

การใช้ปูนซีเมนต์และถ้ำลอยในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเค็ม

นายวรวิทย์ โปธิจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2553

**APPLICATION OF CEMENT AND FLY ASH TO
STRENGTH IMPROVEMENT
OF SALINE SOIL**

Worawit Phojan

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2010**

การใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเดิม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ

(อ. ดร.วุฒิ คำนกิตติกุล)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วรวิทย์ โพธิ์จันทร์ : การใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเค็ม
(APPLICATION OF CEMENT AND FLY ASH TO STRENGTH IMPROVEMENT OF
SALINE SOIL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 117 หน้า.

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นพื้นที่ที่ประสบปัญหาในเรื่องดินเค็ม และดินกระจายตัว ดินในพื้นที่ราบน้ำท่วมถึงเป็นดินเค็ม ซึ่งระดับความเค็มเกิดการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงทางสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศ การจะนำดินในบริเวณนี้มาใช้ประโยชน์ทางวิศวกรรมด้วยปูนซีเมนต์จำเป็นต้องทราบถึงอิทธิพลของระดับความเค็มต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุเหลือใช้ เช่น เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล มีประโยชน์อย่างมากในเชิงเศรษฐศาสตร์ วิศวกรรม และสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของระดับความเค็มต่อการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าลอยและเถ้าชีวมวลในการปรับปรุงกำลังของดินร่วมกับปูนซีเมนต์ ตัวแปรที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความเค็มมีผลให้ขีดจำกัดเหลวและดัชนีสภาพพลาสติกของดินลดลง เนื่องจากการลดความหนาของ Diffuse double layer ดินเหนียวที่มีความเค็มสูง จะมีสถานะความเค้น e/e_L สูง (เมื่อ e คืออัตราส่วนโพรง และ e_L คืออัตราส่วนโพรงที่ขีดจำกัดเหลว) ส่งผลให้แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคดินลดลง ดังนั้น ดินที่มีระดับความเค็มสูง เมื่อผสมกับน้ำและปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากัน จะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าดินที่ระดับความเค็มต่ำ การผสมเถ้าลอยและเถ้าชีวมวลช่วยเพิ่มกำลังอัดให้กับดินซีเมนต์ เถ้าช่วยทำให้ปูนซีเมนต์กระจายตัว และทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี ปริมาณเถ้าที่เหมาะสมในการผสมคือร้อยละ 25 ของปริมาณปูนซีเมนต์ เถ้าทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.75 เท่าของปูนซีเมนต์ การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยและดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล ที่ระดับความเค็มต่าง ๆ สอดคล้องกับ Clay-water/cement ratio/hypothesis กล่าวคือกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ โดยอาศัย Clay-water/cement ratio/hypothesis ผู้วิจัยได้พัฒนาสมการทั่วไปสำหรับทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยและเถ้าชีวมวลที่ระดับความเค็มต่าง ๆ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

WORAWIT PHOJAN : APPLICATION OF CEMENT AND FLY ASH TO
STRENGTH IMPROVEMENT OF SALINE SOIL. THESIS ADVISOR :
PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 117 PP.

FLY ASH/BIOMASS ASH/SALINE SOIL/CEMENT/DISPERSION

Northeast area of Thailand is covered with saline and dispersive soil. For wet lands, flood plains and lowlands, its salinity is changed with time due to climate and geological changes. To improve this soil by cement admixture, the influence of salinity on the engineering properties of cemented soil must be investigated. The replacement of cement by waste materials such as fly ash and biomass ash is economic, engineering and environmental. The present research investigates the influence of salt content on the strength development in cement admixed saline clay and the possibility of using fly ash together with cement for saline clay. The parameters involved in this research are water content, cement, fly ash content and curing time.

As the salt content increases, liquid limit and plastic limit decrease; hence the decrease in plastic index. The decrease in liquid limit is due to the compression of the diffuse double layer. The increase in salt content for a particular water content causes the increase in generalized stress state, e/e_L (where e is void ratio and e_L is liquid limit void ratio). The higher e/e_L is associated with the lower effective stress and the inter-particle attraction. Hence, for the same clay-water/cement ratio, the strength of the cement admixed saline clay samples with higher salt content is lower than that with lower salt content. Fly ash and biomass ash are dispersing materials,

increasing the reactive surface of the cement grains, and hence strength increase. The optimal ash content is 25% by weight of cement. Ash content is equivalent to 0.75 cement content. The strength development in blended cement admixed saline soil follows the clay-water/cement ratio hypothesis. The strength increases with decreasing w_c/C . Based on this hypothesis, the generalized strength equation is proposed for blended cement admixed clay for various salt contents.

School of Civil Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณ

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษาและเมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือ ในการทำการศึกษาวิจัยตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จ สมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ดันเส็ง ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษาชี้แนะแนวทางการเขียนและช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษาชี้แนะแนวทางการเขียนและช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ อาจารย์ ดร.ทงศักดิ์ พิศาลสิน ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สีนศิริ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วชรภูมิ เบญจโอฬาร และคณาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาสั่งสอนและให้คำปรึกษาแนะนำ การทำวิจัย รวมถึง อาจารย์ ดร.สุภสิทธิ์ คนใหญ่ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำในงานวิจัยเรื่องดินเค็มมาโดยตลอด

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้ อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้ และขอบคุณกรมพัฒนาที่ดินเขต 5 จังหวัดขอนแก่น ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเค็ม

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดูตลอดจน ส่งเสริมการศึกษา รวมถึงคุณวรรณวิภา และเด็กชายชนกฤต โพธิ์จันทร์ ภรรยา และลูกชาย ที่ให้ กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมาอีก ทั้งขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาสาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

วรวิทย์ โพธิ์จันทร์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ

บทที่

1 บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4

2 ปรัชสน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินเค็ม.....	5
2.1.1 การจำแนกดินเค็ม.....	7
2.1.2 คุณสมบัติการนำไฟฟ้า.....	7
2.1.3 ค่าเปอร์เซ็นต์โซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้.....	8
2.1.4 ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน.....	8
2.2 อิทธิพลของความเค็มที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพของดิน.....	9
2.3 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์.....	12
2.4 โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	13
2.5 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์.....	14
2.5.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์.....	14
2.5.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3	ปฏิกิริยาเมื่อผสมซีเมนต์กับดินและน้ำ.....	16
2.6	เถ้าลอยและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย.....	17
2.6.1	คุณสมบัติพื้นฐานและทางเคมีของเถ้าลอย.....	18
2.6.2	คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย.....	20
2.6.3	เทคนิคการทดแทนเถ้าลอยในงานคอนกรีต.....	23
2.6.4	คอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ.....	24
2.7	ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์.....	26
2.7.1	ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์.....	26
2.7.2	คุณสมบัติของดิน.....	31
2.7.3	ปริมาณดินเหนียวและชนิดของแร่ดินเหนียว.....	32
2.7.4	คุณสมบัติทางเคมีของดิน.....	34
2.7.5	การผสม.....	35
2.7.6	การบ่ม.....	37
2.7.7	สารผสมร่วม.....	39
2.8	เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	42
2.8.1	การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope.....	43
2.8.2	การวิเคราะห์ Thermal Gravimetry Analysis, TGA.....	44
2.8.3	ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก.....	45
2.9	ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	45
2.10	บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน.....	47
2.11	สมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของตัวแปรควบคุม.....	50
3	วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1	บทนำ.....	52
3.2	การเก็บและการเตรียมดินตัวอย่าง.....	55
3.2.1	การเตรียมตัวอย่างดิน.....	55
3.2.2	คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดินเคมีธรรมชาติ (Basic Property).....	55
3.2.3	คุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างดินเคมีธรรมชาติ (Chemical Property).....	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	ปูนซีเมนต์.....	56
3.4	เกล็ดลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล.....	56
3.5	การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์เกล็ดลอย.....	56
3.5.1	ตัวอย่างดินเค็มธรรมชาติ.....	56
3.5.2	ตัวอย่างดินดินที่ถูกกลดและเพิ่มระดับความเค็ม.....	57
3.6	การทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว.....	58
3.6.1	นำตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าออกจากฟิล์มพลาสติก.....	58
3.6.2	นำตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว.....	58
3.7	ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	58
3.8	การทดสอบ โครงสร้างจุลภาค.....	59
3.8.1	การทดสอบ Thermal gravimetry Analysis.....	59
3.8.2	การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope.....	59
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	
4.1	บทนำ.....	60
4.2	คุณสมบัติพื้นฐานของดิน เกล็ดลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวลที่ศึกษา.....	60
4.3	อิทธิพลของความเค็มต่อคุณสมบัติทางกายภาพของดิน.....	63
4.4	อิทธิพลของความเค็มต่อกำลังอัดแกนเดี่ยวของดินซีเมนต์.....	65
4.5	กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์.....	66
4.6	กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเกล็ดลอย.....	66
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดี่ยวและอายุบ่ม.....	76
4.8	สมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของตัวแปรควบคุม.....	79
4.9	การวิเคราะห์ด้าน โครงสร้างจุลภาค.....	81
4.10	การตรวจสอบสมการทำนายกำลัง.....	82
5	บทสรุป	
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	92
5.1.1	อิทธิพลของระดับความเค็มต่อคุณสมบัติทางกายภาพ.....	92
5.1.2	อิทธิพลของระดับความเค็มต่อกำลังอัดแกนเดี่ยว.....	92

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.3	ถ้ำลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุกระจายตัว.....	92
5.1.4	แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ถ้ำลอยถ่านหินและถ้ำชีวมวล.....	92
5.2	ข้อเสนอแนะในการใช้สมการและงานวิจัยต่อไป.....	93
	รายการอ้างอิง.....	94
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	101
	ประวัติผู้เขียน.....	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชีวมวล และเถ้าลอยถ่านหิน.....3
2.1	ระดับความเค็มของดินและอิทธิพลต่อพืช (US Soil Salinity Laboratory Staff, 1954).....8
2.2	ออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (��ชวาล เศรษฐบุตร, 2536).....15
2.3	สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (��ชวาล เศรษฐบุตร, 2536).....15
2.4	ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618.....18
2.5	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533 – 2541.....19
2.6	ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618.....21
2.7	ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง.....23
2.8	กำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน30
2.9	เครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างดิน (Kamon, 1979).....43
3.1	การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง.....54
4.1	ระดับความเค็มของดินและอิทธิพลต่อพืช (US Soil Salinity Laboratory Staff, 1954).....60
4.2	คุณสมบัติทางเคมีของดินตัวอย่าง.....60
4.3	ผลการทดสอบแอมเตอร์เบอร์กลิเมตร.....63
4.4	พารามิเตอร์ A, B และ k ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวลที่อายุบ่มต่าง ๆ.....72
4.5	Ca(OH) ₂ ของดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ ต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน.....82
4.6	เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลอง และจากการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย).....84
4.7	เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลองและจากการวัด (อภิชาติ สุคติพงษ์, 2552).....88

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการในการเคลื่อนตัวและการสะสมของเกลือในดิน (Abron, 1988).....	6
2.2 แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคดิน และการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า ระหว่างน้ำกับ Na^+ และ Ca^{2+} (Herrin, 1961).....	11
2.3 โครงสร้างของดินเหนียว (Mitchell and Jack, 1966).....	14
2.4 Scanning Electron Microscope (SEM) ใต้น้ำ (ขยาย 3,000 เท่า).....	22
2.5 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Sandy Loam.....	27
2.6 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay.....	27
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์.....	28
2.8 เปรียบเทียบกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Soil 2a-6) และ Silty Clay Loam (Soil 4d) ผสมซีเมนต์ประเภท 1 และประเภท 3 เมื่อผสมเสร็จแล้ว ทดสอบทันที (Felt, 1955).....	28
2.9 ขอบเขตปฏิสัมพันธ์ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ (Horpibulsuk et al, 2003).....	29
2.10 กราฟกำลังอัดแกนเดียวสัมพันธ์กับปริมาณซีเมนต์ (วรรณชัย, 2547).....	30
2.11 อิทธิพลของวัสดุที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Norling and Peckard, 1958).....	31
2.12 อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อค่า Modulus of Elasticity ของดินซีเมนต์ (Reinhold, 1955).....	32
2.13 อิทธิพลของแรงแดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ (Davidson et al, 1962).....	33
2.14 อิทธิพลของแรงแดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ (Davidson et al, 1962).....	33
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่า pH ของดินผสมซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:10 (Sherwood, 1958).....	34
2.16 ผลของระยะเวลาที่ใช้ผสมต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Felt, 1955).....	35
2.17 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้ระยะเวลาการบดอัดนานขึ้น (Ingles and Metcalf, 1972).....	36

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 อิทธิพลของความหนาแน่นต่อกำลังอัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (Felt, 1955).....	37
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิที่ใช้บ่มดินซีเมนต์ (Clare and Pollard, 1954).....	38
2.20 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Leadabrand,1956).....	39
2.21 อิทธิพลของปริมาณปูนขาวต่อกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ (Maclean et al, 1952).....	40
2.22 อนุภาคเถ้าลอยหายาบ (a) อายุบ่ม 28 วัน ,(b) อายุบ่ม 90 วัน (Chindaprasirt, P., et al, 2005).....	46
2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล (Horpibulsuk et al, 2004).....	47
2.24 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับ ดินเหนียวกรุงเทพไร้พันธะเชื่อมประสาน (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2546).....	48
2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของ ดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2546).....	49
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน.....	53
3.2 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer).....	56
4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวล.....	62
4.2 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า.....	62
4.3 อิทธิพลของความเค็มที่มีผลต่อพิกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limit).....	64
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดเหลวและดัชนีสภาพพลาสติกที่ระดับ ความเค็มต่าง ๆ ในแผนภูมิพลาสติก.....	64
4.5 อิทธิพลของระดับความเค็มต่อกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่มต่าง ๆ.....	65
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินซีเมนต์ เถ้าลอยถ่านหินที่อายุบ่ม 28 วัน.....	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 กำลังอัดแกนเดียวและหน่วยน้ำหนักของดินซีเมนต์ที่ลดย่านหิน ที่อายุบ่ม 28 วัน.....	67
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณที่ลดย่านหินซีเมนต์ ที่ลดย่านหิน.....	69
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณที่ลดย่านหินซีเมนต์ ที่ลยี่วมวล.....	70
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดิน ต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (ที่ลดย่านหิน).....	73
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดิน ต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (ที่ลยี่วมวล).....	73
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินซีเมนต์ ที่ลยี่ระดับความเค้นต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน.....	74
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดิน ต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (ที่ลดย่านหิน) ที่ระดับความเค้นต่าง ๆ	75
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์ ที่ลดย่านหิน.....	77
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์ ที่ลยี่วมวล.....	78
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มภายใต้สภาวะ ตัวแปรต่าง ๆ และการ Normalization.....	79
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการทำนากับกำลังอัดที่ได้จากการ ทดสอบของดินซีเมนต์ที่ลยี่วมวล (ข้อมูลของผู้วิจัย และข้อมูลของอภิชาติ สุกดีพงษ์, 2552).....	83

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุบ่มของดิน
ACI	=	American Concrete Institute
ASTM	=	American Society for Testing Material
<i>a</i>	=	Fly ash content
B	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
CAH	=	Calcium aluminate hydrate
Ca(OH) ₂	=	Calcium hydroxide
C	=	Cement content
CAH	=	Calcium Aluminate Hydrate
CFA	=	Classified fly ash
CL	=	ดินเหนียวที่มีค่าดัชนีพลาสติกต่ำ
CH	=	ดินเหนียวที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูง
CSH	=	Calcium silicate hydrate
CEC	=	ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในดิน
Cl ⁻	=	คลอไรด์ (Chloride)
Ca ²⁺	=	ประจุแคลเซียม
D	=	อายุบ่ม
<i>e</i>	=	อัตราส่วนโพรง (Void ratio)
<i>e_L</i>	=	อัตราส่วนโพรงที่ขีดจำกัดเหลว
E	=	พลังงานการบดอัด (Energy)
EC	=	ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)
ECe	=	Electrical Conductivity at Saturation Extract
ESP	=	ค่าเปอร์เซ็นต์โซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้
FSR	=	Free Swell Ratio
H	=	ปริมาณ Ca(OH) ₂ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่อัตราส่วนการแทนที่ใดๆ
<i>k</i>	=	ตัวแปรประสิทธิภาพของเถ้าลอย
K	=	ประจุโปแตสเซียม

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

LI	=	ดัชนีสภาพความเหลว (Liquidity Index)
LL	=	ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit)
LOI	=	Loss on Ignition
w_c	=	ปริมาณน้ำ (Moisture Content)
Mg	=	ประจุแมกนีเซียม
MAPE	=	Mean Absolute Percent Error
NaCl	=	โซเดียมคลอไรด์
Na^+	=	ประจุโซเดียม
OFA	=	Original fly ash
OWC	=	ปริมาณน้ำเหมาะสม (Molding water content)
PC	=	Portland cement
PI	=	ดัชนีสภาพพลาสติก (Plastic Index)
PL	=	ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
q_u	=	กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength)
SEM	=	Scanning Electron Microscope
SAR	=	อัตราการดูดซับโซเดียม (Sodium absorption ratio)
SO_4^-	=	ซัลเฟต (Sulphate)
SL	=	พิกัดหดตัว (Shrinkage Limit)
T	=	ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ของดินซีเมนต์
TGA	=	Thermal Gravimetry Analysis

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เป็นอีกพื้นที่หนึ่งที่มีการขยายตัวในด้านวิศวกรรมโยธามาก ปัญหาทางด้านวิศวกรรมปฐพีในพื้นที่นี้คือ ปัญหาด้านการหดตัวและขยายตัวของดิน ซึ่งมีสาเหตุมาจากดินเค็มและดินกระจายตัว มีพื้นที่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือกว่า 18 ล้านไร่เป็นพื้นที่ดินเค็ม และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี ทั้งนี้เนื่องจากสภาพทางธรณีวิทยาของพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือวางอยู่บนหมวดหินสารคาม ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญเป็นเกลือหินประมาณร้อยละ 34 ของพื้นที่ทั้งภาค น้ำเป็นตัวกลางพาเกลือ ขึ้นมาสู่ผิวดิน เมื่อน้ำระเหยไปหมด จะเหลือเกลือไว้ซึ่งเป็นสาเหตุหลักทำให้ดินเค็ม

เมื่อมีการก่อสร้างบนชั้นดินเค็มหรือมีการขุดดินในพื้นที่ดินเค็มไปใช้ในงานทางวิศวกรรมโยธา จำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินให้ดีขึ้น วิธีการปรับปรุงดินวิธีหนึ่งที่เหมาะสมคือการผสมกับปูนซีเมนต์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และกำลังอัดยังเพิ่มขึ้นในระยะสั้น อีกทั้งปูนซีเมนต์ยังเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ปูนซีเมนต์ผสมในดินที่มีสารซัลเฟตหรือคลอไรด์ผสมอยู่จะทำให้เกิดการก่อตัวของผลึกบางชนิด เรียกว่า “Highly Hydration Sole” ในช่องว่างระหว่างมวลดินของส่วนผสมระหว่างดินและซีเมนต์ ซึ่งจะทำลายโครงสร้างของส่วนผสมลงได้ ทำให้มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพดิน ปัญหาอีกอย่างคือสารแคลเซียมในปูนซีเมนต์ จะทำปฏิกิริยากับสารซัลเฟตที่มีอยู่ในดินและสารอลูมินาทั้งในดินและสารผสมเพิ่ม ก่อให้เกิดผลึกที่เรียกว่า Ettringite ผลึกนี้จะส่งผลให้ดินมีการขยายตัวสูงมากขึ้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Sherwood, 1962) ด้วยเหตุผลนี้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเค็มจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการต้านทานซัลเฟตจึงจะให้กำลังที่ดีประกอบกับสามารถลดการขยายและหดตัวได้มากที่สุด พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินซีเมนต์ในเชิงกายภาพอย่างสมบูรณ์ (เอกรินทร์ วัฒนสันติเจริญ, 2548) แต่ปูนซีเมนต์ชนิดนี้หาซื้อได้ยากในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและมีราคาที่สูง เพื่อเป็นการลดต้นทุนของการก่อสร้าง เราจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และแทนที่ด้วยวัสดุเหลือใช้ ที่มีราคาต่ำ ใกล้เคียงที่เป็นวัสดุที่เหลือ (byproduct) จากการเผาไหม้ของถ่านหิน จัดเป็นวัสดุพอชโซลานที่เป็นที่ยอมรับในงานโครงสร้างทั่วไป โดยเฉพาะในประเทศไทยมีการนำเถ้าลอยมาใช้ในการผสมคอนกรีต เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์

อย่างแพร่หลาย (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547; สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล และคณะ, 2540; Owens, 1979; Jaturapitakkul, 1999; Chindaprasirt et al., 2001; Chindaprasirt et al., 2004; Thumasujarit and Tangtermsirikul, 2004) แต่การนำเถ้าลอยมาใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ในงานดินเค็มซีเมนต์ ยังมีไม่มากนัก

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการใช้เถ้าลอยถ่านหินในการปรับปรุงคุณภาพดินเค็ม และศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าชีวมวล (biomass ash) ซึ่งเป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ของวัสดุธรรมชาติ เช่น เปลือกไม้ ชานอ้อย และขี้เถ้าแกลบ งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม) ต่อกำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อประยุกต์ในการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวล ในการปรับปรุงคุณภาพดินเค็ม

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของระดับความเค็มที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินผสมซีเมนต์และเถ้าลอย

1.2.3 เพื่อพัฒนาสมการทำนายกำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ในพจน์ของปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ในการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร่วมกับเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวล ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเค็ม ดินที่ใช้เป็นดินเค็ม เก็บแบบแปรสภาพที่ความลึก 1.00-2.00 เมตร จากผิวดิน บริเวณ ตำบลท่าหลวง อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง) และเถ้าลอยถ่านหินจาก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าชีวมวลจากบริษัทไทยเพาเวอร์ ทรัพย์หลาย จำกัด อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชีวมวล เปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินจากแม่เมาะ แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชีวะมวล และเถ้าลอยถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าชีวะมวล (อภิชาติ สุดดีพงษ์, 2552)	เถ้าลอยถ่านหิน (Sinsiri et al, 2006)
SiO ₂	74.12%	45.63%
Al ₂ O ₃	0.57%	24.59%
Fe ₂ O ₃	0.88%	11.26%
CaO	1.54%	12.15%
MgO	5.91%	2.87%
SO ₃	3.33%	1.57%
Na ₂ O	1.71%	0.07%
K ₂ O	0.50%	2.66%
LOI	7.45%	1.23%

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 6 ส่วน ดังนี้

1.3.1 การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินเค็มธรรมชาติ (ความชื้นเริ่มต้น ความถ่วงจำเพาะ วิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน ซีดจำกัดเหลว ซีดจำกัดพลาสติก) และสารเชื่อมประสาน

1.3.2 การศึกษาถึงอิทธิพลของระดับความเค็มต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ตัวอย่างดินจะถูกลดและเพิ่มระดับความเค็ม การลดความเค็มทำได้โดยการนำตัวอย่างดินเค็มมาแช่น้ำและปล่อยให้ให้น้ำไหลซึมออกไปจากดินช้า ๆ ส่วนการเพิ่มระดับความเค็มทำได้โดยการนำเกลือสินเธาว์ซึ่งเป็นเกลือธรรมชาติที่ได้จากการทำนาเกลือ มาเพิ่มเข้าไปในตัวอย่างดินในอัตราส่วนร้อยละ 3 5 10 และ 15 ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วทดสอบหาขีดจำกัดเหลว และขีดจำกัดพลาสติก

1.3.3 การศึกษาถึงอิทธิพลของระดับความเค็มต่อกำลังอัดของดินเค็มธรรมชาติและตัวอย่างดินที่ถูกเพิ่มระดับความเค็ม ตามวิธีในข้อ 1.3.2 แล้วปรับแก้ปริมาณความชื้นที่ดัชนีสภาพเหลวเท่ากับ 1.5 ของดินเค็มธรรมชาติ ผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ของน้ำหนักดินแห้ง โดยทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน โดยใช้เครื่อง Unconfined compression Test และทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.3.4 การศึกษาถึงอิทธิพลของระดับความเค็มต่อกำลังอัดของดินเค็มธรรมชาติและตัวอย่างดินที่ถูกเพิ่มระดับความเค็มผสมปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยถ่านหิน โดยผสมดินเข้ากับเกลือตามวิธีในข้อ 1.3.2 แล้วผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้ง ผสมเถ้าลอยโดยใช้เทคนิคการผสมเพิ่มเป็นร้อยละ 0 15 และ 25 ของน้ำหนัก

ปูนซีเมนต์ในแต่ละอัตราส่วนของการผสมปูนซีเมนต์ และแปรผันค่าดัชนีสภาพความเหลวของดิน 3 ค่า (1.0 1.5 และ 2.0) โดยทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว เมื่ออายุบ่ม 7 และ 28 วัน และทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.3.5 การศึกษากำลังอัดของตัวอย่างดินเค็มผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยให้มีอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อซีเมนต์เท่ากับ 3 5 และ 10 และแปรผันค่าดัชนีสภาพความเหลว (liquidity index, li) ของดิน ในแต่ละอัตราส่วนน้ำในดินต่อซีเมนต์ 3 ค่า (1.0 1.5 และ 2.0) โดยทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน และทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.3.6 การศึกษากำลังอัดของตัวอย่างดินเค็มธรรมชาติ ผสมปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย 2 ชนิด คือ เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล โดยผสมดินเข้ากับปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้ง ผสมเถ้าลอยโดยใช้เทคนิคการผสมเพิ่มเป็นร้อยละ 0 10 15 20 และ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ในแต่ละอัตราส่วนของการผสมปูนซีเมนต์ และแปรผันค่าดัชนีสภาพความเหลวของดิน 3 ค่า (1.0 1.5 และ 2.0) โดยทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว เมื่ออายุบ่ม 7 14 28 60 และ 90 วัน และทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เมื่องานวิจัยแล้วเสร็จประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับเป็นดังนี้

1.4.1 ทราบถึงวิธีการประยุกต์ในการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวล ในการปรับปรุงคุณภาพดินเค็ม

1.4.2 ทราบถึงผลกระทบของระดับความเค็มที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินผสมซีเมนต์และเถ้าลอย

1.4.3 ได้สมการทำนายกำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ในพจน์ของปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม

บทที่ 2

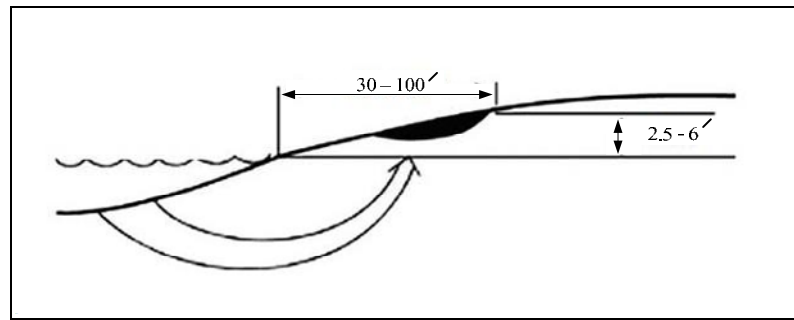
ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินเค็ม

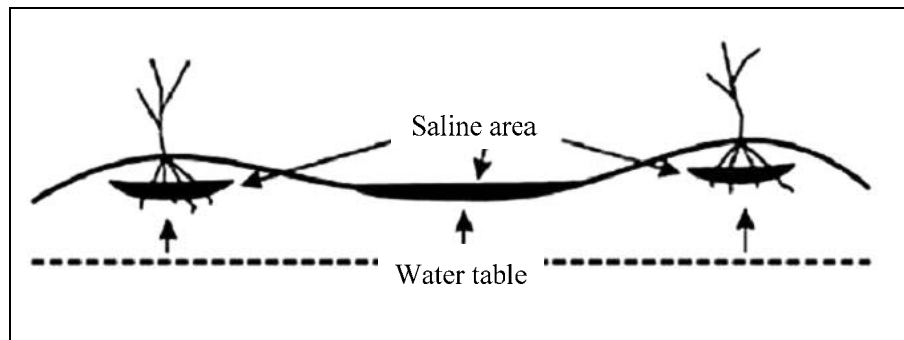
ดินเค็ม (saline soils) หมายถึงดินที่ได้รับอิทธิพลจากเกลือ (salt affected soils) หรือดินที่มีเกลือที่ละลายน้ำได้อยู่มากเกินไปจนมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยทั่วไปเกลือที่พบในดินเค็มมักเกิดจากการรวมตัวของธาตุที่มีประจุบวกพวกโซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม กับธาตุประจุลบเช่น คลอไรด์ ซัลเฟต คาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต และบางกรณีจะพบในรูปของเกลือ โซเดียมไนเตรท แมกนีเซียมซัลเฟต และแมกนีเซียมคลอไรด์ (สมศรี อรุณินท์, 2523; อรุณี ยูวะนิยม, 2525; ดิเรก ฮุ่นตระกูล, 2531)

Pramojanee (1982) and Wongsomsak (1986) ให้ข้อสรุปที่สอดคล้องกันว่า น้ำใต้ดินเป็นตัวการที่สำคัญที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของเกลือจากแหล่งเกลือไปสะสมยังแหล่งต่าง ๆ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ต่ำกว่า ด้วยเหตุที่เกลือเป็นสารที่ละลายน้ำได้ดี เมื่อหินแร่มีเกลือเป็นองค์ประกอบเกิดการผุพังสลายตัว โดยกระบวนการทางกายภาพและเคมี เกลือที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะละลายและเคลื่อนที่ไปยังบริเวณต่าง ๆ โดยมีน้ำเป็นพาหนะสำคัญ

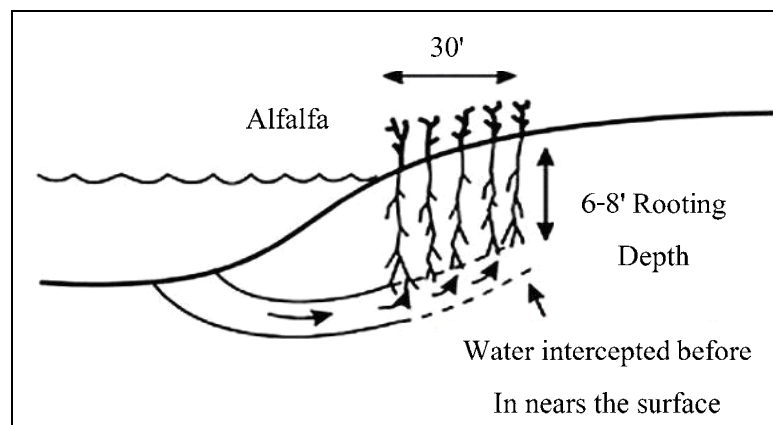
ยงยุทธ โอสดสภา (2524) สรุปได้ว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสะสมของเกลือในดิน ได้แก่ การมีแหล่งเกลือในระดับต้น น้ำใต้ดินมีเกลือละลายอยู่และเคลื่อนตัวอยู่ใต้ผิวดิน สภาพภูมิอากาศ ปริมาณและการแจกกระจายของฝน ลักษณะภูมิประเทศ ความหนาแน่นของพืชพรรณไม้ อัตราการระเหยและการใช้น้ำของพืช ความชื้น อุณหภูมิของอากาศ รวมถึงกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ดังรูปที่ 2.1



(ก) การเคลื่อนย้ายและการสะสมของเกลือในดินที่อยู่ใกล้แหล่งน้ำ



(ข) การสะสมของเกลือในบริเวณภูมิประเทศแบบลูกคลื่น ซึ่งมีน้ำใต้ดินเค็มในระดับตื้น



(ค) กระบวนการในการเคลื่อนตัว และการสะสมของเกลือใต้ดิน

รูปที่ 2.1 กระบวนการในการเคลื่อนตัว และการสะสมของเกลือในดิน (Abron, 1988)

2.1.1 การจำแนกดินเค็ม

ดินเค็มที่พบสามารถจำแนกตามลักษณะการเกิด และสัญญาณภูมิประเทศได้เป็น 2 ประเภท คือ ดินเค็มชายทะเล (coastal saline soils) และดินเค็มในแผ่นดิน (inland saline soils) (Arunin, 1984)

1) ดินเค็มชายทะเลเป็นดินที่เกิดจากอิทธิพลของน้ำทะเล ส่วนใหญ่พบอยู่ตามแนวชายฝั่งทะเลซึ่งอาจยังคงมีน้ำทะเลท่วมถึง หรือเคยเป็นที่ที่น้ำทะเลท่วมถึงมาก่อน ปัจจุบันมีพื้นที่รวมกันประมาณ 3.6 ล้านไร่หรือร้อยละ 1.13 ของพื้นที่ทั้งประเทศ (สมพงษ์ ธีรวงศ์, 2533)

2) ดินเค็มในแผ่นดิน มักจะกระจายอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะในขอบเขตของแอ่งโคราช (korat basin) และแอ่งสกลนคร (sakon nakhon basin) ปัจจุบันมีพื้นที่ดินเค็มกว่า 18 ล้านไร่หรือร้อยละ 34 ของพื้นที่ทั้งประเทศ พิชัย วิชัยดิษฐ์, (2527) พบว่าดินเค็มที่เกิดอยู่ในแอ่งโคราชจะมีการกระจายเป็นบริเวณกว้างขวาง และมีความรุนแรงของปัญหาความเค็มมากกว่าแอ่งสกลนคร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่บริเวณกลางแอ่ง ซึ่งเป็นพื้นที่ของจังหวัดมหาสารคาม ร้อยเอ็ด รวมถึงพื้นที่ทางตอนเหนือของจังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันมีพื้นที่ดินเค็มรวมกันประมาณ 6 ล้านไร่ หรือร้อยละ 33 ของพื้นที่ดินเค็มทั้งภาค เฉพาะจังหวัดนครราชสีมาเพียงแห่งเดียวมีดินเค็มกระจายอยู่ถึง 2.5 ล้านไร่ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2529)

2.1.2 คุณสมบัติการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) เรียกย่อ ๆ ว่า EC เป็นค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่สกัดจากดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (electrical conductivity at saturation extract; Ece) การวัดค่าความเค็มของดินสามารถใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้าของดิน (electrical conductivity meter) เนื่องจากการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเกลือในน้ำ เพื่อความสะดวกอาจต้องใช้อัตราส่วนของดินต่อน้ำเช่น 1:2 หรือ 1:5 การวัดค่าการนำไฟฟ้าจึงทำให้ประมาณค่าเกลือละลายในน้ำที่สกัดออกมาจากดินได้ ซึ่งจะใช้เป็นดัชนีของความเค็ม ดังตารางที่ 2.1 อย่างไรก็ตาม ค่าการนำไฟฟ้าไม่ได้บอกให้ทราบถึงชนิดของเกลือในสารละลาย บอกเพียงแต่ว่ามีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของเกลือในสารละลายเท่านั้น ค่าความเค็มมีหน่วยเป็นเดซิซิเมนต่อเมตร (deci siemens/metre, dS/m) โดยคิดเทียบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณกลับมาเป็นค่า Ece ได้ ตามสูตรดังนี้

$$\begin{aligned}
 1 \text{ dS/m.} &= 10 \text{ meg/l} & (2.1) \\
 &= 600\text{-}640 \text{ ppm} \\
 &= 0.36 \text{ bar}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 2.1 ระดับความเค็มของดินและอิทธิพลต่อพืช (US Soil Salinity Laboratory Staff, 1954)

ECe (dS/m.)	ปริมาณเกลือ (%)	ระดับความเค็ม	อิทธิพลต่อพืช
<2	<0.1	ไม่เค็ม	ไม่กระทบกระเทือนต่อพืช
2-4	0.1-0.2	เค็มเล็กน้อย	พืชที่ไวต่อความเค็มการเจริญเติบโตลดลงบ้าง
4-8	0.2-0.4	เค็มปานกลาง	จำกัดการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด
8-16	0.4-0.8	เค็มมาก	พืชทนเค็มเท่านั้นที่เจริญเติบโตได้ดี
>16	>0.8	เค็มจัด	พืชทนเค็มบางชนิดเท่านั้นที่เจริญเติบโตได้ดี

2.1.3 ค่าเปอร์เซ็นต์โซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้

ค่าเปอร์เซ็นต์โซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable sodium percentage, %ESP) คือ ค่าโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ที่ถูกดูดซับในดิน มีหน่วยเป็นร้อยละของประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ เปอร์เซ็นต์โซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ได้จากการคำนวณค่าของ Exchangeable Sodium ต่อ Cation Exchange Capacity คิดเป็นร้อยละ (ดังสมการที่ 2.2) ค่า ESP มีผลกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินถ้าดินมีปริมาณ Exchange Sodium สูง จะทำให้ดินเหนียว น้ำซึมผ่านได้ยาก ไถพรวนลำบาก ดินเมื่อแห้งจะแข็งและแตกกระแหง ทำให้เป็นอันตรายต่อพืช นอกจากนี้ถ้าปริมาณ ESP ต่ำกว่า 15% ยังทำให้เกิดดินโซดิก (sodic soil) ซึ่งปริมาณโซเดียมจะไปทำให้ metabolism ของพืชไม่สามารถดำเนินไปได้เป็นปกติ และถ้าเป็นดินเค็มที่มีค่า ESP มากกว่า 15% เมื่อทำการชะล้างเกลือออกจะทำให้ดินพองตัว เพราะมีโซเดียมอยู่มาก ดินจะแน่นทึบ ระบายน้ำได้ยากและยังทำให้ค่า pH ของดินสูงขึ้นอีกด้วย

$$ESP = \frac{Na^+}{CEC} \times 100 \quad (2.2)$$

2.1.4 ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน

การแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน (Cation Exchange Capacity : CEC) แสดงถึงความสามารถของดินในการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนบวก อนุภาคดินเหนียว เป็นอนินทรีย์สารที่มีรูปร่างแบนบางและมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด จะมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมากที่สุด และอนุภาคเหล่านี้มีประจุลบ ซึ่งสามารถดูดซับประจุบวกไว้ที่ผิวของมันได้เช่นเดียวกันกับ ฮิวมัส

ซึ่งเป็นอินทรีย์สารที่มีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวมากเช่นกัน ก็สามารถดูดซับประจุบวกได้ เช่นเดียวกับกับอนุภาคดินเหนียว ประจุบวกเหล่านี้คือยึดที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวและอิวมัส ด้วยแรงที่เหนียวแน่นพอสมควร และทนทานต่อการชะล้างของน้ำ แต่ในขณะที่เดียวกัน ก็สามารถถูกไล่ที่ให้ออกหรือหลุดโดยไอออนอีกชนิดหนึ่งที่เป็นอิสระอยู่ใน Soil Solution ได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การแลกเปลี่ยนไอออนบวก และไอออนบวกที่ดูดซับอยู่ที่พื้นที่ผิวของอนุภาคดิน หรืออิวมัส นี้เรียกว่า ไอออนบวกที่แลกเปลี่ยนที่ได้ และปริมาณไอออนบวกทั้งหมดที่ดูดซับสามารถวัดได้โดยคิดจำนวนเป็น milliequivalent (me) ต่อน้ำหนัก 100 กรัมของดินอบแห้ง เรียกคุณสมบัตินี้ว่า ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (cation exchange capacity) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า CEC ซึ่งส่วนใหญ่ เนื้อดินละเอียด มักมีค่า CEC มากกว่า ดินเนื้อหยาบ

หลักในการหาค่า CEC คือใช้ไอออนบวก เช่น NH_4^+ เข้าไปไล่ที่ไอออนบวกอื่น ๆ ที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว แล้วแทนที่ ด้วย Na จาก NaCl อีกครั้งหนึ่ง NH_4^+ ที่ถูกแทนที่จะกลับมายู่ในสารละลาย ซึ่งสามารถแยกออกมาได้ แล้วหาปริมาณ NH_4^+ อีกครั้งหนึ่งก็จะหาค่า CEC ได้

$$\text{CEC} = (\text{ความเข้มข้นของโซเดียมในสารสกัดจากดิน, mg/l}) \times 10 / (\text{น้ำหนักดินแห้ง}) \quad (2.3)$$

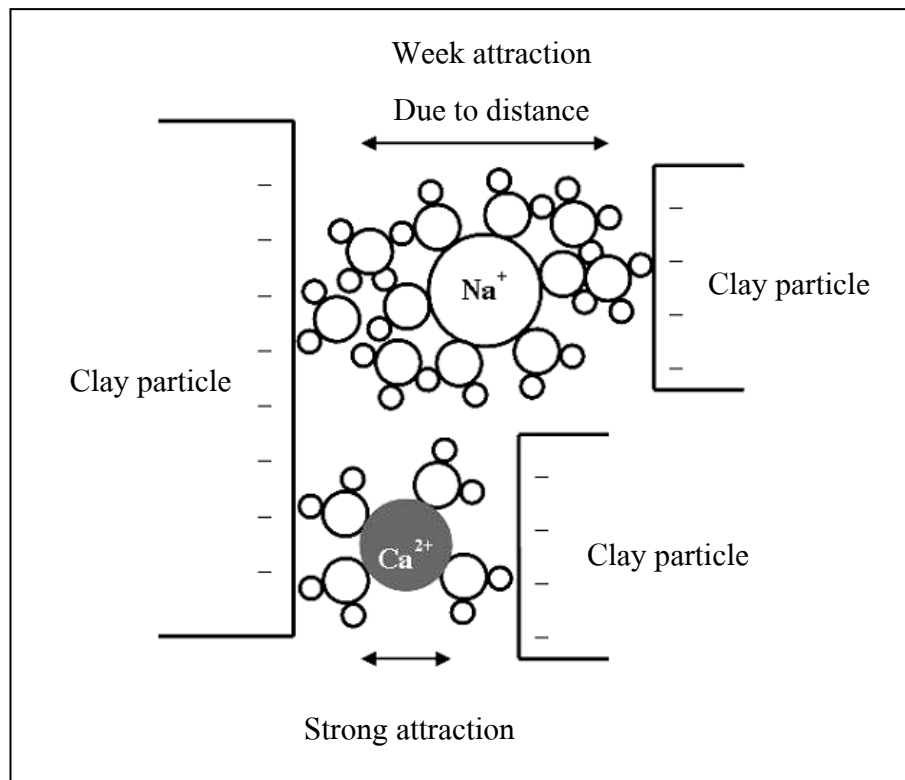
2.2 อิทธิพลของความเค็มที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

มวลดินอาจเปลี่ยนแปลงสภาพ และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ไปได้มากขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น (water content) ในตัวมวลดินเอง โดยเฉพาะในมวลดินที่มีส่วนของเม็ดขนาดเล็กอยู่มาก แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดมักเกิดจากสนามประจุไฟฟ้าโดยรอบอนุภาคของดิน แรงยึดเกาะนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณความชื้นเปลี่ยนไป

ประทีป ดวงเดือน (2531) อธิบายว่าพฤติกรรมของมวลดินจะขึ้นอยู่กับสถานะความเหลวเป็นสำคัญ โดยความเป็นพลาสติกซีดีของดินมีสาเหตุมาจากบริเวณรอบ ๆ ผิวเม็ดดินมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ และดึงดูดโมเลกุลของน้ำที่มีทั้งประจุบวก และลบ (bi-polar) ทำให้น้ำเกาะติดที่ผิวมีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ ชั้นน้ำที่เกาะติดผิวดินเรียกว่าแอดซอร์บ (adsorbed water) ส่วนชั้นที่ถุดออกไปเรียกว่าวิสคอส (viscous water) โดยน้ำทั้งสองชั้น (double layer) จะเป็นชั้นน้ำที่ได้รับอิทธิพลจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และชั้นนอกสุดจะเป็นชั้นน้ำอิสระ (free water) โดยถ้าในมวลดินมีน้ำน้อย น้ำจะเกาะอยู่เฉพาะผิวของเม็ดดิน และทำหน้าที่เป็นน้ำแอดซอร์บเพื่อยึดดินให้ติดกัน แต่ถ้าน้ำมากขึ้นจะทำให้ความหนาของชั้นน้ำรอบผิวเม็ดดินเพิ่มขึ้นเป็นน้ำวิสคอส ซึ่งปริมาณส่วนนี้จะมี ความหนืดสูง และถ้าในดินมีน้ำมากเกินไปจากน้ำวิสคอสเป็นน้ำอิสระแล้ว ความหนืดจะลดลง ทำให้ดินสามารถไหลได้

Petrukhin (1993) พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพและการไหลผ่านของน้ำเค็มในดินนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเกลือที่อยู่ภายในมวลดิน นอกจากนี้แล้วสถานะของเกลือที่อยู่ภายในมวลดินก็ยังส่งผลถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินเค็มอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเกลือที่ละลายจะเข้าแทรกอยู่ในช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างอนุภาคของดิน และจะมีการแตกตัวเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation) ซึ่งจะทำให้ดินเกิดการกระจายตัวและเกิดการไฮเดรชันขึ้น

ดินเหนียวจะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบความเข้มข้นของเกลือในดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเกลือที่พบในดิน ส่วนมากแล้วกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุในดินจะเกิดจากประจุโซเดียม (Na^+) และประจุของแคลเซียม (Ca^{2+}) ซึ่งจะมีผลให้ดินเกิดการกระจายตัว (disperse) และจับตัวเป็นก้อน (coagulate) ตามลำดับ โดยเมื่อดินมีประจุของโซเดียม (Na^+) จะดูดซับน้ำเข้าหาตัวเองทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นเหตุให้ความหนาของน้ำในชั้น Double Layer รอบ ๆ อนุภาคเม็ดดินเพิ่มขึ้น ค่าการบวมตัวสูงขึ้น อนุภาคดินอยู่ห่างกันมากขึ้น เกิดแรงลัทธิระหว่างอนุภาคเป็นแรงผลักส่งผลต่อคุณสมบัติด้านต่าง ๆ รวมทั้งการกระจายตัวของดิน ในทางกลับกันถ้าดินประกอบด้วยประจุของแคลเซียม (Ca^{2+}) คุณสมบัติของดินก็จะต่างจากประจุโซเดียม (Na^+) คือแรงลัทธิระหว่างอนุภาคเป็นแรงดึงดูดเนื่องจากความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของ Ca^{2+} มีมากกว่าไฮโดรเจน (H^+) และโซเดียม (Na^+) ตามลำดับ จึงทำให้เกิดการจับตัวระหว่าง Ca^{2+} ที่ผิวของอนุภาค ไอออนเหล่านี้เกิดการเชื่อมประสานจนปกคลุมอนุภาคของดิน ทำให้ไอออนอื่น ๆ ซึ่งอยู่ที่ผิวของอนุภาคเคลื่อนตัวห่างออกไปพร้อม ๆ กับความหนาของน้ำในชั้น Double Layer จะลดลง ทำให้อนุภาคดินเข้าใกล้กันมากขึ้น (Petrukhin, 1993) การแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าระหว่างน้ำกับ Na^+ และ Ca^{2+} ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคดิน และการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า
ระหว่างน้ำกับ Na^+ และ Ca^{2+} (Herrin, 1961)

Yoder (1967) ได้กล่าวถึงปฏิกิริยาเกลือที่เกิดขึ้นของเกลือคลอไรด์เมื่อผสมกับดินว่า จะทำให้มวลดินมีแรงดึงผิวเพิ่มขึ้นทำให้จุดเยือกแข็งมีค่าต่ำลงอัตราการระเหยของน้ำในมวลดินมีค่าลดลงตามไปด้วย จึงส่งผลให้ดินมีความสามารถในการอมความชื้นได้อย่างนาน ๆ ทำให้เกิดการบดอัดตัวเองได้อย่างต่อเนื่องเมื่อเปิดการจราจร ถึงแม้ว่าเมื่ออยู่ในสภาวะอากาศที่แห้งแล้งก็ตาม ความชื้นในดินที่ถูกปรับปรุงก็จะรักษาไว้ได้ด้วยการดูดซึมจากอากาศอีกทั้งยังช่วยรักษากำลังรับแรงเฉือนของดินในขณะที่อากาศหนาวเย็นจัดด้วยเช่นกัน

นอกจากนั้น ปฏิกิริยาของสารผสมดังกล่าวยังช่วยในการบดอัดได้แน่นยิ่งขึ้นเนื่องจากสารคลอไรด์จะตกผลึกเป็นก้อนเมื่อน้ำระเหยแห้ง จึงทำให้ดินแห้ง จึงทำให้ดินแน่นรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นและยังเป็นตัวเปลี่ยนแปลงความเหนียว (plasticity) ของดินด้วยเช่นกัน

Ingles and Metcalf (1972) ได้อธิบายว่าสารโซเดียมคลอไรด์เป็นสารผสมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินทุกชนิด แม้แต่ดินที่มีสารอินทรีย์ปนอยู่มากก็ตาม โดยเฉพาะดินที่มีค่า Liquid Limit สูงและมีแร่ชนิดของมอนต์มอริลโลไนท์ (montmorillonite) ปะปนอยู่มาก จะสามารถตอบสนองต่อปฏิกิริยาของโซเดียมคลอไรด์นี้ได้ดี ผลของการปรับปรุงดังกล่าวจะช่วยในการบดอัด

เพื่อให้ดินมีความหนาแน่นสูงขึ้น ช่วยลดการบวมตัวของดินเหนียวและค่าความชื้นน้ำอีกทั้งยังลดการหดตัวของดินเมื่ออากาศเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน

Israel (1982) ได้กล่าวถึงผลปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของเกลือคลอไรด์กับดินดังนี้

1) เกลือคลอไรด์จะช่วยรักษาความชื้นภายในมวลดินที่ถูกบดอัด โดยสารแคลเซียมคลอไรด์สามารถดูดซับความชื้นจากชั้นบรรยากาศสัมพัทธ์ 29% จากพฤติกรรมดังกล่าวจะช่วยในการรักษาแรงยึดเหนี่ยวภายในและส่งผลให้ลดการแยกตัวภายในของเม็ดดิน

2) พฤติกรรมของเกลือคลอไรด์จะช่วยในการหล่อลื่นระหว่างเม็ดดิน

3) พฤติกรรมของโซเดียมคลอไรด์จะทำให้อนุภาคของเม็ดดินเกิดการกระจายตัว

4) พฤติกรรมของโซเดียมอออน แคลเซียมอออน และ แมกนีเซียมอออน จะกระทำต่อโครงสร้างดินเหนียวที่วางตัวอย่างระเกะระกะไม่เป็นระเบียบ (flocculate) ทำให้ค่ามุมเสียดทานภายในของดินที่ถูกปรับปรุงมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดค่าการซึมผ่านของน้ำในดินเหนียวที่ทำการบดอัด กล่าวคือเมื่อสารโซเดียมคลอไรด์ละลายน้ำก็จะเกิดปฏิกิริยาทำให้เม็ดดินกระจายตัวและเกิดการบวมตัวส่วนที่กระจายตัวก็จะเข้าไปอุดอยู่ระหว่างช่องว่างจึงเป็นเหตุให้ลดค่าการซึมน้ำดังกล่าว

5) การปรับปรุงดินด้วยการผสมเกลือคลอไรด์ จะช่วยจำนวนครั้งในการทดสอบความทนทานของดินในสภาวะหนาวจัด (freeze thaw cycle test)

6) การใช้เกลือคลอไรด์จะช่วยเพิ่มแรงตึงผิวของน้ำในมวลดิน ซึ่งจะช่วยให้ความหนาแน่นของดินมีค่าเพิ่มขึ้น

7) ผลึกของเกลือจะช่วยในการยึดประสานและเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

ยุทธลักษณ์ ชูวรเชษฐ์ (2548) ได้ทำการศึกษาถึงระดับความเค็มที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ตัวอย่างดินสามารถจำแนกได้เป็น SM-SC มีระดับความเค็มตามธรรมชาติเท่ากับ 57.85 dS/m แล้วเพิ่มระดับความเค็มขึ้นเท่ากับ 323.50 dS/m พบว่า ค่าขีดจำกัดความเหลวของดินลดลง 3.69% ในขณะที่ค่าขีดจำกัดพลาสติกไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อระดับความเค็มของดินเพิ่มขึ้นมีผลให้ดินมีระดับอิมพัคต์ด้วยน้ำลดลงและ กำลังรับแรงเฉือน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำเพิ่มขึ้น

2.3 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์

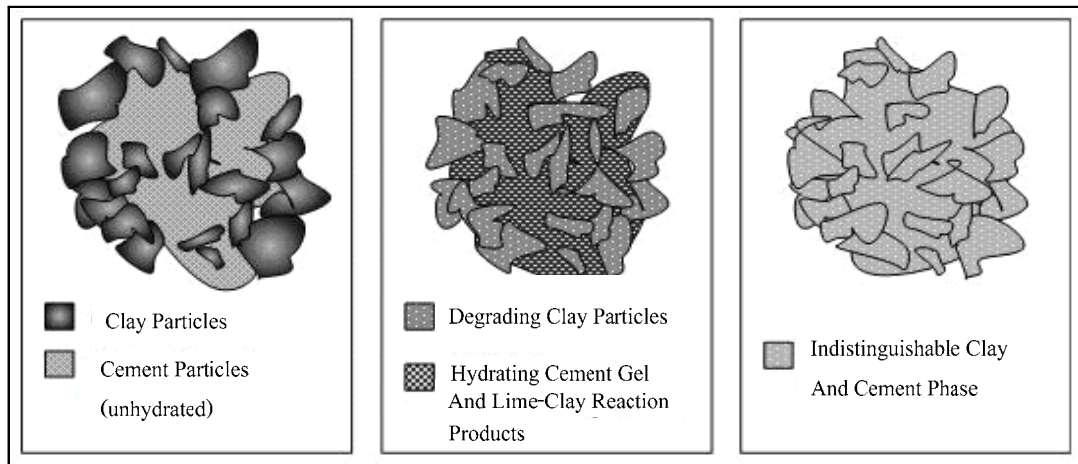
แนวความคิดเรื่องการปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น โดยการผสมวัสดุอื่นได้เกิดขึ้นเป็นเวลาหลายพันปีมาแล้ว ได้มีการนำดินมาผสมกับปูนขาวหรือวัสดุพอซโซลาน เพื่อให้ค่าดัชนีสภาพพลาสติก (plasticity index, PI) ของดินลดลง ซึ่งทำให้ดินรับแรงอัดได้ดีขึ้น หลังจากนั้น ได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องมาหลายศตวรรษ (Tessell et al, 1979)

Swedish และศาสตราจารย์ Bengt Broms ได้ใช้เสาเข็มปูนขาวในงานฐานรากและงานโครงสร้าง (Broms and Boman, 1975) ในประเทศญี่ปุ่นได้เริ่มต้นใช้เทคนิคนี้ในปลายปี ค.ศ. 1970 (Okumura and Terashi, 1975; Terashi et al, 1979; Kawasaki et al, 1981 และ Suzuki, 1982) DJM Research Group (1984) Chida (1982) และ Miura et al, (1986) ได้รายงานความสำเร็จของการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานวิศวกรรม ในปี ค.ศ. 1980 และ 1982 หลังจากการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ไม่นานนัก นักวิจัยและวิศวกรหลายท่านได้สร้างทฤษฎีวิธีการวิเคราะห์และวิธีการออกแบบ

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีปริมาณมากขึ้น ค.ศ. 1930 - 1939 สหรัฐอเมริกาได้เริ่มศึกษาการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต โดยในปี ค.ศ. 1937 Davis และคณะจากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต ในปี ค.ศ. 1948 ได้มีการใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างเขื่อน Hungry Horse ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 - 1979 ได้เกิดวิกฤติการณ์น้ำมันในปี ค.ศ. 1970 - 1979 ได้มีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงทำให้มีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น และได้มีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางเพื่อทำความเข้าใจปฏิกิริยาเคมีของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้น ปัจจุบันได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้กับงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย เพื่อเป็นการลดต้นทุนของคอนกรีตและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเถ้าลอยทิ้ง นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษานำเถ้าลอยลิกไนต์จากอำเภอแม่มาผสมในดินสำหรับงานถนน เช่น อนิรุทธ์ ชงไชย (2530), สมชัย กกกำแหง (2535) และ Rhee, (1982) นักวิจัยเหล่านี้พบว่ากำลังอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น (ในช่วง 0 - 15%) ระยะเวลาการบ่มและค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่า Liquid Limit, Plasticity Limit และ Plasticity Index มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย

2.4 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell and Jack (1966) ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของดินซีเมนต์โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบในโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อถูกบดอัดอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.3(a) ในช่วงอายุบ่มอันสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันกับน้ำ เป็นผลให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อยปูนขาวออกมา ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่ในดินและเกิดการแยกตัว หลังจากนั้นซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.3(b) สำหรับช่วงอายุบ่มยาวนานปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดอย่างสมบูรณ์ทำให้ซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วทั้งก้อนของดินซีเมนต์ เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.3(c)



(a) หลังบดอัดเสร็จ

(b) หลังระยะบ่มสั้น ๆ

(c) หลังระยะบ่มนาน ๆ

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell and Jack, 1966)

2.5 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

2.5.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญคือ

1) Calcareous Material ได้แก่หินปูน (limestone) และดินสอพอง (chalk) 2) Argillaceous Material ได้แก่ Silica ซึ่งอยู่ในรูปของดินเหนียว (clay) และดินดาน (shale) 3) Iron Oxide Material ได้แก่แร่เหล็ก (iron) หรือ สีลาแลง (laterite) เมื่อทำการเผาวัสดุดังกล่าวทั้งหมดรวมกันในหม้อเผา ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่คือ ออกไซด์หลักได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์ และออกไซด์รองได้แก่ MgO , NaO , TiO_2 , P_2O_5 ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์แสดงในตารางที่ 2.2 ออกไซด์หลักจะรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
(ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 - 67
SiO ₂	17 - 25
Al ₂ O ₃	3 - 8
Fe ₂ O ₃	0.5 - 0.6
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 - 5.5
Na ₂ + K ₂ O	0.5 - 1.3
TiO ₂	0.1 - 0.4
P ₂ O ₅	0.1 - 0.2

ตารางที่ 2.3 สารประกอบหลักที่รวมอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรซิลเซียม ซิลิเกต	3CaO . SiO ₂	C ₃ S
ไดซิลเซียม ซิลิเกต	2CaO . SiO ₂	C ₂ S
ไตรซิลเซียม อลูมินา	3CaO . Al ₂ O ₃	C ₃ A
เตตราซิลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์	4CaO . Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

2.5.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทธรรมดา (ordinary portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไปได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขียว

2) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทดัดแปลง (modified portland cement) เหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกิดความร้อนปานกลาง ทนซัลเฟตได้ปานกลาง ปัจจุบันไม่มีผลิตในประเทศไทย

3) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (high early strength portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือถอดแบบในเวลาอันสั้นได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง ข้อควรระวังคือ ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงมากในช่วงต้น อาจก่อให้เกิดการแตกร้าวได้

4) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (low heat portland cement) ได้ถูกพัฒนาครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ ในประเทศไทยไม่มีการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ปัจจุบันนี้ถูกทดแทนโดยการใช้พอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมกับเถ้าลอย

5) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (sulphate resistance portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีไตรแคลเซียม (C_3A) ต่ำ จึงทำให้มีการพัฒนากำลังอัดช้า ทำให้เกิดความร้อนต่ำกว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทธรรมดาได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตราช้างฟ้า ตราปลาฉลาม

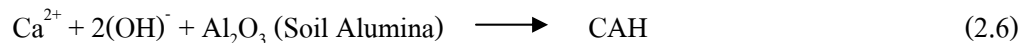
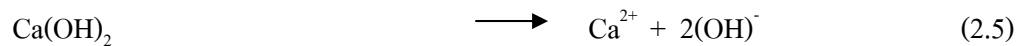
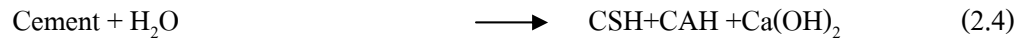
2.5.3 ปฏิกิริยาเมื่อผสมซีเมนต์กับดินและน้ำ

เมื่อซีเมนต์ผสมกับดินและน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้ดินมีกำลังเพิ่มขึ้น ซึ่งได้มีการศึกษา และบันทึกไว้โดยนักวิจัยหลายท่าน

Davidson (1961) ได้กล่าวไว้ว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมซีเมนต์กับดินเหนียวขึ้น จะทำให้เกิดการลดลงของค่า Plasticity ของดินซึ่งน่าจะมาจากการแยกตัวของ อีออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) ในระหว่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เม็ดดินยึดเกาะกันเป็นก้อน เนื่องจากแรงยึดเกาะทางเคมีที่มีอยู่ในดิน หรือการยึดเกาะกันระหว่างผิวของอนุภาคซีเมนต์ที่อยู่ใกล้กัน

Lambe et al, (1959) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์ และอธิบายไว้ว่า ซีเมนต์เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากผลึกของ Tricalcium Silicate, Dicalcium Silicate, Tricalcium Aluminate และ Tetracalcium Aluminate Ferrite เมื่อซีเมนต์ผสมเข้ากับดินและน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา จะได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Hydrated Lime หรือ Calcium Hydroxide ($Ca(OH)_2$) แยกตัวออกมา CSH และ CAH มีคุณสมบัติเชื่อมประสานที่ได้จากปฏิกิริยาหลักของซีเมนต์ นอกจากนี้ Hydrated Lime ที่ได้จะแตกตัวเป็นอีออนของแคลเซียมเข้าไปทำปฏิกิริยากับ Silica และ Alumina ในแร่ดินเหนียว เกิดสารประกอบ CSH และ CAH ขึ้นมาอีก ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์และน้ำในมวลดิน จะทำให้ค่า pH ในดินเพิ่มขึ้น ซึ่งเชื่อว่าการเพิ่มขึ้นของ pH เนื่องจากการแตกตัวของ $Ca(OH)_2$ หรือ Hydrated Lime ทำให้ Silica และ Alumina ซึ่งเป็น

แร่ประกอบในดินเหนียวเกิดการแตกตัวเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของแคลเซียม ได้วัสดุเชื่อมประสานขึ้นอีก ปฏิกิริยานี้จะต้องใช้ระยะเวลาานกว่าจะสมบูรณ์ สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์จะเป็นไปดังสมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3



การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เกิดจากการที่ซีเมนต์ผสมกับน้ำแล้วเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบ CSH, CAH และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไป โดย $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จะแตกตัวออกเป็น Ca^{2+} และทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นแร่ในดินเหนียวได้สารประกอบ CSH และ CAH ออกมาอีก สารประกอบเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานทำให้อนุภาคของเม็ดดินเกิดการรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีกำลังสูงขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการ 2.1 และ 2.2 เรียกว่า Primary Reaction และ 2.3 เรียกว่า Secondary Reaction

2.6 เถ้าลอยและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอย หรือเถ้าถ่านหิน (fly ash หรือ pulverized fuel ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงาน โรงไฟฟ้าถ่านหิน มีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (pozzolan) สังกะระห้ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและอะลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (cementitious) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน

มีหน่วยงานวิจัยหลายหน่วยงานได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิงถึงของเถ้าลอยจะมี 2 แห่งด้วยกันคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือก

เถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีต แต่จากการศึกษาของ สมชัยและคณะ (2540) พบว่าคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นได้ทั้ง Class F และ Class C ดังนั้นการจำแนกประเภทของเถ้าลอยโดยอาศัยหลักเกณฑ์ดังกล่าวอาจเกิดข้อโต้แย้งได้ คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงริเริ่มที่จะดำเนินการร่างมาตรฐานเพื่อใช้กับเถ้าลอยและการออกแบบคอนกรีตสำหรับประเทศไทยขึ้น

2.6.1 คุณสมบัติพื้นฐานและทางเคมีของเถ้าลอย

1) ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กำหนดไม่ให้เกิน 5 เพราะซัลเฟอร์ มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด ระยะเวลาก่อตัวได้ และยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต (sulfate attack)

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับ เถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (loss on Ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มาก การควบคุมในด้าน Air entrainment ของคอนกรีตสดจะทำได้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่ม ในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้ว เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 มาก ปริมาณอัลคาไลน์ (alkali) ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O equivalent) มากที่สุดไม่เกิน ร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ alkali-aggregate ขึ้นได้

ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์ มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยา ต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ พ.ศ. 2431 – 2541 คุณสมบัติโดยทั่วไปมีปริมาณออกไซด์ของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณ CaO จะสูงมากกว่าร้อยละ 10 ปริมาณ LOI ต่ำมาก คือน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือ ปริมาณ Fe_2O_3 จะสูงกว่าแหล่งอื่น

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

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

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี 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) ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย (mineralogical composition)

สมชัย กกกำแหง และคณะ (2540) เมื่อถ่านหินถูกเผา และมีการเย็นตัวของเถ้าลอย การเผาจะทำให้องค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอยด้านการเกิดผลึก (crystalline) แตกต่างกันไป สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์จะมีความเป็น Noncrystalline (glass) มากกว่าร้อยละ 90 อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ก็ยังคงมีองค์ประกอบของ Crystalline จำพวก Quartz Anhydrite Calcite Hematite Mullite ซึ่งเกี่ยวข้องการเกิดปฏิกิริยา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction จะพบว่าเถ้าลอยจากถ่านลิกไนต์จะมีองค์ประกอบของ Crystalline น้อยกว่าเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัสและแอนทราไซต์

3) ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) จะได้สารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หลังจากนั้นสารปอซโซลานในคือเถ้าลอยได้แก่ซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ได้สารไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ผลผลิตเช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ในงานที่เป็นคอนกรีตหลาเมื่อใส่เถ้าลอยลงไปปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ก็จะทำให้คอนกรีตสามารถระบายความร้อนได้ทัน

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ (2542) รายงานว่าเถ้าลอยจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมอลูมิเนตซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงแรกจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต ปริมาณอัลคาไลน์ และปริมาณแคลเซียมในเถ้าลอย

2.6.2 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย

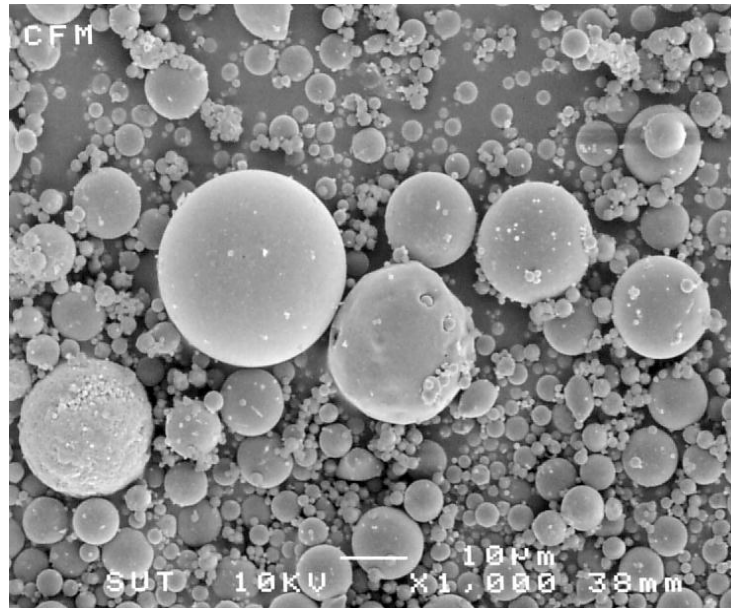
คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของเถ้าลอย สามารถเห็นได้จากพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (fly ash concrete) แต่คุณสมบัติของเถ้าลอยอาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ เช่นมีการเผาน้ำมันเตาร่วมกับการเผาถ่านหิน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และลดการก่อก้อน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งาน อาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C-618 ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 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
- ส่วนที่ข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
Mutiple Factor (ผลคูณระหว่าง %LOI กับ % ของปริมาณความชื้นที่ข้างตะแกรงเบอร์ 325)	255	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ต้าที่ 28 วัน Max% ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03

1) รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม เมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope :SEM จะเห็นรูปร่างกลม ดังรูปที่ 2.4 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบ และทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเทซึ่งคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้



รูปที่ 2.4 Scanning Electron Microscope : SEM เถ้าลอย (ขยาย 1,000 เท่า)

2) ความละเอียด (Fineness)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา Pozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 mm) โดยวิธีร่อนเปียก (wet sieving) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (blaine specific surface-area technique) ตามมาตรฐาน ASTM C-204 หรือวิธี Particle size-analysis หรือวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม การทดสอบเทอร์บิดิเมเตอร์ (turbidimeter test) ตาม ASTM C-115 และการใช้ไฮโดรมิเตอร์ โดยการทดสอบทั้งสี่วิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่แตกต่างกันได้มาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทดสอบ โดยผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความพรุนของเถ้าลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมาก แต่จากการทดสอบเถ้าลอยจาก อำเภอแม่เมะ จังหวัดลำปาง การบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าว ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

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

จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์

3) การหาดัชนีกำลัง (strength activity index)

ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (compressive strength) ของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ต้ามาตรฐานที่ไม่ผสมปอชโซลาน โดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้ามาตรฐาน ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

2.6.3 เทคนิคการทดแทนเถ้าลอยในงานคอนกรีต

เทคนิคการผสมเถ้าลอยในคอนกรีตปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดและคุณสมบัติอื่น ๆ ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (Berry, E.E and Malhotra, V.M., 1980) ซึ่งมีสามวิธีดังนี้

1) ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน การทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยนั้นมีการทดแทนโดยน้ำหนักและการทดแทน โคนปริมาตร จากการทดลองพบว่าการทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:1 นั้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในช่วงสามเดือนแรกต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่กำลังอัดเมื่ออายุหนึ่งปีจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

2) ใช้เป็นมวลละเอียดเพิ่มในคอนกรีต การใช้เถ้าลอยเป็นมวลละเอียดเพิ่มในคอนกรีตจะเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มสารเชื่อมประสานในคอนกรีตซึ่งจะทำให้กำลังอัดตั้งแต่อายุสามเดือนขึ้นไปมีค่าเพิ่มมากขึ้น

3) ใช้ทั้งทดแทนปูนซีเมนต์และใช้เป็นมวลรวมละเอียดด้วย การทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและใช้เถ้าลอยเป็นมวลรวมละเอียดเพิ่มด้วยนี้ หากต้องการให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีกำลังอัดในช่วงแรกเท่ากับคอนกรีตธรรมดา ปริมาณเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยรวมกันจะต้องมากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตธรรมดา

2.6.4 คอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ

1) กำลังอัด

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิमितยงสกุล (2538) ได้นำเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะมาทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 28 60 และ 90 วันของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแม่เมาะ โดยให้เถ้าลอยแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 15 25 และ 35 และใช้อัตราส่วนผสมวัสดุซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก การไหลของมอร์ต้ากำหนดที่ร้อยละ 105 ถึง 115 จากการทดลองพบว่ามอร์ต้าผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อายุเริ่มแรกจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังต่ำกว่ามอร์ต้าธรรมดา ค่ากำลังอัดในช่วงยาวจะมากกว่าค่ากำลังอัดของมอร์ต้าธรรมดา

วิศวะ จักรไพศาล และชัยโรจน์ จักรไพศาล (2540) ได้ทำการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติของเถ้าลอยแม่เมาะที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง (high performance concrete : คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง มีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็ว สามารถใช้งานได้สะดวกและมีคุณภาพดีกว่าคอนกรีตธรรมดา) โดยใช้วิธีวิเคราะห์การวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (Thermal Gravimetry Analysis : TGA) ซึ่งเป็นการทดสอบทางเคมีเพื่อหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ และหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีผลต่อกำลังอัด จากนั้นนำผลที่ได้มาเป็นแนวในการหาปริมาณของเถ้าลอยแม่เมาะที่เหมาะสมเมื่อนำมาแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีต โดยตัวอย่างทดสอบจะเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมด้วยเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปริมาณร้อยละ 0 - 35 โดยน้ำหนักของปริมาณซีเมนต์ และใช้อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.26 - 0.32 หรืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.30 - 0.50 ผลที่ได้จากการศึกษาและทดสอบพบว่า สาเหตุที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีกำลังอัดที่สูงขึ้น เนื่องจากเกิดสารประกอบที่เพิ่มแรงอัด (แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต) เพิ่มขึ้น โดยปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยจะมีค่ามากกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ธรรมดาร้อยละ 5 ที่อายุบ่ม 28 วัน และร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56 วัน แสดงว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดเพิ่มขึ้นตามเวลา นอกจากนี้ยังพบอีกว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีกำลังอัดดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันโดยตรงกับปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก และจากผลของการศึกษาจะได้ว่าปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 15 - 25 ของปูนซีเมนต์

2) ความละเอียด

สมิตร ส่งพิริยะกิจ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2538) ได้ศึกษาถึงผลของความละเอียดของเถ้าลอยแม่เมาะที่มีผลต่อคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยเถ้าลอยที่ใช้แทนปูนซีเมนต์จะมีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 และ 35 ของน้ำหนัก

ปูนซีเมนต์และทำการทดสอบการก่อตัว การไหล และกำลังอัดที่ 1 3 7 14 28 60 และ 90 วัน จากผลการทดลองพบว่า การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์มีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น และค่าการไหลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดมากขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าพัฒนาเร็วขึ้น

ทิน เกตุรัตน์บวร และคณะ (2541) ได้นำเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มาแยกด้วยเครื่อง Air Classifier และนำเถ้าลอยความละเอียดสูงซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.8 ไมครอน มาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อทำคอนกรีตกำลังสูงในการศึกษาจะใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อคงปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ให้มีค่าเท่ากับ 0.26 และมีค่ายุบตัวที่ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่ามากกว่า 5 ซม. ผลการทดสอบกำลังอัดพบว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยละเอียดมาก ๆ ในอัตราส่วนร้อยละ 15 25 และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทำให้กำลังอัดโดยรวมดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย โดยเริ่มให้กำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยตั้งแต่อายุ 17 วันขึ้นไป ซึ่งมีค่ากำลังอัดเทียบเป็นร้อยละ 113 ถึง 115 ของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยที่อายุ 365 วัน

Chindaprasirt, P., et.al. (2005) ได้ศึกษาคุณสมบัติปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยคัดขนาด ผลการศึกษาพบว่า การพัฒนากำลังอัดระยะต้นของมอร์ต้าที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยมีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิกไม่เกิดในระยะต้น ประกอบกับการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์จะทำให้ปฏิกิริยาของปูนลดลง เมื่อมีระยะเวลานานขึ้น การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิก การแทนที่เถ้าลอยในซีเมนต์พอเหมาะในช่วง 0 - 40 % ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นสามารถชดเชยปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ ตลอดจนเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูง จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นและทำให้กำลังอัดระยะปลายสูงขึ้นมาก

3) การต้านทานการกัดกร่อน

สมหมาย สว่างกิจ และคณะ (2535) ได้ทดลองนำเถ้าลอยจากประเทศสหรัฐอเมริกาและเถ้าลอยแม่เมาะมาผสมในปูนซีเมนต์มอร์ต้าในอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และกำหนดให้ค่าอัตราส่วนของน้ำต่อสารเชื่อมประสานมีค่า 0.50 ทำการหล่อเป็นก้อนทดสอบรูปลูกบาศก์ และนำไปแช่ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตรต่อลิตร วัตุน้ำหนักที่หายไปในช่วงเวลา 7 และ 21 วัน ที่แช่ในกรด การทดลองพบว่า ชนิดของเถ้าลอยไม่มีผลต่อการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตมากนัก และคอนกรีตที่มีเถ้าลอยผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดมากกว่าคอนกรีตธรรมดา

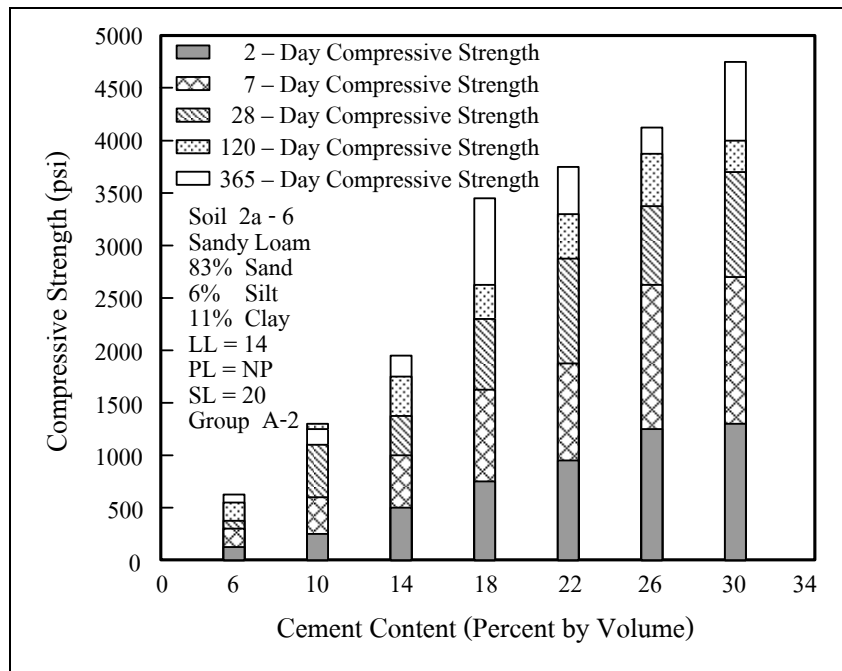
ทิน เกตุรัตน์บวร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2540) ได้นำเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาแยกออกเป็น 4 ขนาดด้วยเครื่องแยกขนาด (Air Classifier) แล้วนำไปผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักในมอร์ต้า ควบคุมให้มีการไหลแผ่อยู่ระหว่าง 101 ถึง 115 เพื่อทดสอบกำลังอัดและความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเป็นระยะเวลา 126 วัน ผลการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนพบว่าตัวอย่างมอร์ต้าที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักสามารถต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าตัวอย่างที่มีเถ้าลอยผสมอยู่ร้อยละ 0 20 30 และ 40 เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยในขนาดเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เถ้าลอยที่มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) น้อยกว่าจะสามารถทนต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าการใช้เถ้าลอยที่มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์สูงกว่า

2.7 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์

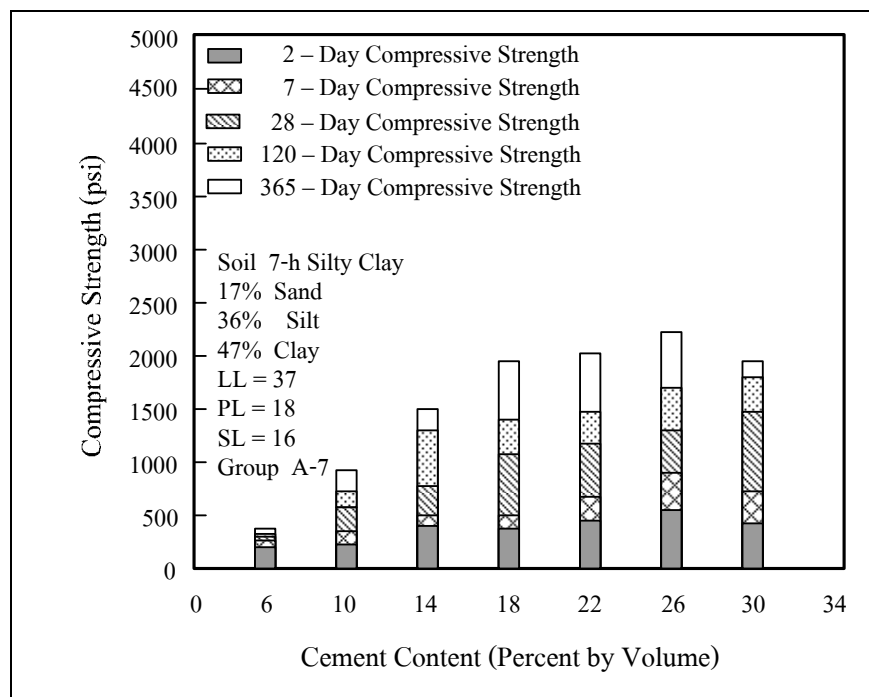
2.7.1 ปริมาณซีเมนต์และปริมาณน้ำในมวลดิน

Ruenkrairergsa (1982) อธิบายว่า ปัจจัยหลักที่มีต่อคุณภาพของดินซีเมนต์ คือ ปริมาณซีเมนต์ เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นกำลังอัดของดินซีเมนต์ก็จะเพิ่มขึ้น และอัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเบื้องต้นของดินด้วย โดยดินซีเมนต์ที่มีมวลเม็ดหยาบมากกว่าจะมีค่าเพิ่มสูงกว่าดินซีเมนต์ที่มีมวลเม็ดละเอียดกว่า

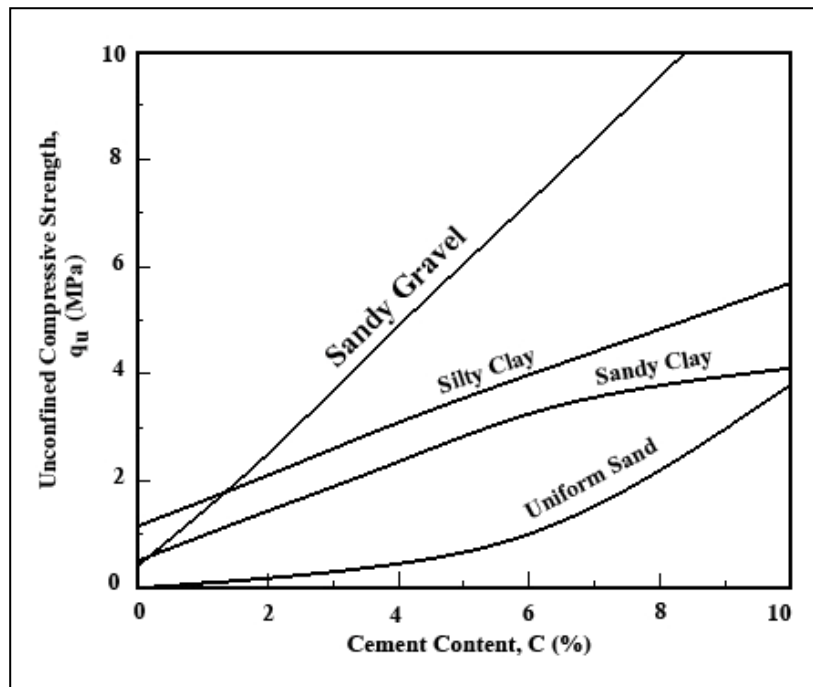
Felt (1955) ได้นำดิน Sandy Loam และ Silty Clay มาผสมกับซีเมนต์ โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ 6 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร นำมาทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 5 ค่า ตั้งแต่ 2 วัน ถึง 1 ปี ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม และดินที่มีดินเหนียวในปริมาณสูงกว่าจะมีกำลังอัดต่ำกว่าดินที่มีดินเหนียวต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Metcalf (1977) ซึ่งสรุปว่า ปริมาณซีเมนต์มีผลโดยตรงกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ โดยเฉพาะกับดินเม็ดหยาบ โดยกำลังอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ แต่สัดส่วนการเพิ่มจะแตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของดิน ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.7 นอกจากนี้ Felt (1955) ยังได้ทดลองหาอิทธิพลของซีเมนต์ประเภทหนึ่ง และซีเมนต์ประเภทสามต่อกำลังอัดของดินสองชนิด คือ Sandy Loam และ Silty Clay Loam ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.8 และสรุปว่า ดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทสามมีกำลังอัดสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มเดียวกัน



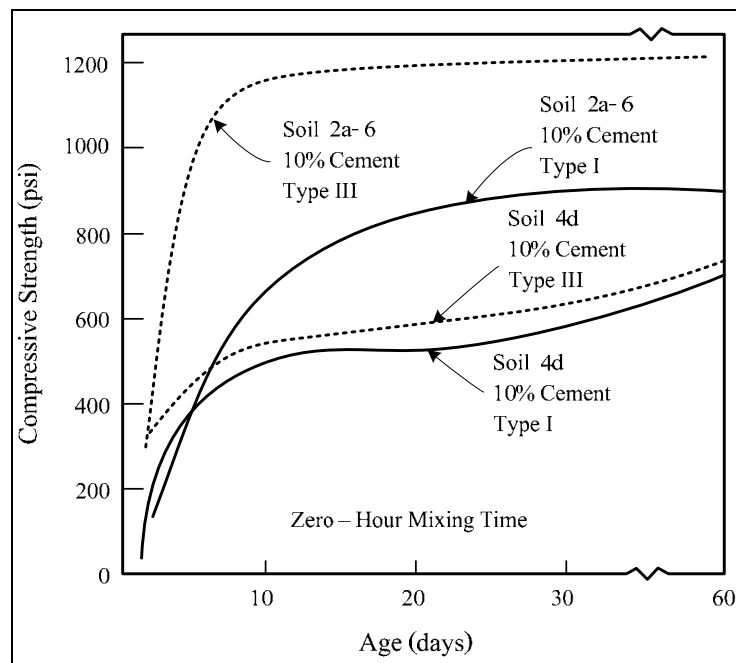
รูปที่ 2.5 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Felt, 1955)



รูปที่ 2.6 อิทธิพลเนื่องจากปริมาณซีเมนต์และอายุบ่มต่อกำลังอัดของดิน Silty Clay (Felt, 1955)



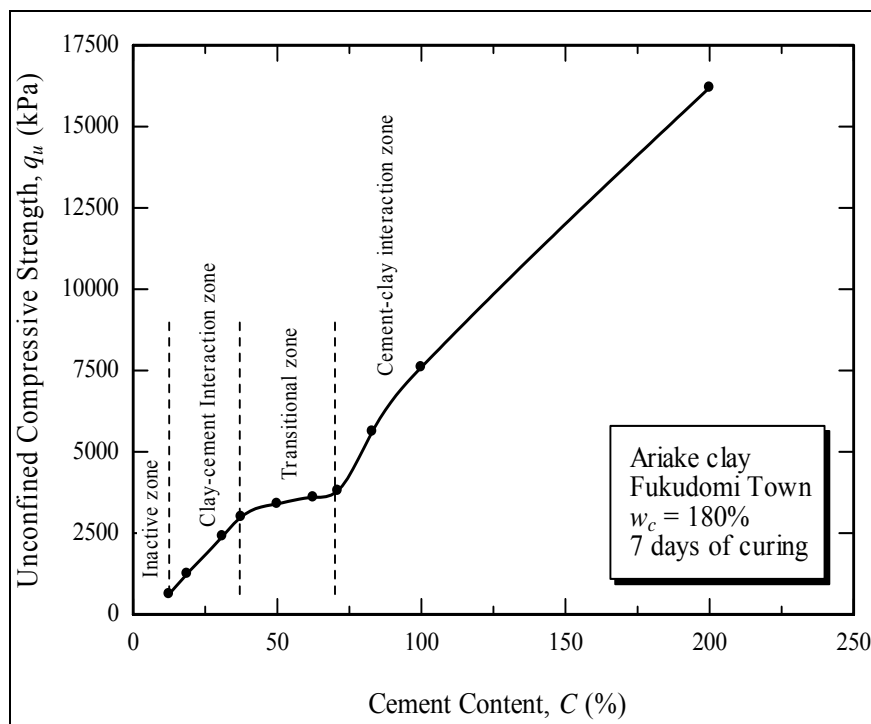
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์ (Metcalf, 1977)



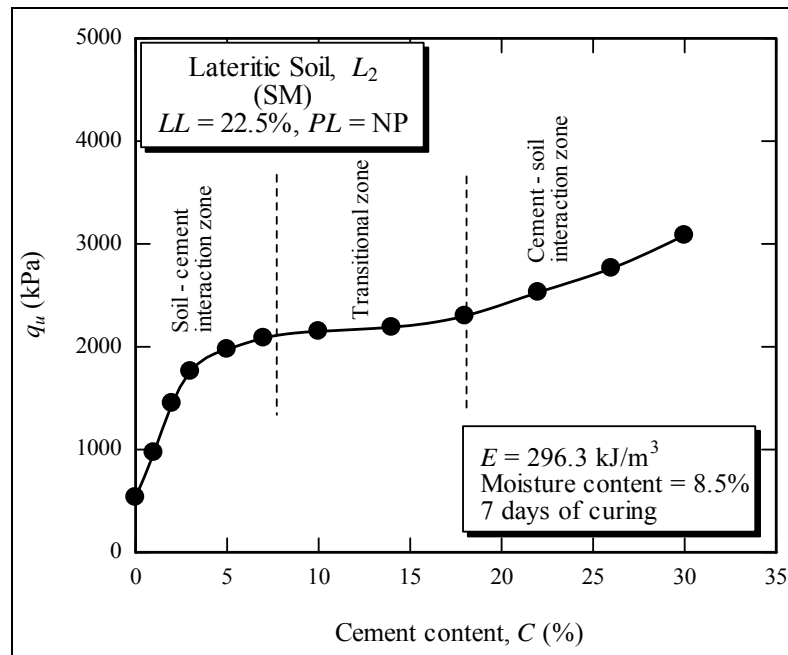
รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบกำลังอัดของดิน Sandy Loam (Soil 2a-6) และ Silty Clay Loam (Soil 4d) ผสมซีเมนต์ประเภท 1 และประเภท 3 เมื่อผสมเสร็จแล้วทดสอบทันที (Felt, 1955)

Horpibulsuk et al. (2003) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูง และพบว่าสำหรับดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินตัวอย่างแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.9 กราฟของกำลังอัดแกนเดียว สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรกซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณซีเมนต์ ต่ำ ๆ เรียกว่า Clay - cement interaction zone ในช่วงนี้กำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ ช่วงที่สองกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าค่อนข้างคงที่ โซนนี้เรียกว่า Transitional zone และถัดจากช่วงนี้ไปเป็น Cement - clay interaction zone ซึ่งกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าสูงขึ้นอีก นอกจากนี้ยังพบอีกว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุบ่มค่าหนึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (clay - water/cement ratio, w_c/C) เท่านั้น

วรรัชย์ เกษกัน (2547) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังที่มีปริมาณน้ำในมวลดินต่ำ พบพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกน เดียวกับปริมาณซีเมนต์มีลักษณะที่คล้ายกับเส้นกราฟของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำในมวลดินสูงที่ศึกษาโดย Horpibulsuk et al. (2003) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ขอบเขตปฏิสัมพันธ์ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)



รูปที่ 2.10 กราฟกำลังอัดแกนเดียวสัมพันธ์กับปริมาณซีเมนต์ (วรรัช เกษกัน (2547)

ทรงพล บุญมาดี (2529) ได้ศึกษากำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัดด้วยพลังงานแบบมาตรฐาน และแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ปริมาณซีเมนต์ 1 3 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักดินแห้ง ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 2.8 ซึ่งสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์และอายุบ่ม โดยกำลังอัดจะมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุบ่ม 7 วันแรก หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มของกำลังอัดจะลดลง

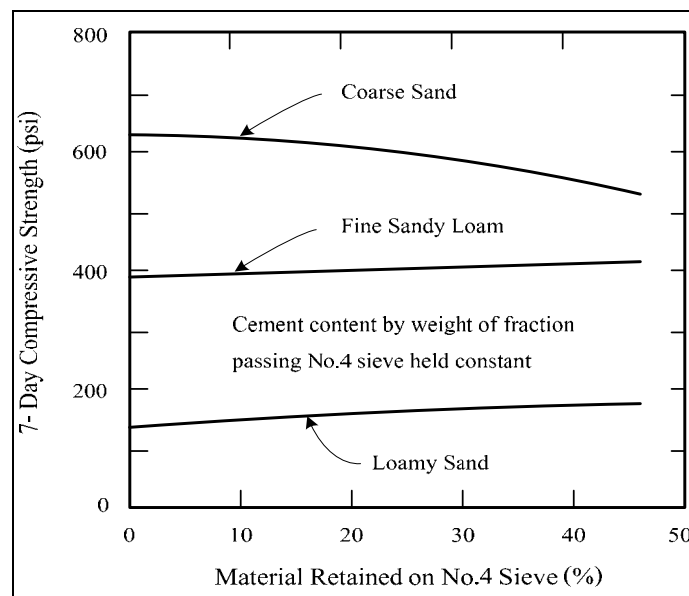
ตารางที่ 2.8 กำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1 3 7 14 และ 28 วัน

พลังงานบดอัด	ปริมาณซีเมนต์, %	กำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่อายุบ่ม 1 3 7 14 และ 28 วัน				
		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
สูงกว่ามาตรฐาน	1	5	5	15	15	15
	3	7	100	112	145	220
	5	182	259	302	330	365
	7	254	348	382	445	557

2.7.2 คุณสมบัติของดิน แร่ธาตุที่ประกอบอยู่ในมวลดินตามธรรมชาติ หรือชนิดของดิน มีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผสมดินเข้ากับซีเมนต์และน้ำ และมีผลต่อกำลังอัดและความคงทนของดินซีเมนต์ ส่วนประกอบเหล่านี้ได้แก่ ดินจำพวก ทราย ดินตะกอน ดินเหนียว และสารประกอบอินทรีย์ เป็นต้น

Winterkorn and Chandrasekharn (1951) ได้รายงานผลการทดสอบกำลังอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ว่าจะได้ผลดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณมวลเม็ดหยาบและปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน

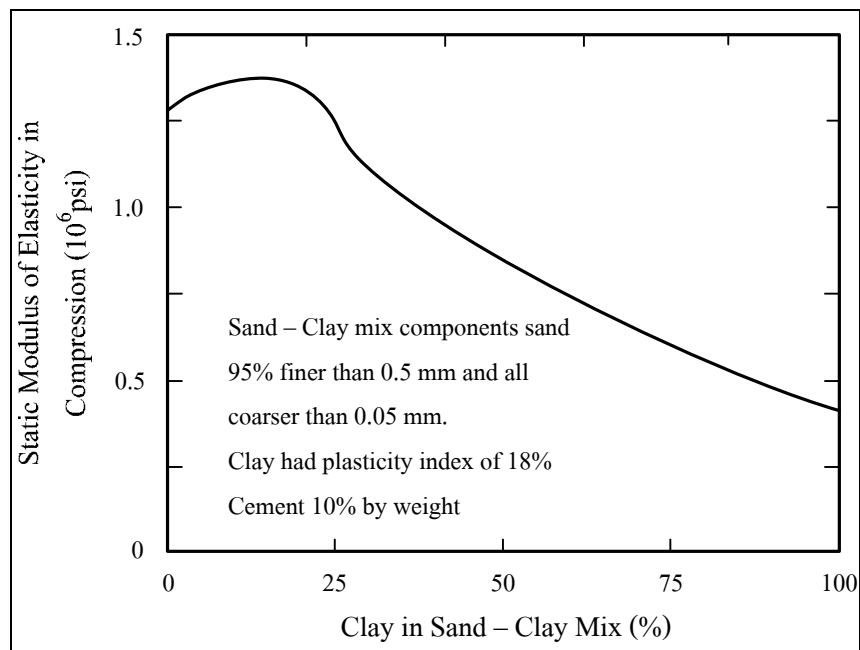
Norling and Peckard (1958) ได้ศึกษาอิทธิพลของมวลหยาบโดยใช้เปอร์เซ็นต์ที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ 3 ชนิด คือ ทรายหยาบ (coarse sand) ทรายละเอียดปนอินทรีย์สาร (fine sand loam) และ ทรายปนอินทรีย์สาร (loamy sand) โดยผสมด้วยปริมาณซีเมนต์ที่เท่ากัน แต่เพิ่มปริมาณมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 แตกต่างกันไป ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.11 และพบว่า Loamy Sand และ Fine Sand Loam จะมีกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีของ Coarse Sand จะมีกำลังอัดลดลง แต่การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือ เป็นการศึกษากำลังอัดที่อัตราส่วนผสมของปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ค่าเดียวกันนั้น ซึ่งค่ากำลังอัดของดินทั้ง 3 ชนิด อาจแตกต่างจากนี้ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์



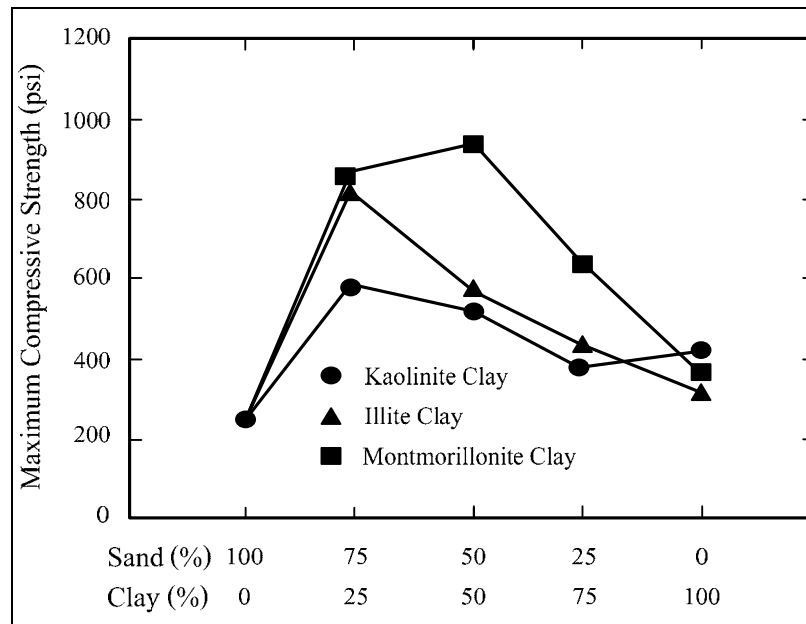
รูปที่ 2.11 อิทธิพลของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Norling and Peckard, 1958)

2.7.3 ปริมาณดินเหนียวและชนิดของแร่ดินเหนียว Reinhold (1955) ได้นำเอาทรายมาผสมกับดินเหนียวและซีเมนต์ โดยเปลี่ยนปริมาณดินเหนียว ผลแสดงในรูปที่ 2.12 พบว่า เมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะลดลง ซึ่งหมายความว่าค่ากำลังอัดก็จะลดลง

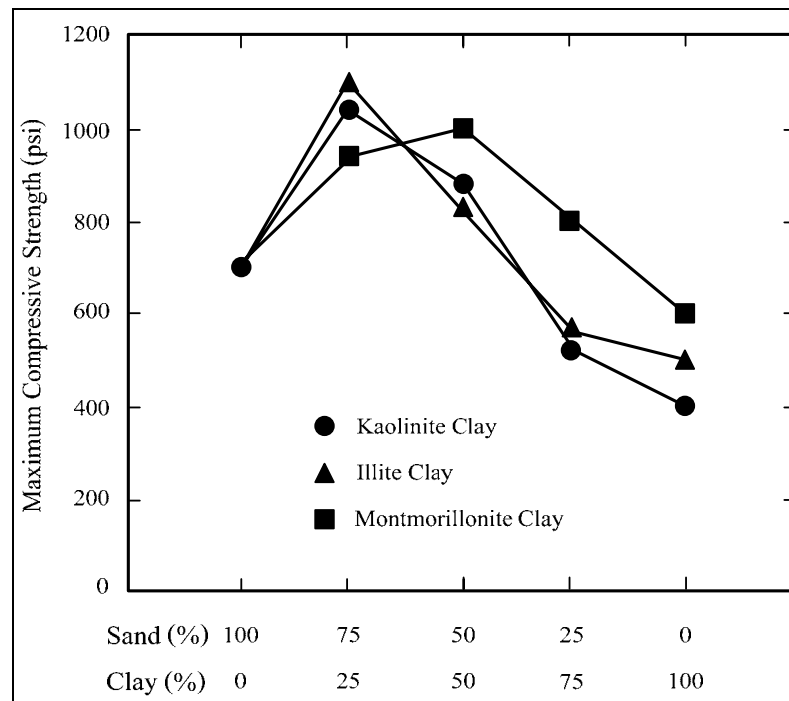
Davidson et al. (1962) ได้ศึกษากำลังอัดดินเหนียว 3 ชนิด คือ Kaolinite Illite และ Montmorillonite ผสมกับทรายและซีเมนต์ โดยเพิ่มอัตราส่วนผสมของดินเหนียวที่ละ 25 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ ใช้อัตราส่วนทรายต่อดินเหนียวดังนี้ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 ผลแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 พบว่า เมื่อปริมาณดินเหนียวมากเกินไปกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับดินพวก Cohesionless Soil จะทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ลดลงอย่างชัดเจน และดินเหนียวจำพวก Montmorillonite ยังให้ค่ากำลังอัดที่มีแนวโน้มสูงกว่าดินเหนียวจำพวก Kaolinite และ Illite



รูปที่ 2.12 อิทธิพลของปริมาณดินเหนียวต่อค่า Modulus of Elasticity ของดินซีเมนต์ (Reinhold, 1955)



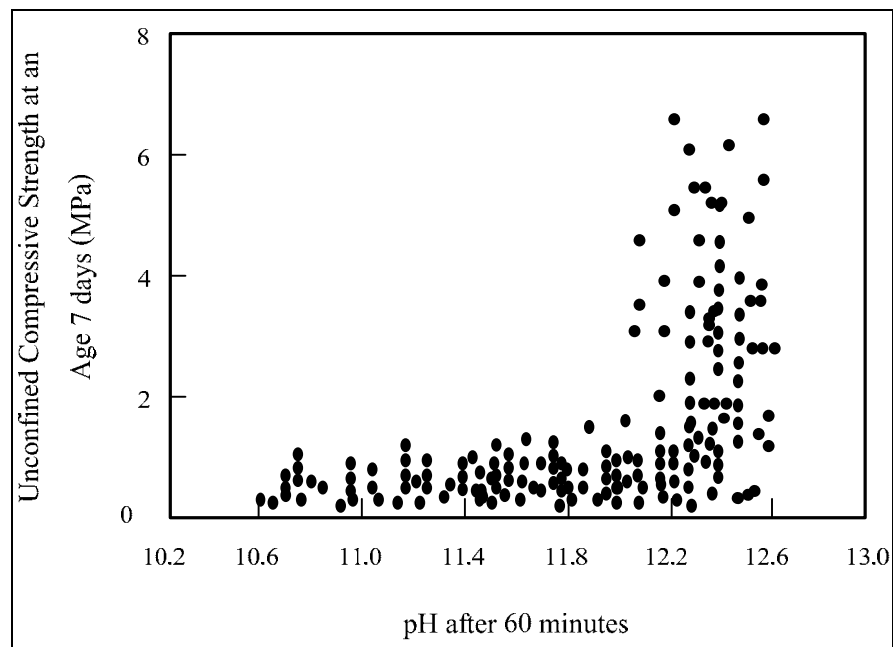
รูปที่ 2.13 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8 เปอร์เซ็นต์
(Davidson et al, 1962)



รูปที่ 2.14 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12 เปอร์เซ็นต์
(Davidson et al, 1962)

2.7.4 คุณสมบัติทางเคมีของดิน Davidson (1961) ได้รายงานว่า ส่วนประกอบทางเคมีของดินจะทำให้ดินทำปฏิกิริยากับซีเมนต์แตกต่างกัน และจะขึ้นอยู่กับประจุลบ (anion) ที่มีอยู่ในอนุภาคของดิน โดยเฉพาะดินที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่จะทำให้ปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป เช่น เกิดการแข็งตัวช้า ส่วนดินที่มีสารซัลเฟตผสมอยู่จะเกิดการบวมตัวและทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

Sherwood (1958) ได้ศึกษาอิทธิพลของสารอินทรีย์ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับค่า pH ของดินซีเมนต์ที่ได้จากการผสมดินและซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:10 ดังแสดงในรูปที่ 2.15 พบว่า ถ้าค่า pH ต่ำกว่า 12.1 แสดงว่าดินที่นำมาใช้ผสมมีสารอินทรีย์ผสมอยู่จึงทำให้ดินซีเมนต์แข็งตัวช้า และเป็นผลทำให้กำลังอัดลดลงเมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ที่เท่ากัน



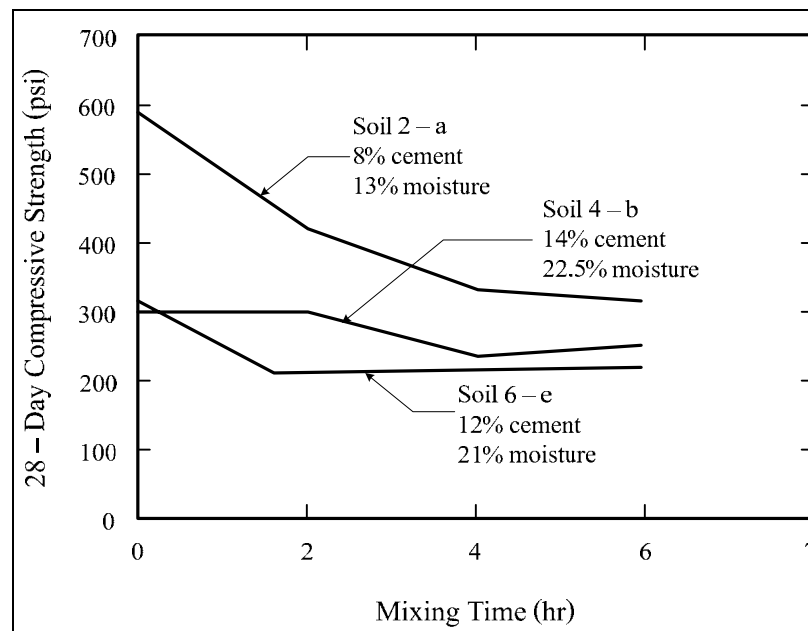
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่า pH ของดิน ผสมซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:10 (Sherwood, 1958)

อภิชาติ คำภาห্লা และคณะ (2551) ได้ศึกษากำลังอัดของดินเหนียวปนตะกอนที่ผสมสารละลายซัลเฟต โดยทำการศึกษากำลังอัดแกนเดี่ยวของดินซีเมนต์ในสภาพธรรมชาติ และดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟต พบว่า กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติ และดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟต มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และอายุบ่ม จนถึงปริมาณซีเมนต์ค่าหนึ่งกำลังอัดแกนเดี่ยวจะมีค่าลดลง ส่วนปริมาณซีเมนต์ที่สามารถให้กำลังอัดแกนเดี่ยวสูงสุด ในปริมาณน้ำที่เหมาะสม มีค่าประมาณ 25 - 30 % ของน้ำหนักดินแห้ง โดยที่กำลังอัด

แกนเดี่ยวของดินที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดแกนเดี่ยวของดินซีเมนต์ตามธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากซัลเฟตไอออนของแมกนีเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ไฮดรต เป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) และแคลเซียมซัลเฟตหรือเอ็ททริงไกต์ การเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์เอ็ททริงไกต์จะทำให้เกิดการขยายตัวของช่องว่างในดินซีเมนต์ที่มีซัลเฟตมากขึ้น การลดลงของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและการขยายตัวของช่องว่างทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่มีซัลเฟตมีค่าลดลง

2.7.5 การผสม

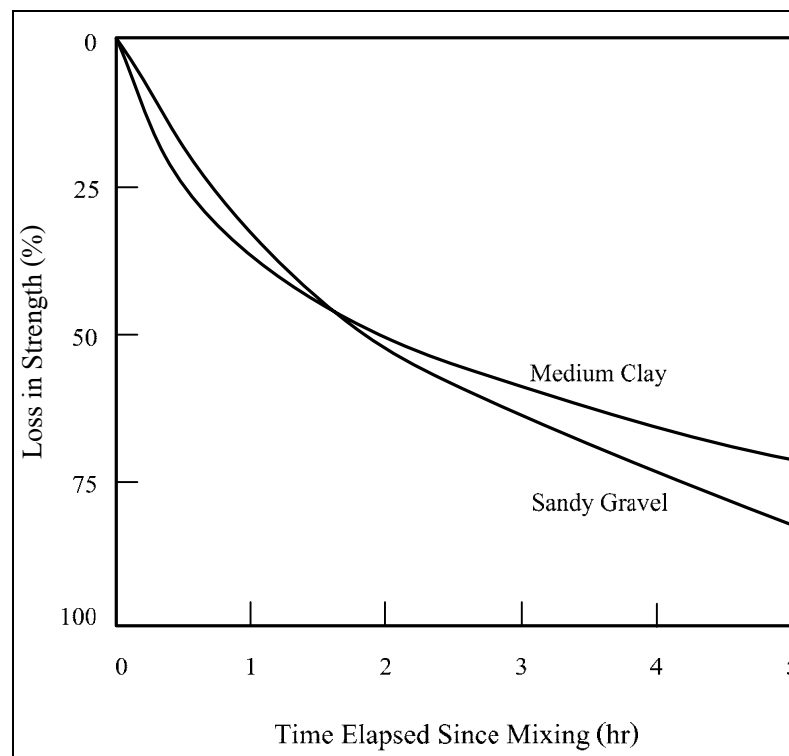
1) ระยะเวลาในการผสม Felt (1955) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการหน่วงเวลาในการผสมดินกับซีเมนต์ให้นานขึ้น และหยุดผสม ที่มีผลต่อกำลังอัดของดิน 3 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A - 2 Sandy Loam (LL = 26, PI = 11) ดินกลุ่ม A - 4 Silty Clay Loam (LL = 35, PI = 12) และ ดินกลุ่ม A-6-7 Clay (LL = 47, PI = 26) ความสัมพันธ์ของผลการทดสอบระหว่างการหน่วงเวลาผสมให้ช้าลงกับกำลังอัด แสดงในรูปที่ 2.16 พบว่า ดินทั้งสามชนิดมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อการหน่วงเวลาในการผสมแบบทิ้งไว้นานขึ้น และการหน่วงเวลาในการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราวที่ใช้เวลานานขึ้นมีผลเสียน้อยกว่าการหยุดผสมเลย



รูปที่ 2.16 ผลของระยะเวลาที่ใช้ผสมต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Felt, 1955)

Ingles and Metcalf (1972) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่ใช้ผสมดินซีเมนต์ โดยใช้ดิน 2 ชนิด คือ ดินเหนียวแข็งปานกลาง (medium clay) และ ทรายปนกรวด (sandy gravel) ผลแสดงในรูปที่ 2.17 พบว่า ถ้าระยะเวลาในการผสมที่นาน 1 ถึง 2 ชั่วโมง กำลังอัดของดินเหนียวแข็งปานกลาง และทรายปนกรวด จะลดลงมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าใช้เวลานานในการผสมนานกว่า 2 ชั่วโมง ขึ้นไป เปอร์เซ็นต์การลดลงของกำลังอัดในดินทรายปนกรวดจะมากกว่าดินเหนียวแข็งปานกลางเล็กน้อย

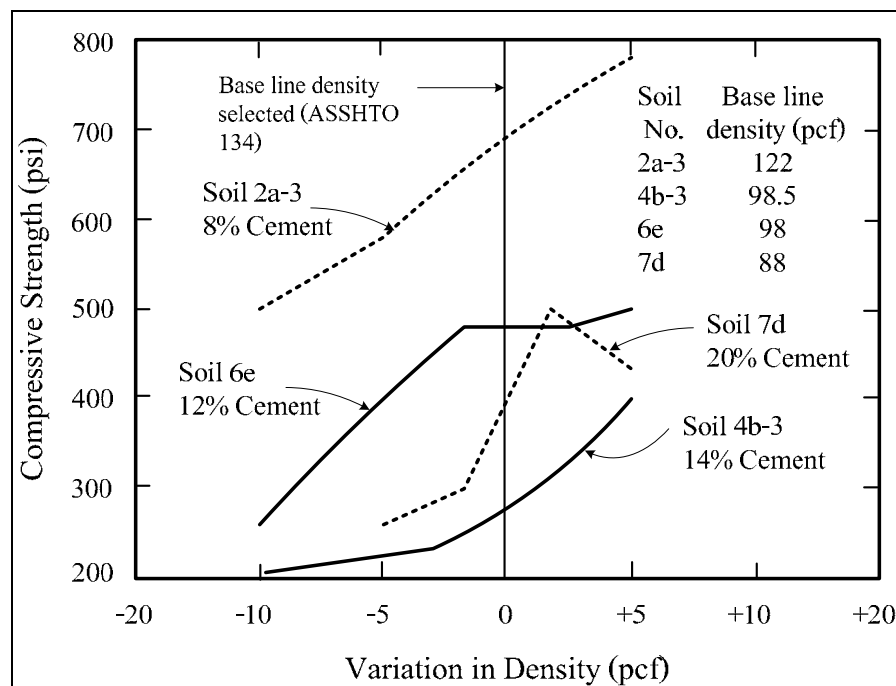
2) ปริมาณน้ำในมวลดิน Felt (1955) และ Davidson et al. (1962) ทำการทดลอง ได้ผลตรงกันว่าปริมาณน้ำและความหนาแน่นมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทรายควรบดอัดให้อยู่ทางด้านแห้งของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด ส่วนดินเหนียวต้องบดอัดให้อยู่ทางด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสมเล็กน้อยจะทำให้ได้กำลังอัดสูงสุด



รูปที่ 2.17 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้ระยะเวลาการบดอัดนานขึ้น
(Ingles and Metcalf, 1972)

Davidson (1961) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเหมาะสมกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ กับดิน 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

3) ความหนาแน่น Felt (1955) ได้ศึกษาดิน 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) มาทดสอบ เพื่อประเมินผลกำลังอัดจากความหนาแน่น โดยใช้การบดอัดแบบมาตรฐานตามมาตรฐาน ASSHTO กำหนดเป็นเส้นความหนาแน่นพื้นฐาน ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.18 พบว่า ทุกตัวอย่างการผสมเมื่อความหนาแน่นของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.18 อิทธิพลของความหนาแน่นต่อกำลังอัดของดินที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (Felt, 1955)

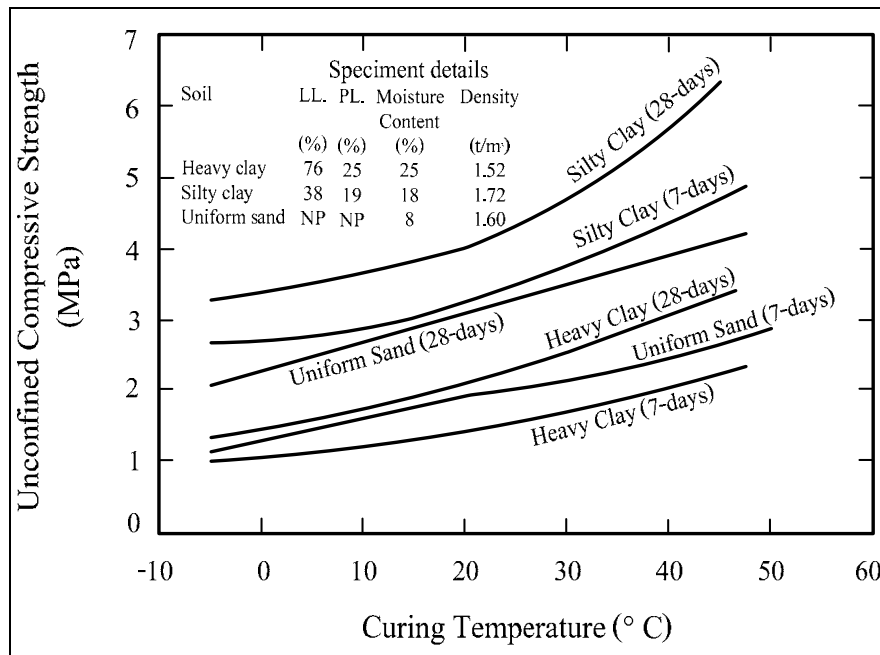
2.7.6 การบ่ม Clare and Pollard (1954) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ พบว่า งานก่อสร้างดินซีเมนต์ในระหว่างอากาศอบอุ่น จะให้กำลังอัดสูงกว่างานก่อสร้างที่มีลักษณะคล้ายกัน ในระหว่างอากาศหนาวเย็นกว่า 50 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่อายุบ่ม 3 เดือนแรก ภายหลังการก่อสร้าง

Ng (1966) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อดินลูกรัง 3 ชนิด ผสมซีเมนต์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 21 เป็น 38 องศาเซลเซียส กำลังอัดจะเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Clare and Pollard (1954) ที่พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์แปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้บ่ม โดยให้เหตุผลว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำในมวลดินผลแสดงดังในรูปที่ 2.19

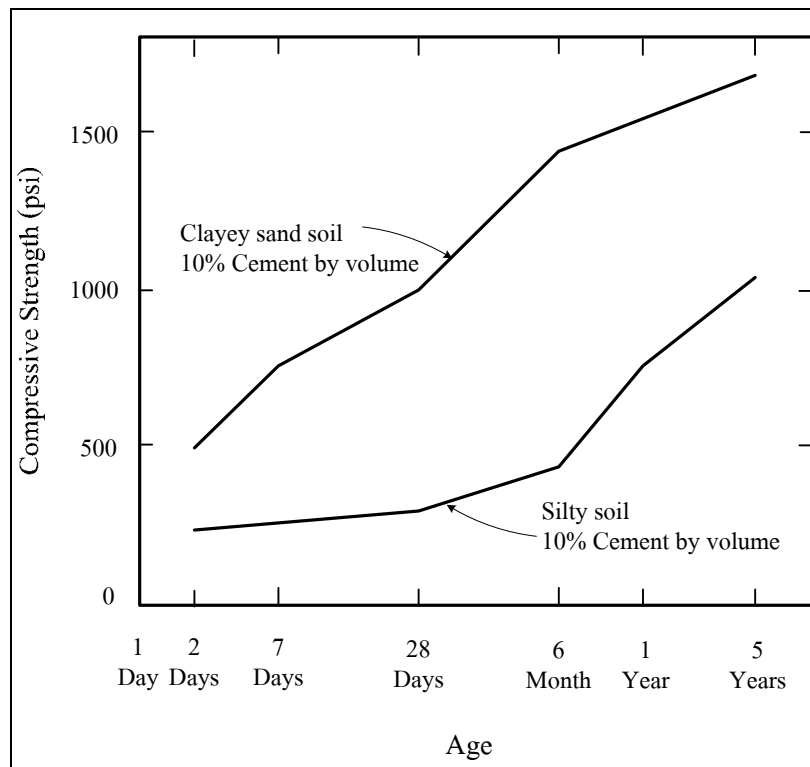
Leadabrand (1956) ได้ศึกษากำลังอัดของดิน 2 ชนิด คือ ดินเหนียวปนทราย (clayey sand) และดินตะกอน (silt) ผสมกับซีเมนต์ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุบ่มตั้งแต่ 2 วัน ถึง 5 ปี พบว่า กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุบ่มคล้ายกับคอนกรีต ผลแสดงดังในรูปที่ 2.20

Maner (1952) ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุในการบ่มดิน โดยนำวัสดุต่าง ๆ ได้แก่ Waterproof Paper, RC-2 Asphalt, Tar และ Asphalt Emulsion มาบ่มดินซีเมนต์ที่ใช้เป็นชั้นรองพื้นทางพบว่า วัสดุที่มีส่วนผสมของดินน้ำมัน (bituminous materials) ทั้ง 3 ชนิด และ Waterproof Paper มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้บ่มดินซีเมนต์





รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิที่ใช้บดดินซีเมนต์ (Clare and Pollard, 1954)

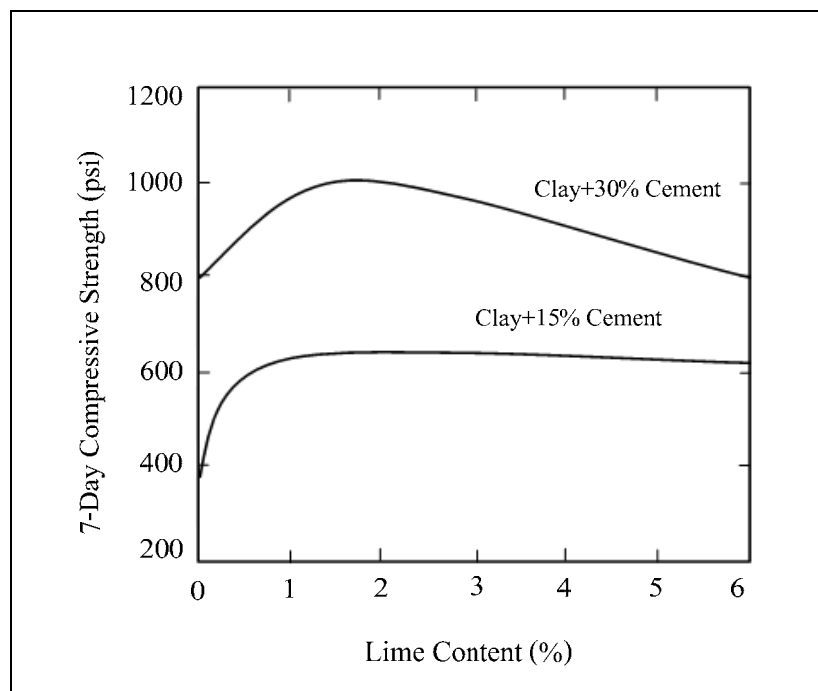


รูปที่ 2.20 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Leadabrand, 1956)

2.7.7 สารผสมร่วม Ruenkrairergsa (1982) ได้รายงานว่าจำนวนปูนขาวเพียงเล็กน้อยที่เพิ่มเข้าไปผสมในดินที่มีค่าดัชนีสภาพพลาสติกสูงก่อนที่จะผสมกับซีเมนต์จะช่วยลดค่าดัชนีสภาพพลาสติกของดินเดิมลงได้มาก และทำให้ดินผสมกับซีเมนต์ได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าปูนขาวที่เพิ่มเข้าไปจะช่วยลดอิทธิพลของสารอินทรีย์ที่จะมีผลต่อปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ได้อีกด้วย

Maclea et al. (1952) ได้นำดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวอยู่ระหว่าง 70 - 75 % และค่าดัชนีสภาพพลาสติกอยู่ระหว่าง 45 - 53 % เปรอร์เซ็นต์ มาทดลองผสมร่วมกับซีเมนต์โดยแปรผันปริมาณซีเมนต์ระหว่าง 15 - 30 % และเพิ่มปูนขาวลงไปอีก 2 % ผลแสดงในรูปที่ 2.21 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น และสามารถต้านทานการสูญเสียกำลังเมื่อแช่น้ำได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าหากผสมปูนขาวมากกว่า 2 % ผลลัพธ์อาจเปลี่ยนแปลงไปได้

Lambe et al (1959) ได้ทดลองนำสารประกอบจำพวกโซเดียม และเถ้าลอย (fly-ash) มาผสมร่วมกับดินและซีเมนต์ พบว่า การใช้สารประกอบจำพวกโซเดียมจะช่วยให้ดินซีเมนต์มีกำลังอัดและความคงทนเพิ่มขึ้น ส่วนเถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน ซึ่งจะทำการกำลังอัดของดินซีเมนต์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ เถ้าลอยยังช่วยลดปริมาณซีเมนต์ทำให้การก่อสร้างงานดินซีเมนต์มีราคาถูก



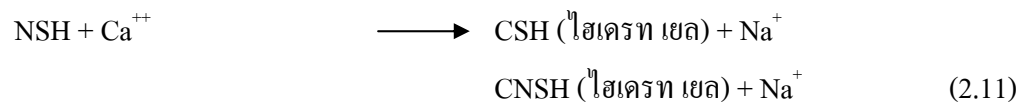
รูปที่ 2.21 อิทธิพลของปริมาณปูนขาวต่อกำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ (Maclea et al., 1952)

พินิจ ตั้งบุญเติม (2544) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของเกลือ ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่มของดินซีเมนต์ที่มีผลต่อค่า Undrained Shear Strength (Su) ค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) และค่า Atterberg's Limit โดยทำการทดสอบที่ปริมาณเกลือร้อยละ 0 - 4 ของปริมาณน้ำที่ผสม ผลการทดสอบพบว่าปริมาณเกลือที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลทำให้ค่า LL PL และ PI เปลี่ยนแปลงเห็นได้อย่างชัด แต่ปริมาณเกลือมีผลต่อค่า SL โดย SL มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกลือที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบ Undrained Shear Strength (Su), ค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกลือ ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่มของดินซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

Lambe et al (1957) ได้ศึกษาข้อมูลวัสดุผสมเพิ่มหลายชนิดที่ใช้ในการผสมเพิ่มลงไปดินซีเมนต์และพบว่าเกลือของสารโลหะที่เป็นค่าซึ่งประกอบด้วย สารโซเดียมเมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ก็จะพัฒนาปรับปรุงกำลังและความทนทานของดินซีเมนต์ได้

Lambe et al (1959) ได้แนะนำการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบพวกอัลคาไลด์ (alkali) กับพวกปูนซีเมนต์ (cement) และดินเหนียวไว้ดังนี้



เมื่อ	X	=	ประจุลบของเกลือ โซเดียมที่ใช้ผสมเพิ่ม (Cl^- , SO_4^{2-})
	NSH	=	Sodium Silicate Hydrate
	NAH	=	Sodium Aluminate Hydrate
	CSH	=	Calcium Silicate Hydrate
	CAH	=	Calcium Aluminat Hydrate

โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการเติมสารละลายเกลือ คือ จะเพิ่มอัตราและขอบเขตของการทำปฏิกิริยาของ Soil Silica กับสารผสมเพิ่มปูนซีเมนต์มากกว่ากรณีเติมปูนซีเมนต์อย่างเดียว

Moh (1962) และ Ariizumi (1977) พบว่าการเพิ่มขึ้นของเกลือในดินมีผลให้กำลังรับแรงของดินผสมซีเมนต์และปูนขาวมีกำลังสูงขึ้น แต่ในการศึกษาเป็นการผสมสารประกอบ NaCl CaCl_2 NaOH ฯลฯ เข้าไปในดินเหนียว ซึ่งไม่ใช่เกลือเดิมที่มีอยู่ในดิน Onitsuka et al. (2003) ได้ทำการศึกษถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเกลือ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเกลือลดลงมีผลให้กำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์และปูนขาวมีค่าลดลง

Modmoltin et al. (2004) ทำการศึกษาพบว่าเกลือมีผลต่อโครงสร้างดินและมีผลช่วยป้องกันการลดกำลังของดินผสมปูนขาวเนื่องจากมีอินทรีย์สารผสมอยู่

เกษม เพชรเกตุ (2544) ศึกษาผลกระทบของ NaCl ต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพฯกับซีเมนต์แบบเปียก ซึ่งสรุปได้ว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ NaCl เพิ่ม โดยจะเห็นได้ชัดเมื่อทำการบ่มดินเหนียวผสมกับซีเมนต์แบบเปียกในช่วงเดือนแรกของการทดลอง

เชิดชนินทร์ หมคมลทิน และคณะ (2548) ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของเกลือต่อดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ โดยใช้ตัวอย่างดิน 3 ชนิด คือดินเหนียวกรุงเทพฯ ดินเบนโทไนท์ และดินคาโอไลไนท์ การศึกษาทำการทดสอบ 2 วิธี วิธีที่ 1 คือทำดินเหนียวให้เป็นประจุชนิดเดียวด้วยความเข้มข้นต่าง ๆ ของโซเดียมและแคลเซียม อีกวิธีหนึ่งคือผสมดินด้วยโซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ในปริมาณต่าง ๆ จากนั้นนำตัวอย่างดินไปผสมซีเมนต์ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด จากการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดของดินเหนียวที่มีประจุชนิดเดียว ชนิดโซเดียมมีค่าสูงกว่าชนิดแคลเซียม เนื่องจากแรงยึดเกาะของดินเหนียวชนิดโซเดียมต่ำกว่า ทำให้การทำปฏิกิริยาของดินกับซีเมนต์ทำได้ดีกว่า แต่ดินเหนียวที่ผสมแคลเซียมคลอไรด์รับแรงอัดได้ดีกว่าดินผสมโซเดียมคลอไรด์ เนื่องจากสารประกอบที่ผสมเพิ่มไม่ได้ยึดเกาะกับดินเหนียว แคลเซียมให้การยึดเกาะกับซีเมนต์ได้ดีกว่าโซเดียม การเติมสารประกอบคลอไรด์เข้าไปมีผลให้มีการเร่งปฏิกิริยาเคมีมากกว่าการให้กำลังเพิ่ม นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของเกลือของดินทั้งสองวิธีมีผลทำให้กำลังของดินผสมซีเมนต์สูงขึ้นด้วย

อภิชาติ คำภาหกล้า และคณะ (2551) ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียวปนตะกอนที่ปนเปื้อนด้วยสารละลายซัลเฟต พบว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ตามธรรมชาติ และดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟต มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม จนถึงปริมาณซีเมนต์ค่าหนึ่งกำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลง ปริมาณซีเมนต์ที่ทำให้กำลังอัดแกนเดียวมีค่าสูงสุด ในปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 25% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยที่กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ตามธรรมชาติ จากการแทนที่เถ้าแกลบในดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟต พบว่าที่ปริมาณสารเชื่อมประสาน (ซีเมนต์+เถ้าแกลบ) เท่ากับ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ที่อายุบ่ม 60 วัน กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีสารละลายซัลเฟตมีค่าสูงกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สภาพธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้ดินมีกำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น แต่ต้องใช้ระยะเวลาบ่มตัวอย่างนานขึ้น

2.8 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างดิน แสดงในตารางที่ 2.9 เสนอโดย Kamon (1979) ซึ่งใช้ทำการศึกษาด้านรูปร่างของอนุภาคดิน การจัดเรียงของโครงสร้าง และขนาดของโพรง ช่องว่างโดยมีหลักการ และข้อจำกัด ในการศึกษาที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.9 เครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างดิน (Kamon, 1979)

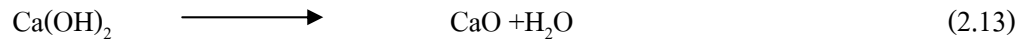
	Electro microscope		X-ray deflaction	Polarization microscope	Porosimeter	อื่นๆ
	Scanning type	Transmission type				
หลักการ	จากการสังเกตโดยใช้ Electronic line		ใช้การหัก เหืองรังสี X-ray	ใช้การสั้น เนื่องจากการ แผ่รังสี	ใช้การ แทนที่ของ ปรอท	คลื่นเสียง, การนำ ไฟฟ้า, การ นำความ ร้อน, คุณสมบัติ ของ แม่เหล็ก
พิจารณา รูปร่างของ อนุภาคดิน	สามารถทำ ได้	ขนาดอนุภาคเล็ก กว่า 5 ไมครอน	ไม่สามารถ ทำได้	พิจารณาขนาด ตะกอนของ อนุภาค เบื้องต้น	ไม่สามารถ ทำได้	ไม่สามารถ ทำได้
การสังเกต อนุภาคดิน	สามารถทำ ได้	ขนาดอนุภาคเล็ก กว่า 5 ไมครอน	ไม่สามารถ ทำได้	พิจารณาขนาด ตะกอนของ อนุภาค เบื้องต้น	ไม่สามารถ ทำได้	ไม่สามารถ ทำได้
พิจารณาการ จัดเรียงของ โครงสร้าง ดิน	สามารถทำ ได้	สามารถทำได้	สามารถทำ ได้	สามารถทำได้	ไม่สามารถ ทำได้	สามารถทำ ได้
พิจารณา โพรง ช่องว่าง	โพรงภายใน และภายนอก อนุภาคดิน	โพรงภายใน และ ภายนอกอนุภาคดิน	ไม่สามารถ ทำได้	โพรงภายนอก อนุภาคดิน	พิจารณาการ กระจายตัว ของขนาด โพรง	สามารถทำ ได้บางส่วน

2.8.1 การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เกิดจากการคิดค้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยการประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอนที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำแสงอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นก็จะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับต่อไป ผลที่ได้คือ ภาพของวัตถุหรือตัวอย่างมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า ถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า (กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาสามารถทำกำลังขยายได้เต็มที่ไม่เกิน 3,000 เท่า) และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้ โดยขึ้นอยู่กับรายละเอียดของตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร (nanometer) ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงส่องสว่างธรรมดามีกำลังแยกแยะใช้ดูวัตถุเล็กสุดเพียง 0.2 ไมครอน เท่านั้น ในกรณีที่เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุประกอบอยู่ด้วยเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนวิเคราะห์ (analytical electron microscope) โดยในการวิเคราะห์ธาตุจะเป็นการวิเคราะห์เฉพาะจุด (spot analysis) หรือพื้นที่เล็ก ๆ ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นหัววัด เรียกว่า อิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส (electron probe microanalysis, EPMA) โดยใช้การวิเคราะห์ธาตุด้วยการวัดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) ซึ่งมีทั้งแบบ Wavelength Dispersive X-ray Spectrophotometry, WDS และแบบ Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry, EDS ในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron detector, SE) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (backscatter electron detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้น ดังนั้น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้จะสามารถประกอบอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ได้ทั้งแบบ EDS และ WDS เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ โดยอาศัยหลักการแยกรังสีตามลำดับพลังงาน

2.8.2 การวิเคราะห์ Thermal Gravimetry Analysis, TGA

เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และวิศวะ จักรไพศาล (2542) ได้นำเสนอหลักการหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ โดยใช้วิธี Thermal Gravimetry Analysis พิจารณาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาในอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปที่อุณหภูมิระหว่าง 100 - 400 องศาเซลเซียสปริมาณน้ำที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ซึ่งประกอบด้วย ให้น้ำ น้ำในช่องว่าง น้ำดูดซึม และ น้ำระหว่างชั้นจะระเหยออกไป แต่เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น สารประกอบในซีเมนต์เพสต์จะสลายตัวเป็นสารประกอบอื่น ที่มีมวลโมเลกุลต่ำลงหรือเป็นธาตุ กล่าวคือ เมื่อซีเมนต์ เพสต์ ถูกเผาที่อุณหภูมิ 400 - 600 องศาเซลเซียส สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะสลายตัว (Decomposition) เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ (2.13)



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

2.8.3 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก

เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และวิศว จักรไพศาล (2542) ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมและปริมาณ Ca(OH)_2 จะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสม จากการศึกษาพบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสม คือลดลงปริมาณ 10 % ทุก ๆ 10 ของเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยที่ใช้แทนที่ซีเมนต์ การหาปริมาณ Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยที่วัดโดยวิธี TGA เป็นปริมาณที่รวมผลจากปฏิกิริยาไฮเดชัน และส่วนที่ลดลงจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกเรียกว่า “ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่วัดได้” การที่จะแยกแยะปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดชันออกจากปริมาณ Ca(OH)_2 ของปฏิกิริยาปอซโซลานิก อาจทำได้จากการทดสอบเปรียบเทียบซีเมนต์เพสต์ธรรมดา กับซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ซึ่งเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้ปริมาณ Ca(OH)_2 ลดลง เรียกว่า “ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป” สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.14)

$$P = H \times (1 - R / 100) - F \quad (2.14)$$

เมื่อ P = เปอร์เซ็นต์ Calcium Hydroxide ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

R = เปอร์เซ็นต์ของซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยน้ำหนัก

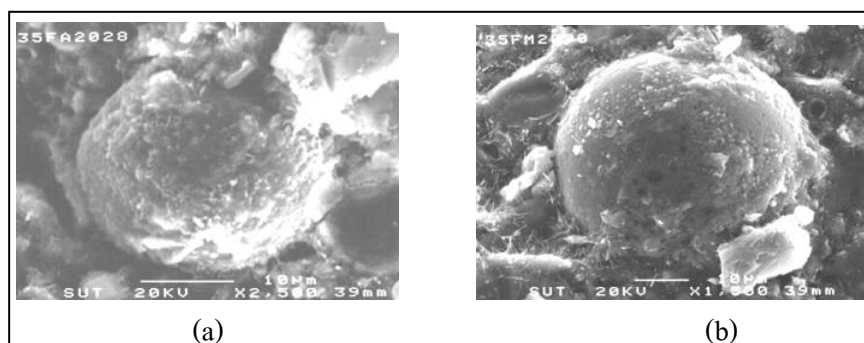
H = เปอร์เซ็นต์ Calcium Hydroxide จากซีเมนต์เพสต์

F = เปอร์เซ็นต์ Calcium Hydroxide จากเพสต์ของเถ้าลอย

2.9 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

Delage and Lefebver (1984) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของ Champlian clay โดยใช้เครื่อง Mercury Intyusion Porosimeter และ Scanning Electron Microscope ทำให้ทราบถึงขบวนการของการบดอัดดิน ได้ทำการแบ่งระดับการอัดปรอทออกเป็น 2 ระดับคือ ในครั้งแรกทำการอัดปรอทโดยให้ปรอทกระจายไปทั่วโพรง จึงทำการลดแรงดันทำให้ปรอทยังคงค้างอยู่ในตัวอย่าง หลังจากนั้นทำการอัดปรอทเป็นครั้งที่สอง โดยอัดให้ปรอทกระจายเต็มโพรงตัวอย่างอย่างไม่จำกัด ความแตกต่างของการอัดปรอททั้ง 2 ระดับจะทำให้มีปริมาณปรอทที่แตกต่างกัน ผลจากการศึกษาสรุปได้ว่าคุณสมบัติโครงสร้างมวลดินของดินเหนียวถูกกำหนดโดยมวลรวมที่อยู่ภายในก้อนดิน (intra-aggregate) และมวลรวมที่อยู่ระหว่างก้อนดิน (inter-aggregate) ซึ่งมวลรวมจะถูกทำลายได้โดยการแปรสภาพทางกลศาสตร์ และอัตราของโพรงทั้งสองจะไม่ถูกทำลายแม้อยู่ในสภาวะที่ถูกรบกวนโพรงที่ไม่จำกัดจะถูกหมายถึงโพรงภายในก้อนดิน (intra-aggregate) ในขบวนการอัดตัวคายน้ำแรงดันประสิทธิผลจะเกิดจากโพรงขนาดใหญ่ และโพรงขนาดเล็กภายในก้อนจะไม่มีการอัดตัวและเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม สำหรับการอัดตัวคายน้ำที่เพิ่มขึ้นดัชนีการอัดตัวสัมพันธ์กับโพรงขนาดใหญ่

Chindapasirt et.al. (2005) ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียดของเถ้าถ่านหินต่อปฏิกิริยาปอซโซลานเพสท์ ที่อายุบ่ม 7 28 และ 90 วัน อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์เท่ากับ 80:20 และ 60:40 ด้วยเครื่อง SEM พบว่าเถ้าลอยเกิดรูพรุน และช่องว่างจำนวนมาก และสามารถเห็นผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ชั้นเกาะอยู่บริเวณผิวของเถ้าลอย รูพรุนเกิดจากการถูกกัดกร่อนเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และพบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นหลังจากมีอายุบ่มมากกว่า 7 วัน ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 อนุภาคเถ้าลอยหยาบ (a) อายุบ่ม 28 วัน, (b) อายุบ่ม 90 วัน

(Chindapasirt et al, 2005)

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และคณะ (2549) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าลอยด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimeter พบว่าการผสมวัสดุเชื่อมประสานช่วยปรับปรุงโครงสร้างดินโดยเพิ่มพันธะเชื่อมประสาน และทำให้แฟบริกแน่นขึ้น ช่องว่างภายในดินซีเมนต์เถ้าลอยประกอบด้วยช่องว่างอากาศ (ขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน) ช่องว่างระหว่างก้อนดินซีเมนต์เถ้าลอย (ขนาดระหว่าง 10 - 0.01 ไมครอน) และช่องว่างภายในก้อนดินซีเมนต์เถ้าลอย (ขนาดเล็กกว่า 0.01 ไมครอน)

2.10 บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

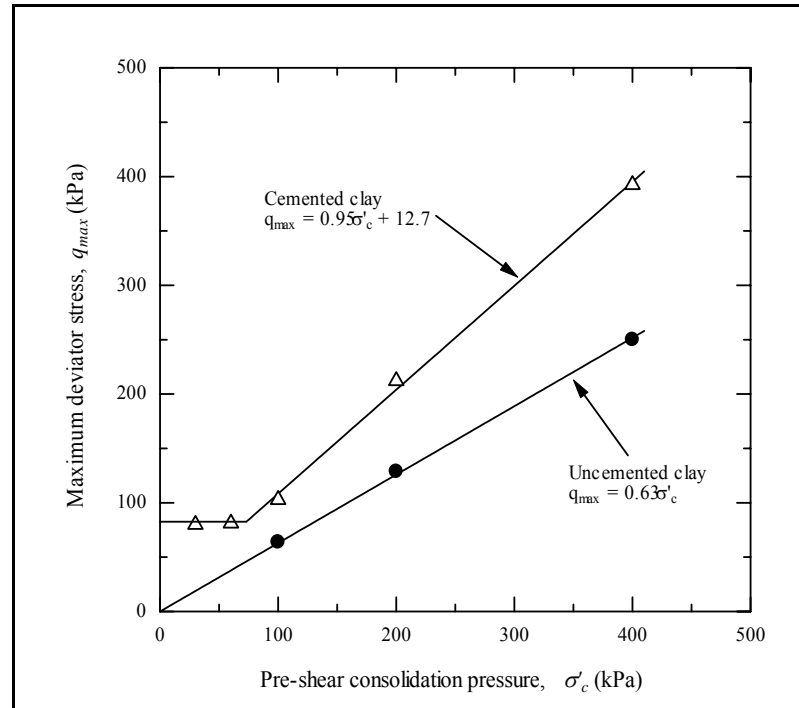
Horpibulsuk et al. (2004) กล่าวว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์ จะขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (fabric) และพันธะเชื่อมประสาน เมื่อเนื้อดินประเภทนี้ภายใต้สภาวะที่ความเค้นประสิทธิผลน้อยกว่าความเค้นครากประสิทธิผล (σ'_y) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของเม็ดดินน้อยมาก ในช่วงนี้ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับพันธะเชื่อมประสาน (cementation bond) แต่เมื่อความเค้นประสิทธิผลมากกว่าความเค้นครากประสิทธิผล ทั้งการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (fabric) และพันธะเชื่อมประสานจะมีอิทธิพลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือน (รูปที่ 2.23) และเสนอความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$q_{\max} = q_{\text{bond}} + q_{\text{fabric}} \quad (2.15)$$

q_{\max} คือ ความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด (ที่จุดวิบัติ)

q_{bond} คือ ความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน

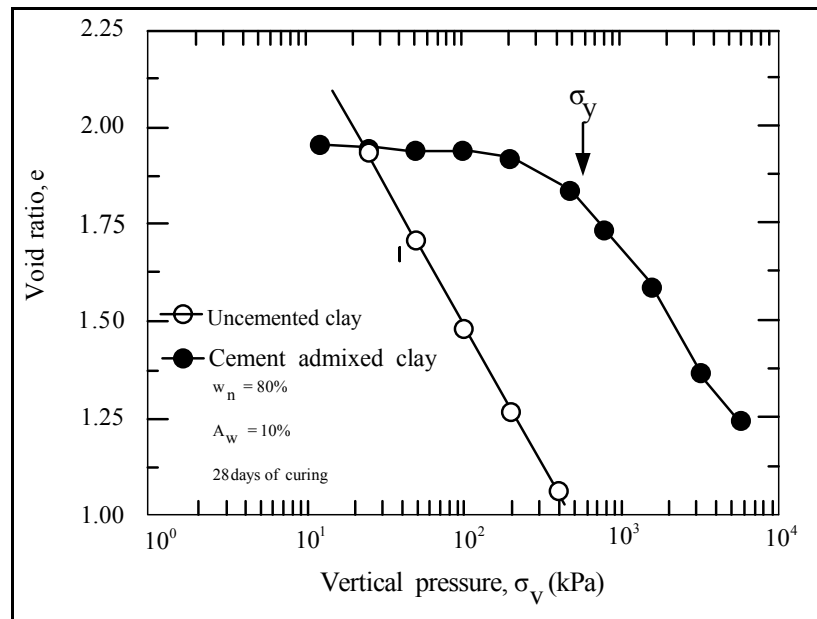
q_{fabric} คือ ความเค้นเบี่ยงเบนเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (fabric)



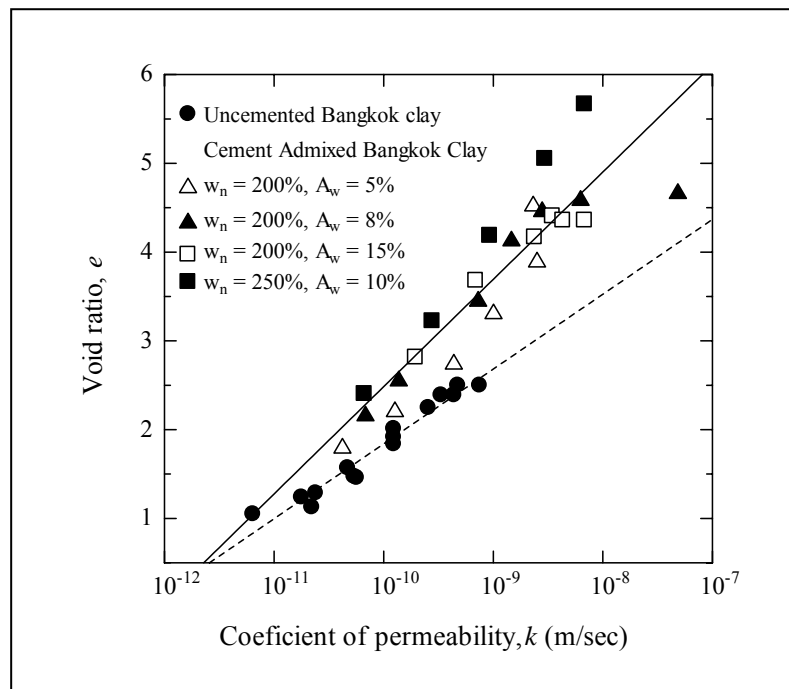
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล (Horpibulsuk et al., 2004)

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน (2546) แสดงผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.24 จากรูปเห็นว่า การอัดตัวคายน้ำมีค่าน้อยมากในช่วงก่อนจุดคราก (yield stress) เป็นเพราะอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน แต่การอัดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงหลังจุดคราก ซึ่งสภาวะหลังจุดครากนี้ ดัชนีการอัดตัว (compression index) มีค่าค่อนข้างคงที่กับการเพิ่มขึ้นของความเค้นในแนวตั้ง นอกจากนี้ ดินเหนียวซีเมนต์ (ดินพันธะเชื่อมประสาน) สามารถที่จะเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงสูง ๆ เมื่อเทียบกับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน (2546) แสดงผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.25 จะเห็นได้ว่า พันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวอย่างมาก ที่อัตราส่วนโพรงที่เท่ากัน ดินเหนียวซีเมนต์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่า ดังนั้น พันธะเชื่อมประสานนอกจากจะเป็นการเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือน และลดการทรุดตัวแล้ว ยังเป็นการลดการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับงานโครงสร้างที่บิบน้ำ เช่น งานซ่อมแซมเขื่อนที่แตกร้าว และ Cut - off wall เป็นต้น



รูปที่ 2.24 การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพไร้พันธะเชื่อมประสาน (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2546)



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราโพรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวซีเมนต์ (สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2546)

ในงานคอนกรีตการนำเถ้าลอยมาทดแทนปริมาณซีเมนต์ได้มีการศึกษาพบว่าคอนกรีตจะมีความทึบแน่นเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากรูปร่างของเถ้าลอยมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีขนาดเล็กกว่าซีเมนต์ จึงเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ และยังช่วยทำให้คอนกรีตง่ายต่อการเท การทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยเมื่อนำไปผสมในคอนกรีตจะมีลักษณะคล้ายกับ การทำปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ซึ่งต้องอาศัยแร่ดินเหนียวในการทำปฏิกิริยาอันดับที่สอง โดยที่ Silica และ Alumina ซึ่งเป็นธาตุหลักที่มีอยู่ในเถ้าลอยจะเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซโลนิกกับสารประกอบ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดสารประกอบ CSH และ CAH ที่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน ซึ่งการทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในงานดินจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาอันดับที่สองเกิดเพิ่มมากขึ้นโดยไม่ต้องอาศัย Silica และ Alumina จากแร่ดินเหนียวแต่เพียงอย่างเดียว การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินจะช่วยให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงภายในมวลดินที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยโดยเฉพาะกำลังอัด โดยที่การศึกษาโครงสร้างจุลภาคมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะให้คำตอบเพื่ออธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่แตกต่างกันออกไป Scanning electron microscope เป็นการอธิบายเชิงคุณภาพถึงการเปลี่ยนแปลงภายในมวลดินโดยการสังเกตจากภาพถ่าย Thermalgravimetry analysis เป็นการอธิบายเชิงปริมาณถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ Silica และ Alumina กับสารประกอบ $(\text{Ca})\text{OH}_2$ ที่ทำปฏิกิริยาปอซโซโลนิกต่อกันซึ่งได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ผสมเถ้าคือ ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และอายุบ่ม ซึ่งตัวแปรดังกล่าว จะได้นำไปพิจารณากำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในงานวิจัยครั้งนี้

2.11 สมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของตัวแปรควบคุม

Horpibulsuk et al. (2003) ได้นำเสนอสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มใด ๆ โดยอาศัยเพียงแค่ผลการทดสอบเดี่ยวที่อายุบ่ม 28 วัน ดังสมการที่ (2.16)

$$\left(\frac{q_{(w_c/C)1,D}}{q_{(w_c/C),28}} \right) = 1.24 \left\{ (w_c/C)_{,28} - (w_c/C)_{1,D} \right\} (0.038 + 0.0281 \ln D) \quad (2.16)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)1,D}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบที่ $(w_c/C)_1$ หลังจากระยะเวลาบ่ม D วัน และ $q_{(w_c/C),28}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันที่ w_c/C สมการที่ (2.16)

นี้เป็นสมการสากลที่สามารถใช้ได้กับดินทุกชนิดเนื่องจากว่าผลของชนิดของดินได้ถูกแสดงในรูปของอัตราส่วนของกำลังอัดแกนเดียว

จากสมการที่ (2.16) ผู้วิจัยคาดว่าสามารถประยุกต์ใช้กับดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอย โดยเรียกส่วนผสมระหว่างซีเมนต์และเถ้าลอยว่าวัสดุเชื่อมประสาน (binder) ดังนั้น สมการที่ (2.16) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\left(\frac{q_{(w_c/C_e)_{1,D}}}{q_{(w_c/C_e)_{28}}} \right) = 1.24 \left\{ (w_c/C_e)_{28} - (w_c/C_e)_{1,D} \right\} (0.038 + 0.0281 \ln D) \quad (2.17)$$

เมื่อ C_e คือปริมาณซีเมนต์เทียบเท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$C_e = C + ka \quad (2.18)$$

เมื่อ k คือ ตัวแปรประสิทธิภาพ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม และ a ปริมาณเถ้าลอย (%)

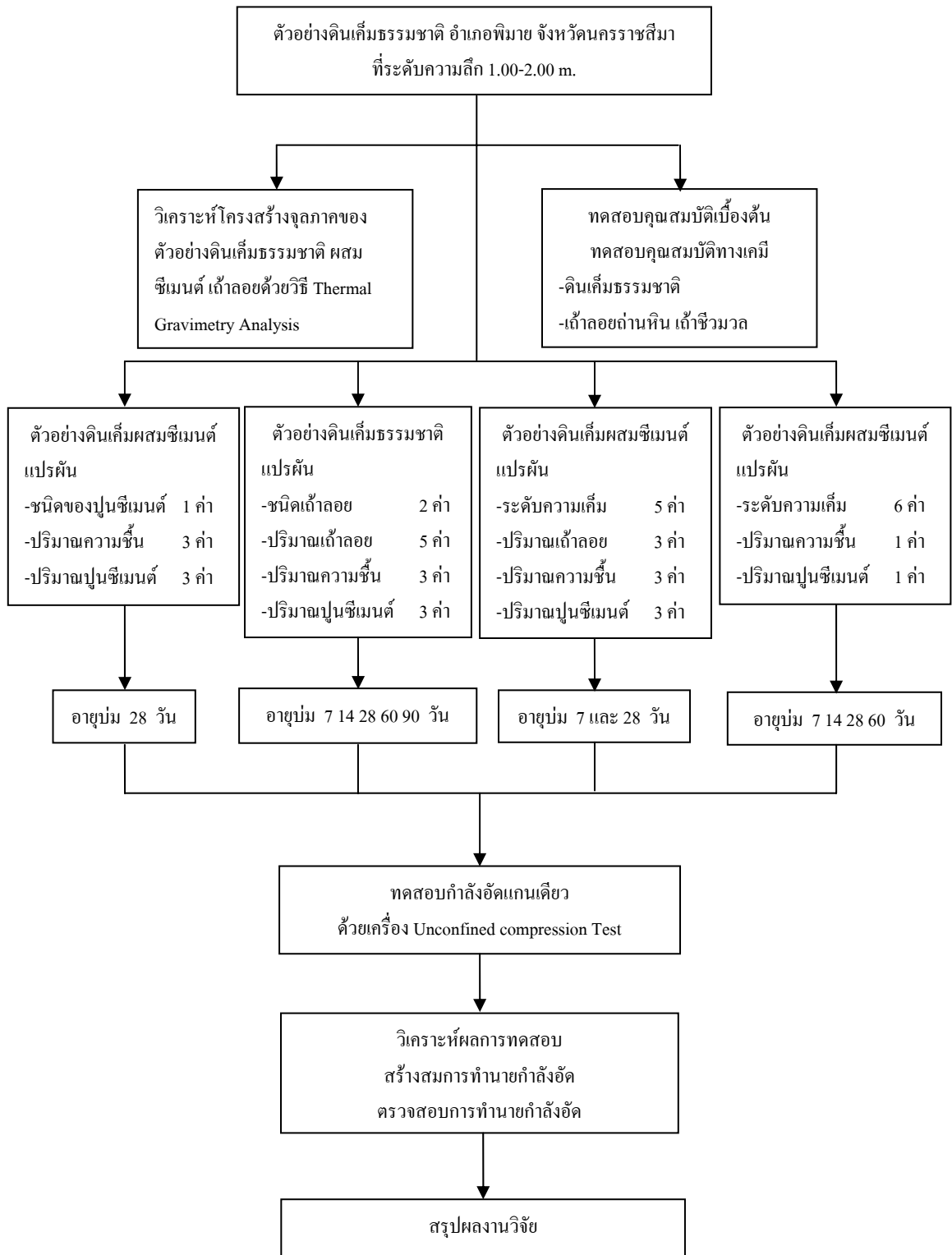
จากสมการข้างต้น ถ้าเราทราบความสัมพันธ์ระหว่าง k ในพจน์ของอัตราส่วนการแทนที่ และชนิดของดิน เราสามารถทำนายกำลังอัดของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอยได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการประยุกต์การใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยเพื่อศึกษากำลังอัดของดินเค็ม ดินตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เก็บในบริเวณ ตำบลท่าหลวง อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา และใช้เถ้าลอย 2 ชนิด คือ เถ้าลอยถ่านหิน จากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และเถ้าชีวมวลจากบริษัทไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงการพัฒนากำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย ในพจน์ของอัตราส่วน ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย ปริมาณความชื้น และอายุบ่ม นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาศึกษาอิทธิพลของระดับความเค็มที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและกำลังอัดแกนเดี่ยวพร้อมทั้งเปรียบเทียบกำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์ วิธีการทดสอบและจำนวนตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3.1 แผนงานวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 3.1 รายละเอียดแต่ละขั้นตอน ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง

การทดสอบ	จำนวนตัวอย่าง
คุณสมบัติพื้นฐาน	ตัวอย่างดินเค็มธรรมชาติ เก็บแบบแปรสภาพจากอำเภอพิมายนครราชสีมา, ตัวอย่างดินผสมเกลือสินเธาว์ ร้อยละ 3 5 10 และ 15 ของน้ำหนักดินแห้ง, เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล
การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มธรรมชาติผสมซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน (ปริมาณความชื้น 3 ค่า \times ปูนซีเมนต์ 3 ค่า \times ปริมาณเถ้าลอย 5 ค่า \times 5 อายุบ่ม (3 ก่อนตัวอย่าง))	จำนวน 675 ชุดตัวอย่าง
การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มธรรมชาติผสมเถ้าชีวมวล (ปริมาณความชื้น 3 ค่า \times ปูนซีเมนต์ 3 ค่า \times ปริมาณเถ้าลอย 5 ค่า \times 5 อายุบ่ม (3 ก่อนตัวอย่าง))	จำนวน 675 ชุดตัวอย่าง
การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินที่ถูกกลดและเพิ่มระดับความเค็มผสมซีเมนต์ (ปริมาณเกลือ 6 ค่า \times ปริมาณความชื้น 1 ค่า \times ปูนซีเมนต์ 1 ค่า \times 4 อายุบ่ม (3 ก่อนตัวอย่าง))	จำนวน 72 ชุดตัวอย่าง
การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินที่ถูกกลดและเพิ่มระดับความเค็มผสมซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน (ปริมาณเกลือ 5 ค่า \times ปริมาณความชื้น 3 ค่า \times ปูนซีเมนต์ 3 ค่า \times ปริมาณเถ้าลอย 3 ค่า \times 2 อายุบ่ม (3 ก่อนตัวอย่าง))	จำนวน 810 ชุดตัวอย่าง
การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน ที่ w_c/C เท่ากัน (ปริมาณความชื้น 3 ค่า \times ปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้ค่า w_c/C 3 ค่า \times ชนิดของปูนซีเมนต์ 1 ค่า \times 1 อายุบ่ม (3 ก่อนตัวอย่าง))	จำนวน 27 ชุดตัวอย่าง

3.2 การเก็บและการเตรียมดินตัวอย่าง

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างดิน ดินตัวอย่างเป็นดินเหนียว เก็บแบบแปรสภาพจากตำบลท่าหลวง อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่ความลึก 1.00 - 2.00 เมตร

3.2.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดินเคมีธรรมชาติ (basic property) ดินตัวอย่างจะถูกนำมาหาคุณสมบัติเบื้องต้น ในห้องปฏิบัติการดังต่อไปนี้

1) ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) การหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กลงกว่า 475 มิลลิเมตร) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 854

2) การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงร่อน (sieve analysis) ทดสอบโดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบล้างตามมาตรฐานของ ASTM D 422

3) การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 422-63

4) การหาขีดจำกัดเหลว (liquid limit, LL) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4318

5) การหาขีดจำกัดพลาสติก (plastic limit, PL) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4318

6) การทดสอบหาอัตราการบวมตัวอิสระ (free swell ratio, FSR) ทดสอบตามวิธีของ Prakash and Sridharan (2004)

3.2.3 คุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างดินเคมีธรรมชาติ (chemical property) ดินตัวอย่างจะถูกนำมาหาคุณสมบัติเบื้องต้นทางเคมี ตามวิธีและมาตรฐานการวิเคราะห์ของกรมพัฒนาที่ดิน มีดังต่อไปนี้

1) การทดสอบหาค่าการนำไฟฟ้าของดินเค็ม (electrical conductivity, EC)

2) การทดสอบหาค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)

3) การทดสอบหาค่าประจุบวก Na Ca Mg และ K

4) การทดสอบหาค่าประจุลบ Chloride และ Sulphate

5) การทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์โซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable sodium percentage, %ESP)

6) การทดสอบหาการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน (cation exchange capacity, CEC)

3.3 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรีข้าง ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมคิดเป็นร้อยละ 10 20 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้ง

3.4 ถ้ำลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล

ในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้ถ้ำลอย 2 ชนิด คือ ถ้ำลอยถ่านหิน และถ้ำชีวมวล ถ้ำลอยถ่านหินที่ใช้นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ถ้ำชีวมวลนำมาจากบริษัทไทยพาวเวอร์โอเปอเรตจำกัด จังหวัดฉะเชิงเทรา ในการศึกษานี้ถ้ำทั้งสองถูกร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ทำการวิเคราะห์การกระจายของอนุภาค (particle size distribution) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (laser particle size analyzer) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (laser particle size analyzer)

3.5 การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ถ้ำลอย

ตัวอย่างดินเค็มที่ใช้ในงานวิจัยจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.5.1 ตัวอย่างดินเค็มธรรมชาติ

1) ดินตัวอย่างถูกร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อแยกเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ออก และทำการปรับปริมาณความชื้นในดินให้มีค่า 1.0 1.5 และ 2.0 เท่าของ Liquidity index (LI) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมเท่ากับร้อยละ 10 20 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้ง ถ้ำลอยทั้งสอง ผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0 10 15 20 และ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ดินตัวอย่างถูกนำมาผสม

กับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยตามอัตราส่วนจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นบรรจุตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร โดยมีดินตัวอย่าง 3 ตัวอย่างในหนึ่งส่วนผสม หลังจากนั้นอีก 24 ถึง 48 ชั่วโมง ทำการถอดตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยออกจากแบบหล่อและห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหาร บ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิ (25 ± 2 °C) เป็นเวลา 7 14 28 60 และ 90 วัน เมื่อครบอายุบ่มนำไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทันทีและทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

2) ดินเต็มตัวอย่างถูกร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยให้มีอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อซีเมนต์เท่ากับ 3 5 และ 10 และแปรผันค่าดัชนีสภาพความเหลว (liquidity index, LI) ของดิน ในแต่ละอัตราส่วนน้ำในดินต่อซีเมนต์ 3 ค่า (1.0 1.5 และ 2.0) โดยทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน เมื่อครบอายุบ่มนำไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทันทีและทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.5.2 ตัวอย่างดินที่ถูกลดและเพิ่มระดับความเค็ม

ตัวอย่างดินเค็มธรรมชาติถูกร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ตัวอย่างดินถูกนำมาเพิ่มและลดระดับความเค็ม วิธีการลดทำได้โดยการนำตัวอย่างดินเค็มมาแช่น้ำและปล่อยให้ น้ำไหลซึมออกไปจากดินช้า ๆ ส่วนการเพิ่มระดับความเค็มทำได้โดยการนำเกลือสินเธาว์ซึ่งเป็นเกลือธรรมชาติที่ได้จากการทำนาเกลือ มาเพิ่มเข้าในตัวอย่างดินในอัตราส่วนร้อยละ 3 5 10 และ 15 ของน้ำหนักดินแห้ง

1) ตัวอย่างดินเค็มธรรมชาติถูกร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ถูกนำมาลดและเพิ่มระดับความเค็ม แล้วทำการทดสอบหาขีดจำกัดเหลว (ASTM D 4318) ขีดจำกัดพลาสติก (ASTM D 4318)

2) ตัวอย่างดินเค็มธรรมชาติถูกร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตรถูกนำมาลดและเพิ่มระดับความเค็ม ทำการปรับปริมาณความชื้นในดินเท่ากับ 53% (1.5 เท่าของ liquidity index ของตัวอย่างดินเค็มธรรมชาติ) ผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ของน้ำหนักดินแห้ง ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นบรรจุตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร โดยมีดินตัวอย่าง 3 ตัวอย่างในหนึ่งส่วนผสม หลังจากนั้นอีก 24 ถึง 48 ชั่วโมง ทำการถอดตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยออกจากแบบหล่อและห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหาร บ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิ (25 ± 2 °C) ที่อายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน เมื่อครบอายุบ่มนำไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทันทีและทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3) ตัวอย่างดินเค็มธรรมชาติถูกร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตรถูกนำมาลดและเพิ่มระดับความเค็ม ทำการปรับปริมาณความชื้นในดินให้มีค่า 1.0 1.5 และ 2.0 เท่าของ liquidity index (LI) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมเท่ากับร้อยละ 10 20 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้ง เถ้าลอยที่ใช้คือ เถ้าลอยถ่านหิน ผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0 15 และ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นบรรจุตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร โดยมีดินตัวอย่าง 3 ตัวอย่างในหนึ่งส่วนผสม หลังจากนั้นอีก 24 ถึง 48 ชั่วโมง ทำการถอดตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยออกจากแบบหล่อและห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหาร บ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิ (25 ± 2 °C) เป็นเวลา 7 และ 28 วัน เมื่อครบอายุบ่มนำไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยวทันทีและทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.6 การทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว

เมื่อได้ดินซีเมนต์เถ้าตามอายุบ่มที่ต้องการ นำตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.6.1 นำตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยออกจากฟิล์มพลาสติก ทำการชั่งน้ำหนัก วัดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางให้ละเอียด 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้ Venires calipers

3.6.2 นำตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว โดยใช้อัตราการกดร้อยละ 1.0 ของความสูงของดินตัวอย่างแล้วบันทึกผลการทดสอบในรูปความเค้นและความเครียดของดิน

3.7 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ความถูกต้องของสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยตรวจสอบโดยเปรียบเทียบกับผลทดสอบสองชุดได้แก่ ดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล (ข้อมูลของผู้วิจัย) ชีดจำกัดเหลวและชีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 43 และ 24 ตามลำดับ จัดเป็นดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกต่ำ (CL) ตามระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ ปริมาณเถ้าชีวมวลที่ใช้เท่ากับร้อยละ 15 และ 20 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล (ข้อมูลจาก อภิชาติ สุคติพงษ์, 2552) ชีดจำกัดเหลวและชีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 89 และ 30 ตามลำดับ จัดเป็นดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกสูง (CH) ตามระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ ดินตัวอย่างประกอบด้วยทราย ดินตะกอน และดินเหนียวในปริมาณร้อยละ 3 27 และ 70 ตามลำดับ ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 10 15 20 และ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

3.8 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาด้านโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอย ดำเนินหลังจากการทดสอบกำลังอัด แกนเดียวแล้วเสร็จ เก็บตัวอย่างดินที่วิบัติส่วนกลางไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยวิเคราะห์ผลของโครงสร้างจุลภาคจะมีการทดสอบสองการทดสอบ ได้แก่ Thermal gravimetry analysis และการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning electron microscope

3.8.1 การทดสอบ Thermal Gravimetry Analysis ปริมาณของ Calcium Hydroxide (Ca(OH)_2) ของดินซีเมนต์หาได้จากการทดสอบ Thermal gravimetry analysis เลือกใช้ดินซีเมนต์ที่มีค่าปริมาณความชื้นในดินเท่ากับ 1.5 (52.5 %) ปริมาณซีเมนต์แตกต่างกันสามค่าคือร้อยละ 10 20 และ 30 ของน้ำหนักดิน และปริมาณเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 0 10 และ 25 ของปริมาณปูนซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน

3.8.2 การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope, (SEM) ถ่ายภาพตัวอย่างดินเค็ม เถ้าลอยถ่านหิน เถ้าชีวมวล ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

บทที่ 4

ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมกำลังอัด (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย ระดับความเค็ม และอายุบ่ม) ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มธรรมชาติผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย และนำเสนอสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อใช้ในการประมาณกำลังอัดโดยแปรผันตัวแปรควบคุม โดยอาศัยเพียงผลทดสอบที่ 28 วัน ท้ายสุดจะอธิบายการพัฒนากำลังอัดด้วยผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวลที่ใช้ในการศึกษา

ดินตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียว เก็บจากอำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่ความลึก 1.00 ถึง 2.00 เมตร ชีดจำกัดเหลวและชีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 43 และ 24 ตามลำดับ ดินตัวอย่างประกอบด้วยทราย ดินตะกอน และดินเหนียวในปริมาณร้อยละ 17 45 และ 38 ตามลำดับ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 ดินประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีพลาสติกต่ำ (CL) ตามระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ ดินนี้มีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเท่ากับ 26 dS/m. และจัดได้ว่าเป็นดินเค็มจัด (ตารางที่ 4.1) ร้อยละของเกลือที่ละลายทั้งหมดในดินเท่ากับ 60 ร้อยละของโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable sodium percentage, ESP) และอัตราการดูดซับโซเดียม (sodium absorption ratio, SAR) มีค่าเท่ากับ 94.8 และ 3.3 ตามลำดับ ด้วยค่า ESP ที่สูงนี้ดินทดสอบจัดเป็นดินเหนียวกระจายตัว คุณสมบัติทางเคมีของดินเหนียว แสดงดังตารางที่ 4.2 ดินทดสอบมีค่า Free swell ratio เท่ากับ 1.3 ซึ่งจัดเป็นดินบวมตัวต่ำการจำแนกของ Prakash and Sridharan (2004) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง เถ้าลอยถ่านหินได้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และเถ้าชีวมวลได้จากบริษัทไทยพาวเวอร์โอเพอร์เลต จำกัด จังหวัดฉะเชิงเทรา ขนาดผลของดินเหนียว เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวลที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analysis แสดงดังรูปที่ 4.1

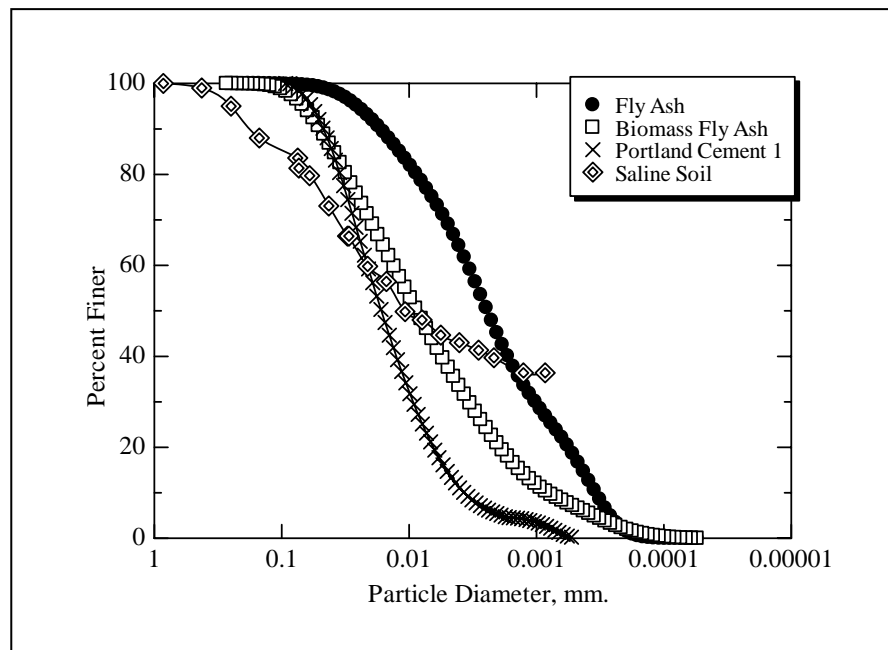
ตารางที่ 4.1 ระดับความเค็มของดินและอิทธิพลต่อพืช (US Soil Salinity Laboratory Staff, 1954)

EC (dS/m.)	ปริมาณเกลือ (%)	ระดับความเค็ม	อิทธิพลต่อพืช
<2	<0.1	ไม่เค็ม	ไม่กระทบกระเทือนต่อพืช
2-4	0.1-0.2	เค็มเล็กน้อย	พืชที่ไวต่อความเค็มการเจริญเติบโตลดลงบ้าง
4-8	0.2-0.4	เค็มปานกลาง	จำกัดการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด
8-16	0.4-0.8	เค็มมาก	พืชทนเค็มเท่านั้นที่เจริญเติบโตได้ดี
>16	>0.8	เค็มจัด	พืชทนเค็มบางชนิดเท่านั้นที่เจริญเติบโตได้ดี

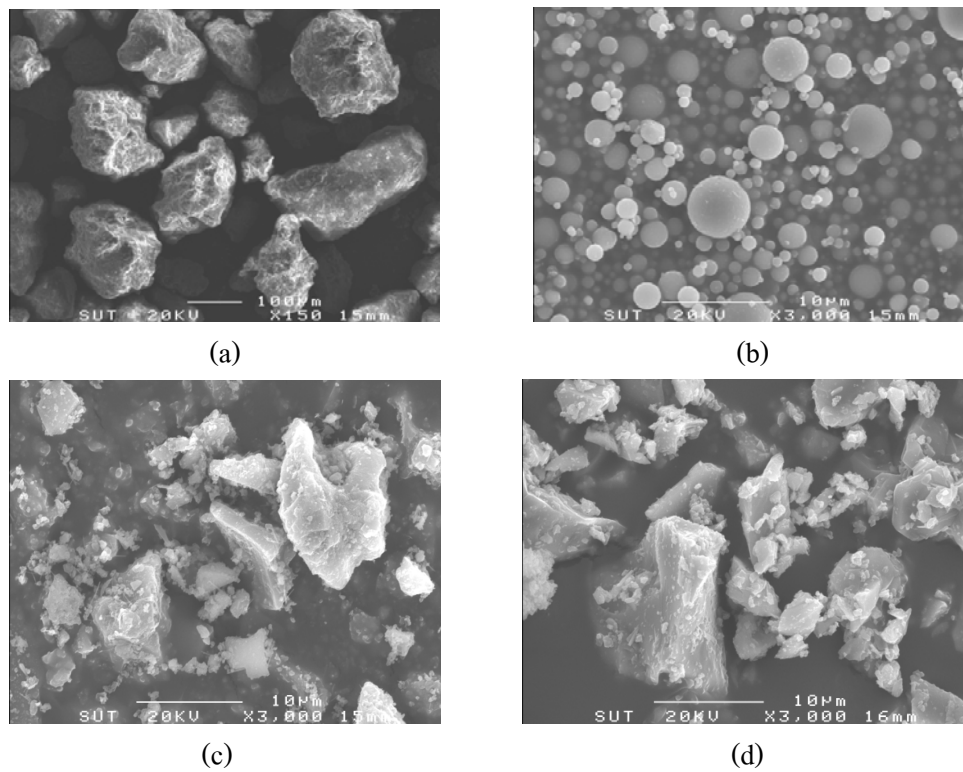
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางเคมีของดินตัวอย่าง

คุณสมบัติทางเคมี	CL
1. Electrical conductivity (dS/m.)	26.00
2. pH	5.3
3. Na (ppm)	3,700
4. Ca (ppm)	2,194
5. Mg (ppm)	259.8
6. K (ppm)	101.1
7. Chloride (ppm)	11,600
8. Sulphate (ppm)	400
9. Sulphur (ppm)	19.58
10. Sodium Percentage	60
11. Sodium Absorption Ratio (SAR) meq/l	3.34
12. CEC (NH ₄ OAC) (me/100g)	16.974
13. Exchangeable Sodium Percentage (%ESP)	94.819

***ทดสอบโดย กรมพัฒนาที่ดิน เขต 5 จังหวัดขอนแก่น และ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวล



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า (a) ดินตัวอย่าง (b) เถ้าลอยถ่านหิน (c) เถ้าชีวมวล

(d) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายกำลังขยาย (scanning electron microscope, SEM) ของดินเค็ม etailoyถ่านหิน etailoyชีวมวล และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเห็นได้ว่าดินมีลักษณะเป็นแผ่นอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน ส่วนetailoyถ่านหินมีลักษณะเป็นเม็ดกลมผิวเรียบและมีขนาดแตกต่างกัน etailoyชีวมวลมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมคล้ายกับetailoyชีวมวล

4.3 อิทธิพลของความเค็มต่อคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

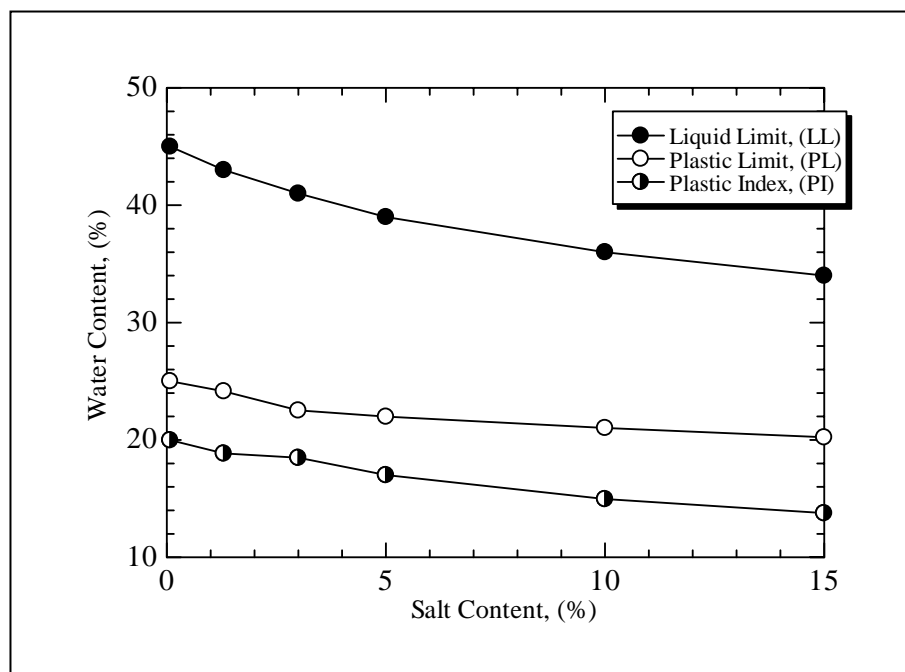
รูปที่ 4.3 แสดงถึงอิทธิพลของความเค็มที่มีผลต่อค่าพิกัดแอดเตอร์เบิร์ก (atterberg's limit) โดยผู้วิจัยได้นำตัวอย่างดินเค็มตามธรรมชาติ ($EC = 26 \text{ dS/m}$. หรือประมาณร้อยละ 1.3 ของปริมาณดิน) มาลดและเพิ่มระดับความเค็ม วิธีการลดทำโดยการนำตัวอย่างดินเค็มมาแช่น้ำและปล่อยให้ น้ำไหลซึมออกไปจากดินช้า ๆ ซึ่งน้ำจะนำพาความเค็มออกไปจนเหลือระดับความเค็มอยู่ที่ $EC = 1.5 \text{ dS/m}$. (หรือประมาณร้อยละ 0.075) ส่วนการเพิ่มปริมาณเกลือ ผู้วิจัยได้นำเกลือสินเธาว์ ซึ่งเป็นเกลือธรรมชาติที่ได้จากการทำนาเกลือ มาเพิ่มเข้าไปในตัวอย่างดินในอัตราส่วนร้อยละ 3 5 10 และ 15 ผลการทดสอบสรุปได้ว่าขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก และดัชนีสภาพพลาสติกมีค่าลดลง ตามระดับความเค็มที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแอดเตอร์เบิร์ก ลิมิต

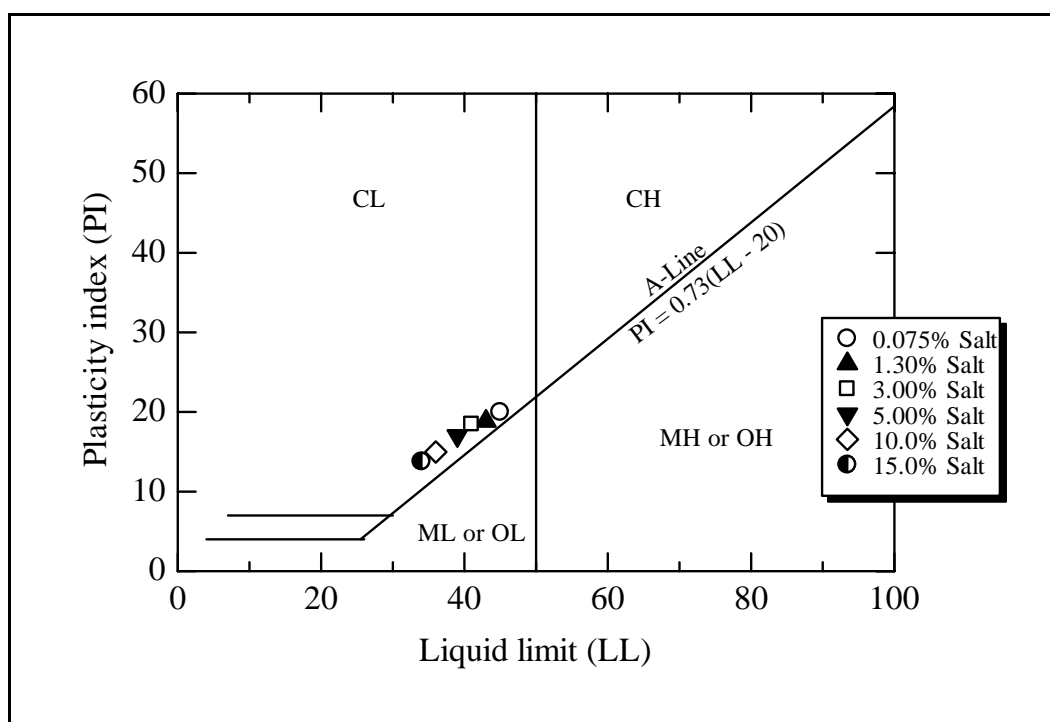
Salt Content (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
0.075	45	25	19.99
1.30	43	24	18.85
3.00	41	22	18.48
5.00	39	22	17.01
10.0	36	21	14.97
15.0	34	20	13.77

ระดับความเค็มที่เพิ่มขึ้นทำให้ขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกลดลง ส่งผลให้ดัชนีสภาพพลาสติกมีค่าลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าความเป็นพลาสติกของดินลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระดับความเค็ม การลดลงของขีดจำกัดเหลวอาจเกิดจากการลดลงของ Diffusion double layer ถึงแม้ว่าความเค็มจะลดขีดจำกัดเหลวและดัชนีสภาพพลาสติก แต่เมื่อทำการพล็อตความสัมพันธ์

ทั้งสองเปรียบเทียบกับเส้น A-Line ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ยังคงอยู่เหนือเส้น A-Line ซึ่งแสดงว่าตัวอย่างทดสอบยังคงเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ



รูปที่ 4.3 อิทธิพลของความเค็มที่มีผลต่อพิกัดแอดเตอร์เบอร์ก (Atterberg's Limit)

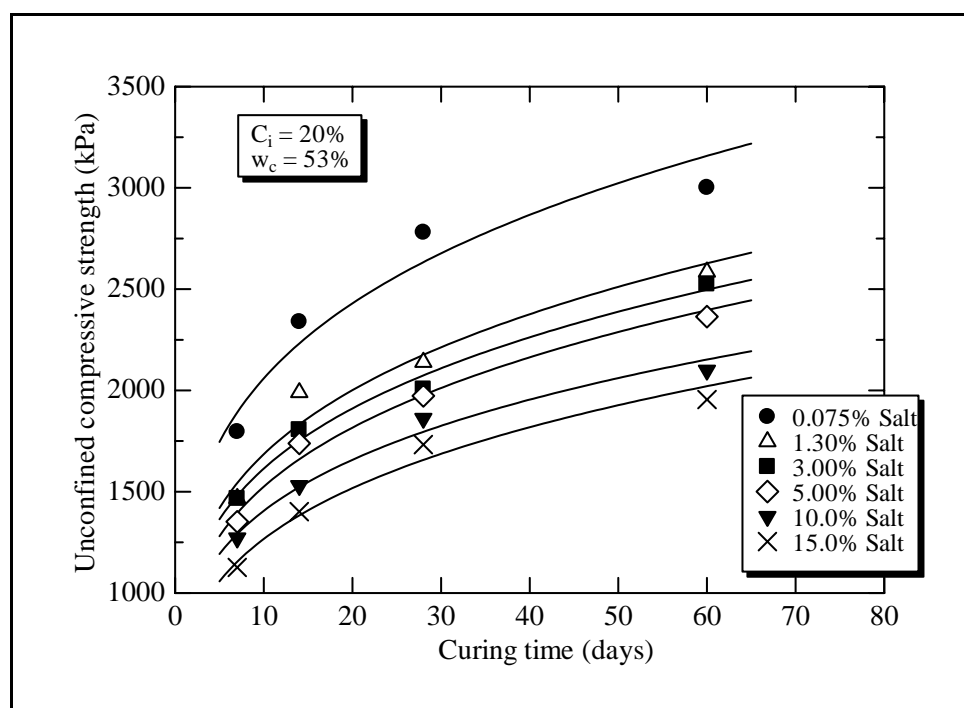


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดเหลวและดัชนีสภาพพลาสติก
ที่ระดับความเค็มต่าง ๆ ในแผนภูมิพลาสติก

4.4 อิทธิพลของความเค็มต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์

รูปที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของความเค็มต่อกำลังอัดแกนเดียว ดินตัวอย่างตามธรรมชาติถูกนำมาผสมเข้าเกลือจนมีปริมาณเกลือร้อยละ 3 5 10 และ 15 จากนั้นปรับปริมาณความชื้นจนมีค่าเท่ากับร้อยละ 53 ($LI = 1.5$ ของดินธรรมชาติ) และผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักดิน เมื่อได้อายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน แล้วทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

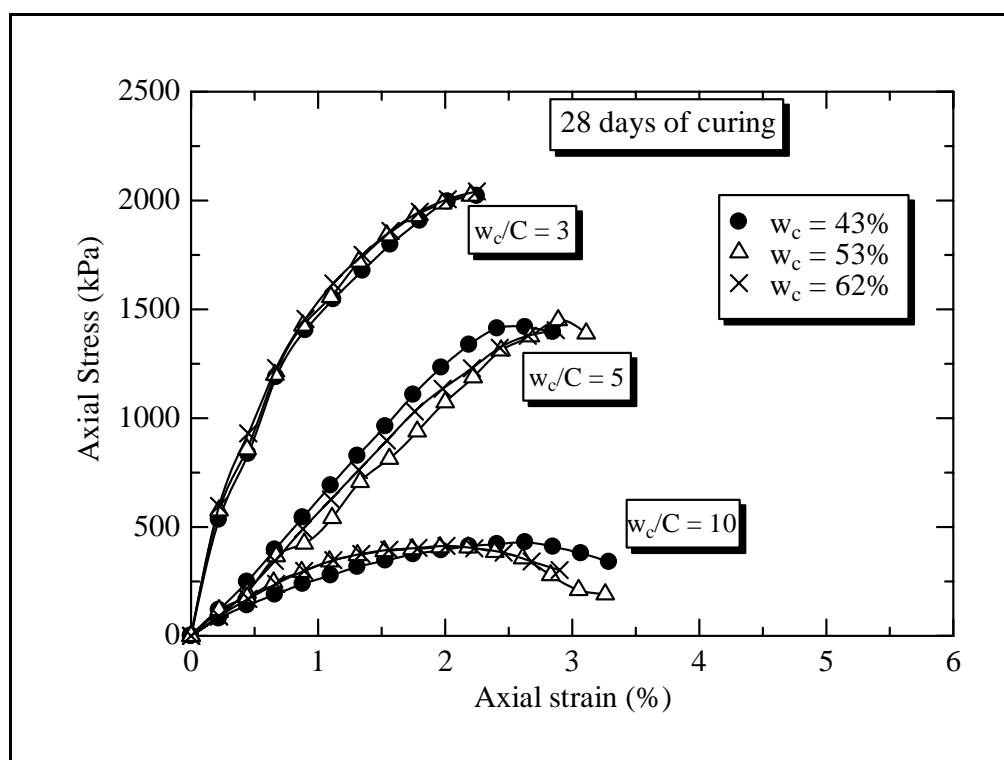
ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณความชื้นและอายุบ่มเดียวกัน กำลังอัดแกนเดียวมีค่าลดลงตามปริมาณเกลือที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ดินที่ระดับความเค็มต่ำจะมีปริมาณขีดจำกัดเหลวสูงที่ปริมาณความชื้นเดียวกัน ดินที่มีระดับความเค็มต่ำจะมีค่า e/e_L ต่ำ (matric suction หรือแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสูง) ในขณะที่ ความแข็งแรงของพันธะเชื่อมประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าประมาณใกล้เคียงกัน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันแปรผันตามปริมาณความชื้น ผลทดสอบทั้งหมดนี้นำมาซึ่งบทสรุปที่ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์แปรผันตามสถานะของความเค็มเริ่มต้นและพันธะเชื่อมประสาน



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของระดับความเค็มต่อกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่มต่าง ๆ

4.5 กำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์

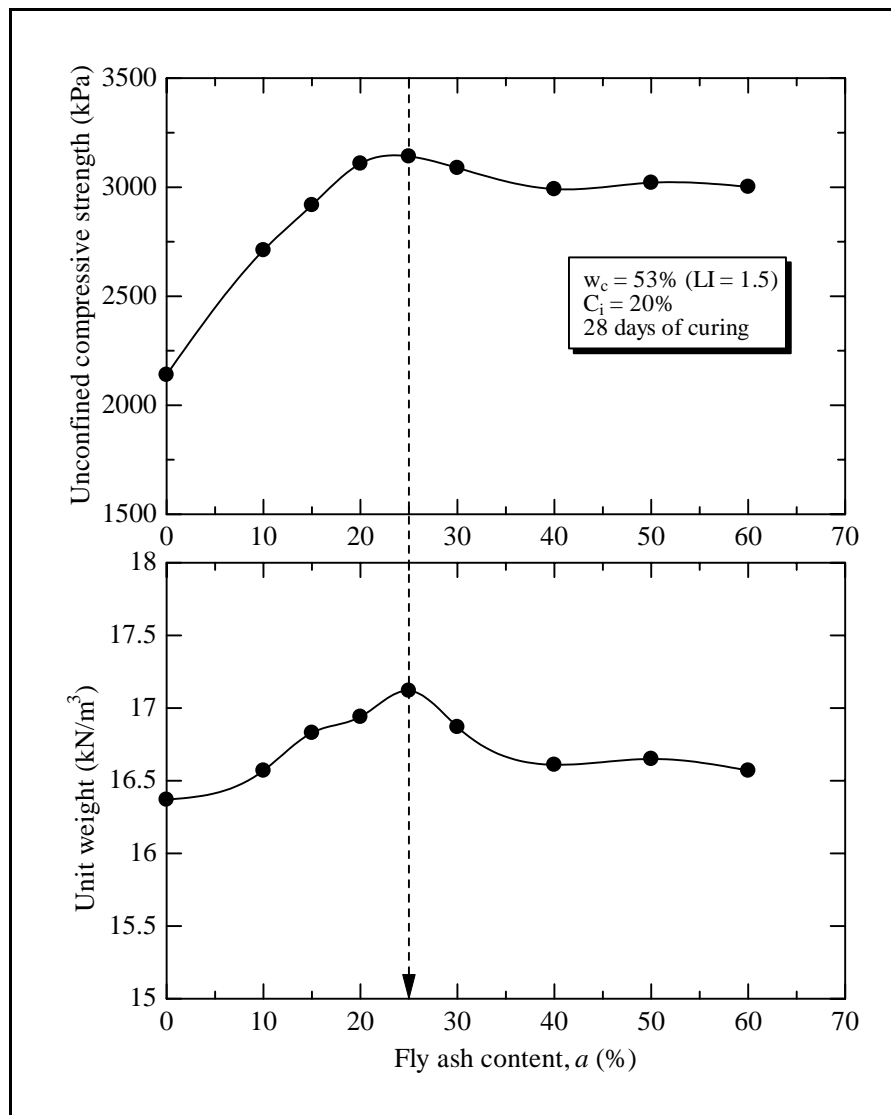
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวแกนของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์ประเภท 1 ที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ปริมาณความชื้น 3 ค่า คือ 1.0 1.5 และ 2.0 เท่าของ Liquidity index ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมในดินทำให้อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 5 และ 10 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน กำลังอัดแกนเดียวมีค่าใกล้เคียงกัน และกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาดินซีเมนต์ของ Horpibulsuk et al. (2005)



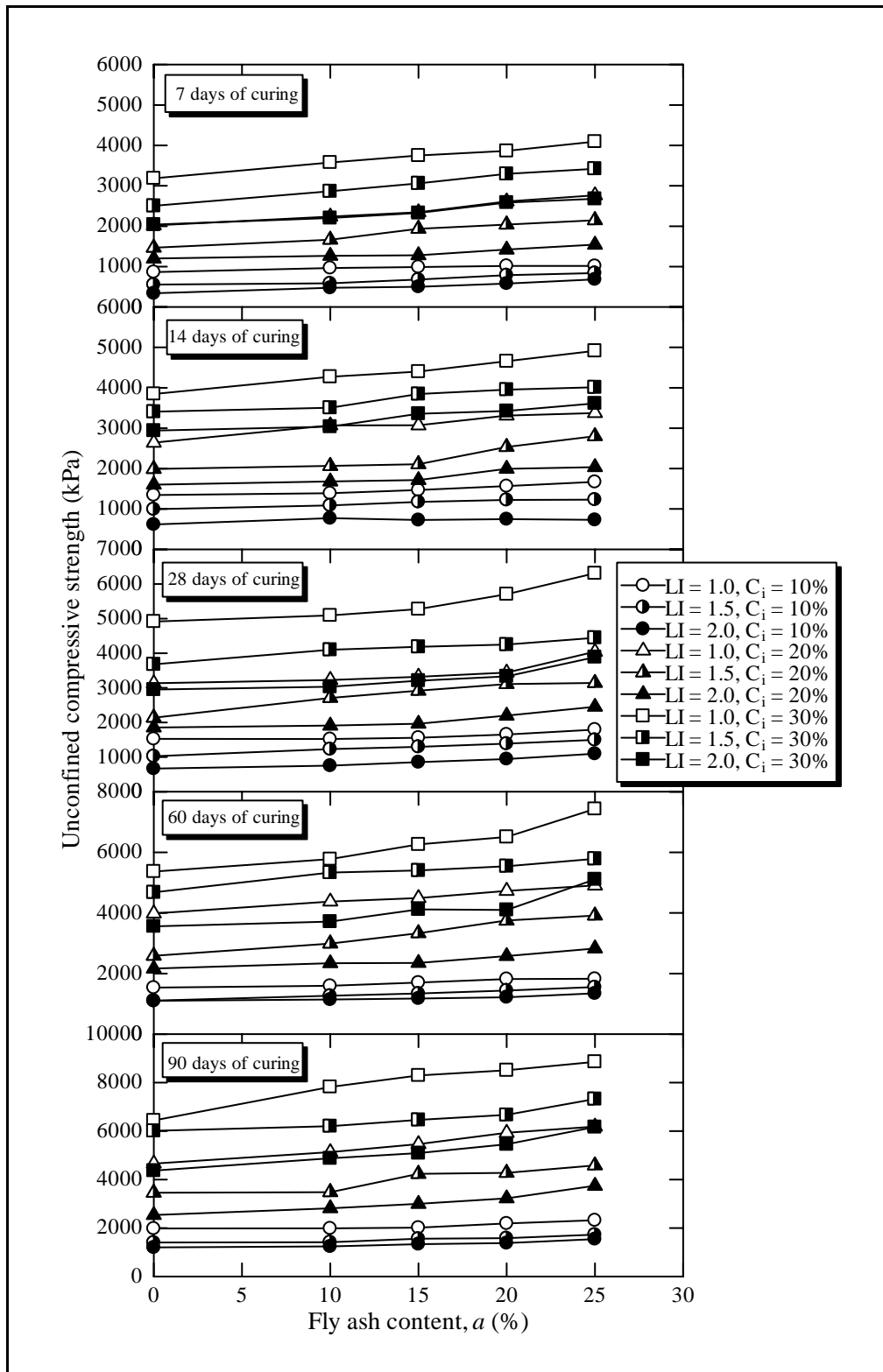
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินซีเมนต์แก้ล้อย่านหิน ที่อายุบ่ม 28 วัน

4.6 กำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

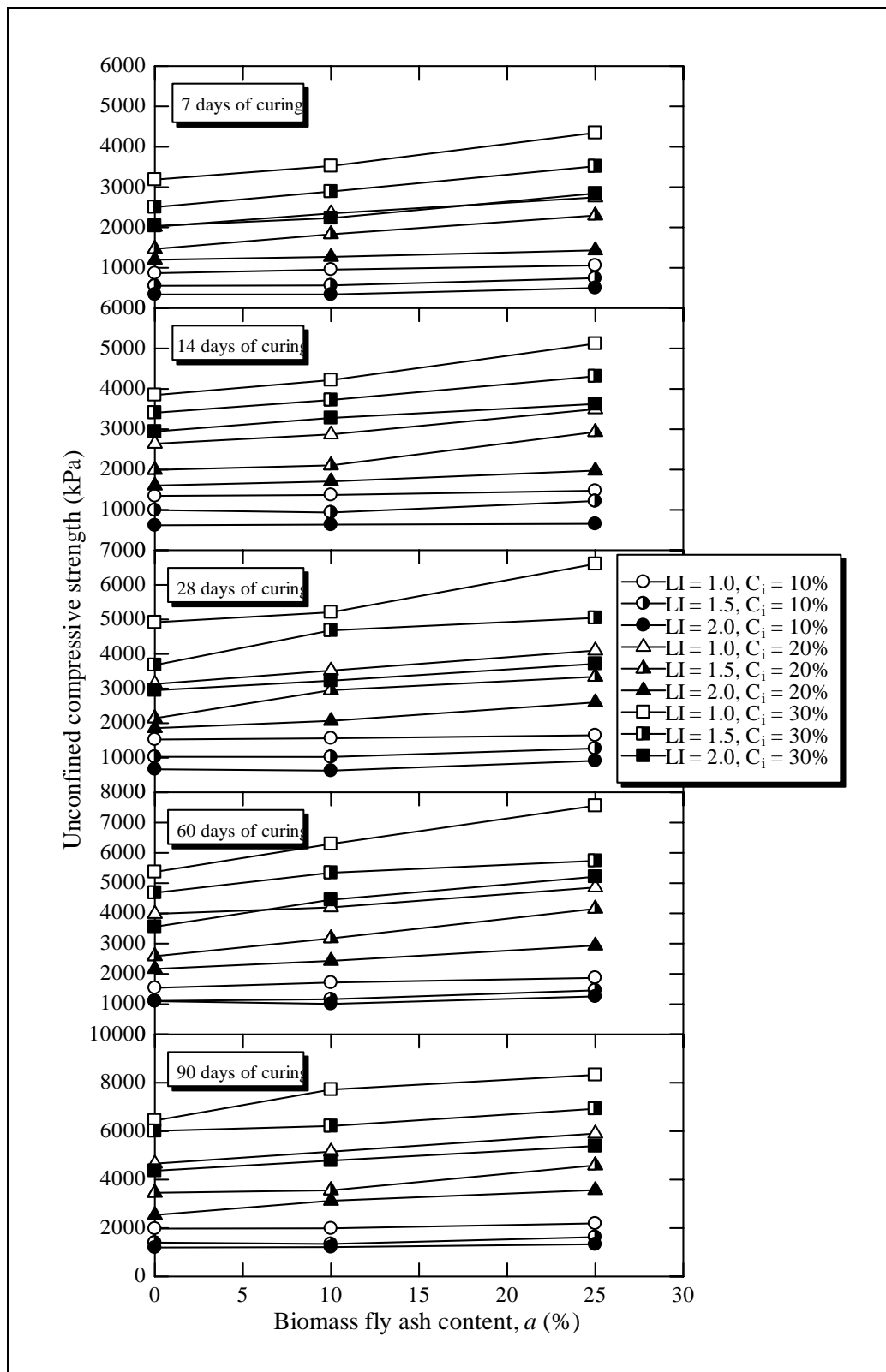
รูปที่ 4.7 แสดงอิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดแกนเดียว ซึ่งเป็นผลทดสอบของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยถ่านหินที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 53 ($LI = 1.5$) และปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย กำลังอัดของดินซีเมนต์และหน่วยน้ำหนักของดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2011) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสม (ให้กำลังอัดสูงสุด) คือร้อยละ 25 ดังนั้นในการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยจึงเลือกทดสอบในช่วงปริมาณเถ้าลอยไม่เกินร้อยละ 25



รูปที่ 4.7 กำลังอัดแกนเดียวและหน่วยน้ำหนักของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน ที่อายุบ่ม 28 วัน รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงการพัฒนา กำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ปริมาณ ความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่มต่าง ๆ สำหรับเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยชีวมวลใน ปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 25 ที่อายุบ่ม 7 14 28 60 และ 90 วัน จะเห็นได้ว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ปริมาณเถ้าลอยสำหรับทุกอัตราส่วนผสม ในอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ที่ เหมือนกัน ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าให้กำลังอัดที่ต่ำกว่า เนื่องจากระยะห่างระหว่างอนุภาคดิน (pore space) มีมากกว่า และทุกอัตราส่วนผสมที่เท่ากัน กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าลอยของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าลอยของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล

จากการศึกษาของยุทธนา รักษาชนม์ (2551), Horpibulsuk et al. (2009) และ อภิชาติ สุดดีพงษ์ (2009) พบว่าเกลือลอยในดินซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายอนุภาคดินซีเมนต์ ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีขึ้นและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ ผลทดสอบของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเกลือลอย (รูปที่ 4.9 และ 4.10) การเพิ่มขึ้นของเกลือลอยใน ปริมาณไม่เกินร้อยละ 25 ของปูนซีเมนต์ เปรียบเสมือนการเพิ่มปูนซีเมนต์ให้กับดินซีเมนต์ ดังนั้น

$$C_e = kf \quad (4.1)$$

เมื่อ C_e คือ ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า k คือตัวแปรประสิทธิภาพ และ f คือปริมาณ เกลือลอยซึ่งเป็นปริมาณ โดยน้ำหนักของดินแห้ง สมการที่ 4.1 เขียนใหม่ในรูปของปริมาณเกลือลอย โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ได้ดังสมการที่ 4.2

$$C_e = kC_i a \quad (4.2)$$

เมื่อ C_i คือปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่เริ่มต้น a คือปริมาณเกลือลอยโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมด (C) ที่มีอยู่ในดินเหนียวจึงเท่ากับ

$$\begin{aligned} C &= C_i + C_e \\ C &= C_i (1 + k a) \end{aligned} \quad (4.3)$$

โดยการรวมสมการที่ 4.2 และ 4.3 เข้ากับตัวแปรอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณ ปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk and Miura, 2001; Muira et al., 2001 และ Horpibulsuk et al., 2003) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่อายุบ่มใด ๆ แสดงดังนี้

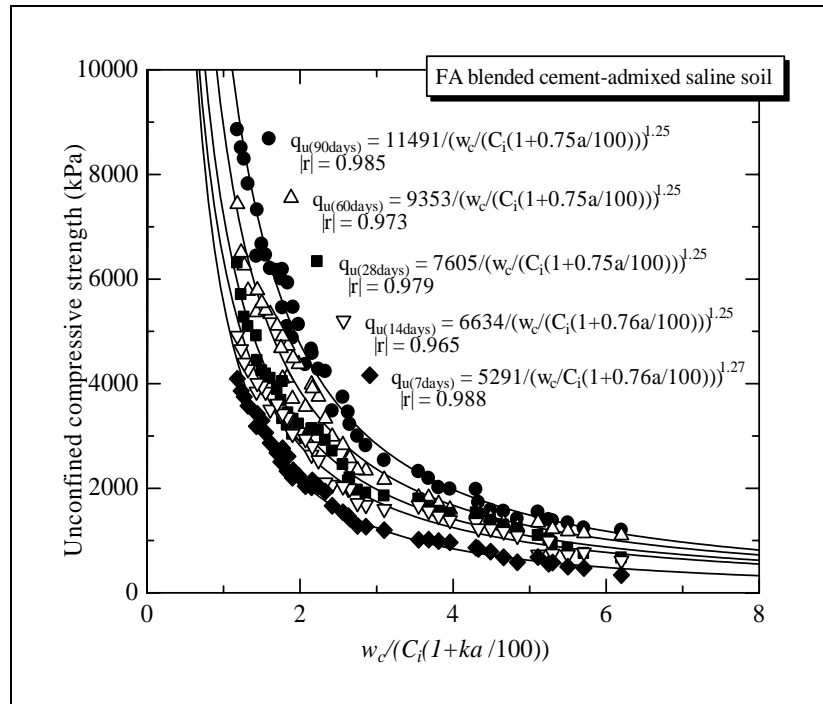
$$q_u = \frac{A}{\left(\frac{w_c}{C_i(1+ka)} \right)^B} \quad (4.4)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ และ q_u คือกำลังอัดที่อายุบ่มใด ๆ พารามิเตอร์ A B และ k สามารถหาได้จากการทำ Multi-regression analysis ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ A B ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 7 14 28 60 และ 90 วัน รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน ที่อายุต่าง ๆ ด้วยพารามิเตอร์อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ที่นำเสนอสามารถใช้ได้กับดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้นในช่วง 1.0 ถึง 2.0 เท่าของ Liquidity Index ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 ถึง 30 ของน้ำหนักดินแห้ง และปริมาณเถ้าลอยที่ร้อยละ 0 ถึง 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

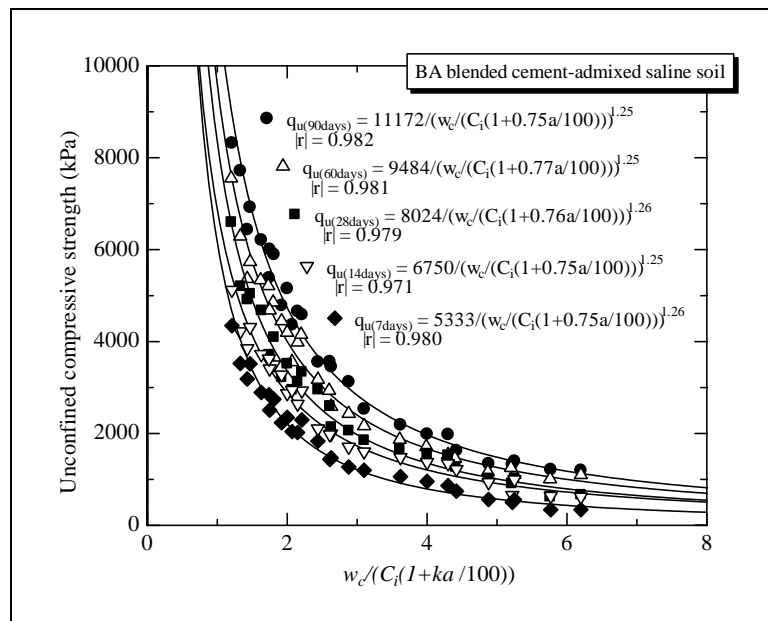
ค่าของพารามิเตอร์ A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2003) และ อภิชาติ สุดดีพงษ์ (2552) และมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละอายุบ่มสำหรับเถ้าลอยทั้งสองชนิด จากผลที่ได้พบว่าค่าของพารามิเตอร์ A และ B ของเถ้าลอยทั้งสองชนิดมีค่าประมาณเท่ากันที่อายุบ่มเดียวกัน พารามิเตอร์ B มีค่าประมาณคงที่ไม่แปรผันตามอายุบ่มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2003) การที่ค่า A B และ k มีค่าประมาณเท่ากันสำหรับเถ้าลอยทั้งสองนี้ ทำให้สรุปได้ว่าส่วนประกอบทางเคมีและรูปร่างของเถ้าลอยทั้งสองที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัด เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกแทบไม่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์เถ้าลอย (Horpibulsuk et al., 2009)

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ A , B และ k ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวลที่อายุบ่มต่าง ๆ

Curing time (Days)	Fly ash			Biomass ash		
	A	B	k	A	B	k
7	5291	1.27	0.76	5333	1.26	0.75
14	6634	1.25	0.76	6750	1.25	0.75
28	7605	1.25	0.75	8024	1.26	0.76
60	9353	1.25	0.75	9484	1.25	0.77
90	11491	1.25	0.75	11172	1.25	0.75

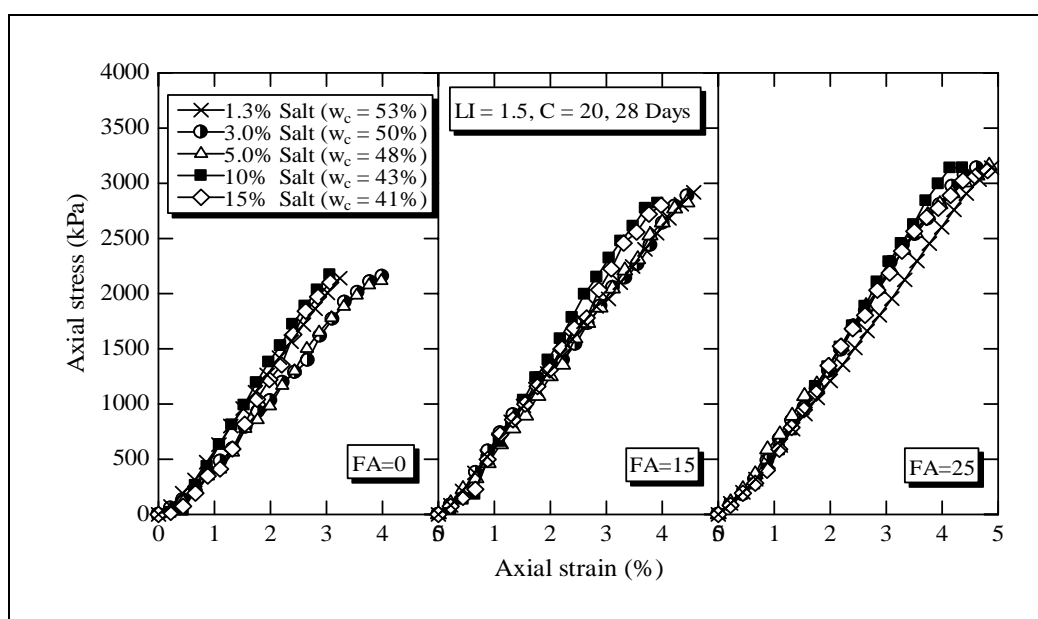


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดิน
ต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (ถ้ำลอยถ่านหิน)



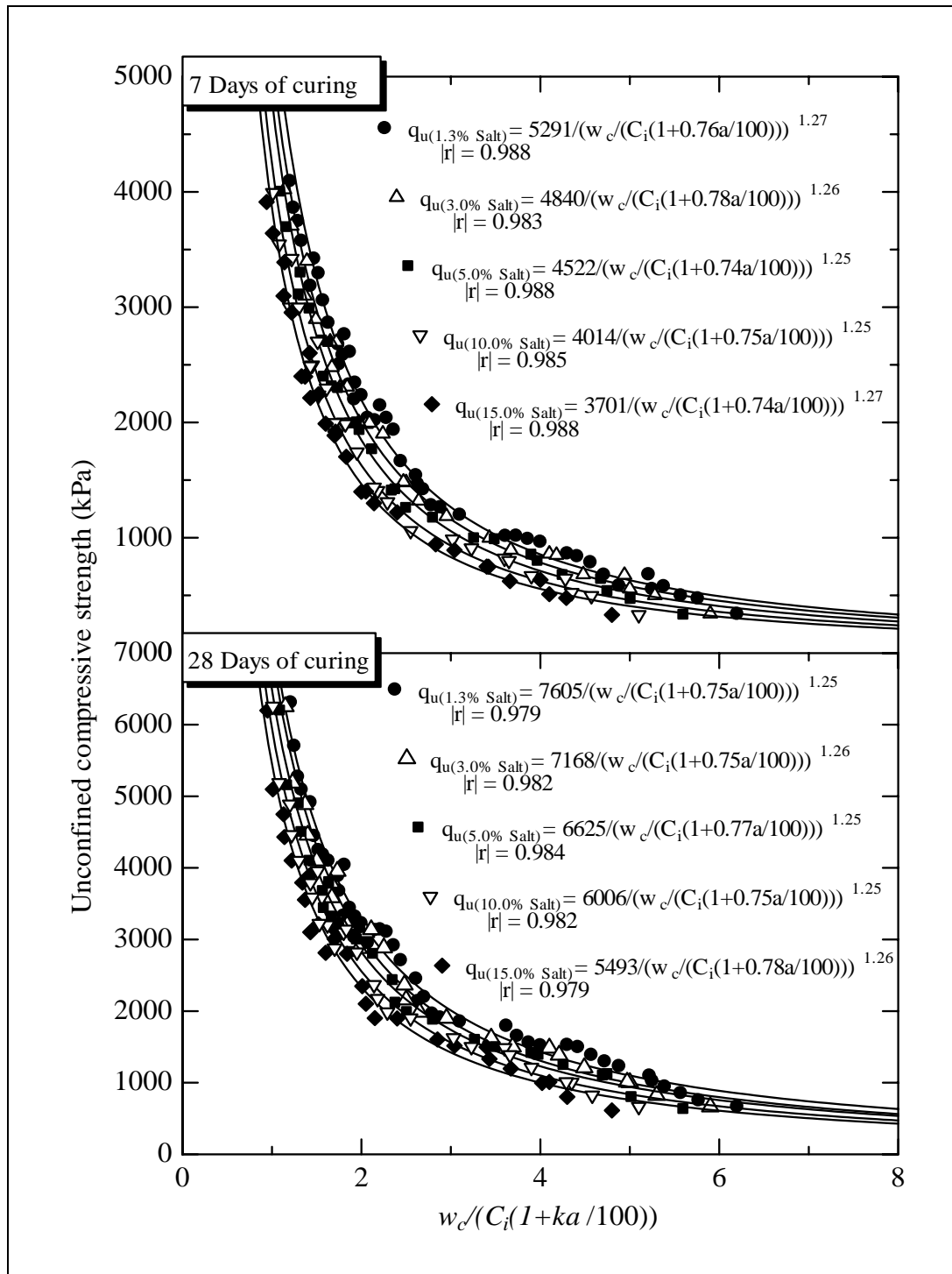
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดิน
ต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (ถ้ำชีวมวล)

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวแกนของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ระดับความเค็มต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ดัชนีสภาพเหลวเท่ากับ 1.5 เท่าของปริมาณความชื้นในดินตามระดับความเค็ม ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักดินแห้ง และปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 0 15 และ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าระดับความเค็มและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์จะมีความแตกต่างกันแต่ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ใกล้เคียง



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ระดับความเค็มต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (เถ้าลอยถ่านหิน) ที่ระดับความเค็มต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์ Multi-regression analysis ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน แสดงให้เห็นว่าค่าของพารามิเตอร์ A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2003) และ Horpibulsuk et al. (2011) ค่าของพารามิเตอร์ A มีค่าลดลงตามระดับความเค็มที่เพิ่มขึ้นในแต่ละอายุบ่ม พารามิเตอร์ B มีค่าประมาณคงที่ระหว่าง 1.25 - 1.27 ไม่แปรผันตามอายุบ่ม และค่า k มีค่าประมาณ 0.76 สำหรับทุกระดับความเค็ม ทำให้สรุปความสามารถในการกระจายตัวของเถ้าลอยไม่แปรผันตามระดับความเค็ม



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดิน
ต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (แก้ล้อยถ่านหิน) ที่ระดับความเค็มต่าง ๆ

ในการสร้างสมการทำนายกำลังอัดของคินซีเมนต์เถ้าลอย เลือกใช้พารามิเตอร์ B ของเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวลเท่ากับ 1.25 ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k ของเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวลเท่ากับ 0.75 ดังนั้น อัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวของคินซีเมนต์เถ้าลอยที่อายุบ่มค่าหนึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.5

$$\left[\frac{q_{(w_c/C)_1}}{q_{(w_c/C)_2}} \right] = \left[\frac{A / (w_c / C_i (1 + 0.75a))_1^{1.25}}{A / (w_c / C_i (1 + 0.75a))_2^{1.25}} \right] = \left[\frac{(w_c / C_i (1 + 0.75a))_2}{(w_c / C_i (1 + 0.75a))_1} \right]^{1.25} \quad (4.5)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_1}$ และ $q_{(w_c/C)_2}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าและกำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่า ตามลำดับ ส่วน $(w_c / C)_1$ และ $(w_c / C)_2$ คือ อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต้องการทราบค่าและทราบค่า ตามลำดับ

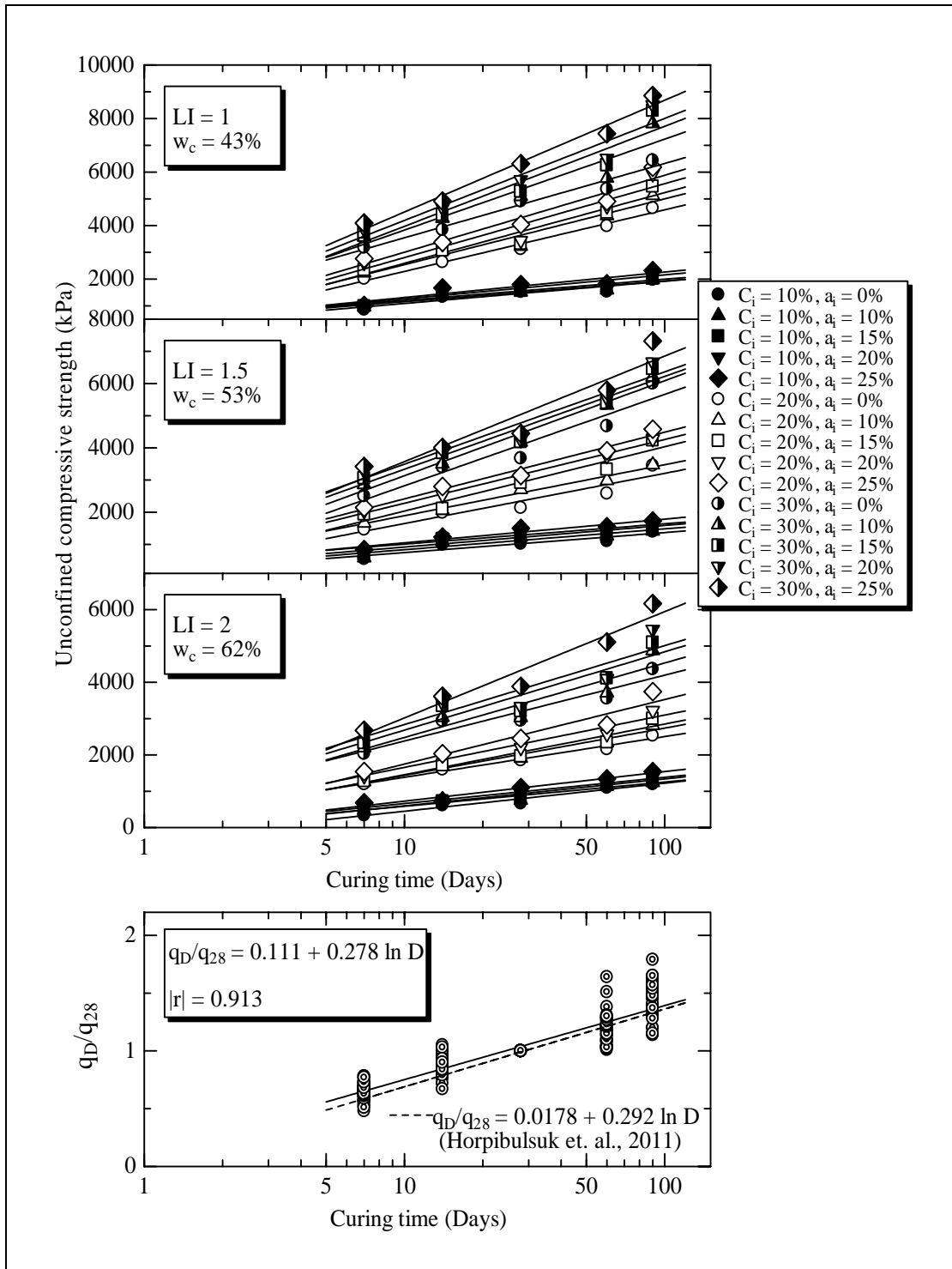
อย่างไรก็ตาม สมการที่ 4.5 ยังมีข้อจำกัด คือ สามารถหาค่ากำลังอัดแกนเดียวได้เฉพาะที่อายุบ่มเดียวกันเท่านั้น ซึ่งหากมีความจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เพื่อลดอายุบ่มแต่ยังต้องการกำลังอัดเท่าเดิมยังไม่สามารถทำได้ จึงต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย ปริมาณความชื้น และอายุบ่มซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม

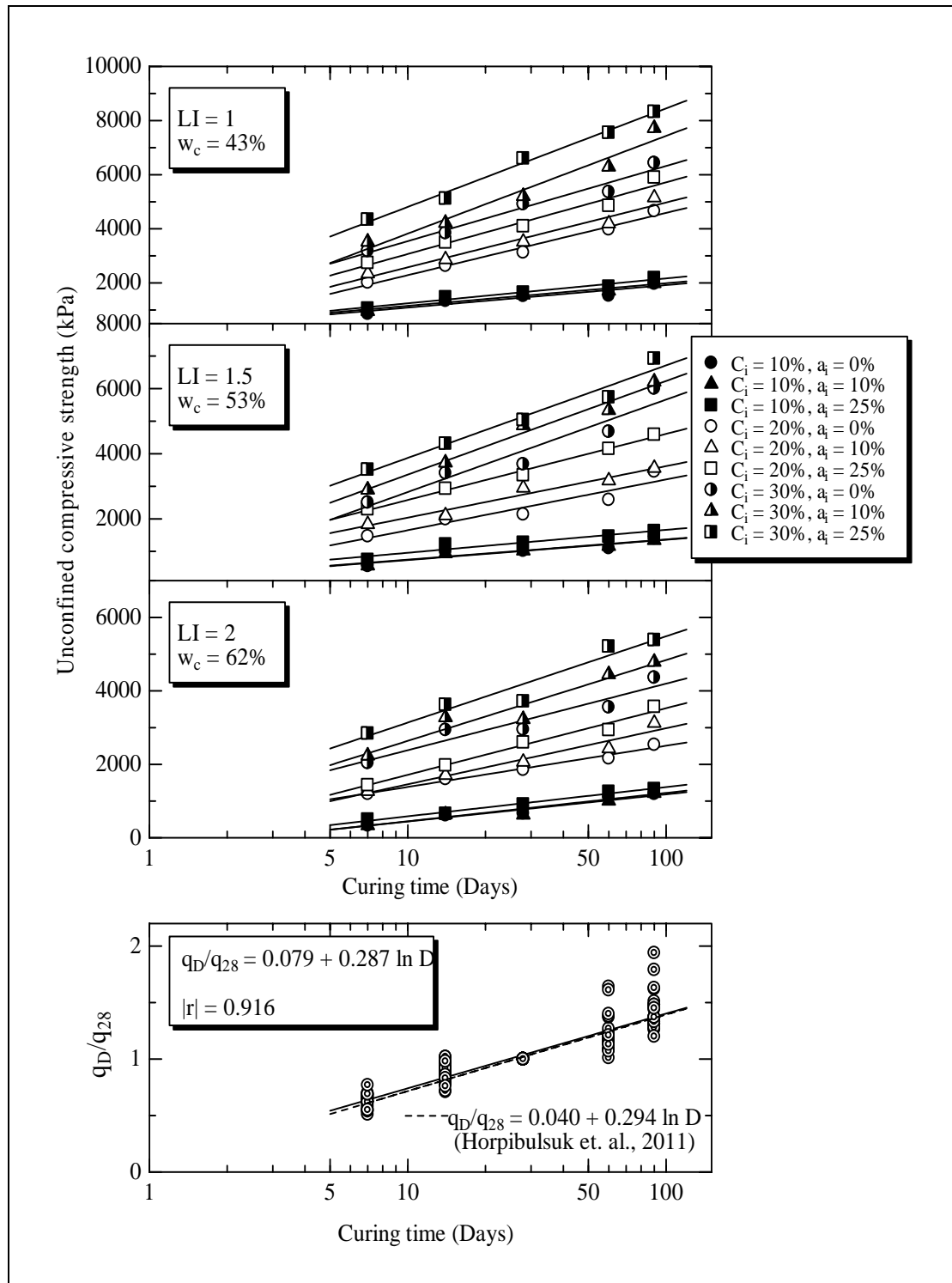
รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอยและปริมาณความชื้นต่าง ๆ ของคินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวล จากการสังเกตพบว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม เนื่องจากเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวลทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายอนุภาคคินซีเมนต์ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นการพัฒนากำลังอัดกับเวลาจึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก ซึ่งถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์ A เท่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.6

$$\frac{q_{D1}}{q_{D2}} = \frac{A_{D1}}{A_{D2}} = \text{ค่าคงที่} \quad (4.6)$$

เมื่อ q_{D1} คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าที่อายุบ่ม D_1 วัน และ q_{D2} คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่าที่อายุบ่ม D_2 วัน A_{D1} และ A_{D2} คือพารามิเตอร์ A ที่สอดคล้องกับอายุบ่ม D_1 และ D_2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม
ของดินซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน

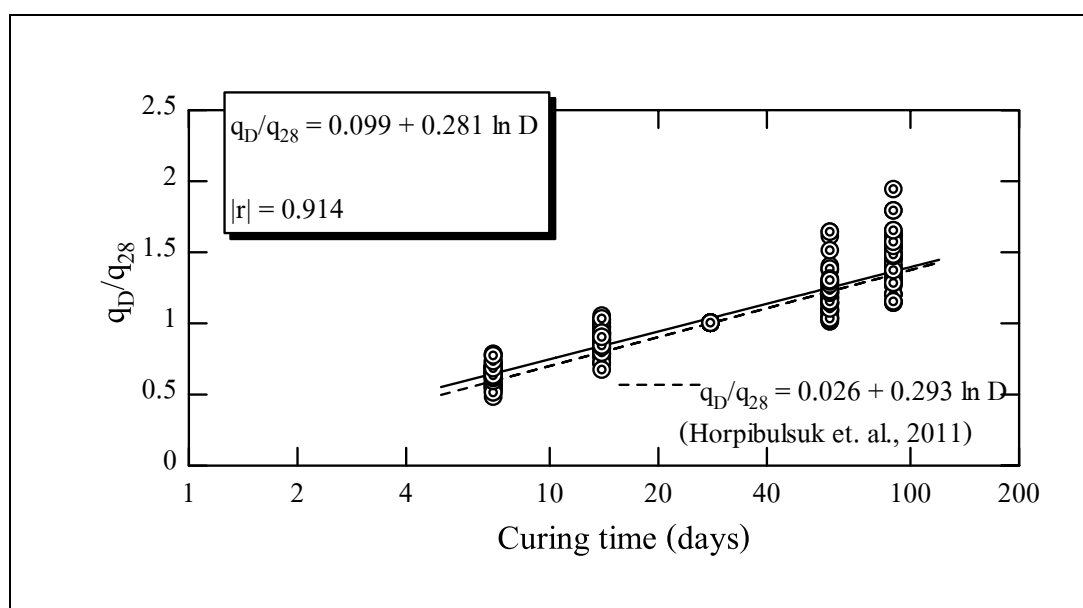


รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล

จากหลักการดังกล่าวแสดงด้วยสมการที่ 4.6 ผู้วิจัยได้ทำการ Normalization ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว (q_u) กับอายุบ่ม (D) ภายใต้สภาวะตัวแปรต่าง ๆ คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้า และปริมาณความชื้นของเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล โดยใช้ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน เป็นค่าอ้างอิง ดังรูปที่ 4.16 ได้สมการอัตรากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยดังสมการที่ 4.7 ผลจากการ Normalization ของผลทดสอบทั้งสองจะได้

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.099 + 0.281 \ln D \quad (4.7)$$

เมื่อ q_D และ q_{28} คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม D ใด ๆ และกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าที่อายุบ่ม 28 วันตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบดินซีเมนต์ของ Horpibulsuk et al. (2011) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม ภายใต้สภาวะตัวแปรต่าง ๆ และการ Normalization

4.8 สมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของตัวแปรควบคุม

เนื่องจากพารามิเตอร์ B และ k มีค่าประมาณ 1.25 และ 0.75 ตามลำดับ ทำให้เราได้สมการอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ใด ๆ ที่อายุบ่มค่าหนึ่งตามสมการที่ 4.5 จากการรวมสมการดังกล่าวกับสมการที่ 4.7 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่มในช่วงความชื้นของดินมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 2.0 เท่าของ Liquidity index ดังนี้

จากสมการที่ 4.5 เมื่อเขียนสมการอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าที่อายุบ่ม D ที่ค่า $(w_c/C)_1$ และ $(w_c/C)_2$ ใด ๆ และที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ค่า $(w_c/C)_1$ และ $(w_c/C)_3$ ใด ๆ จะได้ดังสมการที่ 4.5ก และ 4.5ข ตามลำดับ

$$q_{(w_c/C)_{2,D}} = q_{(w_c/C)_{1,D}} \left[\frac{\left(\frac{w_c}{C_i} (1 + 0.75a) \right)_{1,D}}{\left(\frac{w_c}{C_i} (1 + 0.75a) \right)_{2,D}} \right]^{1.25} \quad (4.5ก)$$

$$q_{(w_c/C)_{3,28}} = q_{(w_c/C)_{1,28}} \left[\frac{\left(\frac{w_c}{C_i} (1 + 0.75a) \right)_{1,28}}{\left(\frac{w_c}{C_i} (1 + 0.75a) \right)_{3,28}} \right]^{1.25} \quad (4.5ข)$$

เมื่อหารสมการที่ 4.5ก ด้วยสมการที่ 4.5ข จะได้

$$\frac{q_{(w_c/C)_{2,D}}}{q_{(w_c/C)_{3,28}}} = \left[\frac{q_{(w_c/C)_{1,D}}}{q_{(w_c/C)_{1,28}}} \right] \left[\frac{\left(\frac{w_c}{C_i} (1 + 0.75a) \right)_{1,D}}{\left(\frac{w_c}{C_i} (1 + 0.75a) \right)_{2,D}} \right]^{1.25} \left[\frac{\left(\frac{w_c}{C_i} (1 + 0.75a) \right)_{1,28}}{\left(\frac{w_c}{C_i} (1 + 0.75a) \right)_{3,28}} \right]^{1.25}$$

แต่ $(w_c/C)_{1,D}$ และ $(w_c/C)_{1,28}$ มีค่าเท่ากันดังนั้น

$$\frac{q_{(w_c/C)_{2,D}}}{q_{(w_c/C)_{3,28}}} = \left[\frac{q_{(w_c/C)_{1,D}}}{q_{(w_c/C)_{1,28}}} \right] \left[\frac{\left(\frac{w_c}{C_i} (1 + 0.75a) \right)_{3,28}}{\left(\frac{w_c}{C_i} (1 + 0.75a) \right)_{2,D}} \right]^{1.25} \quad (4.5ก)$$

เทอมทางขวามือของสมการที่ 4.5ก เป็นอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวที่อายุปม D วัน ต่อกำลังอัดแกนเดียวที่อายุปม 28 วัน ที่ค่า w_c / C ค่าเดียวกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับสมการที่ 4.6 และ 4.7 ดังนั้น เมื่อจัดให้อยู่ในรูปทั่วไปจะได้ดังสมการที่ 4.8 สำหรับดินซีเมนต์เถ้าลอย

$$\left[\frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}} \right] = \left[\frac{w_c / C_i (1 + 0.75a)_{28}}{w_c / C_i (1 + 0.75a)_D} \right]^{1.25} (0.099 + 0.281 \ln D) \quad (4.8)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_D}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ต้องการทราบที่มีค่า (w_c / C) ใด ๆ ที่อายุปม D วัน และ $q_{(w_c/C)_{28}}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ทราบค่า ที่มีค่า (w_c / C) ใด ๆ ที่อายุปม 28 วัน

4.9 การวิเคราะห์ด้านโครงสร้างจุลภาค

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณ Ca(OH)_2 ด้วย TGA ของดินตัวอย่าง พบว่า ปริมาณ Ca(OH)_2 มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณเถ้าลอย สามารถสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย ขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วมระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการกระจายตัว ซึ่งอิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกควบคุมด้วยปูนซีเมนต์ ขณะที่อิทธิพลของการกระจายตัวถูกควบคุมด้วยปริมาณเถ้าลอย

ผลการศึกษาี้แสดงให้เห็น ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วมระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันและการกระจายตัว เถ้าลอยจะช่วยให้เกิดการกระจายตัว เนื่องจากเถ้าลอยทำให้กลุ่มของอนุภาคดินซีเมนต์ที่รวมตัวกันเมื่อสัมผัสกับน้ำแตกตัวออกเป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง เป็นผลให้ผิวสัมผัสของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากปริมาณ Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการกระจายตัว (dispersion effect) และปริมาณการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Ca(OH)_2 สามารถอธิบายได้จากการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่าปริมาณ Ca(OH)_2 มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และสามารถสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย ขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วมระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการกระจายตัว ซึ่งอิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกควบคุมด้วยปูนซีเมนต์ ขณะที่อิทธิพลของการกระจายตัวถูกควบคุมด้วยปริมาณเถ้าลอย

ตารางที่ 4.5 Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน

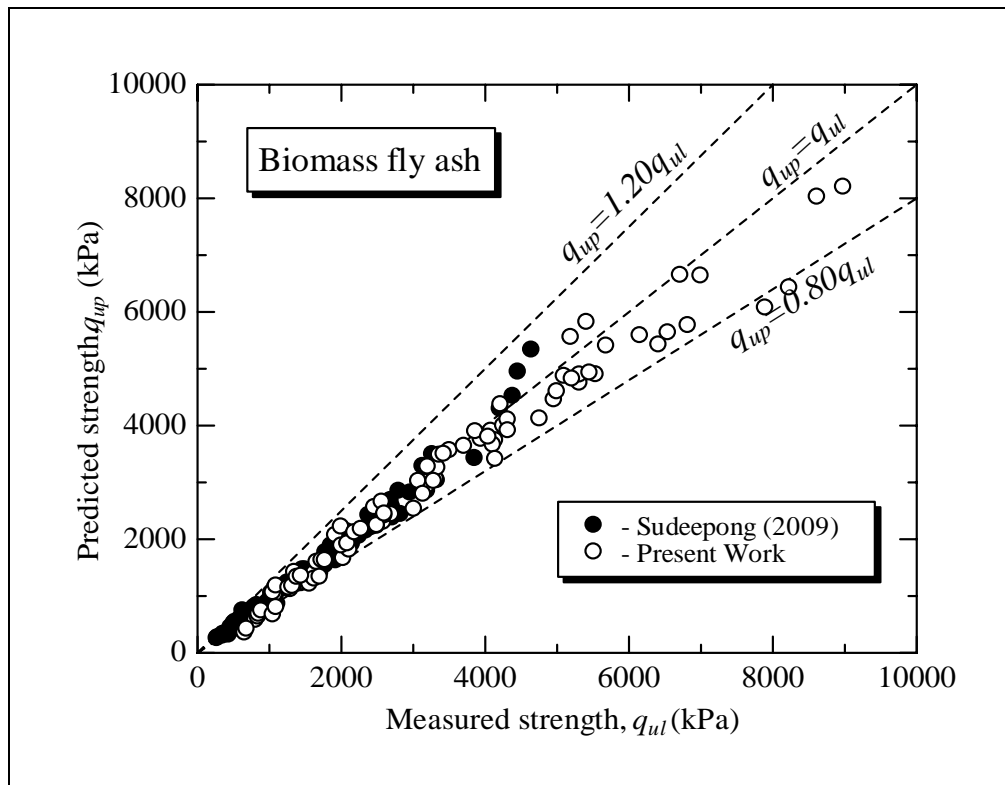
<i>Wc/C</i>	Water content (%)	Cement content (%)	Fly Ash content (%)	Ca(OH) ₂ , (%)
				TGA
2.63	52.5	20	0	14.34
2.44	52.5	20	10	15.44
2.21	52.5	20	25	15.71
1.75	52.5	30	0	16.89
1.63	52.5	30	10	17.02
1.47	52.5	30	25	17.65

4.10 การตรวจสอบสมการทำนายกำลัง

เมื่อได้สมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอย หัวข้อนี้จะแสดงการตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนายกำลังของดินเค็มซีเมนต์เถ้าชีวมวลซึ่งเป็นข้อมูลของผู้วิจัยและเป็นข้อมูลที่ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.6 ผลจากการใช้สมการของดินเค็มซีเมนต์เถ้าชีวมวลเปรียบเทียบกับผลทดลองจริงแสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าความผิดพลาดของผลการทำนายจากค่า Mean Absolute Percent Error, MAPE จะคำนวณได้จากสมการที่ 4.9 จะมีค่าเท่ากับ 12.70

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|q_{up} - q_{ul}|}{q_{ul}} \times 100 \quad (4.9)$$

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังใช้สมการทำนายกำลังอัดกับงานวิจัยของอภิชาติ สุดดีพงษ์ (2552) ซึ่งเป็นดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล เปรียบเทียบกับกำลังอัดจริงดังแสดงในตารางที่ 4.7 มีค่าความผิดพลาดของผลการทำนายจากค่า Mean Absolute Percent Error, MAPE เท่ากับ 8.08 รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ได้จากการทำนายและจากการทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของการทำนายซึ่งจะพบว่าค่าส่วนใหญ่อยู่ในกรอบความเชื่อมั่น 80%



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการทำนายกับกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล (ข้อมูลของผู้วิจัย และข้อมูลของอภิชาติ สุดดีพงษ์, 2552)

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลอง และการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย)

Curing Time (days)	Water Content, w_c (%)	Cement Content, C_i (%)	Biomass Ash (%)	$w_c/(C_i*(1+ka))$	Predicted Strength, q_{up} (kPa.)	Laboratory Strength, q_{ul} (kPa.)	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
7	43	10	15	3.87	1033	1057	2.24
7	43	10	20	3.74	1077	1031	4.46
7	52.5	10	15	4.72	805	580	38.81
7	52.5	10	20	4.57	839	638	31.53
7	62	10	15	5.57	654	357	83.19
7	62	10	20	5.39	682	425	60.39
7	43	20	15	1.93	2458	2564	4.15

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลอง และจากการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย)(ต่อ)

Curing Time (days)	Water Content, w_c (%)	Cement Content, C_i (%)	Biomass Ash (%)	$w_c/(C_i*(1+ka))$	Predicted Strength, q_{up} (kPa.)	Laboratory Strength, q_{ul} (kPa.)	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
7	43	20	20	1.87	2562	2660	3.70
7	52.5	20	15	2.36	1915	2073	7.63
7	52.5	20	20	2.28	1996	2222	10.18
7	62	20	15	2.79	1555	1266	22.86
7	62	20	20	2.70	1621	1404	15.47
7	43	30	15	1.29	4080	3908	4.39
7	43	30	20	1.25	4252	4000	6.31
7	52.5	30	15	1.57	3179	3266	2.67
7	52.5	30	20	1.52	3313	3063	8.17
7	62	30	15	1.86	2582	2308	11.87
7	62	30	20	1.80	2691	2440	10.30
14	43	10	15	3.87	1345	1423	5.49
14	43	10	20	3.74	1402	1220	14.90
14	52.5	10	15	4.72	1048	1066	1.69
14	52.5	10	20	4.57	1092	1184	7.75
14	62	10	15	5.57	851	688	23.72
14	62	10	20	5.39	887	745	19.09
14	43	20	15	1.93	3199	2948	8.51
14	43	20	20	1.87	3334	3259	2.31
14	52.5	20	15	2.36	2492	2235	11.52
14	52.5	20	20	2.28	2598	2418	7.44
14	62	20	15	2.79	2025	1666	21.52
14	62	20	20	2.70	2110	1814	16.33
14	43	30	15	1.29	5310	4753	11.72
14	43	30	20	1.25	5535	4902	12.91
14	52.5	30	15	1.57	4137	3743	10.54
14	52.5	30	20	1.52	4313	4108	4.98
14	62	30	15	1.86	3361	3485	3.56

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลอง และจากการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย)(ต่อ)

Curing Time (days)	Water Content, w_c (%)	Cement Content, C_i (%)	Biomass Ash (%)	$w_c/(C_i*(1+ka))$	Predicted Strength, q_{up} (kPa.)	Laboratory Strength, q_{ul} (kPa.)	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
14	62	30	20	1.80	3503	3567	1.79
28	43	10	15	3.87	1657	1600	Reference
28	43	10	20	3.74	1727	1635	5.61
28	52.5	10	15	4.72	1291	1120	15.25
28	52.5	10	20	4.57	1345	1192	12.87
28	62	10	15	5.57	1048	676	55.10
28	62	10	20	5.39	1093	803	36.09
28	43	20	15	1.93	3940	3766	4.62
28	43	20	20	1.87	4107	3665	12.05
28	52.5	20	15	2.36	3070	3026	1.45
28	52.5	20	20	2.28	3200	3279	2.41
28	62	20	15	2.79	2494	2248	10.93
28	62	20	20	2.70	2599	2450	6.09
28	43	30	15	1.29	6540	5641	15.95
28	43	30	20	1.25	6817	5769	18.17
28	52.5	30	15	1.57	5096	4874	4.56
28	52.5	30	20	1.52	5312	4898	8.45
28	62	30	15	1.86	4140	3412	21.32
28	62	30	20	1.80	4315	3916	10.18
60	43	10	15	3.87	1999	1888	5.89
60	43	10	20	3.74	2084	1925	8.25
60	52.5	10	15	4.72	1558	1216	28.10
60	52.5	10	20	4.57	1624	1306	24.32
60	62	10	15	5.57	1265	1149	10.13
60	62	10	20	5.39	1319	1177	12.05
60	43	20	15	1.93	4755	4124	15.30
60	43	20	20	1.87	4956	4460	11.12

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลอง และจากการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย)(ต่อ)

Curing Time (days)	Water Content, w_c (%)	Cement Content, C_i (%)	Biomass Ash (%)	$w_c/(C_i*(1+ka))$	Predicted Strength, q_{up} (kPa.)	Laboratory Strength, q_{ul} (kPa.)	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
60	52.5	20	15	2.36	3705	3642	1.73
60	52.5	20	20	2.28	3862	3899	0.96
60	62	20	15	2.79	3009	2534	18.76
60	62	20	20	2.70	3137	2798	12.11
60	43	30	15	1.29	7893	6077	29.89
60	43	30	20	1.25	8227	6431	27.93
60	52.5	30	15	1.57	6150	5590	10.02
60	52.5	30	20	1.52	6411	5428	18.10
60	62	30	15	1.86	4996	4603	8.53
60	62	30	20	1.80	5207	4826	7.90
90	43	10	15	3.87	2182	2120	2.90
90	43	10	20	3.74	2274	2181	4.26
90	52.5	10	15	4.72	1700	1340	26.85
90	52.5	10	20	4.57	1772	1631	8.63
90	62	10	15	5.57	1381	1336	3.35
90	62	10	20	5.39	1439	1357	6.05
90	43	20	15	1.93	5189	5559	6.66
90	43	20	20	1.87	5408	5825	7.16
90	52.5	20	15	2.36	4043	3803	6.31
90	52.5	20	20	2.28	4214	4374	3.66
90	62	20	15	2.79	3284	3025	8.56
90	62	20	20	2.70	3423	3503	2.29
90	43	30	15	1.29	8613	8029	7.27
90	43	30	20	1.25	8978	8204	9.43
90	52.5	30	15	1.57	6711	6652	0.89
90	52.5	30	20	1.52	6995	6641	5.33

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลอง และจากการวัด (ข้อมูลของผู้วิจัย)(ต่อ)

Curing Time (days)	Water Content, w_c (%)	Cement Content, C_i (%)	Biomass Ash (%)	$w_c/(C_i*(1+ka))$	Predicted Strength, q_{up} (kPa.)	Laboratory Strength, q_{ul} (kPa.)	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)	
90	62	30	15	1.86	5451	4933	10.51	
90	62	30	20	1.80	5682	5407	5.09	
Mean Absolute Percent Error, MAPE							$\left(\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100 \right)$	12.71

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลองและจากการวัด (อภิชาติ สุดดีพงษ์, 2552)

Curing Time (days)	Water Content, w_c (%)	Cement Content, C_i (%)	Biomass Ash (%)	$w_c/(C_i*(1+ka))$	Predicted Strength, q_{up} (kPa.)	Laboratory Strength, q_{ul} (kPa.)	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
7	89	10	15	8.00	504	520	3.01
7	89	10	20	7.74	526	547	3.89
7	89	20	15	4.00	1200	1138	5.41
7	89	20	20	3.87	1250	1237	1.08
7	89	30	15	2.67	1991	1882	5.81
7	89	30	20	2.58	2076	2141	3.05
7	118	10	15	10.61	355	332	6.78
7	118	10	20	10.26	370	332	11.30
7	118	20	15	5.30	843	695	21.32
7	118	20	20	5.13	879	712	23.44
7	118	30	15	3.54	1400	1371	2.09
7	118	30	20	3.42	1459	1467	0.55
7	147	10	15	13.21	269	257	4.81
7	147	10	20	12.78	281	273	2.84
7	147	20	15	6.61	641	528	21.34
7	147	20	20	6.39	668	563	18.61
7	147	30	15	4.40	1064	844	26.01
7	147	30	20	4.26	1109	865	28.15
14	89	10	15	8.00	656	630	4.20
14	89	10	20	7.74	684	664	3.05
14	89	20	15	4.00	1561	1414	10.42
14	89	20	20	3.87	1627	1458	11.62
14	89	30	15	2.67	2592	2546	1.81
14	89	30	20	2.58	2702	2577	4.84
14	118	10	15	10.61	461	451	2.31
14	118	10	20	10.26	481	460	4.56
14	118	20	15	5.30	1097	1103	0.50

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลองและจากการวัด (อภิชาติ สุดดีพงษ์, 2552)(ต่อ)

Curing Time (days)	Water Content, w_c (%)	Cement Content, C_i (%)	Biomass Ash (%)	$w_c/(C_i*(1+ka))$	Predicted Strength, q_{up} (kPa.)	Laboratory Strength, q_{ul} (kPa.)	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
14	118	20	20	5.13	1144	1169	2.15
14	118	30	15	3.54	1822	1652	10.28
14	118	30	20	3.42	1899	1795	5.79
14	147	10	15	13.21	351	305	14.95
14	147	10	20	12.78	365	322	13.49
14	147	20	15	6.61	834	690	20.85
14	147	20	20	6.39	869	730	19.06
14	147	30	15	4.40	1384	1223	13.19
14	147	30	20	4.26	1443	1224	17.88
28	89	10	15	8.00	809	781	Reference
28	89	10	20	7.74	843	820	2.78
28	89	20	15	4.00	1923	1627	18.21
28	89	20	20	3.87	2005	1755	14.22
28	89	30	15	2.67	3193	2855	11.82
28	89	30	20	2.58	3328	3038	9.53
28	118	10	15	10.61	568	514	10.58
28	118	10	20	10.26	592	547	8.30
28	118	20	15	5.30	1352	1314	2.88
28	118	20	20	5.13	1409	1353	4.14
28	118	30	15	3.54	2244	2056	9.14
28	118	30	20	3.42	2339	2150	8.79
28	147	10	15	13.21	432	320	34.95
28	147	10	20	12.78	450	366	22.98
28	147	20	15	6.61	1027	1052	2.37
28	147	20	20	6.39	1071	1118	4.24
28	147	30	15	4.40	1705	1409	21.01

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลองและจากการวัด (อภิชาติ สุดดีพงษ์, 2552)(ต่อ)

Curing Time (days)	Water Content, w_c (%)	Cement Content, C_i (%)	Biomass Ash (%)	$w_c/(C_i*(1+ka))$	Predicted Strength, q_{up} (kPa.)	Laboratory Strength, q_{ul} (kPa.)	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)
28	147	30	20	4.26	1777	1549	14.73
60	89	10	15	8.00	976	895	9.04
60	89	10	20	7.74	1017	945	7.64
60	89	20	15	4.00	2321	2162	7.36
60	89	20	20	3.87	2419	2214	9.27
60	89	30	15	2.67	3853	3429	12.36
60	89	30	20	2.58	4016	3795	5.82
60	118	10	15	10.61	686	659	4.09
60	118	10	20	10.26	715	713	0.27
60	118	20	15	5.30	1631	1386	17.71
60	118	20	20	5.13	1700	1493	13.89
60	118	30	15	3.54	2708	2381	13.74
60	118	30	20	3.42	2823	2445	15.45
60	147	10	15	13.21	521	428	21.77
60	147	10	20	12.78	543	486	11.77
60	147	20	15	6.61	1240	1160	6.86
60	147	20	20	6.39	1292	1166	0.00
60	147	30	15	4.40	2058	1814	13.43
60	147	30	20	4.26	2145	1916	11.94
90	89	10	15	8.00	1065	1078	1.22
90	89	10	20	7.74	1110	1101	0.81
90	89	20	15	4.00	2533	2439	3.84
90	89	20	20	3.87	2640	2565	2.92
90	89	30	15	2.67	4204	4298	2.18
90	89	30	20	2.58	4382	4522	3.09

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยชีวมวล จากแบบจำลองและจากการวัด (อภิชาติ สุดดีพงษ์, 2552)(ต่อ)

Curing Time (days)	Water Content, w_c (%)	Cement Content, C_i (%)	Biomass Ash (%)	$w_c/(C_i*(1+ka))$	Predicted Strength, q_{up} (kPa.)	Laboratory Strength, q_{ul} (kPa.)	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ (%)	
90	118	10	15	10.61	748	747	0.20	
90	118	10	20	10.26	780	785	0.62	
90	118	20	15	5.30	1780	1771	0.52	
90	118	20	20	5.13	1855	1888	1.72	
90	118	30	15	3.54	2955	2822	4.72	
90	118	30	20	3.42	3080	2994	2.88	
90	147	10	15	13.21	569	565	0.65	
90	147	10	20	12.78	593	587	0.98	
120	89	10	15	8.00	1128	1092	3.30	
120	89	10	20	7.74	1176	1138	3.31	
120	89	20	15	4.00	2683	2689	0.23	
120	89	20	20	3.87	2796	2851	1.92	
120	89	30	15	2.67	4454	4949	10.01	
120	89	30	20	2.58	4642	5336	13.01	
120	118	10	15	10.61	793	808	1.88	
120	118	10	20	10.26	826	840	1.62	
120	118	20	15	5.30	1886	1906	1.06	
120	118	20	20	5.13	1966	1983	0.88	
120	118	30	15	3.54	3130	3287	4.77	
120	118	30	20	3.42	3263	3497	6.70	
120	147	10	15	13.21	602	614	1.89	
120	147	10	20	12.78	628	748	16.06	
120	147	20	15	6.61	1433	1381	3.75	
120	147	20	20	6.39	1493	1469	1.66	
120	147	30	15	4.40	2378	2426	1.96	
120	147	30	20	4.26	2479	2544	2.55	
Mean Absolute Percent Error, MAPE							$\left(\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100 \right)$	8.08

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอยสองชนิด คือ เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าชีวมวล พร้อมทั้งเสนอสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียว โดยแปรผันปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 อิทธิพลของระดับความเค็มต่อคุณสมบัติทางกายภาพ การเพิ่มขึ้นและลดลงของสารประกอบเกลือในดินส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพของดินเปลี่ยนไป นั่นคือทำให้ขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกลดลง ส่งผลให้ดัชนีสภาพพลาสติกมีค่าลดลง การลดลงของขีดจำกัดเหลว อาจเกิดจากการลดลงของ Diffusion double layer

5.1.2 อิทธิพลของระดับความเค็มต่อกำลังอัดแกนเดียว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์แปรผันตามแรงดูดเมตริก (matric suction) และอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่มเดียวกัน ดินที่ระดับความเค็มต่ำจะมีค่าขีดจำกัดเหลวสูง ส่งผลให้ e/e_L มีค่าต่ำ และแรงดูดเมตริก จึงมีค่าสูง ดังนั้น ดินที่มีระดับความเค็มต่ำจึงมีกำลังอัดที่สูงกว่า

5.1.3 เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุกระจายตัว ในช่วงปริมาณเถ้าไม่เกินร้อยละ 25 ทำให้อนุภาคของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้ดีขึ้นส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล มีประสิทธิภาพเทียบเท่า 0.75 เท่าของปูนซีเมนต์ พารามิเตอร์ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่าสามารถนำมาใช้ร่วมกับพารามิเตอร์ปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ในการวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอยได้

5.1.4 แบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล จากพารามิเตอร์ปริมาณปูนซีเมนต์เท่าเทียบและพารามิเตอร์ปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ ผู้วิจัยได้เสนอแบบจำลองกำลังอัดแกนเดียว (unconfined compressive strength) ในรูปแบบของฟังก์ชันกำลัง (power function) ดังสมการที่ 4.4

$$q_u = \frac{A}{\left(\frac{w_c}{C_i(1+ka)}\right)^B} \quad (4.4)$$

เมื่อ A , B และ k เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ โดย A จะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และอายุบ่ม ในขณะที่ B มีค่าคงที่เท่ากับ 1.25 และ k มีค่าเท่ากับ 0.75

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มของดินซีเมนต์แก่ล่อยถ่านหินและแก่ชีวมวลแสดงดังสมการที่ 4.8

$$\left[\frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}} \right] = \left[\frac{w_c / C_i (1 + 0.75a)_{28}}{w_c / C_i (1 + 0.75a)_D} \right]^{1.25} (0.099 + 0.281 \ln D) \quad (4.8)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_D}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์แก่ที่อัตราการทรบที่มีค่า w_c/C ใด ๆ ที่อายุบ่ม D วัน และ $q_{(w_c/C)_{28}}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์แก่ที่ทรบค่า ที่มีค่า w_c/C ใด ๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน

แบบจำลองที่นำเสนอเมื่อใช้ทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์แก่ชีวมวล 2 ชนิด ให้ผลใกล้เคียงกับกำลังอัดที่วัดได้ จากการใช้แบบจำลองดังกล่าวทำนายกำลังอัดกับดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (CH) ที่ถูกนำเสนอโดย อภิชาติ สุกดีพงษ์ (2552) ให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงเช่นกัน โดยมีค่าความผิดพลาดของผลการทำนายจากค่า Mean Absolute Percent Error, MAPE เท่ากับ 8.08 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม สรุปได้ว่าแบบจำลองที่นำเสนอสามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์และแก่ล่อยที่มีระดับความเค็มต่าง ๆ ได้

5.2 ข้อเสนอแนะในการใช้สมการและงานวิจัยต่อไป

5.2.1 การใช้สมการแบบจำลองทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าจะต้องตรวจสอบให้แน่ใจก่อนว่าปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงค่า Liquidity Index ระหว่าง 1.0 – 2.0 และปริมาณเถ้ามีค่าไม่เกินร้อยละ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

5.2.2 ควรทำวิจัยเพิ่มกับดินเค็มที่มีสารประกอบเกลือชนิดอื่น ๆ เช่น แคลเซียมคลอไรด์, โซเดียมซัลเฟต และชนิดอื่น ๆ เพื่อตรวจสอบว่าพารามิเตอร์ A และ B ได้รับผลกระทบอย่างไรกับชนิดของดินเค็ม

5.2.3 ควรศึกษาถึงการพัฒนา กำลังอัดของดินเค็มด้วยโครงสร้างจุลภาคของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอย ที่ระดับความเค็มต่าง ๆ

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายการอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน, 2524 โครงการศึกษาและพัฒนาพื้นที่ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, ประจำปี 2525-2529, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- เกษม เพชรเกตุ, 2544 การศึกษาผลกระทบของโซเดียมคลอไรด์ สารอินทรีย์ และค่าความเป็นกรดต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ ผสมซีเมนต์แบบเปียก, การสัมมนาวิศวกรรมกรรมทาง ครั้งที่ 1, กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย และวราภรณ์ คุณาวานากิจ (2542). คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอย. การสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต, 7-19
- ัชชวาล เศรษฐบุตร, 2536 คอนกรีตเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ, บริษัทคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.
- เชิดชนินทร์ หอมมลทิน และคณะ, 2548 อิทธิพลของเกลือต่อดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์, การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10.
- ทิน เกตุรัตน์บวร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, (2540). ความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการแยกขนาดต่อกำลังอัด และการกักร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกของมอร์ตาร์, วารสาร กฟผ., 53-61
- ทิน เกตุรัตน์บวร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ เอกภพ อังสุวัฒนา, (2541). การใช้เถ้าถ่านหินแยกขนาดจากแม่เมาะในงานคอนกรีตกำลังสูง, วารสาร กฟผ., 36-45
- ดิเรก อุ่นตระกูล, 2531 การประเมินปัญหาและศักยภาพดินเค็มในบริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทรงพล บุญมาดี, 2529 ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 196 หน้า
- ประทีป ดวงเดือน, 2531 คุณสมบัติของดินทางกายภาพ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- พิชัย วิชัยดิษฐ์, 2527 การอ่านและการใช้แผนที่ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, เอกสารคู่มือเจ้าหน้าที่ของรัฐโครงการพัฒนาพื้นที่ดินเค็ม : ความรู้เรื่องดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- พินิจ ตั้งบุญเดิม, 2544 การศึกษาผลกระทบของเกลือต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์, การสัมมนาวิศวกรรมกรรมทาง ครั้งที่ 1, กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.
- ยงยุทธ โอสถสภา, 2520 ดินเค็มและดินโซดิก, ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 172 น.

- ยุทธนา รักษาชนม์ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2552 ถั่วลอถอย – วัสดุกระจายตัวในดินซีเมนต์.
เอกสารประกอบการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
นครราชสีมา. หน้า 251-256.
- ยุทธลักษณ์ ชูวรเชษฐ, 2548 การศึกษาระดับความเค็มที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินใน
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 136 น.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ รุ่งลาวัลย์ ราชัน, 2546 ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของ
ดินเหนียวซีเมนต์, วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา , 25 – 31 หน้า.
- สมชัย กกกำแหง, 2539 ศักยภาพการนำถั่วลอถอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้ประโยชน์, โยธาสาร, 31 -39
หน้า.
- สมชัย กกกำแหง, 2535 การนำถั่วลอถอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน, การ
ประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2535 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระราชา
ูปถัมภ์ 26–29, พฤศจิกายน, 2535.
- สมพงษ์ ถีรวงศ์, 2533 การวิจัยและพัฒนาของกรมพัฒนาที่ดิน, เอกสารประกอบการบรรยายวิชา
ปฐพีวิทยา 597, กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ. 35 น.
- สมหมาย สว่างกิจ และคณะ. (2535). การใช้ถั่วถ่านหินในการป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีต.
เอกสารการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2535, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ใน
พระบรมราชูปถัมภ์, 51-63.
- สมศรี อรุณินท์, 2523 รายงานการประชุมเรื่องดินเค็มที่ประเทศอินเดีย. วารสารดินและปุ๋ย 2, 138 -
147.
- อนิรุทธ์ ชงไชย และ สุเทพ นิ่มนวล, 2530 การใช้ประโยชน์ถั่วลอถอยในการเป็นวัสดุสร้างทาง
หลวง, รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อภิชาติ คำภาหาล้า และคณะ, 2551 กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินซีเมนต์ที่มีซัลเฟต, วารสารวิชาการ,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
- อภิชาติ คำภาหาล้า และคณะ, 2551 กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินซีเมนต์ที่มีซัลเฟตผสมเถ้าแกลบ, การ
ประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, กรุงเทพฯ.
- อภิชาติ สุกดีพงษ์, 2552 การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ถั่วลอถอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 80 หน้า
- อรุณี ชูวานิช, 2525 ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, เอกสารความรู้เรื่องดินเค็มภาคตะวันออกเฉียง
เหนือ, กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

เอกรินทร์ วัฒนสันติเจริญ และคณะ, 2548 คุณลักษณะทางเคมีและแร่ของดินซัลเฟตที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์, **การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10.**

เอกรินทร์ วัฒนสันติเจริญ และ คุณมาศ พันธุ์เดชะ, 2548 การปรับปรุงคุณสมบัติของดินขยายตัวที่มีค่าซัลเฟตสูงโดยใช้เถ้าลอยและปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5, **การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10.**

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

Ariizumi, A, (1977). Mechanism of lime stabilization, **Journal of JSSMFE**, Tsuchi-to-kiso. Vol.25. pp. 9-16.

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

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 : 97 - 107

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 : 42 – 63.**

Felt, E.J. (1955). Factors influencing physical properties of soil – cement mixture. **Highway Research Board**, Bulletin. 108 : 38 – 63.

- Horpibulsuk, S., Bergado, D.T., and Lorenzo, G.A. (2003), Compressibility of Cement Admixed Clays at High Water Content, **Geotechnique** **54**, No.2, pp.151-154.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S. (2003) .Assessment of strength development in cement – admixed high water content clay with Abrams law as a basic. **Geotechnique** **53**, No. 4 : 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., 130(10): 1096-1105.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Raksachon, Y. (2009). Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay, **Soils and Foundations**, 49(1): 85-98.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Suddeepong, A. (2011), “Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay”, **Construction and Building Materials** (in press).
- Igarashi, S., Bentur, A., and Mindess, S. (1996), Microhardness testing of cementations materials, **Advanced Cement Based Materials**, Vol.4, pp.48-57
- Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1972). Soil Stabilization, **Sydney, Butterworths** : 64 – 69
- Israel, W.R. (1982), Soil Stabilization and cold-Mix Recycle, **Koehring Bomag AMCA Int. Corp**, Springfield, United States, 65 p.
- Kamon, M. (1979), Study on engineering properties of very soft clay and it stabilization, Doctoral dissertation, **Kyoto University**, Kyoto, Japan (in Japanese).
- Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Honjo, Y. (1981), Deep mixing method using cement hardening agent, **Proc. of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Stockholm, pp. 721-724.
- Lambe, T.W. and Moh, Z.C. (1957). Improvements of Soil-Cement additives. Net.Res. Council, Washington,D.C., United State. **Highway Res. Board Bull.**183 : 38 - 47.
- Lambe, T.W., Mitchaels, A.S. and Moh, Z.C. (1959). Improvements of Soil-Cement with Alkali Compounds. **Highway Research Board**, Bulletin.241 : 67 – 103
- Leadarand, J.A. (1956). Some Engineering Aspects of Soil-Cement Mixture. Mid-South Section, **ASCE**, April 27 : 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 : 287 - 292
- Maner, A.W. (1952). Curing Soil Cement Base. Proceeding of Highway Research Board, Vol. 31, Washington, D.C., **National Research Council** : 540 - 548
- Metcalf, J.B. (1977) .Principle and application of cement and lime stabilization. **Australian Road Research Board** : 20 p
- Mindess, S. (1996), Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone, J.C. ed., **RILEM Technical Committee 108-ICC Report**, E&FN SPON, pp.48-63.
- Mitsui, K., Li, Z., Lange, D.A., and Shah, D.P. (1994), Relation between microstructure and mechanical properties of the paste-aggregate interface, **ACI Materials Journal**, Vol.91, No.1, pp.30-39.
- Modmoltin, C., Lu, J., M. and Onitsuka, K. (2004). Influence of humic acid and salt concentration on lime stabilized ariake clays and microstructure resure, **Chaineese Journal of Geotechnical Engineering**. Vol.26 No.2 pp. 281-286.
- Moh Z.C., (1962), Soil stabilization with cement and sodium additives, **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division**. Vol. 88 No.6 pp.81 – 105.
- 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** **40**, No. 2 : 303 – 305
- Ng, S.C. (1966). Cement Stabilization of Lateritic Soil, Master of Engineering **Thesis, Civil Engineering Program**, No. 125, Seato Graduate School of Engineering : 55 - 65
- Norling, L.T. and Peckard, R.G. (1958). Expedned Short – Cut Test Method for Detetmining Cement Factor for Sandy Soil. **Highway Research Board**, Bulletin. 198 : 20 - 31
- Okamura, T. and Terashi, M. (1975). Deep lime mixing method of stabilization for marine clays, **Proc., 5th Asian Regional conf. on soil Mech., and Found. Engineering**, Bangalore, India, 1, pp. 69-75.
- Onitsuka, K., Modmoltin, C., Kouno, M. and Negami, T. (2003). Effect of organic matter on lime and cement stabilized Ariake clays, **Journal of Geotech.,JSCE**. No.729/III-62, pp.1-13.
- Petrukhim, V.P. (1993). Construction of Structures on Saline Soils. **A.A.Balkema Publishers**, Brookfield.

- Pramojanee, P. (1982). A study of the relationship between salt affected soils and landforms in Amphoe kham Sakae Sang area, Nakon Ratchasima Prov. Thailand. **ITC**. Enchede, Netherlands. 155 p.
- Reinhold, F. (1955). Elastic Behavior of Soil-Cement Mixtures. **Highway Research Board**, Bulletin. 108 : 128 – 137
- Rhee, Y.H. (1982), Soil Stabilization with lime and Fly Ash, **Master of Engineering Thesis**, Asian Institute Technology.
- Ruengkrairergsa, T. (1982) . **Principal of Soil Stabilization. Group Training in Road Construction**. Bangkok , Thailand : 17 – 26.
- Sherwood, P.T. (1958). The effect of Sulphates on Cement Stabilization Clay. **Highway Research Board**, Bulletin. 198 : 45 – 54
- Sherwood, P.T. (1962). The effect of Sulphates on Cement and Lime Stabilization Soilsy. **Highway Research Board**, Bulletin. 355 : 98 - 107
- Terashi, M., Tanaka, H. and Okumura, T. (1997), Engineering properties of lime treated marine soils and DMM, **Proc. 6th Asian Reg. Conf. SMFE**, 1, pp. 191-194.
- Terrel, R.L., Barenberg, E.J., Michell, J.M. and Thomson, M.R. (1979) . **Soil stabilization in pavement structure a user's manual mixture design consideration**. Washington : Government Printing Office.
- U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils Agriculture**, Washington, D.C. 160 p.
- Winterkorn, H.F. and Chandrasekharn, E.C. (1951). Lateritic Soil and Their Stabilization. **Highway Research Board**, Bulletin. 44 : 10 – 29
- Wongsomsak, S. (1986), Salinization in Northeast Thailand. **Southeast Asian Studies 24 (2)**: 133-153.
- Yoder, E.J. (1967). Principle of Pavement Design. **John Wiley & Son., Inc.** New York. 569 p.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

วรวิทย์ โปธิจันทร์ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2553 การใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเค็ม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15 (The 15th National Covention on Civil Engineering), GTE 009., มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. จังหวัดอุบลราชธานี. 12-14 พฤษภาคม 2553.

วรวิทย์ โปธิจันทร์ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2554 การพัฒนากำลังอัดของดินเค็มซีเมนต์และเถ้าลอย. วารสารงานวิจัย ปีที่ 38. ฉบับที่ 1. วิศวกรรมสาร. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.

วรวิทย์ โปธิจันทร์ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2554 การวิเคราะห์กำลังอัดของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 (The 16th National Covention on Civil Engineering), GTE 002., มหาวิทยาลัยมหิดล. จังหวัดนครปฐม. 18-20 พฤษภาคม 2554. (อยู่ระหว่างรอนำเสนอ)



การใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเค็ม

APPLICATION OF CEMENT AND FLY ASH TO STRENGTH IMPROVEMENT OF SALINE SOIL

วรวิทย์ โปธิจันทร์ (Worawit Phojan)¹

สุขสันต์ หอพิบูลสุข (Suksun Horpibulsuk)²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (wora_phojan@yahoo.com)

²รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (suksun@g.sut.ac.th)

บทคัดย่อ : บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอย) ในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเค็มด้วยการผสมซีเมนต์และเถ้าลอย การวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยบางส่วนเพื่อเพิ่มกำลังอัดของดินเค็ม จะเห็นได้ว่าทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย โดยอาศัยตัวแปร clay-water/cement ratio ร่วมกับตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า เราสามารถทำนายกำลังอัดของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้ จากการศึกษาพบว่าที่อายุต่างๆ เถ้าลอยมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.90 เท่าของปูนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอย

ABSTRACT : This present paper investigates the influence of equivalent control, (moisture content, cement content and fly ash content) admixed with cement and fly ash to strength improvement of saline soil. This study presents the possibility of replacing cement with fly ash to improve strength of a saline soil. It is found that for all combinations of cement and water, strength increases with fly ash content. Based on the clay-water/cement ratio and the parameter equivalent cement content, the strength prediction equation for the saline soil is introduced. It is found that for curing time test, fly ash content is equal to 0.85 cement content for all combinations of water content, cement content and fly ash content.

KEYWORDS : Saline soil, Fly ash, Cement, Unconfined compressive strength, Clay-water/cement ratio

1. บทนำ

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เป็นอีกพื้นที่หนึ่งที่มีกรชายต้วในด้ำนวิศวกรรมโยธำอย่างมก และปัญหำที่พบในงำนวิศวกรรมปฐพีนี้คือ ปัญหำด้ำนการหดตัวและขยด้วของดิน ซึ่งมีสภพมจากดินเค็มและดินกรยด้ว พื้นที่ดินเค็มในภคตะวันออกเฉียงเหนือมีกว่ำ 18 ล้นไร่ และมีแนวโน้มนที่จะเพิ่มขึ้นทุกปี ทั้งนี้เนื่องจกสภพทางธรณีวิทยของพื้นที่ภคตะวันออกเฉียงเหนือวองอยู่บนหมวดหินสภคคภค ซึ่งมี

องค์ประกอบที่สำคัญเป็นเกลือหินประมณ 34 % ของพื้นที่ทั้งภค ดังนั้นจึงมีการแพร่กระจายของดินเค็มและน้ำเค็มในบริเวณกว่ำง [1] โดยที่เกลือส่งผลต่อความเค็มของน้ำใต้ดิน และน้ำเป็นด้วกลวงพกเกลือ ขึ้นมสู่ผิวดิน เมื่อน้ำระเหยไปหมด จะเหลือเกลือไว้ซึ่งเป็นสภคหลักทำให้อดินเค็ม

เมื่อบริเวณพื้นที่ที่มีความเค็มได้มีการก่อสร้างหรือมีการขุดดินในพื้นที่ดินเค็มไปใช้ในงานทางวิศวกรรมโยธานั้นจะต้องทำการปรับปรุงเสถียรภพของดินให้ดีขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยมีความคิดที่



จะทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเค็ม วิธีปรับปรุงดินวิธีหนึ่งที่เหมาะสมคือการผสมปูนซีเมนต์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และราคาไม่สูงนอกจากนี้กำลังอัดยังเพิ่มขึ้นในระยะสั้น ในการปรับปรุงดินในปริมาณที่มากต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง เพื่อเป็นการลดต้นทุนของการก่อสร้าง เราจำเป็นต้องลดปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ที่มีราคาถูก การแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้กำลังอัดของดินเพิ่มขึ้นและช่วยให้ดินซีเมนต์มีความทนทาน (Durability) เพิ่มขึ้นด้วย เถ้าลอยที่เป็นวัสดุที่เหลือ (Byproduct) จากการเผาไหม้ของถ่านหิน จัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่เป็นที่ยอมรับในงานโครงสร้างทั่วไป โดยเฉพาะในประเทศไทยมีการนำเถ้าลอยมาใช้ในการผสมคอนกรีต เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์มีอย่างแพร่หลาย [2] งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการใช้เถ้าลอยถ่านหิน ในการปรับปรุงคุณภาพดินเค็มร่วมกับซีเมนต์ โดยมุ่งศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอย) ต่อการพัฒนากำลังอัดแกนเดียว

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการประยุกต์การใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยถ่านหิน เพื่อศึกษากำลังอัดของดินเค็ม โดยจะศึกษาถึงการพัฒนากำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ในพจน์ของอัตราส่วน ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอย ที่มีเปลี่ยนแปลงค่าของน้ำในดินต่อปริมาณซีเมนต์

2.1 ตัวอย่างดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย

ดินตัวอย่างที่จะใช้ในงานวิจัยนี้เก็บในบริเวณ ตำบลท่าหลวง อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่ระดับความลึก 1.00 – 1.50 เมตรจากผิวดิน มีความเค็มอยู่ที่ 26 dS/m. จัดว่าเป็นดินเค็มจัด ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับ 35% ดินดังกล่าวมีปริมาณดินทราย : ดินตะกอน : ดินเหนียว เท่ากับ 17 : 45 : 38 มีค่าความตึงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ค่าขีดจำกัดเหลว และค่าขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 43% และ 24% ตามลำดับ ดินประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกต่ำ (CL) ด้วยการจัดจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified soil classification system, USCS) องค์ประกอบทางเคมีของดินเค็มดังตารางที่ 1 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ใน

การศึกษาคือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยถ่านหินได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินแสดงดังตารางที่ 2 ดินตัวอย่างถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 เพื่อแยกเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ออก และทำการปรับแก้ปริมาณความชื้นในดินให้มีค่า Liquid index (LI) เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของดินตัวอย่าง

คุณสมบัติทางเคมี	CL
1. Electrical conductivity (dS/m.)	26.00
2. pH	5.3
3. Sulfate (ppm)	19.08
4. Na (ppm)	3,700
5. Ca (ppm)	2,194
6. Mg (ppm)	259.8
7. K (ppm)	101.1
8. CEC (NH ₄ OAc) (me/100g)	16.974
9. %ESP	94.819

***ทดสอบโดย กรมพัฒนาที่ดิน เขต 5 จังหวัดขอนแก่น

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

Chemical composition (%)	FA
SiO ₂	45.69
Al ₂ O ₃	24.59
Fe ₂ O ₃	11.26
CaO	12.15
MgO	2.87
SO ₃	1.57
Na ₂ O	0.07
K ₂ O	2.66
LOI	1.23

2.2 การเตรียมตัวอย่างดินเค็มซีเมนต์ และเถ้าลอย

ดินตัวอย่างจะถูกปรับแก้ปริมาณความชื้นต่างๆ (LI= 1.0 , 1.5 และ 2.0) นำมาผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ตามอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 30 ของน้ำหนักดิน และปริมาณเถ้าลอย 0 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นบรรจุตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าลอยในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร หลังจากนั้นอีก 24 ชั่วโมง ทำการลดตัวอย่างดินเค็ม



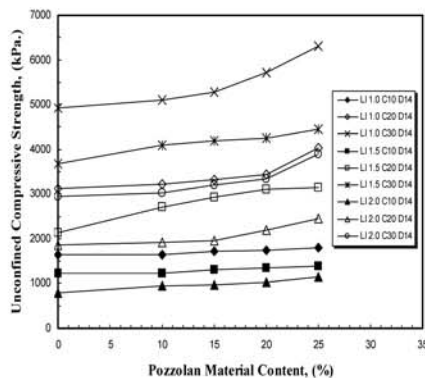
ซีเมนต์ได้ล่อยออกจากแบบหล่อและห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหาร บ่มในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7, 14, และ 28 วัน เมื่อครบอายุบ่ม นำตัวอย่างออกจากฟิล์มถนอมอาหาร แล้วนำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทันที

2.3 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ก่อนทำการทดสอบจะต้องทำการวัดขนาด ความสูง และ เส้นผ่าศูนย์กลางให้ละเอียด 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้ Vernier caliper ทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวด้วยอัตราเร็วในการกด 1.0 เปอร์เซนต์ ของความสูงตัวอย่างดินต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างดินวิบัติ ในระหว่างการทดสอบบันทึกขนาด น้ำหนักและความสูงที่เปลี่ยนแปลงเพื่อหาล้างอัดแกนเดียวสูงสุด

3. ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์ได้ล่อย มีปริมาณความชื้นสามค่าผสมกับปูนซีเมนต์และได้ล่อยใน อัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์และได้ล่อยที่อายุบ่ม 28 วัน

จากภาพที่ 1 พบว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์ และได้ล่อยที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณได้ล่อยในทุก อัตราส่วนผสม กำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์ได้ล่อยมีค่า สูงขึ้น ตามการลดลงของปริมาณความชื้นและการเพิ่มขึ้นของ ปริมาณซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณได้ล่อย เปรียบเสมือนการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ให้กับดินซีเมนต์ [3]

การประยุกต์ใช้หลักการดังกล่าวร่วมกับตัวแปรปริมาณซีเมนต์ เทียบเท่า [4] ดังสมการที่ 1

$$C_e = kC_i F \tag{1}$$

เมื่อ C_e คือปริมาณซีเมนต์เทียบเท่า C_i คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่ เริ่มต้น k คือตัวแปรประสิทธิภาพ และ F คือปริมาณได้ล่อย ดังนั้นปริมาณซีเมนต์ทั้งหมด (C) ที่มีอยู่ในดินจึงมีค่าเท่ากับ

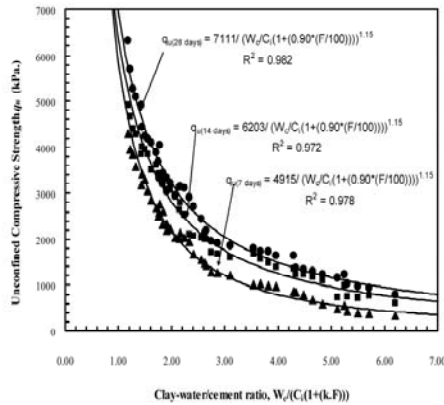
$$C = C_i + C_e \tag{2}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดิน ต่อปริมาณปูนซีเมนต์ สามารถหาได้โดยการรวมสมการที่ (1) และ (2) เข้ากับตัวแปรปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (w_c/C) ที่อายุบ่มต่างๆ ได้ดังสมการที่ 3

$$q_u = \frac{A}{\left(\frac{w_c}{C_i + C_e}\right)^B} \tag{3}$$

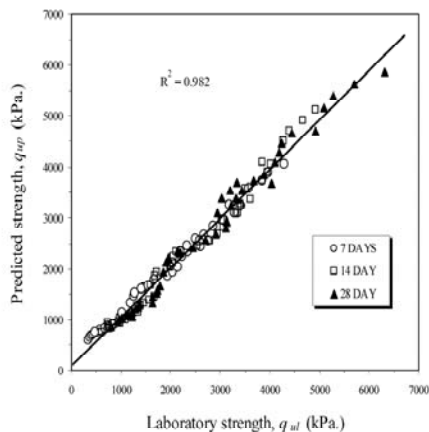
เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ และ q_u กำลังอัดที่อายุบ่มใดๆ พารามิเตอร์ A, B และ k สามารถหาได้จากการทำ Non-linear regression และสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด แกนเดียวและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ ดังสมการที่ 4

$$q_u = \frac{A}{\left[C_i \left[1 + \left(k \cdot \left(\frac{F\%}{100} \right) \right) \right] \right]^B} \tag{4}$$



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ ที่อายุบ่มต่างๆ

ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ ที่อายุบ่มต่างๆ จากการศึกษาพบว่า พารามิเตอร์ *A* มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al.[5] พารามิเตอร์ *B* มีค่าอยู่ประมาณคงที่เท่ากับ 1.15 ไม่แปรผันตามอายุบ่ม และ *k* มีค่าเท่ากับ 0.85 การที่ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม เนื่องจากเด็ลลอสทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายอนุภาคดินซีเมนต์ [4] ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นการพัฒนากำลังอัดจึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลักซึ่งถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์ *A* เท่านั้น



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวในห้องปฏิบัติการ (q_{ul}) และกำลังอัดแกนเดียวที่ได้จากสมการทำนายกำลังอัด (q_{up})

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ (q_{ul}) และค่ากำลังอัดที่ได้จากสมการทำนายกำลังอัดสมการที่ 4 (q_{up}) จะเห็นได้ว่าผลการทำนาย (q_{up}) ใกล้เคียงกับผลทดสอบ (q_{ul}) อย่างมากโดยเมื่อทำการวิเคราะห์แบบ Linear regression พบว่า ค่าจากสมการถดถอย R^2 มีค่าถึง 0.982 สิ่งนี้เป็นการยืนยันให้เห็นในทางปฏิบัติเบื้องต้นว่า เราสามารถใช้สมการทำนายกำลังอัดที่นำเสนอในสมการที่ 4 ในการประมาณกำลังอัดของดินเต็มผสมซีเมนต์ได้

4. สรุปผล

จากการศึกษากำลังอัดของดินเต็มซีเมนต์และเด็ลลอส ถ่านหินสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 เด็ลลอสมีประสิทธิภาพเทียบเท่าเท่ากับ 0.85 เท่าของปูนซีเมนต์ (เท่ากับว่าในการเติมปูนซีเมนต์ 20 เปอร์เซ็นต์ของดินแห้ง และเด็ลลอส 25 เปอร์เซ็นต์ของปูนซีเมนต์ เทียบได้กับการเติมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเท่ากับ 24.25 เปอร์เซ็นต์) สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม

4.2 ตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่ากับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ สามารถใช้ในการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์และเด็ลลอสได้

5. บรรณานุกรม

[1] อรุณี ชูระนิม, (2525) ดินเต็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, เอกสารความรู้เรื่องดินเต็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

[2] Mindess, S., (1996). Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone, J.C. ed., RILEM Technical Committee 108-ICC Report, E&FN SPON, pp.48-63.

[3] Rachan, R., Chim-oye, N., and Horpibulsuk, S. (2009). Application of biomass fly ash as a pozzolanic material for stabilization of low swelling clay, *Lowland Technology International*, 11(1):11-19.

[4] อภิชาติ สุดดีพงษ์, รุ่งลาวัลย์ ราชัน และสุชสันต์ หอพิบูลสุข, (2009) ตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า-พารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์ การพัฒนา กำลังอัดของดินซีเมนต์และเด็ลลอส, *การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา*



- [5] Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S. (2003). Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with abrams' law as a basis, *Geotechnique*, 53(4):439-444

ที่ ศธ.0514.4.1.5/



คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
จังหวัดขอนแก่น 40002

21 มกราคม 2554

เรื่อง แจ้งการตีพิมพ์บทความ

เรียน นายวรวิทย์ โพธิ์จันทร์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง “การพัฒนากำลังอัดของดินเค็มผสมซีเมนต์และเถ้าลอย” เพื่อพิจารณาลงตีพิมพ์ในวิศวกรรมสาร มข. นั้น

บัดนี้ กองบรรณาธิการพิจารณาแล้ว เห็นสมควรตีพิมพ์บทความของท่านลงในวิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 38 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม-มีนาคม 2554 ฉะนั้นจึงขอแจ้งให้ท่านชำระเงินเพื่อเป็นค่าตีพิมพ์บทความ จำนวน 1,000 บาท (หนึ่งพันบาทถ้วน) โดยโอนเข้าบัญชีเงินรายได้ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (คณะวิศวกรรมศาสตร์) เลขที่บัญชี 551-3-02662-6 ธนาคารไทยพาณิชย์ สาขามหาวิทยาลัยขอนแก่น พร้อมทั้งส่งหลักฐานการโอนเงินมายังกองบรรณาธิการวิศวกรรมสาร มข. หมายเลขโทรสาร 043-362142 E-mail: enjournal@kku.ac.th หรือชำระเป็นเงินสดที่เจ้าหน้าที่ประจำวิศวกรรมสาร มข. ตึกเพียรวิจิตร ชั้น 7 ภายในระยะเวลา 2 สัปดาห์ หากพ้นระยะเวลาที่กำหนด จะถือว่าท่านสละสิทธิ์ในการตีพิมพ์บทความ

จึงเรียนมาเพื่อทราบและดำเนินการต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ปริญญา จินดาประเสริฐ)

บรรณาธิการ

วิศวกรรมสาร มข.

โทร. 043-362145-6 ต่อ 706 โทรสาร 043-362142

หมายเหตุ : หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติมกรุณาติดต่อ คุณสุธารัตน์ สุทธิสาย (เจ้าหน้าที่ประจำวิศวกรรมสาร มข.)

ที่อยู่ : วิศวกรรมสาร มข. ตึกเพียรวิจิตร ชั้น 7 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

E-mail : enjournal@kku.ac.th

การพัฒนากำลังอัดของดินเค็มผสมซีเมนต์และเถ้าลอย

วรวิทย์ โพธิ์จันทร์¹⁾ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข²⁾

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย และอายุบ่ม) ต่อกำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยและมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 25 ของปริมาณปูนซีเมนต์ เถ้าลอยช่วยให้อนุภาคของดินเค็มและปูนซีเมนต์กระจายตัวและสัมผัสกันได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีขึ้น กำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมต่างๆ สามารถประมาณได้โดยอาศัยพารามิเตอร์ clay-water/cement ratio ร่วมกับตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า สำหรับการผสมเพิ่มเถ้าลอยในอัตราส่วนน้อยกว่าร้อยละ 25 เถ้าลอยมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.75 เท่าของปูนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างดิน น้ำ ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย

คำสำคัญ: ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า, เถ้าลอย, ปูนซีเมนต์, วัสดุกระจายตัว, ดินเค็ม

¹⁾ นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา 30000,
อีเมล: worawit_phojan@yahoo.com

²⁾ รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา 30000,
อีเมล: suksun@g.sut.ac.th

* Corresponding Author

วรวิทย์ โพธิ์จันทร์ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข

STRENGTH DEVELOPMENT IN BLENDED CEMENT ADMIXED SALINE SOIL

Worawit Phojan^{*1)} and Suksun Horpibulsuk²⁾

Abstract

This present paper investigates influential factors (water content, cement content, fly ash content and curing time) on strength development in saline soil admixed with cement and fly ash. It is found that for a particular cement content, the strength of admixed saline clay increases with fly ash content and the highest strength is attained at 25% fly ash. Fly ash disperses the soil-cement clusters into smaller clusters and increases the reactive surface, hence strength improvement. Based on the clay-water/cement ratio and the parameter equivalent cement content, the strength prediction equation for the cement admixed saline soil is introduced. For fly ash content less than 25%, fly ash content is equivalent to 0.75 cement content for all combinations of water content, cement content and fly ash content.

Keywords: equivalent cement content, fly ash, cement, disperse, saline soil

^{*1)} M.Eng. Scholar, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, E-mail: worawit_phojan@yahoo.com

²⁾ Professor, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, E-mail: suksun@g.sut.ac.th

* Corresponding Author

การพัฒนาแก้ปัญหาล้างดินเค็มซีเมนต์แก้ด้อย

1. บทนำ

ดินเค็ม (Saline Soils) หมายถึงดินที่ได้รับอิทธิพลจากเกลือ (Salt affected soils) โดยทั่วไปเกลือที่พบในดินเค็มมักเกิดจากการรวมตัวของธาตุที่มีประจุบวกพวกโซเดียม, แคลเซียม, แมกนีเซียม และโพแทสเซียม กับธาตุประจุลบเช่น คลอไรด์, ซัลเฟต, คาร์บอเนต, โบคาร์บอเนต และไฮเดียมคาร์บอเนต

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นพื้นที่ที่มีปัญหาในงานวิศวกรรมปฐพีจากดินเค็มและดินกระจายตัว พื้นที่ดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีกว่า 18 ล้านไร่ และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นทุกๆ ปี ทั้งนี้เนื่องจากสภาพพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีองค์ประกอบของเกลือหินประมาณร้อยละ 34 ของพื้นที่ทั้งภาค ดังนั้นจึงมีการแพร่กระจายของดินเค็มและน้ำเค็มในบริเวณกว้าง (Arune, 1982) ดินเค็มเกิดจากการที่น้ำนำพาของเกลือขึ้นมาสู่ผิวดิน เมื่อน้ำระเหย เกลือจะปนเปื้อนอยู่ในดิน

เกลือที่มีอยู่ในดินในมวลดินมีผลถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เกลือที่แทรกอยู่ในโพรงระหว่างอนุภาคดินอาจเกิดการแตกตัวเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation) เช่น โซเดียม (Na⁺) และมีผลให้ดินเกิดการกระจายตัว (Petrukhin, 1993) นอกจากนี้ โซเดียมคลอไรด์ที่อยู่ในดินเมื่อละลายน้ำจะทำให้อนุภาคของเม็ดดินเกิดการกระจายตัวและการบวมตัว (Israel, 1982)

Davidson (1961) ได้รายงานว่าประจุลบที่มีอยู่ในอนุภาคของดิน (ซัลเฟตและคลอไรด์) มีผลต่อการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ โดยอาจหน่วงการแข็งตัวของดินซีเมนต์ ดินที่มีสารประกอบของซัลเฟตผสมอยู่เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์จะเกิดการบวมตัวและทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

ดังนั้นเมื่อนำดินจากพื้นที่ที่มีความเค็มมาใช้ในงานทางวิศวกรรมโยธา จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม (การกระจายตัวและการบวมตัว) ให้ดีขึ้น วิธีปรับปรุงดินวิธีหนึ่งที่เหมาะสมคือการใช้ปูนซีเมนต์ วิธีการลดต้นทุนของการก่อสร้างวิธีหนึ่งคือ การแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ที่มีราคาต่ำ

การแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้กำลังอัดของดินเพิ่มขึ้นและช่วยให้ดินซีเมนต์มีความคงทน (Durability) เพิ่มขึ้นด้วย การใส่เกลือในดินซีเมนต์จะช่วยให้อนุภาคของดินซีเมนต์กระจายตัวและสัมผัสกับน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น นอกจากนี้ การใส่เกลือในดินซีเมนต์เปรียบเสมือนการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ให้กับดินซีเมนต์ (Yuthana, 2008; Horpibulsuk et al., 2009; Apichat, 2009 and Horpibulsuk et al., 2011)

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในของการประยุกต์การใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และแก้ด้อย (Class F) ผ่านหิน ในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเค็มธรรมชาติ โดยแปรผันปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณแก้ด้อย และอายุปฐพี

2.1 ตัวอย่างดิน ปูนซีเมนต์และแก้ด้อย

ดินตัวอย่างที่จะใช้ในงานวิจัยนี้เก็บในบริเวณ ตำบลท่าหลวง อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ที่ระดับความลึก 1.00 – 1.50 เมตรจากผิวดิน มีความเค็มอยู่ที่ 26 dS/m. จัดว่าเป็นดินเค็มจัด ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 38 ดินดังกล่าวมีปริมาณดินทราย : ดินตะกอน : ดินเหนียว เท่ากับ 17 : 45 : 38 มีค่าความด่างจำเพาะเท่ากับ 2.63 ค่าซิดจังก์ทีล และค่าซิดจังก์ทีลพลาสติกเท่ากับร้อยละ 43 และ 24 ตามลำดับ ดินประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกค่า (CL) ด้วยการใช้ระบบดินแบบเอกภาพ (Unified soil classification system, USCS) องค์ประกอบทางเคมีของดินเค็มแสดงดังตารางที่ 1 ร้อยละของเกลือที่ละลายทั้งหมดในดินเท่ากับร้อยละ 60 ร้อยละของโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ (%ESP) และอัตราการดูดซับโซเดียม (SAR) เท่ากับ 94.82 และ 3.34 ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวแสดงถึงคุณสมบัติของดินเหนียวกระจายตัว

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้ด้อยผ่านหินได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

วรัทยา โพธิ์จันทร์ และ สุชานต์ หอพิบูลสุข

จังหวัดลำปาง องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน แสดงดังตารางที่ 2 ดินตัวอย่างถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 เพื่อแยกเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ออก และทำการปรับปริมาณความชื้นในดินให้มีค่า Liquidity index (LI) เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของดินตัวอย่าง

คุณสมบัติทางเคมี	CL
1. Electrical conductivity (dS/m.)	26.00
2. pH	5.3
3. Chloride, Cl (ppm)**	11,600
4. Sulfate, SO ₄ (ppm)**	400
5. Sodium Percentage (%)	60
6. Sodium Absorption Ratio (SAR) meq/l	3.34
7. CEC (NH ₄ OAc) (me/100g)	16.974
8. Exchangeable Sodium Percentage (%ESP)	94.819

ทดสอบโดย **คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และกรมพัฒนาที่ดิน เขต 5 จังหวัดขอนแก่น

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย (Class F)

Chemical composition (%)	FA
SiO ₂	45.69
Al ₂ O ₃	24.59
CaO	12.15
MgO	2.87
SO ₃	1.57
LOI	1.23

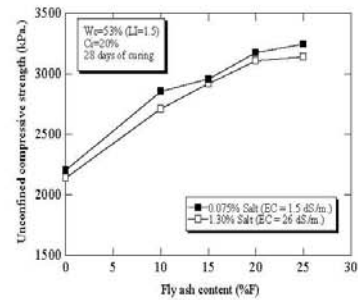
2.2 การเตรียมตัวอย่างดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอย

ดินตัวอย่างถูกปรับให้มีปริมาณความชื้นต่างๆ (LI = 1.0 , 1.5 และ 2.0) และนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 30 ของน้ำหนักดิน และปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 0 ถึง 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จนเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้น ดินผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยถูกบรรจุในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร เมื่อได้อายุบ่ม 24 ชั่วโมง ตัวอย่างดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอย ถูกถอดออกจากแบบหล่อและห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหาร

และบ่มในควบคุมอุณหภูมิ เมื่อได้อายุบ่มที่ต้องการ (7, 14, 28, 60 และ 90 วัน) นำตัวอย่างออกจากฟิล์มถนอมอาหาร แล้วนำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทันที ด้วยอัตราการกดร้อยละ 1 ของความสูงตัวอย่างต่อนาที

3. ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

รูปที่ 1 และตารางที่ 3 แสดงถึงอิทธิพลของความเค็มต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอย โดยการลดความเค็มตามธรรมชาติ (EC = 26 dS/m. หรือประมาณร้อยละ 1.3 ของปริมาณดิน) วิธีการลดทำได้โดยการนำตัวอย่างดินเค็มมาแช่น้ำและปล่อยให้ น้ำไหลซึมออกไปจากดินซ้ำๆ ซึ่งน้ำจะนำพาความเค็มออกไปจนเหลือระดับความเค็มอยู่ที่ EC = 1.5 dS/m. (หรือประมาณร้อยละ 0.075) และทำการผสมตัวอย่างดินดังกล่าวกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 53 (LI = 1.5) ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักดิน และปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 0 ถึง 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ทำการบ่มที่อายุ 28 วันแล้วทดสอบกำลังอัดแกนเดียว



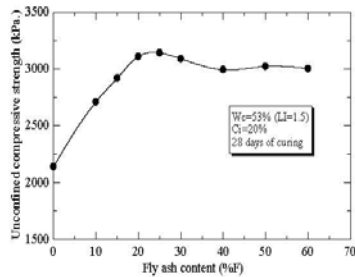
รูปที่ 1 อิทธิพลของความเค็มต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์เถ้าลอยถ่านหิน ที่อายุบ่ม 28 วัน

ตารางที่ 3 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

ปริมาณเถ้าลอย	กำลังอัดแกนเดียว (kPa)	
	0.075% Salt	1.30% Salt
0%	2205	2140
10%	2854	2711
15%	2967	2918
20%	3176	3109
25%	3247	3141

การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย

รูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของสารประกอบเกลือในดินมีผลให้กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินซีเมนต์มีค่าสูงขึ้น รูปที่ 2 แสดงผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 53 (LI = 1.5) ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย กำลังอัดของดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และค่ากำลังอัดในช่วงปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 20 ถึง 30 มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก หลังจากนั้นกำลังอัดมีค่าลดลง ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสม (ให้กำลังอัดสูงสุด) คือร้อยละ 25



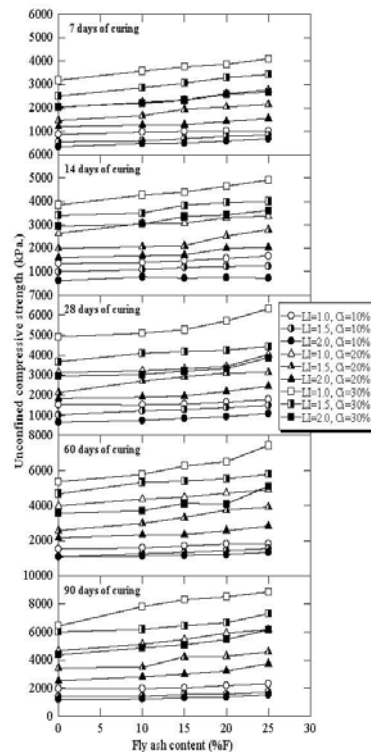
รูปที่ 2 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยผ่านหินที่อายุปม 28 วัน

รูปที่ 3 แสดงการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์และอายุปมต่างๆ สำหรับเถ้าลอยในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 25 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยสำหรับทุกอัตราส่วนผสม ในอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่เหมือนกัน ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าให้กำลังอัดที่ต่ำกว่า เนื่องจากระยะห่างระหว่างอนุภาคดิน (Pore space) มีมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2009) และทุกอัตราส่วนผสมที่เท่ากันกำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุปม

เมื่อพิจารณาประกอบกับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าลอยจากรูปที่ 3 พบว่าการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยในปริมาณไม่เกินร้อยละ 25 ของปูนซีเมนต์ทำให้

กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเปรียบเสมือนการเพิ่มปูนซีเมนต์ให้กับดินซีเมนต์ ดังนั้น

$$C_u = kF \tag{1}$$



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าลอยของดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อายุปมต่างๆ

เมื่อ C_u คือปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า k คือตัวแปรประสิทธิภาพ และ F คือปริมาณเถ้าลอยซึ่งเป็นปริมาณโดยน้ำหนักของดินแห้ง สมการที่ 1 สามารถจัดรูปได้ใหม่ในพจน์ของปริมาณปูนซีเมนต์ได้ดังสมการที่ 2

$$C_u = kCF \tag{2}$$

เมื่อ C_c คือปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่เริ่มต้น F คือปริมาณเถ้าลอยโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมด (C) ที่มีอยู่ในดินเหนียวจึงเท่ากับ

วราวิทย์ โพธิ์จันทร์ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข

$$C = C_i + C_o$$

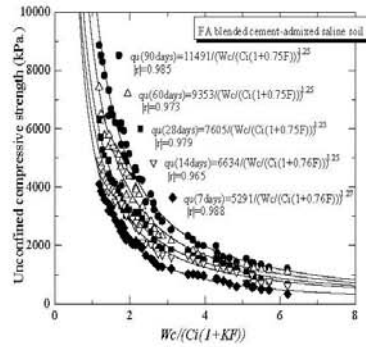
$$C = C_i (1 + kF) \tag{3}$$

โดยการรวมสมการที่ 2 และ 3 เข้ากับตัวแปรอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk and Miura, 2001; Muira et al., 2001 และ Horpibulsuk et al., 2003) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่อายุบ่มใดๆ แสดงดังนี้

$$q_u = \frac{A}{\left(\frac{w_c}{C_i(1+kF)}\right)^B} \tag{4}$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ และ q_u คือกำลังอัดที่อายุบ่มใดๆ พารามิเตอร์ A , B และตัวแปรประสิทธิภาพ k สามารถหาได้จากการทำ Multi-regression analysis รูปที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์แฉะล่อยถ่านหิน ที่อายุต่างๆ ด้วยพารามิเตอร์อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ที่นำเสนอสามารถใช้ได้กับดินซีเมนต์แฉะล่อยที่ปริมาณความชื้นในช่วง 1.0 ถึง 2.0 เท่าของ Liquidity Index ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 ถึง 30 ของน้ำหนักดินแห้ง และปริมาณแฉะล่อยที่ร้อยละ 0 ถึง 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

ค่าของพารามิเตอร์ A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2003) ในขณะที่ B และ k มีค่าประมาณคงที่ สำหรับทุกอายุบ่มและอัตราส่วนผลระหว่างปูนซีเมนต์ น้ำ และแฉะล่อยจากการศึกษาพบว่า B มีค่าประมาณ 1.25 และ k มีค่าเท่ากับ 0.75 ดังนั้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าแฉะล่อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพเป็น 0.75 เท่าของปูนซีเมนต์หรือกล่าวอย่างง่ายว่า ในการเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ของดินแห้ง และแฉะล่อยร้อยละ 25 ของปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 5 ของดินแห้ง) เทียบได้เท่ากับเติมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเท่ากับร้อยละ 23.75 ของดินแห้ง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์

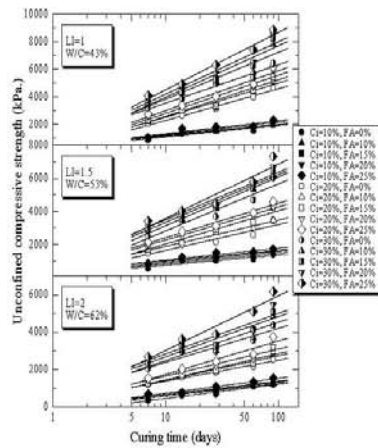
4. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณแฉะล่อย และปริมาณความชื้นต่างๆ ของดินซีเมนต์แฉะล่อย จากการสังเกตพบว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม เนื่องจากแฉะล่อยทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายอนุภาคดินซีเมนต์ ปฏิกิริยาปอลิโซลนิกเกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้น การพัฒนากำลังอัดกับเวลาจึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลักซึ่งถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์ A เท่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 5

$$\frac{q_{D1}}{q_{D2}} = \frac{A_{D1}}{A_{D2}} = \text{ค่าคงที่} \tag{5}$$

เมื่อ q_{D1} คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าที่อายุบ่ม D_1 วัน และ q_{D2} คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่าที่อายุบ่ม D_2 วัน A_{D1} และ A_{D2} คือพารามิเตอร์ A ที่สอดคล้องกับอายุบ่ม D_1 และ D_2 ตามลำดับ

การพัฒนาทำาลังอัดของดินเค็มซีเมนต์เฝ้าลอลย

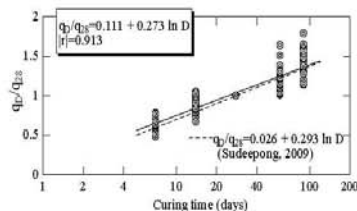


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม ของดินซีเมนต์เฝ้าลอลย

จากหลักการดังแสดงด้วยสมการที่ 5 ผู้วิจัยได้ ทำการ Normalization ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว (q_u) กับอายุบ่ม (D) ภายใต้สภาวะตัวแปรต่างๆ คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเฝ้าลอลย และปริมาณความชื้น รูปที่ 6 โดยใช้ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน เป็นค่าอ้างอิง ผลจากการ Normalization ของผลทดสอบทั้งสองจะได้

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.111 + 0.273 \ln D \quad (6)$$

เมื่อ q_D และ q_{28} คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์ที่อายุบ่ม D ใดๆ และกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์เฝ้าที่อายุบ่ม 28 วันตามลำดับ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มภายใต้สภาวะตัวแปรต่างๆและการ Normalization

5. สมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของตัวแปรควบคุม

ในการสร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์เฝ้าลอลย พารามิเตอร์ B เท่ากับ 1.25 ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ k ของเฝ้าลอลย 0.75 ดังนั้นเขียนอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์เฝ้าลอลยที่อายุบ่มค่าหนึ่งได้ดังสมการที่ 7

$$\left[\frac{q_{(w_c/c)_1}}{q_{(w_c/c)_2}} \right] = \left[\frac{(w_c/c)_2}{(w_c/c)_1} \right]^{1.25} \quad (7)$$

เมื่อ $q_{(w_c/c)_1}$ และ $q_{(w_c/c)_2}$ กำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าและกำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่า ตามลำดับ ส่วน $(w_c/c)_1$ และ $(w_c/c)_2$ คือ อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต้องการทราบค่าและทราบค่าตามลำดับ

จากการรวมสมการที่ 6 และ 7 เข้าด้วยกัน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ในช่วง 1 ถึง 6 และอายุบ่มในช่วงความชื้นของดินอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 2.0 เท่าของ Liquidity index ดังนี้

$$\left[\frac{q_{(w_c/c)_D}}{q_{(w_c/c)28}} \right] = \left[\frac{w_c/c_D(1+0.75F)_{28}}{w_c/c_D(1+0.75F)_D} \right]^{1.25} (0.111 + 0.273 \ln D) \quad (8)$$

เมื่อ $q_{(w_c/c)_D}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินเค็มซีเมนต์เฝ้าลอลยที่ต้องการทราบที่มีค่า $(w_c/c_D(1+0.75F))_D$ ใดๆ ที่อายุบ่ม D วัน และ $q_{(w_c/c)28}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เฝ้าลอลยที่ทราบค่า ที่มีค่า $(w_c/c_D(1+0.75F))_{28}$ ใดๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน

6. บทสรุป

จากการศึกษาทำาลังอัดของดินเค็มซีเมนต์และเฝ้าลอลยถ่านหินสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 เฝ้าลอลยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุกระจายตัวในช่วงปริมาณเฝ้าลอลยไม่เกินร้อยละ 25 ทำให้อุณหภูมิของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของดินเค็มสูงขึ้น

วราทิพย์ โพธิ์จันทร์ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุท

6.2 สำหรับการผสมเพิ่มเถ้าลอยในอัตราส่วนน้อยกว่าร้อยละ 25 เถ้าลอยมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.75 เท่าของปูนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม

6.3 ตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่ากับความสัมพัทธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ สามารถใช้ในการทำนายกำลังอัดของดินเค็มผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

Apichat Suddeepong, Runglawan Rachan and Suksun Horpibulsuk. 2009., Equivalent Cement Content – a New Parameter for Analysis of Strength Development in Blended Cement Admixed Clay, The 14th National Convention on Civil Engineering. Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima. (In Thai).

Aruneey Yuvaniyama. 1982., Saline Soils in The Northeast of Thailand, Land Development Department, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, (In Thai).

Yuthana Raksachon. 2008., Unconfined Compressive strength and Microstructure of compacted Cement-Fly Ash Stabilized Clay, Degree of Master of Engineering in Civil Engineering, Suranaree University of Technology. (In Thai).

Davidson, D.T. (1961). Soil stabilization with Portland cement. Highway Research Board:200 p

Horpibulsuk, S. and Miura, N. (2001). A new approach for studying behavior of cement stabilized clays, Proc. 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, Turkey, 3: 1759-1762.

Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S. (2003). Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis, Geotechnique, 53(4): 439-444.

Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Raksachon, Y. (2009). Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay, Soils and Foundations, 49(1): 85-98.

Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Suddeepong, A. (2011). "Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay", Construction and Building Materials.

Israel, W.R. (1982). Soil stabilization and cold-mix recycle. Koehring Bomag AMCA Int. Corp, Springfield, United States. 65 p.

Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T.S. (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, Soils and Foundations, 41(5): 33-45.

Petrukhim, V.P. (1993). Construction of Structures on Saline Soils. A.A.Balkema Publishers, Brookfield.

Rachan, R., Chim-oye, N., and Horpibulsuk, S. (2009). Application of biomass fly ash as a pozzolanic material for stabilization of low swelling clay, Lowland Technology International, 11(1):11-19.

ประวัติผู้เขียน

นายวรวิทย์ โพธิ์จันทร์ เกิดเมื่อวันที่ 9 เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนมหาไถ่ศึกษาชาย ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ในปีการศึกษา 2534 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนขอนแก่นวิทยายน อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ในปีการศึกษา 2537 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาช่างก่อสร้างจากวิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น ในปีการศึกษา 2540 และสำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาช่างก่อสร้างจากวิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น ในปีการศึกษา 2542 หลังจากสำเร็จการศึกษามีความตั้งใจอยากเป็นวิศวกรโยธา จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี (หลักสูตร วศบ. 4 ปี) ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2547 หลังจบการศึกษาได้ทำงานในบริษัทที่ปรึกษางานก่อสร้าง ในตำแหน่งวิศวกรสนาม เป็นเวลา 3 เดือน ต่อจากนั้นได้เข้ามาทำงานในสายงานวิชาการ ในตำแหน่งอาจารย์ สอนวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา ในมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รับผิดชอบในวิชาปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ และปฏิบัติการวิศวกรรมการทาง จึงเกิดความชอบในสาขาดังกล่าวและเป็นแรงจูงใจในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2551