียวที่ใช้ผสม ผลแสดงในรูปที่ 2.9 พบว่า เมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลง ซึ่งหมายความว่าค่ากำลังอัดก็จะลดลงด้วย

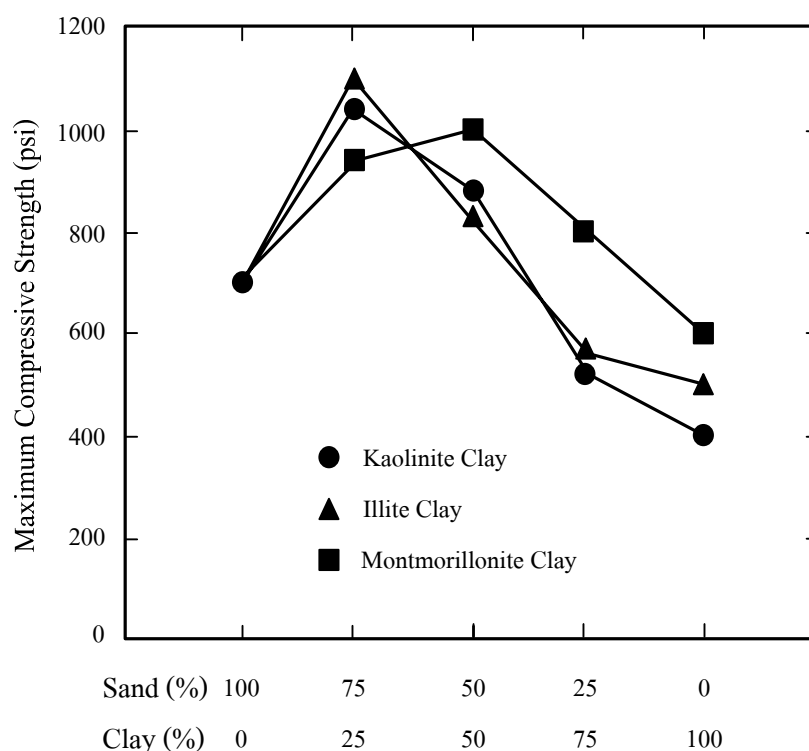
Davidson et al. (1962) ได้ศึกษากำลังอัดดินเหนียว 3 ชนิด คือ Kaolinite, Illite และ Montmorillonite ผสมกับทรายและซีเมนต์ โดยเพิ่มอัตราส่วนผสมของดินเหนียวที่ละ 25 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ ใช้อัตราส่วนทรายต่อดินเหนียวดังนี้ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, และ 0:100 ผลแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11 พบว่า เมื่อปริมาณดินเหนียวมากเกินไปกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับดินจำพวก Cohesionless Soil จะทำให้ค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ลดลงอย่างชัดเจน และดินเหนียวจำพวก Montmorillonite ยังให้ค่ากำลังอัดที่มีแนวโน้มสูงกว่าดินเหนียวจำพวก Kaolinite และ Illite



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อค่า Modulus of Elasticity ของดินซีเมนต์ (Reinhold, 1955)



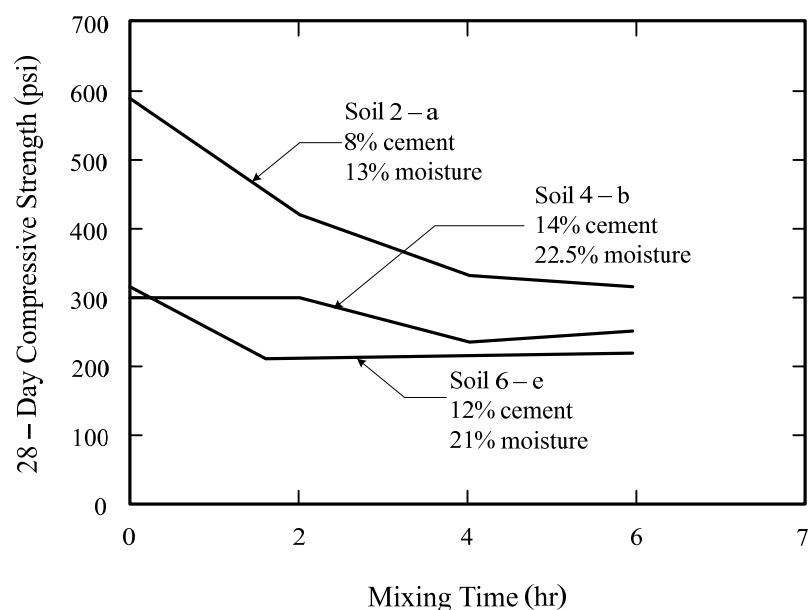
รูปที่ 2.10 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ (Davidson et al., 1962)



รูปที่ 2.11 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ (Davidson et al., 1962)

2.8.3 การผสมและการบดอัด

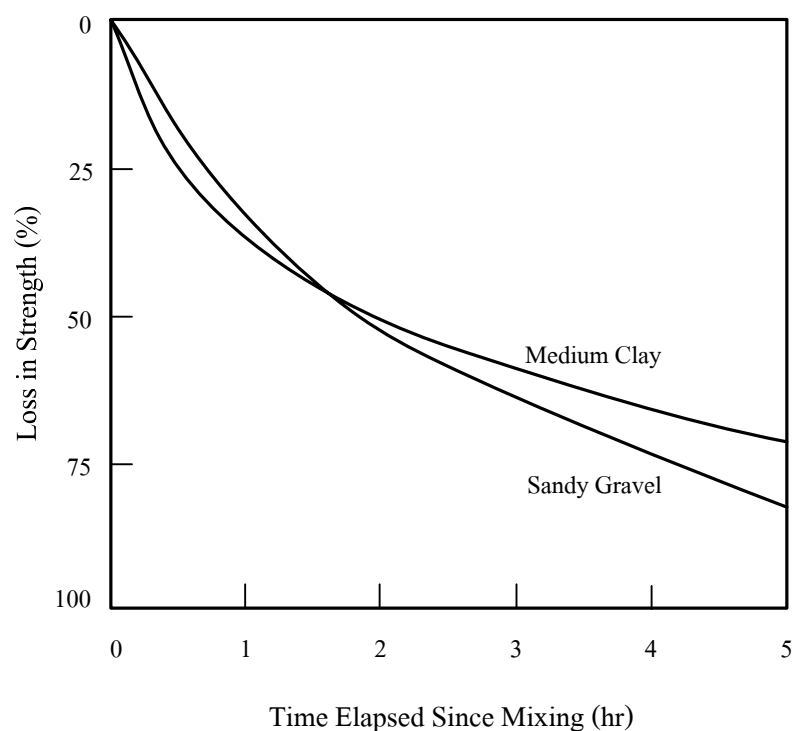
Felt (1955) ได้ศึกษาระยะเวลาในการผสม อิทธิพลเกี่ยวกับการหน่วงเวลาในการผสมดินกับซีเมนต์ให้นานขึ้น และหยุดผสม ที่มีผลต่อกำลังอัดของดิน 3 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A-2 Sandy Loam (LL = 26, PI = 11) ดินกลุ่ม A-4 Silty Clay Loam (LL = 35, PI = 12) และ ดินกลุ่ม A-6-7 Clay (LL = 47, PI = 26) ความสัมพันธ์ของผลการทดสอบระหว่างการหน่วงเวลาผสมให้ช้าลงกับกำลังอัด แสดงในรูปที่ 2.12 พบว่า ดินทั้งสามชนิดมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อการหน่วงเวลาในการผสมแบบทิ้งไว้นานขึ้น และการหน่วงเวลาในการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราวที่ใช้เวลานานขึ้นมีผลเสียน้อยกว่าการหยุดผสมเลย



รูปที่ 2.12 ผลของระยะเวลาที่ใช้ผสมต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Felt, 1955)

Ingles and Metcalf (1972) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่ใช้ผสมดินซีเมนต์ โดยใช้ดิน 2 ชนิด คือ ดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) และ ทรายปนกรวด (Sandy Gravel) ผลแสดงในรูปที่ 2.13 พบว่า ถ้าระยะเวลาในการผสมที่นาน 1 ถึง 2 ชั่วโมง กำลังอัดของดินเหนียวแข็งปานกลาง และทรายปนกรวด จะลดลงมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าใช้เวลาในการผสมนานกว่า 2 ชั่วโมงขึ้นไป เปอร์เซ็นต์การลดลงของกำลังอัดในดินทรายปนกรวดจะมากกว่าดินเหนียวแข็งปานกลางเล็กน้อย

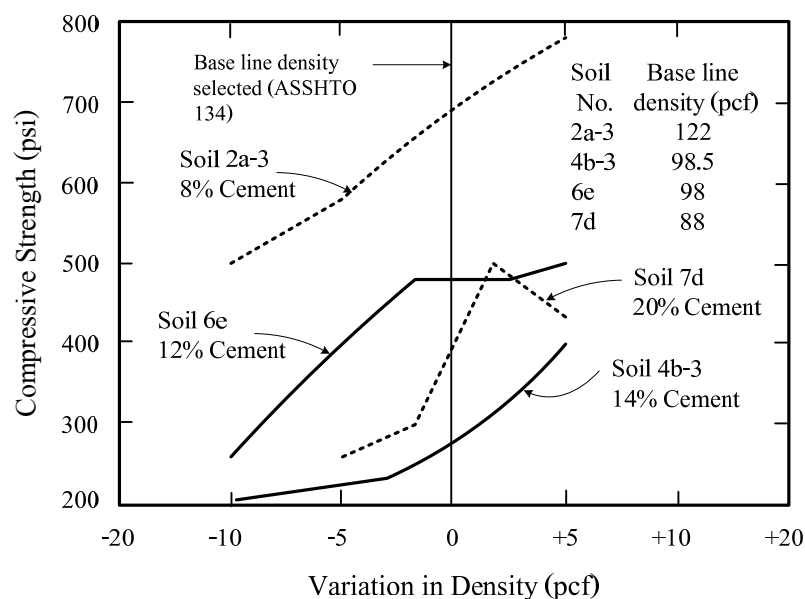
Felt (1955) and Davidson et al. (1962) ศึกษาปริมาณน้ำในมวลดิน พบว่าปริมาณน้ำและความหนาแน่นมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทรายควรบดอัดให้อยู่ทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด ส่วนดินเหนียวต้องบดอัดให้อยู่ทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด



รูปที่ 2.13 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้ระยะเวลาการบดอัดนานขึ้น (Ingles and Metcalf, 1972)

Davidson (1961) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่น้ำเหมาะสมกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ดิน 6 ชนิด ได้แก่ ดินกลุ่ม A-2 (Sandy Loams), A-3 (Sands), A-4 (Silts and Loams), A-5 (Silts), A-6 (Medium Clays) และ A-7 (Heavy Clays) พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการผสมให้นานขึ้นหรือทำการบดอัดซ้ำจะมีผลทำให้ค่าปริมาณน้ำเหมาะสมเพิ่มขึ้นขณะเดียวกันความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลงและทำให้กำลังอัดลดลงด้วย

Felt (1955) ได้ศึกษาความหนาแน่นของดิน 4 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A-2 Sandy Loam (LL = 26, PI = 11), A-4 Silty Clay Loam (LL = 35, PI = 12), A-6-7 Clay (LL = 47, PI = 26) และ A-7 (LL = 118, PI = 83) มาทดสอบเพื่อประเมินผลกำลังอัดจากความหนาแน่น โดยใช้การบดอัดแบบมาตรฐานตามมาตรฐาน ASSHTO กำหนดเป็นเส้นความหนาแน่นพื้นฐาน ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.14 พบว่าทุกตัวอย่างการผสมเมื่อความหนาแน่นของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.14 อิทธิพลของความหนาแน่นต่อกำลังอัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน
(Felt, 1955)

2.8.4 การบ่ม

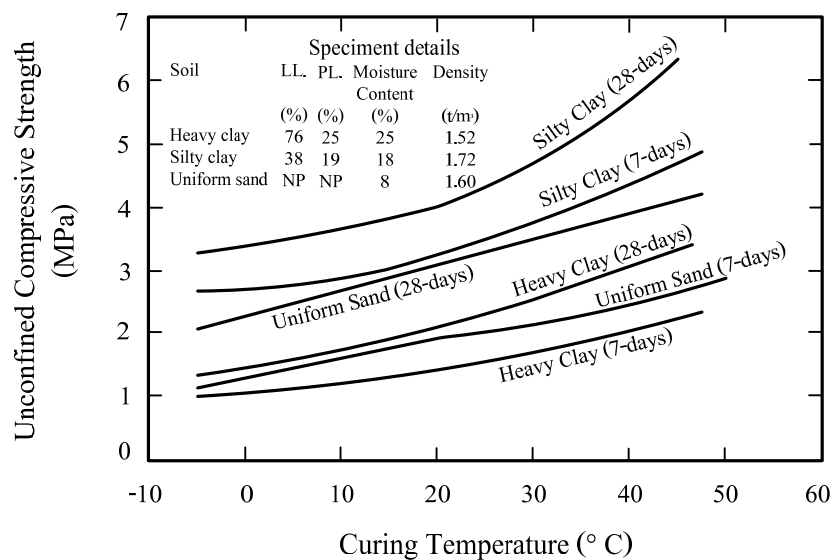
Clare and Pollard (1954) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ พบว่า งานก่อสร้างดินซีเมนต์ในระหว่างอากาศอบอุ่น จะให้กำลังอัดสูงกว่างานก่อสร้างที่มีลักษณะคล้ายกันในช่วงอากาศหนาวเย็นกว่า 50 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่อายุบ่ม 3 เดือนแรก ภายหลังการก่อสร้าง

Ng (1966) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อดินลูกรัง 3 ชนิด ผสมซีเมนต์ พบว่า เมื่อทำให้อุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 21 เป็น 38 องศาเซลเซียส ค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Clare and Pollard (1954) ที่พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์แปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้บ่ม โดยให้เหตุผลว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำในมวลดิน ผลแสดงดังในรูปที่ 2.15

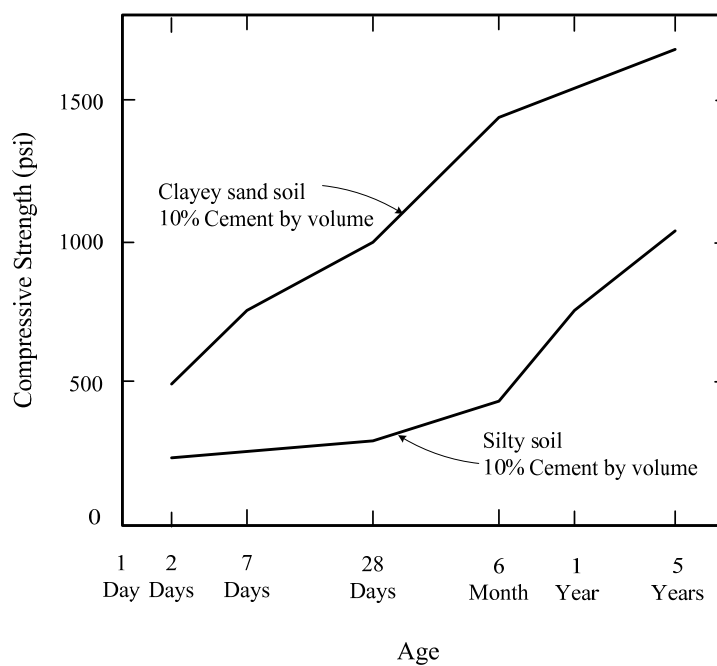
Leadbrand (1956) ได้ศึกษากำลังอัดของดิน 2 ชนิด คือ ดินเหนียวปนทราย และดินตะกอน ผสมกับซีเมนต์ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุบ่มตั้งแต่ 2 วัน ถึง 5 ปี พบว่า กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุบ่มคล้ายกับคอนกรีต ผลแสดงดังในรูปที่ 2.16

Maner (1952) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุในการบ่มดิน โดยนำวัสดุต่าง ๆ ได้แก่ Waterproof Paper, RC-2 Asphalt, Tar และ Asphalt Emulsion มาบ่มดินซีเมนต์ที่ใช้ก่อสร้างเป็น

ชั้นรองพื้นทาง พบว่าวัสดุที่มีส่วนผสมของดินน้ำมันทั้ง 3 ชนิด และ Waterproof Paper มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้กับดินซีเมนต์



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิที่ใช้บ่มดินซีเมนต์ (Clare and Pollard, 1954)



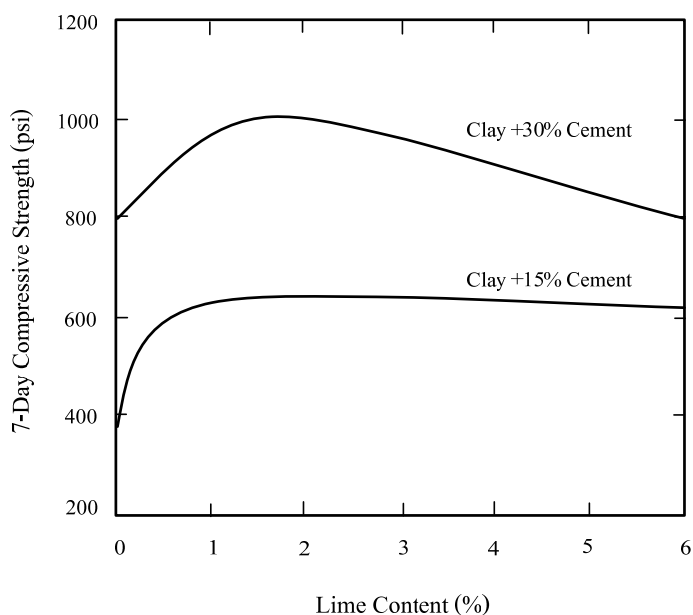
รูปที่ 2.16 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Leadabrand, 1956)

2.8.5 สารผสมร่วม

Ruenkairergsa, T. (1982) พบว่าปริมาณปูนขาวเพียงเล็กน้อยที่เพิ่มเข้าไปผสมในดินที่มีค่าดัชนีสภาพพลาสติกสูงก่อนที่จะผสมกับซีเมนต์จะช่วยลดค่าดัชนีสภาพพลาสติกของดินเดิมลงได้มาก และทำให้ดินผสมกับซีเมนต์ได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ปูนขาวที่เพิ่มเข้าไปจะช่วยลดอิทธิพลของสารอินทรีย์ที่จะมีผลต่อปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ได้อีกด้วย

Maclean et al. (1952) ได้นำดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวอยู่ระหว่าง 70 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ และค่าดัชนีสภาพพลาสติกอยู่ระหว่าง 45 ถึง 53 เปอร์เซ็นต์ มาทดลองผสมร่วมกับปูนซีเมนต์โดยแปรผันปริมาณปูนซีเมนต์อยู่ระหว่าง 15 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มปูนขาวลงไปอีก 2 เปอร์เซ็นต์ ผลแสดงในรูปที่ 2.17 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น และสามารถต้านทานการสูญเสียน้ำได้ดียิ่งขึ้น แต่หากผสมปูนขาวมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ผลลัพธ์อาจเปลี่ยนแปลงไปได้

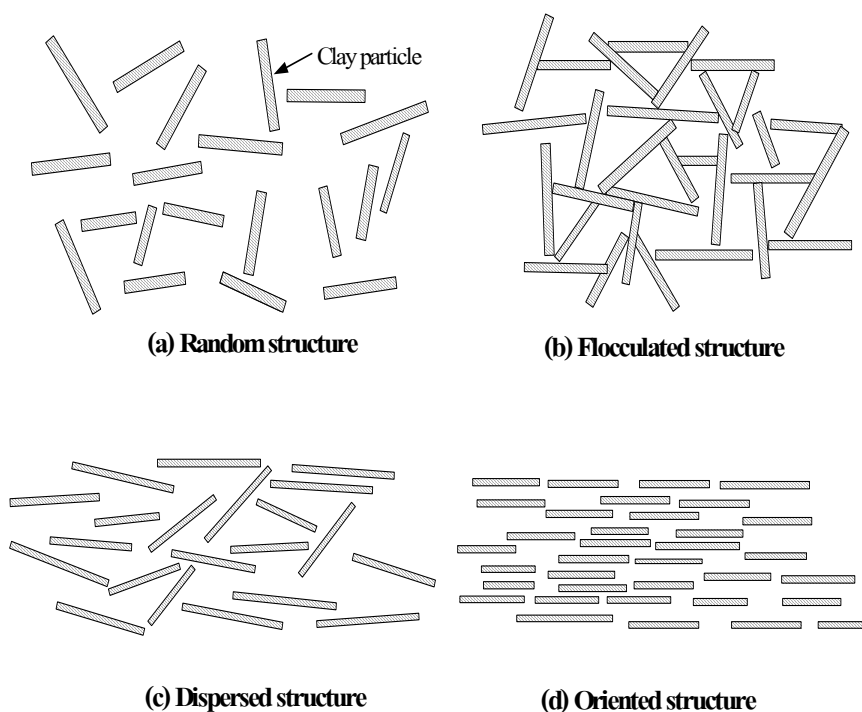
Lambe et al. (1959) ได้ทดลองนำสารประกอบจำพวกโซเดียม และเกลือมาผสมร่วมกับดิน และ ซีเมนต์ พบว่าการใช้สารประกอบจำพวกโซเดียมจะช่วยให้ดินซีเมนต์มีกำลังอัดและความคงทนเพิ่มขึ้น ส่วนเกลือเป็นสารผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติทำให้ดินซีเมนต์ผสมเกลือเกิดสารเชื่อมประสานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกในดินซีเมนต์ผสมเกลือ จึงทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเกลือมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ เกลือยังช่วยลดปริมาณซีเมนต์ทำให้การก่อสร้างงานดินซีเมนต์มีราคาถูก



รูปที่ 2.17 อิทธิพลปริมาณปูนขาวต่อกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ (Maclean et al., 1952)

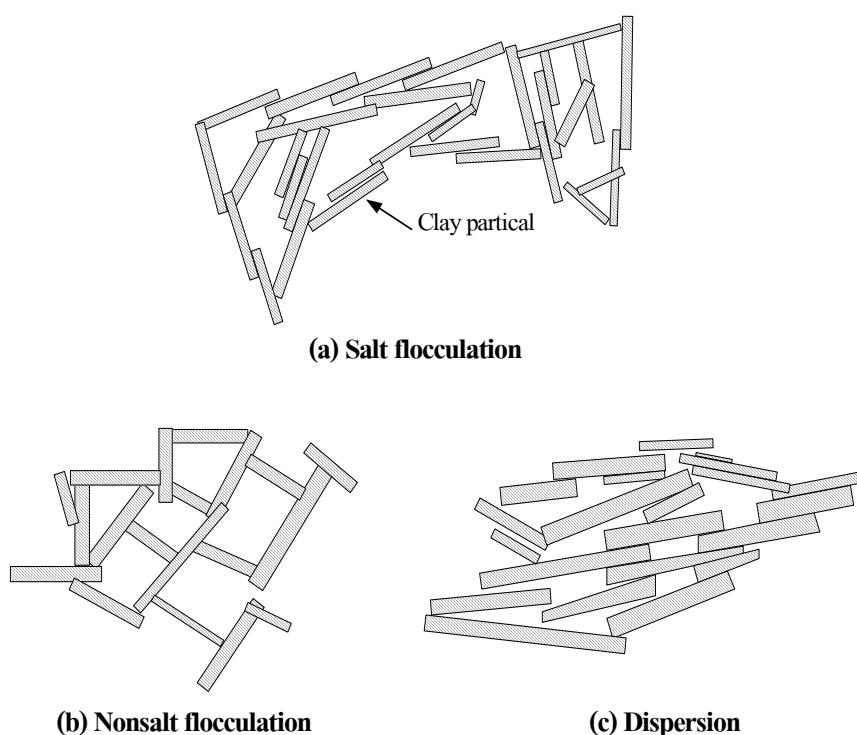
2.9 โครงสร้างจุลภาค

แบบจำลองของโครงสร้างดินในเบื้องต้น แสดงในรูปที่ 2.18 โดย Yong and Warkentin (1966 and 1975) โครงสร้างดินจะแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของแรงผลักรวมที่มีมากกว่าแรงดูดระหว่างอนุภาคของดิน ซึ่งจะเป็รูปร่างของดินที่ดูดซึมน้ำ หรืออยู่ในสภาวะของดินปั้นใหม่ (remolded) โครงสร้างการจับตัวกันเป็นกลุ่ม (flocculation) ของเม็ดดินเป็นรูปร่างที่เกิดจากความเข้มข้นของเกลือ เช่นดินที่อยู่ในทะเล แรงดูดส่วนใหญ่จะมีอิทธิพลระหว่างเม็ดดิน โครงสร้างดินจะมีการกระจายตัวเมื่อดินเหนียวอิมตัว หรือในกรณีที่ดินเหนียวเกิดการอัดตัวคายน้ำเพียงเล็กน้อย ในกรณีที่ดินเหนียวเกิดการอัดตัวคายน้ำมาก ๆ โครงสร้างของดินจะเรียงตัวในทิศทางที่ขนานไปทางเดียวกัน ซึ่งการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของดินสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือการยึดเกาะกันแบบหน้าต่อหน้า แบบด้านหน้ากับด้านข้าง และ แบบด้านข้างกับด้านข้าง อย่างไรก็ตามแบบจำลองเบื้องต้นไม่ใช่สิ่งเดียวที่ใช้ในการพิจารณาโครงสร้างดิน เพราะว่าการดินตามธรรมชาติจะมีส่วนประกอบส่วนประกอบที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ แร่ดินเหนียว ดินตะกอน ทราย และยังมีผลเนื่องจากผลกระทบทางเคมีที่มีอิทธิพลกับความเข้มข้นของไฟฟ้าในโพรง อัตราการตกตะกอน และตัวแปรอื่น ๆ



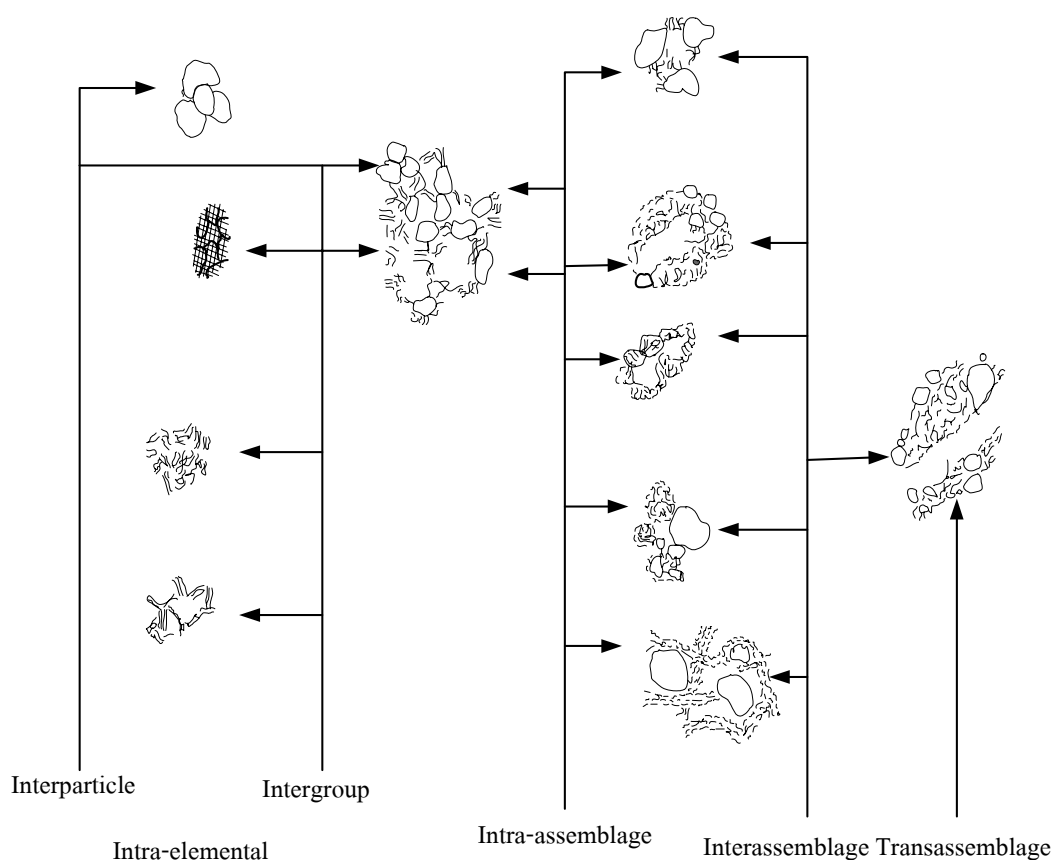
รูปที่ 2.18 ชนิดของโครงสร้างดินเหนียว (Yong and Warkentin, 1966 and 1975)

Lambe (1958) แสดงให้เห็นอนุภาคของเม็ดดินที่ถูกจำกัด โดยการพิจารณาจากการตกตะกอนของดินที่เกิดจากผลกระทบของไฟฟ้าเคมี แสดงในรูปที่ 2.19 ความแตกต่างของการจับตัวกันเป็นก้อนจะขึ้นอยู่กับแรงทางไฟฟ้าระหว่างดินและน้ำในอนุภาคของเม็ดดิน ชนิดของเกลือที่จับตัวกันเป็นก้อนจะเกิดกับดินที่ตกตะกอนทับถมในทะเล และชนิดที่ไม่มีกลุ่มก้อนเกลือจะเป็นดินที่ตกตะกอนในน้ำจืด O'Brien (1970) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างดิน คาร์โอไลไนต์ (Kaolinite) และอีไลต์ (Illite) ที่แช่อยู่ในน้ำกลั่นและน้ำเกลือ (NaCl = 1 g/l) ซึ่งวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope พบว่าการจับตัวกันเป็นกลุ่มของดินเหนียว 2 ชนิด ที่อยู่ในน้ำกลั่นและน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นต่างกัน การจัดเรียงตัวของดินคาร์โอไลไนต์ที่อยู่ในน้ำกลั่นและน้ำเกลือ จะจับเรียงตัวกันแบบหน้าต่อหน้าและเรียงทับซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ในส่วนของดินอีไลต์ที่อยู่ในน้ำกลั่นจะมีการเรียงตัวแบบหน้าต่อหน้า อย่างไรก็ตามในน้ำเกลือจะมีการจับเรียงตัวกันเป็นกลุ่มแบบด้านหน้ากับด้านข้างมากกว่าน้ำกลั่น และจะมีการจัดเรียงตัวแบบหน้าต่อหน้าเป็นชั้น ๆ เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 2.19 โครงสร้างดินที่ตะกอนที่เกิดจากผลกระทบของไฟฟ้าเคมี (Lambe, 1958)

ความสัมพันธ์โดยทั่วไปของอนุภาคดินจะไม่อยู่ในเชิงอนุภาคเดียว และโพรงที่ปิดล้อมจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดิน และกลุ่มของโครงสร้างดินจะถูกสร้างขึ้นโดยกลุ่มของอนุภาคดิน ซึ่งกลุ่มของโครงสร้างดินเหล่านี้จะถูกเรียกว่า domain cluster ped aggregate และ assemblage เป็นต้น Matsuo and Kamon (1976) ได้เสนอโครงสร้างดินให้อยู่ในรูปของ ped และ pore เพื่อนำไปวิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้างดิน แบบจำลองของโครงสร้างดินแสดงในรูปที่ 2.20 เสนอโดย Collins and McGrown (1974) ได้อธิบายว่าโครงสร้างดินเกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างดินตะกอน ดินทราย มวลรวม และโพรงชนิดต่าง ๆ

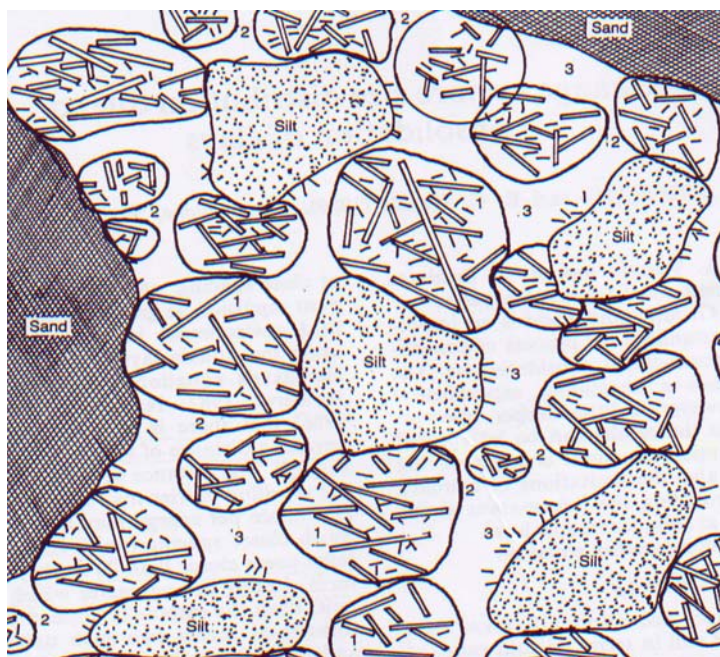


รูปที่ 2.20 การเข้าแทนที่และการรวมตัวของอนุภาค และช่องว่างชนิดต่าง ๆ

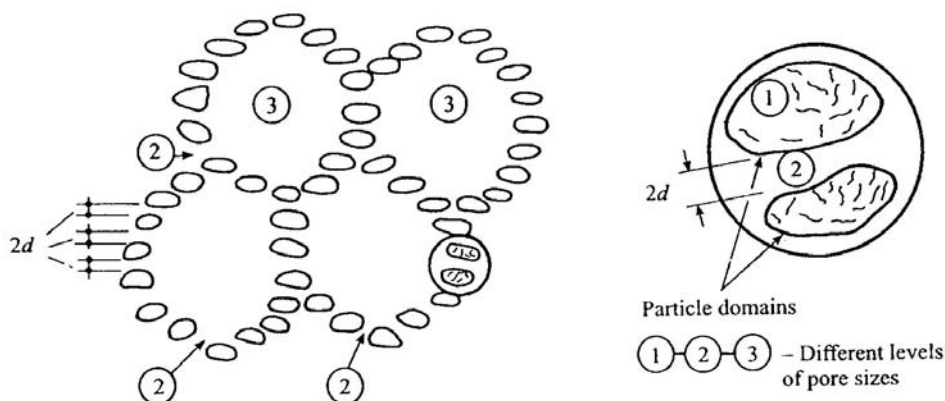
(Collins and McGrown, 1974)

Nagaraj et al. (1990) ได้สรุปผลการทดลองของ Griffith and Joshi (1989) และได้แสดงแบบจำลองโครงสร้างของเม็ดดินละเอียดโดยอาศัยทฤษฎีกลุ่มก้อนดิน (cluster theory) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 และ 2.22 ซึ่งขนาดของช่องว่างมีด้วยกัน 3 ระดับ คือ

- ก. ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเหนียวในก้อนดิน (cluster) มีขนาดน้อยกว่า 20 \AA
- ข. ช่องว่างระหว่างก้อนดินสองก้อน มีขนาดอยู่ระหว่าง 20 \AA ถึง 200 \AA
- ค. ช่องว่างขนาดใหญ่ภายในกลุ่มของก้อนดิน มีขนาดใหญ่มากกว่า 200 \AA

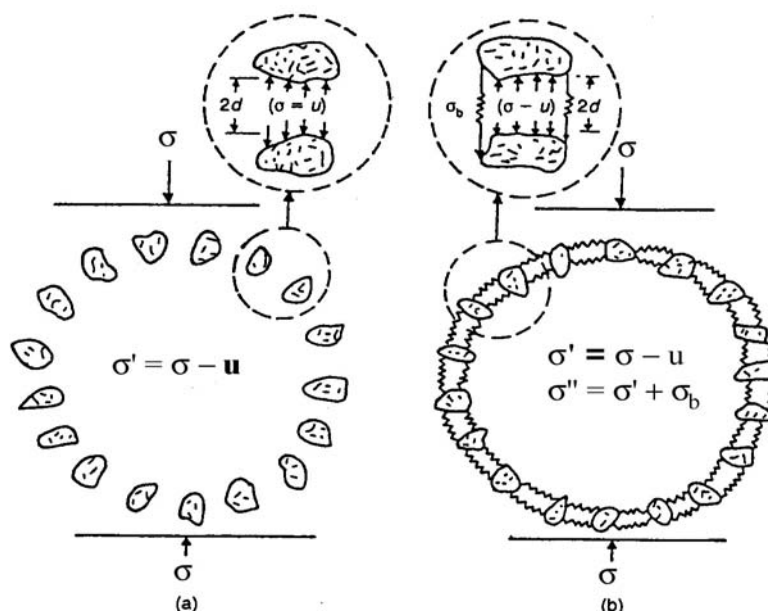


รูปที่ 2.21 การกระจายของช่องว่างในเม็ดดิน (Nagaraj et al., 1990)



รูปที่ 2.22 การจัดเรียงตัวของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj, 1990)

Nagaraj et al. (1990) and Horpibulsuk, S. et.al. (2003) ได้นำเสนอแบบจำลองโครงสร้างของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ แสดงดังรูปที่ 2.23 รูปที่ 2.23(a) เป็นโครงสร้างของดินที่ปราศจากพันธะเชื่อมประสาน (cementation) เมื่อผสมซีเมนต์กับดิน พันธะเชื่อมประสานจะเชื่อมแฟบริคเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (b)



รูปที่ 2.23 โครงสร้างของดินเหนียว (a) ดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (Nagaraj et al., 1990) และ (b) ดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน (Horpibulsuk, S. et al., 2003)

2.10 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างดิน แสดงในตารางที่ 2.6 เสนอโดย Kamon (1979) ซึ่งใช้ทำการศึกษาด้านรูปร่างของอนุภาคดิน การจัดเรียงของโครงสร้าง และขนาดของโพรงช่องว่าง โดยมีหลักการ และข้อจำกัด ในการศึกษาที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.6 เครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างดิน (Kamon, 1979)

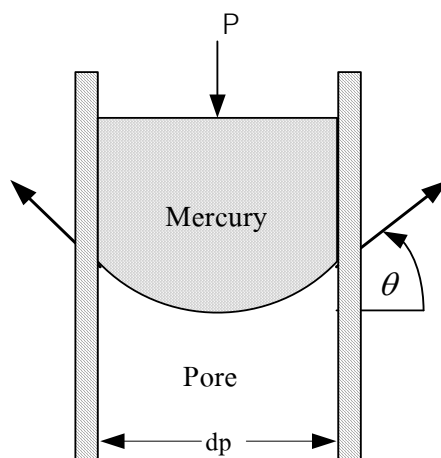
	Electro microscope		X-ray diffraction	Polarization microscope	Porosimeter	อื่นๆ
	Scanning type	Transmission type				
หลักการ	จากการสังเกตโดยใช้ Electronic line		ใช้การหักเหของรังสี X-ray	ใช้การสั่นเนื่องจากการแผ่รังสี	ใช้การแทนที่ของปรอท	คลื่นเสียง, การนำไฟฟ้า, การนำความร้อน, คุณสมบัติของแม่เหล็ก
พิจารณารูปร่างของอนุภาคดิน	สามารถทำได้	ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 5 ไมครอน	ไม่สามารถทำได้	พิจารณาขนาดตะกอนของอนุภาคเบื้องต้น	ไม่สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้
การสังเกตอนุภาคดิน	สามารถทำได้	ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 5 ไมครอน	ไม่สามารถทำได้	พิจารณาขนาดตะกอนของอนุภาคเบื้องต้น	ไม่สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้
พิจารณาการจัดเรียงของโครงสร้างดิน	สามารถทำได้	สามารถทำได้	สามารถทำได้	สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้	สามารถทำได้
พิจารณาโพรงช่องว่าง	โพรงภายในและภายนอกอนุภาคดิน	โพรงภายในและภายนอกอนุภาคดิน	ไม่สามารถทำได้	โพรงภายนอกอนุภาคดิน	พิจารณาการกระจายตัวของขนาดโพรง	สามารถทำได้บางส่วน

2.10.1 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) ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงส่องสว่างธรรมดามีกำลังแยกแยะใช้วัตถุเล็กสุดเพียง 0.2 ไมครอน เท่านั้น ในกรณีที่เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุประกอบอยู่ด้วยเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนวิเคราะห์ (analytical electron microscope) โดยในการวิเคราะห์ธาตุจะเป็นการวิเคราะห์เฉพาะจุด (spot analysis) หรือพื้นที่เล็ก ๆ ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นหัววัด เรียกว่า อิเล็กตรอน โพรบไมโครแอนาไลซิส (electron probe microanalysis, EPMA) โดยใช้การวิเคราะห์ธาตุด้วยการวัดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (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 ดังนั้น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้จะสามารถประกอบอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ได้ทั้งแบบ EDS และ WDS เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยหลักการแยกรังสีตามลำดับพลังงาน

2.10.2 การทดสอบด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimeter

เป็นเครื่องมือใช้หาค่าการกระจายตัวของขนาดช่องว่างในเม็ดดินโดยใช้ mercury intrusion technique ซึ่งขนาดช่องว่างในเม็ดดินสามารถคำนวณได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการอัดปรอท (P) กับ surface tension ของปรอท (σ) ซึ่ง Washburn (1921) ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน P และขนาดช่องว่าง d_p ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 หลักการของการวัดขนาดของช่องว่างในเม็ดดิน

2.10.3 การวิเคราะห์ Thermal Gravimetry Analysis, TGA

เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และวิศวะ จักรไพศาล (2542) ได้นำเสนอหลักการหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ โดยใช้วิธี Thermal Gravimetry Analysis พิจารณาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาในอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปที่อุณหภูมิระหว่าง 100 - 400 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ซึ่งประกอบด้วย ให้น้ำ น้ำในช่องว่าง น้ำดูดซึม และ น้ำระหว่างชั้น จะระเหยออกไป แต่เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น สารประกอบในซีเมนต์เพสต์จะสลายตัวเป็นสารประกอบอื่น ที่มีมวลโมเลกุลต่ำลงหรือเป็นธาตุ กล่าวคือ เมื่อซีเมนต์เพสต์ถูกเผาที่อุณหภูมิ 400 - 600 องศาเซลเซียส สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะสลายตัว (Decomposition) เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ (2.4)



การวิเคราะห์โดยวิธี TGA จะเป็นการวัดปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัว โดยที่น้ำในส่วนนี้ระเหยออกไปคงเหลือแต่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการระเหยของน้ำในส่วนที่เป็น น้ำหนักน้ำที่สูญเสียไป (weight loss) ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงจากการวิเคราะห์ด้วย TGA

2.10.4 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก

เอกสิทธิ์ ลี้สุวรรณ และวิศวะ จักรไพศาล (2542) ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมและปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสม จากการศึกษาพบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสม คือลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ทุก ๆ 10 ของเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยที่ใช้แทนที่ซีเมนต์ การหาปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยที่วัดโดยวิธี TGA เป็นปริมาณที่รวมผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และส่วนที่ลดลงจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก เรียกว่า “ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่วัดได้” การที่จะแยกแยะปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันออกจากปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ของปฏิกิริยาปอซโซลานิก อาจทำได้จากการทดสอบเปรียบเทียบซีเมนต์เพสต์ธรรมดากับซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ซึ่งเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้ปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ลดลง เรียกว่า “ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป” สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.5)

$$P = H \times (1 - R/100) - F \quad (2.5)$$

เมื่อ P = เปอร์เซ็นต์ Calcium Hydroxide ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

R = เปอร์เซ็นต์ของซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยน้ำหนัก

H = เปอร์เซ็นต์ Calcium Hydroxide จากซีเมนต์เพสต์

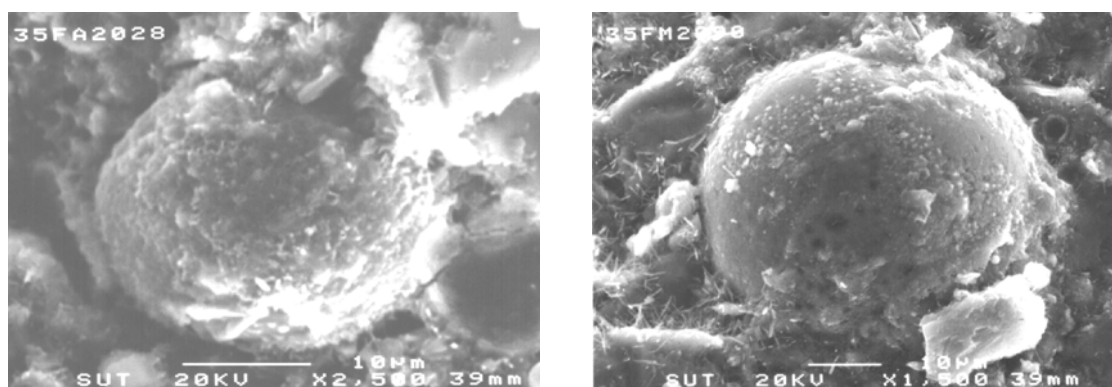
F = เปอร์เซ็นต์ Calcium Hydroxide จากเพสต์ของเถ้าลอย

2.11 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 ผลจากการศึกษาสรุปได้ว่าคุณสมบัติโครงสร้างมวลดินของดินเหนียวถูกกำหนดโดยมวลรวมที่อยู่ภายในก้อนดิน (Intra-aggregate) และมวลรวมที่อยู่ระหว่างก้อนดิน (Inter-aggregate) ซึ่งมวลรวมจะถูกทำลายได้โดยการแปรสภาพทางกลศาสตร์ และอัตราของโพรงทั้งสองจะไม่ถูกทำลายแม้ที่อยู่ในสภาวะที่ถูกรบกวน

โพรงที่ไม่จำกัดจะถูกหมายถึงโพรงภายในก้อนดิน (Intra-aggregate) ในขบวนการการอัดตัวคายน้ำ แรงดันประสิทธิผลจะเกิดจากโพรงขนาดใหญ่ และโพรงขนาดเล็กภายในก้อนจะไม่มีการอัดตัวและเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม สำหรับการอัดตัวคายน้ำที่เพิ่มขึ้นดัชนีการอัดตัวจะสัมพันธ์กับโพรงขนาดใหญ่

Chindaprasirt, P. et.al. (2005) ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียดของเม็ดถ่านหินต่อปฏิกิริยาปอซโซลานเพสต์ ที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์เท่ากับ 80:20 และ 60:40 ด้วยเครื่อง SEM พบว่าเม็ดลอยเกิดรูพรุน และช่องว่างจำนวนมาก และสามารถเห็นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเกาะอยู่บริเวณผิวของเม็ดลอย รูพรุนเกิดจากการถูกกัดกร่อนเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และพบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นหลังจากมีอายุบ่มมากกว่า 7 วัน ดังรูปที่ 2.25



(a)

(b)

รูปที่ 2.25 อนุภาคเม็ดลอยหยาบ (a) อายุบ่ม 28 วัน, (b) อายุบ่ม 90 วัน

(Chindaprasirt, P. et.al., 2005)

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และคณะ (2549) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเม็ดลอยด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimeter พบว่า การผสมวัสดุเชื่อมประสาน ช่วยปรับปรุงโครงสร้างดิน โดยเพิ่มพันธะเชื่อมประสาน และทำให้แฟบrikแน่นขึ้น ช่องว่างภายในดินซีเมนต์เม็ดลอยประกอบด้วยช่องว่างอากาศ (ขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน) ช่องว่างระหว่างก้อนดินซีเมนต์เม็ดลอย (ขนาดระหว่าง 10-0.01 ไมครอน) และช่องว่างภายในก้อนดินซีเมนต์เม็ดลอย (ขนาดเล็กกว่า 0.01 ไมครอน)

2.12 บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

2.12.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน

Horpibulsuk, S. et al. (2004) กล่าวว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับปัจจัยการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสาน เมื่อเฉือนดินประเภทนี้ภายใต้สภาวะที่ความเค้นประสิทธิผลน้อยกว่าความเค้นครากประสิทธิผล (σ'_v) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของเม็ดดินน้อยมาก ในช่วงนี้กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับปริมาณผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน (Cementation bond) แต่เมื่อความเค้นประสิทธิผลมากกว่าความเค้นครากประสิทธิผล ทั้งการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และพันธะเชื่อมประสานจะมีอิทธิพลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือน (รูปที่ 2.26) และเสนอความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$q_{\max} = q_{\text{bond}} + q_{\text{fabric}} \quad (2.6)$$

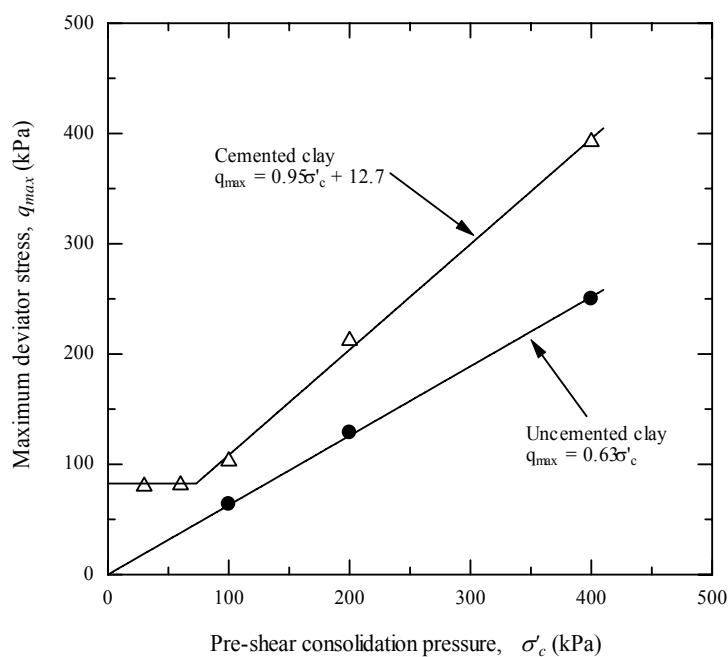
q_{\max} คือ ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (ที่จุดวิบัติ)

q_{bond} คือ ความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน

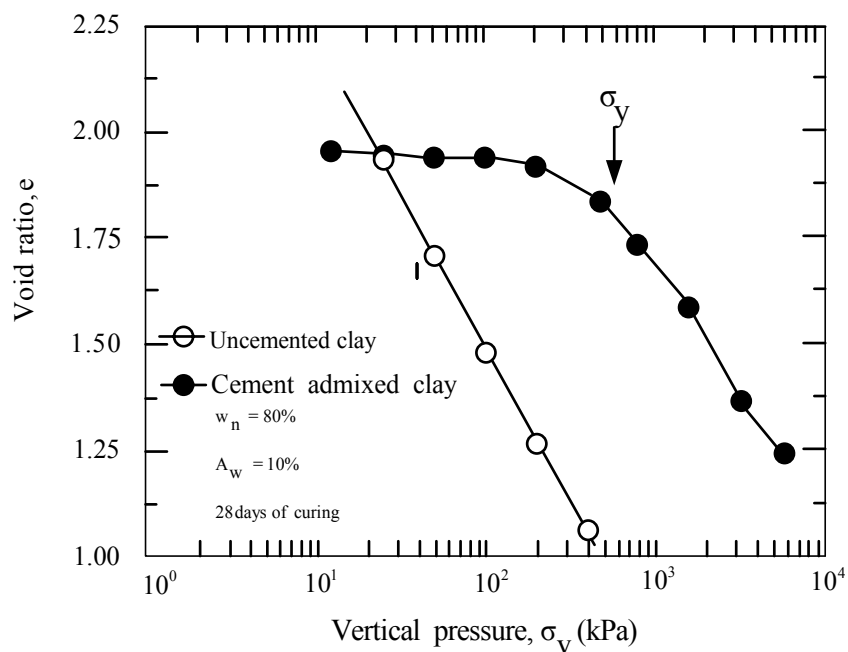
q_{fabric} คือ ความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric)

2.12.2 การอัดตัวคายน้ำ

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน (2546) แสดงผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.27 จากรูปเห็นว่าการอัดตัวคายน้ำมีค่าน้อยมากในช่วงก่อนจุดครากเป็นเพราะอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน แต่การอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงหลังจุดคราก ซึ่งสภาวะหลังจุดครากนี้ดัชนีการอัดตัว (Compression index) มีค่าค่อนข้างคงที่กับการเพิ่มขึ้นของความเค้นในแนวดิ่ง นอกจากนี้ดินเหนียวซีเมนต์ (ดินพันธะเชื่อมประสาน) สามารถที่จะเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วน โพร่งสูง ๆ เมื่อเทียบกับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน



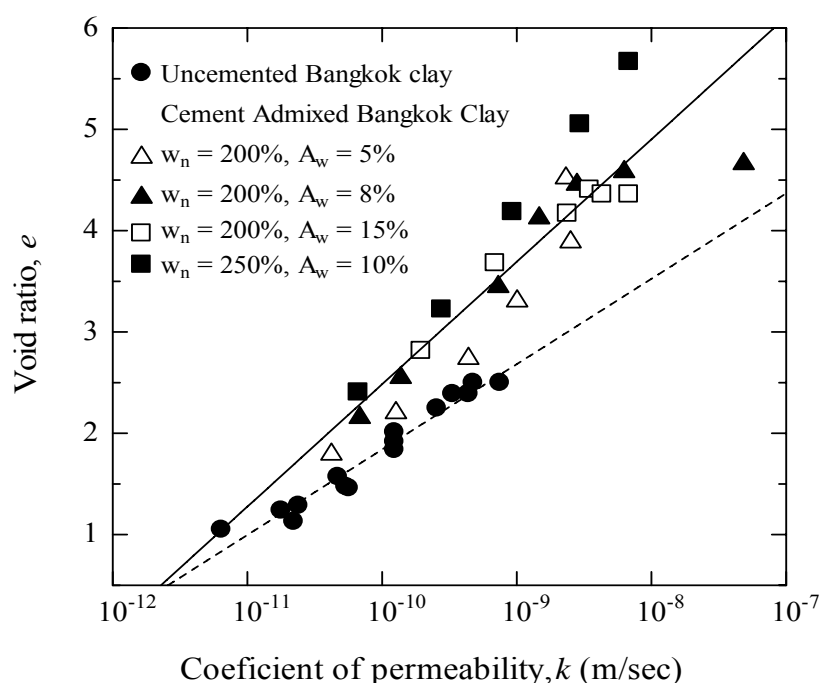
รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล
(Horpibulsuk, S. et. al, 2004)



รูปที่ 2.27 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพฯ
ไร้พันธะเชื่อมประสาน (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน , 2546)

2.13.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน (2546) แสดงผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.30 จะเห็นว่าพันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวอย่างมาก ที่อัตราส่วน โพรงที่เท่ากัน ดินเหนียวซีเมนต์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่า ดังนั้นพันธะเชื่อมประสานนอกจากจะเป็นการเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือน และลดการทรุดตัว แล้วยังเป็นการลดการซึมผ่านของน้ำซึ่งมีประโยชน์สำหรับงานโครงสร้างที่บดน้ำ เช่น งานซ่อมแซมเขื่อนที่แตกร้าว และ Cut - off wall เป็นต้น



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน , 2546)

จากการศึกษาที่ผ่านมา สามารถสรุปได้ว่ากำลังอัดของดินผสมซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรอิทธิพล ได้แก่ ปริมาณของปูนซีเมนต์ ปริมาณความชื้น อายุบ่ม ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการรับกำลังอัดของดินซีเมนต์ และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโดยการวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาค สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมต่าง ๆ ซึ่งทำให้เกิดความเข้าใจได้มากยิ่งขึ้น และผลศึกษานี้เราสามารถสรุปสาระสำคัญที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรควบคุมของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย และได้นำมากำหนดขอบเขตของตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการวิจัย ดังนี้

1. อัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ การแทนที่เถ้าลอยในซีเมนต์พอเหมาะในช่วงร้อยละ 0-40 ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นสามารถชดเชยปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ งานวิจัยนี้จะใช้ อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30 และ 40

2. ปริมาณน้ำในมวลดิน สำหรับดินทรายควรทำการบดอัดให้อยู่ทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด ส่วนดินเหนียวต้องบดอัดให้อยู่ทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด งานวิจัยจะใช้ปริมาณน้ำ 4 ค่า ได้แก่ ร้อยละ 80, 100, 120 และ 140 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

3. การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก สำหรับการทดแทนเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ในช่วงร้อยละ 0-40 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก เกิดขึ้นหลังจากตัวอย่างมีอายุบ่มมากกว่า 7 วัน อายุบ่มที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ใช้อายุบ่ม 5 ค่า ได้แก่ 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน

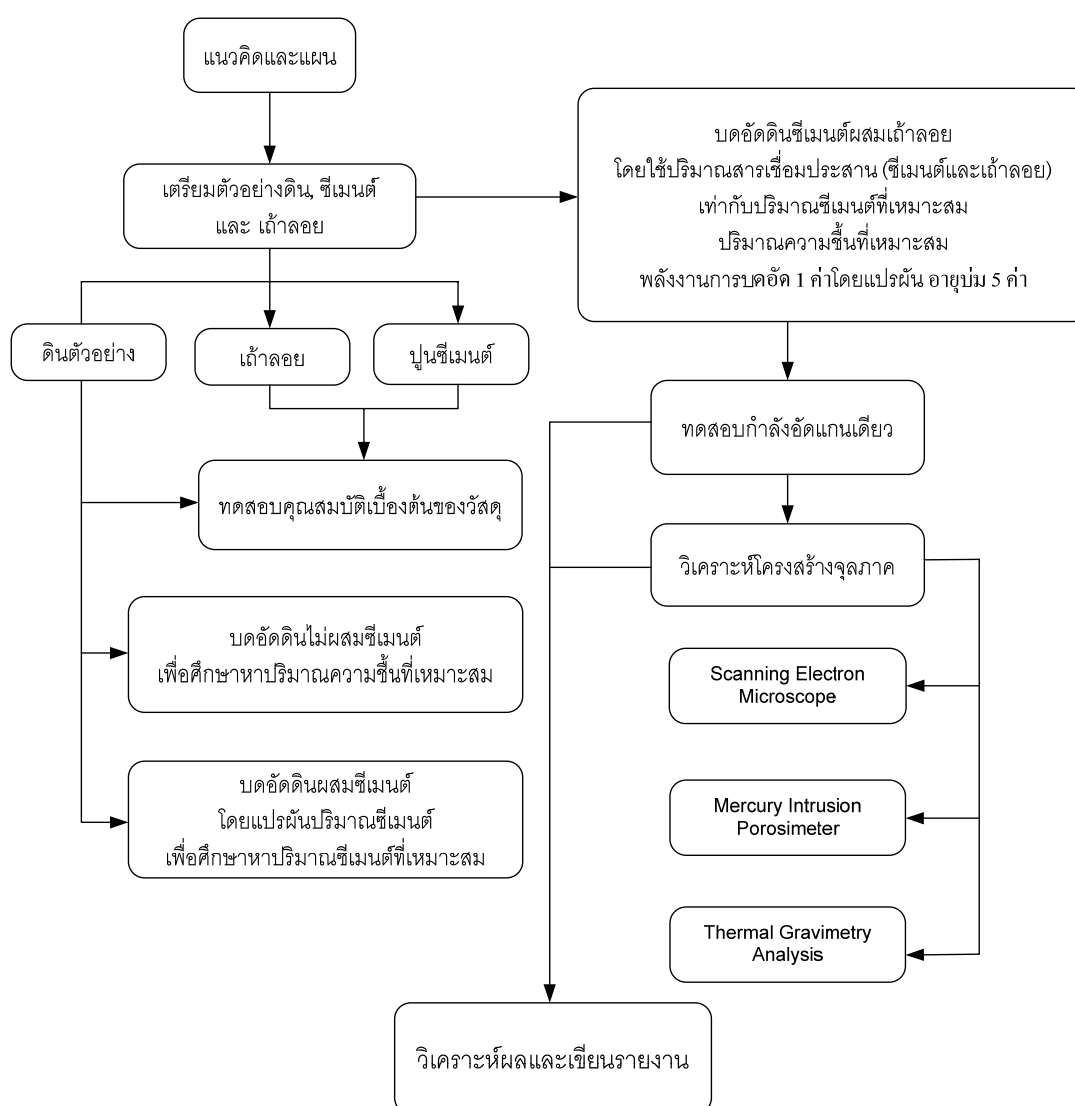
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและอธิบายกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยสัมพัทธ์ โครงสร้างจุลภาค ดินตัวอย่างที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นดินบริเวณอาคารสุรนิเวศน์ 9 ภายใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เก็บตัวอย่างแบบแปรสภาพที่ความลึก 3 - 4 เมตร มีคุณสมบัติเป็น ดินเม็ดละเอียด ดินตัวอย่างจะนำมาผสมสารเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย) แล้วทำการ บดอัด จากนั้นนำไปหาค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเมื่อแปรผันตัวแปรควบคุมต่าง ๆ (อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์ ปริมาณความชื้น อายุบ่ม และความละเอียดของเถ้าลอย) จากนั้นเก็บ ตัวอย่างบางส่วนนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ ผสมเถ้าลอย ซึ่งประกอบด้วย การดูภาพขยายของ โครงสร้างภายในก่อนดินด้วยเครื่องมือ Scanning Electron Microscope การหาขนาดและปริมาตรโพรงในก่อนดินด้วยเครื่องมือ Porosimeter Test และการหาปริมาณของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยเครื่อง Simultaneous TGA Analyzer ผลที่ได้จะนำมาใช้อธิบายกำลังอัดแกนเดียว

ก่อนที่จะดำเนินการวิจัยในส่วนของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ผู้วิจัยจะนำเสนอวิธีการศึกษา หาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินเหนียว ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย วิธีศึกษาการบดอัดดินเหนียวไม่ผสม ซีเมนต์ การศึกษากำลังอัดของดินซีเมนต์โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์เพื่อหาปริมาณซีเมนต์ที่ เหมาะสม หลังจากนั้น จะเสนอวิธีเตรียมตัวอย่างดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย วิธีการหาค่ากำลังอัด แกนเดียว และวิธีวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค แผนงานวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดัง รูปที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งรายละเอียด และขั้นตอนการวิจัย จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการบดอัดดินเหนียวผสมซีเมนต์

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
ปริมาณความชื้น	1	ปริมาณความชื้นเหมาะสม ของดิน ไม่ผสมซีเมนต์
พลังงานการบดอัด	2	1. แบบมาตรฐาน (Standard Proctor) 2. แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)
อายุบ่ม	1	7 วัน
ปริมาณซีเมนต์	11	3, 5, 7, 11, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 45
จำนวนตัวอย่าง	3	ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ละ 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการบดอัดดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
ปริมาณความชื้น	4	ปริมาณความชื้น พิจารณาจากอิทธิพลของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ผลต่อกำลังอัด
พลังงานการบดอัด	1	แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)
อายุบ่ม	5	7, 28, 60, 90 และ 120 วัน
ปริมาณซีเมนต์ผสมเถ้าลอย	1	ปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม
อัตราส่วนระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาณเถ้าลอย	5	1. ซีเมนต์ต่อเถ้าลอย 100 : 0 2. ซีเมนต์ต่อเถ้าลอย 90 : 10 3. ซีเมนต์ต่อเถ้าลอย 80 : 20 4. ซีเมนต์ต่อเถ้าลอย 70 : 30 5. ซีเมนต์ต่อเถ้าลอย 60 : 40
ความละเอียดของเถ้าลอย	2	1. มวลละเอียด 2. มวลหยาบ
จำนวนตัวอย่าง	3	ชุดละ 3 ตัวอย่าง

ดินที่นำมาใช้ในการศึกษา ต้องทำการศึกษาค้นหาคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน หลังจากนั้นจะนำไปบดอัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เพื่อใช้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมบดอัดดินผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ โดยกำหนดค่าตัวแปรตามตารางที่ 3.1 ผลที่ได้สามารถกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นปริมาณสารเชื่อมประสานของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

ตารางที่ 3.2 แสดงตัวแปรของตัวอย่างดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย จำนวนตัวแปรที่ใช้ได้จากผลการศึกษาเถ้าลอยในบทที่ 2 และการศึกษาตัวแปรของอิทธิพลปริมาณซีเมนต์ที่ได้จากการศึกษาดินซีเมนต์ตารางที่ 3.1 ซึ่งตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย เมื่อบ่มได้อายุแล้วจะนำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทุกตัวอย่าง หลังจากนั้นจะพิจารณาตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่สนใจ นำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคตามวิธี Scanning Electron Microscope, Porosimeter Test และ Thermal Gravimetry Analysis ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

3.2 การเก็บและการเตรียมตัวอย่างดิน

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

ดินที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นดินบริเวณอาคารสุรนิเวศน์ 9 ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เก็บตัวอย่างในลักษณะแปรสภาพที่ระดับความลึก 3 - 4 เมตรจากผิวดิน เพื่อให้ได้ดินมีลักษณะที่เหมือนกันและมีการปนเปื้อนน้อยที่สุด จากนั้นนำตัวอย่างดินไปผึ่งให้แห้งใช้ค้อนขยทุบดินที่จับตัวกันเป็นก้อนให้แตกตัวออกจากกันโดยให้มีขนาดประมาณ 1 - 2 เซนติเมตร เพื่อสะดวกในการย่อยดิน ทำการย่อยดินด้วยเครื่องให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำดินที่ผ่านการย่อยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 อีกครั้งหนึ่ง ดินตัวอย่างที่มีอนุภาคเล็กจะทำให้ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น จากนั้นแบ่งดินใส่ถุงพลาสติกถุงละ 6 กิโลกรัม เพื่อนำไปใช้ในตอนต่อไป

3.2.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง

3.2.3 ถ้ำลอย

ถ้ำลอยหยาบ เป็นถ้ำลอยที่ใช้ได้จากโรงจักรไฟฟ้าแม่เมาะอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และถ้ำลอยที่ถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 จะนำไปใช้เป็นถ้ำลอยละเอียด

การทดแทนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยในการวิจัยครั้งนี้ ใช้เทคนิคการผสมถ้ำลอยในคอนกรีตวิธีที่ 1 ของ Berry, E.E. and Malhotra, V.M. (1980) ใช้ถ้ำลอยทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน โดยน้ำหนักอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยที่ใช้คิดเป็นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และ ปริมาณสารเชื่อมประสาน(ปูนซีเมนต์ผสมถ้ำลอย) ที่ใช้ในการผสมใช้เท่ากับปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม

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 จีจํากัดเหลว (liquid limit)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318 มีวิธีการทดสอบแบบหลายจุด (Multipoint Liquid Limit)

3.3.6 พิกัดพลาสติก (plastic limit)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3.4 คุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย

3.4.1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

โดยใช้ขวดทดลอง Le Chatelier ตามมาตรฐาน ASTM C 188

3.4.2 ทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย

โดยการหาลำหนักร่อนเถ้าลอยที่ล้างตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) โดยใช้วิธี Wet Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C 430

3.4.3 วิเคราะห์การกระจายของอนุภาค (particle size distribution)

ทำการวิเคราะห์การกระจายของอนุภาคของเถ้าลอย ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (laser particle size analyzer) ดังรูปที่ 3.2

3.4.4 ถ่ายภาพขยายกำลังสูงสุดของเถ้าลอย

ถ่ายภาพขยายกำลังสูง ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ดังรูปที่ 3.3

3.4.5 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS – 932 ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer)



รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope)



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS – 932

3.5 การบดอัดดิน

การบดอัดดินจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

3.5.1 การหากราฟการบดอัดของดินไม่ผสมซีเมนต์

การศึกษาเพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (optimum water content) รวมถึงกราฟการบดอัด (compaction curve) โดยใช้พลังงาน 2 พลังงาน และทดสอบตามมาตรฐานดังนี้

- 1) การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D698-91
- 2) การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1557-91

3.5.2 การหากราฟการบดอัดของดินผสมซีเมนต์และการหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม

การศึกษาเพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม รวมถึงกราฟการบดอัด โดยใช้พลังงานการบดอัดและวิธีการบดอัดเช่นเดียวกับการบดอัดดินที่ไม่ผสมซีเมนต์ จากนั้นทำการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยผสมปูนซีเมนต์ 11 ค่า ได้แก่ร้อยละ 3, 5, 7, 11, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 45 ของน้ำหนักดินแห้งที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม นำตัวอย่างไปบ่ม

ในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเป็นเวลา 7 วัน เมื่อตัวอย่างดินซีเมนต์ได้อายุบ่มตามกำหนดทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ใช้อัตราการกดตัวอย่าง 1.0 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงตัวอย่างก่อนที่จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ ทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาตรปูนซีเมนต์ เพื่อพิจารณาหาค่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นค่าปริมาณสารเชื่อมประสานในการบดอัดตัวอย่างดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด

3.5.3 การบดอัดตัวอย่างดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้เป็นถุงย่อยมาหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นของดินตามมาตรฐาน ASTM D2216 หลังจากนั้นเติมน้ำลงไปดินให้ได้ความชื้นตามความต้องการ โดยให้แปรผันปริมาณความชื้น 4 ค่าคือ 80%, 100%, 120% และ 140% ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ดินตัวอย่างที่ถูกคลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วจะถูกห่อในถุงพลาสติกเป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง แล้วนำดินตัวอย่างไปหาปริมาณความชื้นอีกครั้งหนึ่งเพื่อตรวจสอบ จากนั้นทำการผสมดินตัวอย่างและสารเชื่อมประสานให้เข้ากันจนวัสดุที่ผสมมีสีกลมกลืนเป็นสีเดียวกัน แล้วเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ไปหาปริมาณความชื้นพร้อมกับทำการบดอัดทันที โดยวิธีการบดอัดและพลังงานการบดอัดที่ใช้จะเช่นเดียวกันกับดินที่ไม่ผสมซีเมนต์ ตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัดจะถูกดันออกจากแบบนำไปชั่งน้ำหนักและห่อด้วยฟิล์มพลาสติก ดังรูปที่ 3.5 แล้วนำไปบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเป็นเวลา 7, 28, 69, 90 และ 120 วัน



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการควบคุมปริมาณความชื้น

3.6 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, q_u)

รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องทดสอบ Unconfined Compression Testing Machine เมื่อได้ตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมแล้วลอยตามระยบบที่ต้องการ นำตัวอย่างดินไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.6.1 นำตัวอย่างดินออกจากฟิล์มพลาสติก

ทำการชั่งน้ำหนัก วัดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางให้ละเอียด 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้ Vernier Caliper

3.6.2 นำตัวอย่างดินเข้าเครื่องทดสอบ Unconfined Compression Testing Machine

ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยใช้อัตราการกด 1.0 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงดินตัวอย่าง ต่อ นาทีจนกระทั่งดินตัวอย่างวิบัติ ทำการบันทึกผลการทดสอบในรูปของความเค้นและความเครียดของดิน

3.6.3 เก็บตัวอย่างดินหลังทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

เพื่อนำไปหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินหลังทำการทดสอบ และตัวอย่างบางก้อนที่มีความสนใจ ไปทำการวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด

3.7 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมถ้ำลอยบดอัด

ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวบางส่วนจะถูกนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดิน ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.7.1 วิธีเตรียมตัวอย่างด้วย Freeze drying

เป็นขั้นตอนการทำดินตัวอย่างให้แห้งก่อนนำไปทำการทดสอบ หากการกระจายขนาดช่องว่าง (Pore Size Distribution) การทดสอบ Thermal Gravimetry Analysis และถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดินตัวอย่างที่ถูกทำให้แห้งด้วยวิธีการ Freeze drying จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร คุณสมบัติทางฟิสิกส์ และทางเคมีน้อย วิธีการ Freeze drying มีขั้นตอนดังนี้ ดินตัวอย่างจะถูกนำมาย่อยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวประมาณ 15 นาที ใ้ไนโตรเจนซึมเข้าไปในตัวอย่างดิน หลังจากนั้นดินตัวอย่างจะถูกนำไปเข้าเครื่อง freeze drying apparatus ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 การเตรียมตัวอย่าง Freeze dry



รูปที่ 3.8 เครื่อง Freeze dry

3.7.2 การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

ดินตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งจะถูกทำให้แตกจนมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 - 4 มิลลิเมตร ดินตัวอย่างจะถูกนำไปติดตั้งบนแท่งติดตัวอย่าง หลังจากนั้นจะนำเข้าสู่ขบวนการเคลือบตัวอย่างด้วยเครื่อง Iron sputtering device ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และสุดท้ายเป็นขั้นตอนการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 เครื่อง Iron sputtering device



รูปที่ 3.10 เครื่อง Scanning Electron Microscope, (SEM)

3.7.3 การวิเคราะห์ด้วย Mercury Intrusion Porosimeter

ดินตัวอย่างหลังจากนำไปเตรียมตัวอย่างด้วยวิธี Freeze Dry แล้วจะถูกนำมาเกลี่ยให้เป็นชั้นลูกบาศก์เล็ก ๆ ขนาด 0.2 - 0.3 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเกลี่ยตัวอย่าง จากนั้นทำการวัดขนาดของช่องว่างด้วยเครื่อง Mercury intrusion porosimeter ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งสามารถวัดขนาดของช่องว่างที่มีขนาดระหว่าง 500 - 0.0035 ไมโครเมตร ขนาดของช่องว่างสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดของปรอทในขณะที่ปรอทแทรกตัวเข้าไปในช่องว่าง กับแรงต้านที่เกิดจากแรงตึงผิวที่เกิดจากปรอทและดิน ดังสมการที่ 3.1

$$P d_p = -4 \sigma \cos \theta \quad (3.1)$$

เมื่อ P คือ ความดันของปรอทที่เกิดจากการแทรกตัวเข้าไปในช่องว่าง (ปาสคาล) d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่าง (เมตร) σ คือ แรงตึงผิวปรอทที่สัมผัสกับอากาศมีค่าเท่ากับ 0.484 นิวตันต่อเมตร และ θ คือ มุมสัมผัสระหว่างตัวอย่างกับปรอท มีค่าเท่ากับ 140 องศา

สมการที่ 3.1 ใช้ภายใต้สมมติฐาน 5 ข้อ ดังต่อไปนี้

- 1) ช่องว่างมีลักษณะเป็นทรงกระบอกอย่างสม่ำเสมอ
- 2) ปรอทจะแทรกเข้าไปในช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ก่อนช่องว่างที่มีขนาดเล็ก
- 3) การวัดขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องมือ คือ เครื่องมือที่สามารถอัดแรงดันได้มากจะสามารถหาขนาดของช่องว่างที่มีขนาดเล็กกว่าเครื่องมือที่มีแรงอัดน้อย
- 4) โครงสร้างของดินไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างการทดสอบ
- 5) ไม่มีของเหลวอื่นในตัวอย่าง



รูปที่ 3.11 เครื่อง Mercury Intrusion Porosimeter

3.7.4 การวิเคราะห์ Thermal Gravimetry Analysis

การเตรียมตัวอย่างตามวิธี Freeze dry หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (150 ไมครอน) ปริมาณดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบประมาณ 10 - 20 มิลลิกรัม นำดินตัวอย่างใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างแล้วนำเข้าเตาเผา อุณหภูมิที่ใช้ในการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างตั้งแต่ 50 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อ 1 นาที เครื่อง Simultaneous TGA analyzer (ดังรูปที่ 3.12) จะบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิ ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 450 - 580 องศาเซลเซียส ซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสีย เมื่อให้ความร้อนกับตัวอย่างที่อุณหภูมิระหว่าง 450 - 580 องศาเซลเซียส ผลึก Ca(OH)_2 จะสลายตัวเป็น Calcium Oxide กับน้ำ ดังสมการที่ 3.2



น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากความร้อน ส่งผลให้น้ำหนักของก้อนตัวอย่างลดลง ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถประมาณได้จากน้ำหนักที่สูญเสียดังสมการที่ (3.2) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.11 คูณด้วยน้ำหนักที่สูญเสีย (El-Jazairi and Illston, 1977 และ 1980) การเปลี่ยนแปลง

ของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานสามารถตรวจสอบได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากต่างก็เป็นผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.12 เครื่อง Simultaneous TGA Analyzer

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษากำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์บดอัด และ ดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด เริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้น คุณสมบัติทางเคมีของดินเหนียว ซีเมนต์ และเถ้าลอย จากนั้นจะได้แสดงผลการศึกษาการบดอัดดินเหนียวที่ไม่ผสมซีเมนต์ ดินเหนียวผสมซีเมนต์ และดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย และสุดท้ายจะเสนอผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย

ในตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่เก็บจากบริเวณอาคารสุรนิเวศน์ 9 ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ระดับความลึก 3 - 4 เมตรจากผิวดิน ในระหว่างการเก็บดินตัวอย่างไม่ปรากฏระดับน้ำใต้ดิน ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ดินดังกล่าวมีปริมาณทราย : ดินตะกอน : ดินเหนียว เท่ากับ 2 : 45 : 53 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.74 ค่าขีดจำกัดเหลว และค่าขีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 74 และ 27 เปอร์เซ็นต์ มีค่าอัตราการบวมตัวอิสระ (free swell ratio) เท่ากับ 1.0 ดินประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง (CH) ด้วยการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified soil classification system, USCS) ตามลำดับ ผลการทดสอบการบวมตัวอิสระ ที่เสนอโดย Prakash and Sridharan (2004) แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวปนดินตะกอนนี้จัดเป็นดินบวมตัวต่ำ และมีค่าอัตราส่วนบวมตัวอิสระเท่ากับ 1.0

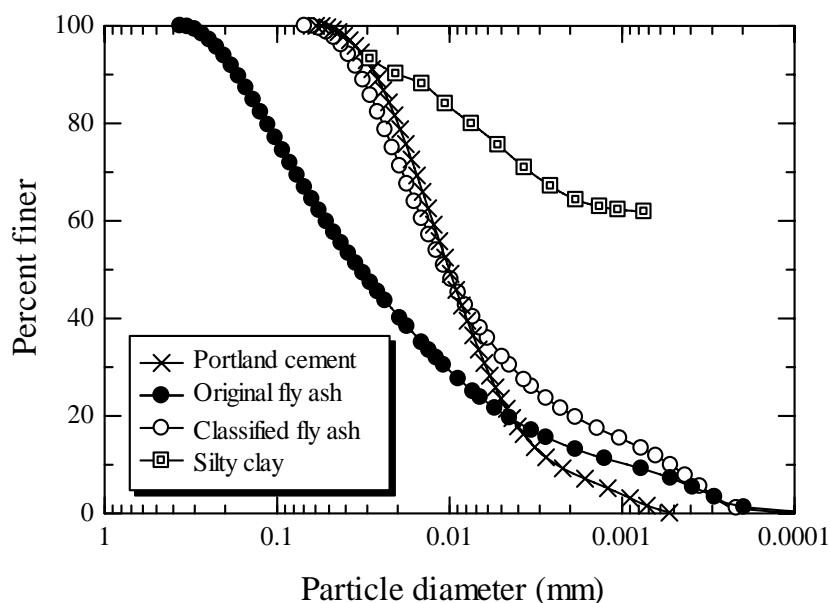
เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษานำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งจะเรียกว่า เถ้าลอยหยาบ (Original fly ash, OFA) และเมื่อร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 จะเรียกว่า เถ้าลอยละเอียด (Classified fly ash, CFA) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียว (Silty Clay) ปูนซีเมนต์ (Portland cement, PC) เถ้าลอยหยาบ และเถ้าลอยละเอียด แสดงดังตารางที่ 4.2 ผลรวมของส่วนผสมหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ใน OFA และ CFA มีปริมาณเท่ากับ 81.54 และ 79.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นเถ้าลอยทั้งสองนี้จึงจัดเป็นเถ้าลอยชั้น F (Class F) ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

Soil property	Silty clay
Physical properties :	
1. Specific gravity	2.74
2. Liquid limit	74.10
3. Plastic limit	25.70
4. Free swell ratio	1
Unified soil classification	CH

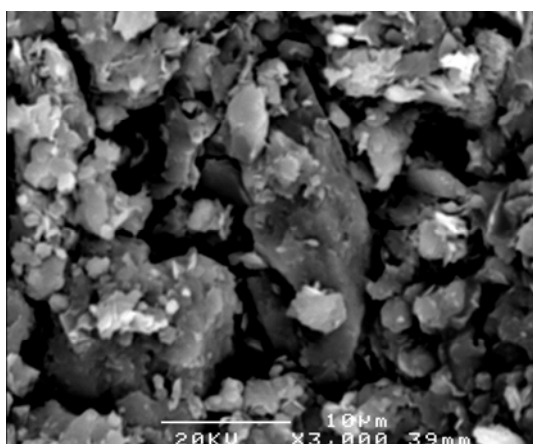
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปนดินตะกอน ปูนซีเมนต์ และ เถ้าลอย

Chemical composition (%)	Silty clay	PC	OFA	CFA
SiO_2	20.10	20.90	45.69	44.72
Al_2O_3	7.55	4.76	24.59	23.69
Fe_2O_3	32.89	3.41	11.26	11.03
CaO	26.15	65.41	12.15	12.67
MgO	0.47	1.25	2.87	2.63
SO_3	4.92	2.71	1.57	1.28
Na_2O	ND	0.24	0.07	0.07
K_2O	3.17	0.35	2.66	2.87
LOI	3.44	0.96	1.23	1.42

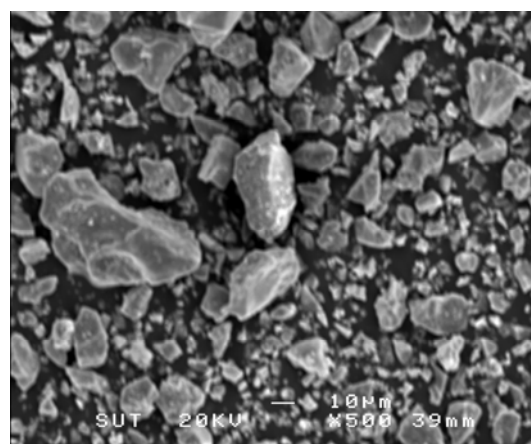


รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และ เถ้าลอย

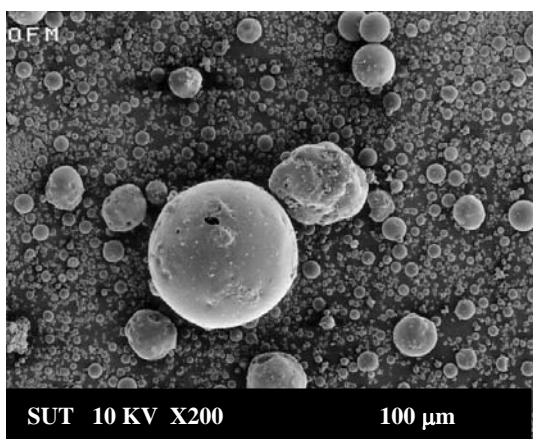
กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และ เถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 4.1 ผลการศึกษาด้วย Hydrometer Analysis พบว่าเม็ดดินมีที่ขนาดเล็กมาก ซึ่งขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 0.0007 มิลลิเมตร (0.7 ไมครอน) จะยังไม่มีตกตะกอน และสามารถหาขนาดเม็ดเถ้าลอยเฉลี่ย (median particle size D_{50}) มีค่าเท่ากับ 0.03 มิลลิเมตร (30 ไมครอน) และ 0.009 มิลลิเมตร (9 ไมครอน) สำหรับ OFA และ CFA ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากราฟการกระจายขนาดของ PC และ CFA มีลักษณะคล้ายกันมาก D_{50} ของ PC มีค่าเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร (10 ไมครอน) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า D_{50} ของ CFA ค่าความถ่วงจำเพาะของ PC OFA และ CFA เท่ากับ 3.15, 2.33 และ 2.54 ตามลำดับ



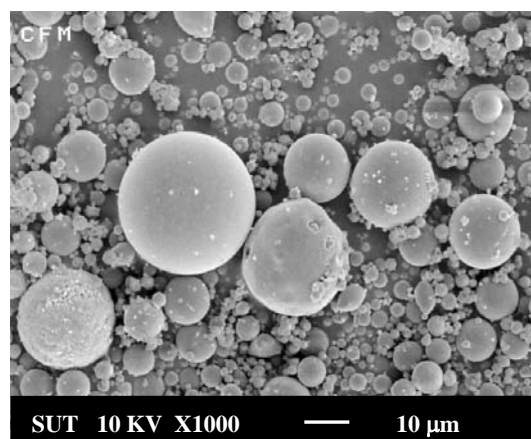
(a)



(b)



(c)



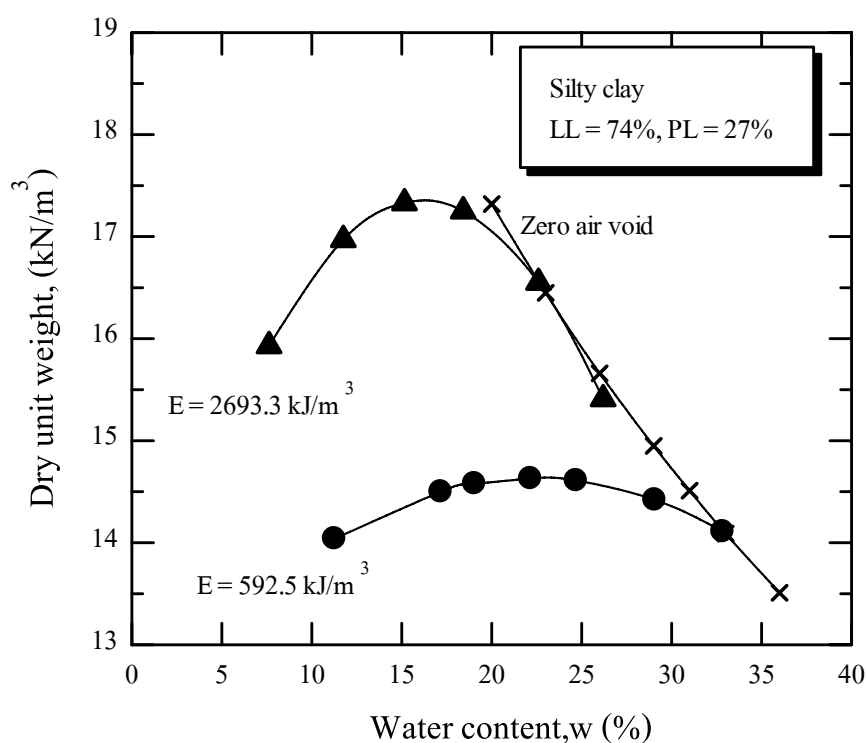
(d)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM (a) ดินตัวอย่าง ที่กำลังขยาย 3000 เท่า (b) PC ที่กำลังขยาย 500 เท่า (c) Original Fly Ash (OFA) ที่กำลังขยาย 200 เท่า และ (d) Classified Fly Ash (CFA) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

รูปที่ 4.2 แสดงรูปถ่ายกำลังขยายของดินเหนียว PC OFA และ CFA ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope จะเห็นได้ว่าอนุภาคเม็ดดินตัวอย่างจะเกาะเป็นกลุ่มก้อน โดยมีขนาดของเม็ดที่แตกต่างกันอยู่รวมกัน ส่วนเม็ดของปูนซีเมนต์จะมีขนาดเม็ดที่ไม่สม่ำเสมอ และลักษณะเป็นเหลี่ยม ขณะที่อนุภาคเถ้าลอยหยาบและละเอียดมีลักษณะเป็นทรงกลม

4.3 กราฟการบดอัดของดินเหนียวที่ไม่ผสมซีเมนต์

รูปที่ 4.3 แสดงผลการบดอัดดินเหนียวที่ไม่ผสมซีเมนต์ ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน (592.5 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) จะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานการบดอัดเพิ่มขึ้นปริมาณความชื้นมีค่าลดลง และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษานักวิจัยในอดีต (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2540), มานะ อภิพัฒน์มนตรี (2539), สถาพร ภูวิจิตรจากรู (2542) และ Horpibulsuk. S. et al, 2006) นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นหลังปริมาณความชื้นที่เหมาะสม มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกัน และขนาดกับเส้นช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ (Zero air void) ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างที่ได้จากการบดอัดดินที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน แสดงในตารางที่ 4.3



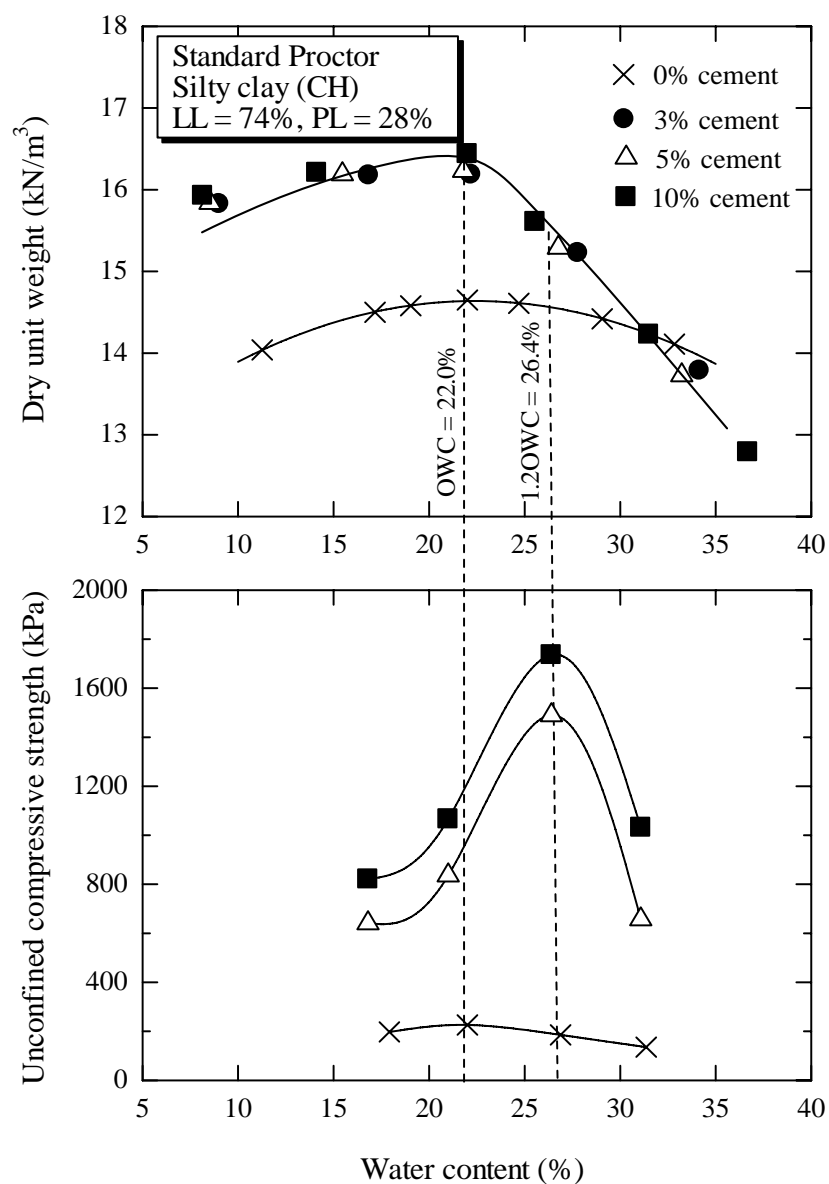
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น กับความหนาแน่นแห้ง ที่พลังงานการบดอัด 592.5 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินตัวอย่าง

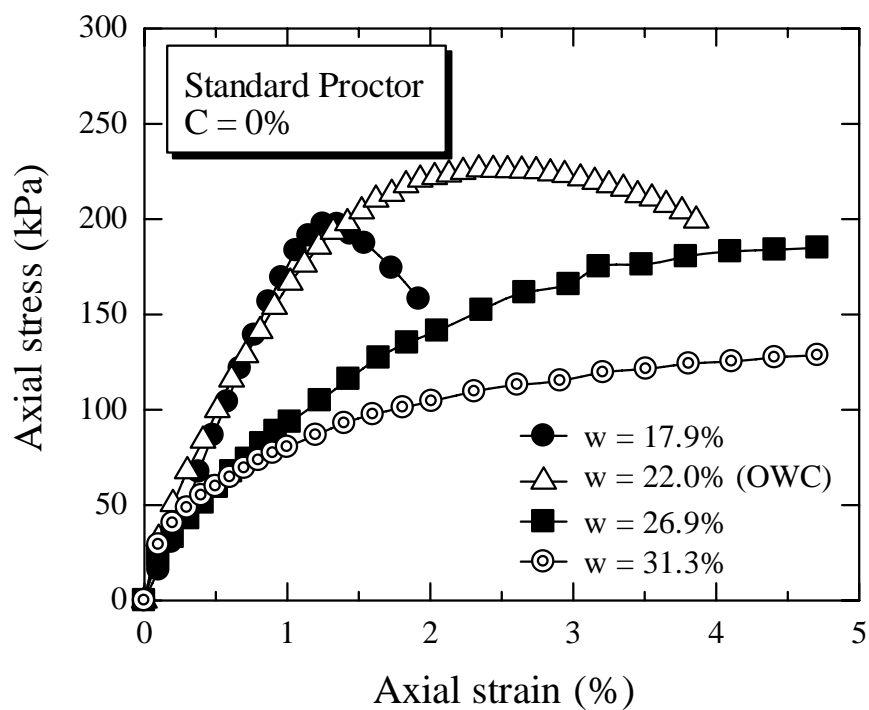
Energy per unit volume	Silty clay (CH)	
	OWC, (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)
1. Standard Proctor (592.5 kJ/m ³)	22.4	14.6
2. Modified Proctor (2693.3 kJ/m ³)	17.2	17.4

4.4 ผลศึกษาการบดอัดและแรงอัดแกนเดียวดินซีเมนต์

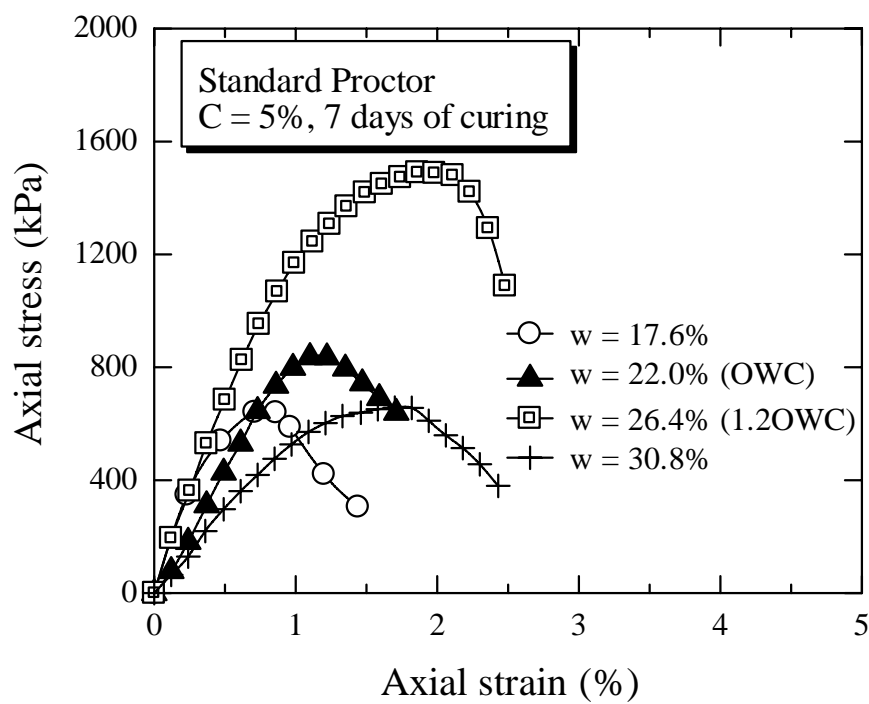
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้นของดินเหนียวปนดินตะกอน (ไม่ผสมซีเมนต์) และดินเหนียวซีเมนต์ จากกราฟการบดอัดจะเห็นได้ว่าดินซีเมนต์มีความไวตัวต่อน้ำสูงกว่าดินไม่ผสมซีเมนต์ ในช่วงปริมาณความชื้นทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังจะเห็นได้จากหน่วยน้ำหนักแห้งของดินซีเมนต์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของน้ำ หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์มีค่าสูงกว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินไม่ผสมซีเมนต์ ขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง กำลังอัด และสติเฟเนสของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นจนกระทั่งถึงปริมาณความชื้นเหมาะสม และมีค่าน้อยลงตามปริมาณความชื้นเหมาะสม เมื่อปริมาณความชื้นอยู่ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม พฤติกรรมนี้แตกต่างจากพฤติกรรมของดินเหนียวซีเมนต์ ซึ่งกำลังอัด และสติเฟเนสสูงสุดจะอยู่ที่ปริมาณความชื้นที่ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6



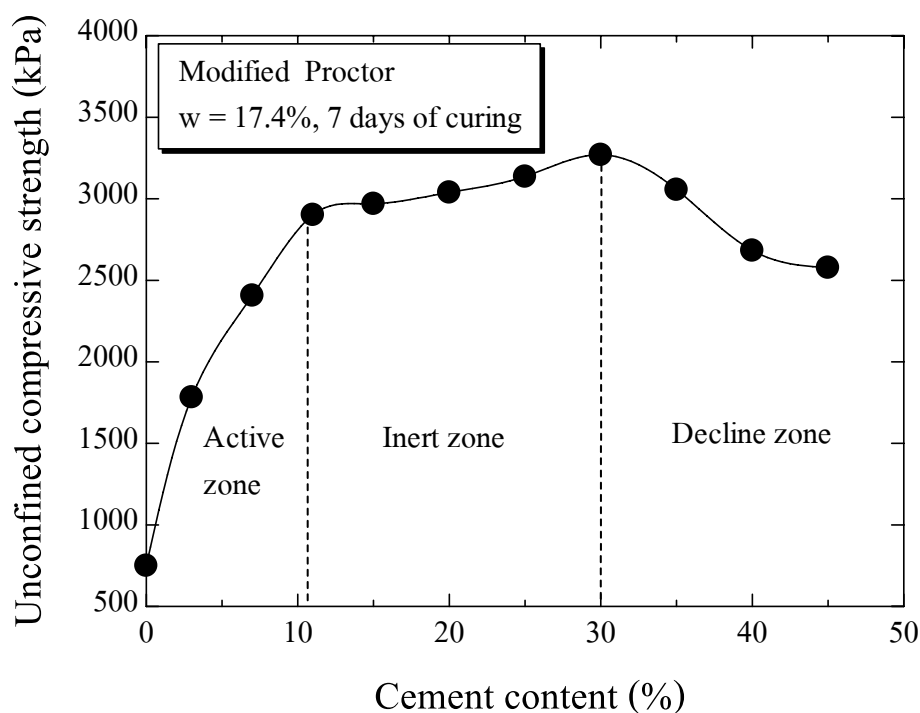
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัด กับปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์



รูปที่ 4.5 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวซีเมนต์



รูปที่ 4.6 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวซีเมนต์



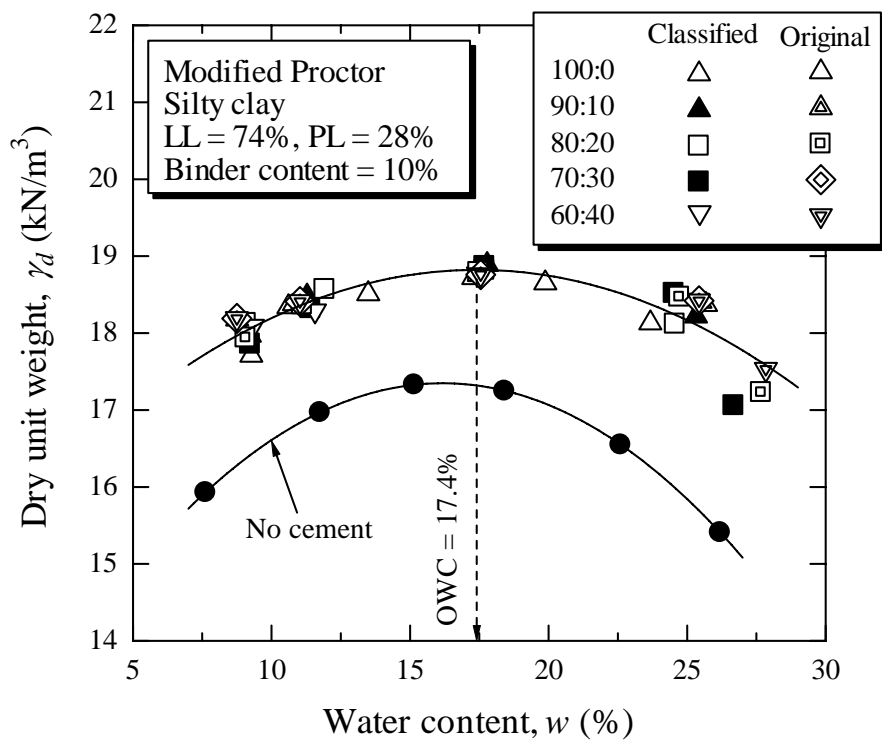
รูปที่ 4.7 โซนการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์

รูปที่ 4.7 แสดงอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่บดอัดภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม (20%) และที่อายุบ่ม 7 วัน การพัฒนากำลังอัดสามารถแบ่งออกเป็นสามโซน เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ซีเมนต์เจลที่จุดสัมผัสจะมีมากขึ้น และเมื่อซีเมนต์เจลแข็งตัว พันธะเชื่อมประสานที่จุดสัมผัสก็จะมีแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย ในโซนนี้เรียกว่าโซนแอคทีฟ (active zone) ถัดจากโซนนี้กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โซนนี้เรียกว่าโซนล่าช้า (inert zone) กำลังอัดของดินซีเมนต์จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซีเมนต์มีค่าเกินกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ในโซนนี้เรียกว่าโซนลดกำลัง (decline zone) และอาจสรุปได้ว่า ที่ปริมาณความชื้น และพลังงานการบดอัดค่าหนึ่งการเติมปริมาณปูนซีเมนต์ในดินเหนียวเกินกว่าโซนแอคทีฟไม่ช่วยให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ดินเหนียวซีเมนต์ผสมแก้ลอยจะใช้ปริมาณสารเชื่อมประสาน (ซีเมนต์และแก้ลอย) ที่ 10 เปอร์เซ็นต์

4.5 ผลศึกษาการบดอัดและแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

รูปที่ 4.8 แสดงกราฟผลการบดอัดของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ และเถ้าลอยทั้งสองชนิดที่อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับกราฟการบดอัดดินไม่ผสมซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของการบดอัดดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยหยาบและละเอียดจะมีค่าเท่ากับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดไม่ผสมซีเมนต์ แต่หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์เถ้าลอยมีค่าสูงกว่าของดินบดอัดไม่ผสมซีเมนต์ ผลการบดอัดนี้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (Horpibulsuk, S. et al., 2006 และ 2008c)

ตารางที่ 4.4 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวปนดินตะกอน ดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียด จะเห็นได้ว่าพิกัดพลาสติกของดินเหนียวซีเมนต์และเถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ (การลดลงของอัตราส่วนการแทนที่) การเพิ่มขึ้นของพิกัดพลาสติกบ่งบอกถึงการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคดินเนื่องจากการดูดซับ Ca^{2+} จากกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ เถ้าลอยจะไม่มีอิทธิพลต่อพิกัดพลาสติก (PL) ดังจะเห็นได้จากผลทดสอบดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนแทนที่ 100 เปอร์เซ็นต์ (C:F = 0:100) มีค่า PL เท่ากับ 29.4 เปอร์เซ็นต์ และ ดินเหนียวปนดินตะกอน (C:F = 0:0) มีค่า PL เท่ากับ 27.5 เปอร์เซ็นต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เถ้าลอยไม่มีอิทธิพลต่อการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน การรวมตัวเป็นกลุ่มอนุภาคมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดแต่แทบจะไม่ผลต่อขีดจำกัดเหลว ด้วยเหตุนี้ ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) ของดินเหนียว ดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์เถ้าลอย จึงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินเหนียวรวมตัวต่ำถูกควบคุมโดยขีดจำกัดเหลว (Nagaraj et al., 2006 และ Horpibulsuk, S. et al., 2008a)

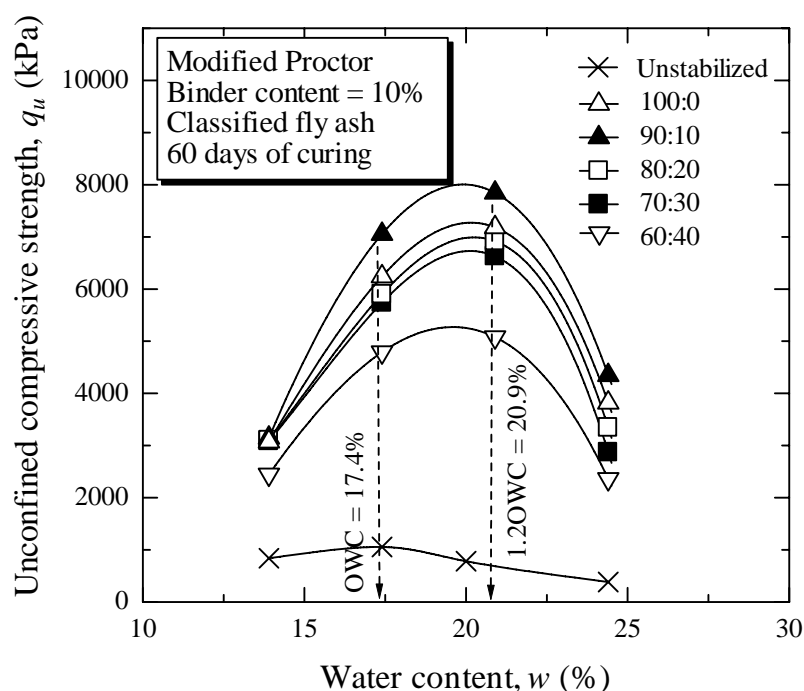


รูปที่ 4.8 กราฟการบดอัดดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

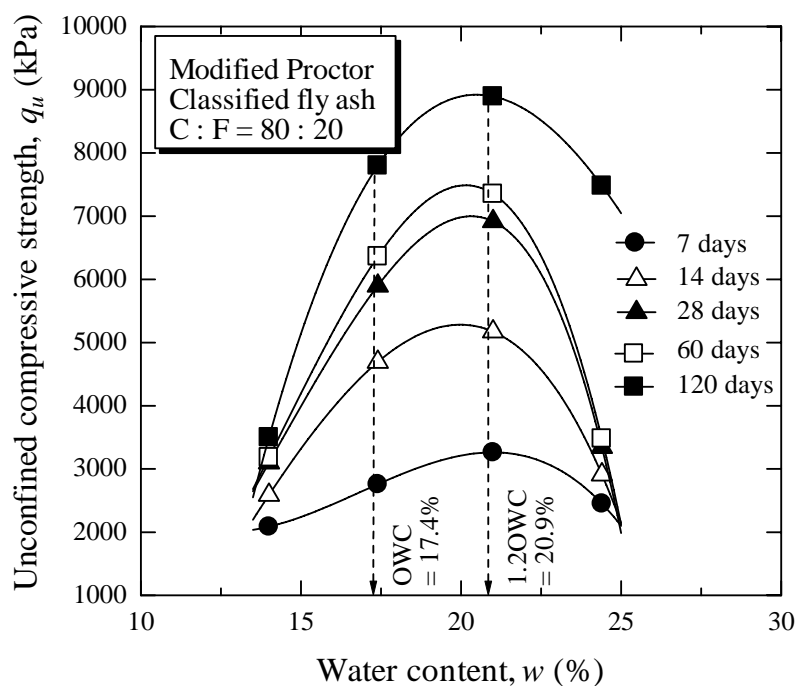
ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติพื้นฐานของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนแทนที่ต่าง ๆ

Type of stabilization	C:F	Atterberg's limits (%)		
		LL	PL	PI
No stabilization	0:0	74.1	27.5	46.6
PC	100:0	71.0	44.8	26.2
PC + CFA	0:100	73.1	29.4	43.7
	80:20	71.4	37.6	33.8
	60:40	71.7	33.3	38.4
PC + OFA	80:20	71.4	36.3	35.1
	60:40	71.7	33.3	38.4

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์เถ้าลอยเม็ดละเอียด ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 60 วัน เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของดินบดอัด กำลังอัดสูงสุดของดินซีเมนต์เถ้าลอยเกิดที่ปริมาณความชื้นประมาณ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม ขณะที่กำลังอัดสูงสุดของดินบดอัดเกิดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ซึ่งเป็นจุดที่หน่วยน้ำหนักมีค่าสูงสุด สำหรับดินซีเมนต์เถ้าลอยกำลังอัดสูงสุดยังคงเกิดที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่อายุบ่มต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับดินเหนียวซีเมนต์ (Horpibulsuk, S. et al., 2008c) สำหรับทุกอายุบ่ม อัตราส่วนการแทนที่ และความละเอียด



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 60 วัน

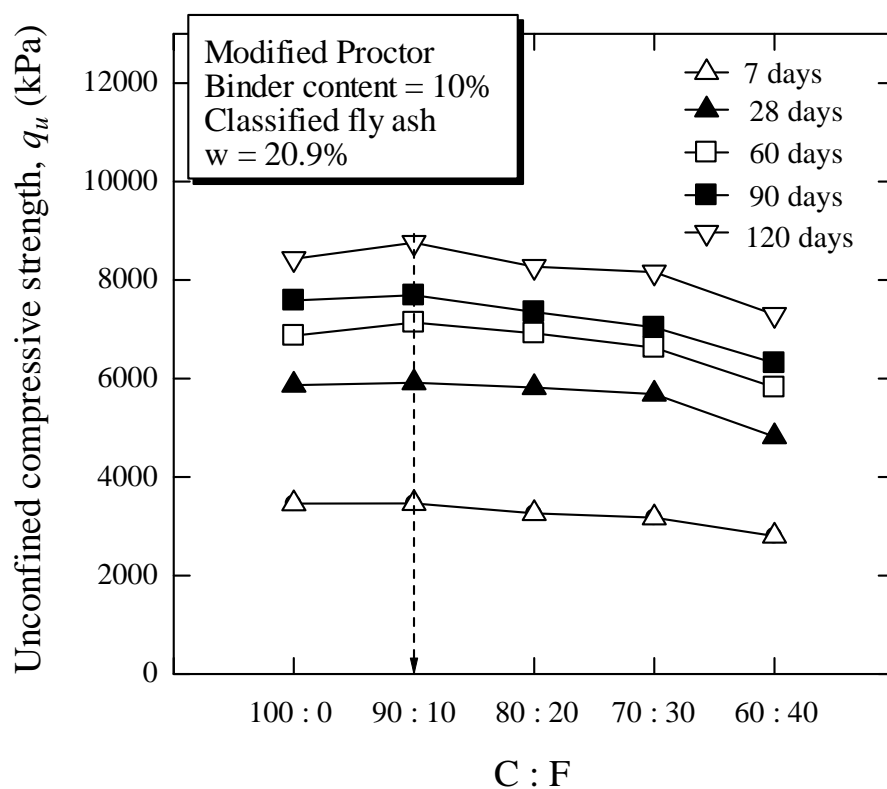


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์
เถ้าลอยละเอียดที่อัตราส่วนการแทนที่ 80:20 ที่อายุบ่มต่าง ๆ

ตารางที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ และความละเอียดของเถ้าลอยต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ที่อายุบ่มต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าที่ทุกอายุบ่ม กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดส่วนมากมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบเล็กน้อย (ยกเว้นที่อัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 40 ที่อายุบ่ม 60 วัน และอัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 90 และ 120 วัน) ดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบ และละเอียดที่มีอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับดินซีเมนต์ (อัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 0) ดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 ให้กำลังอัดต่ำกว่าดินซีเมนต์ และกำลังอัดดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 จะให้ค่าสูงที่สุดตั้งแต่อายุบ่มเริ่มแรก ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และอัตราส่วนการแทนที่ของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียด ที่อายุบ่มต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.11 พฤติกรรมนี้แตกต่างจากพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยเถ้าลอยจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่อายุบ่มสูง ๆ (โดยทั่วไปเกินกว่า 60 วัน) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า กำลังอัดของคอนกรีตเถ้าลอยจะมีค่ามากกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ปราศจากเถ้าลอยเมื่ออายุบ่มเกินกว่า 60 วัน

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่ และอายุบ่มต่าง ๆ

Curing time (days)	Compressive strength (kPa)									
	C:F = 100:0	C:F = 90:10		C:F = 80:20		C:F = 70:30		C:F = 60:40		
		CFA	OFA	CFA	OFA	CFA	OFA	CFA	OFA	
7	3460	3465	3479	3262	3257	3174	3082	2803	2669	
28	5867	5916	5362	5817	5701	5685	5263	4821	4634	
60	6872	7138	6828	6918	6437	6627	6537	5821	5840	
90	7586	7353	7691	7353	7043	7038	6753	6316	6181	
120	8432	8272	8566	8271	8182	8771	7901	7300	7200	

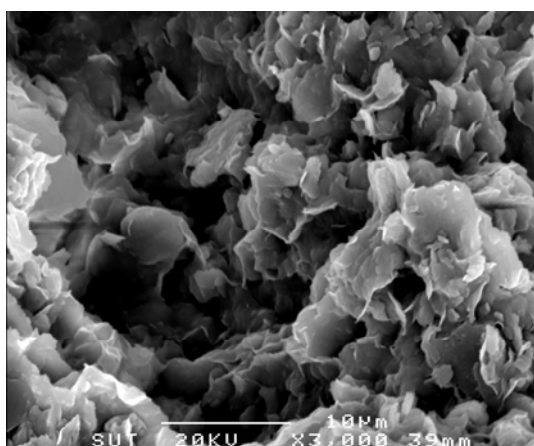


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และอัตราส่วนการแทนที่
ที่อายุบ่มต่าง ๆ

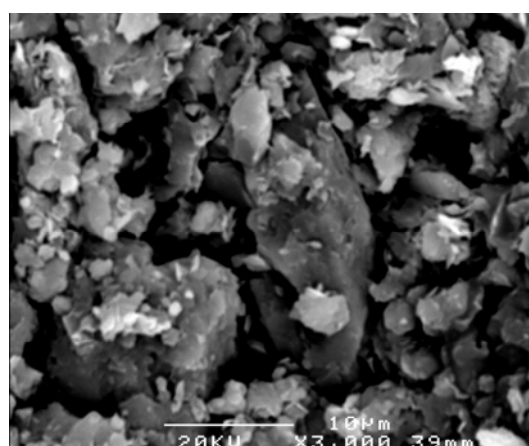
4.6 การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาค

4.6.1 ภาพถ่ายกำลังขยายดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์

รูปที่ 4.12 (a) แสดงภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัดที่ *OWC* ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน จะเห็นว่ากลุ่มเม็ดดินขนาดใหญ่แตกตัวเป็นกลายเป็นกลุ่มเม็ดดินขนาดเล็ก และทำให้โพรงมีขนาดเล็กลง ซึ่งกลุ่มก้อนดิน และขนาดโพรงแตกต่างจากดินที่ไม่ได้บดอัด ดังรูปที่ 4.12 (b) รูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายขยายของดินไม่ผสมซีเมนต์บดอัดภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้นระหว่าง 0.8 ถึง 1.2 เท่าของ *OWC* ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม รูปที่ 4.13(c) โครงสร้างของดินมีลักษณะเป็นแบบกระจัดกระจาย (dispersed structure) แสดงว่าปริมาณความชื้นมีมากพอต่อการพัฒนา Diffusion double layer ส่งผลให้เกิดแรงผลักที่สูง ดังนั้นอนุภาคของเม็ดดิน และกลุ่มเม็ดดินจึงสามารถเคลื่อนตัวข้ามกันได้ง่ายเมื่อถูกเขย่า ส่งผลให้กำลังอัด และสตีเฟนสต่ำ การบดอัดทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม ดังรูปที่ 13(a) ปริมาณความชื้นที่มีไม่มากพอที่จะพัฒนา Diffusion double layer ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น ระยะห่างระหว่างอนุภาคดินจึงมีน้อย ส่งผลให้โครงสร้างดินมีแนวโน้มเป็นแบบรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (flocculation) ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะเป็นผลรวมของโครงสร้างทั้งสอง ที่สภาวะดังกล่าวดินตัวอย่างแสดงกำลังอัด และสตีเฟนสสูงที่สุด อิทธิพลของพลังงานการบดอัดแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจากรูปที่ 4.12(a) และ รูปที่ 13(b) พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานก่อให้เกิดกลุ่มของเม็ดดินขนาดใหญ่

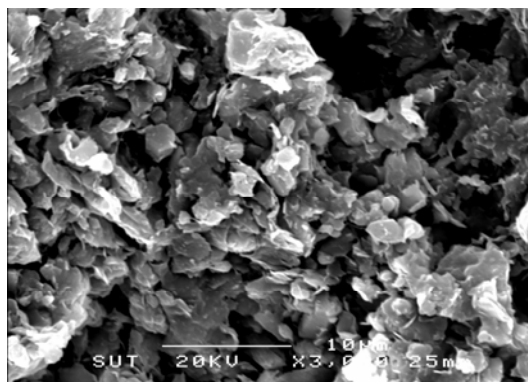
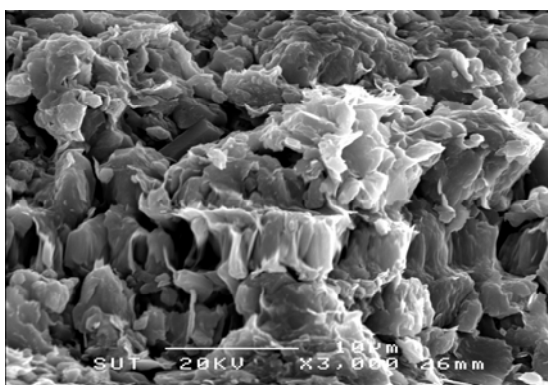
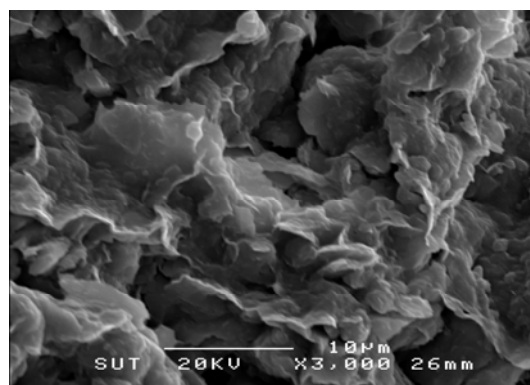


(a)



(b)

รูปที่ 4.12 (a) ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัด ที่ *OWC* ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน และ (b) ดินตัวอย่างไม่บดอัด

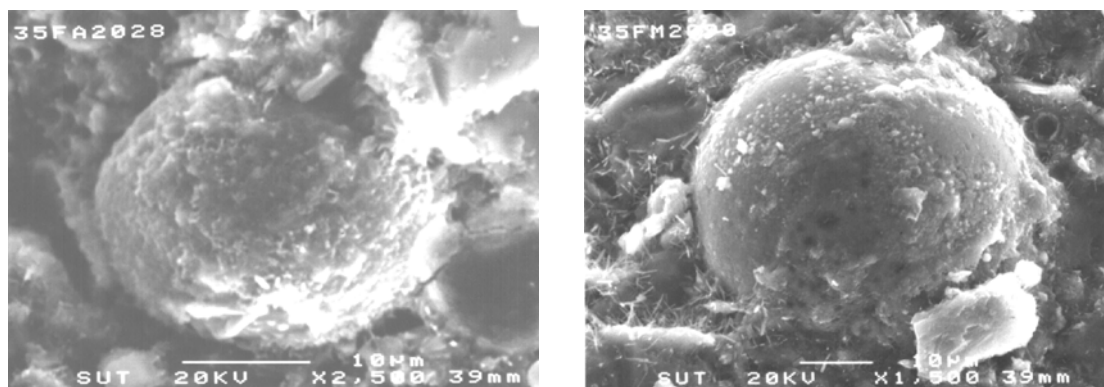
(a) $w = 14\%$ ($0.8OWC$)(b) $w = 17\%$ (OWC)(c) $w = 20\%$ ($1.2OWC$)

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายขยายของดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์บดอัดภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

4.6.2 ภาพถ่ายกำลังขยายดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

รูปที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายอนุภาคเถ้าลอยหยาบในคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน และ 90 วัน ผิวของอนุภาคเถ้าลอยจะถูกกัดกร่อน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย (Chindaprasirt, P., 2005) รูปที่ 4.15 ถึง 4.18 แสดงภาพถ่ายขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบ และละเอียดที่บดอัดที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ อนุภาคของเถ้าลอยปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจนระหว่างกลุ่มอนุภาคดินและซีเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 (C:F = 70:30) สำหรับทั้งสองอายุบ่ม (รูปที่ 4.15a, 4.16a, 4.17a และ 4.18a) ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ที่พัฒนาขึ้นรอบอนุภาคปูนซีเมนต์

เชื่อมต่อกันของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยเข้าด้วยกัน ที่อายุบ่มเดียวกันอนุภาคของเถ้าลอยละเอียดจะสามารถแทรกเข้าไปอุดโพรงช่องว่างในมวลดินได้มากกว่าเถ้าลอยหยาบ นอกจากนี้ยังพบว่าแม้ว่าผิวของเถ้าลอยถูกเคลือบด้วยชั้นของผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ แต่ผิวของอนุภาคเถ้าลอยที่อายุบ่มต่าง ๆ ยังคงเรียบ แสดงว่าเถ้าลอยไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก การค้นพบนี้แตกต่างจากผลการศึกษาของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่เถ้าลอยเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกอย่างเห็นได้ชัดเจนจากรอยกัดตามผิวของเถ้าลอย (Fraay et al. (1989), Berry et al. (1994), Xu and Sarker, (1994), Chindapasirt P. (2005)) ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมีปริมาณสูงมากพอที่จะผลิต Ca(OH)_2 เพื่อใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลิก ผลการสังเกตนี้เราสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกแทบจะไม่มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย

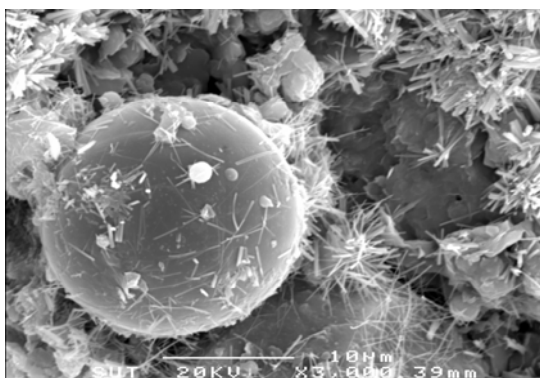


(a)

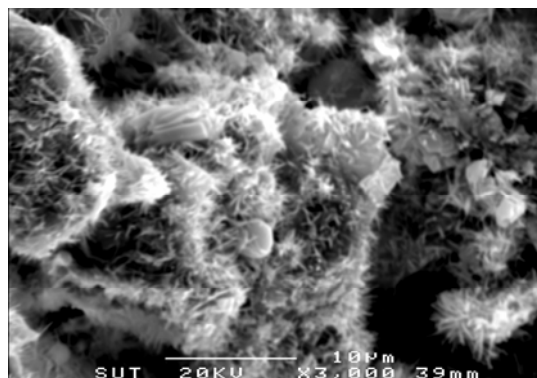
(b)

รูปที่ 4.14 อนุภาคเถ้าลอยหยาบ (a) อายุบ่ม 28 วัน และ (b) อายุบ่ม 90 วัน

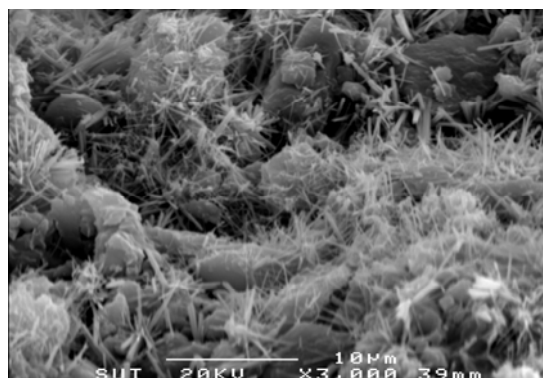
(Chindapasirt, P., 2005)



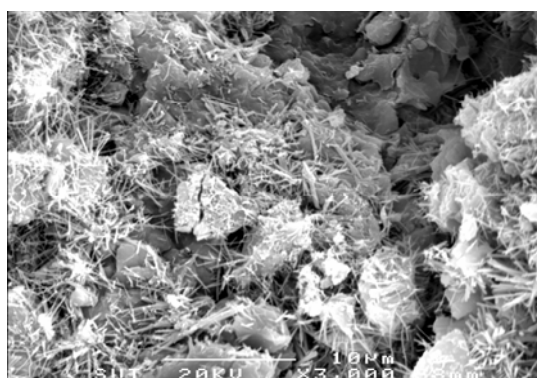
(a) 70:30



(b) 80:20

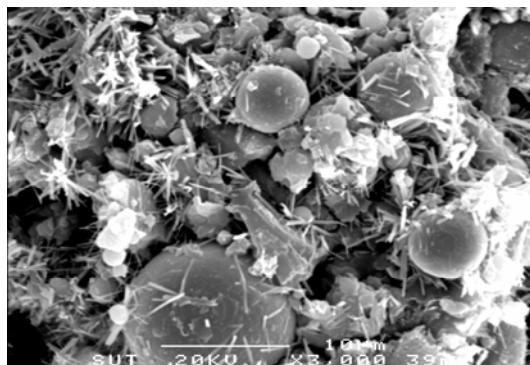


(c) 90:10

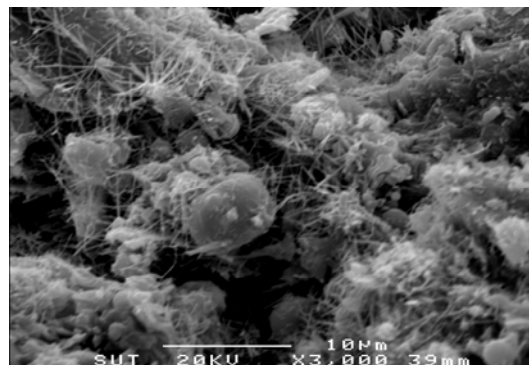


(d) 100:0

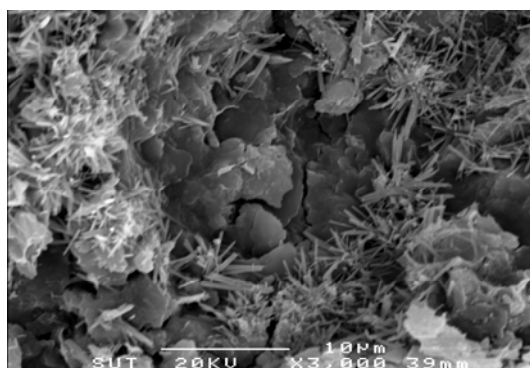
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 28 วัน



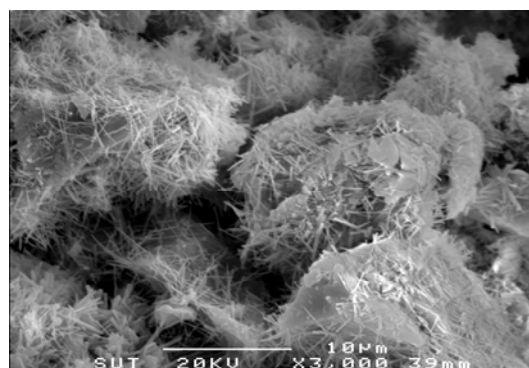
(a) 70:30



(b) 80:20

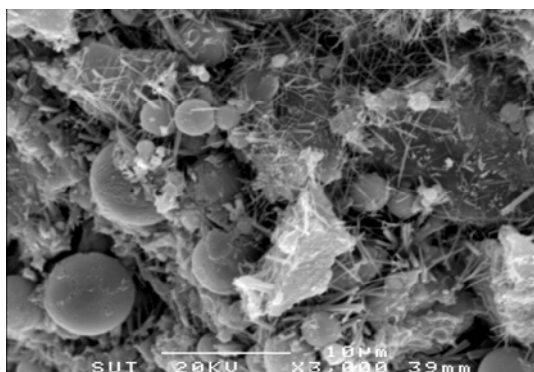


(c) 90:10

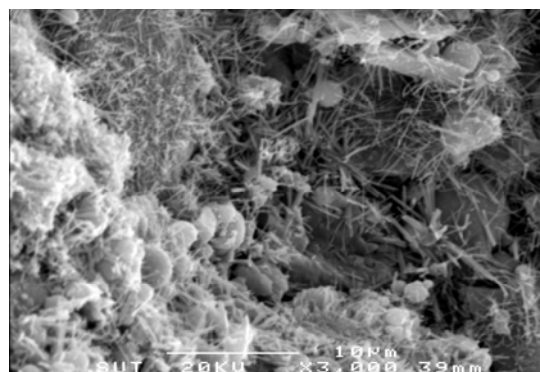


(d) 100:0

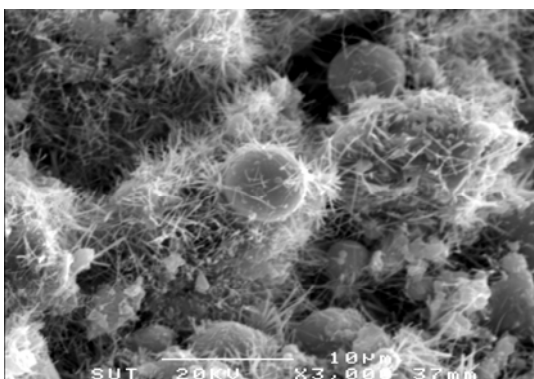
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 60 วัน



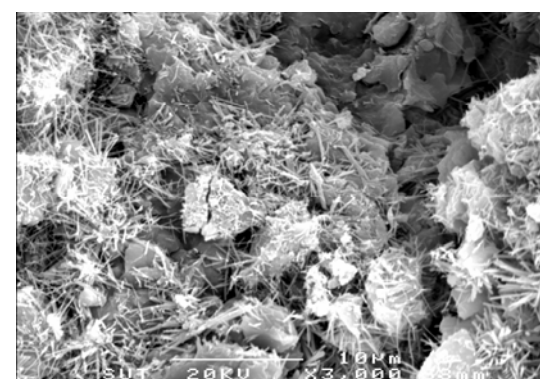
(a) 70:30



(b) 80:20

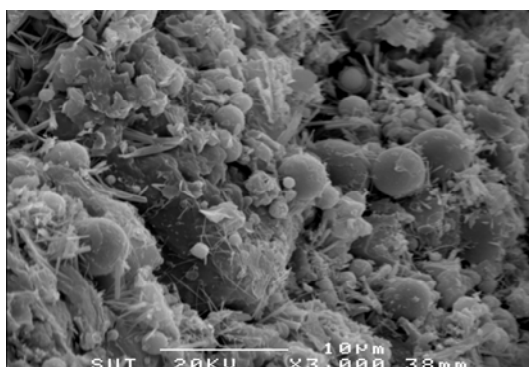


(c) 90:10

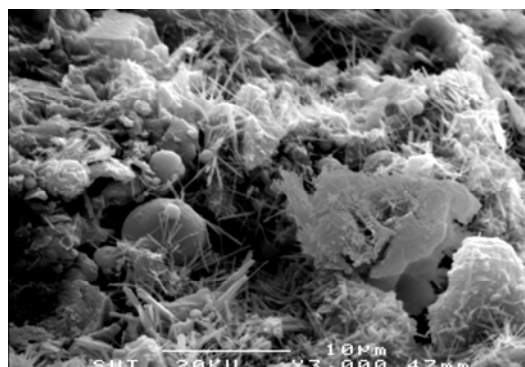


(d) 100:0

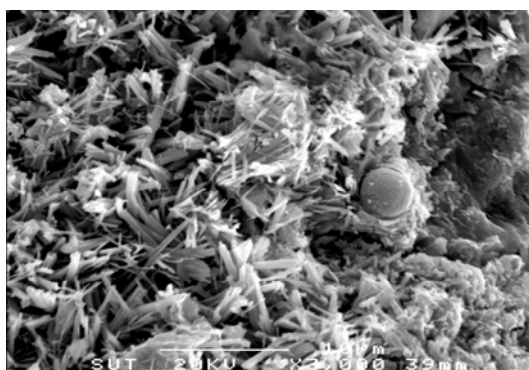
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่ม 28 วัน



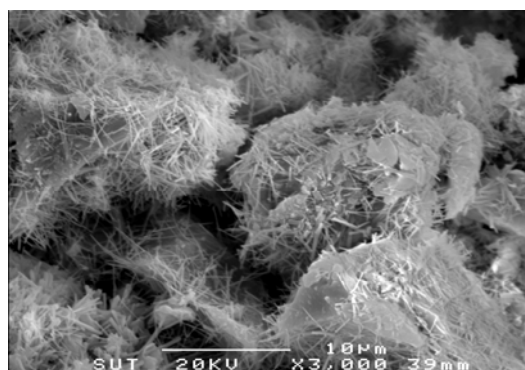
(a) 70:30



(b) 80:20



(c) 90:10



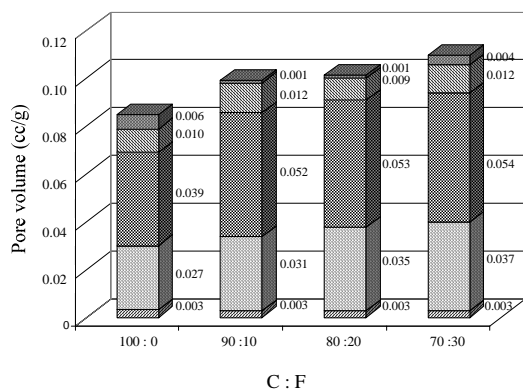
(d) 100:0

รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่ม 60 วัน

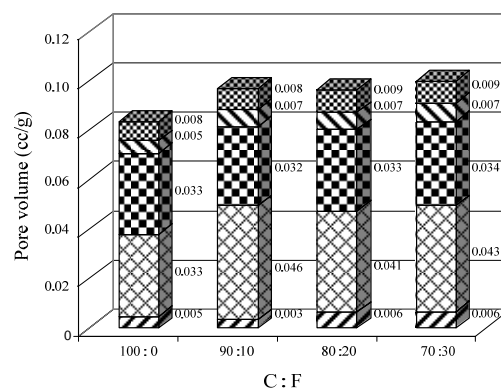
4.6.3 การกระจายขนาดโพรง

รูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงการกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบ และละเอียดที่อายุบ่ม และอัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าที่อายุบ่มหนึ่ง ดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดมีปริมาตรโพรงทั้งหมด (total pore volume) ต่ำกว่าดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบ (ที่อายุบ่ม 7 วัน อัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าลอย 80:20 มีค่าเท่ากับ 0.101 และ 0.087 cc/g สำหรับเถ้าลอยหยาบ และ ละเอียด ตามลำดับ) ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับภาพถ่ายขยาย สำหรับดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบ ปริมาตรโพรงทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนแทนที่ เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยหยาบมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของดิน และปูนซีเมนต์ ดังนั้น การเพิ่มเถ้าลอยหยาบจึงเป็นการเพิ่มมวลหยาบส่งผลให้โพรงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.19 แต่สำหรับดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดการกระจายขนาด

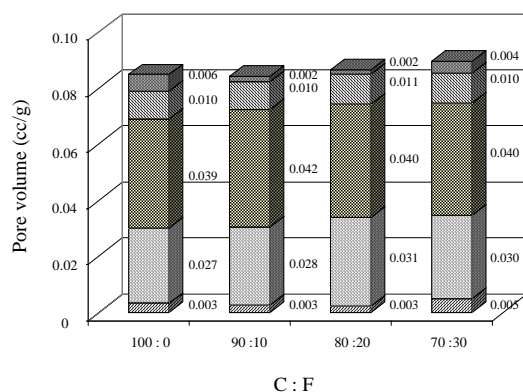
โพรงมีลักษณะเกือบเหมือนกันสำหรับทุกอัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าลอย เพราะการกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยละเอียดมีลักษณะคล้ายกัน อีกทั้ง D_{50} ยังมีค่าใกล้เคียงกัน



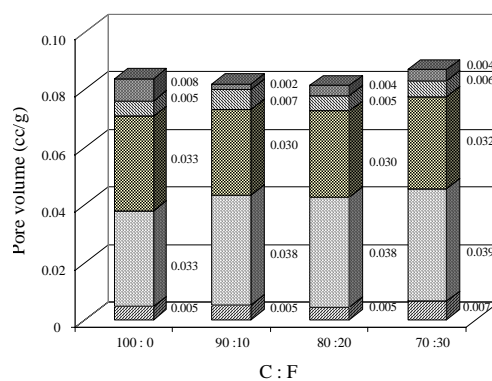
(a) อายุบ่ม 7 วัน (เถ้าลอยหยาบ)



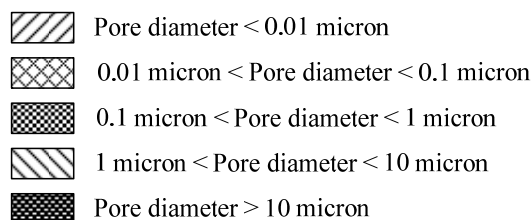
(b) อายุบ่ม 28 วัน (เถ้าลอยหยาบ)



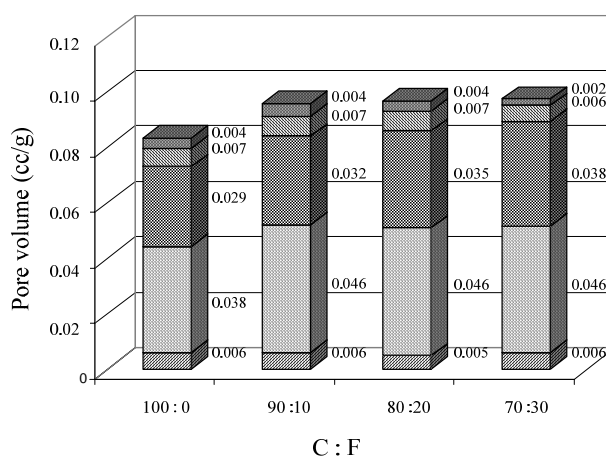
(c) อายุบ่ม 7 วัน (เถ้าลอยละเอียด)



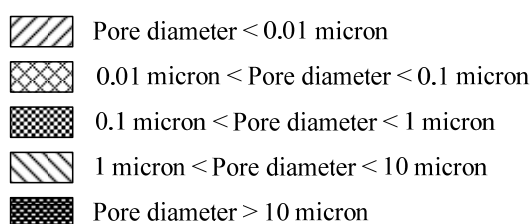
(d) อายุบ่ม 28 วัน (เถ้าลอยละเอียด)



รูปที่ 4.19 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อายุบ่มต่าง ๆ



อายุบ่ม 60 วัน



รูปที่ 4.20 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบที่อายุบ่ม 60 วัน

แม้ว่าการกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบและละเอียดจะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จะเห็นว่าโพรงทั้งหมดของดินซีเมนต์ทั้งเถ้าลอยหยาบ และเถ้าลอยละเอียดที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 มีปริมาณมากกว่าของดินซีเมนต์ไม่ผสมเถ้าลอย แต่กำลังอัดดินซีเมนต์เถ้าลอยมีค่าสูงกว่า แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย ไม่ได้ขึ้นอยู่กับกระจายตัวของขนาดโพรงเพียงอย่างเดียว และเมื่อพิจารณาดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 10 เปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมเถ้าลอยจะเห็นว่า โพรงทั้งหมดและโพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) มีปริมาณลดลง ขณะที่โพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) มีปริมาณเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.19 ดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดที่อายุบ่ม 28 วัน โพรงทั้งหมดและโพรงขนาดใหญ่ จะเปลี่ยนแปลงจาก 0.084 cc/g และ 0.046 cc/g เป็น 0.082 cc/g และ 0.039 cc/g ตามลำดับ และ โพรงขนาดเล็กเปลี่ยนแปลงจาก 0.038 cc/g เป็น 0.043 cc/g ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคน่าจะเกิดจากการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์โพรงในมวลดิน ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

4.6.4 ผลการศึกษา TGA

ผลการศึกษา TGA แสดงดังตารางที่ 4.6 ปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบ และละเอียดที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 7 วัน ที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ ปริมาณ Ca(OH)_2 เกิดมากที่สุดที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสม สำหรับทั้งดินซีเมนต์เถ้าลอยหยาบ และละเอียดซึ่งเป็นปริมาณความชื้นที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด และที่ปริมาณความชื้น 17 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาณความชื้นเหมาะสม) แม้ว่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินซีเมนต์เถ้าลอยจะมีค่าสูงที่สุด (ปริมาตรโพรงน้อยที่สุด) แต่ Ca(OH)_2 มีปริมาณน้อยกว่าที่ปริมาณความชื้น 1.2 ของปริมาณความชื้นเหมาะสม พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาด และปริมาตรรวมของโพรงแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปริมาณสารเชื่อมประสาน (สาร CSH และ CAH ซึ่งเกิดตามปริมาณ Ca(OH)_2)

ตารางที่ 4.6 Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ C: F = 90:10 ที่อายุบ่ม 7 วัน

Water content (%)	Fly ash	Weight loss (%)	Ca(OH)_2 (%)
14% (0.8 <i>OWC</i>)	CFA	1.59	6.52
17% (<i>OWC</i>)	CFA	1.63	6.72
20% (1.2 <i>OWC</i>)	CFA	1.70	6.97
24% (1.4 <i>OWC</i>)	CFA	1.62	6.67
14% (0.8 <i>OWC</i>)	OFA	1.57	6.43
17% (<i>OWC</i>)	OFA	1.61	6.61
20% (1.2 <i>OWC</i>)	OFA	1.65	6.77
24% (1.4 <i>OWC</i>)	OFA	1.55	6.35

จากภาพถ่ายขยาย และผลการวิเคราะห์กระจายขนาดโพรง เราสามารถกล่าวได้ว่าถ้าลอย ทำให้กลุ่มของอนุภาคดินซีเมนต์ที่รวมตัวกันเมื่อสัมผัสกับน้ำแตกตัวออกเป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง เป็นผลให้ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากปริมาณ Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการกระจายตัว (Dispersion effect)

เนื่องจากอิทธิพลของการกระจายตัวของเม็ดลอย ปฏิกิริยาเคมีของดินซีเมนต์ผสมเม็ดลอยที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากปฏิกิริยาเคมีที่ได้แสดงในสมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 เนื่องจากเม็ดลอยไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก แต่ทำหน้าที่กระจายกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ให้มีขนาดเล็กทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันดียิ่งขึ้น เราสามารถแสดงสมการเนื่องจากอิทธิพลร่วม (ไฮเดรชันและการกระจายตัว) ได้ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำของดินซีเมนต์ผสมเม็ดลอย
(เนื่องจากอิทธิพลของปูนซีเมนต์)



(เนื่องจากอิทธิพลของการกระจายตัว)



สมการที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชันเนื่องจากอิทธิพลร่วม จะทำให้สารประกอบ CSH และ CAH ที่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสานและปริมาณ Ca(OH)_2 เพิ่มมากขึ้น ปริมาณ Ca(OH)_2 ที่ใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานิก สามารถหาได้จากสมการที่ 2.5 ที่ได้เสนอมานี้แล้ว จากผลการวิเคราะห์เม็ดลอยไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก มีเพียงปริมาณของ Ca(OH)_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเนื่องจากอิทธิพลร่วม ปริมาณ Ca(OH)_2 เนื่องจากอิทธิพลร่วมสามารถหาได้โดยตรงจากผลวิเคราะห์ TGA ของดินซีเมนต์เม็ดลอย ในทำนองเดียวกันปริมาณ Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน(ปูนซีเมนต์) สามารถหาได้จากวิเคราะห์ TGA ของดินซีเมนต์ตัวอย่างซึ่งมีปริมาณซีเมนต์เท่ากับของดินซีเมนต์เม็ดลอย เพื่อความง่ายปริมาณ Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ปริมาณปูนซีเมนต์ใดๆ สามารถประมาณได้จากปริมาณ Ca(OH)_2 ที่ทราบค่าของดินซีเมนต์ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ค่าหนึ่ง โดยการสมมติว่าการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ (เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และวิศว จักรไพศาล, (2542)) ดังนั้นปริมาณ Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (H) ที่อัตราส่วนการแทนที่ใดๆ ที่อายุบ่มค่าหนึ่งสามารถประมาณได้จากสมการที่ 4.3

$$H = T \times \left(1 - \frac{F}{100} \right) \quad (4.3)$$

เมื่อ T คือ ปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ (อัตราส่วนการแทนที่เท่ากับร้อยละ 0) ซึ่งหาได้จากการวิเคราะห์ TGA และ F คืออัตราส่วนการแทนที่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ และปริมาณ Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้น (induced) เนื่องจากการกระจายตัวนี้สามารถคำนวณได้จากผลต่างของปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ที่ละลายที่เกิดจากอิทธิพลร่วม (ไฮเดรชัน และการกระจายตัว) กับ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (H) ที่ได้จากการประมาณตามสมการที่ 4.3

ตารางที่ 4.7 ปริมาณแสดง Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ที่ละลายที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นเหมาะสมสำหรับอัตราส่วนการแทนที่ และอายุบ่มต่าง ๆ จากผลการศึกษามองเห็นว่า ปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ที่ละลายจะสูงกว่่าที่ละลายหายสำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่ และอายุบ่ม ที่ปริมาณความชื้นและอายุบ่มหนึ่งปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ที่ละลายหาย และจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 10 แต่จะลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มเกินร้อยละ 10 พฤติกรรมนี้แตกต่างจากพฤติกรรมของที่ละลายในคอนกรีต โดยที่ Ca(OH)_2 จะมีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการของเพิ่มขึ้นปริมาณ และ ความละเอียดของที่ละลาย (Berry et al. (1989), Sybertz and Wiens (1991), Harris et al. (1987), Chindaprasirt, P. (2005 and 2006))

ตารางที่ 4.7 Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ที่ละลายที่อัตราส่วนการแทนที่ และอายุบ่มต่าง ๆ

Curing time (days)	Replacement ratio C : F	Fly ash	Ca(OH)_2 (%)		
			TGA Analysis	Hydration	Induced
7	100:0	-	6.67	6.67	0.00
	90:10	CFA	6.97	6.00	0.97
	80:20	CFA	6.79	5.34	1.45
	70:30	CFA	6.39	4.67	1.72
	90:10	OFA	6.77	6.00	0.77
	80:20	OFA	6.66	5.34	1.32
	70:30	OFA	6.12	4.67	1.45

ตารางที่ 4.7 Ca(OH)₂ ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุป่มต่าง ๆ (ต่อ)

Curing time (days)	Replacement ratio C : F	Fly ash	Ca(OH) ₂ (%)		
			TGA Analysis	Hydration	Induced
28	100:0	-	6.79	6.79	0.00
	90:10	CFA	6.96	6.11	0.85
	80:20	CFA	6.81	5.43	1.38
	70:30	CFA	6.57	4.75	1.82
	90:10	OFA	6.83	6.11	0.72
	80:20	OFA	6.76	5.43	1.33
	70:30	OFA	6.46	4.75	1.70
60	100:0	-	6.82	6.82	0.00
	90:10	CFA	7.16	6.14	1.02
	80:20	CFA	6.92	5.46	1.46
	70:30	CFA	6.68	4.77	1.91
	90:10	OFA	6.89	6.14	0.75
	80:20	OFA	6.81	5.46	1.35
	70:30	OFA	6.53	4.77	1.76
90	100:0	-	7.07	7.07	0.00
	90:10	CFA	7.28	6.36	0.91
	80:20	CFA	6.94	5.66	1.28
	70:30	CFA	6.67	4.95	1.72
	90:10	OFA	7.07	6.36	0.71
	80:20	OFA	6.83	5.66	1.17
	70:30	OFA	6.62	4.95	1.67

ตารางที่ 4.7 Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่มต่าง ๆ (ต่อ)

Curing time (days)	Replacement ratio C : F	Fly ash	Ca(OH)_2 (%)		
			TGA Analysis	Hydration	Induced
120	100:0	-	7.08	7.08	0.00
	90:10	CFA	7.29	6.37	0.92
	80:20	CFA	6.96	5.66	1.30
	70:30	CFA	6.70	4.96	1.74
	90:10	OFA	7.09	6.37	0.72
	80:20	OFA	6.85	5.66	1.19
	70:30	OFA	6.68	4.96	1.72

เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ปริมาณ Ca(OH)_2 เกิดมากที่สุดที่ C:F = 90:10 สำหรับทั้งเถ้าลอยหยาบและละเอียดและสำหรับทุกอายุบ่ม เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ที่มีค่าเกินร้อยละ 10 ปริมาณของ Ca(OH)_2 จะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่ากำลังอัดขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เท่านั้นเป็นตัวควบคุมการพัฒนากำลังอัด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่มีเงื่อนไขการผสม (ปริมาณซีเมนต์ อัตราส่วนการแทนที่ และอายุบ่ม) ต่างกัน จะมีค่าประมาณใกล้เคียงกันตราบใดที่ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์มีปริมาณเท่ากัน

Sinsiri, T. et al. (2006) ได้แสดงให้เห็นว่า Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสต์เถ้าลอยมีค่าต่ำกว่า Ca(OH)_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์เสมอ เนื่องจากการใช้ Ca(OH)_2 ในปฏิกิริยาปอซโซลานิก แต่ในกรณีของดินซีเมนต์เถ้าลอย Ca(OH)_2 เนื่องจากอิทธิพลร่วมมีค่าสูงกว่าของปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์สำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่ม Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของเถ้าลอย และอัตราส่วนการแทนที่สำหรับทุกอายุบ่ม

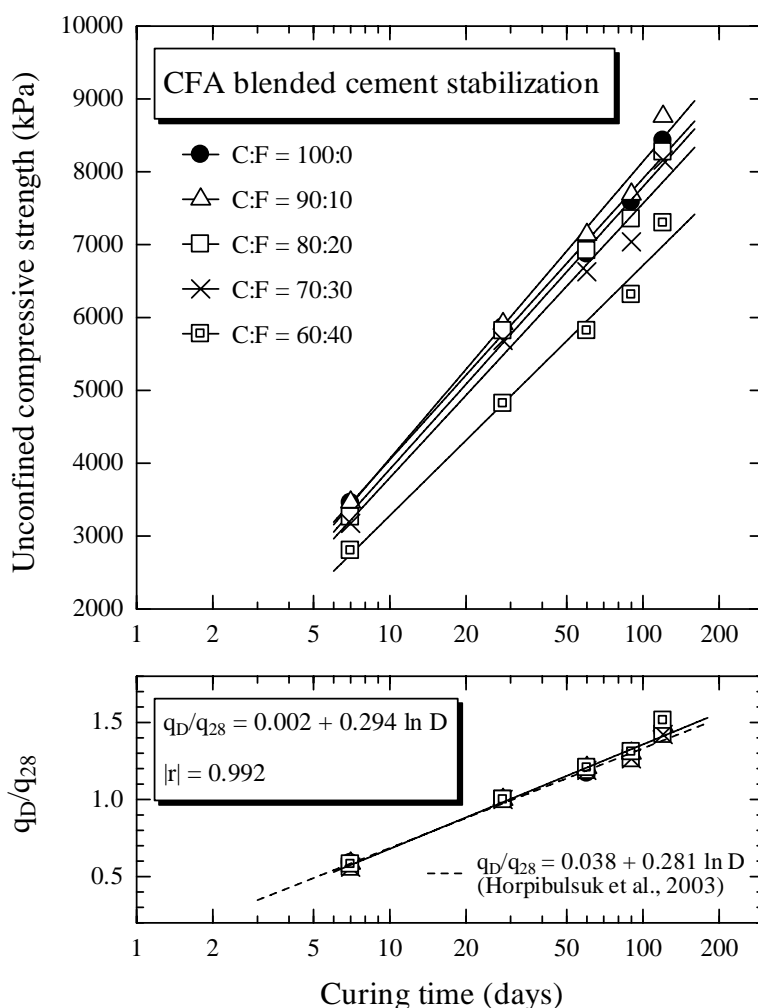
ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และ ดิน ต่างเป็นวัสดุอนุภาค (Particulate material) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นอิสระต่อกัน วัสดุอนุภาคอาจจัดเป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยาหรือไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ สำหรับการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย ปูนซีเมนต์ และดินเหนียวจัดเป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เถ้าลอย ดินตะกอน และทรายจัดเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เนื่องจากมี Specific surface ต่ำ และไม่มีประจุที่ผิว ซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เชื่อมต่อโครงสร้างดินซีเมนต์เถ้าลอยเข้าด้วยกัน โดยวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะถูกฝังอยู่ในโครงสร้าง (Embedded state)

เนื่องจากปูนซีเมนต์ และดินเหนียวเป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เมื่อดินเหนียวถูกผสมกับปูนซีเมนต์ และน้ำ อนุภาคดินเหนียว และปูนซีเมนต์จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ ปล่อยให้ลอยซึ่งเป็นวัสดุไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำสามารถกระจายกลุ่มของอนุภาคดิน และซีเมนต์ให้เป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กกลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ดีขึ้น

4.7 การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเทียบกับเวลา

รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการพัฒนา กำลังอัด (q_D/q_{28}) กับเวลาของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียด เมื่อ q_D คือกำลังอัดที่อายุบ่ม D วัน และ q_{28} คือกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเหมือนกันสำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่ และสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของดินเหนียวซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นสูงที่เสนอโดย Horpibulsuk, S. et al. (2003) ความสัมพันธ์นี้สนับสนุนบทสรุปที่ได้จากการสังเกตโครงสร้างจุลภาคที่ว่า การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์เถ้าลอยขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยที่ปฏิกิริยาปอซโซลานิกแทบจะไม่มีบทบาท

จากการศึกษานี้ เราสามารถสรุปได้ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วม (ไฮเดรชันและการกระจายตัว) อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันถูกควบคุมโดยปริมาณปูนซีเมนต์ ขณะที่อิทธิพลจากการกระจายตัวถูกควบคุมโดยปริมาณเถ้าลอย (อัตราส่วนการแทนที่) ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่ามากที่สุด แต่อิทธิพลจากการกระจายตัวมีน้อยที่สุด (Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นจากการกระจายตัวมีปริมาณต่ำสุด) ในทางตรงกันข้ามที่อัตราส่วนการแทนที่ 30 เปอร์เซ็นต์ อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีน้อยที่สุด แต่อิทธิพลจากการกระจายตัวมีค่ามากที่สุด แม้ว่าอิทธิพลจากการกระจายตัวที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 จะมีน้อยที่สุด แต่กำลังอัดมีค่าสูงที่สุด ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (Ca(OH)_2) จากอิทธิพลร่วมมีปริมาณมากที่สุด ดังนั้น เราสามารถกล่าวได้ว่า นอกจากการประยุกต์ใช้เถ้าลอยในรูปแบบของวัสดุแทนที่ (Replacement material) แล้ว เรายังสามารถประยุกต์ใช้เถ้าลอยในรูปแบบของวัสดุช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซีเมนต์ (Dispersing material) ที่เติมลงในปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเพิ่มกำลังอัด ซึ่งอัตราส่วนการเพิ่มที่เหมาะสมนั้นจำเป็นต้องได้รับการศึกษาต่อไป



รูปที่ 4.21 การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยละเอียดกับเวลา

จากผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ที่มีผลกับกำลังอัดดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยโดยใช้ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคมาอธิบาย พบว่าเถ้าลอยในดินซีเมนต์ไม่ได้ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก สามารถเห็นได้จากภาพถ่าย SEM เถ้าลอยถูกล้อมรอบด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันผิวของเถ้าลอยยังคงมีลักษณะเรียบและกลม ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาเถ้าลอยในงานคอนกรีตผิวของเถ้าลอยจะสึกกร่อนซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก

เถ้าลอยจะช่วยให้การกระจายตัวขนาดโพรง และปริมาตรโพรงทั้งหมดเพิ่มมากขึ้น ผลการศึกษา MIP อธิบายอิทธิพลการกระจายตัวขนาดโพรง และปริมาตรโพรงทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนแทนที่ เนื่องจากเถ้าลอยทำให้กลุ่มของอนุภาคดินซีเมนต์ที่รวมตัวกันเมื่อสัมผัสกับน้ำแตกตัวออกเป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง เป็นผลให้ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น

ดังจะเห็นได้จากปริมาณ Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการกระจายตัว (Dispersion effect) และปริมาณการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Ca(OH)_2 สามารถอธิบายได้จากผลการวิเคราะห์ด้วย TGA

การวิเคราะห์ปริมาณสารเชื่อมประสาน ด้วย TGA พบว่าปริมาณ Ca(OH)_2 มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนแทนที่ และสามารถสรุปได้ว่า กำลังอัดของคินซีเมนต์เถ้าลอย ขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วมระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการกระจายตัว ซึ่งอิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกควบคุมด้วยปูนซีเมนต์ ขณะที่อิทธิพลของการกระจายตัวถูกควบคุมด้วยปริมาณเถ้าลอย (อัตราส่วนแทนที่)

กำลังอัดที่อัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 10 ที่ปริมาณความชื้น 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม สำหรับทุก ๆ อายุบ่ม ทั้งเถ้าลอยหยาบและเถ้าลอยละเอียดมีค่าสูงสุด เนื่องจากอิทธิพลร่วมมีความเหมาะสม ทำให้มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) สูงที่สุด

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

การศึกษากำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวผสมเถ้าลอยบดอัด โดยแปรผันตัวแปรควบคุม (อัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ ปริมาณความชื้น อายุบ่ม และ ความละเอียดของเถ้าลอย) เพื่อสร้างความเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยบดอัด

การวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยโดยอาศัยผลวิเคราะห์ทางด้านโครงสร้างจุลภาค อันได้แก่ Scanning Electron Microscope (SEM) Mercury Intrusion Porosimeter Test (MIP) และ Thermal Gravimetry Analysis (TGA) บทสรุปที่สำคัญมีดังนี้

- 1) ผลการศึกษา SEM พบว่า เถ้าลอยถูกล้อมรอบด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน แต่ผิวของเถ้าลอยยังคงมีลักษณะเรียบและกลม ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาเถ้าลอยในงานคอนกรีต ผิวของเถ้าลอยจะสึกกร่อนซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก แสดงว่า เถ้าลอยในดินซีเมนต์แทบจะไม่ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก กำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะได้รับอิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงอย่างเดียว
- 2) ผลการศึกษา MIP อธิบายการกระจายตัวของขนาดและปริมาตรโพรงทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนแทนที่ เนื่องจากเถ้าลอยจะทำหน้าที่กระจายกลุ่มของอนุภาคดินซีเมนต์ที่รวมตัวกันเมื่อสัมผัสกับน้ำให้แตกตัวออกเป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง จึงทำให้ดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีผิวสัมผัสที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มมากขึ้น
- 3) ผลการศึกษา TGA ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์ กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วมระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการกระจายตัว ซึ่งอิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกควบคุมด้วยปูนซีเมนต์ ขณะที่อิทธิพลของการกระจายตัวถูกควบคุมด้วยปริมาณเถ้าลอย (อัตราส่วนแทนที่)

- 4) กำลังอัดที่อัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 10 และปริมาณความชื้นที่ 1.2 เท่าของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม สำหรับทุกๆ อายุบ่ม ทั้งเด็กลอยหยาบและเด็กลอยละเอียดมีค่าสูงสุด เนื่องจากอิทธิพลร่วมมีความเหมาะสม ส่งผลให้มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) สูงที่สุด

5.1.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

- 1) เนื่องจากงานวิจัยเรื่องกำลังอัดดินซีเมนต์ผสมเด็กลอย ได้มีผู้ที่สนใจศึกษามาเป็นจำนวนมาก และใช้เครื่องมือ และวิธีการวิจัยหลายอย่างแตกต่างกัน เพื่อหาผลทดสอบมาอธิบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของดิน แต่งานวิจัยเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินที่ปรับปรุงด้านซีเมนต์ผสมเด็กลอยยังมีอยู่น้อยมาก
- 2) การผสมเด็กลอยแบบอัตราส่วนแทนที่มีผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นน้อย เนื่องจากปริมาณ Ca(OH)_2 จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นน้อย หากเปลี่ยนวิธีผสมเด็กลอยในรูปของสารผสมเพิ่ม อาจช่วยให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดเพิ่มมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- American Society for Testing Material. (1989) . **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.
- Berry, E.E., et. al. (1989). **Beneficiated Fly ash: Hydration, Microstructure, and Strength Development in Portland Cement Systems** in. V.M. Malhotra (Ed.), Third CANMET/ACI, Conference On Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete (SP-114), Detroit, pp 241-273.
- Berry, E.E. and Malhotra, V.M. (1980). **Fly ash for use in concrete-A Critical Review**. ACI JOURNAL , pp 59-73
- Chindaprasirt, P. et. al. (1999), **Strength activity index of single size fly ash mixed with Portland cement type I and type II**. Proceeding of the 7th East Asia-Pacific Conference on Structure Engineering and Construction, Kochi, Japan
- Chindaprasirt, P. et. al. (2001), **Influence of Mae Moh fly ash fineness on characteristics strength and drying development of blended cement mortars**. The Eighth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Singapore, 5-7 December 2001.
- 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.
- 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.
- Collins, K. and Mcgown, A. (1974). **The form and function of microfabric feathers in a variety of natural soil**. Geotechnique, Vol.24, No.2, pp 223-254.
- Davidson, D.T. (1961).**Soil stabilization with Portland cement**. Highway Research Board: 200 p.

- 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 Champlain clay and of its evolution during consolidation.** Canadian Geotechnical Journal, Vol.21, pp 21-35.
- Fraay, A.L.A., et.at. (1989). **The reaction of fly ash in concrete.** A critical examination. Cem. Concr. Res, pp 235-246.
- 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 59 – 167.
- Harris, H.A., et.al., (1987). **Factor affecting the reactivity of fly ash from western coals.** Cem. Concr. Aggr, pp 34-37.
- Horpibulsuk, S. et.al. (1999). **Prediction of strength and consolidation parameters of cement stabilized clays.** Report of the Faculty of Science and Engineering, Saga University, Japan, Vol. 28, No.2, pp 27-28.
- 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 basis.** 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. (Tentatively accepted for publication).
- Horpibulsuk, S. et.al. (2006). **Analysis of Strength Development of Cement Stabilized Clay from Microstructural Consideration.** International Symposium of Lowland Technology , Saga Japan, pp 14-16.
- Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972). **Soil Stabilization, Sydney.** Butterworths , pp 64 – 69.
- Kamaluddin, M. and Balasubramaniam, A.S. (1995). **Overconsolidated behavior of cement treated soft clay.** Proceedings of 10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Thailand, pp 407-412 .

- Kamon, M. (1979). **Study on engineering properties of very soft clay and its stabilization**.
Doctoral Dissertation : Kyoto University, Kyoto, Japan (in Japanese).
- Kamon, M. and Bergado, D.T. (1992). **Ground Improvement Techniques**. Proceedings of 9th
Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok,
Vol.2, pp 526-546.
- Lambe, T. W., (1958). **The structure of compacted clay**. Proc. ACSE, Vol.84, SM2, pp 1-34.
- 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.
- Lane, R.O. and Best, J.F. (1982). **Properties and use of fly ash in Portland cement concrete**.
Concrete International : Design & Construction, Vol.4, No.7, pp 81-92.
- Lapierre, C., Leroueil, S. and Locat, J. (1990). **Mercury intrusion and permeability of
Louisevilly 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.
- Matsuo, S. and Kamon, M., (1976), **Terminology of clay structure**, Journal of the Japanese
Geotechnical Society, Vol.24, No.1, pp.59-64 (in Japanese).
- Metcalf, J.B. (1977) **Principle and application of cement and lime stabilization**.
Australian Road Research Board, 20 p.
- Mitchell, J.K. and Jack, E.K. (1966) **The fabric of soil – cement and its formation**.
Proceeding 14th National Conference on Clay and Clay Minerals Vol. 26 , pp 279 – 305.
- Nagaraj, T.S., Vatasala, A., 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 Vol.40, No. 2, pp 303 – 305.
- Owens, PL. (1979). **Fly ash and its usage in concrete**, Concrete, the Journal of concrete Society,
Vol. 13, 21-26.

- Portland Cement Association. (1959) . **Soil – cement laboratory handbook**. Illinois: Portland Cement Association.
- Reinhold, F. (1955). **Elastic behavior of soil-cement mixtures**. Highway Research Board, Bulletin. Vol.108, pp 128 – 137.
- Ruenkraiirergsa, 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.
- Sybert, F.andWiens, U., (1991). **Effect of fly ash fineness on hydration characteristics and strength development**. International Conference on Blended Cement in Construction, University of Sheffield, pp 152-165.
- 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.
- Thumasujarit, K. and Tangtermsirikul, (2004). **Bleeding model for fly ash concrete**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, 19-21 พฤษภาคม 2547, MAT-184-MAT-189.
- Washburn, E. W., (1921). Note on a method of determining the distribution of pore sizes in porous materials, **Proceedings of the National Academy of Science**, Vol.7, pp 115-116.
- Xu, A.and Sarker, S.L., (1994). **Microstructure development in high-volume fly ash cement system**. ASCE J, Mater. Civ. Eng, pp 117-136.
- Yong, R. N. and Warkentin, B. P., (1975), Soil properties and behaviour, **Elsevier Scientific Publishing Company**.
- ชัย มุกตพันธ์ และกาชู่โตะ นากาซาวา. (2540). **ปฐพีศาสตร์และวิศวกรรมฐานราก**. กรุงเทพฯ : ดวงกมล.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จึงเกษมโชคชัย และวารภรณ์ คุณวานากิจ (2542). **คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอย**. การสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต, 7-19
- ทิน เกตุรัตน์บวร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, (2540). **ความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการแยกขนาดต่อกำลังอัด และการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกของมอร์ตาร์**, วารสาร กฟผ., 53-61

- ทิน เกตุรัตน์บวร ,ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และเอกภพ อังศุวัฒนา, (2541). การใช้เสี้ยนหินแยกขนาด จากแม่เมาะในงานคอนกรีตกำลังสูง, วารสาร กฟผ., 36-45
- ทรงพล บุญมาดี. (2529) ความสัมพันธ์ระหว่าง **Unconfined Compressive Strength** กับ **CBR** ของดินลูกรังผสมซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 196 (หน้า)
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิमितยงสกุล. (2538). ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ : 37-51.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิमितยงสกุล. (2538). คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ , 105-113.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2547). เถ้าลอยในงานคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย, 109 (หน้า)
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, สุรเชษฐ์ มั่งมีศรี และธีระพงษ์ แก้วคง. (2541). คุณสมบัติปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยคัดขนาด. ขอนแก่น : วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- มานะ อภิพัฒนมนตรี. (2539). วิศวกรรมปฐพีและฐานราก. กรุงเทพฯ : ส่วนตำราสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543. เครื่องมือวิจัยและวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการดำเนินงานเบื้องต้น, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรณชัย เกษกัน. (2548). กำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- วิศว จักรไพศาล และชัยโรจน์ จักรไพศาล. (2540). ผลของเถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกของคอนกรีตสมรรถนะสูง, วารสาร กฟผ. , 60-67.
- วิศว จักรไพศาล และเอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ. (2542). ผลกระทบของซีเถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง. การประชุมสัมมนาการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 90-97.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชน, 2546. ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์, วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา , 25 – 31.
- สถาพร คูวิจิตรจารุ. (2542). ปฐพีศาสตร์. กรุงเทพฯ : ไลบรารี ไลน์ พับบลิชซิ่ง
- สมิตร ส่งพิริยะกิจ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2538). การศึกษาการบดเสี้ยนหินจากแม่เมาะเพื่อใช้เป็นสารปอซโซลานในการเพิ่มกำลังคอนกรีต. วารสาร สจธ , 27-36.

สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล และคณะ. การศึกษาการหดตัวแบบบอโตจิ้นซ์ของซีเมนต์พิเศษผสมเถ้าลอยที่ผ่านการคัดขนาด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่4: ภูเก็ต

สมหมาย สว่างกิจ และคณะ. (2535). การใช้เถ้าถ่านหินในการป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีต. เอกสารการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2535, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 51-63.

ภาคผนวก ก

ข้อบ่งชี้ที่ได้รับความรู้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในประเทศ

1) วรรัชย์ เกษกัน, ยุทธนา รักษาชนม์ และสุขสันต์ หอพิบูลสุข (2549) ผลการเปรียบเทียบวิธีการประมาณความเค้นสูงสุดที่เคยกดทับในอดีตของดินเหนียวกรุงเทพ (Comparison of pre-consolidation pressure of Bangkok clays obtained from different methods). การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11. (The 11th National Convention on Civil Engineering), เมอร์ลิน บีช รีสอร์ท จังหวัดภูเก็ต. 20-22 เมษายน 2549

2) ยุทธนา รักษาชนม์, สุขสันต์ หอพิบูลสุข และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (2550) อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์บดอัด (Effect of cement content on strength development in cement stabilized clay). การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. (The 12th National Convention on Civil Engineering), GTE 033, อมรินทร์ ลากูน จังหวัดพิษณุโลก. 2-4 พฤษภาคม 2550

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ

1) 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. (Accepted for publication).

2) Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Raksachon, Y. (2009), "Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay", Soil and Foundation. (in press).

ประวัติผู้เขียน

นายยุทธนา รักษาชนม์ เกิดเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน 2513 ที่จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษา ระดับประกาศนียบัตรชั้นสูง แผนกช่างก่อสร้าง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2533 และได้เข้ารับราชการที่ กรมทางหลวง กรมโยธาธิการ และ กรมธุรกิจพลังงาน ตามลำดับ ปัจจุบันรับราชการที่สำนักงาน ทางหลวงชนบทจังหวัดชลบุรี กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2544 และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2547 ในระหว่างศึกษาระดับปริญญาตรีมีความสนใจทางด้านวิศวกรรมปฐพี เนื่องจากสามารถนำความรู้ไปใช้กับงานที่ปฏิบัติได้อย่างแท้จริงทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมปฐพี เพื่อเพิ่มพูนความรู้ความสามารถให้กับตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2547 จากการทำวิจัยทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจทางด้านการปรับปรุงคุณสมบัติของ ดินด้วยซีเมนต์และซีเมนต์ผสมถ้ำลอย โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาคเป็นอย่างดี ในระหว่างการศึกษาได้มีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ จำนวน 4 บทความ โดยมีรายละเอียดปรากฏใน ภาคผนวก ก.