

กำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด

นายสนธยา แพพัฒน์นัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-533-542-8

**COMPRESSIVE STRENGTH OF STABILIZED
FINE GRAINED SOILS**

Sontaya Papattanotai

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

Suranaree University of Technology

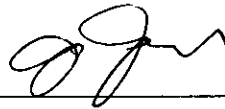
Academic Year 2005

ISBN 974-533-542-8

กำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด

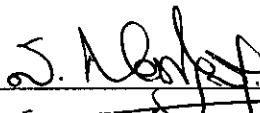
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ)

ประธานกรรมการ



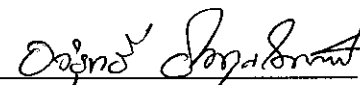
(ผศ. ดร.สุขสันติ ห่อพินุลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



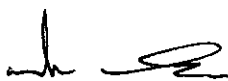
(อ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ



(อ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ



(รศ. ดร.เสาวณี รัตนพานี)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สนธยา แพทย์โนทัย : กำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด (COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT STABILIZED FINE GRAINED SOILS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 113 หน้า. ISBN 974-533-542-8

ดินชั้นบนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวปนดินตะกอนและดินทราย ปนดินตะกอน ซึ่งเกิดจากการพัดพาของลม กำลังต้านทานแรงเฉือนและความสามารถในการทรุดตัวของดินประเภทนี้จะลดลงอย่างมากเมื่ออยู่ในสภาพเปียก เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อาคารคอนกรีตที่ตั้งบนดินประเภทนี้เกิดการแตกร้าว เช่น รางระบายน้ำ และถนน เป็นต้น แนวทางป้องกันทางหนึ่งคือการสร้างอาคารบนดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด โดยแปรผันปัจจัย 4 อย่างได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ พลังงานการบดอัดและอายุบ่ม และอธิบายกำลังอัดด้วยลักษณะโครงสร้างจุลภาค จากการศึกษาพบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับการช่องว่างภายในดินและชนิดของอนุภาคของเม็ดดิน ช่องว่างในดินแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ 1) ช่องว่างอากาศ มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน 2) ช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างอนุภาค มีขนาด 10-0.1 ไมครอน 3) ช่องว่างขนาดเล็กระหว่างอนุภาค มีขนาด 0.1-0.01 ไมครอน และ 4) ช่องว่างภายในอนุภาค มีขนาดเล็กกว่า 0.01 ไมครอน กำลังอัดจะขึ้นอยู่กับการช่องว่างขนาดใหญ่และเล็กระหว่างอนุภาค กล่าวคือ ถ้าช่องว่างระหว่างอนุภาคมีน้อยกำลังอัดจะสูง ปฏิกริยาไฮเดรชันจะทำให้ช่องว่างที่มีขนาด 0.1-0.01 ไมครอน และขนาด 10-0.1 ไมครอนลดลง ดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมจะมีค่ากำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งอธิบายได้ว่าที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมจะเกิดปฏิกริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ และมีช่องว่างกลุ่มที่ 2 และ 3 น้อยที่สุด อัตราส่วนความชื้นต่อซีเมนต์ควบคุมปริมาณผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (Ca(OH)_2 and Ettringite) และ SiO_2 และปริมาตรของช่องว่างขนาดเล็กระหว่างอนุภาค ถ้าเพิ่มพลังงานบดอัดจะทำให้ปริมาณช่องว่างในดินซีเมนต์ลดลงส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น ที่อายุบ่มของดินซีเมนต์มากปริมาณ Ettringite จะลดลง ในขณะที่ปริมาณ Ca(OH)_2 มากขึ้น และช่องว่างลดลง ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม

กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นมากกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความชื้นต่อซีเมนต์และอายุบ่มเท่านั้น ส่วนกำลังอัดที่ปริมาณความชื้นน้อยกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมสามารถประมาณได้จากโค้งที่สมมาตรกับด้านเปียก สมการที่นำเสนอสามารถใช้ทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด โดยอาศัยเพียงผลทดสอบเดียว

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

SONTAYA PAPATTANOTAI : COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT
STABILIZED FINE GRAINED SOILS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
SUKSUN HORPIBULSUK, Ph. D., 113 PP. ISBN 974-533-542-8

COMPRESSIVE STRENGTH/STABILIZED FINE GRAIN SOILS

Upper soils in northeast Thailand are wind-blown deposits consisting of silty clay and silty sand. Shear strength and resistance to deformation of these soils decrease when wet. This causes fractures in buildings and infrastructures such as gutters and roads, etc. To prevent such problem structures should be built on cement treated soil.

This thesis studied the unconfined compressive strength of cement stabilized fine-grained soil by varying 4 factors namely water content, cement content, compaction energy and curing time. An attempt to explain the strength in terms of the microstructure of soil was also made. It was found that strength is related to the pore space and type of particles. The pores can be classified into 4 categories namely : 1) air pores, size > 10 micron, 2) macro inter-aggregate pores, size 10-0.1 micron, 3) micro inter-aggregate pores, size 0.1-0.01 micron and 4) intra-aggregate pores, size < 0.01 micron. The strength depends on the volume of macro and micro inter aggregate pores. The lesser these pores the higher strength. Hydration process decreases the volume of macro and micro inter-aggregate pores. The stabilized clay exhibits highest strength when mixed and compacted at optimum water content (OWC). At OWC there is just enough water for complete hydration and the total pore volume is least. The soil-water/cement ratio controls the amount of hydration products (Ettringite, Calcium Hydroxide) and silica and the micro inter-aggregate volume. At OWC the higher the compaction energy the

smaller the volume of total pore and the higher the strength. As the soil-cement aged the amount of Ettringite decreases while that of calcium hydroxide increases.

The unconfined compressive strength for the wet side of OWC was found to be a function of the soil-water/cement ratio and curing time. As the soil Soil-cement The strength for the dry side of OWC was symmetrical to the wet side.

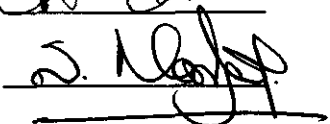
School of Civil Engineering

Academic Year 2004

Student's Signature



Advisor's Signature



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

รองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ ให้คำปรึกษา และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.พรพจน์ ดันเส็ง กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหา วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทาน เนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวัชรเดช, อาจารย์ ดร.ทงศักดิ์ พิศาลสิน, และคณาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจรูปแบบ วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่ๆ บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ พี่นุ้ย และ น้องๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สนธยา แพพัฒน์นัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ค

บทที่

1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3

2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมา	4
2.2 การพัฒนาการออกแบบถนนดินซีเมนต์ในประเทศไทย	5
2.3 ประเภทของดินซีเมนต์	7
2.4 โครงสร้างของดินซีเมนต์	8
2.5 กลไกการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์	9
2.6 คุณสมบัติของดินซีเมนต์	11
2.7 สมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด	12
2.8 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค	28

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ.....	29
3.2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน.....	31
3.2.1 การเตรียมดินตัวอย่าง.....	31
3.2.2 ปูนซีเมนต์.....	32
3.3 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง (Basic property).....	32
3.3.1 ปริมาณความชื้นเริ่มต้น.....	32
3.3.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity).....	32
3.3.3 การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงร่อน.....	33
3.3.4 การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์.....	33
3.3.5 จีดจำกัดเหลว (Liquid limit).....	33
3.3.4 พิกัดพลาสติก (Plastic limit).....	33
3.4 การบดอัดดิน.....	33
3.5 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength).....	34
3.6 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของดินซีเมนต์บดอัด.....	35
3.7 สมการทำนายกำลังในพจน์ของตัวแปรควบคุม.....	41

4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ.....	45
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ศึกษาวิจัย.....	45
4.3 ผลการทดสอบ X-ray diffraction ของดินตัวอย่างที่ 1 และซีเมนต์เพส.....	46
4.4 กราฟการบดอัด ความเค้น-ความเครียด ของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัดที่ไม่ผสมซีเมนต์.....	48
4.5 กำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด.....	51
4.6 กำลังอัดและลักษณะโครงสร้างของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด.....	59
4.6.1 อิทธิพลของปริมาณความชื้น.....	59
4.6.2 อิทธิพลของพลังงาน.....	67

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.6.3 อิทธิพลของอายุปม	70
4.7 แบบจำลองโครงสร้างดินและดินซีเมนต์บดอัด	84
4.8 การเทียบปรับสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด.....	85
4.9 ตรวจสอบสมการทำนายกำลัง.....	89
5 บทสรุป	
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	97
5.2 ข้อเสนอแนะการใช้สมการและงานวิจัยต่อไป	98
รายการอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. วิธีการต่างๆ ที่ใช้ทดสอบ โครงสร้างจุลภาค	102
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	112
ประวัติผู้เขียน	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับอายุการบ่ม (T) ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 1 – 28 วัน, ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3 , 5 และ 7 (ธีรชาติ, 2544).....	13
2.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับร้อยละปริมาณซีเมนต์ (C) ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 (ธีรชาติ, 2544)	13
2.3 ตารางความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ Dry density ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3 , 7 ,14 , และ 28 วัน ของดินลูกรังผสมซีเมนต์เมื่อ γ_{dry} คือ ความหนาแน่นแห้ง (ton/m ³) (ธีรชาติ, 2544)	14
2.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการบดอัด (E) และค่า q_u ของดินลูกรัง ผสมซีเมนต์ ที่อายุการบ่ม 3-28 วัน ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 (ธีรชาติ, 2544)	15
2.5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการบดอัด (E) และค่า q_u ของดินลูกรัง ผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 ภายใต้อายุการบ่ม (ธีรชาติ, 2544).....	15
2.6 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับร้อยละปริมาณซีเมนต์ของดินทรายปนดินตะกอน ผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ (C) ร้อยละ 3-7 (ธีรชาติ, 2544)	16
2.7 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับอายุการบ่ม (T) ของดินทรายปนดินตะกอนผสม ซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 อายุการบ่ม 1 – 28 วัน (ธีรชาติ, 2544).....	17
2.8 ตารางความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ Dry density ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 วัน ของดินทรายปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ (ธีรชาติ, 2544)	17
2.9 สมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการบดอัด (E) และค่า q_u ของดินทรายปนดิน ตะกอนผสมซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 3-28 วัน ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 (ธีรชาติ, 2544)	18
2.10 สมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน q_u และในการบดอัด (E) ของดินทรายปนดิน ตะกอนผสมซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 ภายใต้อายุการบ่ม (ธีรชาติ, 2544).....	18
2.11 ตารางแสดงตัวแปรต่างๆ ในสมการทำนายสิ่งที่สัมพันธ์กับชนิดของดิน	28
3.1 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง.....	30
3.2 รูปแบบการบดอัดและพลังงานที่ใช้ในการทดสอบ	33
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ 1 และดินตัวอย่างที่ 2.....	46

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.2 ความหนาแน่นแห้ง อัตราส่วนช่องว่าง และกำลังอัดเมื่อแปรผันปัจจัย.....	52
4.3 เปรียบเทียบปริมาณ Lin count ของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Ettringite SiO_2 และ กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน ที่ความชื้น 0.6OWC, OWC และ 1.4OWC.....	76
4.4 กำลังอัด ขนาดช่องว่าง อัตราส่วนช่องว่าง และน้ำหนักแห้ง ที่ปัจจัยควบคุมต่างๆ.....	81
4.5 การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดที่ความชื้น มากกว่าความชื้นเหมาะสมเปรียบเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ	90
4.6 การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดที่ความ ชื้นน้อยกว่าความชื้นเหมาะสมเปรียบเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ	93
4.7 การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดเปรียบเทียบกับค่า กำลังอัดจากสมการทำนายกำลังของธีรชาติ.....	95
ก.1 ค่า Temperature vs vapor pressure	104
ก.2 รายละเอียดการใช้งานเครื่อง MIP.....	111

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างของดินซีเมนต์ (ข้อมูลจาก Mitchell และ el Jack)	8
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์ อายุบ่ม 14 วัน ที่พลังงานบดอัดแบบครึ่งมาตรฐาน (วรรณชัย, 2548)	19
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์ อายุบ่ม 14 วัน ที่พลังงานบดอัดแบบครึ่งสูงกว่ามาตรฐาน (วรรณชัย, 2548)	19
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกผสมซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 28 วัน พลังงานบดอัดแบบมาตรฐาน (วรรณชัย, 2548)	20
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกผสมซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 28 วัน พลังงานบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (วรรณชัย, 2548)	20
2.6 แรงอัดแกนเดียวของหินคลุก ที่ค่า w/C เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 ภายใต้พลังงานการบดอัดที่ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (วรรณชัย, 2548)	21
2.7 แรงอัดแกนเดียวของหินคลุก ที่ค่า w/C เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 ภายใต้พลังงานบดอัดที่แตกต่างกัน (วรรณชัย, 2548)	21
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินลูกรัง	22
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของหินคลุก	23
2.10 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)	24
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Horpibulsuk et al. 2006)	25
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของหินคลุกผสมซีเมนต์บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Horpibulsuk et al. 2006)	26
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ	27
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	30
3.2 การเตรียมดินตัวอย่าง	32

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 ตัวอย่างการควบคุมปริมาณความชื้น.....	34
3.4 เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด.....	35
3.5 ตัวอย่างดินหลังจากแช่ให้มีขนาด 1 เซนติเมตร.....	36
3.6 Freeze drying apparatus.....	36
3.7 Mercury intrusion porosimeter.....	37
3.8 พื้นฐานการวัดขนาดของช่องว่าง.....	38
3.9 หลักการของ Bragg's Law.....	39
3.10 เครื่องทดสอบ X-ray diffraction.....	40
3.11 ดินตัวอย่างที่ถูกย่อยและติดบนแท่งติดตัวอย่าง.....	40
3.12 เครื่อง Iron sputtering device.....	41
3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	41
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัด.....	42
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม.....	43
4.1 การกระจายขนาดผลของดินตัวอย่าง.....	46
4.2 Diffractogram ของดินตัวอย่างที่ 1 และซีเมนต์เพส.....	47
4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน.....	48
4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของดินทรายปนดินตะกอน.....	49
4.5 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่บดอัดด้วยพลังงาน บดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	49
4.6 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่บดอัดด้วยพลังงาน บดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	50
4.7 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่บดอัดด้วยพลังงาน บดอัดเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	50
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น-ความหนาแน่นแห้ง-กำลังอัดของดินเหนียว ปนดินตะกอนที่อายุบ่ม 28 วันภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	51

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับกำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ 3 เปอร์เซนต์ บดอัดภายใต้พลังงานการบดอัด 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุบ่มต่างๆ	52
4.10 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์ 1% ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	55
4.11 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์ เท่ากับ 3% ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	55
4.12 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์ 5% ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	56
4.13 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์ 7% ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	56
4.14 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์ เท่ากับ 5% ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	57
4.15 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์ เท่ากับ 5% ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	57
4.16 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์ เท่ากับ 5% ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	58
4.17 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์ เท่ากับ 5% ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	58
4.18 ดินผสมซีเมนต์ 3 % ที่ความชื้น 21.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1450 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	59
4.19 ดินผสมซีเมนต์ 3 % ที่ความชื้น 12.9% (0.6 OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1030 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	60
4.20 ดินผสมซีเมนต์ 3 % ที่ความชื้น 30.1% (1.4 OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1120 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	60

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.21	ดินผสมซีเมนต์ 3 % ที่ความชื้น 10.5% (0.6 OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วันกำลังอัด 1226 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	60
4.22	ดินผสมซีเมนต์ 3 % ที่ความชื้น 17.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วันกำลังอัด 1560 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	61
4.23	ดินผสมซีเมนต์ 3 % ที่ความชื้น 24.5% (1.4 OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วันกำลังอัด 1231 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	61
4.24	เปรียบเทียบลักษณะการกระจายขนาดของช่องว่างของดินที่ไม่ได้ผสม ซีเมนต์และดินที่ผสมซีเมนต์บดอัดที่ OWC.....	62
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรช่องว่างทั้งหมดที่ปริมาณความชื้น 3 ค่า บดอัดด้วย พลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่มที่ 7 วัน.....	63
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรช่องว่างทั้งหมดที่ปริมาณความชื้น 3 ค่า บดอัดด้วย พลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่มที่ 7 วัน	63
4.27	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 12.9% (0.6 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	64
4.28	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 21.5% (OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	65
4.29	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 30.1% (1.4 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	65
4.30	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 10.5% (0.6 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	66
4.31	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	66
4.32	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 24.5% (1.4 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	67
4.33	ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 21.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูล ต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1450 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	68

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.34	ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1560 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	68
4.35	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างทั้งหมดที่พลังงานบดอัดต่างกันที่ 3% ซีเมนต์ ระยะบ่ม 7 วัน.....	69
4.36	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 21.5% (OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	69
4.37	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	70
4.38	ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 21.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1450 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	71
4.39	ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 21.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 28 วัน กำลังอัด 2500 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	71
4.40	ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 2963.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1560 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	71
4.41	ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 28 วัน กำลังอัด 2950 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	72
4.42	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 10.5% (0.6 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	73
4.43	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	73
4.44	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 24.5% (1.4 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	74
4.45	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 10.5% (0.6 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	74
4.46	Diffractiongram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	75

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 24.5% (1.4 OWC) ภายใต้อัตราพลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร.....	75
4.48 กำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่ w/C เดียวกัน	76
4.49 ดินผสมซีเมนต์ 3 % ที่ความชื้น 24.5% ($w/C = 8$) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูล ต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 950 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	77
4.50 ดินผสมซีเมนต์ 3.5% ที่ความชื้น 28% ($w/C = 8$) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 820 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	77
4.51 ดินผสมซีเมนต์ 2.375 % ที่ความชื้น 19% ($w/C = 8$) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 980 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	77
4.52 ดินผสมซีเมนต์ 3 % ที่ความชื้น 19% ($w/C = 6.33$) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1220 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	78
4.53 ดินผสมซีเมนต์ 3.5% ที่ความชื้น 22.17% ($w/C = 6.33$) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1380 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	78
4.54 ดินผสมซีเมนต์ 3.79 % ที่ความชื้น 24% ($w/C = 6.33$) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1250 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร	78
4.55 การกระจายขนาดของช่องว่างของดินผสมซีเมนต์บดอัดที่ $w/C = 6.33$	79
4.56 การกระจายขนาดสะสมของช่องว่างของดินผสมซีเมนต์บดอัด.....	79
4.57 การกระจายขนาดของช่องว่างของดินผสมซีเมนต์บดอัดที่ $w/C = 8$	80
4.58 การกระจายขนาดสะสมของช่องว่างของดินผสมซีเมนต์บดอัด.....	80
4.59 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ $w/C=1$ บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูล ต่อลูกบาศก์เมตร	82
4.60 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ $w/C=1$ บดอัดด้วยพลังงาน 269.3 กิโลจูล ต่อลูกบาศก์เมตร	82
4.61 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ $w/C=3$ บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูล ต่อลูกบาศก์เมตร	83

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.62 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ $w/C=3$ บดอัดด้วยพลังงาน 269.3 กิโลจูล ต่อลูกบาศก์เมตร	83
4.63 ช่องว่างในดินซีเมนต์บ่มด้วยวิธีการห่อด้วยฟิล์มพลาสติก.....	84
4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์	85
4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินเม็ดละเอียด ผสมซีเมนต์บดอัด	86
4.66 กราฟตรวจสอบความสมมาตรของกำลังอัดทางด้านเปียกและทางด้านแห้ง	88
4.67 แบบจำลองความสมมาตรของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ทางด้านแห้งกับทางด้านเปียก ของปริมาณความชื้นเหมาะสม	88
4.68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการทำนายกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบ ของดินตะกอนปนดินทราย.....	95
ก.1 หลักการของ Bragg 's Law	106
ก.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	110
ก.3 เครื่อง Mercury intrusion porosimeter (MIP)	110
ก.4 หลักการทำงานของเครื่อง เครื่อง MIP	111

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

<i>A</i>	=	เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและอายุบ่ม
AASHO	=	American association of state highway officials
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
<i>B</i>	=	เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน
<i>C</i>	=	ร้อยละปริมาณซีเมนต์
CAH	=	Calcium aluminate hydrate
Ca(OH) ₂	=	Calcium hydroxide
CH	=	Silty clay
CSH	=	Calcium silicate hydrate
<i>D</i>	=	ระยะบ่ม
<i>E</i>	=	พลังงานในการบดอัด
LL	=	ขีดจำกัดเหลว (liquid limit)
Ln	=	Natural Logarithm
NP	=	ดินที่ไม่มีพลาสติก
OWC	=	Optimum water content
PCA	=	Portland cement association
PL	=	พิกัดพลาสติก
q_u	=	Unconfined compressive strength
SW-SM	=	ดินทรายปนดินตะกอน
<i>T</i>	=	อายุการบ่ม (วัน) 1 – 28 วัน
USCS	=	Unified Soil Classification System
UTM	=	Universal Testing Machine
<i>w/C</i>	=	อัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์
γ_{dry}	=	คือ ความหนาแน่นแห้ง (ton/m ³)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ดินชั้นบนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวปนดินตะกอนและดินตะกอนปนทราย ซึ่งเกิดจากการพัดพาของลม (wind blown deposit) ดินประเภทนี้เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะมีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูง แต่เมื่ออยู่ในสภาพเปียกหรืออิ่มตัวด้วยน้ำกำลังต้านทานแรงเฉือนจะมีค่าลดลง โดยทั่วไปการก่อสร้างอาคารมักจะกระทำในฤดูแล้งซึ่งเป็นช่วงที่ดินมีความต้านทานแรงเฉือนสูง ในช่วงการก่อสร้างจึงไม่เห็นสภาพการวิบัติ แต่ในฤดูฝนดินจะมีความชื้นสูง ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนลดลงและปริมาตรลดลง ดังเห็นได้จากการวิบัติของอาคาร เช่น รางระบายน้ำ และถนนภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มกำลังอัดและลดการยุบตัวของดิน

การปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์เป็นที่นิยมและมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ซีเมนต์ที่ผสมลงไปดินจะทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรม (engineering properties) ของดินให้ดีขึ้น ได้แก่ กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้น การยุบตัวลดลง และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลง ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาลักษณะทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์บดอัดมาอย่างต่อเนื่อง (Marshall, 1954; Felt, 1965; Mitcalfe 1977; Ruenkairergsa, 1982; ทรงพล บุญมาดี, 2529; และ ชีรชาติและสมบัติ, 2544) แต่ผลการศึกษาเหล่านั้นยังขาดการอธิบายทางด้านโครงสร้างดินซึ่งเป็นตัวแปรที่ควบคุมลักษณะทางวิศวกรรม (Horpibulsuk et al. 2003) นอกจากนี้คำอธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีอย่างไรจึงทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (ปริมาณน้ำ ปริมาณซีเมนต์ พลังงาน และอายุบ่ม) ต่อกำลังอัดแกนเดียว (unconfined compressive strength , q_u) ของดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีผสมซีเมนต์ และสร้างสมการทำนายกำลังอัดในพจน์ของปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ พลังงาน และอายุบ่ม (Horpibulsuk et al., 2006)

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด โดยแปรผัน ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ พลังงานการบดอัด และอายุบ่ม และอธิบายกำลังอัดโดยพิจารณาโครงสร้างจุลภาค
- 1.2.2) เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดแกนเดียว (unconfined compressive strength) ของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด ดินตัวอย่างที่ใช้เป็นดินเม็ดละเอียดเก็บแบบแปรสภาพที่ความลึก 1.5-2.0 เมตร จากผิวดิน ที่บริเวณอาคารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี การศึกษาจะแปรผัน 4 ปัจจัย ดังนี้ ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น พลังงาน และอายุบ่ม และหากำลังอัดแล้วนำมาสร้างสมการทำนายกำลังอัด (calibration) แล้วตรวจสอบความถูกต้อง (verification) ของสมการโดยใช้ดินเม็ดละเอียดเก็บตัวอย่างแบบแปรสภาพที่ความลึก 1.5-2.0 เมตรจากผิวดิน บริเวณหอพักสุรสวัสดิ์แมนชั่น หมู่บ้านสุรสวัสดิ์แลนด์ ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราช้าง ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมคิดเป็นร้อยละ 1, 3, 5, และ 7 ของน้ำหนักดินแห้ง การศึกษาแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนคือ

- 1.3.1) ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง (ความชื้นเริ่มต้น ความถ่วงจำเพาะ วิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน ชีดจำกัดเหลว และพิกัดพลาสติก)
- 1.3.2) ศึกษาการบดอัดดิน โดยแบ่งการบดอัดออกเป็น 2 ส่วน คือบดอัดดินตัวอย่างที่ไม่ผสมซีเมนต์ เพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (maximum dry unit weight) และปริมาณความชื้นเหมาะสม (optimum water content) รวมถึงกราฟการบดอัด (compaction curve) ของดินโดยใช้พลังงานในการบดอัด 4 ค่า (296.3, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) และบดอัดดินตัวอย่างผสมซีเมนต์ที่มีปริมาณความชื้น 60, 80, 100, 120 และ 140 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยแปรผันอายุบ่ม 7, 14, 28, 60, 90, และ 180 วัน พลังงานที่ใช้สำหรับการบดอัดจะเหมือนกับการบดอัดดินตัวอย่างที่ไม่ผสมซีเมนต์
- 1.3.3) ทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เมื่อครบอายุบ่ม ดินตัวอย่างถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ (universal testing machine, UTM) จนกระทั่งดินตัวอย่างวิบัติ บันทึกข้อมูลกำลังอัดแกนเดียวในรูปของความเค้นและความเครียดของดินตัวอย่าง

- 1.3.4) ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของดินและดินซีเมนต์ ดินตัวอย่างจะผ่านกระบวนการ Freeze drying นำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หาการกระจายขนาดของช่องว่างด้วยเครื่อง Mercury intrusion porosimeter และตรวจหาชนิดของผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffraction
- 1.3.5) วิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อนำไปเทียบปรับสมการทำนายกำลังอัด
- 1.3.6) ตรวจสอบความถูกต้องของสมการ โดยใช้ดินตัวอย่างที่ 2 เก็บแบบแปรสภาพที่บริเวณหอพัก สุรสวัสดิ์แมนชั่น หมู่บ้านสุรสวัสดิ์แลนด์ ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ที่ความลึก 1.5-2.0 เมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1) ได้ความเข้าใจว่าดินที่มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นมีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงอย่างไร
- 1.4.2) สามารถออกแบบดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ให้มีกำลังอัดตามต้องการ

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมา

ดินเป็นทรัพยากรทางธรรมชาติที่มีอยู่อย่างมากมาย ซึ่งจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันตามแต่ชนิดและแหล่งกำเนิดของดิน เนื่องจากในแต่ละพื้นที่มีสภาพภูมิประเทศที่แตกต่างกัน จึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภท การปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้ดีขึ้น ได้มีการทำมานานแล้วในช่วงแรก (นับเป็นเวลาหลายพันปีมาแล้ว) ได้มีการผสมดินกับปูนขาวหรือวัสดุ Pozzolans เพื่อทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินดีขึ้น หลังจากนั้นได้มีการศึกษาอย่างเนืองมาหลายศตวรรษ (Terrel et al., 1979)

Davidson (1961) กล่าวถึงเรื่องวิวัฒนาการของดินซีเมนต์ที่ได้กำเนิดขึ้นในโลกไว้ว่าการเกิดขึ้นเป็นครั้งแรกน่าจะเกิดจากกิจกรรมการก่อสร้างถนนในเมือง Sarasota รัฐ Florida ในปี 1915 ซึ่งเป็นถนนดินซีเมนต์ จากหลักฐานพบว่าถนน Oak ได้ถูกสร้างขึ้นจากการขุดดิน Shale จากอ่าวมาผสมกับทรายและซีเมนต์ ต่อจากนั้นก็มีส่วนผสมที่ได้ไถเกลี่ยและบดอัดด้วยรถบดไอน้ำที่มีน้ำหนัก 10 ตัน วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่ไม่มีหลักวิชาการ ต่อมาในช่วงปี 1920 State highway department ในสหรัฐอเมริกาซึ่งประกอบด้วยรัฐ Iowa, South Dakota, Ohio, California และ Texas ได้มีการทดสอบดินผสมซีเมนต์ทำถนน แต่เนื่องจากขาดความรู้ความเข้าใจทางวิทยาศาสตร์ทำให้ไม่สามารถอธิบายผลได้ Mills (1935, 1936) กล่าวว่าในปี 1932 South Carolina state department ได้ทำการศึกษาส่วนผสมของดินและซีเมนต์ภายใต้การดูแลของ Dr C.H. Moorefield การวิจัยและทดลองหลายรูปแบบในปี 1933 และ 1934 ซึ่งได้รายงานผลการทดสอบว่าดินซีเมนต์เป็นวัสดุที่สามารถผสมเข้ากันได้ และนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางของถนนที่มีราคาถูกได้

Catton (1938) ได้กล่าวถึงผลงานที่ประสบความสำเร็จของ South Carolina state highway department ว่าเป็นสิ่งที่ช่วยกระตุ้นให้เกิดการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมขึ้นอย่างกว้างขวาง ในปี 1935 Portland cement association (PCA) นำโดย F.T. Sheet และ M.D. Catton ได้ใช้เทคโนโลยีการบดอัดดิน ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญที่ใช้มาตั้งแต่ปี 1929 มาปรับปรุงใช้กับการบดอัดดินซีเมนต์ และได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่น ผลของการศึกษาทำให้สามารถหาปริมาณของซีเมนต์และปริมาณน้ำที่ใช้ ส่วนการทดสอบหาความชื้น-ความหนาแน่น การทดลอง Wet-dry

และการทดลอง Freeze-thaw นั้นได้ทำเป็นมาตรฐานโดย American society for testing and materials (ASTM) และ American association of state highway officials (AASHO)

Terrel et al. (1997) และ Davidson (1961) ได้บันทึกตรงกันว่า South carolina state highway , Bureau of public road และ PCA ได้ร่วมมือกันก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ยาว 1.5 ไมล์ใกล้กับเมือง Johnsonville เพื่อยืนยันผลการทดลองขึ้นในปี 1935 ซึ่งต่อมาได้กลายเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นโครงการแรกของวิศวกรรมถนนดินซีเมนต์

PCA (1959) ได้บันทึกไว้ว่าในปี 1935 ได้ศึกษาค้นคว้าจนได้ส่วนผสมที่เหมาะสมของ ซีเมนต์กับดินหลาย ๆ ชนิดและจากการศึกษาครั้งนี้มีวิธีการทดสอบและระเบียบวิธีการก่อสร้างที่ให้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือได้ถูกกำหนดขึ้น รูปแบบการทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้นคือ Moisture-density, Wet-dry test และ Freeze-thaw test สำหรับดินซีเมนต์และวิธีการเหล่านี้ต่อมาได้ถูกนำมาเป็น มาตรฐานการทดสอบของ ASTM ในปี 1944 และ AASHO ในปี 1945

Hogentogler (1938) พบว่าการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน คือกระบวนการที่ทำให้ดินตามธรรมชาติ มีความทนทานต่อการสึกกร่อนและรับน้ำหนักได้สูงขึ้นโดยไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น ทั้งที่นี้อาจเป็นวิธีใส่สารผสมเพิ่ม การบดอัด การทำให้ดินแน่นขึ้นโดยวิธีต่างๆ และการควบคุมคุณภาพในห้องทดลอง ค่า Optimum water content (OWC) จะเป็นตัวแปรสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของดิน ส่วนสารผสมเพิ่มที่ใช้ อาจเป็นสารผสมดินชนิดต่างๆ เข้าด้วยกันหรือใช้ สารประกอบอื่นทางเคมีก็ได้

Davidson (1961) ได้รายงานความสำเร็จของ South carolina state highway department นำไปสู่การขยายขอบเขตการทดลองอีกหลายรัฐในสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะในช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ถนนซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างสนามบินอย่างมาก ในปี 1941-1944 พบว่ามีปริมาณการใช้ถึง 22 ล้านตารางหลา แต่ในขณะเดียวกันการก่อสร้างถนนมีปริมาณน้อยลง ภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ยุติ การใช้ถนนดินซีเมนต์ก็กลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง นอกเหนือจากการสร้างถนนแล้วยังมีการใช้ดินผสมซีเมนต์เป็นชั้นรองพื้นทางของถนนคอนกรีต ไหล่ทางของถนน ที่จอดรถ คลังเก็บสินค้า รองพื้นอ่างเก็บน้ำของคูคลอง ยิ่งไปกว่านั้นการใช้ถนนดินซีเมนต์ ได้แผ่ขยายกว้างในสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในประเทศอังกฤษ อาฟริกาใต้ ตะวันออกกลาง อเมริกาใต้ และเยอรมันในเวลาต่อมา

2.2 การพัฒนาการออกแบบถนนดินซีเมนต์ในประเทศไทย

กรมทางหลวงซึ่งมีหน้าที่ในการออกแบบ ก่อสร้าง และบำรุงรักษาถนนได้นำเอาแนวความคิด ดินซีเมนต์มาสร้างถนนดินซีเมนต์ที่สามารถต้านทานการจราจรที่สูงขึ้นและรถบรรทุกเกินพิกัดซึ่งมี

มากในปัจจุบัน ถนนดินซีเมนต์ได้ถูกสร้างขึ้นในประเทศไทยครั้งแรกโดยกรมทางหลวงในปี พ.ศ. 2508 พัฒนาการของถนนดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงสามารถแบ่งเป็นสามช่วงเวลาดังนี้

ช่วงต้น (พ.ศ 2508–2515) กรมทางหลวงร่วมกับบริษัทปูนซีเมนต์ไทยสร้างถนนพื้นทางดินซีเมนต์ สายวาริน–เดชอุดม ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือความยาว 5 กิโลเมตร เมื่อปี พ.ศ.2508 เนื่องจากถนนสายแรกแสดงพฤติกรรมที่ดี กรมทางหลวงจึงได้ทำการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นอีกหลายสายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงปี พ.ศ. 2508–2515 รวมความยาวของถนนดินซีเมนต์ทั้งสิ้นประมาณ 1,400 กิโลเมตร การที่กรมทางหลวงต้องก่อสร้างถนนดินซีเมนต์เนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่ขาดแคลนหินที่จะนำมาใช้เป็นพื้นทางของถนนในช่วงเวลานั้น เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องยังไม่มีความรู้และเข้าใจพฤติกรรมของดินซีเมนต์ดีพอ เป็นเหตุให้ผิวถนนบางช่วงเกิดรอยแตกเสียหายเป็นจำนวนมากเป็นปัญหาในการบำรุงสายทางทำให้กรมทางหลวงระงับการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ ในปี พ.ศ. 2515 เพื่อศึกษาปัญหาของถนนดินซีเมนต์ให้ละเอียดก่อนตัดสินใจนำกลับมาใช้ใหม่

ช่วงกลาง (พ.ศ 2515–2525) เป็นช่วงของการศึกษาพฤติกรรมของถนน ดินซีเมนต์ที่มีอยู่เดิมอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาวิจัยดินซีเมนต์เพิ่มเติมโดยทำการวิจัยในห้องปฏิบัติการและสร้างถนนทดลอง รวมทั้งการศึกษารายงานข้อมูลจากต่างประเทศ ผลของการศึกษาในช่วงดังกล่าวทำให้เข้าใจถึงธรรมชาติของถนนดินซีเมนต์ได้ดียิ่งขึ้น

ช่วงปัจจุบัน (พ.ศ 2525–ปัจจุบัน) เป็นช่วงของการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์โดยยึดเอาผลที่ได้จากการศึกษาในช่วงกลางเป็นแนวทางพบว่าถนนดินซีเมนต์ที่สร้างขึ้น ในระยะหลังไม่มีปัญหาเกี่ยวกับรอยแตกภายหลังการก่อสร้างแต่อย่างไร

ถนนดินซีเมนต์โดยทั่วไปจะแสดงพฤติกรรมที่ดีในด้านความแข็งแรงทนทานแม้ใช้งานไปหลายปี ก็ยังไม่เกิดรอยแตกร่องล้อ (rut) หรือหลุมบ่อ (pothole) บนผิวหน้าของถนน ตรงกันข้ามกับถนนพื้นทางที่เป็นหินคลุกซึ่งปรากฏรอยแตกร่องล้อและหลุมบ่ออย่างชัดเจน เมื่อใช้งานไปนานๆ การที่ถนนดินซีเมนต์ไม่แสดงรอยร่องล้อเป็นเพราะความสามารถในการรับน้ำหนักของถนนดินซีเมนต์สูงกว่าพื้นทางหินคลุกมาก ดินซีเมนต์ซึ่งมีลักษณะเป็น Cemented aggregate base มีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงกว่าหินคลุก ทำให้ดินซีเมนต์สามารถจะต้านทานแรงอัดจากรถบรรทุกทุกเกินพิกัดได้ดีกว่าหินคลุก ซึ่งมีลักษณะเป็น Unbound granular base และสามารถจะยับยั้งได้เมื่อถูกแรงเฉือนทางด้านข้าง จึงสามารถต้านทานแรงเฉือนทางด้านข้างได้ดีกว่า และลดการเกิดรอยแตกร่องล้อบนผิวถนน แม้ว่าจะรับน้ำหนักบรรทุกทุกเกินพิกัดมากก็ตาม

2.3 ประเภทของดินซีเมนต์

Highway research board committee on soil-cement stabilization (1959) ได้ให้คำจำกัดความของ Cement-treated soil ว่าเป็นการผสมดิน ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และน้ำ เข้าด้วยกันและทำการบดอัดจนแน่น Cement-treated soil สามารถแบ่งเป็นหลายประเภทดังต่อไปนี้

Cement modified silty clay soil ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพของดินในลักษณะของ Cement modified silty clay soil จะน้อยมากประมาณ 1-3% โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของผิวหน้าถนนเดิมซึ่งเป็นดินเหนียวที่มีลักษณะเปียกแฉะและมีความอ่อนตัวมากให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นพอที่รถยนต์จะผ่านไปมาได้โดยไม่เกิดการลื่นไถล

Cement modified granular soil ปริมาณซีเมนต์ที่จะใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของดินในลักษณะ Cement modified granular soil จะน้อยมากเพียงประมาณร้อยละ 3 เพื่อลดคุณสมบัติทางด้าน Plasticity และการดูดซึมน้ำของดิน Cement modified crushed rock ซึ่งมักจะใช้เป็นพื้นทางของ Flexible pavement และ Rigid pavement ในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย เป็นต้น ก็จัดอยู่ในประเภทของ Cement modified granular soil โดยเหตุที่ Cement modified soil ไม่ว่าจะเป็น Clayey soil หรือ Granular soil จะใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ค่อนข้างต่ำ ถึงแม้ว่าปริมาณซีเมนต์จะทำให้ดินมีคุณสมบัติโดยทั่วไปเปลี่ยนแปลงไปในด้านที่ดีขึ้นอย่างเด่นชัดก็ตามแต่กำลังรับแรงอัดของดินอาจจะไม่เพิ่มขึ้นมากนัก ดังนั้น Cement modified soil ซึ่งมักจะไม่ได้กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมไว้อย่างแน่นอน แต่จะพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปอันเป็นผลมาจากการผสมซีเมนต์ปริมาณต่ำเป็นเกณฑ์ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไป Cement modified granular soil ก็จะทำให้กำลังแบกทานของดินเพิ่มสูงขึ้นมาก อีกทั้งยังทำให้การแอ่นตัวของชั้นทางภายใต้น้ำหนักบรรทุกลดลงต่ำกว่า Granular soil ที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มาก

Soil-cement เป็นดินผสมซีเมนต์ที่ออกแบบส่วนผสมให้ได้กำลังอัดหรือความแข็งแรงทนทานตามมาตรฐานของ PCA หรือ AASHTO หรือ ASTM ปริมาณซีเมนต์ที่ผสมกับดินจะต้องสูงพอจนทำให้กำลังอัดหรือกำลังรับแรงแบกทานตามที่กำหนด ปริมาณซีเมนต์จะสูงร้อยละ 5-7 สำหรับดินที่มีการกะขนาดดี และจะสูงกว่านั้นถ้าดินมีการกะขนาดไม่ดี หรือ Plasticity index (PI) สูง และในกรณีที่ดินเดิมมี PI สูงการทำดินซีเมนต์จะต้องผสมปูนขาวลงไปก่อนเพื่อลด PI ของดินเดิมลงบ้าง

Plastic soil-cement เป็นดินผสมซีเมนต์ที่ต้องมีน้ำหนักรวมพอที่จะทำให้ส่วนผสมมีสภาพเหลวพอที่จะนำไปลาดปูลงไปบนพื้นที่มีความลาดเอียง ยกตัวอย่างเช่น การลาดท้องคลองชลประทานและการคาดผิวหน้าของลาดคันทาง Plastic soil-cement จะต้องมีความ Workability สูงพอที่จะนำมาใช้ในงานต่างๆ ดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Cement-treated soil slurry เป็นซีเมนต์ที่ผสมกับวัสดุประเภททรายและน้ำ โดยมีปริมาณน้ำที่สูงมาก อาจจะเติมสารผสมเพิ่มอื่นๆ เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของส่วนผสมให้มี Workability สูง วัสดุประเภทนี้โดยปกติจะใช้เป็น Grouting materials ในงานซ่อมถนนคอนกรีต

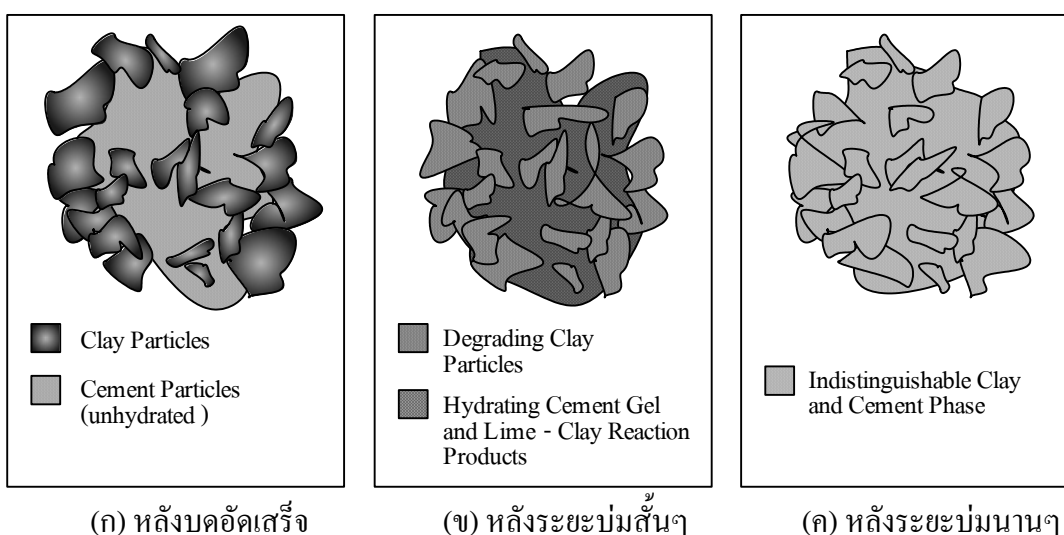
2.4 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell และ Jack (1966) ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของดินซีเมนต์โดยมีส่วนประกอบ และโครงสร้างของดินซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 2.1

ในการบดอัดดินและอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ Unhydrated จะผสมกับอนุภาคของดินดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก)

ภายใต้การบ่มในระยะเวลาอันสั้นอนุภาคของซีเมนต์ที่ Unhydrated จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะทำให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินและปล่อย Lime ออกมาโดยจะทำปฏิกิริยากับ Soil silica และ Soil alumina ที่มีอยู่ในดินทำให้เกิดการแยกตัวของ Soil silica และ Soil alumina ในดิน หลังจากนั้นซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะแพร่ไปตามอนุภาคของดินดังแสดงในรูปที่ 2.1(ข)

ภายใต้การบ่มในระยะยาวจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ทำให้ซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วทั้งก้อนของดินซีเมนต์ เป็นผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ค)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (ข้อมูลจาก Mitchell และ Jack)

Mitchell (1982) อธิบายวัตถุประสงค์ทั่วไปในการเติมสารเคมีผสมลงในดินก็เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน ได้แก่ การควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตร การปรับปรุงคุณสมบัติหรือพฤติกรรมของ Stress-strain หรือกำลังรับน้ำหนัก ควบคุมการไหลซึมผ่านได้ของน้ำและปรับปรุงความทนทานต่อการกัดกร่อนแตกหักของดิน สำหรับการควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน สามารถทำได้โดยการเติมสารที่มี Hydrating cation ต่างๆ เช่น Calcium, Magnesium, Aluminum หรือ Iron เข้าไปแทนที่ ดินที่มีสารประกอบประเภท Sodium ซึ่งมี Hydration cation สูงหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาที่จะสร้างสารเชื่อมยึดเม็ดดินเกิดขึ้น สำหรับการควบคุมการไหลซึมผ่านได้ของน้ำสามารถเติมสารเคมีที่ป้องกันการซึมของน้ำปรับปรุงช่องว่างในเม็ดดินหรือทำให้ขนาดมวลผลของดินดีขึ้น และการที่จะทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินเพิ่มขึ้นทำได้โดยการลดช่องว่างในเม็ดดิน การทำให้เม็ดดินเชื่อมยึดติดกันหรือการทำให้เกิด Flocculation เพื่อป้องกันการบวมตัวของดิน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการปรับปรุงคุณภาพของดินระหว่างอินทรีย์วัตถุโดยทั่วไปจะแตกต่างกันมาก โดยที่อินทรีย์วัตถุจะให้กำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะหยุดการเพิ่มขึ้นของกำลังรับน้ำหนักเมื่อระยะเวลาหนึ่ง

การผสมซีเมนต์ลงในดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดแล้วจะได้สารสุดท้ายเป็น Calcium silicate hydrate (CSH) ซึ่งซีเมนต์จะมีสาร Silica ในตัวของมันเองอยู่แล้ว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงสั้นๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อนำซีเมนต์ผสมลงไปดินประกอบด้วยการแทนที่หรือการแลกเปลี่ยน Valency โดยวิธีการดูดกลืน Cation ของ Calcium และเม็ดดินจะดูดซับเอา $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เข้าไว้ การเกิดสารประกอบที่ทำให้เกิดการเชื่อมยึดติดกันของเม็ดดินและการเพิ่มขึ้นของความเป็นด่างของสภาวะแวดล้อม ส่วนในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องระยะยาวนั้นเนื่องจากสภาพความเป็นด่างจะทำให้เกิดการแยกตัวของเม็ดดินเหนียว และการผลิตสารประกอบที่ช่วยในการเชื่อมยึดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องกันไปเป็นระยะเวลาหลายๆปี

Ruenkairergsa (1982) อธิบายว่าปริมาณซีเมนต์มีอิทธิพลหลักต่อประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นคุณสมบัติของดินซีเมนต์จะดีขึ้นด้วย และอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเบื้องต้นของดินด้วย ค่า Cohesion ของดินซีเมนต์ของดินเม็ดหยาบจะเพิ่มสูงมากกว่าดินซีเมนต์ที่ดินเดิมมีความละเอียดกว่า และปริมาณการใช้ซีเมนต์ก็ขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของดินด้วย

2.5 กลไกการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์

Winterkorn (1955) ได้อธิบายว่า การปรับปรุงคุณสมบัติของดินเป็นการนำเอาวิธีการทางด้าน ฟิสิกส์ เคมีฟิสิกส์ และเคมีมาใช้ผสมกับดิน เพื่อให้ดินมีคุณสมบัติที่ดีกับงานด้านวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การก่อสร้างถนนและสนามบิน

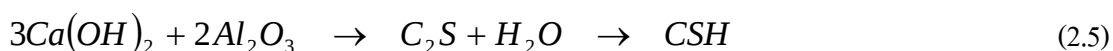
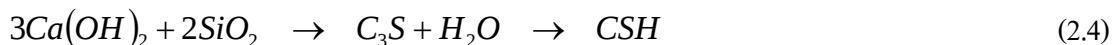
Circeo et al. (1962) ได้บันทึกไว้ว่าการใส่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในดินสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและโครงสร้างของดิน ดินเกือบทุกชนิดสามารถปรับปรุงด้วยซีเมนต์ อย่างไรก็ตามการปรับปรุงคุณสมบัติของดินก็อาจจะทำได้เหมือนกัน ดินที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์เหมือนกัน แต่มีคุณสมบัติด้านเคมีต่างกันจะทำให้กำลังอัด ต่างกันเมื่อปรับปรุงด้วยปริมาณซีเมนต์ที่เท่ากัน ดังนั้นการกระทำปฏิกิริยาทางเคมีของดินซีเมนต์จะมีผลเป็นอย่างมากต่อกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์

Felt (1955) อธิบายว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ นอกจากนี้ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีกำลังอัดสูงกว่าดินที่มีขนาดเม็ดเล็ก และดินที่มีปริมาณดินเหนียวผสมอยู่มากจะมีกำลังอัดน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Metcalf (1977) ซึ่งได้ศึกษาพบว่าปริมาณซีเมนต์มีผลโดยตรงต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยเฉพาะกับดินเม็ดหยาบ และได้สรุปไว้ว่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จะแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ ที่ใช้แต่สัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของกำลังของดินจะแตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของดิน

Davidson (1961) กล่าวว่าคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังจากการผสมซีเมนต์กับดินเหนียวขึ้นทำให้เกิดการลดลงของ Plasticity เนื่องมาจากการแยกตัวของ Calcium ion ในระหว่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือไม่ก็มาจากการจับกลุ่มของ Cation ในดินเหนียว กระบวนการทั้งสองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าที่อยู่อย่างหนาแน่นในอนุภาคดินเหนียว ประจุไฟฟ้าจะทำให้อนุภาคดินเหนียวรวมตัวกันและตกตะกอนเป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และขนาดอนุภาคดินเหนียวที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนี้จะทำให้ดินเหนียวมีลักษณะคล้ายดินตะกอนที่มีค่า Plasticity ต่ำหรือมีค่าการยึดเหนี่ยวต่ำ การเชื่อมประสานในการบดอัด Cement treated soil ปฏิกิริยาไฮเดรชันของส่วนประกอบของซีเมนต์จะเกิดขึ้นในเวลาที่แตกต่างกัน โดยผลของปฏิกิริยาทำให้เม็ดดินเกิดการยึดเกาะกันเป็นก้อน การยึดเกาะที่เพิ่มขึ้นนี้เนื่องมาจากการพัฒนาของแรงยึดเกาะทางเคมีที่มีอยู่ในธรรมชาติของดิน หรือการเกาะระหว่างผิวของอนุภาคซีเมนต์ที่อยู่ใกล้กัน

Moh (1965) พบว่าการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยา Cement hydration เป็นหลัก เมื่ออนุภาคของซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำที่เรียกว่า Cement hydration ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดสาร CSH, Calcium aluminates hydrate (CAH) และ Calcium hydroxide $[Ca(OH)_2]$ สาร CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึด โดยสามารถเกาะยึดเข้าด้วยกันกับอนุภาคของเม็ดดินเป็นมวลดินที่มีความแข็งแรงสูง $Ca(OH)_2$ ที่เกิดจะทำปฏิกิริยากับ Soil silica และ Soil alumina ในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มจากปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรง ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับซีเมนต์แสดงดังนี้





หมายเหตุ

สัญลักษณ์ C_3S, C_2S, C_3A, CSH และ CAH ไม่ใช่สูตรทางเคมีแต่เป็นชื่อย่อของสาร

2.6 คุณสมบัติของดินซีเมนต์

ความหนาแน่นของดินซีเมนต์ ปกติแล้วจะวัดในเทอมของความหนาแน่นแห้ง ซึ่งการทำงานในสนามจะต้องควบคุมความชื้นให้ดีขึ้นทำการบดอัด การทดสอบ Moist-density โดย ASTM D558 ได้ค่า OWC และ Maximum dry density เพื่อนำมาใช้บดอัดดินซีเมนต์ การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ลงไปโดยทั่วไปจะมีผลกระทบกับ OWC และ Maximum dry density ของดินกล่าวคือ ซีเมนต์ที่เพิ่มลงไปดินจะมีผลกระทบกับการจัดเรียงตัวของดินซึ่งจะทำให้ค่า OWC สูงขึ้นและ Maximum dry density จะน้อยลงแต่อย่างไรก็ดี เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์มีค่าสูงกว่าของดินจึงทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ผสม เมื่อความหนาแน่นของดินซีเมนต์สูงขึ้นกำลังอัดก็จะสูงขึ้นด้วย Shen และ Mitchell (1966) พบว่าปริมาณซีเมนต์ที่ใช้มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นที่ได้ โดยเฉพาะกับดินประเภท Cohesion less soil

Compressive strength ในการกำหนด Density criteria ของงาน Soil-cement ส่วนใหญ่แล้วจะกำหนดค่า Unconfined compressive strength (q_u) เป็นหลักการหาค่า q_u จะได้จากการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM D1633 โดยที่ค่า q_u จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติของดิน ปริมาณซีเมนต์ การบดอัด เป็นต้น Highway research board (1961) ได้ให้ค่า Young's modulus ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 140 ถึง 20,000 MN/m² (20,300 ถึง 2,900,000 lb/in²) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและปริมาณซีเมนต์ สำหรับค่า Plastic deformation จะเกิดที่ 60-70 เปอร์เซ็นต์ของ Ultimate failure strength

Flexural strength ของดินซีเมนต์ คำนวณได้จากทดสอบ Fixed-beam (ASTM D1635) Direct-tension test และ Split-tension test โดยปกติแล้วค่า Flexural strength จะมีค่าโดยประมาณอยู่

ระหว่าง $1/5$ ถึง $1/3$ ของ q_u Federal highway administration (1976) ได้แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ Flexural strength ไว้ว่าค่า Flexural strength จะมีค่าสูงกว่า $1/3$ fc' ที่ค่า Strength ต่ำๆ และถ้า Unconfined compressive strength สูงขึ้นจะให้ค่า Flexural strength ที่ต่ำกว่า $1/5$ fc'

PCA (1986) พบว่าการผสมซีเมนต์ลงไปดินจะช่วยลดสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเพราะซีเมนต์จะเป็นตัวช่วยลดการหดตัวของดินได้ เมื่อการหดตัวของดินซีเมนต์น้อยลงก็มีผลทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้อยลงด้วย โดยปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวราบจะมีค่ามากกว่าในแนวดิ่ง ดังที่ Nussbaum และ Colley (1971) ได้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวนานกับการบดอัดของดินถม จะมีค่ามากกว่าแนวตั้งฉากกับการบดอัดประมาณ 2–20 เท่า

การหดตัวและรอยแตกที่เกิดขึ้นจากการหดตัวของ Soil-cement นั้นขึ้นอยู่กับหลายสาเหตุ เช่น ชนิดของดินที่ใช้ ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น Degree of compaction และการบ่ม Marchall (1954) ได้แสดงให้เห็นถึงปริมาณและขนาดของรอยแตกของถนนในประเทศ ออสเตรเลีย ซึ่งพบว่าดินซีเมนต์แต่ละชนิดจะมีรูปแบบการแตกที่แตกต่างกันไป ดินซีเมนต์ที่ทำจากดินเหนียวจะเกิดรอยแตกเนื่องจากการหดตัวมากแต่รอยจะมีขนาดเล็กหรือที่เรียกว่า Hair-line crack ระยะห่างระหว่างรอยแตกจะอยู่ประมาณ 2-5 ฟุต ส่วนดินซีเมนต์ที่ทำจากดินทรายจะเกิดรอยแตกน้อย แต่ขนาดความกว้างของรอยแตกจะอยู่ประมาณ 10-20 ฟุต วิธีการที่จะลดการเกิดรอยแตกเนื่องจากการหดตัว Highway research board (1961) แนะนำว่าดินที่นำมาใช้จะต้องมีขนาดละกัณดีและจะต้องควบคุมความชื้นที่ผิวหน้าของดินซีเมนต์ให้ติดตลอดระยะเวลาการบ่ม

2.7 สมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัด

ธีรชาติ (2544) ได้สร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินลูกรังและดินทรายปนดินตะกอนผสมซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ซึ่งได้เสนอความสัมพันธ์ ระหว่างกำลังอัด (q_u) กับตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อายุบ่ม ปริมาณซีเมนต์ น้ำหนักแห้ง และพลังงานบดอัด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ถึง 2.10 แต่สมการที่สร้างขึ้นยังไม่สามารถใช้กับดินชนิดอื่นได้ และไม่สามารถทำนายกำลังอัดที่ปริมาณความชื้นอื่นที่ไม่ใช่ปริมาณความชื้นเหมาะสม

ตารางที่ 2.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับอายุการบ่ม (T) ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ ที่อายุ บ่ม 1 – 28 วัน, ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3 , 5 และ 7 (ธีรชาติ, 2544)

Type of compaction	Equation model	Cement content, (%)	Regression equation, q_u (kPa)	Determination coefficient, R^2
½ Standard proctor E_1	Linear	3	$q_u = 0.1830T + 10.433$	0.8480
	Linear	5	$q_u = 0.4007T + 11.898$	0.9582
	Linear	7	$q_u = 0.4082T + 17.749$	0.9770
Standard proctor E_2	Linear	3	$q_u = 0.1622T + 14.080$	0.862
	Linear	5	$q_u = 0.3205T + 17.722$	0.8355
	Linear	7	$q_u = 0.3424T + 22.151$	0.9037
½ Modify proctor E_3	Linear	3	$q_u = 0.3139T + 21.202$	0.9318
	Linear	5	$q_u = 0.4274T + 31.278$	0.8327
	Linear	7	$q_u = 0.5678T + 34.362$	0.8935
Modify proctor E_4	Linear	3	$q_u = 0.3180T + 27.548$	0.9472
	Linear	5	$q_u = 0.6225T + 33.157$	0.8957
	Linear	7	$q_u = 0.8440T + 36.615$	0.8830

ตารางที่ 2.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับร้อยละปริมาณซีเมนต์ (C) ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 (ธีรชาติ, 2544)

Type of compaction	Equation model	Age of curing, (days)	Regression equation, q_u (kPa)	Determination coefficient, R^2
½ Standard proctor E_1	Linear	3	$q_u = 2.2075C + 2.6305$	0.9118
	Linear	7	$q_u = 2.1613C + 5.5334$	0.9927
	Linear	14	$q_u = 2.3353C + 6.5351$	0.9834
	Linear	28	$q_u = 3.5390C + 4.7177$	0.9961
Standard proctor E_2	Linear	3	$q_u = 2.0775C + 7.1882$	0.9762
	Linear	7	$q_u = 2.0775C + 7.1882$	0.9727
	Linear	14	$q_u = 2.8655C + 8.6742$	0.9986
	Linear	28	$q_u = 3.1922C + 9.1008$	0.9842

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

Type of compaction	Equation model	Age of curing,(days)	Regression equation, q_u (kPa)	Determination coefficient, R^2
½ Modify proctor E_3	Linear	3	$q_u = 3.2320C + 12.4290$	0.9575
	Linear	7	$q_u = 3.7457C + 13.8750$	0.8793
	Linear	14	$q_u = 4.6052C + 14.1110$	0.962
	Linear	28	$q_u = 4.8780C + 15.7690$	0.9701
Modify proctor E_4	Linear	3	$q_u = 1.8910C + 22.1910$	0.9788
	Linear	7	$q_u = 2.9248C + 22.404$	0.955
	Linear	14	$q_u = 4.8058C + 19.278$	0.9691
	Linear	28	$q_u = 5.2835C + 20.959$	0.9841

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ Dry density ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3 , 7 ,14 , และ 28 วัน
ของดินลูกรังผสมซีเมนต์เมื่อ γ_{dry} คือ ความหนาแน่นแห้ง (ton/m³) (ธีรชาติ, 2544)

Cement content, (%)	Equation model	Age of curing, (days)	Regression equation, q_u (kPa)	Determination coefficient, R^2
3	Linear	3	$q_u = 65.617 \gamma_{dry} - 113.28$	0.9970
	Linear	7	$q_u = 74.957 \gamma_{dry} - 130.05$	0.9583
	Linear	14	$q_u = 84.013 \gamma_{dry} - 145.73$	0.9821
	Linear	28	$q_u = 85.191 \gamma_{dry} - 145.75$	0.9785
5	Linear	3	$q_u = 100.09 \gamma_{dry} - 172.58$	0.9765
	Linear	7	$q_u = 100.09 \gamma_{dry} - 172.58$	0.9781
	Linear	14	$q_u = 102.23 \gamma_{dry} - 173.80$	0.9877
	Linear	28	$q_u = 100.42 \gamma_{dry} - 168.07$	0.9470
7	Linear	3	$q_u = 89.904 \gamma_{dry} - 151.85$	0.9882
	Linear	7	$q_u = 99.428 \gamma_{dry} - 168.04$	0.9641
	Linear	14	$q_u = 116.87 \gamma_{dry} - 200.42$	0.9785
	Linear	28	$q_u = 126.42 \gamma_{dry} - 215.62$	0.9044

ตารางที่ 2.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการบดอัด (E) และค่า q_u ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ ที่อายุการบ่ม 3-28 วัน ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 (ธีรชาติ, 2544)

Cement content, (%)	Equation model	Age of curing, (days)	Regression equation, q_u (kPa)	Determination coefficient, R^2
3	Logarithm	3	$q_u = 7.3810\text{Ln}(E) - 55.040$	0.9940
	Logarithm	7	$q_u = 8.5223\text{Ln}(E) - 63.518$	0.9829
	Logarithm	14	$q_u = 9.0505\text{Ln}(E) - 66.517$	0.9828
	Logarithm	28	$q_u = 10.145\text{Ln}(E) - 75.256$	0.9765
5	Logarithm	3	$q_u = 10.182\text{Ln}(E) - 77.478$	0.9533
	Logarithm	7	$q_u = 11.285\text{Ln}(E) - 83.258$	0.9601
	Logarithm	14	$q_u = 12.828\text{Ln}(E) - 95.563$	0.9675
	Logarithm	28	$q_u = 12.939\text{Ln}(E) - 92.486$	0.9617
7	Logarithm	3	$q_u = 8.3314\text{Ln}(E) - 54.691$	0.9426
	Logarithm	7	$q_u = 10.899\text{Ln}(E) - 75.472$	0.9410
	Logarithm	14	$q_u = 13.635\text{Ln}(E) - 97.802$	0.9865
	Logarithm	28	$q_u = 13.777\text{Ln}(E) - 95.254$	0.9022

ตารางที่ 2.5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการบดอัด (E) และค่า q_u ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 ภายใต้ทุกอายุการบ่ม (ธีรชาติ, 2544)

Cement content, (%)	Equation model	Regression equation (kPa)	Determination coefficient, R^2
3	Logarithm	$q_u = 8.7746\text{Ln}(E) - 65.083$	0.8614
5	Logarithm	$q_u = 11.809\text{Ln}(E) - 87.196$	0.7955
7	Logarithm	$q_u = 11.661\text{Ln}(E) - 80.805$	0.7339

ตารางที่ 2.6 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับร้อยละปริมาณซีเมนต์ของดินทรายปนดินตะกอน
ผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ (C) ร้อยละ 3-7 (ธีรชาติ, 2544)

Type of compaction	Equation model	Age of curing, (days)	Regression equation (kPa)	Determination coefficient , R^2
½ Standard proctor E_1	Linear	3	$q_u = 2.8375C - 4.9718$	0.9982
	Linear	7	$q_u = 3.2605C - 5.4278$	0.9998
	Linear	14	$q_u = 4.7677C - 9.2067$	0.9691
	Linear	28	$q_u = 6.1120C - 10.704$	0.9878
Standard proctor E_2	Linear	3	$q_u = 4.6438C - 11.000$	0.9647
	Linear	7	$q_u = 4.6203C - 9.1256$	0.9864
	Linear	14	$q_u = 5.8470C - 11.680$	0.9756
	Linear	28	$q_u = 6.8753C - 11.353$	0.9971
Modify proctor E_4	Linear	3	$q_u = 6.2825C - 11.403$	0.9968
	Linear	7	$q_u = 8.6813C - 17.197$	0.9880
	Linear	14	$q_u = 8.8465C - 14.573$	0.9970
	Linear	28	$q_u = 10.197C - 17.282$	0.9929

ตารางที่ 2.7 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับอายุการบ่ม (T) ของดินทรายปนดินตะกอนผสม
ซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 อายุการบ่ม 1 – 28 วัน (ธีรชาติ, 2544)

Type of compaction	Equation model	Age of curing, (days)	Regression equation (kPa)	Determination coefficient , R^2
$\frac{1}{2}$ Standard proctor E_1	Linear	3	$q_u = 0.1970T + 2.7029$	0.9739
	Linear	5	$q_u = 0.3550T + 8.8127$	0.9611
	Linear	7	$q_u = 0.7330T + 12.715$	0.9925
Standard proctor E_2	Linear	3	$q_u = 0.2230T + 3.6049$	0.9870
	Linear	5	$q_u = 0.4698T + 9.0314$	0.9969
	Linear	7	$q_u = 0.6077T + 20.590$	0.9791
Modify proctor E_4	Linear	3	$q_u = 0.2431T + 7.9839$	0.8996
	Linear	5	$q_u = 0.4612T + 19.844$	0.8712
	Linear	7	$q_u = 0.7581T + 35.277$	0.8254

ตารางที่ 2.8 ตารางความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และ Dry density (γ_{dry}) ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 วัน
ของดินทรายปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ (ธีรชาติ, 2544)

Type of compaction	Equation model	Age of curing, (days)	Regression equation (kPa)	Determination coefficient , R^2
3	Linear	7	$q_u = 67.703 \gamma_{dry} - 115.68$	0.9583
	Linear	14	$q_u = 78.001 \gamma_{dry} - 132.15$	0.9085
	Linear	28	$q_u = 80.833 \gamma_{dry} - 135.14$	0.9797
5	Linear	7	$q_u = 146.64 \gamma_{dry} - 251.52$	0.8950
	Linear	14	$q_u = 188.45 \gamma_{dry} - 323.69$	0.8805
	Linear	28	$q_u = 198.05 \gamma_{dry} - 339.47$	0.9073
7	Linear	7	$q_u = 254.02 \gamma_{dry} - 440.89$	0.9782
	Linear	14	$q_u = 254.64 \gamma_{dry} - 434.27$	0.9161
	Linear	28	$q_u = 278.19 \gamma_{dry} - 473.64$	0.9398

ตารางที่ 2.9 สมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการบดอัด (E) และค่า q_u ของดินทรายปนดิน ตะกอนผสมซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 3-28 วัน ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 (ธีรชาติ, 2544)

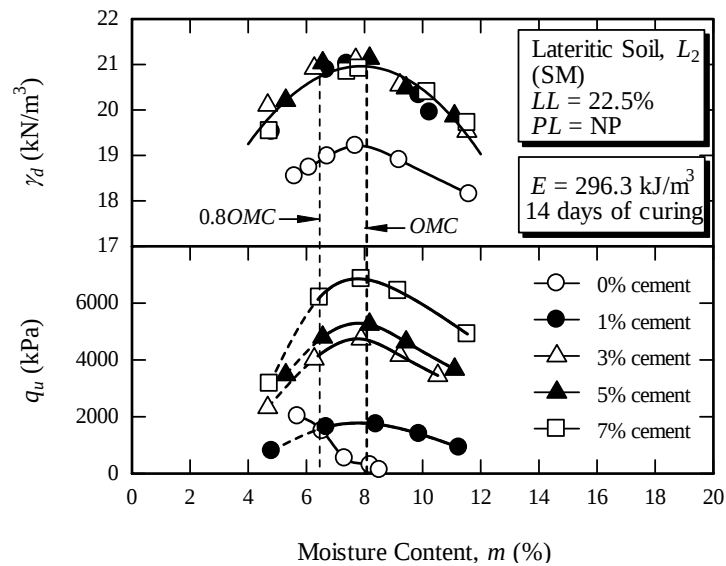
Type of compaction	Equation model	Age of curing, (days)	Regression equation (kPa)	Determination coefficient, R^2
3	Logarithm	3	$q_u = 2.6240\text{Ln}(E) - 18.979$	0.9900
	Logarithm	7	$q_u = 2.6240\text{Ln}(E) - 18.979$	0.9862
	Logarithm	14	$q_u = 3.3984\text{Ln}(E) - 24.928$	0.9996
	Logarithm	28	$q_u = 2.7521\text{Ln}(E) - 15.932$	0.9922
5	Logarithm	3	$q_u = 6.2736\text{Ln}(E) - 45.008$	0.9451
	Logarithm	7	$q_u = 6.2736\text{Ln}(E) - 45.008$	0.9696
	Logarithm	14	$q_u = 6.7005\text{Ln}(E) - 45.384$	0.9317
	Logarithm	28	$q_u = 6.1813\text{Ln}(E) - 35.983$	0.9999
7	Logarithm	3	$q_u = 8.3588\text{Ln}(E) - 58.288$	0.9987
	Logarithm	7	$q_u = 12.835\text{Ln}(E) - 95.995$	0.9952
	Logarithm	14	$q_u = 11.146\text{Ln}(E) - 74.111$	0.9985
	Logarithm	28	$q_u = 10.320\text{Ln}(E) - 58.633$	0.9880

ตารางที่ 2.10 สมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน q_u และในการบดอัด (E) ของดินทรายปนดิน ตะกอนผสมซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3-7 ภายใต้ทุกอายุการบ่ม (ธีรชาติ, 2544)

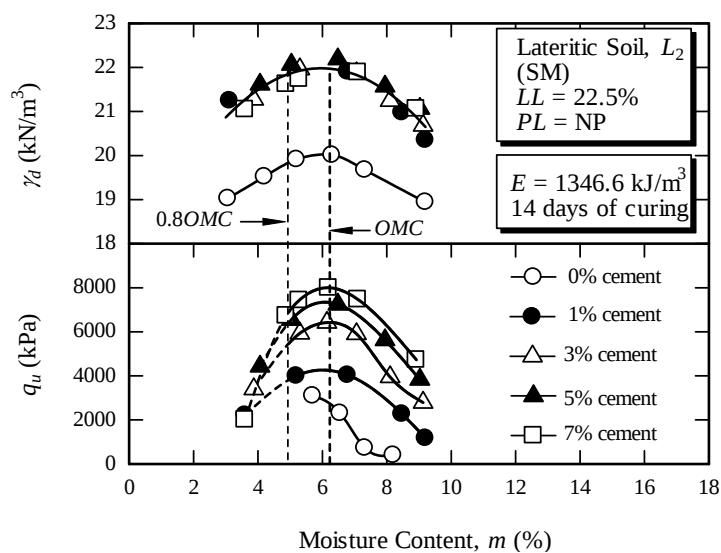
Cement content (%)	Equation model	Regression equation	Determination coefficient, R^2
3	Logarithm	$q_u = 2.7628\text{Ln}(E) - 19.240$	0.5667
5	Logarithm	$q_u = 5.9741\text{Ln}(E) - 39.864$	0.6079
7	Logarithm	$q_u = 10.665\text{Ln}(E) - 71.757$	0.6501

วรรัชย์ (2548) ได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินเม็ดหยาบ (ลูกรังและหินคลุก) ผสมซีเมนต์บดอัด ที่พลังงานบดอัดแบบครึ่งมาตรฐาน และพลังงานบดอัดแบบครึ่งสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 14 และ 28 วัน พบว่ากราฟการบดอัดของดินผสมซีเมนต์และดินไม่ผสมซีเมนต์จะมีค่าปริมาณน้ำเหมาะสม

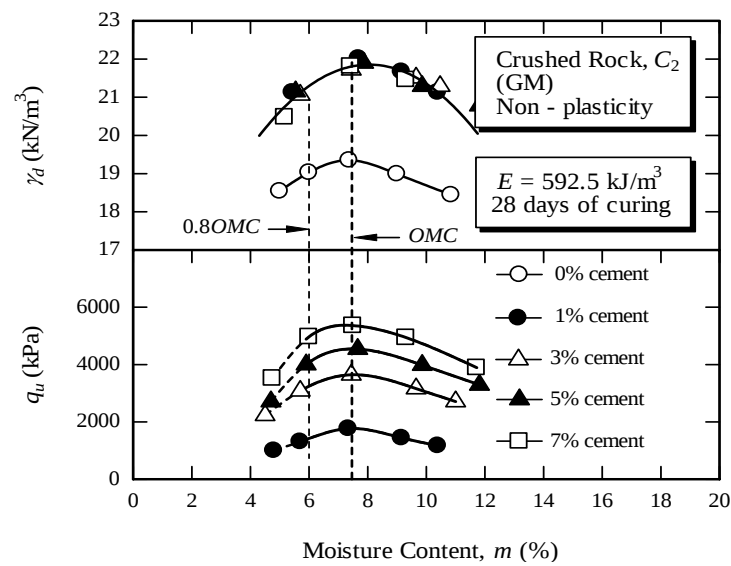
ใกล้เคียงกันมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าเดียวกัน แต่หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินผสมซีเมนต์จะมีค่าสูงกว่าดินไม่ผสมซีเมนต์ และมีค่าใกล้เคียงกันทุกๆ ปริมาณซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ถึง 2.5



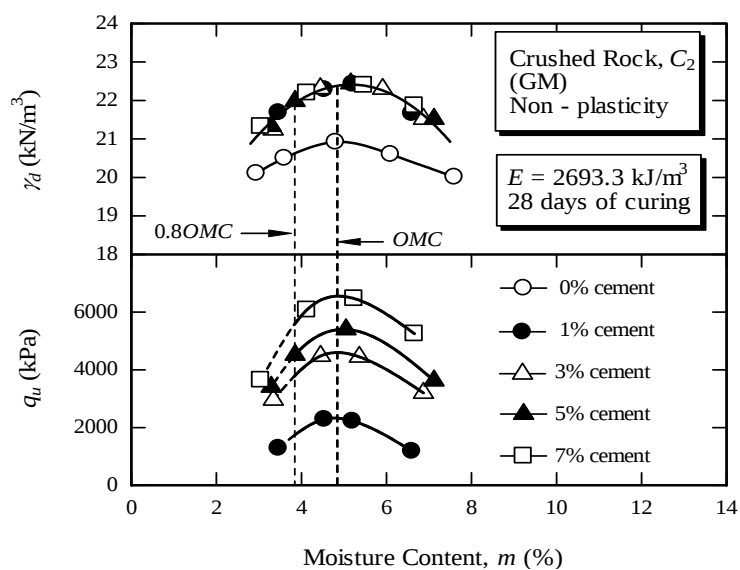
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์ อายุบ่ม 14 วัน ที่พลังงานบดอัดแบบครึ่งมาตรฐาน (วรรัชย์, 2548)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์ อายุบ่ม 14 วัน ที่พลังงานบดอัดแบบครึ่งสูงกว่ามาตรฐาน (วรรัชย์, 2548)



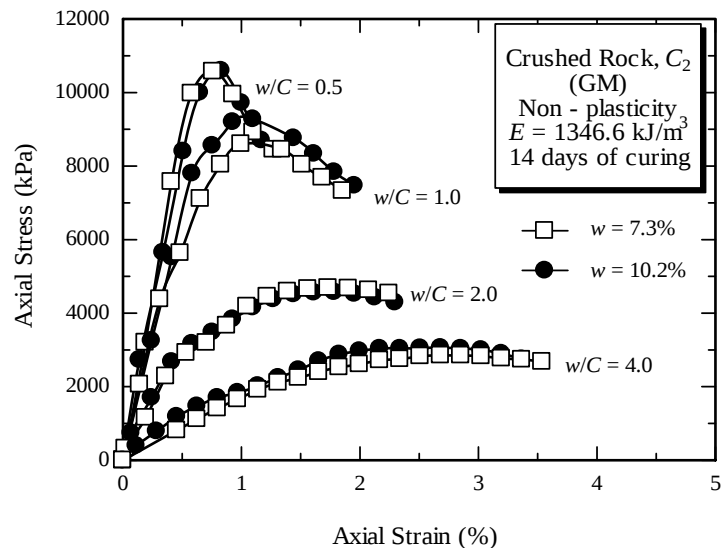
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกผสมซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 28 วัน พลังงานบดอัดแบบมาตรฐาน (วรรณชัย, 2548)



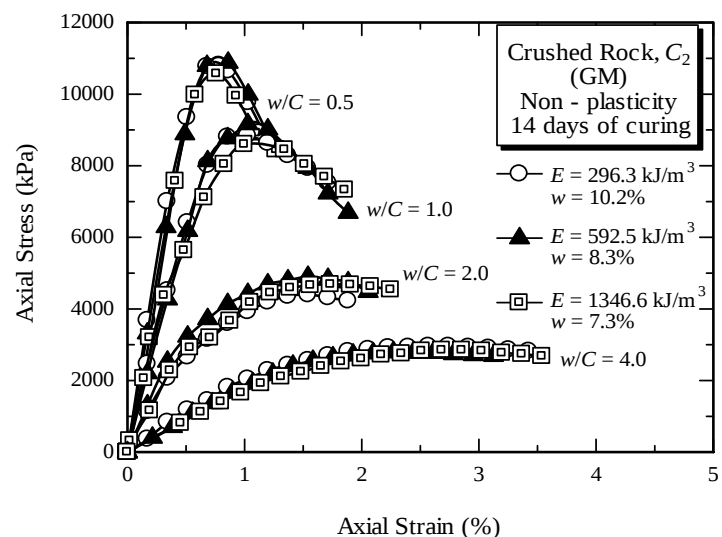
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ - ความหนาแน่นแห้ง - กำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกผสมซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 28 วัน พลังงานบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (วรรณชัย, 2548)

นอกจากนี้ วรรณชัย (2548) ยังได้ศึกษาพฤติกรรมกำลังอัดแกนเดียวของหินคลุกผสมซีเมนต์บดอัดด้วยพลังงาน 3 ค่า ได้แก่ 296.3, 592.5, และ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ทางด้านเปียกของ

ปริมาณน้ำเหมาะสม ที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากัน ได้ผลทดสอบดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 และสรุปว่ากำลังอัดแปรผันเป็นปฏิกิริยาคลับกับอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์

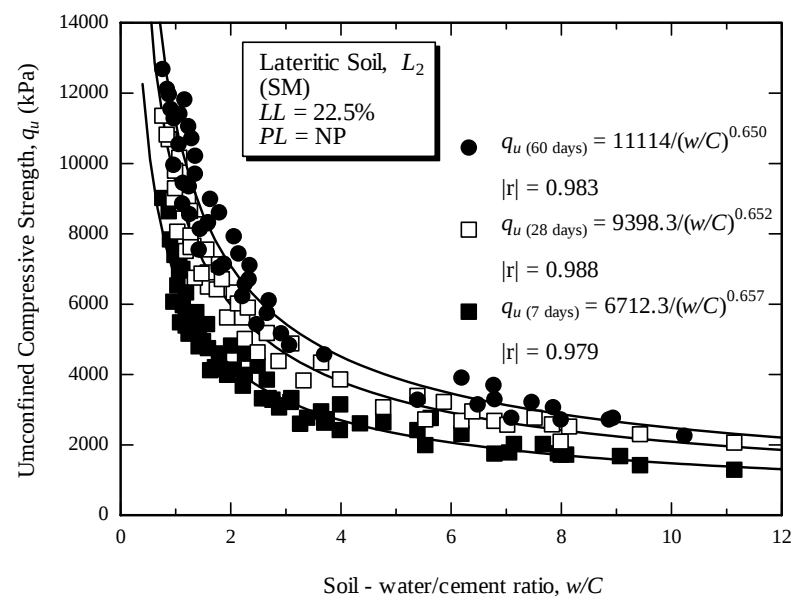


รูปที่ 2.6 แรงอัดแกนเดียวของหินคลุก ที่ค่า w/C เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 ภายใต้พลังงานการบดอัดที่ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (วรรัชย์, 2548)

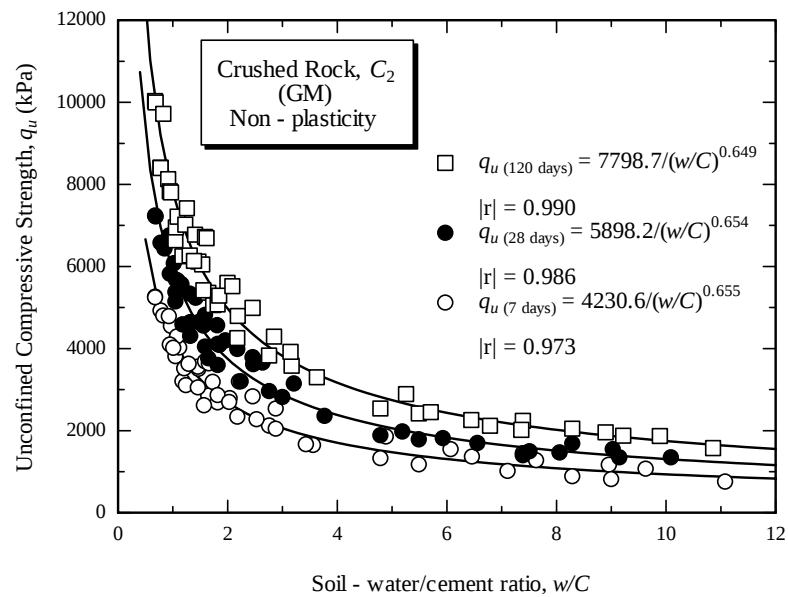


รูปที่ 2.7 แรงอัดแกนเดียวของหินคลุก ที่ค่า w/C เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 ภายใต้พลังงานบดอัดที่แตกต่างกัน (วรรัชย์, 2548)

เพื่อให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแปรผันเป็นปฏิกิริยากลับกับอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ วรรชัย (2548) จึงทำการบดอัดดินลูกรัง และหินคลุก โดยผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณ 1-7 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง ภายใต้พลังงานการบดอัด 296.3, 592.5, 1346.6 และ 1693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุบ่ม 7, 28, และ 120 วัน ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์สามารถแทนด้วยฟังก์ชันกำลัง (power function) ดังสมการที่ 2.6



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินลูกรัง (วรรชัย, 2548)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของหินคลุก (วรรัชย์, 2548)

$$q_u = \frac{A}{(w/C)^B} \quad (2.6)$$

พารามิเตอร์ A เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและอายุบ่ม ส่วนพารามิเตอร์ B เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดินมีค่าเกือบคงที่เท่ากับ 0.65 และได้เสนอสมการกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ระยะบ่มเดียวกันค่าหนึ่งดังสมการที่ 2.7

$$\left\{ \frac{q_{(w/C)_1}}{q_{(w/C)_2}} \right\} = \left[\frac{A/(w/C)_1^{0.65}}{A/(w/C)_2^{0.65}} \right] = \left[\frac{(w/C)_2}{(w/C)_1} \right]^{0.65} \quad (2.7)$$

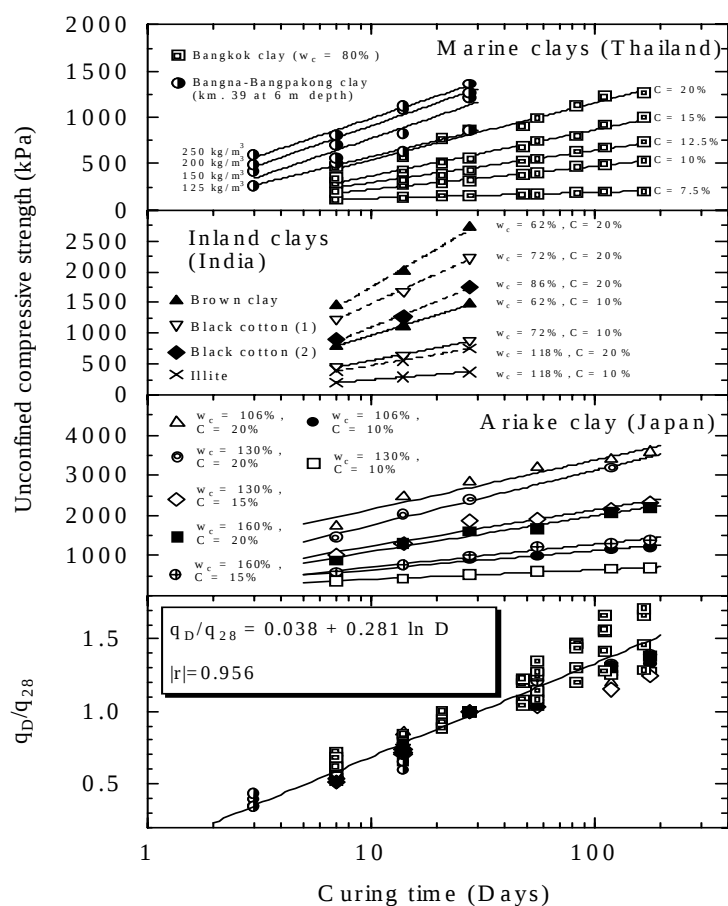
สมการทำนายกำลังที่ได้สามารถทำนายกำลังอัดของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด โดยอาศัยผลทดสอบกำลังอัดที่ทราบอัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์เพียงค่าเดียวก็สามารถทำนายกำลังอัดที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์อื่นได้ แต่สมการดังกล่าวยังไม่ได้รวมอิทธิพลของอายุบ่ม

Horpibulsuk et al. (2003) ได้ศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังของดินปริมาณความชื้นสูงผสมซีเมนต์สัมพันธ์กับอายุบ่ม โดยทำการทดลองกับดินหลายชนิด ที่ปริมาณซีเมนต์และปริมาณความชื้นต่างๆ พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังของดินซีเมนต์ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน เมื่อเขียน

กำลังอัดที่อายุบ่มใดๆ ในพจน์ของกำลังที่อายุบ่มอ้างอิงค่าหนึ่ง (ผู้วิจัยเลือกใช้อายุบ่ม 28 วัน) ดังสมการที่ 2.8 และกราฟรูปที่ 2.10

$$q_D / q_{28} = 0.038 + 0.281 \ln D \quad (2.8)$$

เมื่อ q_D คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม D ใด ๆ q_{28} คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 28 วัน และ D คือระยะบ่ม



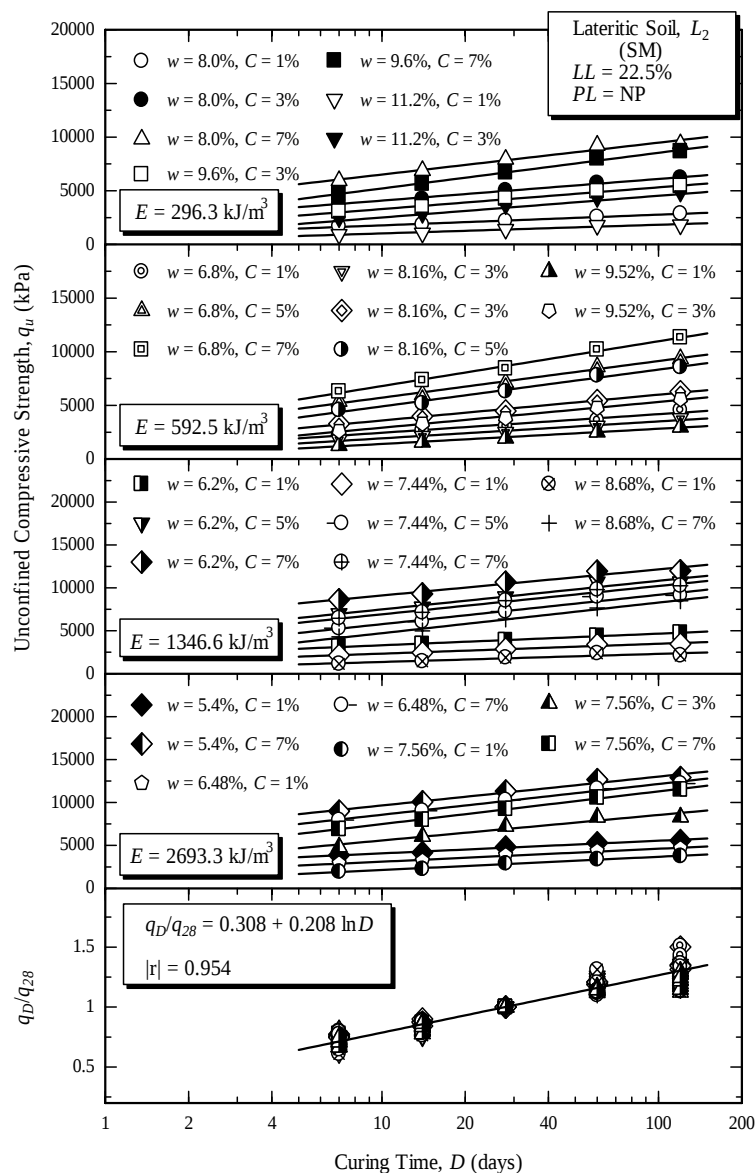
รูปที่ 2.10 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003)

Horpibulsuk et al. (2006) ทำการศึกษากำลังอัดแกนเดียวของดินผสมซีเมนต์บดอัดจากดินลูกรัง และหินคลุก (รูปที่ 2.11 ถึง 2.13) โดยผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณ 1-7 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก

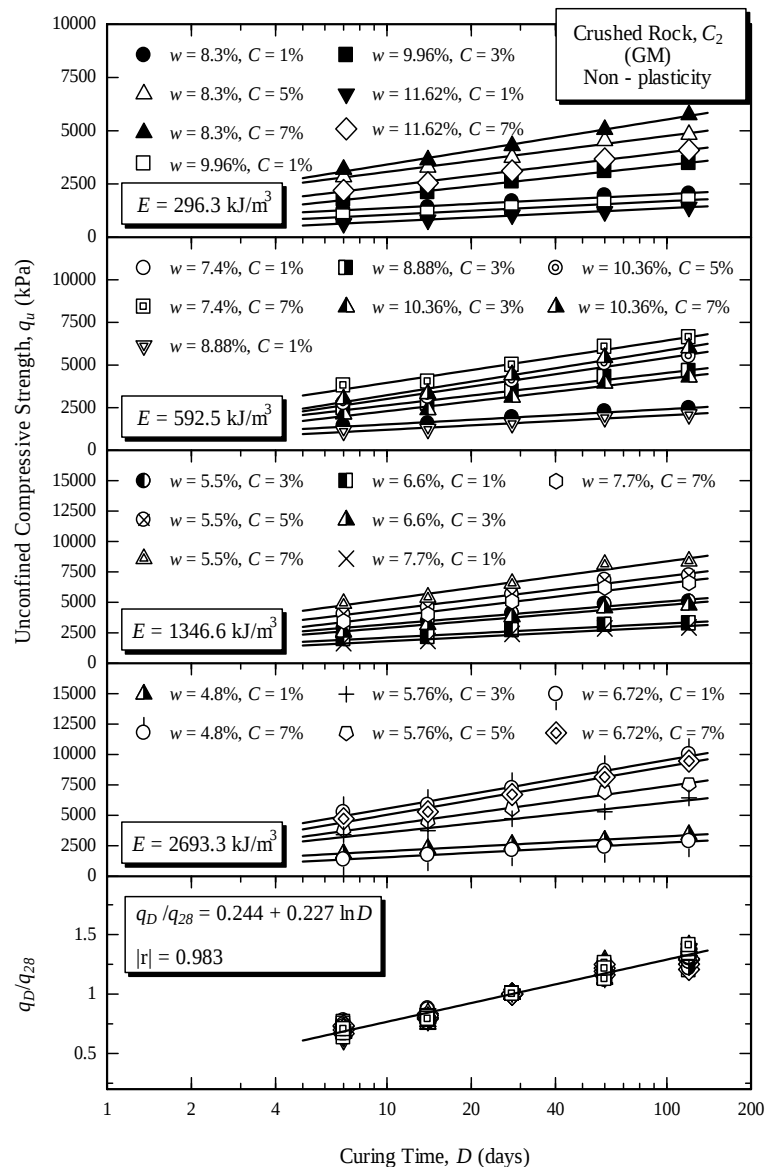
ดินแห้ง ภายใต้พลังงานการบดอัด 296.3, 592.5, 1346.6 และ 1693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุบ่ม 7, 28, และ 120 วัน และได้สร้างสมการ

$$q_D / q_{28} = 0.308 + 0.208 \ln D \quad \text{สำหรับดินลูกรัง} \quad (2.9)$$

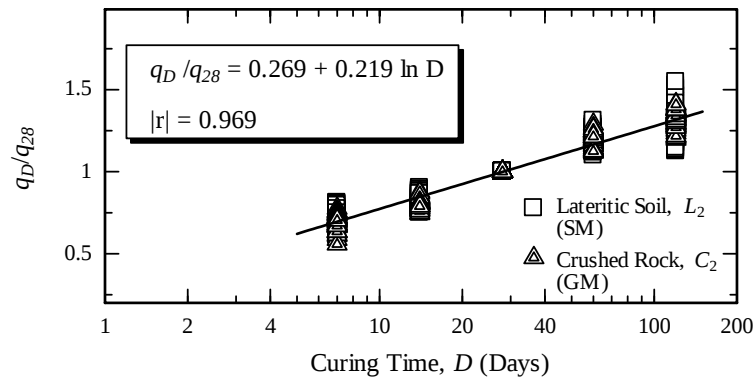
$$q_D / q_{28} = 0.308 + 0.208 \ln D \quad \text{สำหรับดินลูกรัง} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินลูกรังผสมซีเมนต์บดอัด ทางด้านเปลือกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (Horpibulsuk et al. 2006)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของหินคลุกผสมซีเมนต์บดอัด
ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (Horpibulsuk et al. 2006)



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ (วรรัชย์, 2548)

และได้เสนอสมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์บดอัดซึ่งสามารถใช้ได้กับดินซีเมนต์ในช่วงความชื้น 100-140% ของปริมาณความชื้นเหมาะสม และช่วงที่ความชื้น 80-100% ของปริมาณความชื้นเหมาะสมจากความสมดุลของกราฟ ดังสมการที่ 2.11

$$\left\{ \frac{q_{(w/C)D}}{q_{(w/C)28}} \right\} = \left[\frac{(w/C)_{28}}{(w/C)_D} \right]^{0.65} (0.269 + 0.219 \ln D) \quad (2.11)$$

สมการดังกล่าวเป็นสมการทำนายกำลังที่สามารถใช้งานได้ดีกับดินเม็ดหยาบ แต่ยังไม่มีการยืนยันได้ว่าจะสามารถใช้งานกับดินที่มีขนาดละเอียดแตกต่างกันมากๆ ได้ เช่นอาจจะใช้งานได้ไม่ดีกับดินเม็ดละเอียดเป็นต้น

จากสมการที่ 2.11 เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปตัวแปรต่างๆดังสมการที่ 2.12 ตัวแปร B เป็นตัวแปรที่ค่อนข้างจะคงที่สำหรับดินกลุ่มหนึ่ง ตัวแปร E และ F จะมีความแตกต่างกันสำหรับดินแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.11 แต่การทดลองนี้ได้ทำการสร้างความสัมพันธ์สำหรับกลุ่มดินเม็ดหยาบและแนะนำให้ใช้ค่า $B = 0.65$, $E = 0.269$, และ $F = 0.219$ สำหรับดินเม็ดหยาบ

$$\left\{ \frac{q_{(w/C)D}}{q_{(w/C)28}} \right\} = \left[\frac{(w/C)_{28}}{(w/C)_D} \right]^B (E + F \ln D) \quad (2.12)$$

ตารางที่ 2.11 ตารางแสดงตัวแปรต่างๆ ในสมการทำนายกำลังที่สัมพันธ์กับชนิดของดิน (วรรัชย์, 2548)

Type of soils	Parameter		
	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
Lateritic soil	0.65	0.308	0.208
Crushed rock	0.65	0.244	0.277

2.8 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

Horpibulsuk et al. (2006) ได้เริ่มทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย โดยส่องตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและหาการกระจายขนาดของช่องว่าง ได้แบ่งขนาดช่องว่างออกเป็น 3 กลุ่ม : ช่องว่างอากาศ (ขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน) ช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน (ขนาด 10-0.01 ไมครอน) และช่องว่างภายในอนุภาคดิน (ขนาดเล็กกว่า 0.01 ไมครอน) และได้อธิบายว่า ที่อัตราส่วนซีเมนต์เถ้าลอยค่าหนึ่ง ผลกระทบจากปฏิกิริยาเคมีมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มและอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน แต่ช่องว่างภายในอนุภาคดินและช่องว่างอากาศมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากถึงแม้อายุบ่มจะเพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนซีเมนต์-เถ้าลอยค่าหนึ่ง กำลังอัดจะแปรผันกลับกับปริมาณช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน การศึกษานี้ทำให้ทราบว่า อนุภาคดินซีเมนต์เถ้าลอยจับตัวกันอยู่อย่างไร และทราบถึงสาเหตุการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าลอย แต่ยังไม่มีการศึกษากับดินซีเมนต์

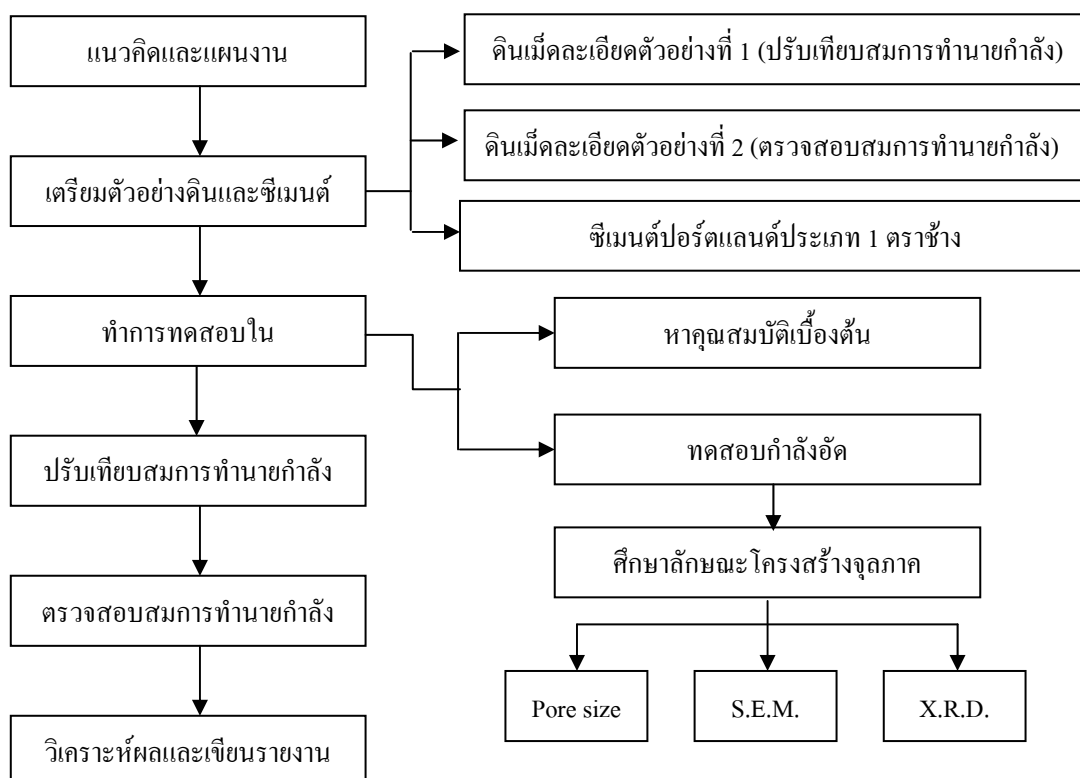
การศึกษาในครั้งนี้ต้องการสร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดทั้งทางด้านเปียกและด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยอาศัยแนวคิดจากสมการทำนายกำลังของดินเม็ดหยาบ พร้อมทั้งอธิบายพฤติกรรมของดินซีเมนต์ในระดับโครงสร้างโดยการถ่ายภาพลักษณะโครงสร้างดิน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาการกระจายขนาดของช่องว่างโดยการอัดปรอทด้วยเครื่อง Mercury intrusion porosimeter ควบคู่ไปกับการศึกษาชนิดของอนุภาค (ผลึก) ด้วยเครื่องมือ X-ray diffraction เพื่อตรวจหาผลึกที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและอธิบายกลไกควบคุมกำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด เพื่อทำนายกำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด เพื่อให้ครอบคลุมข้อปัญหา ผู้วิจัยได้เลือกดินตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง เก็บแบบแปรสภาพ เก็บที่ความลึก 1.5 -2.0 เมตร ซึ่งเป็นดินเม็ดละเอียด ดินตัวอย่างที่ 1 เก็บจากบริเวณอาคารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จะนำมาบดอัดและหาลำดับอัดเพื่อเทียบปรับ (calibration) สมการทำนายกำลัง ส่วนดินตัวอย่างที่ 2 เก็บจากบริเวณหอพัก สุรสวัสดิ์แมนชั่น หมู่บ้านสุรสวัสดิ์แลนด์ ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา จะนำมาบดอัดและหาลำดับอัดเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง (verification) ของสมการทำนายกำลังอัด วิธีการสร้างสมการจะใช้วิธีที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2006) ส่วนการศึกษาลักษณะโครงสร้างของดินซีเมนต์ จะส่องตัวอย่างดินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (S.E.M.) เพื่อให้เห็นอนุภาคที่ประกอบเป็นดินซีเมนต์ แล้วส่องตัวอย่างดินด้วยเครื่องมือ X-ray diffraction เพื่อศึกษาปริมาณอนุภาคนิคมต่าง ๆ จากนั้นจะใช้เครื่องมือ Mercury intrusion porosimeter เพื่อหาขนาดและปริมาณช่องว่างในดิน แผนงานวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 3.1 วิธีการทดสอบและจำนวนตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3.1 รายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน	
ดินเม็ดละเอียดตัวอย่างที่ 1 (เทียบปรับสมการทำนายกำลัง)	แปรสภาพที่บริเวณอาคารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ความลึก 1.5-2.0 เมตร จากผิวดิน
ดินเม็ดละเอียดตัวอย่างที่ 2 (ตรวจสอบสมการทำนายกำลัง)	แปรสภาพที่บริเวณหอพักสุรสวัสดิ์แมนชั้น หมู่บ้านสุรสวัสดิ์แลนด์ ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ที่ความลึก 1.5-2.0 เมตรจากผิวดิน
การทดสอบการบดอัดของดินที่ไม่ผสมซีเมนต์	
ดินเม็ดละเอียดตัวอย่างที่ 1 (สร้างกราฟการบดอัด)	จำนวน 32 ชุดตัวอย่าง
ดินเม็ดละเอียดตัวอย่างที่ 2 (สร้างกราฟการบดอัด)	จำนวน 10 ชุดตัวอย่าง

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

การทดสอบการบดอัดของดินที่ไม่ผสมซีเมนต์	
การทดสอบกำลังอัด	จำนวน 19 ชุดตัวอย่าง
ทดสอบการบดอัดดินเม็ดละเอียดตัวอย่างที่ 1 ผสมซีเมนต์ (ซีเมนต์ 4 ค่า $\times$ 4 พลังงาน $\times$ ความชื้น 5 ค่า $\times$ 6 อายุบ่ม (3 ก้อนตัวอย่าง))	จำนวน 1440 ชุดตัวอย่าง
ทดสอบการบดอัดดินเม็ดละเอียดตัวอย่างที่ 2 ผสมซีเมนต์ (ซีเมนต์ 4 ค่า $\times$ 2 พลังงาน $\times$ ความชื้น 5 ค่า $\times$ 3 อายุบ่ม (3 ก้อนตัวอย่าง))	จำนวน 360 ชุดตัวอย่าง
การศึกษาลักษณะโครงสร้างของดินซีเมนต์บดอัด	
ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซีเมนต์ 2 ค่า $\times$ 2 พลังงาน $\times$ ความชื้น 3 ค่า $\times$ 3 อายุบ่ม + ที่อัตราส่วน w/C เดียวกัน 6 ค่า	จำนวน 42 ชุดตัวอย่าง
ทดสอบการกระจายขนาดของช่องว่าง ซีเมนต์ 2 ค่า $\times$ 2 พลังงาน $\times$ ความชื้น 3 ค่า $\times$ 1 อายุบ่ม + ที่อัตราส่วน w/C เดียวกัน 5 ค่า	จำนวน 17 ชุดตัวอย่าง
X-ray diffraction ซีเมนต์ 2 ค่า $\times$ 2 พลังงาน $\times$ ความชื้น 3 ค่า $\times$ 3 อายุบ่ม + ที่อัตราส่วน w/C เดียวกัน 6 ค่า	จำนวน 42 ชุดตัวอย่าง

3.2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

3.2.1 การเตรียมดินตัวอย่าง

ดินตัวอย่างที่ 1 เก็บแบบแปรสภาพที่บริเวณอาคารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ความลึกประมาณ 1.5-2.0 เมตรจากผิวดิน เพื่อให้ได้ดินที่มีลักษณะเหมือนกันมากที่สุดโดยไม่มีการอินทรีย์ปนเปื้อน ดินตัวอย่างถูกเก็บในถังพลาสติกในสภาพแห้งดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก) เพื่อให้ง่ายต่อการย่อยดิน ตัวอย่างดินถูกนำมาทุบด้วยค้อนยางจนได้ขนาดประมาณ 1-2 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำเข้าเครื่องย่อยดินเพื่อให้ได้เม็ดดินที่มีขนาดเล็กลง และร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 4 ดินที่ผ่านการร่อนแล้วจะแบ่งใส่ถุงพลาสติกถุงละ 6 กิโลกรัมดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข) เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

ดินเม็ดละเอียดตัวอย่างที่ 2 เก็บแบบแปรสภาพที่บริเวณหอพัก สุรสวัสดิ์แมนชั้น หมู่บ้านสุรสวัสดิ์แลนด์ ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ที่ความลึก 1.5-2.0 เมตรจาก ผิวดิน และทำการเตรียมดินเช่นเดียวกันกับดินตัวอย่างที่ 1



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 การเตรียมดินตัวอย่าง

3.2.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทรายขาว ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมคิดเป็นร้อยละ 1, 3, 5, และ 7 ของน้ำหนักดินแห้ง

3.3 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง (basic property)

คุณสมบัติเบื้องต้นของดินมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ลักษณะทางวิศวกรรม ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานของดินจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของดินว่าเป็นดินเม็ดหยาบหรือดินเม็ดละเอียด ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินดังนี้

3.3.1 ปริมาณความชื้นเริ่มต้น

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2216

3.3.2 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 854

3.3.3 การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงร่อน

ทดสอบโดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบล้างตามมาตรฐานของ ASTM D 422

3.3.4 การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 422-63

3.3.5 ชีดจำกัดเหลว (liquid limit)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4318 ด้วยวิธีการทดสอบแบบหลายจุด (multipoint liquid limit)

3.3.6 พิกัดพลาสติก (plastic limit)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4318

3.4 การบดอัดดิน

การบดอัดจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

3.4.1 การทดสอบการบดอัดของดินที่ไม่ผสมซีเมนต์

เป็นการทดสอบเพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสม (optimum water content) รวมถึงกราฟการบดอัด (compaction curve) ของดินตัวอย่าง โดยใช้พลังงานในการบดอัด 4 ค่าได้แก่พลังงาน $\frac{1}{2}$ เท่าของการบดอัดแบบมาตรฐาน (E_1) พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน (E_2) พลังงานการบดอัดแบบ $\frac{1}{2}$ เท่าของการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (E_3) และพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (E_4) รูปแบบการบดอัดและพลังงานที่ใช้ในการบดอัด แสดงดังตารางที่ 3.2 แบบหล่อ (mold) ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร สูง 116.8 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.2 รูปแบบการบดอัดและพลังงานที่ใช้ในการทดสอบ

Compaction no.	Weight of hammer (N)	Number of layer	Number of blow/layer	Height of hammer drop (m)	Energy per unit volume (kJ/m^3)
E_1	24.464	3	13	0.3048	307.11
E_2	24.464	3	25	0.3048	590.59
E_3	44.48	5	13	0.4572	1395.93
E_4	44.48	5	25	0.4572	2684.48

3.4.2 การทดสอบการบดอัดดินตัวอย่างผสมซีเมนต์

ทำโดยนำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้เป็นถุงย่อยมาหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นของดินตามมาตรฐาน ASTM D 2216 หลังจากนั้นเติมน้ำลงไปดินให้ได้ความชื้นตามต้องการ โดยจะแปรผันปริมาณความชื้น 5 ค่าคือ 60%, 80%, 100%, 120% และ 140% ของปริมาณความชื้นเหมาะสม ดินตัวอย่างที่ถูกคลุกเคล้าให้เข้าแล้วจะถูกห่อในถุงพลาสติกเป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง แล้วนำดินตัวอย่างไปหาปริมาณความชื้นอีกครั้งเพื่อตรวจสอบ จากนั้นทำการผสมดินตัวอย่างและซีเมนต์ให้เข้ากันจนวัสดุที่ผสมมีสีกลมกลืนเป็นสีเดียวกัน แล้วเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ไปหาปริมาณความชื้นพร้อมกับทำการบดอัดทันที โดยรูปแบบการบดอัดและพลังงานที่ใช้จะเหมือนกับการบดอัดดินตัวอย่างที่ไม่ผสมซีเมนต์ ตัวอย่างดินซีเมนต์บดอัดถูกนำมาชั่งน้ำหนักและห่อด้วยฟิล์มพลาสติก ดังในรูปที่ 3.3 แล้วนำไปบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเป็นเวลา 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการควบคุมปริมาณความชื้น

3.5 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

เมื่อได้ดินซีเมนต์ตามระยะบ่มที่ต้องการนำตัวอย่างดินซีเมนต์ไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.5.1 นำตัวอย่างดินออกจากฟิล์มพลาสติก

ทำการชั่งน้ำหนัก วัดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางให้ละเอียด 0.1 มิลลิเมตรโดยใช้ Vernier caliper

3.5.2 นำตัวอย่างดินซีเมนต์เข้าเครื่องทดสอบ UTM

ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยใช้อัตราการกด 0.5% ของความสูงดินตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งดินตัวอย่างวิบัติ ทำการบันทึกผลทดสอบ ในรูปของความเค้นและความเครียดของดิน

3.5.3 เก็บตัวอย่างดินซีเมนต์หลังการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

เพื่อนำไปหาปริมาณความชื้น



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด

3.6 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของดินซีเมนต์บดอัด

ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวจะถูกนำมาทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของดินมีขั้นตอนดังนี้

3.6.1 Freeze drying

เป็นขั้นตอนการทำดินตัวอย่างให้แห้งก่อนนำไปหาการกระจายขนาดของช่องว่างทดสอบ X-ray diffraction และส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron

microscope) ดินตัวอย่างที่ถูกทำให้แห้งด้วยวิธีการ Freeze drying จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีน้อย วิธีการ Freeze drying มีขั้นตอนดังนี้ ดินตัวอย่างจะถูกนำมาย่อยให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวประมาณ 15 นาทีให้ไนโตรเจนเหลวซึมเข้าไปในตัวอย่างดิน หลังจากนั้นดินตัวอย่างจะถูกนำไปเข้าเครื่อง Freeze drying apparatus ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างดินหลังจากแต่งให้มีขนาด 1 เซนติเมตร



รูปที่ 3.6 Freeze drying apparatus

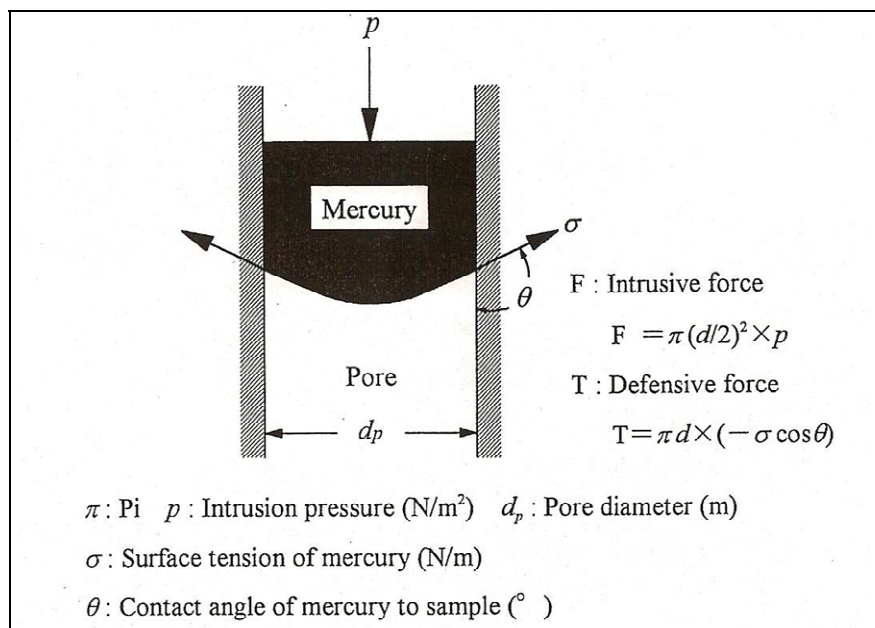
3.6.2 การหาการกระจายขนาดของช่องว่าง

ดินตัวอย่างจะถูกนำมาวัดขนาดช่องว่างด้วยเครื่อง Mercury intrusion porosimeter ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งสามารถวัดขนาดของช่องว่างที่มีขนาดระหว่าง 500-0.0035 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.7 Mercury intrusion porosimeter

ขนาดของช่องว่างคำนวณได้จากสมการระหว่างแรงอัดจากความดันของปรอท (F) ในขณะที่ปรอทแทรกเข้าไปในช่องว่าง กับแรงต้านที่เกิดจากแรงตึงผิวที่เกิดจากปรอทและดิน (T) ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 พื้นฐานการวัดขนาดช่องว่าง

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

เมื่อ p คือความดันของปรอทเกิดการแทรกเข้าไปในช่องว่าง (ปาสคาล), d_p คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องว่าง (เมตร), σ คือแรงตึงผิวปรอทสัมผัสกับอากาศมีค่าเท่ากับ 0.84 นิวตันต่อเมตร และ θ คือมุมสัมผัสระหว่างตัวอย่างกับปรอทมีค่าเท่ากับ 140 (องศา)

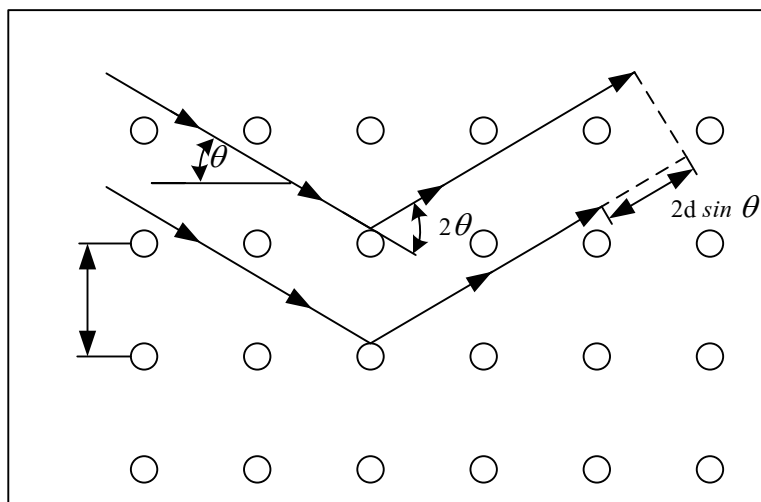
สมการที่ 3.1 ใช้ภายใต้สมมติฐาน 5 ข้อดังต่อไปนี้

- ก) ช่องว่างมีลักษณะเป็นทรงกระบอกอย่างสม่ำเสมอ
- ข) ปรอทจะเข้าไปแทรกในช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ก่อนช่องว่างที่มีขนาดเล็ก
- ค) การวัดขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องมือ คือ เครื่องมือที่สามารถอัดแรงดันได้มากจะสามารถหาขนาดช่องว่างที่เล็กลงได้อีก
- ง) โครงสร้างดินไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างการทดสอบ
- จ) ไม่มีของเหลวอื่นในตัวอย่าง

3.6.3 การทดสอบ X-ray diffraction

อาศัยคุณสมบัติการกระเจิงแสงของอนุภาคเมื่อรังสีเอกซ์มีความสามารถในการทะลุทะลวงสูงจะแทรกเข้าไปในโครงสร้างของผลึกซึ่งประกอบด้วยชั้นอนุภาคเรียงตัวกัน อนุภาคจะ

กระเจิงลำแสงและหักเหลำแสงไปเป็นมุม 2θ ดังรูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ถูกเสนอในรูปสมการที่ 3.2 รูปที่ 3.10 เป็นเครื่องทดสอบ X-ray diffraction



รูปที่ 3.9 หลักการของ Bragg 's Law

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.2)$$

n คือจำนวนลูกคลื่นที่ส่งออกมา, λ คือความยาวคลื่นเอกซเรย์, d คือระยะระหว่างอนุภาคในระนาบ, θ คือมุมที่รังสีตกกระทบบนระนาบของผลึก

สมการที่ 3.2 เป็นจริงภายใต้สมมติฐาน 2 ข้อดังต่อไปนี้

- ก) อนุภาคที่จะทำการทดสอบต้องมีคุณสมบัติการกระเจิงแสง
- ข) โครงสร้างดินประกอบด้วยผลึกหลายชนิด



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบ X-ray diffraction

3.6.4 การส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)

ดินตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งจะถูกทำให้แตกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-4 มิลลิเมตร และจะถูกนำไปติดบนแท่งติดตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.11 หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการเคลือบตัวอย่างด้วยเครื่อง Iron sputtering device ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และสุดท้ายเป็นขั้นตอนการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.11 ดินตัวอย่างที่ถูกย่อยและติดบนแท่งติดตัวอย่าง



รูปที่ 3.12 เครื่อง Iron sputtering device



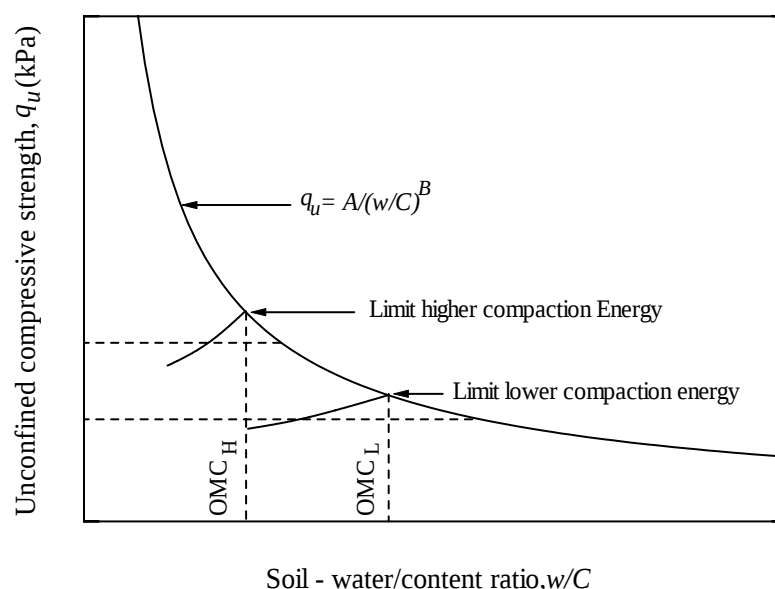
รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.7 สมการทำนายกำลังในพจน์ของตัวแปรควบคุม

สมการทำนายกำลังอัดของดินเม็ดละเอียดจะแปรผัน 4 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น พลังงาน และอายุบ่ม การสร้างสมการจะใช้แนวความคิดเดียวกับสมการทำนายกำลังของดินเม็ดหยาบ วรรณชัย (2548) ที่เสนอว่ากำลังอัดแปรผันเป็นปฏิภาคกลับกับอัตราส่วน ปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และได้เสนอความสัมพันธ์ในรูปของฟังก์ชันกำลัง (power function) ดังสมการที่ 3.3

$$q_u = \frac{A}{(w/C)^B} \quad (3.3)$$

พารามิเตอร์ A เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและอายุบ่ม ส่วนพารามิเตอร์ B เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ปริมาณซีเมนต์และปริมาณความชื้นเป็นตัวแปรที่อยู่ในสมการสำหรับพลังงาน เป็นตัวแปรที่แฝงอยู่ในสมการคือ พลังงานจะทำให้สามารถบดอัดดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ต่ำได้ ดังนั้นจึงจะสร้างความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกับดินเม็ดหยาบดังในกราฟรูปที่ 3.14 เพื่อดูว่ากำลังอัดของดินเม็ดละเอียดเป็น ฟังก์ชันกำลัง (power function) หรือไม่

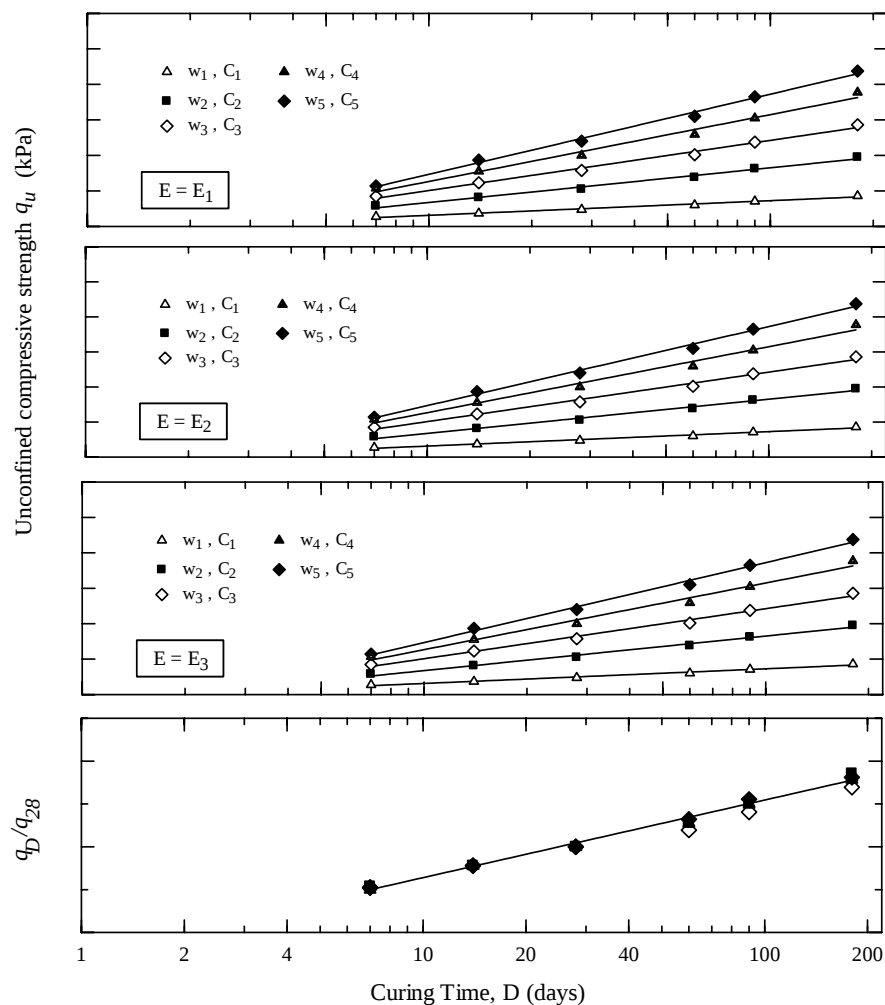


รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัด

ส่วนปัจจัยอายุบ่ม วรรณชัย (2548) พบว่ากราฟ Semi-log ระหว่างกำลังอัดสัมพันธ์กับอายุบ่ม ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์และพลังงานต่างๆ เป็นกราฟเส้นตรง และเมื่อหาร (normalize) ด้วยกำลังอัดที่อายุบ่มอ้างอิงหนึ่ง (28 วัน) จะได้กราฟเส้นตรงเดียวกันสำหรับทุกอัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์เดียวกันและทุกพลังงาน ถ้าพบว่าสมการเป็นฟังก์ชันกำลัง (power function) เช่นเดียวกับดินเม็ดหยาบ ผู้วิจัยจะได้ค่าของตัวแปรดังกล่าวจากกราฟ ทำให้ได้สมการทำนายกำลังเช่นเดียวกับดินเม็ดหยาบดังในสมการที่ 3.4

$$\frac{q_{(w/C)1,D}}{q_{(w/C)1,28}} = \left\{ \frac{q_{(w/C)2,D}}{q_{(w/C)3,28}} \right\} \left[\frac{(w/C)_{2,D}}{(w/C)_{3,D}} \right]^B \quad (3.4)$$

แต่สมการนี้ยังไม่คำนึงถึงอิทธิพลของอายุบ่มจึงจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระยะบ่มกำลังอัดที่อัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และพลังงานการบดอัดต่างๆ เช่นเดียวกับดินเม็ดหยาบดังกราฟรูปที่ 3.15 และจะหาค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการที่ 3.5 ที่ใช้กับดินเม็ดละเอียด



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม

ดังนั้นสำหรับดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด ถ้าผู้วิจัย Plot กราฟกำลังอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และสามารถ Fit ฟังก์ชันกำลังเข้ากับข้อมูล จากนั้น Plot

กราฟกำลังอัดสัมพันธ์กับอายุบ่มสำหรับแต่ละพลังงาน และเมื่อหารด้วยกำลังอัดที่ 28 วัน ถ้าสามารถหาค่าเส้นตรงเข้ากับข้อมูลได้ ก็จะสรุปได้ว่ากำลังอัดสำหรับดินเหนียวละเอียดเป็นไปตามสมการที่ 3.5

$$\left\{ \frac{q_{(w/C)D}}{q_{(w/C)28}} \right\} = \left[\frac{(w/C)_{28}}{(w/C)_D} \right]^B (E + F \ln D) \quad (3.5)$$

สำหรับทางด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นเหมาะสมจะตรวจสอบดูว่ากราฟกำลังอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ด้านหนึ่งสมมาตรกับด้านเปียกหรือไม่และช่วงพิสัยที่เหมาะสม เพื่อใช้ประโยชน์ความสมมาตรต่อไป

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษากำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด เพื่อสร้างความเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมกำลังอัด (พลังงานการบดอัด ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม) และนำเสนอการเทียบปรับสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดเพื่อใช้ในการประมาณกำลังอัดโดยแปรผันตัวแปรควบคุมโดยอาศัยเพียงผลทดสอบที่ 28 วัน ที่พลังงานการบดอัดเดียวของดินที่ต้องการทำนายกำลังอัด

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ศึกษาวิจัย

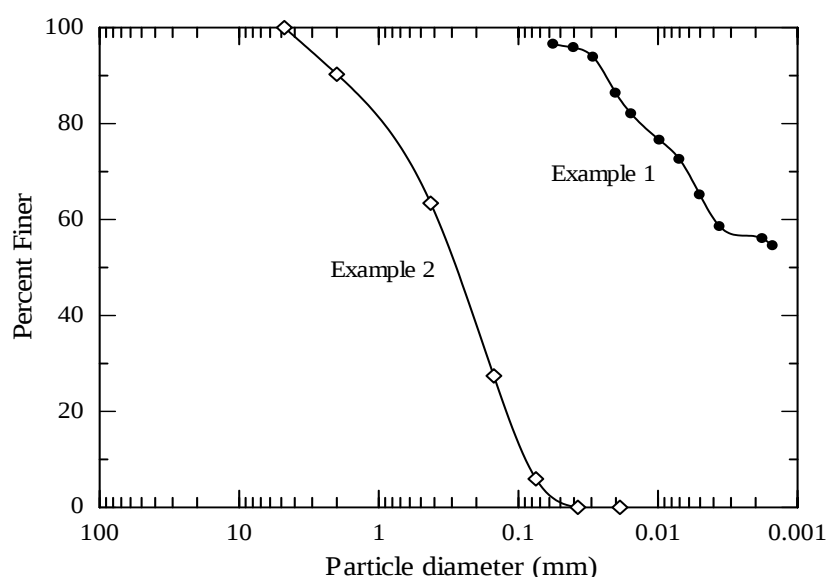
จากการศึกษาตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิด พบคุณสมบัติพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 4.1 ขนาดกละของดินทั้งสองชนิดแสดงในรูปที่ 4.1

ดินตัวอย่างที่ 1 เก็บจากบริเวณอาคารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา ที่ระดับความลึก 1.5-2.0 เมตร จากผิวดิน ดินดังกล่าวมีปริมาณทราย:ดินตะกอน:ดินเหนียว เท่ากับ 2:45:53 จัดเป็นดินเหนียวปนดินตะกอน (silty clay) ชีดจำกัดเหลว และชีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 50.9 และ 26.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดัชนีสภาพพลาสติกมีค่าเท่ากับ 34.7 เปอร์เซ็นต์ ดินนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกสูง (CH) ตามการจำแนกดินแบบเอกภาพ (unified soil classification system, USCS)

ดินตัวอย่างที่ 2 เก็บจากบริเวณหอพัก สุรสวัสดิ์แมนชั่น หมู่บ้าน สุรสวัสดิ์แลนด์ ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ที่ความลึก 1.5-2.0 เมตร จากผิวดิน ดินดังกล่าวประกอบด้วย ทรายเป็นมวลหลักในปริมาณสูงถึงร้อยละ 91.5 ส่วนประกอบที่เหลือเป็นดินตะกอน และดินเหนียวในปริมาณร้อยละ 7.5 และ 1.0 ตามลำดับ การจำแนกดินแบบเอกภาพดินนี้จัดเป็นดินทรายปนดินตะกอน (SW-SM) เนื่องจากมีปริมาณดินเหนียวอยู่น้อย ดินนี้จัดเป็นดินที่ไม่มีพลาสติก (non-plastic)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ 1 และดินตัวอย่างที่ 2

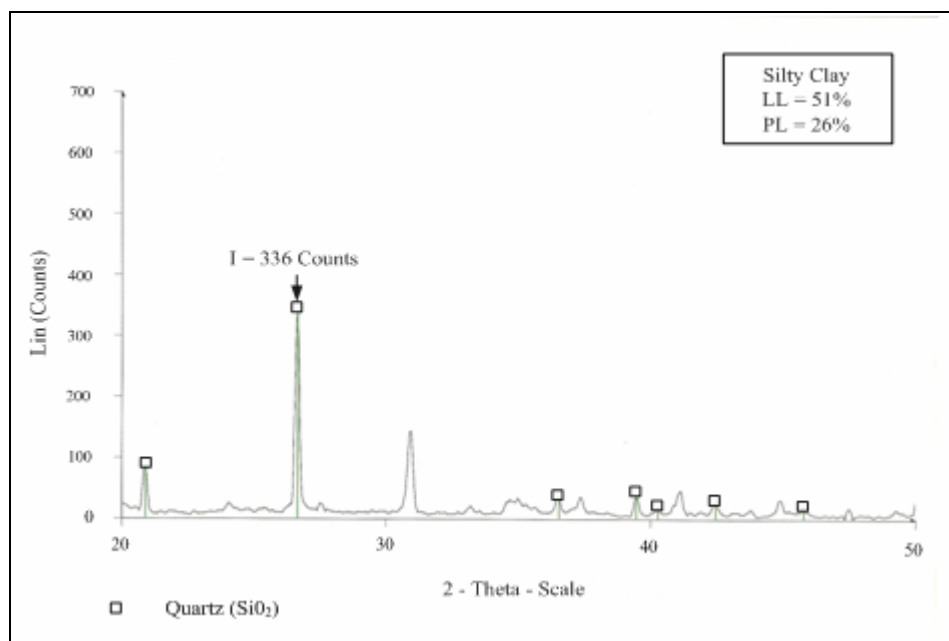
Soil properties	Example 1	Example 2
Physical properties :		
1. Specific gravity	2.57	2.60
2. Liquid limit,%	51	NP
3. Plastic limit,%	26	NP
Unified soil classification	CH	SW-SM



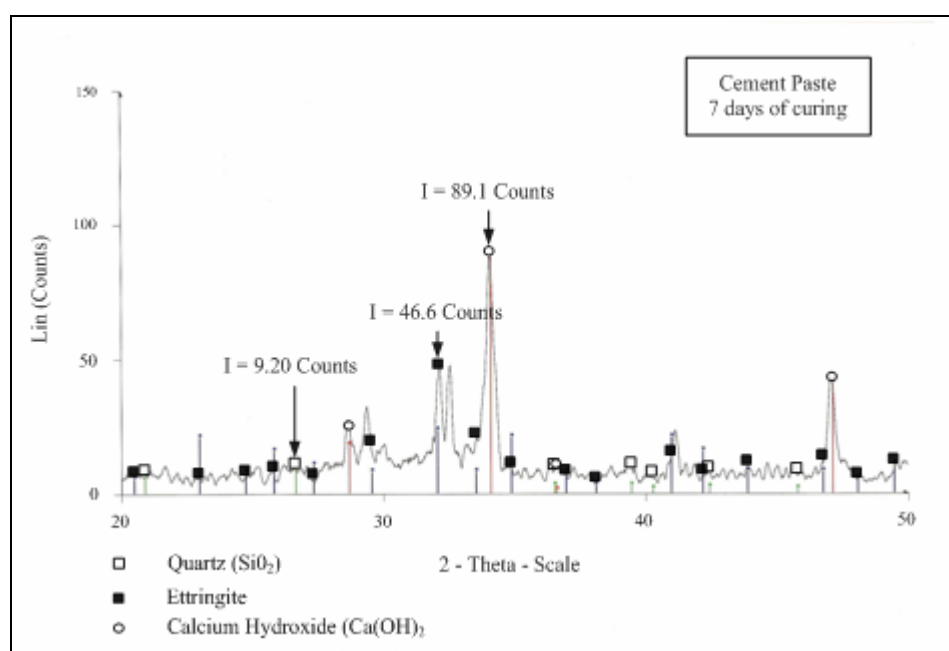
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดผลของดินตัวอย่าง

4.3 ผลการทดสอบ X - ray diffraction ของดินตัวอย่างที่ 1 และซีเมนต์เพส

รูปที่ 4.2 แสดงผลทดสอบ X - ray diffraction ของดินตัวอย่างที่ 1 และซีเมนต์เพสที่อายุ บ่ม 7 วัน ดินเหนียวปนดินตะกอนมีแร่ Quartz (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก มุม 2θ ที่ให้ค่า Lin counts สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 26.7 องศา สำหรับปูนซีเมนต์ปริมาณผลึกของ Calcium hydroxide และ ปริมาณ Ettringite ที่เกิดขึ้นเป็นตัวบ่งชี้ว่าความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน มุม 2θ ที่ให้ค่า Lin counts สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 34.2 และ 32.1 องศา สำหรับ Calcium hydroxide และ Ettringite ตามลำดับ



a) ดินตัวอย่างที่ 1



b) ซีเมนต์เพส (ซีเมนต์ 40 กรัม ผสมน้ำ 20 กรัม) ที่อายุบ่ม 7 วัน

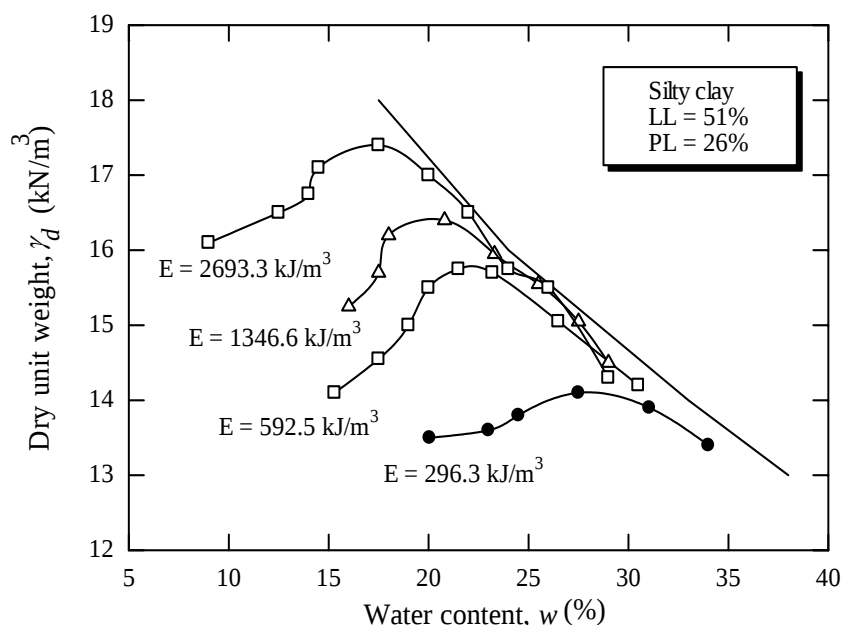
รูปที่ 4.2 Diffractogram ของดินตัวอย่างที่ 1 และซีเมนต์เพส

4.4 กราฟการบดอัด ความเค้น-ความเครียด ของดินเหนียวปนดินตะกอนบดอัดที่ไม่

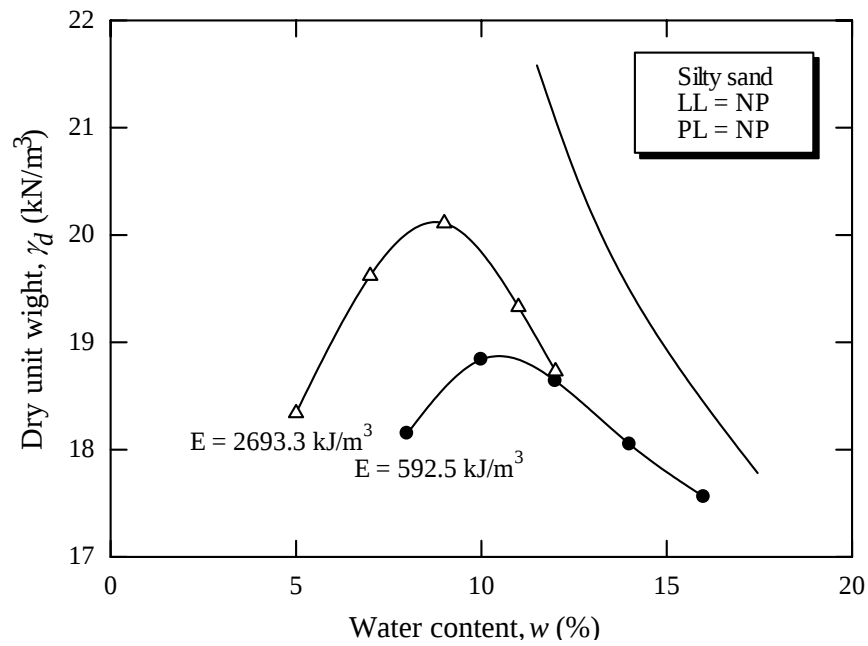
ผสมซีเมนต์

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลการบดอัดดินตัวอย่างที่ 1 และดินตัวอย่างที่ 2 ที่พลังงานการบดอัดต่างๆ จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มพลังงานปริมาณความชื้นมีค่าน้อยลง และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบของนักวิจัยในอดีต (ชัย, มานะ, สถาพร, และ Horpibulsuk et al, 2006 เป็นต้น) นอกจากนี้ ยังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นหลังปริมาณความชื้นเหมาะสม มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกัน และขนานกับเส้นช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ (zero air void)

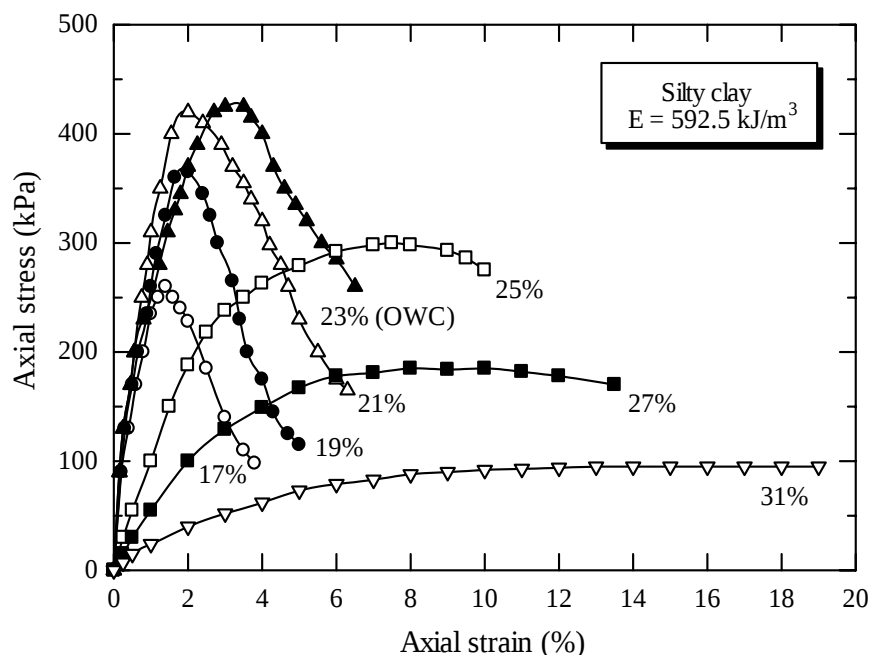
รูปที่ 4.5 ถึง 4.7 แสดงพฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่ 1 บดอัด สำหรับปริมาณความชื้นต่างๆ ที่พลังงานการบดอัด 3 ค่า (592.5 1346.6 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) จะเห็นว่าในช่วงที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม กำลังอัดและความยืดหยุ่น (ductile) ของดินบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นจนกระทั่งถึงปริมาณความชื้นเหมาะสม ในขณะที่ กำลังอัดแกนเดียวของดินบดอัดมีค่าน้อยลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นสำหรับปริมาณความชื้นมีค่าสูงเกินกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้น กำลังอัดแกนเดียวมีค่าสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม



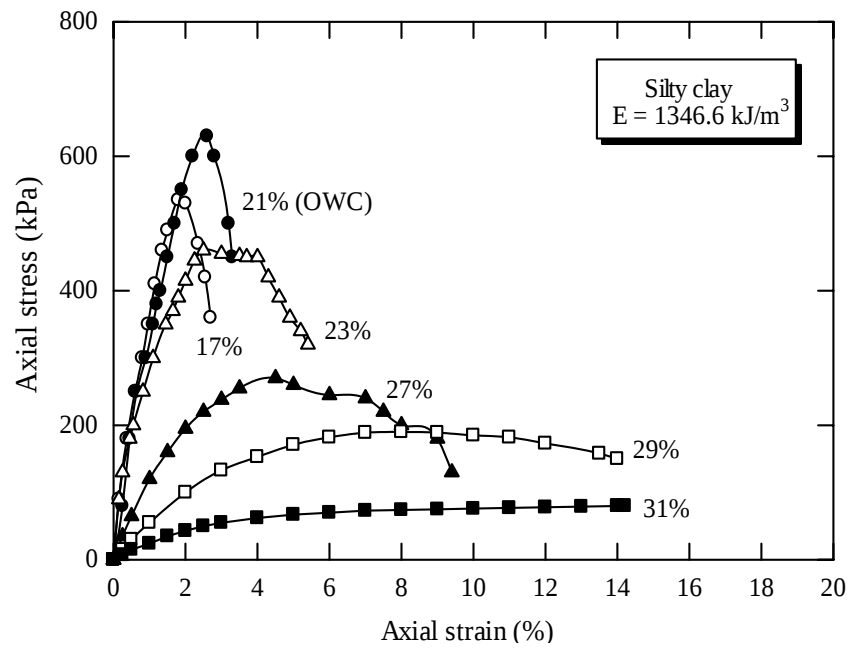
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอน



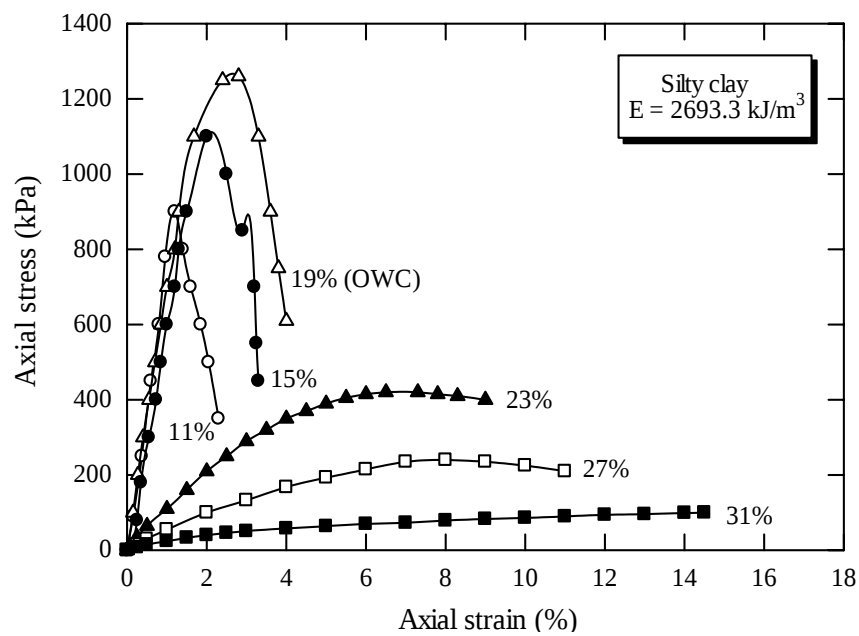
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของดินทรายปนดินตะกอน



รูปที่ 4.5 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่บดอัดด้วยพลังงานบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



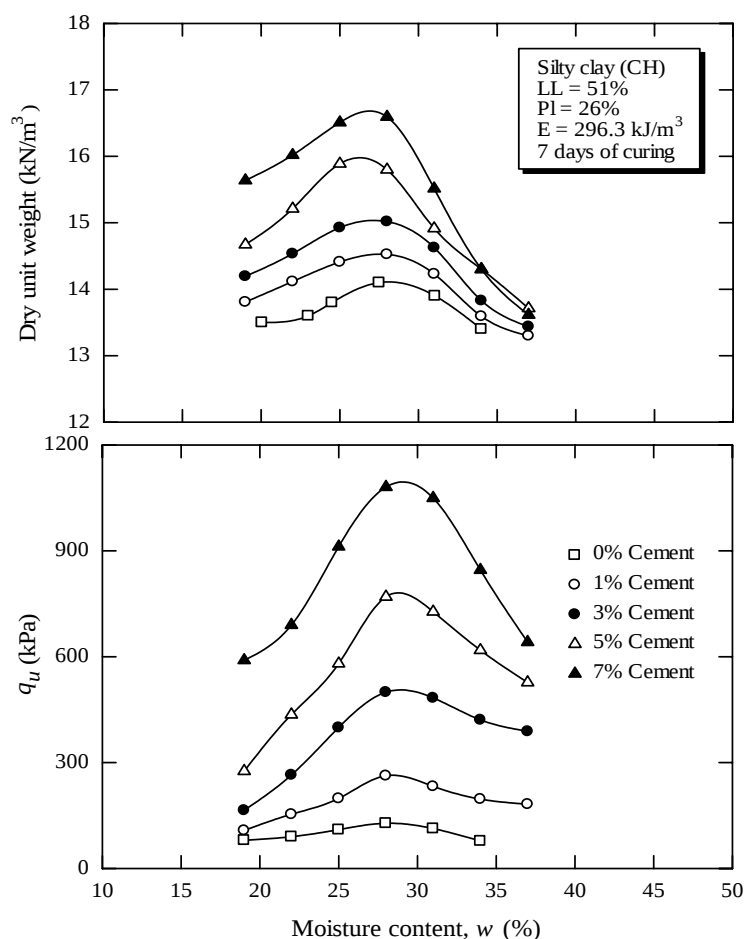
รูปที่ 4.6 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่บดอัดด้วยพลังงานบดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.7 ผลทดสอบแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่บดอัดด้วยพลังงานบดอัดเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

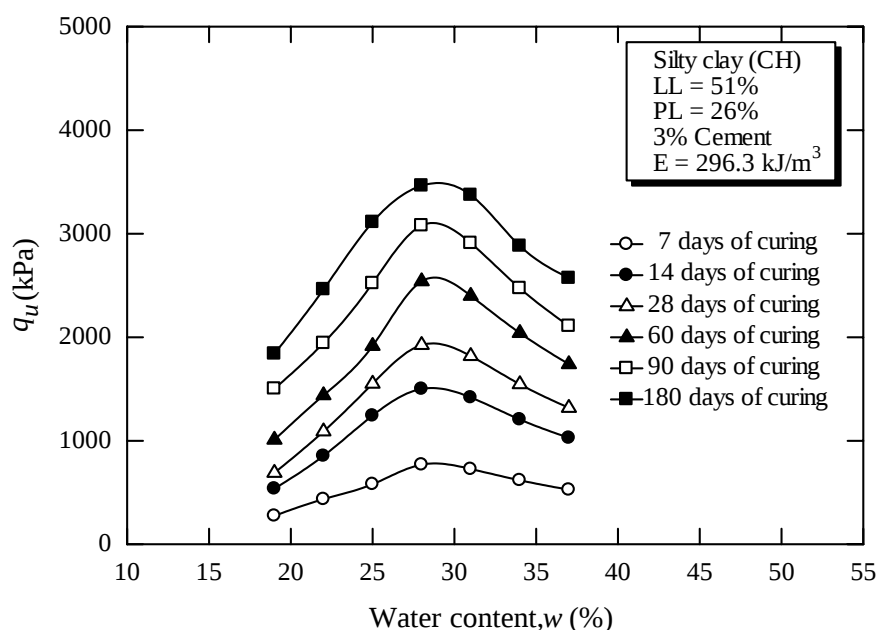
4.5 กำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด

รูปที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานและกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่พลังงาน ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้นและอายุบ่มต่างๆ เริ่มจากความหนาแน่นแห้งและกำลังอัดของดินบดอัดที่ไม่ผสมและผสมซีเมนต์ ที่ปริมาณความชื้นต่างๆ พบว่าในช่วงที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม หน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดของดินบดอัดเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นมากกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังอัดจะลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเห็นได้ชัดว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและกำลังอัดแกนเดียวสูงสุดด้วย ปริมาณความชื้นเหมาะสมนี้อาจแปรผันตามปริมาณซีเมนต์ แต่ในช่วงของซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาพบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเปลี่ยนแปลงน้อยมาก นอกจากนี้ยังพบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น – ความหนาแน่นแห้ง – กำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนที่อายุบ่ม 28 วันภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

รูปที่ 4.9 แสดงการพัฒนากำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์ บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม กำลังอัดแกนเดียวสูงที่สุดเกิดขึ้นที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม และแนวโน้มกราฟการบดอัดทางด้านแห้งและทางด้านเปียกเกือบสมมาตรกัน



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับกำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์ บดอัดภายใต้พลังงานการบดอัด 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุบ่มต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นแห้ง อัตราส่วนช่องว่าง และกำลังอัดเมื่อแปรผันปัจจัย

Energy (kJ/m ³)	Cement content, C (%)	Moisture content, w (%)	Curing time, D (days)	w/C (%)	Dry density	Void ratio (Kn/m ³)	Strength, q_u (kPa)
296.3	0	19	7	-	13.5	0.474	80
296.3	0	22	7	-	13.6	0.464	90
296.3	0	25	7	-	13.8	0.443	110
296.3	0	28	7	-	14.1	0.413	128
296.3	0	31	7	-	13.9	0.433	113
296.3	0	34	7	-	13.4	0.484	78

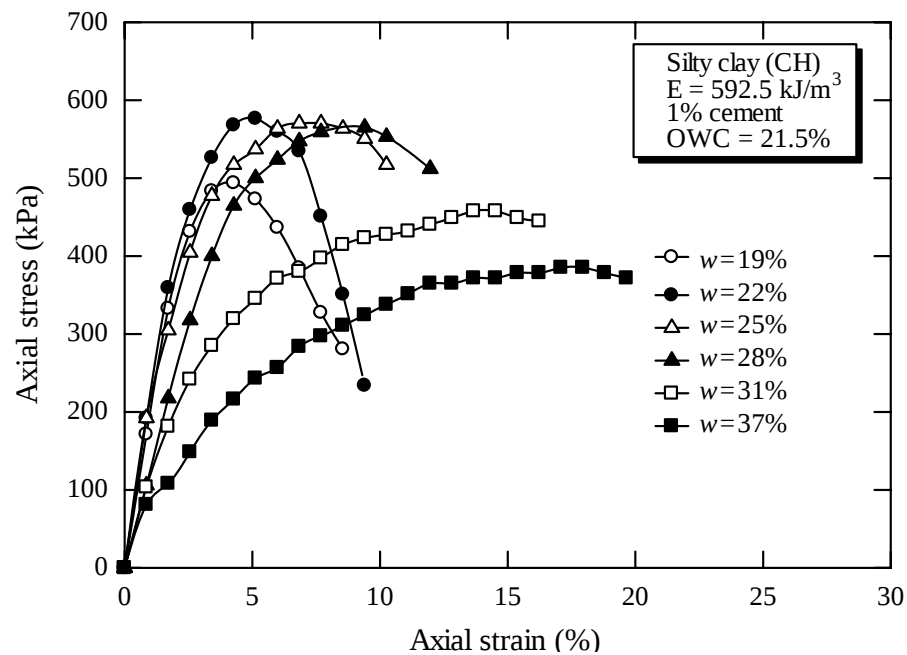
ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

Energy (kJ/m ³)	Cement content, C (%)	Moisture content, w (%)	Curing time, D (days)	w/C (%)	Dry density	Void ratio (K _n /m ³)	Strength, q_u (kPa)
296.3	5	19	7	3.8	14.7	0.354	276
296.3	5	22	7	4.4	15.2	0.299	436
296.3	5	25	7	5.0	15.9	0.230	580
296.3	5	28	7	5.6	15.8	0.239	770
296.3	5	31	7	6.2	14.9	0.329	728
296.3	5	34	7	6.8	14.3	0.392	618
296.3	7	19	7	3.8	15.6	0.256	590
296.3	7	22	7	4.4	16.0	0.217	690
296.3	7	25	7	5.0	16.5	0.167	912
296.3	7	28	7	5.6	16.6	0.158	1081
296.3	7	31	7	6.2	15.5	0.268	1050
296.3	7	34	7	6.8	14.3	0.392	846
296.3	3	19	14	6.33	14.1	0.413	538
296.3	3	22	14	7.33	14.5	0.372	855
296.3	3	25	14	8.33	14.9	0.331	1244
296.3	3	28	14	9.33	15.0	0.320	1501
296.3	3	31	14	10.33	14.6	0.361	1419
296.3	3	34	14	11.33	13.8	0.443	1206
296.3	3	19	28	6.33	14.1	0.413	690
296.3	3	22	28	7.33	14.5	0.372	1090
296.3	3	25	28	8.33	14.9	0.331	1551
296.3	3	28	28	9.33	15.0	0.320	19245
296.3	3	31	28	10.33	14.6	0.361	1819
296.3	3	34	28	11.33	13.8	0.443	1546
296.3	3	19	60	6.33	14.1	0.413	1010
296.3	3	22	60	7.33	14.5	0.372	1439
296.3	3	25	60	8.33	14.9	0.331	1916

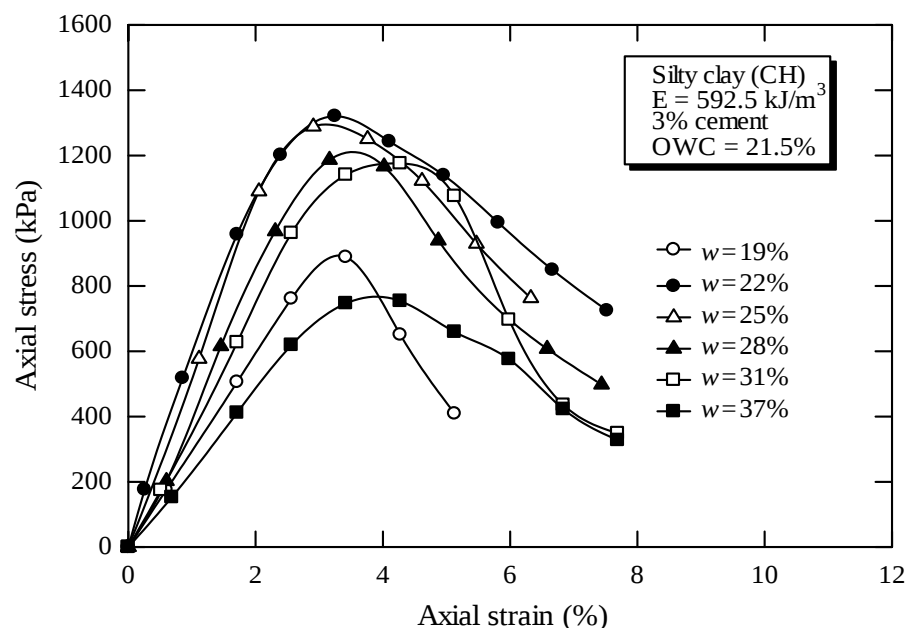
ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

Energy (kJ/m ³)	Cement content, C (%)	Moisture content, w (%)	Curing time, D(days)	w/C (%)	Dry density	Void ratio (K _n /m ³)	Strength, q_u (kPa)
296.3	3	28	60	9.33	15.0	0.320	2541
296.3	3	31	60	10.33	14.6	0.361	2401
296.3	3	34	60	11.33	13.8	0.443	2041
296.3	3	19	90	6.33	14.1	0.413	1503
296.3	3	22	90	7.33	14.5	0.372	1944
296.3	3	25	90	8.33	14.9	0.331	2522
296.3	3	28	90	9.33	15.0	0.320	3079
296.3	3	31	90	10.33	14.6	0.361	2910
296.3	3	34	90	11.33	13.8	0.443	2474
296.3	3	19	180	6.33	14.1	0.413	1841
296.3	3	22	180	7.33	14.5	0.372	2462
296.3	3	25	180	8.33	14.9	0.331	3112
296.3	3	28	180	9.33	15.0	0.320	3464
296.3	3	31	180	10.33	14.6	0.361	3374
296.3	3	34	180	11.33	13.8	0.443	2883

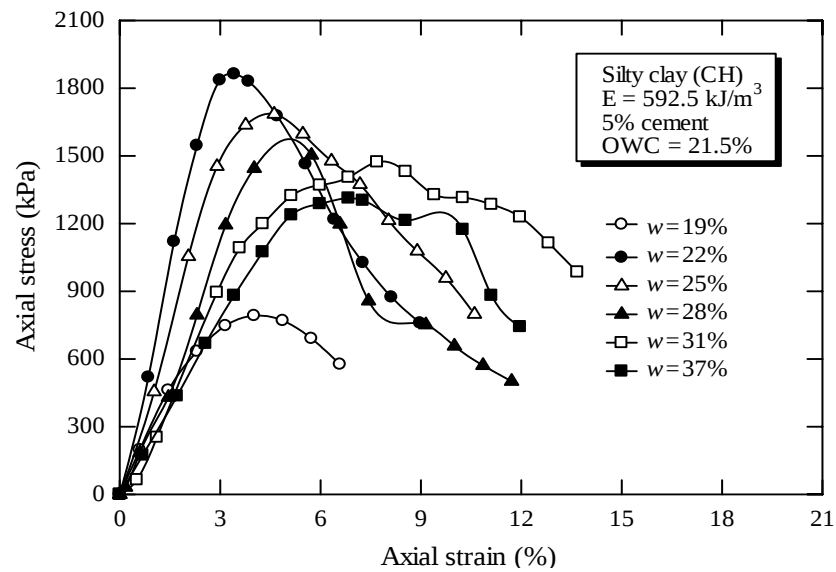
รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงพฤติกรรมการรับแรงอัดของดินตัวอย่างที่ 1 ผสมซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นและปริมาณซีเมนต์ต่างๆ ด้วยพลังงานเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร จะเห็นว่ากำลังอัด (หน่วยแรงสูงสุด) ของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นหนึ่งๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ กำลังอัดแกนเดียวยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นจนถึงปริมาณความชื้นเหมาะสมและลดลง หลังจากนั้น ลักษณะการวิบัติของดินซีเมนต์บดอัดจะค่อนข้างไปทางวัสดุเปราะมากกว่าดินที่ไม่ได้ผสมซีเมนต์



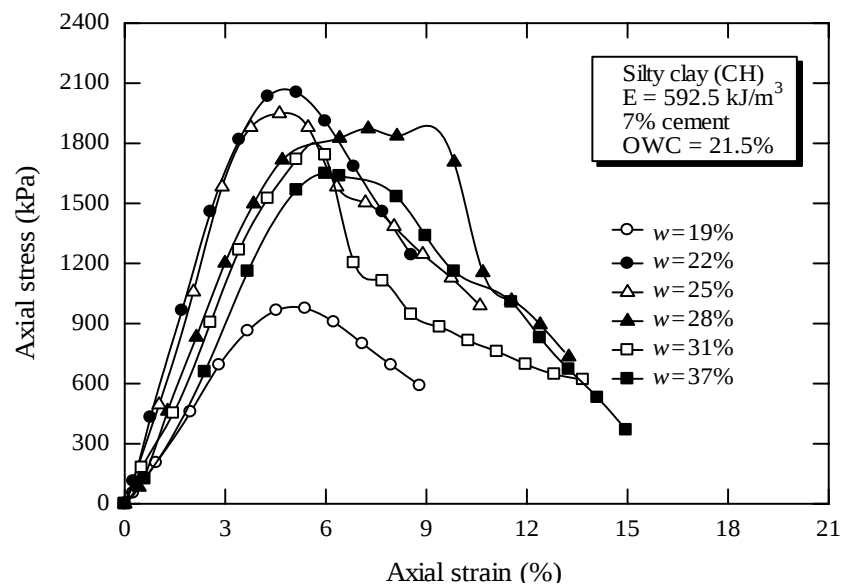
รูปที่ 4.10 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์ 1%
 ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.11 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ
 3% ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



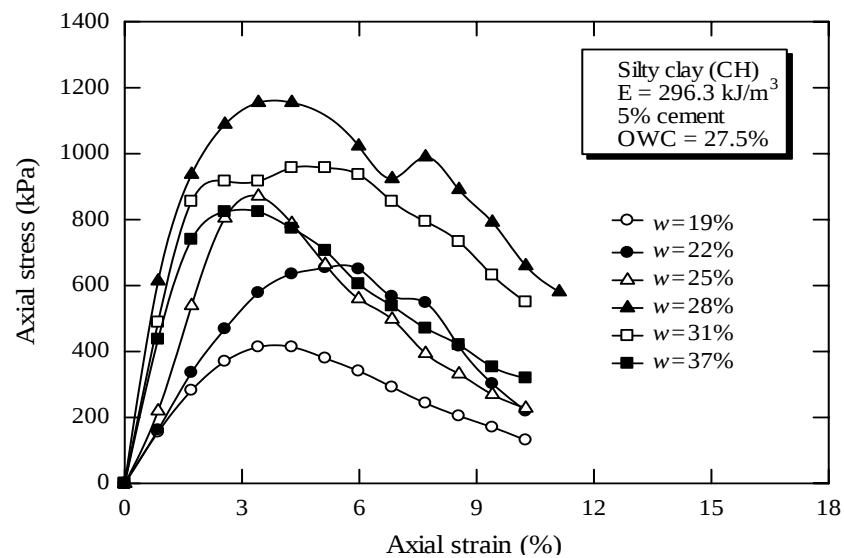
รูปที่ 4.12 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์ 5%
 ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



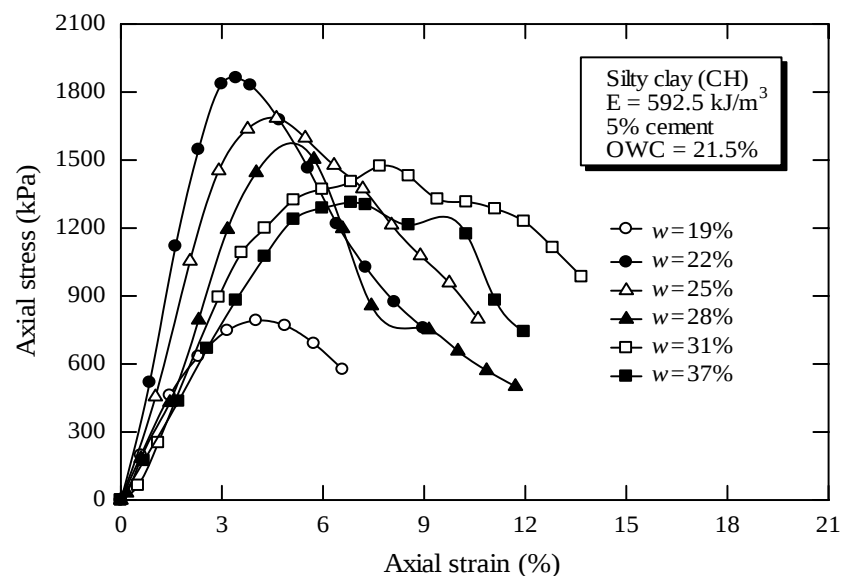
รูปที่ 4.13 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์ 7%
 ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

รูปที่ 4.14 ถึง 4.17 แสดงอิทธิพลของพลังงานการบดอัดต่อ ความเค้น-ความเครียด ของดิน
 ซีเมนต์บดอัด จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง พลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัด

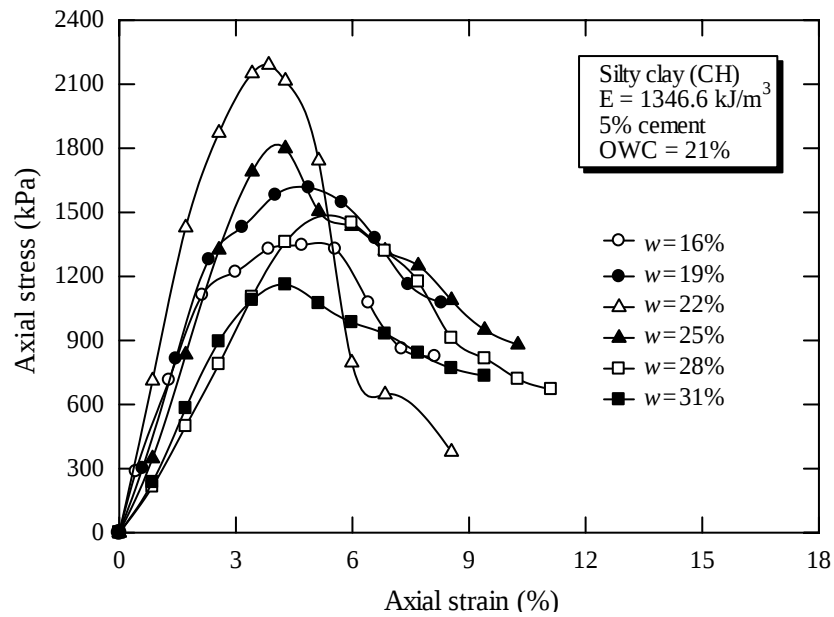
แกนเดี่ยวยังมีค่ามากขึ้น ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามพลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่าโมดูลัสแปรผันตามกำลังอัด



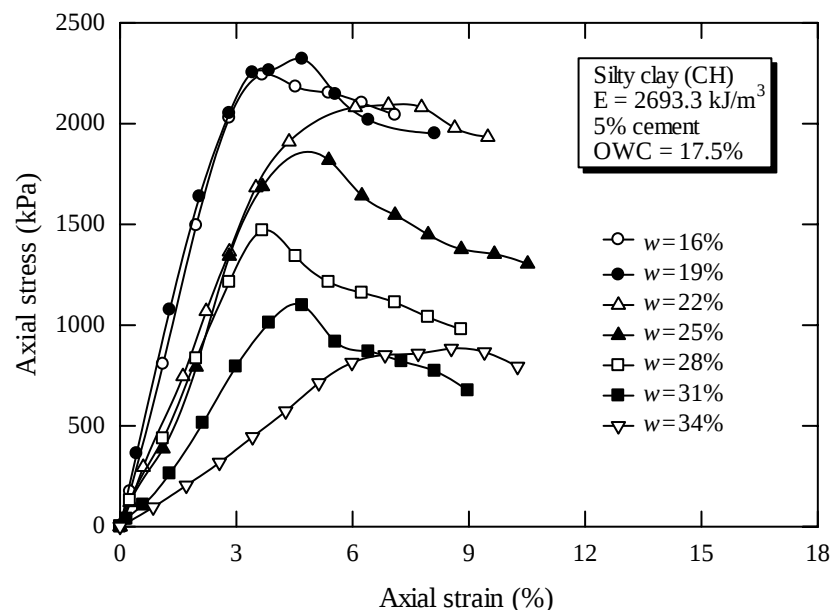
รูปที่ 4.14 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 5%ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.15 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 5%ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.16 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 5% ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 1346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

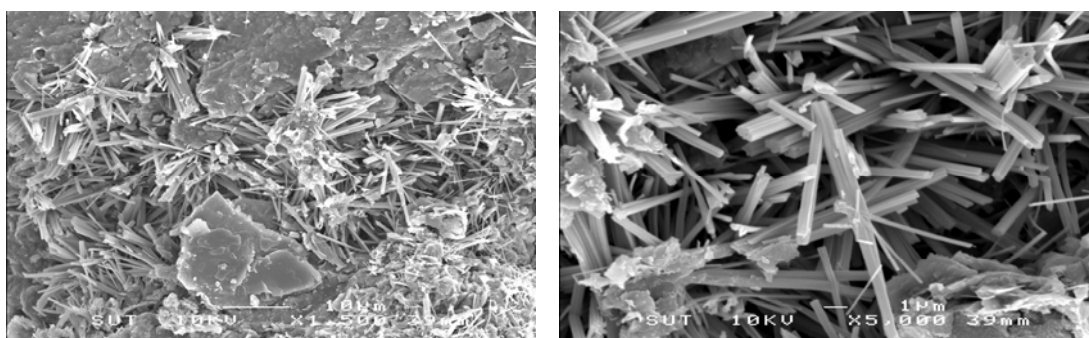


รูปที่ 4.17 พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 5% ภายใต้พลังงานการบดอัดเท่ากับ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

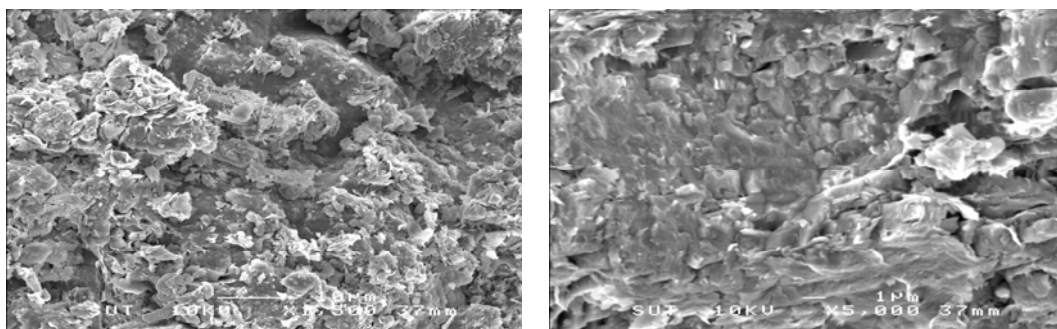
4.6 กำลังอัดและลักษณะโครงสร้างของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด

4.6.1 อิทธิพลของปริมาณความชื้น

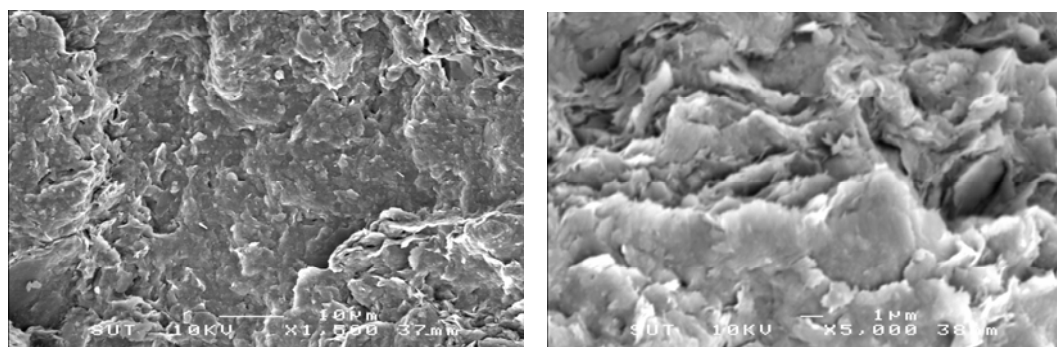
ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ทั้งทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมและที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) ได้รับการศึกษาโดยการส่องและถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การหาการกระจายขนาดของช่องว่าง และการทดสอบ X-ray diffraction รูปที่ 4.18 แสดงภาพถ่ายขยาย 1500 เท่าของดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุบ่ม 7 วัน พบ Ettringite (มีลักษณะเป็นเส้น) ซึ่งแสดงว่าปฏิกิริยา Hydration เกิดได้อย่างสมบูรณ์ แต่ที่ปริมาณความชื้นต่ำและสูงมาก (0.60 OWC และ 1.40 OWC) ที่พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณ Ettringite ไม่ปรากฏให้เห็นมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ปฏิกิริยา Hydration ที่สมบูรณ์เกิดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมส่งผลให้กำลังอัดแกนเดียวมีค่าสูงที่สุด ปรากฏการดังกล่าวนี้เกิดขึ้นกับพลังงานการบดอัดอื่นๆ ด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ถึง 4.23 (พลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร)



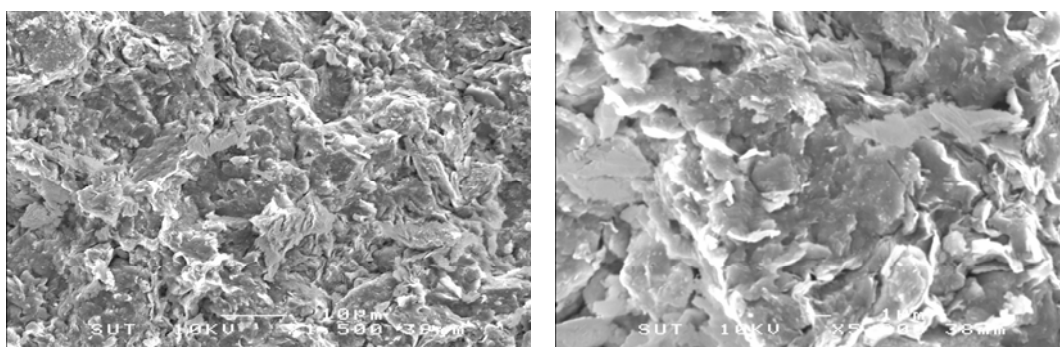
รูปที่ 4.18 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 21.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1450 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



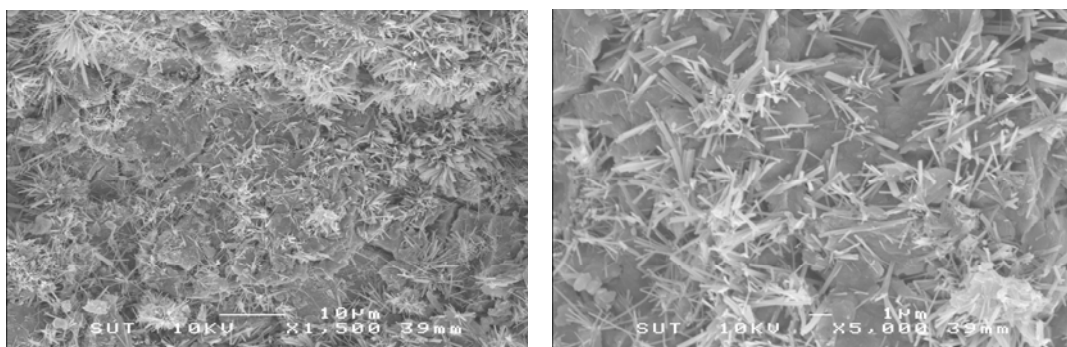
รูปที่ 4.19 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 12.9% (0.6 OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1030 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



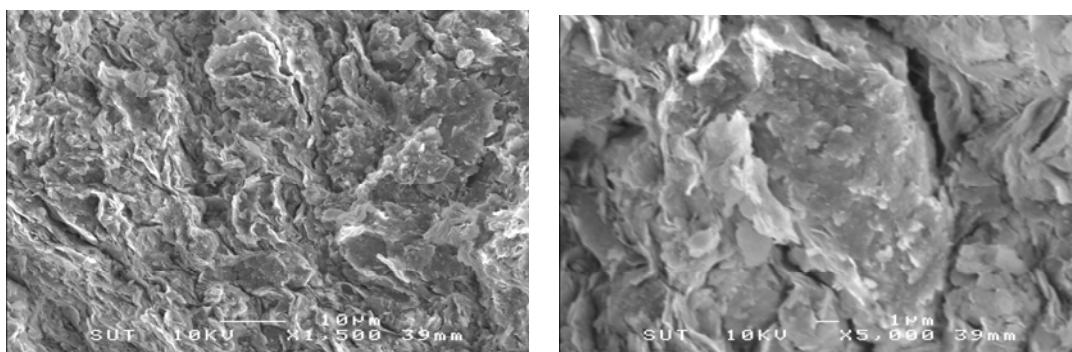
รูปที่ 4.20 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 30.1% (1.4 OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1120 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.21 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 10.5% (0.6 OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1226 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



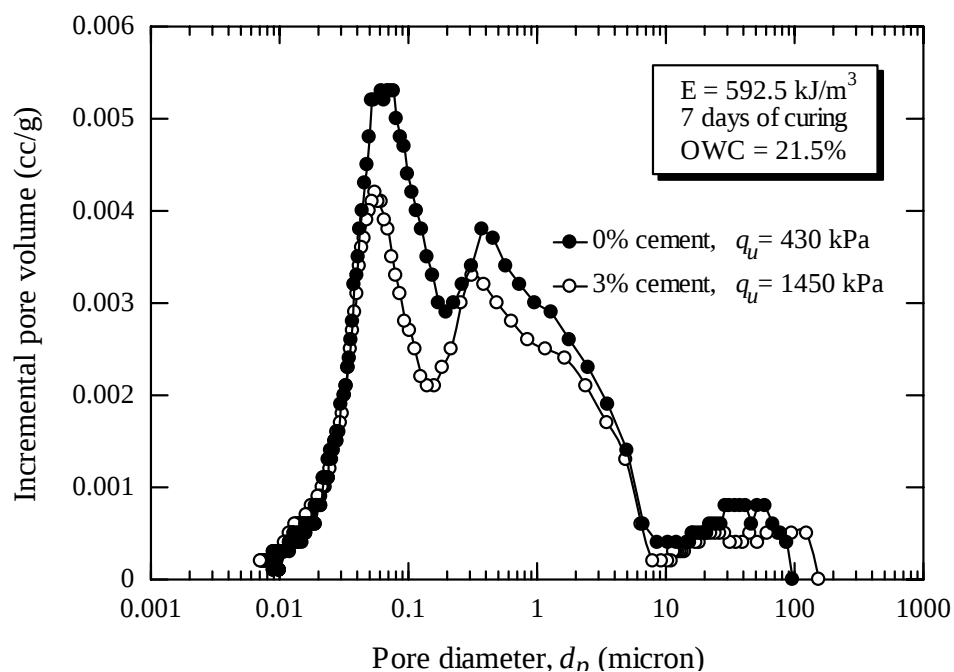
รูปที่ 4.22 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1560 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



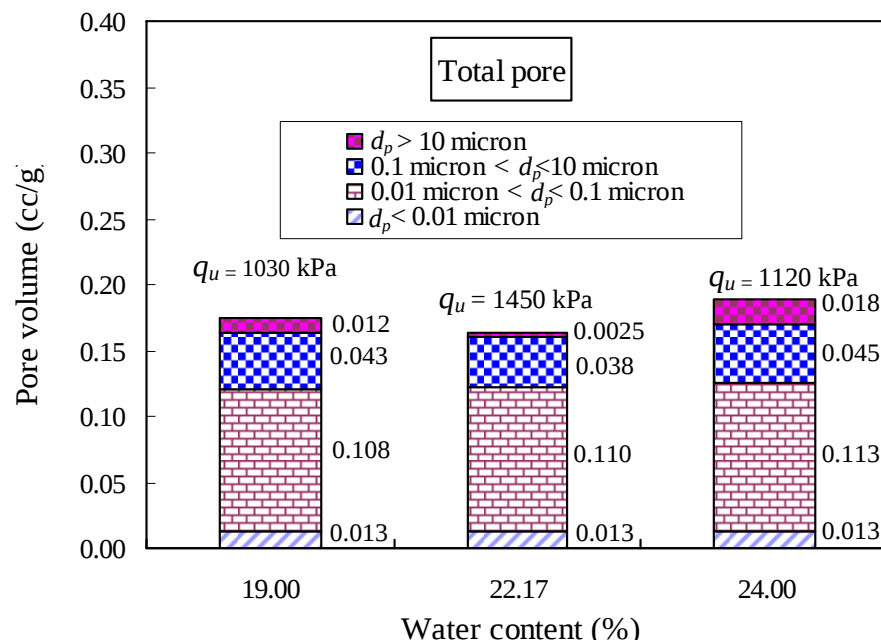
รูปที่ 4.23 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 24.5% (1.4 OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1231 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

จากกราฟการกระจายขนาดของช่องว่างที่เป็นรูประฆังคว่ำ 3 ส่วน ดังเช่นในรูปที่ 4.24 ผู้วิจัยขอเสนอการแบ่งกลุ่มช่องว่างออกเป็น 4 กลุ่ม คือ 1) ช่องอากาศ (air pore) คือ ช่องว่างขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน 2) ช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างอนุภาค (macro inter aggregate pore) คือ ช่องว่างที่มีขนาด 0.1-10 ไมครอน 3) ช่องว่างขนาดเล็กระหว่างอนุภาค (micro inter aggregate pore) คือ ช่องว่างขนาด 0.01-0.1 ไมครอน 4) ช่องว่างภายในอนุภาคดิน (intra-aggregate pore) คือ ช่องว่างขนาดเล็กกว่า 0.01 ไมครอน รูปดังกล่าวยังแสดงการกระจายขนาดช่องว่างของดินที่ไม่ได้ผสมซีเมนต์และผสมซีเมนต์บดอัดพบว่า การผสมปูนซีเมนต์ทำให้ขนาดช่องว่างช่วง 0.01-0.1 ไมครอน และ 0.1-10 ไมครอน ลดลงและกราฟการกระจายขนาดเบี่ยงไปทางซ้ายมือ ในขณะที่ช่องว่างขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน และเล็กกว่า 0.01 ไมครอน มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

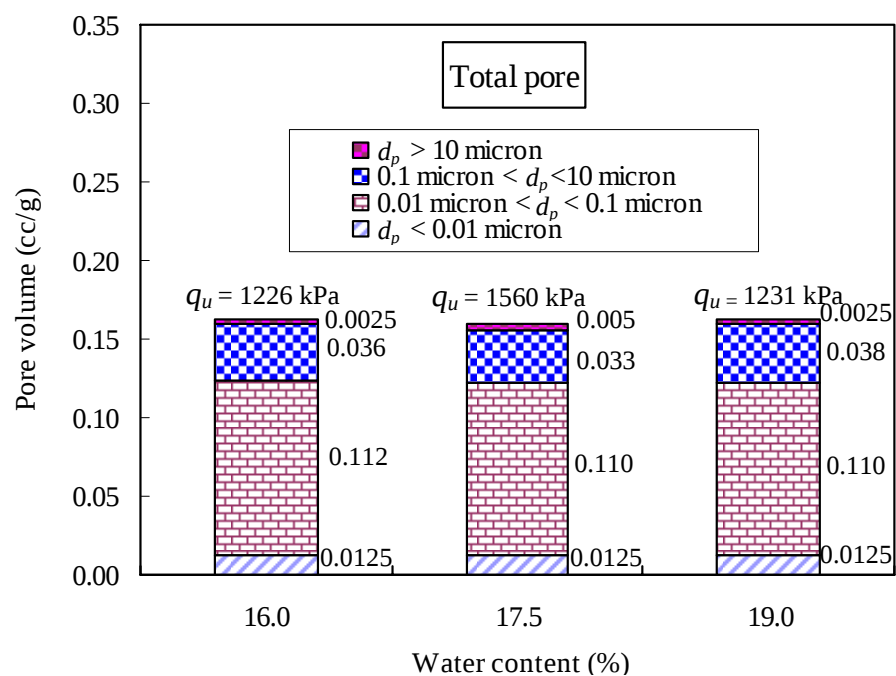
เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบปริมาตรของช่องว่างแต่ละกลุ่ม การกระจายขนาดของช่องว่างตามรูปที่ 4.24 สามารถแสดงเป็นกราฟแท่งดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ซึ่งเป็นดินผสมซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์ ทั้งทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม และที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ดินซีเมนต์บดอัดที่ OWC มีปริมาณช่องว่างรวมของกลุ่มที่ 2 และ 3 น้อยกว่าดินบดอัดทางด้านเปียกและทางด้านแห้งของ OWC ในขณะที่ช่องว่างกลุ่มที่ 1 และ 4 มีปริมาณใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาปริมาณช่องว่างทั้งหมดในดินพบว่าดินทางด้านแห้งและด้านเปียกของ OWC มีปริมาณช่องว่างทั้งหมดมากกว่าที่ OWC



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบลักษณะการกระจายขนาดของช่องว่างของดินที่ไม่ผสมซีเมนต์และดินที่ผสมซีเมนต์บดอัดที่ OWC

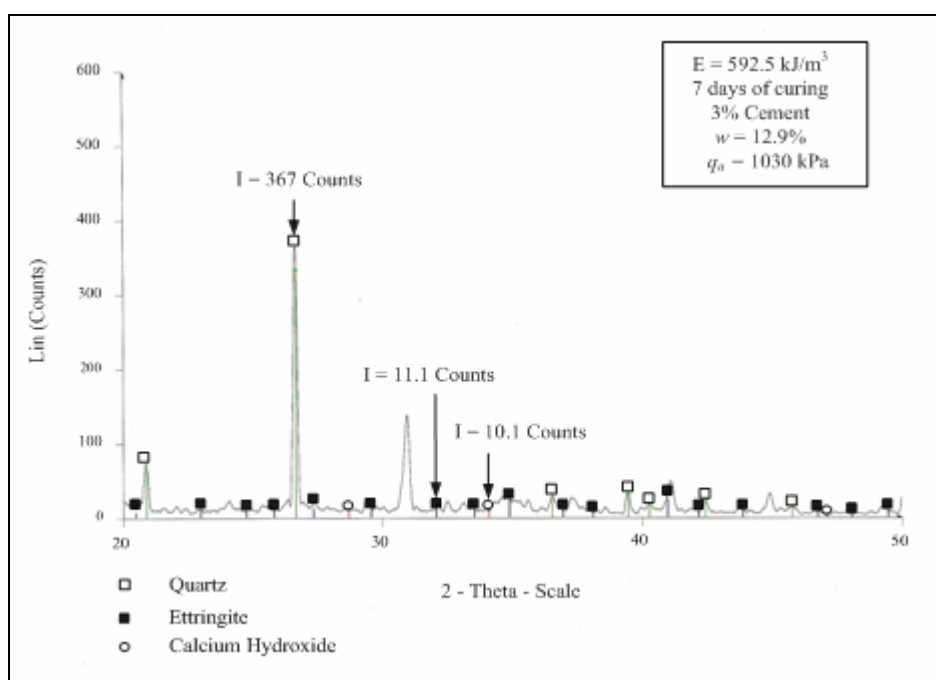


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างทั้งหมดที่ปริมาณความชื้น 3 ค่า บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่มที่ 7 วัน

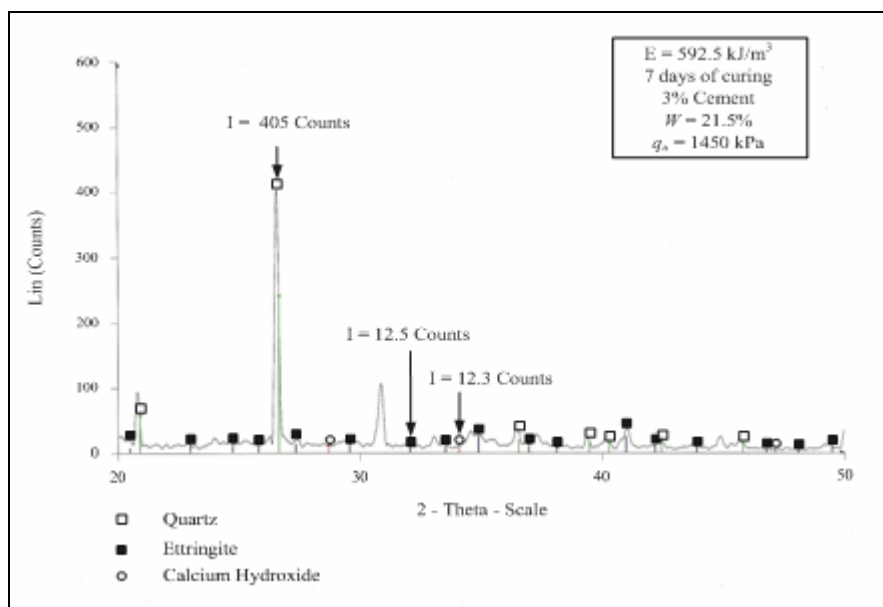


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างทั้งหมดที่ปริมาณความชื้น 3 ค่า บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่มที่ 7 วัน

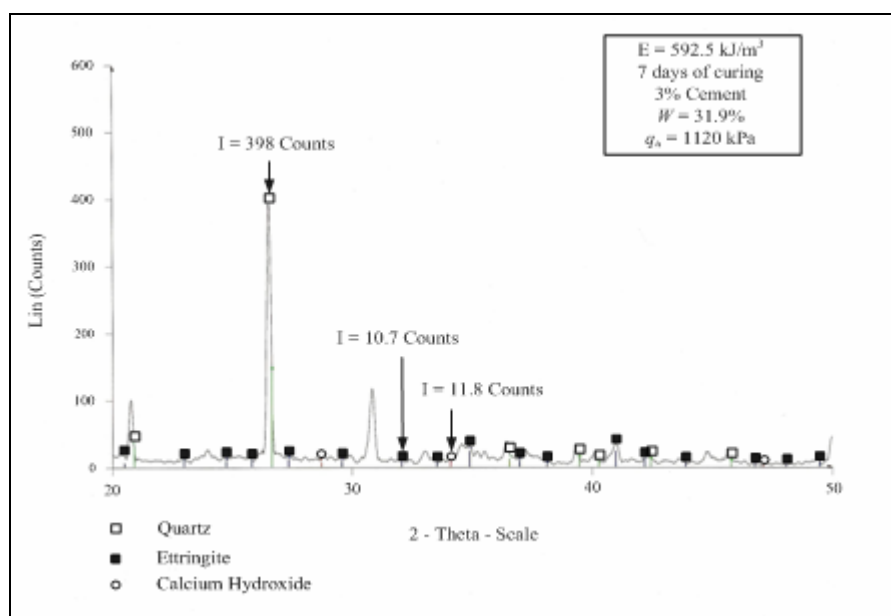
ผลทดสอบ X-ray diffraction ของดินบดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร พบว่า Calcium hydroxide และ Ettringite มีปริมาณต่ำสำหรับดินบดอัดทางด้านแห้งและทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม (รูปที่ 4.27 ถึง 4.29) ซึ่งหมายความว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้น้อยกว่าที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ผลที่ได้นี้มีลักษณะเช่นเดียวกับดินบดอัดที่พลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ถึง 4.32 เพียงแต่ Ettringite และ Calcium hydroxide ที่พลังงานการบดอัดสูงกว่ามีปริมาณมากกว่า เนื่องจากที่ OWC Calcium Hydroxide และ Ettringite มีปริมาณมากที่สุด อีกทั้งหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าสูงสุด (ช่องว่างน้อยที่สุด) ดังนั้นกำลังอัดมีค่ามากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์ Hydration ทั้งทางด้านแห้งและด้านเปียกพบว่าผลิตภัณฑ์ Hydration ทางด้านเปียกมีปริมาณมากกว่าเล็กน้อย ดังนั้นกำลังอัดทางด้านเปียกจึงสูงกว่าด้านแห้งเล็กน้อย



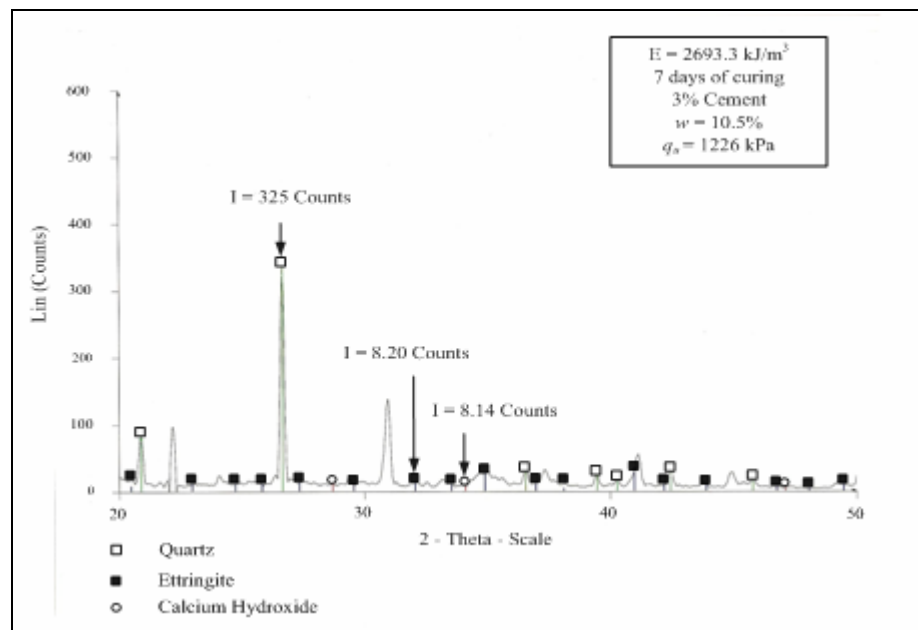
รูปที่ 4.27 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 12.9% (0.6 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



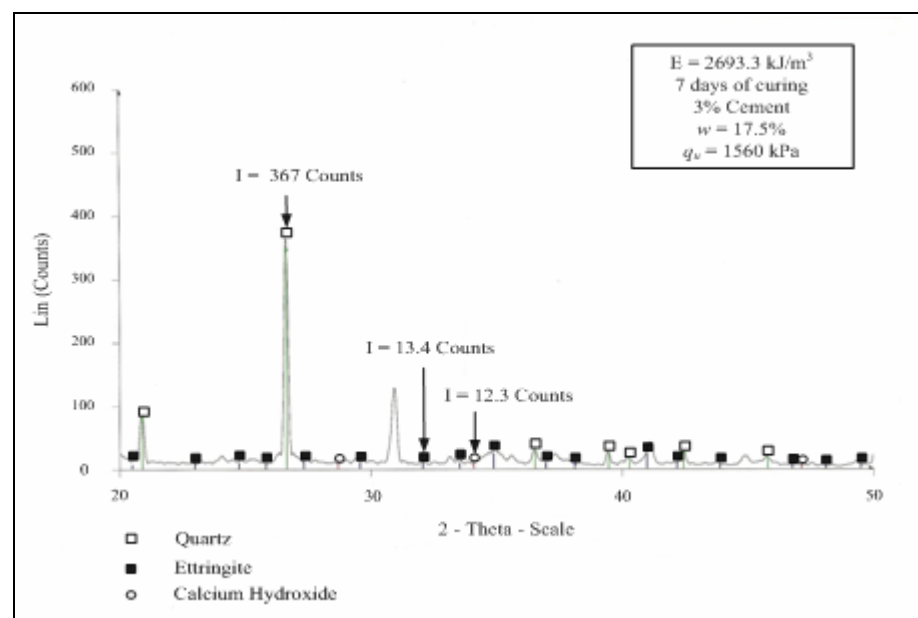
รูปที่ 4.28 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 21.5% (OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



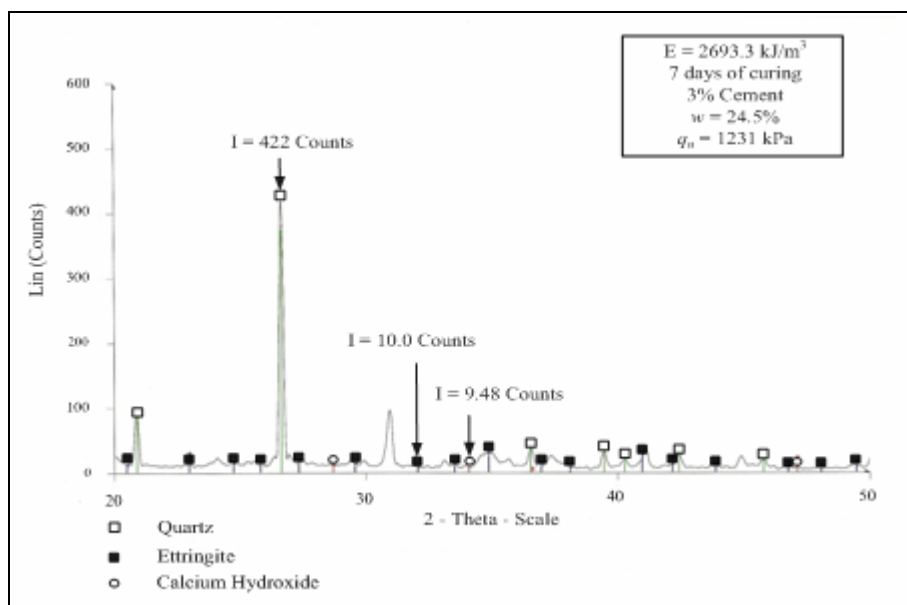
รูปที่ 4.29 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 30.1% (1.4 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.30 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 10.5% (0.6 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



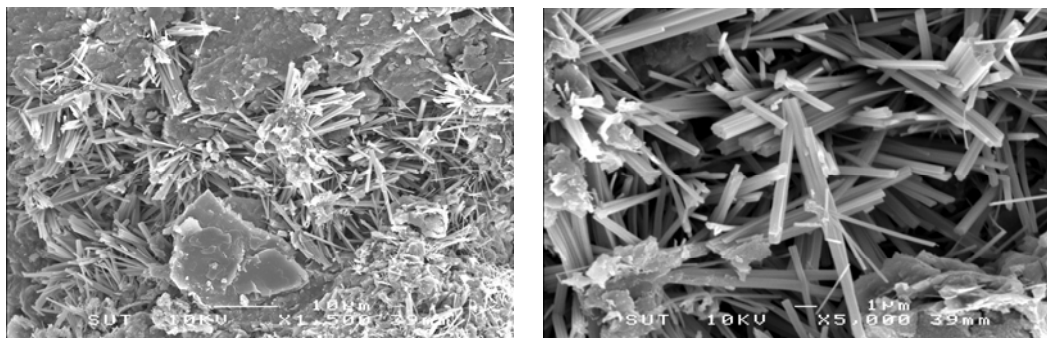
รูปที่ 4.31 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



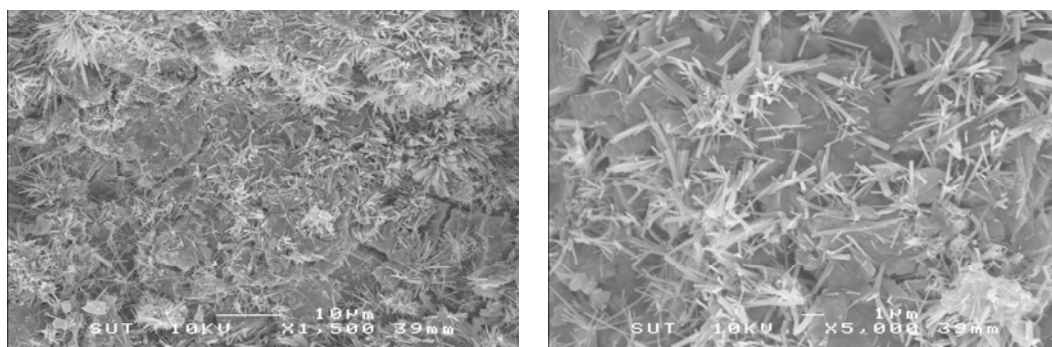
รูปที่ 4.32 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 24.5% (1.4 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

4.6.2 อิทธิพลของพลังงาน

เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ OWC ภายใต้พลังงานบดอัดสองพลังงาน (592.5 และ 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ปริมาณซีเมนต์เดียวกัน (ที่ 3% ซีเมนต์) จากภาพถ่ายขยาย 1500 และ 5000 เท่าพบว่าที่พลังงานการบดอัดต่ำ (592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) มีช่องว่างมาก ส่วนที่พลังงานการบดอัดสูง (2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) ช่องว่างน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.33 และ 4.34

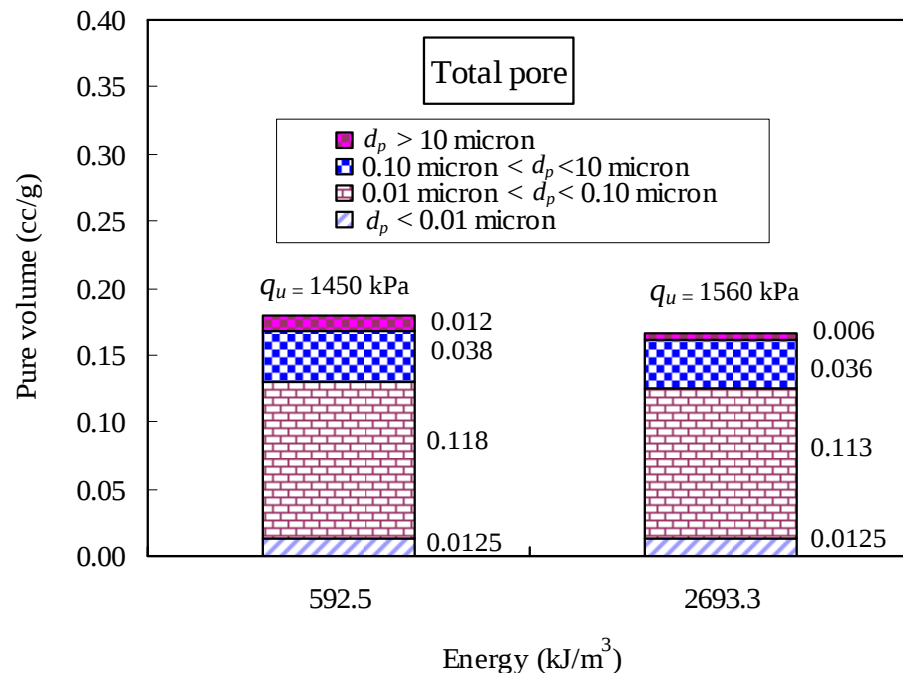


รูปที่ 4.33 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 21.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1450 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

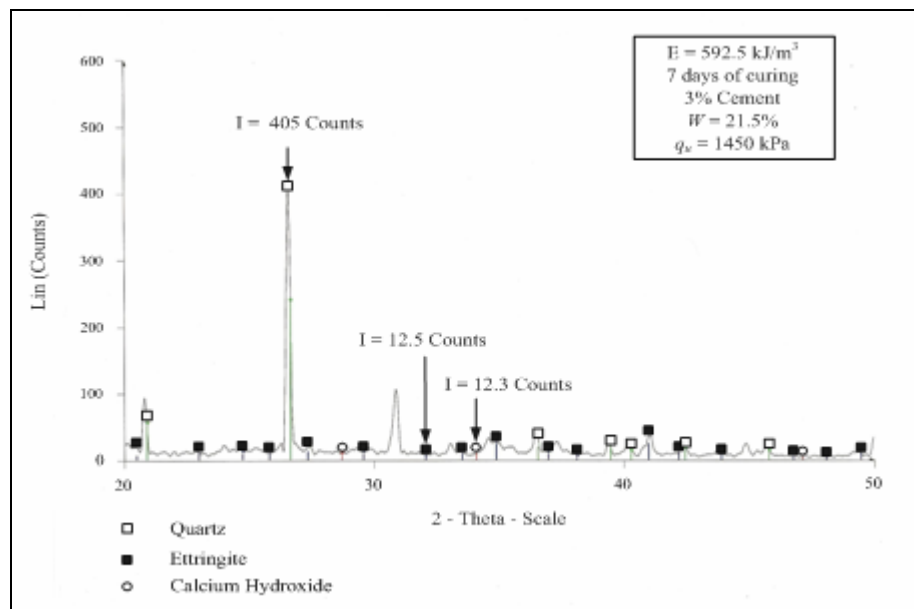


รูปที่ 4.34 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1560 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

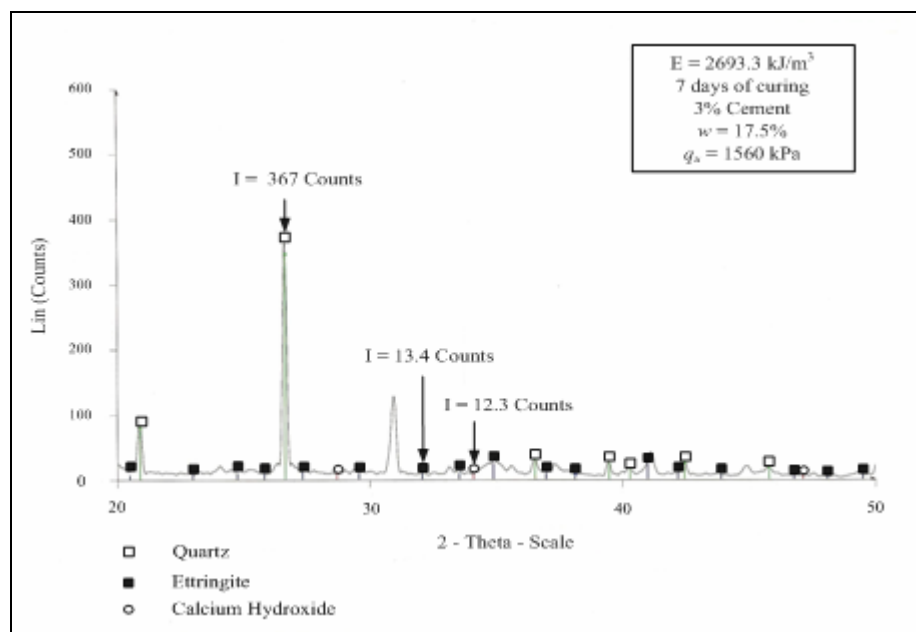
ผลการวัดขนาดช่องว่างจากเครื่อง M.I.P. ก็สอดคล้องกับภาพถ่ายในรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่าช่องว่างทั้งหมด (Total pore) ของดินที่บดอัดด้วยพลังงานสูงกว่าจะมีปริมาณน้อยกว่า โดยที่ช่องว่างขนาด 0.01-0.1 ไมครอน และ 0.1-10 ไมครอน ของดินที่บดอัดที่พลังงานสูง (2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) จะมีปริมาณต่ำกว่าดินที่บดอัดที่พลังงานต่ำ (592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) ในขณะที่ช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน ของดินที่บดอัดด้วยพลังงานต่ำมีปริมาณมากกว่า นอกจากนี้ผลทดสอบ X - ray diffraction ยังแสดงให้เห็นว่าดินซีเมนต์บดอัดที่พลังงานสูงกว่าจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์กว่าดินซีเมนต์ที่บดอัดที่พลังงานต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.36 และ 4.37



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างทั้งหมดที่พลังงานบดอัดต่างกันที่ 3% ซีเมนต์
ระยะบ่ม 7 วัน



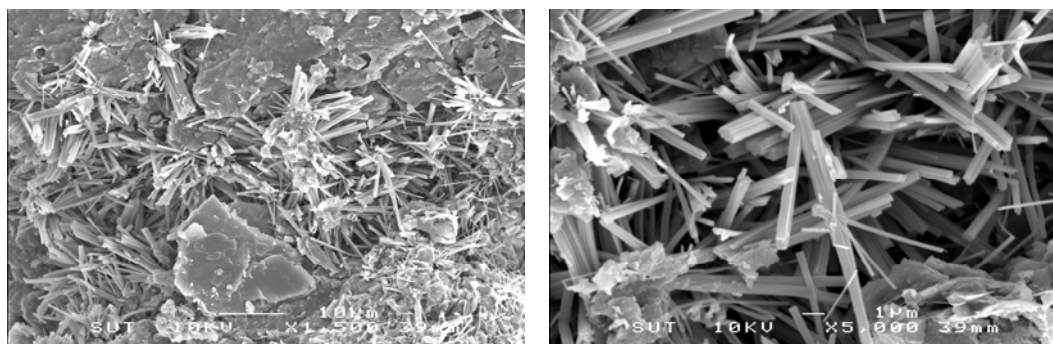
รูปที่ 4.36 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 21.5% (OWC)
ภายใต้พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



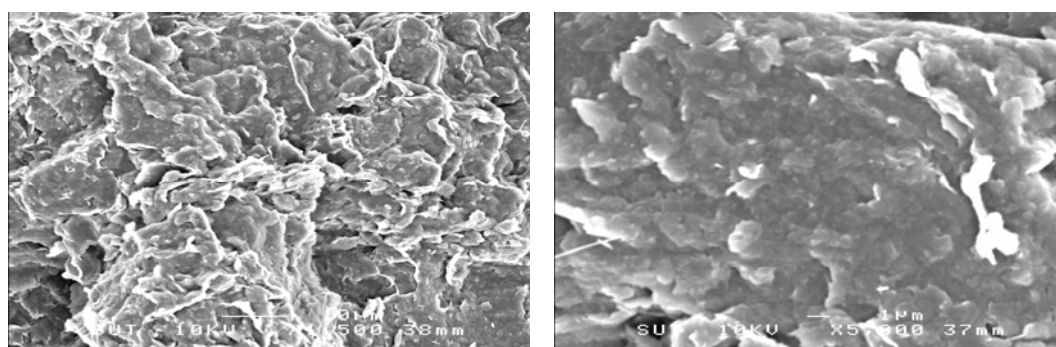
รูปที่ 4.37 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

4.6.3 อิทธิพลของอายุบ่ม

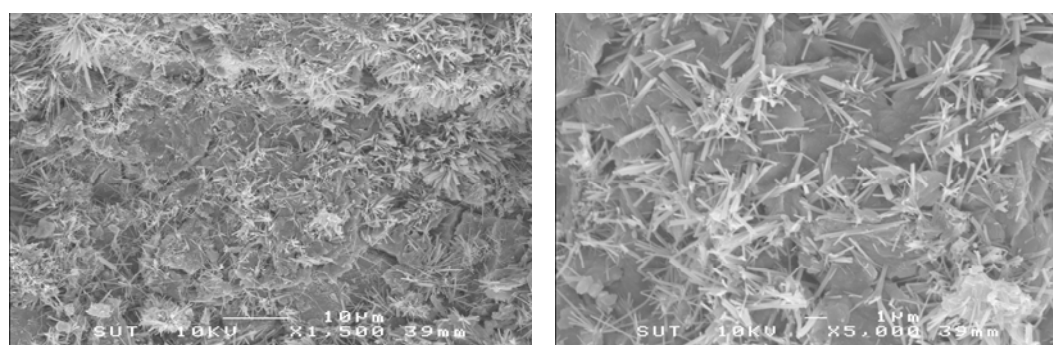
รูปที่ 4.38-4.39 แสดงภาพถ่ายขยาย 1500 และ 5000 เท่าของดินซีเมนต์ 3 % ที่ระยะบ่ม 7 และ 28 วัน ที่บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม พบว่าที่ระยะบ่ม 7 วัน มี Ettringite ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน และปริมาณของ Ettringite ลดลงตามอายุบ่มทำให้ปริมาณ Calcium hydroxide เพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปถ่ายจุลภาคที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งแทบจะมองไม่เห็น Ettringite ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นกับดินซีเมนต์บดอัดที่บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตรเช่นเดียวกัน ดังแสดงรูปที่ 4.40-4.41



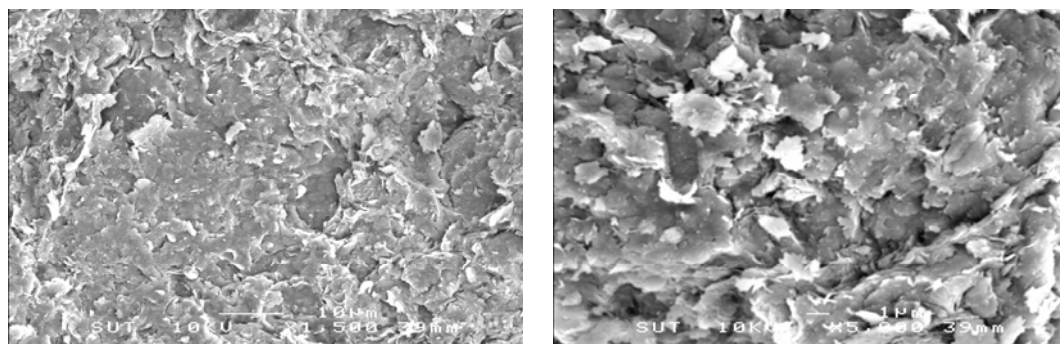
รูปที่ 4.38 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 21.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1450 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.39 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 21.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 28 วัน กำลังอัด 2500 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

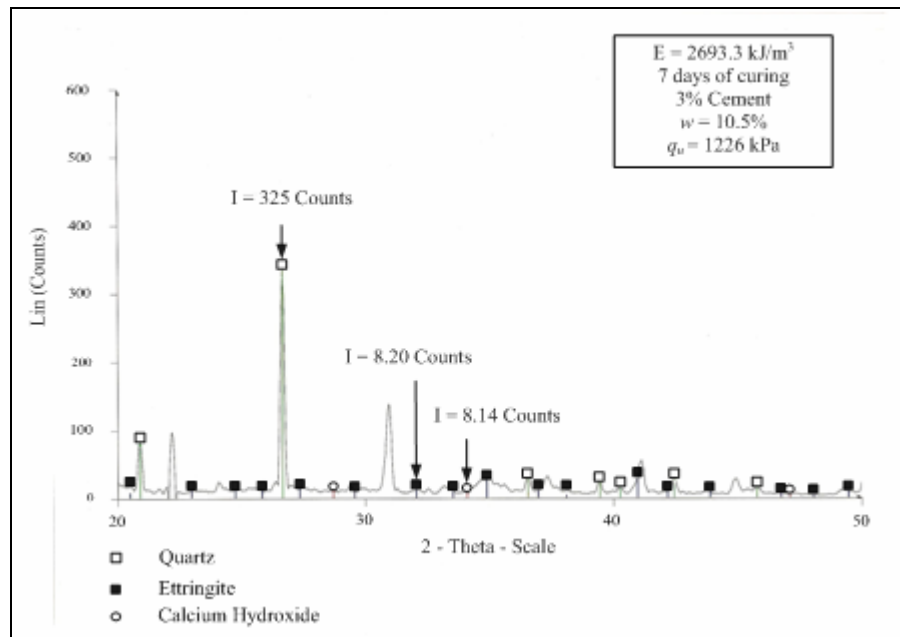


รูปที่ 4.40 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1560 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

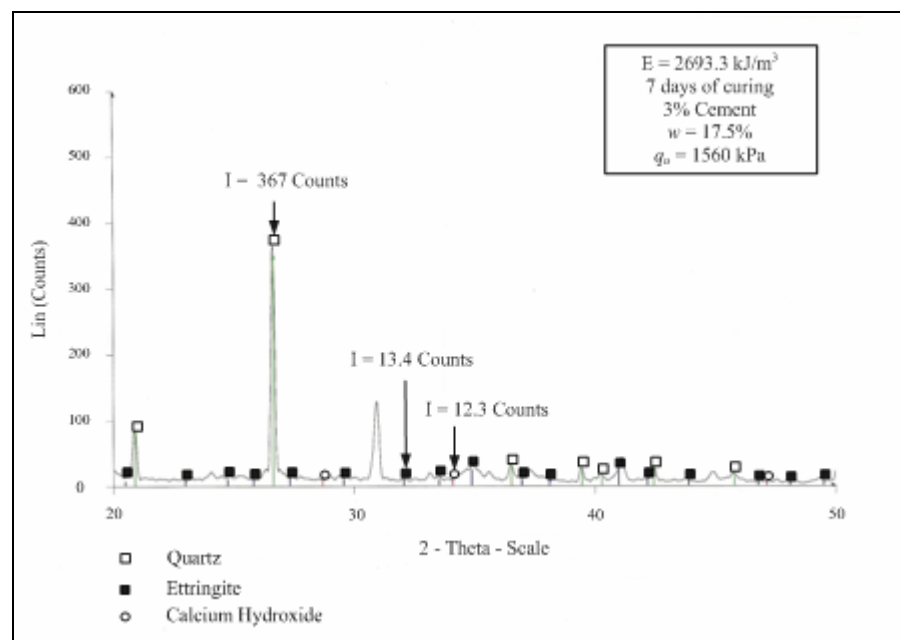


รูปที่ 4.41 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 28 วัน กำลังอัด 2950 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

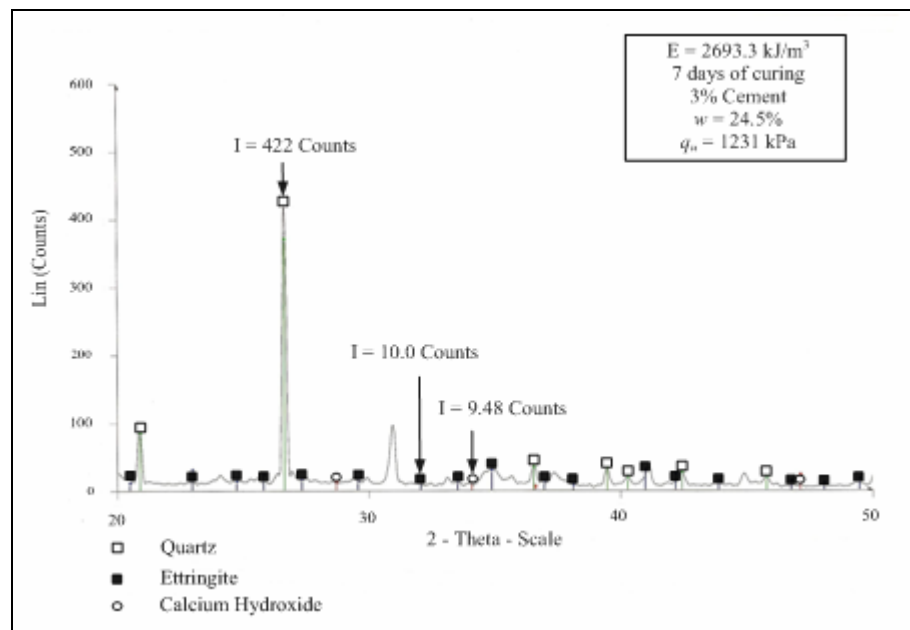
ผลทดสอบ X-ray diffraction (รูปที่ 4.42-4.47) ยืนยันว่า Calcium hydroxide มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะบ่มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ Ettringite มีปริมาณลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ Quartz มีค่าลดลงตามอายุบ่มทั้งนี้เนื่องจาก Quartz เป็นสารที่จำเป็นสำหรับการเกิดปฏิกิริยา Pozzolan อิทธิพลของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันต่อกำลังอัดสรุปได้ดังตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการอัดแปรผันตามปริมาณ Calcium hydroxide



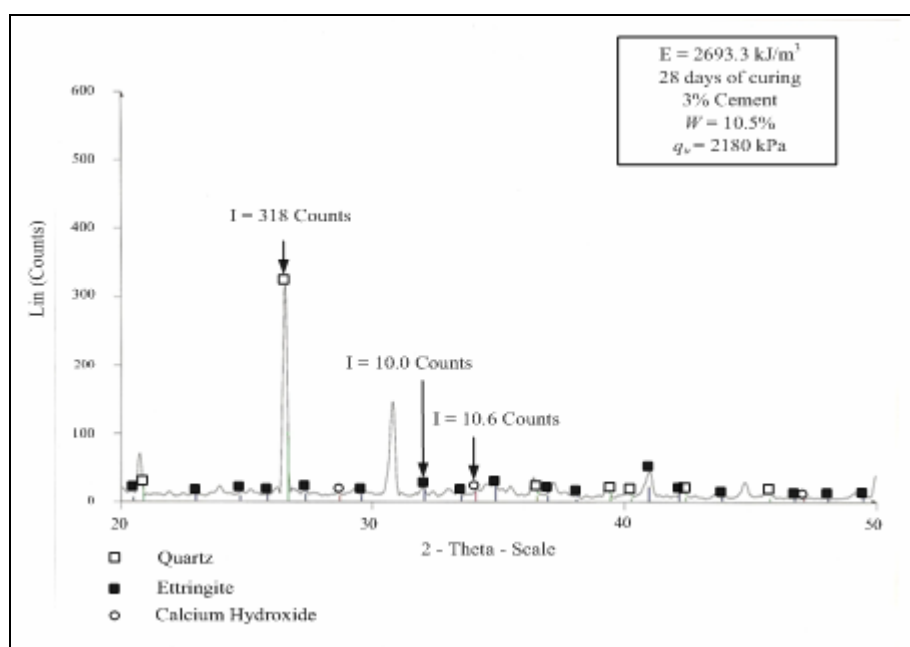
รูปที่ 4.42 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 10.5% (0.6 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



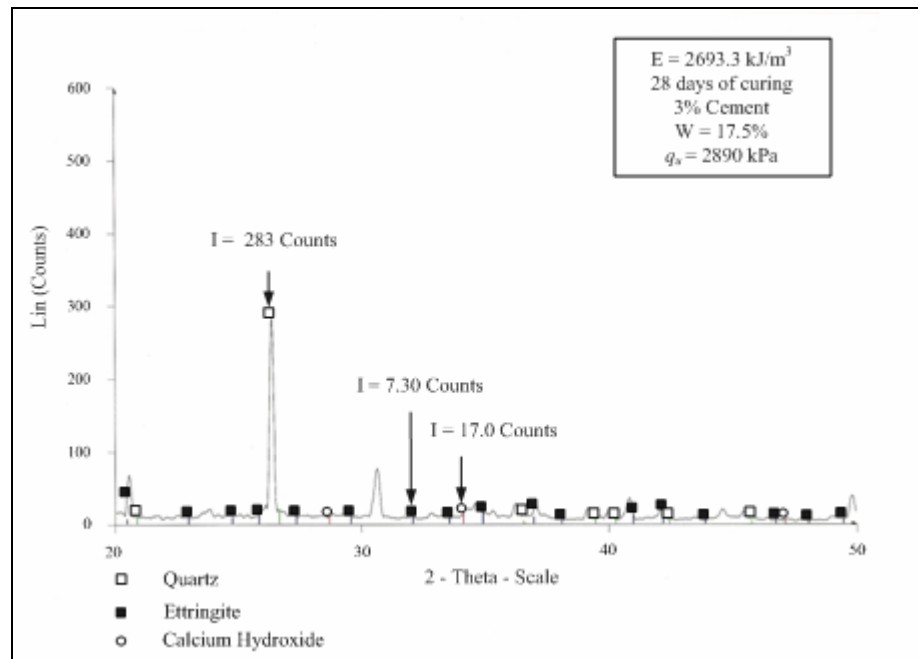
รูปที่ 4.43 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



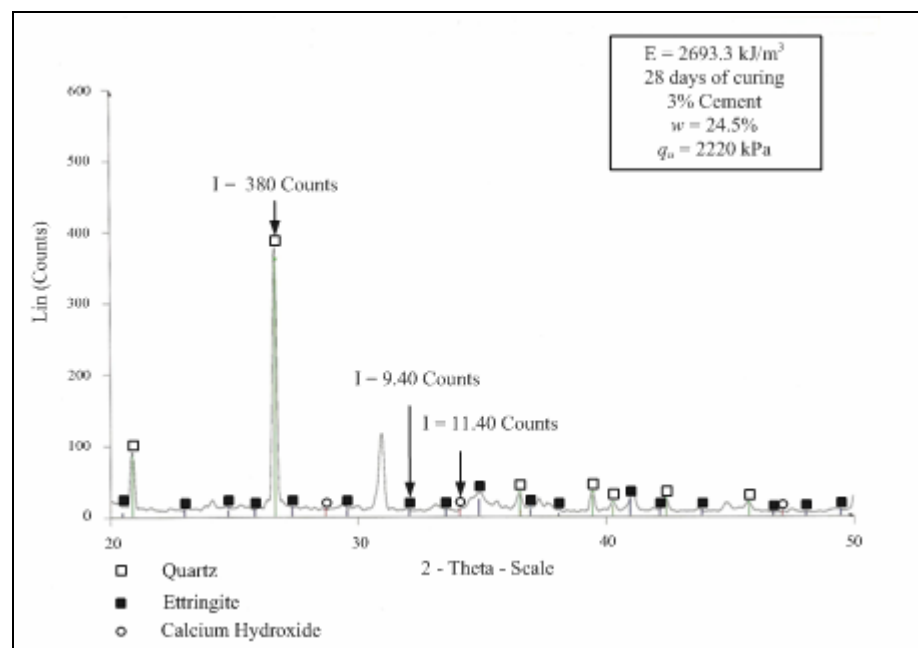
รูปที่ 4.44 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 24.5% (1.4 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.45 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 10.5% (0.6 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.46 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 17.5% (OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

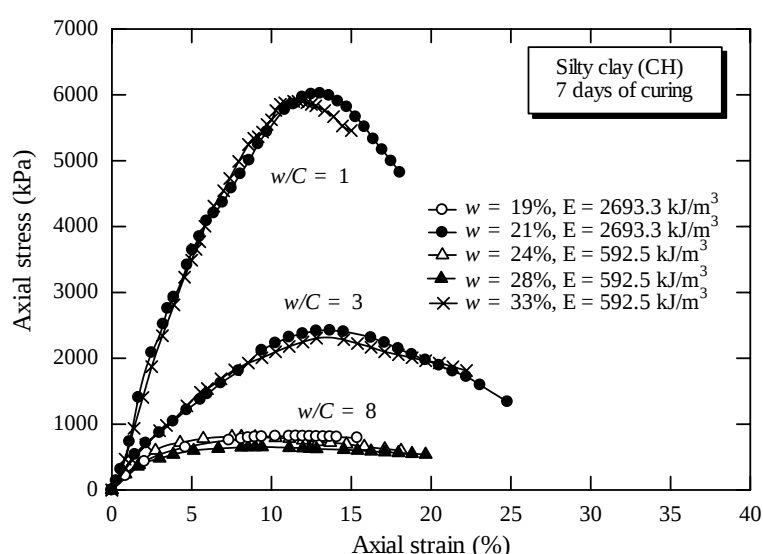


รูปที่ 4.47 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 24.5%(1.4 OWC) ภายใต้พลังงานการบดอัด 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

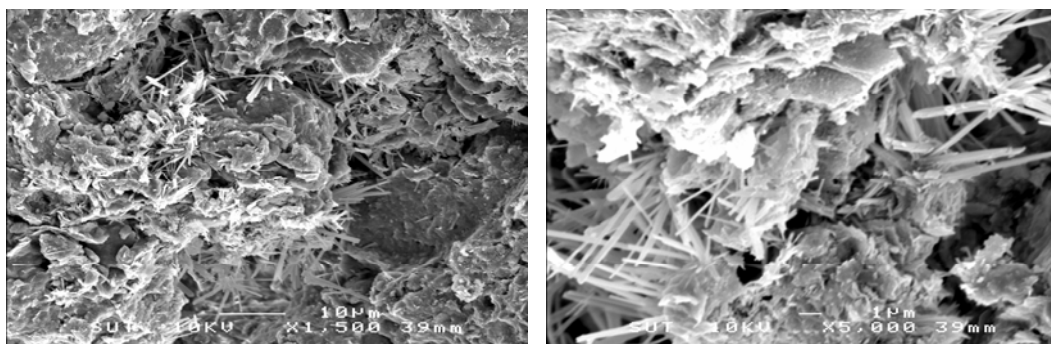
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณ Lin count ของ Ca(OH)_2 , Ettringite SiO_2 และ กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน ที่ความชื้น 0.6OWC, OWC และ 1.4OWC

Moisture	Ca(OH)_2		Ettringite		SiO_2		Strength (kPa)	
	7 days	28 days	7 days	28 days	7 days	28 days	7 days	28 days
0.6OWC	8.14	10.6	8.20	7.30	325	318	970	2135
OWC	12.3	17.0	13.4	10.5	367	283	1270	2490
1.4OWC	9.48	11.4	10.0	9.40	422	380	1090	2220

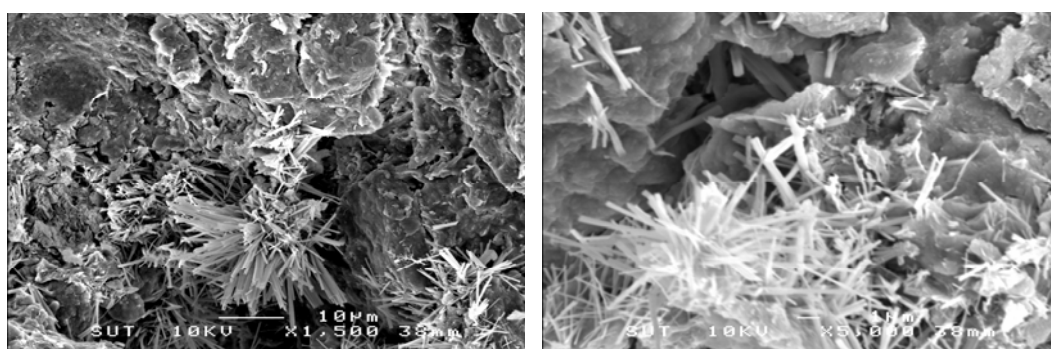
จากหัวข้อ 4.6 พบว่าที่อายุบ่มค่าหนึ่ง กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดแปรผันตามปริมาณน้ำ และซีเมนต์ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต (Horpibulsuk et al., 2006 และ วรรัชย์, 2548) Horpibulsuk et al. (2006) กล่าวว่ากำลังอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสมแปรผันตามอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ (w/C) แต่ยังคงขาดคำอธิบายทางโครงสร้างจุลภาค งานวิจัยนี้จะศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินที่มีอัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อซีเมนต์ (w/C) เดียวกัน 3 ค่า (1.0, 3.0, และ 8.0) ที่ระยะบ่ม 7 วัน รูปที่ 4.48 แสดงพฤติกรรมรับแรงอัดจะเห็นว่ากำลังอัดแปรผันตาม w/C รูปที่ 4.49 ถึง 4.54 แสดงภาพถ่ายขยาย 1500 และ 5000 เท่า ของดินซีเมนต์ที่ w/C เท่ากับ 6.3 และ 8.0 อัตราส่วน w/C จะเท่ากันกำลังอัดเกือบเท่ากันแต่ขนาดช่องว่างในดินมีความแตกต่างกัน ช่องว่างของดินซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 19 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาณความชื้นเหมาะสม) มีขนาดเล็กที่สุด



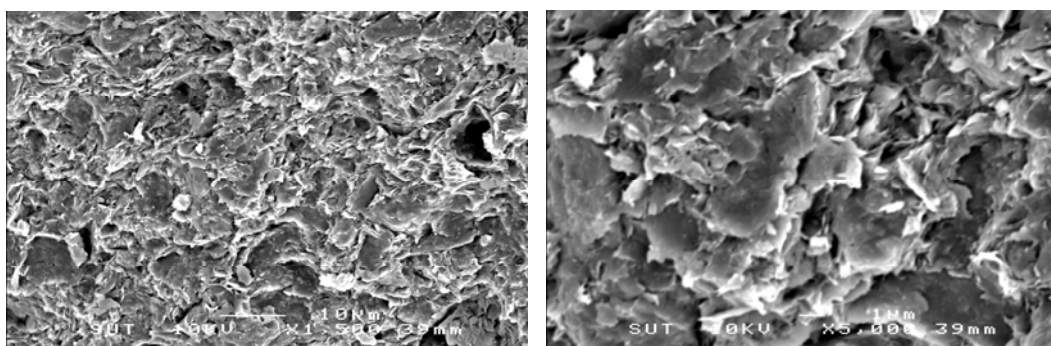
รูปที่ 4.48 กำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ที่ w/C เดียวกัน



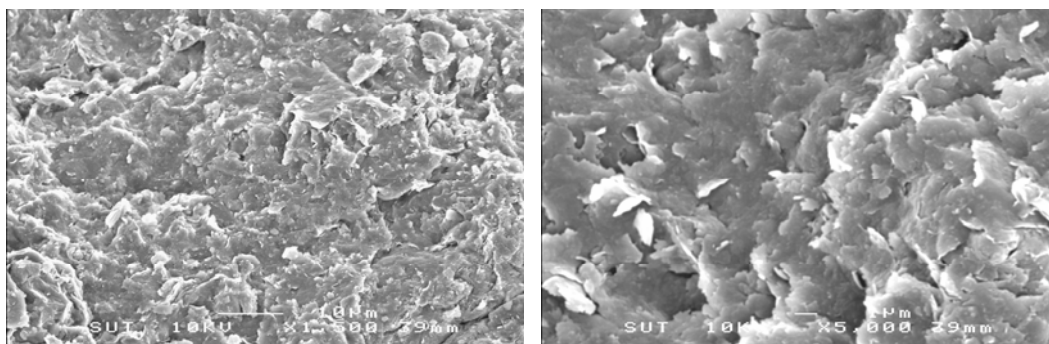
รูปที่ 4.49 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 24% ($w/C = 8$) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 950 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



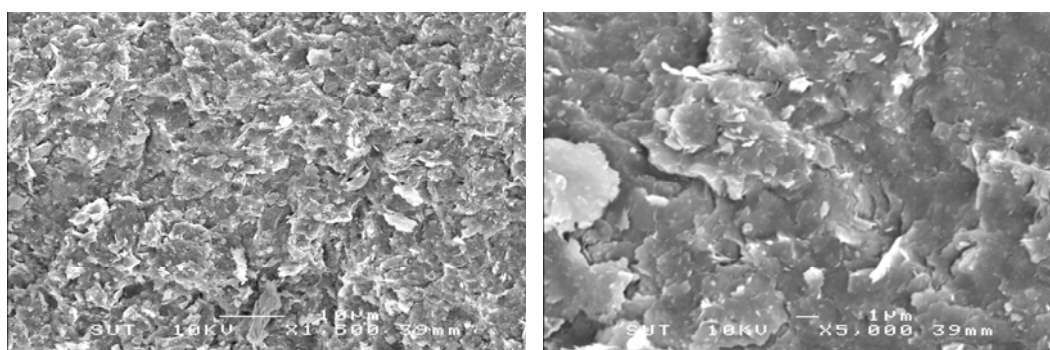
รูปที่ 4.50 ดินผสมซีเมนต์ 3.5% ที่ความชื้น 28% ($w/C = 8$) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 820 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



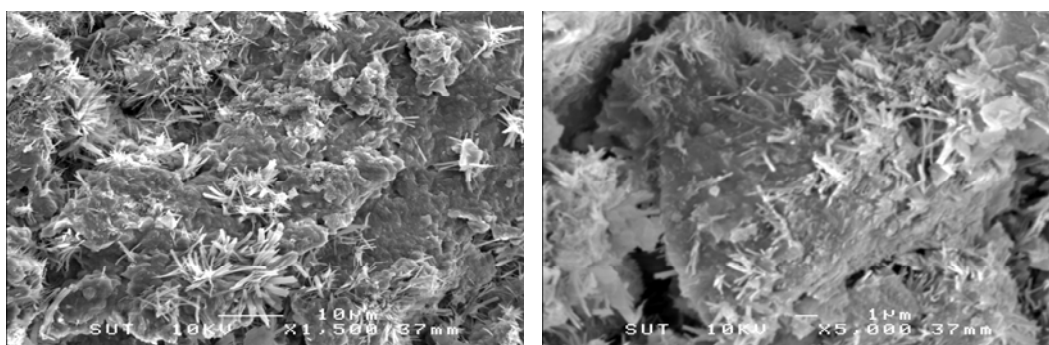
รูปที่ 4.51 ดินผสมซีเมนต์ 2.375% ที่ความชื้น 19% ($w/C = 8$) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 980 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.52 ดินผสมซีเมนต์ 3% ที่ความชื้น 19% ($w/C = 6.33$) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1220 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

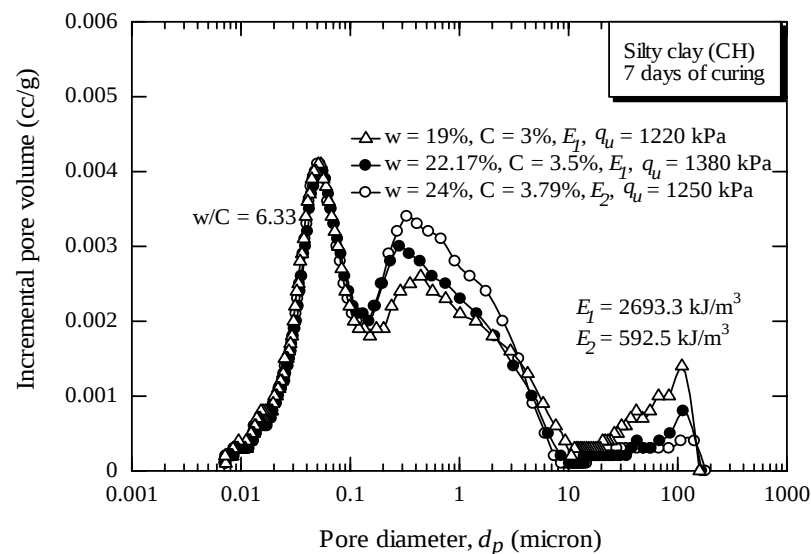


รูปที่ 4.53 ดินผสมซีเมนต์ 3.5% ที่ความชื้น 22.17% ($w/C = 6.33$) บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1380 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

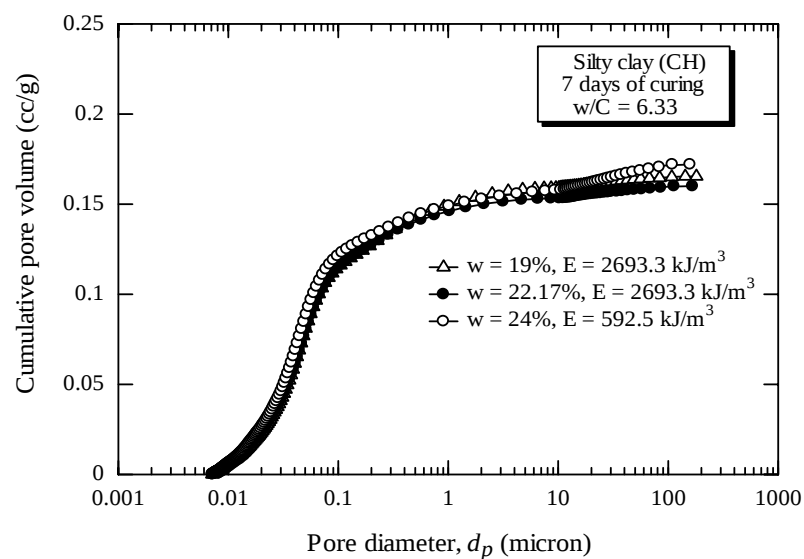


รูปที่ 4.54 ดินผสมซีเมนต์ 3.79% ที่ความชื้น 24% ($w/C = 6.33$) บดอัดด้วยพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร บ่ม 7 วัน กำลังอัด 1250 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

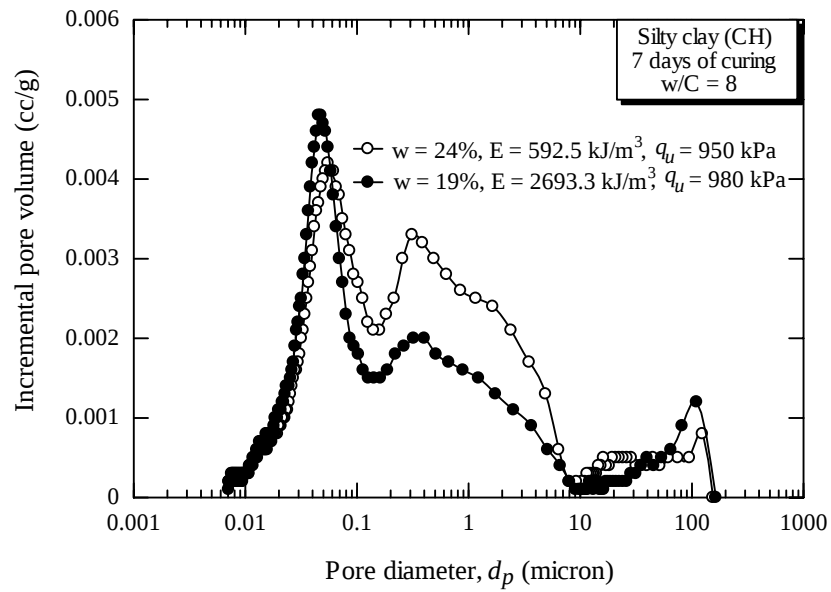
รูปที่ 4.55 ถึง 4.58 แสดงเปรียบเทียบการกระจายขนาดช่องว่างของดินซีเมนต์บดอัดที่มีค่า w/C เท่ากัน 2 ค่า (6.33 และ 8.0) เห็นได้ว่าดินตัวอย่างที่ w/C เท่ากันจะมีช่องว่างที่เล็กกว่า 0.01 ไมครอน ใหญ่กว่า 10 ไมครอน และขนาด 0.01-0.1 ไมครอน ในปริมาณใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าปริมาณ ความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และพลังงานการบดอัด จะมีค่าแตกต่างกันก็ตาม



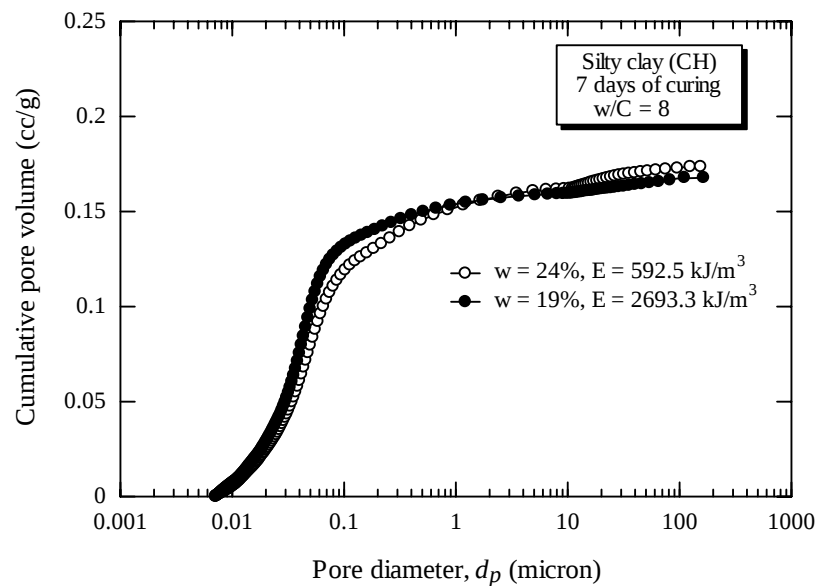
รูปที่ 4.55 การกระจายขนาดของช่องว่างของดินผสมซีเมนต์บดอัดที่ $w/C = 6.33$



รูปที่ 4.56 การกระจายขนาดสะสมของช่องว่างของดินผสมซีเมนต์บดอัด



รูปที่ 4.57 การกระจายขนาดของช่องว่างของดินผสมซีเมนต์บดอัดที่ $w/C = 8$

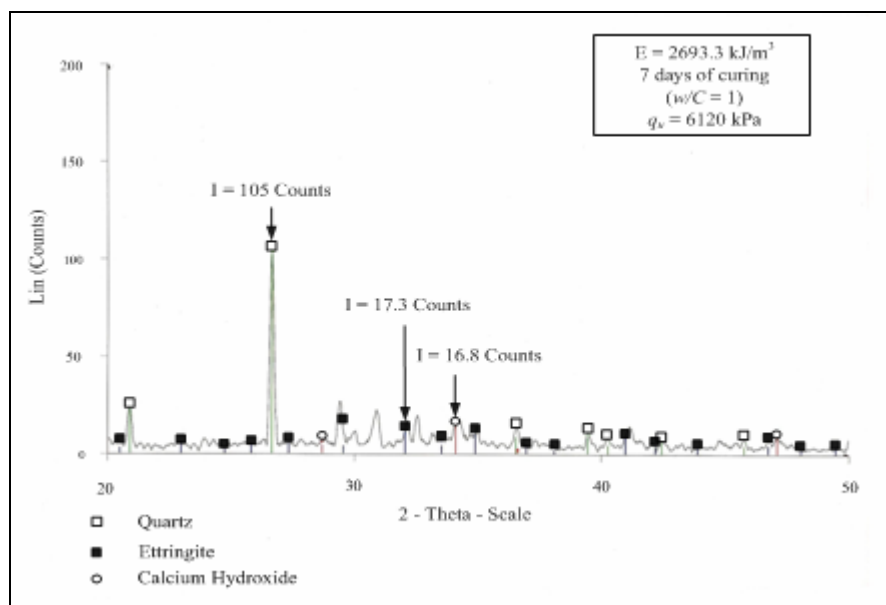


รูปที่ 4.58 การกระจายขนาดสะสมของช่องว่างของดินผสมซีเมนต์บดอัด

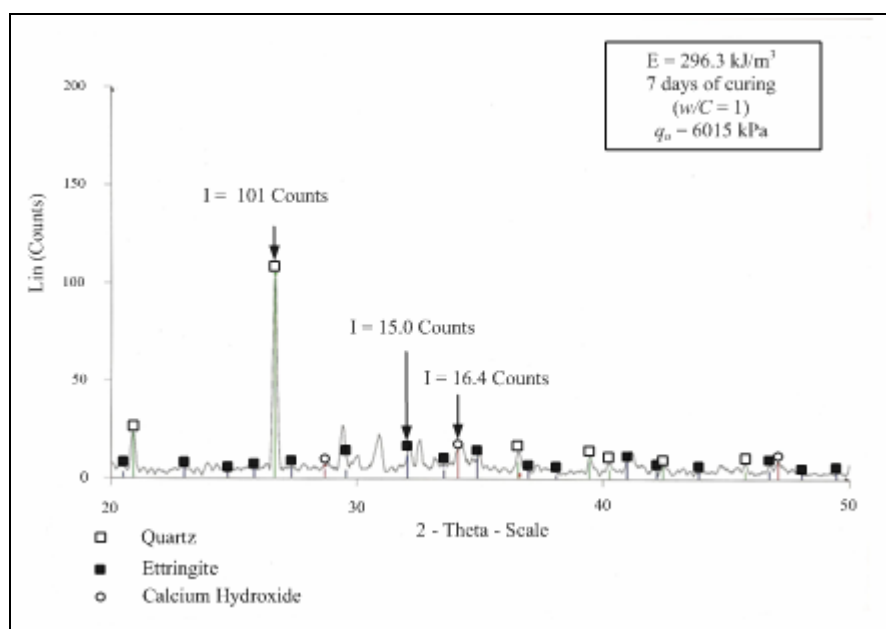
ตารางที่ 4.4 กำลังอัด ขนาดช่องว่าง อัตราส่วนช่องว่าง และน้ำหนักแห้ง ที่ปัจจัยควบคุมต่างๆ

Energy (kJ/m ³)	Cement C(%)	Moisture content,w(%)	Curing time, D(days)	w/C (%)	Dry density (kN/m ³)	Pore size (cc/g)	Void ratio	Strength, q_u (kPa)
592.5	3	12.9	7	4.3	16.3	0.176	0.188	1030
592.5	3	21.5	7	7.2	16.5	0.164	0.168	1450
592.5	3	24.0	7	3.4	16.4	0.180	0.178	1250
592.5	3	30.1	7	10.0	16.2	0.189	0.199	1120
2693.3	3	10.5	7	3.5	16.6	0.163	0.158	1226
2693.3	3	17.5	7	5.8	16.7	0.161	0.148	1560
2693.3	3	19.0	7	6.3	16.6	0.170	0.158	1350
2693.3	3.5	22.2	7	7.5	16.5	0.162	0.168	1290
2693.3	3	24.5	7	8.2	16.5	.0163	0.168	1231

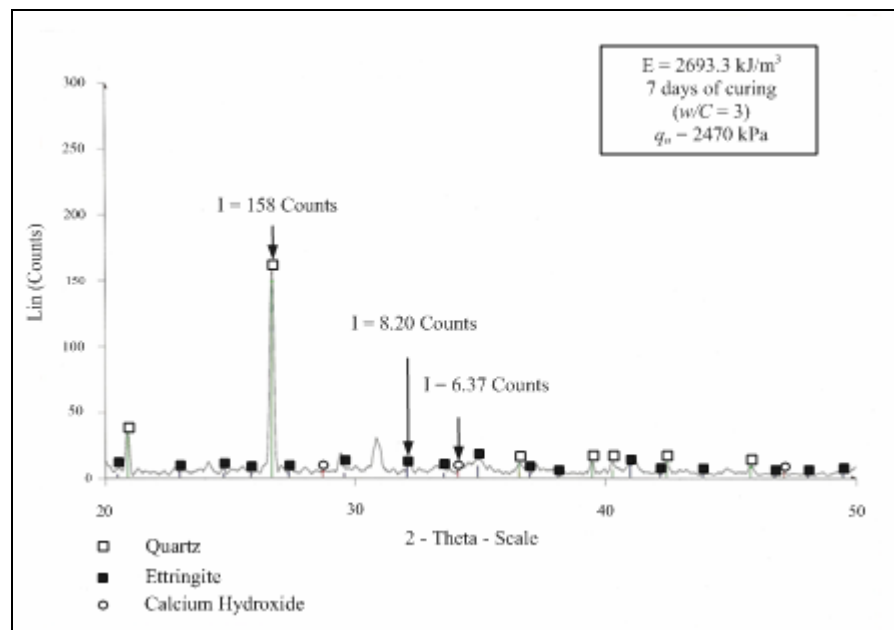
เมื่อพิจารณา Diffractogram ในรูปที่ 4.59-4.62 พบว่าดินที่มีอัตราส่วนความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์เดียวกัน พบว่าปริมาณ Calcium hydroxide (16.8, 16.4)(6.37, 5.71) ปริมาณ Ettringite (17.3, 15.0)(8.2, 7.2 และปริมาณ SiO₂ (105, 101)(158, 166) โดยน้ำหนักจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่าผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์มีปริมาณโดยน้ำหนักเท่ากัน และทำหน้าที่อุดช่องว่างขนาด 0.01-0.1 ไมครอน



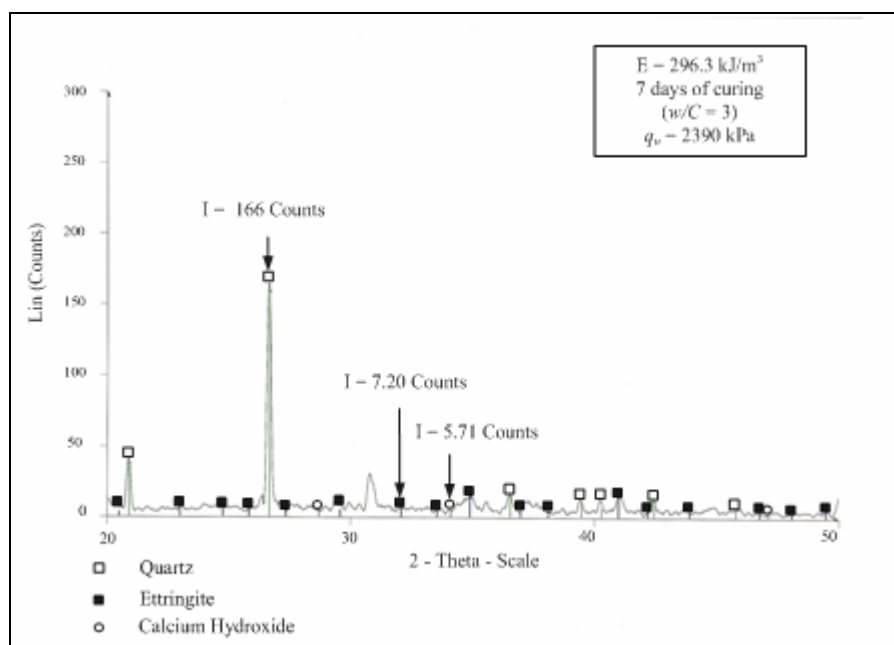
รูปที่ 4.59 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอน ที่ $w/C = 1$ บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.60 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอน ที่ $w/C = 1$ บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



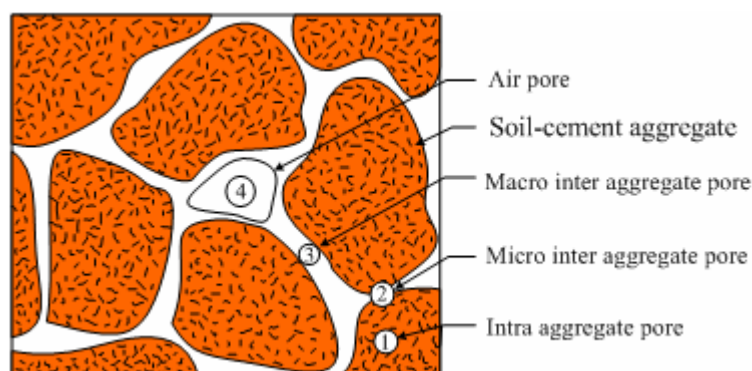
รูปที่ 4.61 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอน ที่ $w/C = 3$ บดอัดด้วยพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.62 Diffractogram ของดินเหนียวปนดินตะกอน ที่ $w/C = 3$ บดอัดด้วยพลังงาน 296.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

4.7 แบบจำลองโครงสร้างดินและดินซีเมนต์บดอัด

จากภาพถ่ายจุลภาคและการศึกษาขนาดของช่องว่าง ผู้เขียนขอเสนอแบบจำลองโครงสร้างดินที่น่าจะเป็นไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.63 ช่องว่างในมวลดินถูกแบ่งออกเป็น 4 ช่วงขนาดด้วยกัน ได้แก่ 1) ช่องอากาศ (air pore) คือ ช่องว่างขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน 2) ช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างอนุภาค คือ ช่องว่างที่มีขนาด 0.1-10 ไมครอน 3) ช่องว่างขนาดเล็กระหว่างอนุภาค (micro inter aggregate pore) คือ ช่องว่างขนาด 0.01-0.1 ไมครอน 4) ช่องว่างภายในอนุภาคดิน (intra-aggregate pore) คือ ช่องว่างขนาดเล็กกว่า 0.01 ไมครอน เมื่อผสมดินและซีเมนต์เข้าด้วยกัน ปูนซีเมนต์จะถูกห่อหุ้มด้วยดิน เนื่องจากดินมีอนุภาคที่เล็กกว่าและมีปริมาณที่มากกว่ามาก เมื่อดินซีเมนต์ถูกบดอัดจะเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนดินซีเมนต์ (aggregate) เนื่องจากแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นภายในก้อนดินเกิดจากการบดอัดบดอัดและแรงดึงดูดระหว่างดินเหนียว



รูปที่ 4.63 ช่องว่างในดินซีเมนต์บดด้วยวิธีการห่อด้วยฟิล์มพลาสติก

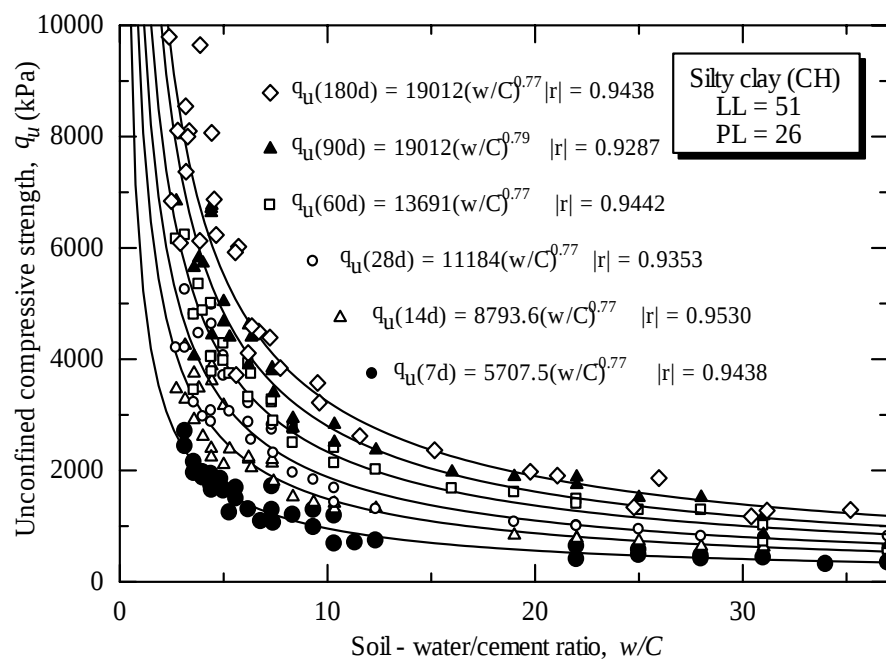
ในขณะเดียวกันเมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำในดินจะทำปฏิกิริยาเกิดซีเมนต์เจล (cement gel) รอบและภายในก้อนดินซีเมนต์ช่วยเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดิน ช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอนเป็นช่องว่างอากาศ ถึงแม้ว่าอากาศบางส่วนจะถูกไล่ออกจากมวลดินด้วยการบดอัดก็ตาม แต่ก็ออกไม่หมด ด้วยเหตุนี้โครงสร้างดินบดอัดจึงมีปริมาณช่องว่างอากาศอยู่ ช่องว่างอากาศที่เหลือจะถูกล้อมรอบด้วยซีเมนต์เจล ซีเมนต์เจลแทบจะไม่สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างอากาศนี้ได้ เมื่ออายุบ่มมากขึ้น ซีเมนต์เจลจะแข็งตัวและแทนที่ช่องว่างขนาด 10-0.01 ไมครอน แม้จะมีปริมาณซีเมนต์ในก้อนดิน (aggregate) แต่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของช่องว่างในก้อนดินเพราะน้ำในก้อนดินมีไม่เพียงพอไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ ด้วยเหตุนี้ ปริมาณช่องว่างทั้งหมดจึงลดลงโดยปริมาณช่องว่างในก้อนดินและช่องว่างอากาศไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าปฏิกิริยา

ระหว่าง ดิน-ซีเมนต์-น้ำ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ซีเมนต์และช่องว่างช่วงขนาด 0.01-10 ไมครอนลดลง จึงทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้น

ขนาดช่องว่างที่ควบคุมกำลังอัดคือขนาดช่วง 0.01-0.1 ไมครอน กำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่มีอัตราส่วนผสมต่างกันจะมีกำลังอัดเท่ากันก็ต่อเมื่อมีปริมาณ Ca(OH)_2 และ Ettringite เท่ากัน และมีช่องว่างขนาด 0.01-0.1 ไมครอนเท่ากัน ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อควบคุมอัตราส่วน w/C ให้เท่ากัน

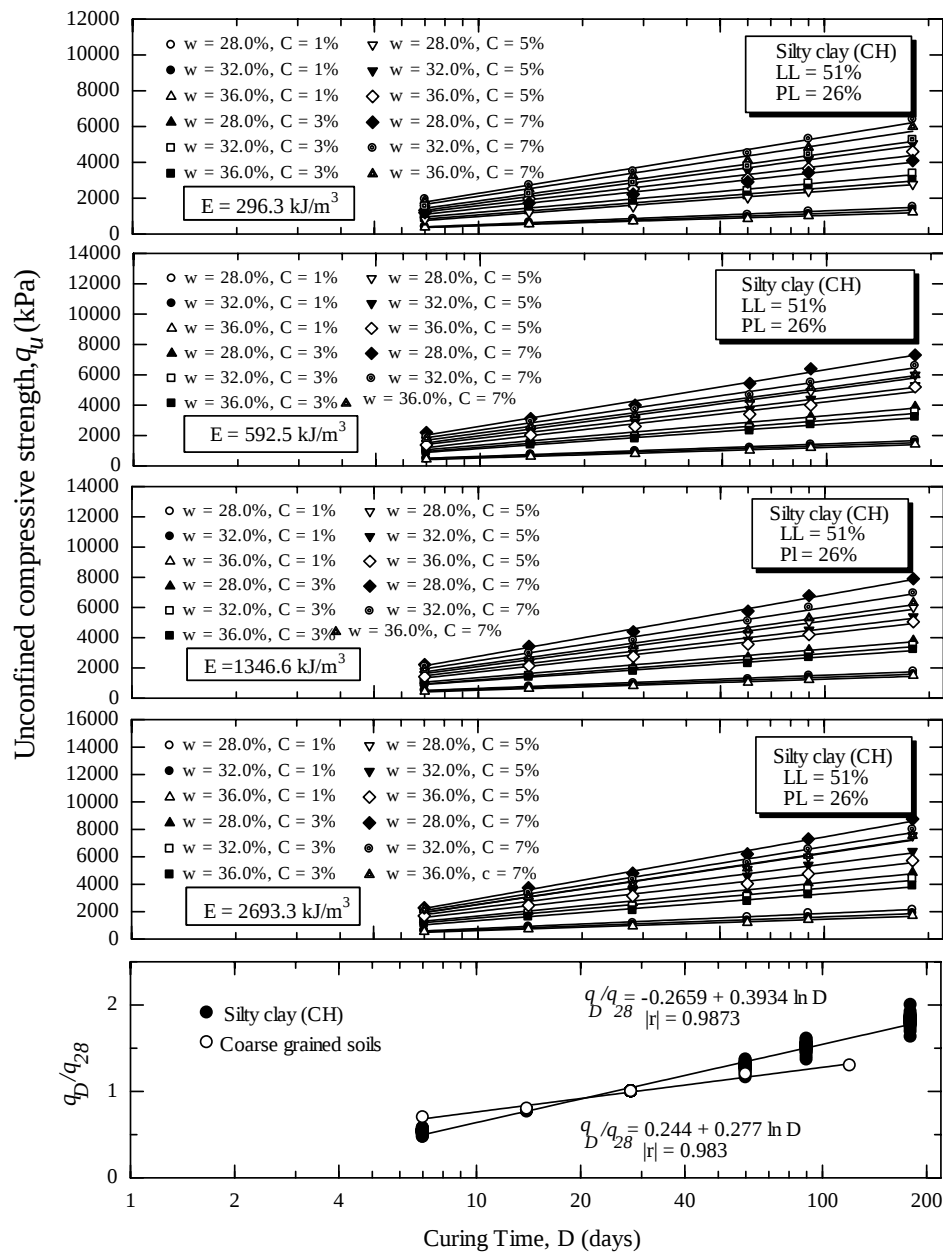
4.8 การเทียบปรับสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัด

รูปที่ 4.64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วน w/C จะเห็นว่า ความสัมพันธ์อยู่ในรูปของฟังก์ชันกำลัง โดยที่ B (ดัชนียกกำลัง) มีค่าเกือบคงที่ 0.77 (เทียบกับ 0.65 สำหรับดินเม็ดหยาบ, วรรณชัย 2548) ค่า B ที่แตกต่างกันอาจเนื่องจากปริมาณดินเหนียวที่มีอยู่มากกว่าในดินเม็ดละเอียด



รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วน w/C ของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์

รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ Semi log ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มที่พลังงานต่างๆ และ ความสัมพันธ์แบบ Normalized จะเห็นว่าสามารถ fit สมการเส้นตรงได้ดี โดยสมการ Normalized ดัง แสดงในสมการที่ 4.3



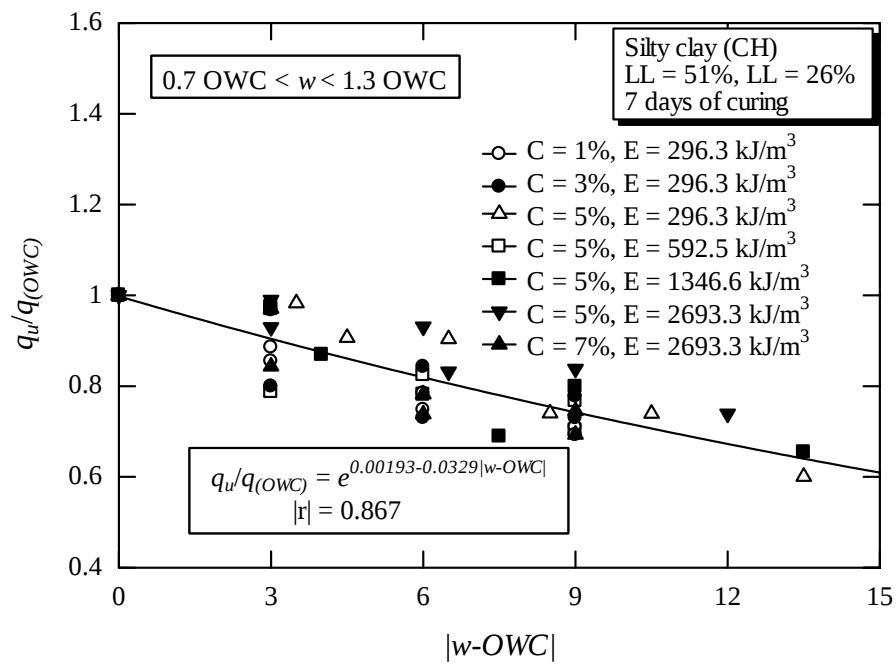
รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินเหนียวละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด

$$\frac{q_D}{q_{28}} = -0.2659 + 0.3934 \ln D \quad (4.3)$$

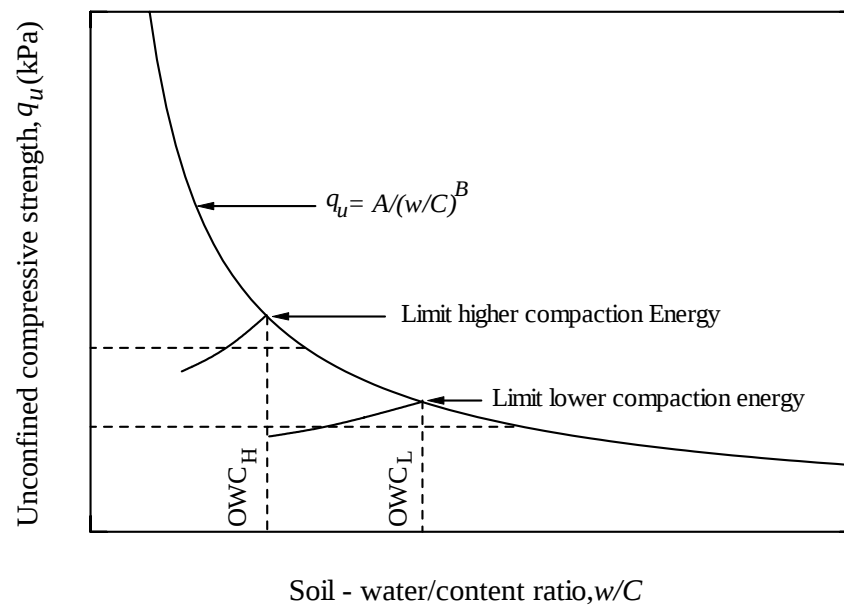
เทอมทางซ้ายมือของสมการที่ 4.3 เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม D วัน ต่อ กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ค่า w/C เดียวกัน สมการที่ 4.4 สามารถทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดที่ ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และระยะบ่มใดๆ โดยอาศัยผลทดสอบที่ 28 วัน เพียงค่าเดียว ในช่วงอายุบ่ม 7 ถึง 180 วัน และ w/C ในช่วง 0-37 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์มีค่าใกล้เคียงกับสมการที่สร้างขึ้นจากดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด (Horpiulsuk et al. 2006)

$$\left\{ \frac{q_{(w/c)D}}{q_{(w/c)28}} \right\} = \left[\frac{(w/c)_{28}}{(w/c)_D} \right]^{0.77} (-0.2659 + 0.3934 \ln D) \quad (4.4)$$

สำหรับกำลังอัดแกนเดียวทางด้านข้างของปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดสามารถพิจารณาได้ดังนี้ จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เมื่อแปรผันปริมาณซีเมนต์และพลังงาน ทั้งทางด้านเปียกและด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่อายุบ่มค่าหนึ่ง จะเห็นว่ากำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ปริมาณซีเมนต์ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณน้ำมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ โดย กำลังอัดแกนเดียวทางด้านแห้งจะมีลักษณะเกือบสมมาตรกับด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม ในช่วงปริมาณความชื้นระหว่าง 70-130 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำเหมาะสมเมื่อ plot ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างปริมาณความชื้นกับปริมาณความชื้นเหมาะสม กับอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดของข้อมูลกำลังอัดทั้งหมดจะได้กราฟแสดงดังในรูปที่ 4.66 จะเห็นว่า สามารถ fit เส้นโค้งได้ดีแสดงว่าสมมาตรกันผู้วิจัยจึงได้เสนอกราฟทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ ทางด้านแห้งและทางด้านเปียกดังแสดงในรูปที่ 4.67



รูปที่ 4.66 กราฟตรวจสอบความสมมาตรของกำลังอัดทางด้านเปียกและทางด้านแห้ง



รูปที่ 4.67 แบบจำลองกำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ทางด้านแห้งกับทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นเหมาะสม

4.9 ตรวจสอบสมการทำนายกำลัง

เมื่อได้สมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดทั้งทางด้านเปียกและด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม ในหัวข้อนี้เราจะตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนายกำลัง เมื่อนำมาใช้กับดินเม็ดละเอียดจากแหล่งอื่นๆ ซึ่งในที่นี้จะนำมาตรวจสอบกับดินตัวอย่างที่ 2 ผลการทำนายเปรียบเทียบกับผลทดสอบจริง แสดงดังตารางที่ 4.3 ถึง 4.4 และรูปที่ 4.68 เมื่อนำค่ามาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัด (q_{up}/q_{ul}) จะพบว่าค่าอยู่ในช่วงค่าความเชื่อมั่น 80% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรมและมีค่าที่อยู่นอกกรอบความเชื่อมั่น 80% ประมาณ 12 % อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของขั้นตอนการบดอัดและขั้นตอนการบ่ม นอกจากนี้ผู้วิจัยยังใช้สมการทำนายกำลังอัดในงานวิจัยของธีรชาติ (2544) เปรียบเทียบกับกำลังอัดจริงดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่าได้ผลพอใช้ได้แต่ไม่ดีนัก

ตารางที่ 4.5 การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดที่ความชื้นมากกว่า
ความชื้นเหมาะสมเปรียบเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Energy (kJ/m ³)	OWC (%)	Moisture content, w (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	w/C	Predicted strength, q_u (kPa)	Lab strength, q_u (kPa)
592.5	11.4	12.5	7	1	12.5	718	830
592.5	11.4	13.5	7	1	13.5	677	780
592.5	11.4	14.5	7	1	14.5	641	650
592.5	11.4	11.5	7	3	3.8	1785	2570
592.5	11.4	12.5	7	3	4.2	1674	2350
592.5	11.4	13.5	7	3	4.5	1578	1820
592.5	11.4	14.5	7	3	4.8	1494	1520
592.5	11.4	11.5	7	5	2.3	2649	3410
592.5	11.4	12.5	7	5	2.5	2481	3130
592.5	11.4	13.5	7	5	2.7	2339	2570
592.5	11.4	14.5	7	5	2.9	2213	2290
592.5	11.4	11.5	7	7	1.6	3428	3920
592.5	11.4	12.5	7	7	1.8	3215	3550
592.5	11.4	13.5	7	7	1.9	3030	3150
592.5	11.4	14.5	7	7	2.1	2868	2250
2693.3	9	10	7	1	10.0	853	1160
2693.3	9	11	7	1	11.0	793	940
2693.3	9	12	7	1	12.0	742	750
2693.3	9	9	7	3	3.0	2156	3250
2693.3	9	10	7	3	3.3	1988	2810
2693.3	9	11	7	3	3.7	1848	2180
2693.3	9	12	7	3	4.0	1728	1610
2693.3	9	9	7	5	1.8	3195	3890
2693.3	9	10	7	5	2.0	2946	3560
2693.3	9	11	7	5	2.2	2738	2940
2693.3	9	12	7	5	2.4	2561	2200
2693.3	9	9	7	7	1.3	4141	4290
2693.3	9	10	7	7	1.4	3818	3840

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

Energy (kJ/m ³)	OWC (%)	Moisture content, w (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	w/C	Prediced strength, q_u (kPa)	Lab strength, q_u (kPa)
2693.3	9	11	7	7	1.6	3548	3610
2693.3	9	12	7	7	1.7	3318	3450
592.5	11.4	11.5	14	1	11.5	1185	1220
592.5	11.4	12.5	14	1	12.5	1111	1120
592.5	11.4	13.5	14	1	13.5	1047	1080
592.5	11.4	14.5	14	1	14.5	991	1020
592.5	11.4	11.5	14	3	3.8	2760	3100
592.5	11.4	12.5	14	3	4.2	2588	2820
592.5	11.4	13.5	14	3	4.5	2439	2350
592.5	11.4	14.5	14	3	4.8	2309	1820
592.5	11.4	11.5	14	5	2.3	4090	4650
592.5	11.4	12.5	14	5	2.5	3836	4480
592.5	11.4	13.5	14	5	2.7	3615	3750
592.5	11.4	14.5	14	5	2.9	3421	2880
592.5	11.4	11.5	14	7	1.6	5299	5050
592.5	11.4	12.5	14	7	1.8	4970	4720
592.5	11.4	13.5	14	7	1.9	4684	4650
592.5	11.4	14.5	14	7	2.1	4433	4550
2693.3	9	9	14	1	9.0	1430	1950
2693.3	9	10	14	1	10.0	1319	1880
2693.3	9	11	14	1	11.0	1226	1780
2693.3	9	12	14	1	12.0	1146	1160
2693.3	9	9	14	3	3.0	3333	4050
2693.3	9	10	14	3	3.3	3073	3290
2693.3	9	11	14	3	3.7	2856	3740
2693.3	9	12	14	3	4.0	2671	2600
2693.3	9	9	14	5	1.8	4940	5080
2693.3	9	10	14	5	2.0	4555	4920
2693.3	9	11	14	5	2.2	4232	4620

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

Energy (kJ/m ³)	OWC (%)	Moisture content, w (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	w/C	Prediced strength, q_u (kPa)	Lab strength, q_u (kPa)
2693.3	9	12	14	5	2.4	3958	4000
2693.3	9	9	14	7	1.3	6400	7070
2693.3	9	10	14	7	1.4	5901	6460
2693.3	9	11	14	7	1.6	5484	6180
2693.3	9	12	14	7	1.7	5129	5930
592.5	11.4	11.5	28	1	11.5	1603	1620
592.5	11.4	12.5	28	1	12.5	1503	1400
592.5	11.4	13.5	28	1	13.5	1416	1120
592.5	11.4	14.5	28	1	14.5	1340	1080
592.5	11.4	11.5	28	3	3.8	3734	3850
592.5	11.4	12.5	28	3	4.2	3502	3800
592.5	11.4	13.5	28	3	4.5	3300.6	3200
592.5	11.4	14.5	28	3	4.8	3123.9	3120
592.5	11.4	11.5	28	5	2.3	5533.9	6500
592.5	11.4	12.5	28	5	2.5	5189.8	6500
592.5	11.4	13.5	28	5	2.7	4891.2	5600
592.5	11.4	14.5	28	5	2.9	Reference	4430
592.5	11.4	11.5	28	7	1.6	7171	7000
592.5	11.4	12.5	28	7	1.8	6725	6600
592.5	11.4	13.5	28	7	1.9	6338	6220
592.5	11.4	14.5	28	7	2.0	5998	5320
2693.3	9	9	28	1	9.0	1936	2580
2693.3	9	10	28	1	10.0	1785	2100
2693.3	9	11	28	1	11.0	1658	1800
2693.3	9	12	28	1	12.0	1551	1780
2693.3	9	9	28	3	3.0	4510	4730
2693.3	9	10	28	3	3.3	4159	4180
2693.3	9	11	28	3	3.7	3864	3870
2693.3	9	12	28	3	4.0	3614	3600

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

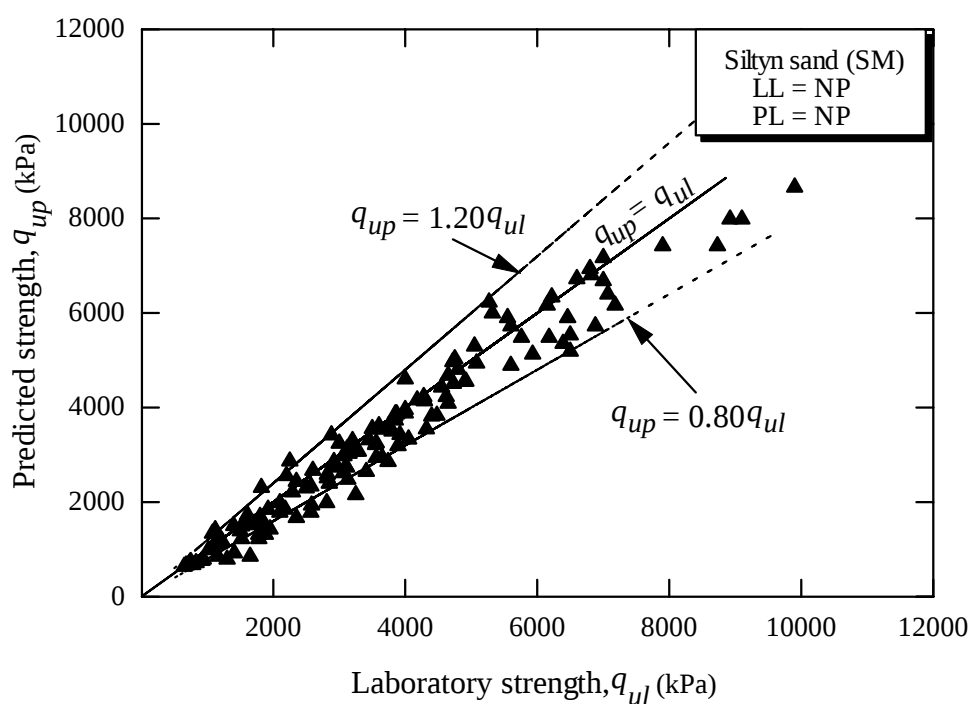
Energy (kJ/m ³)	OWC (%)	Moisture content, w (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	w/C	Prediced strength, q_u (kPa)	Lab strength, q_u (kPa)
2693.3	9	9	28	5	1.8	6684	7000
2693.3	9	10	28	5	2.0	6163	7180
2693.3	9	11	28	5	2.2	5727	6880
2693.3	9	12	28	5	2.4	5356	6390
2693.3	9	9	28	7	1.3	8660	9900
2693.3	9	10	28	7	1.4	7985	9100
2693.3	9	11	28	7	1.6	7420	7900
2693.3	9	12	28	7	1.7	6939	6800

ตารางที่ 4.6 การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดที่ความชื้นน้อยกว่า
ความชื้นเหมาะสมเปรียบเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Energy (kJ/m ³)	OWC (%)	Moisture content, w (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	w/c	Prediced strength, q_u (kPa)	Lab strength, q_u (kPa)
592.5	11.4	9	7	1	9.0	666	680
592.5	11.4	10.5	7	1	10.5	728	740
592.5	11.4	9	7	3	3.0	1552	1710
592.5	11.4	9	7	5	1.8	2299	2500
592.5	11.4	10.5	7	5	2.1	2512	2820
592.5	11.4	9	7	7	1.3	2979	3070
592.5	11.4	10.5	7	7	1.5	3255	3560
2693.3	9	7	7	1	7.0	793	1300
2693.3	9	8	7	1	8.0	853	1650
2693.3	9	7	7	3	2.3	1847	1920
2693.3	9	8	7	3	2.7	1988	2100
2693.3	9	7	7	5	1.4	2738	3110
2693.3	9	8	7	5	1.6	2946	3650
2693.3	9	7	7	7	1.0	3548	4320
2693.3	9	8	7	7	1.1	3818	4400

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

Energy (kJ/m ³)	OWC (%)	Moisture content, w (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	w/c	Prediced strength, q_u (kPa)	Lab strength, q_u (kPa)
592.5	11.4	9	14	1	9.0	1029	1090
592.5	11.4	10.5	14	1	10.5	1125	1190
592.5	11.4	9	14	3	3.0	2398	2850
592.5	11.4	10.5	14	3	3.5	2621	3060
592.5	11.4	9	14	5	1.8	3554	3500
592.5	11.4	10.5	14	5	2.1	3884	4000
592.5	11.4	9	14	7	1.3	4605	4000
592.5	11.4	10.5	14	7	1.5	5032	4750
2693.3	9	7	14	1	7.0	1226	1520
2693.3	9	8	14	1	8.0	1319	1780
2693.3	9	7	14	3	2.3	2856	2920
2693.3	9	8	14	3	2.7	3073	3250
2693.3	9	7	14	5	1.4	4232	4280
2693.3	9	8	14	5	1.6	4554	4900
2693.3	9	7	14	7	1.0	5484	5760
2693.3	9	8	14	7	1.1	5902	5550
592.5	11.4	9	28	1	9.0	1393	1500
592.5	11.4	10.5	28	1	10.5	1522	1700
592.5	11.4	9	28	3	3.0	3245	3000
592.5	11.4	10.5	28	3	3.5	3546	3620
592.5	11.4	9	28	5	1.8	4809	4800
592.5	11.4	10.5	28	5	2.1	Reference	5280
592.5	11.4	9	28	7	1.3	6231	5270
592.5	11.4	10.5	28	7	1.5	6809	6820
2693.3	9	7	28	3	2.3	3864	3850
2693.3	9	8	28	3	2.7	4159	4280
2693.3	9	7	28	5	1.4	5727	5600
2693.3	9	8	28	5	1.6	6163	6150
2693.3	9	7	28	7	1.0	7421	8730
2693.3	9	8	28	7	1.1	7985	8920



รูปที่ 4.68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการทำนายกับกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบของดินตะกอนปนดินทราย

ตารางที่ 4.7 การทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดจากสมการทำนายกำลังอัดของธีรชาติ

Energy (kJ/m ³)	OWC (%)	Moisture content, w (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	w/C	Strength, q_u (kPa) (ธีรชาติ)	Predicted strength, q_u (kPa)
296.3	12.85	12.85	3	3	4.3	323	306
296.3	12.85	12.85	3	5	2.6	969	452
296.3	12.85	12.85	3	7	1.8	1463	600
296.3	12.85	12.85	7	3	4.3	400	943
296.3	12.85	12.85	7	5	2.6	1108	1389
296.3	12.85	12.85	7	7	1.8	1750	1843
296.3	12.85	12.85	14	3	4.3	535	1457
296.3	12.85	12.85	14	5	2.6	1352	2146
296.3	12.85	12.85	14	7	1.8	2254	2849
296.3	12.85	12.85	28	3	4.3	807	1972

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

Energy (kJ/m ³)	OMC (%)	Moisture content, w (%)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	w/C	Strength, q_u (kPa) (พีรชาติ)	Prediced strength, q_u (kPa)
296.3	12.85	12.85	28	5	2.6	1840	3324
296.3	12.85	12.85	28	7	1.8	3260	3855
592.5	12.50	12.50	3	3	4.2	419	312
592.5	12.50	12.50	3	5	2.5	1024	466
592.5	12.50	12.50	3	7	1.8	2198	600
592.5	12.50	12.50	7	3	4.2	507	960
592.5	12.50	12.50	7	5	2.5	1208	1431
592.5	12.50	12.50	7	7	1.8	2437	1843
592.5	12.50	12.50	14	3	4.2	660	1483
592.5	12.50	12.50	14	5	2.5	1531	2212
592.5	12.50	12.50	14	7	1.8	2854	2849
592.5	12.50	12.50	28	3	4.2	966	2007
592.5	12.50	12.50	28	5	2.5	2176	2993
592.5	12.50	12.50	28	7	1.8	3689	Reference
2693.3	11	11	3	3	3.7	855	344
2693.3	11	11	3	5	2.2	2082	514
2693.3	11	11	3	7	1.6	3684	657
2693.3	11	11	7	3	3.7	950	1058
2693.3	11	11	7	5	2.2	2263	1579
2693.3	11	11	7	7	1.6	3981	2018
2693.3	11	11	14	3	3.7	1117	1636
2693.3	11	11	14	5	2.2	2580	2441
2693.3	11	11	14	7	1.6	4501	3119
2693.3	11	11	28	3	3.7	1450	2213
2693.3	11	11	28	5	2.2	3214	4221
2693.3	11	11	28	7	1.6	5543	4220

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

การศึกษาดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดเพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด โดยแปรผันตัวแปรควบคุมได้แก่ พลังงานในการบดอัด ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม รวมถึงการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 กำลังอัดแกนเดียวทางด้านเปียก

กำลังอัดแกนเดียวทางด้านเปียก ของปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินผสมซีเมนต์ C% น้ำ w% บดอัดด้วยพลังงาน E ที่อายุบ่ม D วัน สามารถทำนายโดยเทียบกับกำลังอัดที่ 28 วัน ด้วยสมการที่ 4.3

$$\left\{ \frac{q_{(w/c)D}}{q_{(w/c)28}} \right\} = \left[\frac{(w/c)_{28}}{(w/c)_D} \right]^{0.77} (-0.2659 + 0.3934 \ln D) \quad (4.3)$$

อิทธิพลของพลังงานจะแฝงอยู่ในสมการคือพลังงานจะทำให้สามารถบดอัดดินซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ที่ต่ำได้ ส่วนกำลังอัดด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสมหาได้จากกราฟที่สมมาตรกันในช่วงความชื้น 70–130 % ของปริมาณความชื้นเหมาะสม

สมการที่นำเสนอสร้างมาจากดินเม็ดละเอียดระยะบ่มอยู่ในช่วง 7-180 วันและนำมาตรวจสอบกับดินทรายปนดินตะกอนซึ่งให้ผลเป็นที่ยอมรับได้

5.1.2 กำลังอัดของดินซีเมนต์

สามารถอธิบายจากโครงสร้างจุลภาคดังนี้

ก) ช่องว่างภายในดินสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม 1) ช่องอากาศ (air pore) คือช่องว่างขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน 2) ช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างอนุภาค (macro inter aggregate pore) คือ ช่องว่างที่มีขนาด 0.1-10 ไมครอน 3) ช่องว่างขนาดเล็กระหว่างอนุภาค (micro inter aggregate pore) คือ ช่องว่างขนาด 0.01-0.1 ไมครอน 4) ช่องว่างภายในอนุภาคดิน (intra-aggregate pore) คือ ช่องว่างขนาดเล็กกว่า 0.01 ไมครอน

- ข) ปฏิกริยาไฮเดรชันจะทำให้ช่องว่างกลุ่มที่ 2 และ 3 ลดลง ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น
- ค) ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมกำลังอัดแกนเดี่ยวของคินซีเมนต์จะมีค่ามากที่สุดซึ่งอธิบายได้ว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์และมีช่องว่างน้อยสุด ในขณะที่ปริมาณความชื้นต่ำและสูงมาก (0.60 OWC และ 1.40 OWC) ปฏิกริยาไฮเดรชันเกิดได้ไม่สมบูรณ์
- ง) คินซีเมนต์ที่บดอัดที่พลังงานบดอัดสูงกว่าจะมีขนาดช่องว่างน้อยกว่าคินซีเมนต์ที่บดอัดที่พลังงานต่ำกว่า และปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้สมบูรณ์กว่าส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงกว่า
- จ) เมื่ออายุบ่มมากขึ้นปริมาณ Ettringite จะลดลง ในขณะที่ปริมาณ Ca(OH)_2 เพิ่มขึ้น และช่องว่างลดลงด้วย ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม

5.2 ข้อเสนอแนะการใช้สมการและงานวิจัยต่อไป

เนื่องจากปูนซีเมนต์มีแนวโน้มราคาที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงควรที่จะมีการศึกษาถึงวัสดุแทนที่ราคาถูก เช่น ถ้ำลอย และถ้ำเกลบ เป็นต้น มาผสมเพิ่ม

รายการอ้างอิง

- ชัย มุกตพันธุ์ และกาชู่โตะ นากาซาวา. (2540). **ปฐพีกลศาสตร์และวิศวกรรมฐานราก**. กรุงเทพฯ : ดวงกมล.
- มานะ อภิพัฒนะมนตรี. (2539). **วิศวกรรมปฐพีและฐานราก**. กรุงเทพฯ : ส่วนตำราสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.
- สถาพร คูวิจิตรจารุ. (2542). **ปฐพีกลศาสตร์**. กรุงเทพฯ : ไลบรารีไนน์พับบลิชชิง.
- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และชัยวัฒน์ สันสกุล. (2543). **กำลังรับแรงอัดและกำลังแบกทานของดินทรายผสมซีเมนต์**. กรุงเทพฯ : ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.
- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแสน จรัสกร. (2545). **กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน**. กรุงเทพฯ : กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.
- วรรัช เกษกัน. (2548). **กำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Bell, F.G. (1993). **Engineering Treatment of Soil**. London : E&FN Spon, pp.240-251.
- Catton, M.D. (1938). **Soil-Cement Mixtures for Roads**. Highway Research Board Proc , 18 : Part II, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A., pp 314-321.
- Circeo, L.T., Davidson, D.T. and David, H.T. (1962). **Strength Naturity Relation of Soil-Cement Mixture**. Iowa State University for 41st Annual Meeting of the Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A.
- Davidson, D.T. (1961). **Soil Stabilization with Portland Cement**. Highway Research Board, Bulletin No. 292, pp. 4-74.
- Federal Highway Administration. (1976). **Soil Stabilization in Pavement Structures: A User's Manual**. Report, No. FHWA-IP-80-2, Federal Highway Administration, Washington, D.C., pp. 234-238.
- Felt, E.J. (1955). **Factors Influencing Properties of Soil-Cement Mixtures**. Highway Road Research Board, No. 49, 20p.

- Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stability. (1959). **Definition of Terms Relating to Soil-Portland Cement Stabilization**. Highway Research Abstracts, 29: 6 June 1959, pp. 28-29.
- Highway research Board. (1961). **Soil Stabilization with Portland Cement**. Highway Research Board , Bulletin No. 292, 212p.
- Hogentogler, G.A. (1938). **Engineering Properties of the Soils**. New York : McGraw-Hill.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S. (1999). **Prediction of strength and consolidation parameters of cement stabilized clays**. Report of the Faculty of Science and Engineering, Saga University, Japan, 28(2), pp. 27-38.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W. and Rachan, R. (2006). **Strength development in cement stabilized coarse grained and low plasticity soils : Laboratory and field study**. Soils and Foundations. (in press).
- Horpibulsuk, S. (2001). **Analysis and Assessment of Engineering Behavior of Cement Stabilized clays**. Ph.D. Dissertation, Saga University, Saga, Japan.
- Horpibulsuk, S. and Miura, N. (2001). **A new approach for studying behavior of cement stabilized Clays**. Proceeding of 15th International Conference of Soil Mechanic and Geotechnical Engineering Turkey, 3, pp. 1759-1762.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S. (2001). **Analysis and assessment of strength development in cement admixed clay**. Proc. International Conference on Civil Engineering, Indian Institute of Science, 2, pp. 156-163.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S. (2005). **Clay-water / cement ratio identity for same strength and deformation of cement admixed high water cement soft clays**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE , Vol. 131, No. 2, pp.187-192.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S. (2003). **Assessment of strength development in cement admixed clays**. Geotechnique, Vol. 53, No. 4, pp. 434-444.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. and Kogo, H. (2002). **Improvement of soft marine clays by deep mixing technique**. Proceeding of 12th International Conference on Offshore and Polar Engineering, Kitakyushu, Japan, pp. 584-591.
- Marchall, T.J. (1954). **Some Properties of Soil Treated with Portland Cement**. Symposium on Soil Stabilization, Australia, pp. 38.

- Mills, W.H. (1935). **Road Base Stabilization with Portland Cement**. Engineering News Record, Vol. 115, No. 22, pp. 751-753.
- Mitchell, J.K. (1982). **Soil Improvement : State-of-the-art**. Report, Proc. X Icsmfe, Vol. 4, Rotterdam, pp. 533-537.
- Mitchell, J.K. and E.L.Jack, S.A. (1966). **The Fabric of Soil-Cement and Its Formation**. Proceedings 14th National Conference on Clay and Clay Minerals, Vol. 26, pp. 297-303.
- Moh, Z.C. (1965). **Reaction of Soil Minerals with Cement and Chemicals**. Highway Research Record, No. 86, pp. 39-61.
- Nussbaum, P.J. and Colley, B.E. (1971). **Dam Construction and Facing with Soil-Cement**. Research and Development Bulletin, No. Rd010W, pp. 14.
- Portland Cement Association. (1959). **Soil-Cement Laboratory Handbook**. Illinois, Skokie, 60p.
- Portland Cement Association. (1986). **Soil-Cement for Facing Slopes and Lining Channel and Lagoons**. Information Sheet, No. IS126W, pp. 8.
- Ruenkairergsa, T. (1982). **Principle of Soil Stabilization**. Group Training in Road Construction, Bangkok, Thailand, pp.17-26.
- Shen, C.K. and Mitchell, J.K. (1966). **Behavior of Soil-Cement in Repeated Compression and Flexure**. Highway Research Board, No. 128, pp. 68-100.
- Terel, R.L., Berenberg, E.J., Mitchell, J.M. and Thomson, M.R. (1979). **Soil Stabilization in Pavement Structure : A User's Manual Mixture Design Consideration**. Vol. 2, Washington, D.C., Government Printing Office, 120p.
- Winterkorn, H.F. (1955). **The Science of Soil Stabilization**. Highway Research Board Bulletin No. 108, National Research Council, Washington, D.C., pp. 1- 24.

ภาคผนวก ก
วิธีการต่างๆ ที่ใช้ทดสอบโครงสร้างจุลภาค

ก.1 Freeze drying

ก.1.1 หลักการของ Freeze drying

Freeze drying คือกระบวนการที่ทำให้สารที่เปียกแห้ง โดยทำให้สารนั้นเย็นจนแข็งตัวและระเหยเอาไอน้ำแข็งออกไป การทำให้แห้งแบบ Freeze - drying นี้รู้จักกันมานานแล้วแต่เนื่องจากเครื่องมือราคาแพง เพราะต้องใช้ระบบทำความเย็นจัดและเครื่องปั๊มที่มีประสิทธิภาพสูงคู่กันให้เป็นสุญญากาศ และการใช้งานรวมทั้งการดูแลรักษาต้องการเทคนิคเฉพาะ จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ในระบบผลิตทั่วไป ข้อดีของวิธี Freeze drying สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถทนความร้อนสูงวิธีทำแห้งแบบอื่นๆ ไปจะใช้ความร้อนสูง ส่วนวิธีนี้ทำให้คุณสมบัติของสารเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ความแห้งสามารถคงตัวอยู่ได้นาน ณ อุณหภูมิห้อง และสามารถนำกลับมาละลายน้ำได้ง่าย ถ้าจะอธิบายให้ละเอียด freeze drying ก็คือ การรักษาสภาพของสารที่เปียกหรือสารละลายในน้ำโดยผลิตภัณฑ์จะถูกทำให้เย็นจนแข็งและอยู่ในบรรยากาศที่มีความชื้นต่ำ เกิดสถานะไอน้ำแข็งระเหิดคือการเปลี่ยนเป็นไอน้ำโดยไม่ผ่านการละลายผลิตภัณฑ์จะไม่เปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือทางเคมี

ก.1.2 กระบวนการของ Freeze drying

แบ่งเป็น 3 กระบวนการ คือ

- 1) Pre-freezing เป็นการลดอุณหภูมิของสารเพื่อทำให้เกิดก้อนผลึกของน้ำก่อนทำ Primary drying จะทำให้สารแข็งตัวใน Freeze-dryer (internal freezing) หรืออาจให้แข็งตัวในภาชนะเฉพาะ (external freezing) ความหนาที่เหมาะสมของสารเพื่อให้ Freezing time และ Drying cycle สั้น คือประมาณ 10 มม. ถึง 15 มม. การทำให้วัตถุแข็งตัวก็เพื่อที่จะยึดวัตถุนั้นให้อยู่ในสภาพ Solid matrix เพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือกายภาพ เมื่อน้ำถูกกำจัดออกไป โดยทั่วไปจุดเยือกแข็งจะอยู่ที่ 0°C แต่ถ้ามีส่วนประกอบที่เป็นน้ำตาลหรือเกลือ Sodium chloride จุดเยือกแข็งจะต่ำกว่า 0°C ผลิตภัณฑ์จะแข็งตัวอย่างสมบูรณ์เมื่ออุณหภูมิต่ำลงถึงอุณหภูมิ Eutectic ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารที่ผสมในผลิตภัณฑ์นั้น แต่โดยทั่วไปการลดอุณหภูมิจนถึง -40°C ผลิตภัณฑ์แทบทุกชนิดจะแข็งตัว อย่างสมบูรณ์ภายใน 2-3 ชั่วโมง
- 2) Primary drying เป็นการระเหิด หรือ ดึงเอาไอน้ำแข็งออกจากผลิตภัณฑ์ เมื่อ Primary drying เสร็จสมบูรณ์ ไอน้ำแข็งจะระเหิดไปหมด หรืออาจมีความชื้นหลงเหลืออยู่ ซึ่งต้องเอาความชื้นนั้นออกโดยใช้ Secondary drying

- 3) Secondary drying เป็นกระบวนการลดความชื้นที่หลงเหลือจาก Primary drying และเพื่อเพิ่มความคงตัวของสารที่อาจมีความชื้นหลงเหลือจาก Primary drying

ก.1.3 เครื่องมือและระบบที่ใช้ในการทำ Freeze-drying

- 1) Low temperature condenser จะทำหน้าที่ดักจับไอน้ำในระบบ ไอน้ำที่อยู่เหนือผิวผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนตัวไปสู่พื้นที่ความดันต่ำ (low pressure area) คือบริเวณรอบๆผิว Condenser ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง -40°C ถึง -60°C แล้วแต่ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ อุณหภูมิช่วงนี้จะมีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการทำ Freeze drying ยังมีอุณหภูมิต่ำประสิทธิภาพยิ่งสูง เพราะความดันไอยิ่งต่ำ (ดังแสดงในตารางที่ ก.1) ทำให้ความดันไอของน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ยิ่งสูงการระเหิดจะยิ่งสูง

ตารางที่ ก.1 ค่า Temperature vs vapor pressure

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความดัน mm(HG)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความดัน mm(HG)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความดัน mm(HG)
0	4.579	-24	0.526	-56	0.01380
-2	3.880	-26	0.430	-60	0.00808
-4	3.280	-28	0.351	-64	0.00464
-6	2.765	-30	0.2859	-68	0.00261
-8	2.326	-32	0.2318	-70	0.00194
-10	1.950	-34	0.1873	-72	0.00143
-12	1.632	-36	0.1507	-76	0.00077
-14	1.361	-40	0.0966	-80	0.00040
-16	1.132	-44	0.0609	-84	0.00020
-18	0.939	-48	0.0378	-88	0.00010
-20	0.776	-50	0.0269	-92	0.000048
-22	0.640	-52	0.0230	-96	0.000022

- 2) High vacuum ปัมที่มีประสิทธิภาพจะลดความดันในระบบทำให้เกิดสูญญากาศเพียงพอความดัน (0.1 mmHg) เพื่อเร่งการระเหิดของน้ำแข็งและกำจัดอากาศหรือ Non condensable gas ออกไป ลดแรงเสียดทานในระบบ ช่วยให้การเคลื่อนที่ของ Water vapor เกิดได้ดี และยังเป็น การป้องกันการเกิด Oxidation ระหว่าง Freeze drying และช่วงในการเก็บรักษาด้วย โดยปกติ High vacuum ประมาณ 5-50 millitorr (0.005-0.05 mmHg) จะมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ในเครื่องมือ Freeze dryer ทั่วๆ ไปจะสามารถลด Pressure เหลือประมาณ 100-120 millitorr หรือต่ำกว่า ซึ่งนับว่าเพียงพอ (Int. Unit 1 millitorr or micron = 10^{-3} torr = 10^{-3} mmHg)
- 3) Controlled heat to product ผลิตภัณฑ์จะถูกทำให้ร้อนเพื่อช่วยให้การระเหิดเกิดสม่ำเสมอ โดยต้องควบคุมอุณหภูมิให้เพียงพอที่จะผลักดันไอน้ำออกไปโดยที่น้ำแข็งไม่ละลาย โดยทั่วไปจะควบคุมอุณหภูมิ ให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งเล็กน้อย เมื่อน้ำแข็งระเหิดออกไปเกือบหมดแล้วจึงค่อยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนถึง 20°C หรือ 30°C

ก.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction : XRD)

ก.2.1 บทนำ

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction; XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลสารประกอบอินทรีย์ ดีเอ็นเอ โปรตีน รวมถึงวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น

ผลึกจะถูกส่องด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งจะถูกหักเหไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึก และจะถูกบันทึกมุมหักเห ระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg ผลึกแต่ละชนิดจะหักเหรังสีเอกซ์ต่างกัน เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ ตั้งแต่สารประกอบอินทรีย์ ดีเอ็นเอ โปรตีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ จนถึงวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น

XRD เป็นเทคนิคที่ใช้เสริมเทคนิค spectroscopic อื่นๆ เช่น เทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (x-ray fluorescence; XRF) ซึ่งจะสามารถบอกได้ว่าวัสดุเหล่านั้นประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง ในขณะที่ XRD นั้นจะช่วยให้สามารถรู้ได้ว่าธาตุเหล่านั้นมีองค์ประกอบเป็นอย่างไร

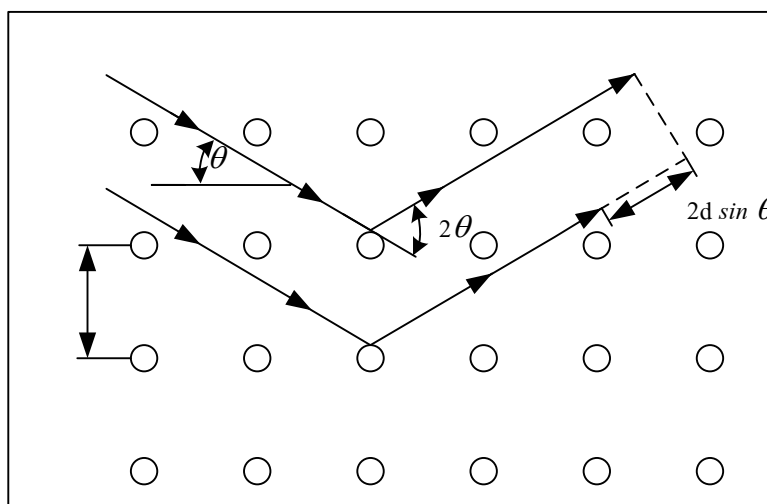
ก.2.2 ความเป็นมา

โครงสร้างผลึกโปรตีนชนิดแรกที่ใช้เทคนิค XRD ในการตรวจวัด คือ สเปิร์มของปลาฉลาม (myoglobin) ซึ่งถูกค้นพบโดย Max Perutz และ Sir John Crowder Kendrew เมื่อปี ค.ศ. 1958 ทำให้พวกเขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมี งานวิจัยนี้ได้รับแรงบันดาลใจจากการสังเกตเห็นผลึกของ myoglobin ในคราบเลือดที่แห้งกรังบนดาบฟ้าของเรือล่าปลาวาฬ

การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยรังสีเอ็กซ์สามารถแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของดีเอ็นเอมีลักษณะเป็นเกลียวคู่ นอกจากนี้ เทคนิคนี้ยังใช้ในการวิเคราะห์การออกฤทธิ์ของยา เช่น ยาต้านมะเร็ง ว่ามีกลไกการทำงานต่อโมเลกุลเป้าหมายได้อย่างไร

ก.2.3 หลักการพื้นฐานและวิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นจะใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึก วัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ อะตอมภายในผลึกจะเรียงตัวเป็นระนาบขนานกัน โดยแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ผลึกแต่ละชนิดจะมีระยะห่าง d แตกต่างกัน ในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ θ รังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) โดยมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ ก.1 ซึ่ง ความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ถูกเสนอในรูปสมการที่ ก.1



รูปที่ ก.1 หลักการของ Bragg's Law

$$n\lambda = 2d\sin \theta$$

(ก.1)

โดยที่ n คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (เท่ากับ 1, 2, 3,..., λ)

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก และ

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

ในขั้นตอนแรกนั้นต้องทำการปลูกผลึกที่สนใจแล้วนำผลึกที่ได้ไปแช่ในโตรเจนเหลว ผลึกเพื่อลด Radiation damage ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างทดลองและลดการขึ้นลงของอุณหภูมิภายในผลึก ผลึกจะถูกวางในเครื่อง Diffractometer แล้วฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ รังสีที่ถูกเลี้ยวเบนจะถูกบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มหรือคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จะถูกรวบรวมแล้วนำมาสร้างเป็นแผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นจะคอมพิวเตอรืปรับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่ง เทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเข้มที่มุมต่างๆ จะถูกนำมาพล็อตเป็นกราฟที่เรียกว่า Diffractogram ซึ่งแต่ละพีคที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิด วิธีการนี้สามารถศึกษาทั้งคุณสมบัติด้านกายภาพ เคมี และคุณสมบัติเชิงกลอื่นๆ

ก.2.4 เทคนิคของ XRD

เทคนิคที่ใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

- 1) Single-crystal methods วิธีนี้ใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างอะตอม (ความสมมาตร ตำแหน่ง ช่องว่าง เป็นต้น) ซึ่งวิธีการดั้งเดิมนั้นจะใช้ผลึกติดอยู่กับที่ และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เมื่อฉายลำรังสีให้ตกลงบนผลึกเดี่ยว จะทำการบันทึกผลการเลี้ยวเบนลงบนแผ่น Photographic plate ซึ่งใช้ในการบันทึกค่าความเข้มและตำแหน่งของรังสีที่เกิดการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันจะทำให้ผลึกเกิดการหมุนและอาศัยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีของกล้องช่วยให้สามารถตรวจวัดปริมาณของรังสีที่เลี้ยวเบนได้ดีกว่าวิธีการดั้งเดิม วิธีการนี้จะใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวแต่อาศัยการเปลี่ยนมุม θ โดยการเคลื่อนที่ของผลึกซึ่งอยู่บนแท่นหมุน แล้วใช้ Diffractometer และคอมพิวเตอร์ในการเก็บรวบรวมและจัดการข้อมูล ซึ่งจะให้ผลที่มีความแม่นยำมากกว่า
- 2) Powder methods เบื้องต้นแล้ววิธีการนี้จะใช้ในการระบุแร่ธาตุ โดยจะใช้บอริกซ์ประกอบและตรวจวัดความสัมพันธ์ของธาตุที่มีอยู่ในสารผสม เช่นเดียวกับ Single-crystal methods คือ แต่เดิมนั้นจะใช้เทคนิคของการถ่ายภาพในการบันทึกข้อมูลการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า X-ray powder

diffractometer และยังสามารถศึกษาผลึกที่ไม่สามารถใช้วิธีการแรกในการตรวจวัดได้

ก.2.5 X-ray powder diffractometer

แหล่งกำเนิดและเครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ในปัจจุบันนี้มีข้อจำกัดที่สามารถตรวจวัดได้เฉพาะความเข้มของโฟตอนที่เกิดการเลี้ยวเบนเท่านั้น แต่ไม่สามารถเฟสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของข้อมูลรูปร่างที่แท้จริงของความหนาแน่นอิเล็กตรอน ถ้าใช้เครื่องมือนี้ทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ นอกจากจะสามารถแยกแยะธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง X-ray powder diffractometer (XPRD) ยังเป็นวิธีการเดียวที่สามารถแยกแยะความแตกต่างของเฟสของอะตอมที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในตัวอย่างได้ จึงเป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพ

ก.2.6 การทำงานของ XRPD

เทคนิค X-ray powder diffractometry นั้นจะใช้ลำรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว ฉายลงบนตัวอย่างที่ถูกวางอยู่บนแท่นหมุนเป็นมุม θ ระหว่าง $0-90^\circ$ รังสีที่เลี้ยวเบนจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดแล้วบันทึกบน inked strip chart เครื่องตรวจวัดจะหมุนไปพร้อมกับแท่นหมุน แต่จะหมุนเป็นมุม 2θ และ Strip chart จะหมุนไปพร้อมกับแท่นหมุนและเครื่องตรวจวัดด้วยความเร็วคงที่ เพื่อบันทึกค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ แล้วนำมาพล็อตกราฟ Diffractogram พิกัดแต่ละพิกัดบน Diffractogram จะเป็นลักษณะเฉพาะของเฟสอะตอมต่างๆ จากความสัมพันธ์ของสมการของ Bragg จะสามารถหาค่า d ของแต่ละพิกัดแล้วนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่มีอยู่ เช่น JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) เป็นต้น ก็จะหาปริมาณสัมพัทธ์ของเฟสที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้

ก.2.7 การเกิดรังสี X-ray

ขั้นตอนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์จะถูกสร้างขึ้นภายในหลอดปิดซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ (filament) ที่อยู่ภายในหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง ทำให้เคลื่อนที่เส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดด้วยความเร็วสูงเข้าชนขั้วแอโนด ซึ่งโดยทั่วไปทำจากโลหะทองแดง อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้หัวในสุด (K-shell) ของอิเล็กตรอนทองแดงหลุดออกไปจึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้น เป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L- และ M-shell) เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น โดยการคายรังสีเอ็กซ์ออกมา รังสีเอ็กซ์ที่คายออกมาจะผ่านออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ไปยังสารตัวอย่าง และรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างจะถูกตรวจจับด้วย อุปกรณ์ตรวจจับ รังสีเอ็กซ์ (detector)

ก.2.8 ข้อดีและข้อจำกัด

เทคนิค XRPD นั้นเป็นเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงาน สามารถใช้งานได้ง่าย ใช้ปริมาณตัวอย่างเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 2 มิลลิกรัม) แต่เดิมนั้นแม้ว่าเทคนิคนี้จะมีข้อดีหลายอย่าง แต่ด้วยผลข้อมูลที่ช้าและในการใช้งานจำเป็นต้องอาศัยความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน ทำให้เทคนิคนี้ยังไม่ค่อยเป็นที่แพร่หลายมากนัก แต่อย่างไรก็ตาม ใน 2-3 ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาด้านการออกแบบเครื่องมือให้ได้ผลข้อมูลที่รวดเร็วขึ้นและใช้งานได้ง่ายขึ้น และด้วยเทคโนโลยีทางด้าน Solid-state ทำให้เครื่องตรวจวัดไม่ต้องการการบำรุงรักษามากนัก ทำให้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางมากขึ้น ตั้งแต่การใช้งานในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัย บริษัท การควบคุมขั้นตอนการผลิต รวมไปถึงช่วยให้ผู้ผลิตต่างๆ ได้รับความรู้ความเข้าใจในกระบวนการผลิตมากขึ้น

ก.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)

ก.3.1 หลักการทำงาน

รูปที่ ก.2 แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องมือดังกล่าวมีหลักการทำงานคือ ในสภาพสุญญากาศ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าขนาด 10 – 40 kV ผ่านไปยัง Filament จะทำให้ Filament ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกบังคับให้รวมตัวเป็นลำอิเล็กตรอนที่มีความเข้มสูงและความเร็วคงที่ โดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ Condenser lens และ Objective lens ไปตกลงบนตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบตัวอย่างนั้นจะถูกสนามแม่เหล็กดึงให้ส่องกราดไปบนตัวอย่างในลักษณะของ Raster ขณะที่ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนผิวตัวอย่าง จะมีอิเล็กตรอนสะท้อนกลับขึ้นมา อิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับดังกล่าวจะถูกตรวจจับด้วย Detector และแปลงเป็นสัญญาณ Video ส่องกราดไปบนจอ Cathode ray tube (CRT) สัมพันธ์กับลำอิเล็กตรอนที่ส่องกราดบนตัวอย่าง จึงทำให้เห็นภาพผิวของตัวอย่างที่ลำอิเล็กตรอนส่องกราดอยู่ขณะนั้น



(a)



(b)

รูปที่ ก.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ก.4 Mercury intrusion porosimetry

ก.4.1 หลักการทำงาน

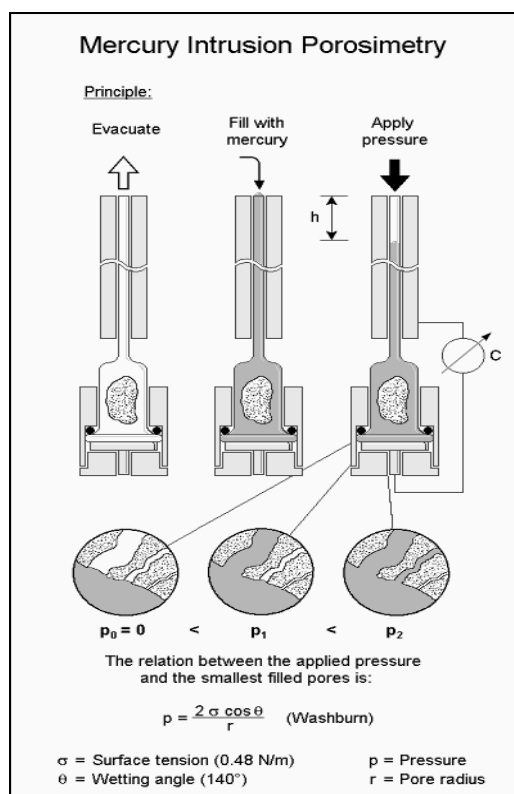
การวัดขนาดของช่องว่างในสารพูนด้วยเครื่อง Mercury intrusion porosimeter (รูปที่ ก.3) สามารถวัดขนาดช่องว่างของตัวอย่างที่มีขนาดตั้งแต่ 0.5 มิลลิเมตร ถึง 3.5 นาโนเมตร รายละเอียดของเครื่องมือ แสดงในตารางที่ ก.2 ตัวอย่างชิ้นงานจะถูกใส่ในช่องใส่ตัวอย่าง และทำให้เป็นสุญญากาศ เริ่มต้นปรอทจะยังไม่สามารถเข้าไปในช่องว่างของตัวอย่างในสภาวะปกติเนื่องจากปรอทมีแรงตึงผิวสูง แต่ปรอทจะสามารถเข้าไปในช่องว่าง เพิ่มความดัน (สูงสุดถึง 60000 บาร์) จนทำให้ปรอทสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างขนาดเล็กๆ ได้ ดังนั้นถ้าต้องการวัดขนาดช่องว่างที่เล็กลง จึงต้องใช้ความดันเพิ่มขึ้นดังรูปที่ ก.4 บันทึกความดันและปริมาตรของปรอทที่หายไป



รูปที่ ก.3 เครื่อง Mercury intrusion porosimeter (MIP)

ตารางที่ ก. 2 รายละเอียดการใช้งานเครื่อง MIP

Pore Size Range	0.0035 - 500 microns
Surface Area Range	1 - 100 m ² /g
Sample Size	2.7 cm H x 2 cm D
Pressure Range	Vacuum to 60,000 PSI
Pressurizing Gas	Air or isopropyl alcohol
Pressure Transducer Range	0 - 60,000 PSI
Resolution	1 in 20,000
Accuracy	0.25% of reading
Power Requirements	110/120 VAC, 50/60 Hz (Others available)
Dimensions	72" H x 30" W x 30" D
Weight	400 lbs



รูปที่ ก.4 หลักการทำงานของเครื่อง เครื่อง MIP

ภาคผนวก ข

ข้อบ่งชี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับประเทศ

1) สนธยา แพพัฒน์นัย และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2549). กำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11 (The 11th National Convention on Civil Engineering), GTE 008, เมอร์ลิน บีช รีสอร์ท จ. ภูเก็ต. 20-22 เมษายน 2549.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ

2) S. Horpibulsuk, R. Rachan, S. Papattanotai and T.S. Nagaraj. (2006). Analysis of Strength Development of Cement Stabilized Clay from Microstructural Considerations. International Symposium of Lowland Technology September 14-16 2006, Saga, Japan. (accepted for publication).

ประวัติผู้เขียน

นายสนธยา แพพัฒน์โนทัย เกิดเมื่อวันที่ 28 มีนาคม 2523 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี ศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2541 และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2545 ในระหว่างที่ทำการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา มีความสนใจทางด้านวิศวกรรมปฐพี จึงทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมปฐพี เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้ตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2546 จากการทำวิจัยทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจทางด้านการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเป็นอย่างดี และมีผลงานตีพิมพ์ 2 บทความ