



การปรับปรุงสมบัติของดินทุ้งกงด้วยยิปซัมเทียมผสมเถ้าใยปาล์มน้ำมัน
**Stabilization of Tungkong Soil with Flue Gas Desulfurization Gypsum
Composite Blending Oil Palm Fiber Ash**

ภักดี บัวจันทร์

Pakdee Bourjan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงสมบัติของดินทุ่งกงด้วยยิปซัมเทียมผสมเถ้าไพลล์น้ำมัน
ผู้เขียน นายภักดี บัวจันทร์
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณพล ตันนโยภาส)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณพล ตันนโยภาส)

.....
(ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม)

.....กรรมการ
(ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพุกภัย)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา (ธรณีเทคนิค)

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติของดินทุ่งกงด้วยยิปซัมเทียมผสมเถาไยปาล์มน้ำมัน
ผู้เขียน	นายภักดี บัวจันทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

ศึกษาทดสอบคุณลักษณะของดิน ทุ่งกงที่มียิปซัมเทียมและเถาไยปาล์มน้ำมัน เป็นตัวปรับปรุงในประเด็น อัตราส่วนผสม ความหนาแน่นรวม กำลังอัด และการรับแรงแบกทาน ทั้งสถานะไม่แช่น้ำและแช่น้ำ บางอัตราส่วน ได้ดำเนินการวัดต่อก่อนดินที่แทนที่ดิน ทุ่งกงบางส่วนด้วยยิปซัมเทียมในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักแห้งรวม นอกจากนี้ที่ยิปซัมเทียมอัตราส่วนร้อยละ 50 ได้แทนบางส่วนด้วยเถาไยปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 10 และ 15 ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อ น้ำหนักแห้งรวม ต่างกันตั้งแต่ 0.30 0.40 และ 0.50 ก้อนตัวอย่างยังได้บ่ม ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน เตรียมก้อนตัวอย่างดินผสมยิปซัมเทียมรูปทรงกระบอก ขนาด 39×78 มม. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของก้อนตัวอย่างด้วยเทคนิครังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ และโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการ ทดสอบบ่งว่ากำลังอัด แแกนเดียว กำลังแรงแบกทาน สภาพแบบไม่แช่น้ำ และแบบแช่น้ำ ของก้อนตัวอย่างดิน ทุ่งกงผสมยิปซัมเทียมเพิ่มขึ้น ตามส่วนผสม ของยิปซัมเทียม อัตราส่วนน้ำ ต่อ น้ำหนักแห้งรวม ทำให้กำลังอัดแแกนเดียวและการรับแรงแบกทาน การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นรวม แปรผกผันกับปริมาณความชื้น ส่วนการก่อตัวเพิ่มขึ้น จากมุมมองพฤติกรรมเชิงกลการเติมยิปซัมเทียมร้อยละ 45 และเถาไยปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ในดินทุ่งกง บ่มเป็นเวลา 28 วัน ให้กำลังอัดสูงสุดทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำคือ 24.9 และ 29.86 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนการรับแรงแบกทานแบบแช่น้ำได้สูงสุดร้อยละ 98.88 การบวมตัวอยู่ในช่วงร้อยละ -0.01 ถึง 0.07 ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงว่าการปรับปรุงดินทุ่งกงสามารถเกี่ยวข้องกับผลสมบัติเชิงกล ซึ่งผลทดลองแนะว่าเถาไยปาล์มน้ำมันสามารถผสมกับยิปซัมเทียมในปริมาณน้อย (ร้อยละ 5) สำหรับใช้ทำเป็นดินคันทาง และดินรองพื้นทางในโครงสร้างถนน

การจัดทำสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ ได้แก่ กำลังอัดแแกนเดียวและโมดูลัสยืดหยุ่นกับตัวแปรตามปริมาณยิปซัมเทียม ปริมาณน้ำ ปริมาณเถาไยปาล์มน้ำมัน และอายุบ่ม

ผลวิเคราะห์บ่งว่าการแปรผันของปฏิกิริยาไฮเดรชันและกำลังอัดแกนเดี่ยวของดินทุ้งกงที่ปรับปรุง
กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมได้ความสัมพันธ์ที่ดีสำหรับวัสดุก่อสร้างทาง

คำหลัก: ดินทุ้งกง ยิปซัมเทียม เถ้าไฮปาล์มน้ำมัน การปรับปรุงดิน วัสดุก่อสร้างทาง
กำลังอัดแกนเดี่ยว

Thesis Title Stabilization of Tungkong Soil with Flue Gas Desulfurization
Composite Blending Oil Palm Fiber Ash

Author Mr. Pakdee Bourjan

Major Program Civil Engineering

Academic Year 2011

ABSTRACT

An experimental characteristic of Tungkong soil (TKS) with flue gas desulphurization (FGD) and oil palm fiber ash (OPFA) as the stabilizer were investigated in terms of mix proportions, bulk density, unconfined compressive strength (UCS) and California bearing ratio (CBR) in unsoaked and soaked conditions. Measurements were carried out in a soil-cement of with 20%, 30%, 40% and 50% of FGD ratios by total dry weight that were partially replaced by TKS. Moreover, at 50%FGD was partially replaced of 5, 10 and 15% of OPFA with different water ratios of 0.30, 0.40, and 0.50 by total dry weight. The specimens were then assessed by performing mechanical tests on samples curing at ambient temperature of 1, 7 and 28 days. Soil-FGD cylindrical specimens were cast to test in size of 39×78 mm. Chemical analysis of the specimens using X-Ray Florescence (XRF) technique and microstructure through Scanning Electron Microscope (SEM) was determined.

Laboratory test results revealed that UCS, CBR in unsoaked and soaked of TKS partially samples were replaced with the FGD specimens were increased depend upon mix proportions of FGD, and water ratios to total dry weight ratio. As a consequent, the UCS, CBR, water absorption and bulk density inversed to proportion of moisture content. From the point of view in mechanical performance, adding 45% of FGD and 5% of OPFA into TKS and cured at 28-d, highest strength levels of UCS in soaked and unsoaked conditions of 24.9 and 29.86 ksc was achieved, respectively. The maximum CBR value of OPFA-FGD-TKS specimen in soaked was obtained to 98.88% and swell behavior was in the range of 0.01% to 0.07%. The XRD and SEM analysis showed that TKS modifications can be related to the engineering properties results. The recommendation was that the OPFA could possibly be blended in small amounts (5%) with FGD for use in base and subbase course in highway structure. Correlations for unconfined compressive

strength and secant modulus as functions of FGD, water, OPFA contents and curing time have been established. The results also indicated that the well established variations of hydration reaction and unconfined compressive strength of stabilized TKS with water/mixture ratios are valid for highway materials.

Keywords: Tungkong soil, Flue gas desulphurization composit, Oil palm fiber ash, Soil stabilization, Construction sub base, Unconfined compressive strength.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. วรรณกรรมปริทัศน์	5
2.1 การปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง	5
2.2 การปรับปรุงคุณภาพของดิน โดยวิธีทางเคมี	8
2.3 การปรับปรุงดินโดยเติมสารเคมี	9
2.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	11
2.3.2 ปูนขาว	12
2.3.3 เถ้า	16
2.3.4 ขางมะตอย	19
2.4 สารปอซโซลาน	19
2.4.1 เถ้าไพล่าลุ่มน้ำมัน	22
2.4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าไพล่าลุ่มน้ำมัน	23
2.4.3 ปฏิกริยาของปอซโซลานในดิน	24
2.5 ยิปซัมเทียม	25
2.6 กระบวนการผลิตยิปซัมเทียมของโรงไฟฟ้ากระบี่	28
2.7 สมบัติดัชนีและการจำแนกชนิดของดิน	30
2.7.1 สมบัติดัชนี	30
2.7.2 การจำแนกชนิดของดิน	31
2.8 สมบัติกำลังของดิน	33
2.9 ระเบียบวิธีสถิติที่ใช้	35

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
สารบัญ	
2.9.1 สถิติพื้นฐาน	36
2.9.2 การวิเคราะห์การถดถอย	37
2.9.3 ค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์งานดิน	38
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	41
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	41
3.2 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ	42
3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ	45
3.3.1 การทดสอบทางกายภาพของดินทุ้งกง	45
3.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินทุ้งกง	46
3.4 การทดสอบดินทุ้งกงกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยขี้ปศุสัตว์และ เถ้าไพลล์น้ำมัน	46
3.4.1 การทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยวของดินทุ้งกงกรณีปรับปรุงคุณภาพ	46
3.4.2 การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) ของดินทุ้งกง กรณีปรับปรุงคุณภาพ	46
3.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินทุ้งกงกรณีปรับปรุงคุณภาพ	47
3.4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของดินทุ้งกงกรณีปรับปรุงคุณภาพ	47
4. ผล การทดสอบและอภิปรายผล	48
4.1 สมบัติของดินทุ้งกงกรณีที่ยังมิได้ปรับปรุงคุณภาพ	48
4.1.1 สมบัติทางกายภาพของดินทุ้งกง	48
4.1.2 สมบัติทางวิศวกรรมของดินทุ้งกง	49
4.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินทุ้งกง	49
4.2 สมบัติของขี้ปศุสัตว์และเถ้าไพลล์น้ำมัน	52
4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของขี้ปศุสัตว์และเถ้าไพลล์น้ำมัน	52
4.2.2 การบำบัดขี้ปศุสัตว์ใช้ทดลอง	53
4.2.3 การจำแนกขี้ปศุสัตว์และเถ้าไพลล์น้ำมันตามประเภทสารปอชโซลาน	54
4.2.4 โครงสร้างจุลภาคของดินทุ้งกงขี้ปศุสัตว์และเถ้าไพลล์น้ำมัน	54

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
สารบัญ	
4.3 ระยะเวลาการก่อตัว	55
4.3.1 ระยะเวลาการก่อตัวของดินทุ่งงแทนที่ด้วยยิปซัมเทียม	55
4.3.2 ระยะเวลาการก่อตัวของดินทุ่งงกรณีที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียม และเถ้าไพล่าลมน้ำมัน	60
4.3.3 อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งงผสมยิปซัมเทียม	63
4.4 ความหนาแน่นแห้งของดินทุ่งงที่ปรับปรุง	68
4.4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำมีต่อความหนาแน่นแห้ง	71
4.5 กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินทุ่งงที่ปรับปรุง	75
4.5.1 ผลกระทบของยิปซัมเทียมและปริมาณความชื้นมีต่อกำลังอัดแกนเดี่ยว	76
4.5.2 ผลกระทบของยิปซัมเทียมและเถ้าไพล่าลมน้ำมัน	80
4.5.3 ผลกระทบของปริมาณยิปซัมเทียมและเถ้าไพล่าลมน้ำมันต่อค่าโมดูลัส ยืดหยุ่น	83
4.5.4 ผลกระทบของปริมาณยิปซัมเทียมและเถ้าไพล่าลมน้ำมันต่อค่าความเครียด ที่จุดพิบัติ	86
4.6 แคลิฟอร์เนีย แบริงเรโซของดินทุ่งงกรณีปรับปรุงคุณภาพ	89
4.7 องค์ประกอบแร่ในดินทุ่งงที่ปรับปรุง	91
4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของดินทุ่งงที่ปรับปรุง	92
4.9 การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยสหสัมพันธ์ของตัวแปร	93
5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	99
5.1 สรุปผลการศึกษา	99
5.2 ข้อเสนอแนะ	100
บรรณานุกรม	101
ภาคผนวก	110
การเผยแพร่ผลงานทางวิทยานิพนธ์	132
ประวัติผู้เขียน	147

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่ต่างชนิดกัน	6
2.2 วิธีปรับปรุงคุณภาพของดินที่แปรผันตามขนาดเม็ดดิน	10
2.3 แนวทางการเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิด	11
2.4 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันจากหลายคณะวิจัย	24
2.5 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของดินประเภทต่างๆ	31
2.6 การจำแนกดินและการใช้ตามซี บี อาร์	35
2.7 ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์	40
3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา	43
4.1 สมบัติทางกายภาพและ สมบัติทางวิศวกรรมของดินทุ่งกง	50
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินทุ่งกง ยิปซัมเทียม และเถ้าปาล์มน้ำมัน	51
4.3 การจำแนกยิปซัมเทียมและเถ้าปาล์มน้ำมัน	54
4.4 ระยะเวลาการก่อตัวของดินทุ่งกง	57
4.5 อุณหภูมิสูงสุดในขณะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของดินทุ่งกง	67
4.6 สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของดินทุ่งกง ที่อายุบ่ม 1 วัน	77
4.7 สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของดินทุ่งกง ที่อายุบ่ม 7 วัน	78
4.8 สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของดินทุ่งกง ที่อายุบ่ม 28 วัน	79
4.9 ค่า CBR และการบวมตัวของดินทุ่งกงที่ปรับปรุง	89
4.10 ความสัมพันธ์ของค่าหน่วยน้ำหนักแบบแช่น้ำกับค่าปัจจัยต่างๆ	94
4.11 ความสัมพันธ์ของค่าหน่วยน้ำหนักแบบไม่แช่น้ำกับค่าต่างๆ	94
4.12 ความสัมพันธ์ของค่า UCS แบบแช่น้ำกับค่าปัจจัยต่างๆ	95
4.13 ความสัมพันธ์ของค่า UCS แบบไม่แช่น้ำกับค่าปัจจัยต่างๆ	95
4.14 ความสัมพันธ์ของค่า โมดูลัสยืดหยุ่นแบบ Unsoak กับค่าปัจจัยต่างๆ	96
4.15 ความสัมพันธ์ของค่า โมดูลัสยืดหยุ่นแบบ Soak กับค่าปัจจัยต่างๆ	96
4.16 ความสัมพันธ์ของค่าความเครียดแบบ Unsoak กับค่าปัจจัยต่างๆ	97
4.17 ความสัมพันธ์ของค่าความเครียดแบบ Unsoak กับค่าปัจจัยต่างๆ	97

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 การทรุดตัวของถนนบนชั้นดินเหนียวอ่อน	2
1.2 การวิบัติของถนนบนชั้นดินเหนียวอ่อน	3
2.1 การเกาะตัวของสาร CSH ในโครงสร้างดินเหนียวผสมปูนขาว	14
2.2 ระบบในโรงไฟฟ้าช่วงกำจัดยิปซัมเทียม (ก) สายพานกรอง และ (ข) ตู้เก็บยิปซัมเทียม	30
2.3 แผนภาพระบบการจำแนกดินเอกภาพ	32
2.4 ภาพแสดงหน้าตัดมวลดินและการรับแรงของมวลดิน	33
2.5 เครื่องมือทดสอบแรงอัดแกนเดียว	34
3.1 บ่อดินยืมแห่งหนึ่งในตำบลทุ่งกง	41
3.2 ลักษณะยิปซัมเทียม (ก) ลักษณะเถ้าไยปาล์มน้ำมัน (ข)	42
3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ	42
3.4 ขั้นตอนการหาส่วนผสมยิปซัมเทียมแทนที่ดินทุ่งกง	43
3.5 ขั้นตอนการแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมัน	44
3.6 (ก) แบบหล่อตัวอย่าง (ข) ตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (ค) ตัวอย่างที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก แผ่นอลูมิเนียมและบรรจุถุงพลาสติก (ง) การเก็บตัวอย่างบ่มในภาชนะที่อุณหภูมิห้อง	45
4.1 การกระจายตัวของเม็ดดินด้วยวิธี Laser particle size analysis	49
4.2 ลายเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของยิปซัมเทียม	53
4.3 ภาพถ่ายจุลภาคอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด	56
4.4 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด	56
4.5 พฤติกรรมการก่อตัวของดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยยิปซัมเทียม ร้อยละ 20	58
4.6 พฤติกรรมการก่อตัวของดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยยิปซัมเทียม ร้อยละ 30	58
4.7 พฤติกรรมการก่อตัวของดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยยิปซัมเทียม ร้อยละ 40	59
4.8 พฤติกรรมการก่อตัวของดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยยิปซัมเทียม ร้อยละ 50	59

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.9	อิทธิพลของยิปซัมเทียมและอัตราส่วนน้ำผสมส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของดินทุ่งกง	60
4.10	พฤติกรรมกรรมการก่อตัวของดินทุ่งกงแทนที่ด้วยยิปซัมเทียม ร้อยละ 45	61
4.11	พฤติกรรมกรรมการก่อตัวของดินทุ่งกงแทนที่ด้วยยิปซัมเทียม ร้อยละ 40	61
4.12	พฤติกรรมกรรมการก่อตัวของดินทุ่งกงแทนที่ด้วยยิปซัมเทียม ร้อยละ 35	62
4.13	อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำมีต่อการก่อตัวของดินทุ่งกง	62
4.14	อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยยิปซัมเทียม ร้อยละ 20	63
4.15	อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยยิปซัมเทียม ร้อยละ 30	64
4.16	อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยยิปซัมเทียม ร้อยละ 40	64
4.17	อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยยิปซัมเทียม ร้อยละ 50	65
4.18	อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยยิปซัมเทียม	65
4.19	อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งกงแทนที่ด้วยยิปซัมเทียม และเถ้าไพล์น้ำมัน	66
4.20	ผลกระทบของอัตราส่วนยิปซัมเทียมปรับปรุงดินที่มีต่อความหนาแน่นแห้งไม่แช่น้ำที่ อายุบ่ม 1 วัน	68
4.21	ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าไพล์น้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียมปรับปรุงดินที่มีต่อความหนาแน่นแห้งไม่แช่น้ำ ที่อายุบ่ม 1 วัน	69
4.22	ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าไพล์น้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียมปรับปรุงดินที่มีต่อความหนาแน่นแห้งไม่แช่น้ำ ที่อายุบ่ม 7 วัน	69

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ผลกระทบของอัตราส่วนไถปาล์มน้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียมปรับปรุงดินที่มีต่อความหนาแน่นแห้งไม่แช่น้ำ ที่อายุบ่ม 7 วัน	70
4.24 ผลกระทบของอัตราส่วนยิปซัมเทียมปรับปรุงดินที่มีต่อความหนาแน่นแห้งไม่แช่น้ำ ที่อายุบ่ม 28 วัน	70
4.25 ผลกระทบของอัตราส่วนไถปาล์มน้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียมปรับปรุงดินที่มีต่อความหนาแน่นแห้งไม่แช่น้ำ ที่อายุบ่ม 28 วัน	71
4.26 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินปรับปรุงไม่แช่น้ำ	72
4.27 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินปรับปรุง อายุบ่ม 1 วัน	72
4.28 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินปรับปรุง อายุบ่ม 7 วัน	73
4.29 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินปรับปรุง อายุบ่ม 28 วัน	73
4.30 ผลกระทบของอายุบ่มที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินที่ปรับปรุงด้วยปริมาณน้ำ 30% ของน้ำหนักทั้งหมด	74
4.31 ผลกระทบของอายุบ่มที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินที่ปรับปรุงด้วยปริมาณน้ำ 40 % ของน้ำหนักทั้งหมด	74
4.32 ผลกระทบของอายุบ่มที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินที่ปรับปรุงด้วยปริมาณน้ำ 50 % ของน้ำหนักทั้งหมด	75
4.33 การพัฒนากำลั่งอัดของดินทุ่กงปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียม ที่อายุบ่ม (ก) 1 วัน (ข) 7 วัน และ (ค) 28 วัน	81
4.34 การพัฒนากำลั่งอัดของดินทุ่กงปรับปรุงด้วยไถปาล์มน้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียม	82
4.35 พฤติกรรม โมดูลัสยืดหยุ่นของดินทุ่กงที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำ	84

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 พฤติกรรมโมดูลัสยืดหยุ่นของดินตุงกงที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำ	85
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่จุดพิบัติกับอัตราส่วนยิปซัมเทียมแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำ	87
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่จุดพิบัติกับดินตุงกงผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียม	88
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของดินตุงกง	90
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุดินตุงกง	90
4.41 ลายเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของดินตุงกง	91
4.42 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าไยปาล์มน้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียม	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ถนนเป็นสิ่งก่อสร้างที่เป็นสาธารณูปโภคพื้นฐานของประเทศ ที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและการพัฒนาของประเทศชาติ เป็นสิ่งก่อสร้างที่สามารถช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆ ทั้งในการคมนาคมและขนส่งของประชาชนคนไทย และเพื่อนำความเจริญจากชุมชนเมืองสู่ชุมชนท้องถิ่นต่างๆ นอกจากนี้ถนนยังมีความจำเป็นต่อระบบเศรษฐกิจ การขยายตลาดแรงงาน การเพิ่มการกระจายรายได้ ความมั่นคงและการพัฒนาท้องถิ่นให้มีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ประเทศชาติมีความมั่นคงทางเศรษฐกิจและสังคมที่ยั่งยืน

ถนนจึงนับเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่อชุมชนอย่างมาก ความสำคัญในการพัฒนาและแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อชุมชนและเป็นการบริการชุมชนทางตรงและทางอ้อมเพื่อนำไปสู่การพัฒนาศักยภาพและการแก้ปัญหาของชุมชนในทุกระดับ ตั้งแต่ระดับท้องถิ่นจนถึงระดับประเทศ ถนนที่มีคุณภาพดีย่อมทำให้การคมนาคมมีความคล่องตัว ทำให้เกิดการขยายตัวทางเศรษฐกิจ การท่องเที่ยว ช่วยประหยัดพลังงานน้ำมันซึ่งมีราคาแพงขึ้นทุกวัน และยังช่วยสนับสนุนการขยายตัวของสังคมเมืองสู่สังคมชนบท เกิดการพัฒนาเศรษฐกิจแบบยั่งยืน และลดการเกิดอุบัติเหตุขณะขับขี่ยานพาหนะเนื่องจากถนนไม่มีคุณภาพหรือความชำรุดของถนน

ในการก่อสร้างถนนนั้น จำเป็นต้องมีการสำรวจสมบัติดิน เพื่อหาแหล่งวัสดุที่มีคุณภาพดีเพื่อใช้ในการก่อสร้าง แหล่งวัสดุที่ดีจึงจำเป็นอย่างยิ่งและเป็นสิ่งสำคัญมาก ถ้าแหล่งวัสดุที่มีคุณภาพดีอยู่พื้นที่ใกล้เส้นทางที่ทำการก่อสร้าง จะเป็นการสามารถประหยัดเงินงบประมาณไปได้มาก เนื่องด้วยจะช่วยลดต้นทุนจากค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ซึ่งจะเป็นการช่วยประหยัดพลังงานไปด้วย ดังนั้นในการสำรวจหาแหล่งวัสดุจึงมีการพยายามหาแหล่งวัสดุที่มีคุณภาพดีที่สุดและใกล้ที่สุดมาใช้ในการก่อสร้าง แต่ปัจจุบันการพัฒนาเศรษฐกิจและโครงสร้างพื้นฐานของประเทศมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วมาก เพื่อรองรับการขยายตัวของเศรษฐกิจของประเทศ การก่อสร้างล้วนทำให้มีการใช้ วัสดุจากธรรมชาติมากขึ้น จนหาวัสดุที่ได้มาตรฐานในการก่อสร้างยากหรือห่างไกลจากแหล่งก่อสร้าง ดินที่มีคุณภาพดีเหมาะสมจะต้องสามารถรับน้ำหนักได้ดี บดอัดแน่นได้ง่ายและมีความแข็งแรงทนทาน แต่ดินคันทางในบางที่ ที่มีคุณภาพด้อยกว่ามาตรฐานและรับกำลังได้น้อย (รูปที่ 1.1) ซึ่งจำเป็นจะต้องหาวัสดุจากแหล่งอื่นที่มีคุณภาพมาทดแทนวัสดุที่ด้อยคุณภาพ การวิจัยนี้จึงสังเกตเห็นความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาอย่างจริงจัง และเห็น

ความสำคัญของวัสดุที่มีคุณภาพในธรรมชาติซึ่งเริ่มน้อยลง การปรับปรุงคุณภาพดินที่มีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานให้สามารถรับกำลังเพิ่มมากขึ้นนั้น เป็นแนวทางหนึ่งในการลดการทำลายแหล่งวัสดุธรรมชาติลงได้ และเพื่อเป็นฐานข้อมูลหรือองค์ความรู้ให้กับวิศวกรและผู้เกี่ยวข้องได้นำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาอ้างอิงได้อย่างถูกต้องและลดต้นทุนในการก่อสร้าง



รูปที่ 1.1 การทรุดตัวของถนนบนชั้นดินเหนียวอ่อน



รูปที่ 1.2 การวิบัติของถนนบนชั้นดินเหนียวอ่อน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาสมบัติของดินทุ่งกง ยิปซัมเทียม และเถ้าไพล่ามน้ำมัน
2. เปรียบเทียบกำลังของดินเดิมกับดินที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียม และเถ้าไพล่ามน้ำมัน
3. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของดินทางที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียม
4. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังอัดแกนเดียว ค่า CBR กับ ปริมาณยิปซัมเทียม อายุการบ่ม ปริมาณความชื้นของดินที่ปรับปรุง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เก็บตัวอย่างดินจากบ่อขี้มในตำบลทุ่งกง อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี
2. ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี ของดินทุ่งกง ยิปซัมเทียมและเถ้าไพล่ามน้ำมัน
3. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) และการตรวจชนิดแร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) หลังการปรับปรุงคุณภาพเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดินซีเมนต์ (ดินผสมยิปซัมเทียมและเถ้าไพล่าม) ที่อัตราส่วนผสมที่ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุด

4. ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compression Strength ,UCS) แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak) และแบบแช่น้ำ (Soak) ที่อายุ ทุกอัตราส่วนผสม

5. ทำการทดสอบกำลังแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (California Bearing Ratio ,CBR) แบบแช่น้ำ (Soak) เฉพาะอัตราส่วนผสมที่ให้กำลังอัดแกนเดี่ยวสูงสุด

6. วิเคราะห์เชิงสถิติด้วยสหสัมพันธ์ของตัวแปร กำลังอัดแกนเดี่ยว ค่า CBR ปริมาณยิปซัมเทียบ เถ้าไฮปาล์ม อายุการบ่ม และปริมาณความชื้น ในรูปสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Variable Regression)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสมบัติต่างๆของยิปซัมเทียบ
2. ลดของเสียจากการผลิตกระแสไฟฟ้า และเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจากการผลิตกระแสไฟฟ้าได้
3. เป็นการนำเอาเศษวัสดุที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมกระดาษซึ่งไม่มีมูลค่ามาใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรม
4. เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อช่วยในการออกแบบในการปรับปรุงคุณภาพดินที่ไม่ได้ตามมาตรฐานการออกแบบ
5. เป็นการเพิ่มวัสดุทดแทนทางเลือกใหม่ในงานวิศวกรรมการทาง

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

บทนี้ได้บรรจุเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับความรู้ที่นำมาใช้ในงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ อันประกอบด้วยสาระ การปรับปรุงคุณภาพของดินเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง การปรับปรุงดินโดยวิธีทางเคมี การปรับปรุงดินโดยวิธีการเติมสารเคมี สารปอซโซลาน ยิปซัมเทียม กระบวนการเกิดยิปซัมเทียมของโรงไฟฟ้ากระบี่ สมบัติดัชนีและการจำแนกดิน สมบัติกำลังและสถิติที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 การปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง

เมื่อดินในสถานที่ก่อสร้างหลวมหรือบดอัดได้สูงหรือเมื่อดินเหล่านั้นมีดัชนีความเหนียวชั้นไม่เหมาะสม สภาพซึมผ่านได้สูงมากเกินไป หรือสมบัติอื่นๆ ไม่เป็นที่พึงปรารถนาทำให้ดินเหล่านั้นไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในโครงการก่อสร้าง ดินควรได้รับการปรับปรุง (Bowles, 1984) เนื่องจากดินเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ดังนั้นสมบัติต่างๆ จึงมักแปรเปลี่ยนไปตามสภาพพื้นที่และชนิดของวัตถุต้นกำเนิด (Cernica, 1995) บางครั้งปัญหาเหล่านี้อาจจะหลีกเลี่ยงได้โดยการเปลี่ยนสถานที่ก่อสร้าง แต่หากไม่สามารถใช้วิธีดังกล่าวได้และจำเป็นต้องเผชิญกับปัญหาอย่างเช่นปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของดินเหล่านั้นแล้ว วิธีการปรับปรุงดินมีด้วยกันมากมาย ซึ่งแบ่งวิธีการปรับปรุงดินได้ดังนี้

- การปรับปรุงโดยทางกล (Mechanical Stabilization)
- การปรับปรุงโดยทางเคมี (Chemical Stabilization)
- การปรับปรุงโดยระบายน้ำ (Hydraulic Stabilization)
- การปรับปรุงโดยลดหรือเพิ่มอุณหภูมิ (Thermal Stabilization)
- การปรับปรุงโดยทางไฟฟ้า (Electrical Stabilization)

การปรับปรุงทางเคมีโดยเฉพาะด้วยปูนขาว เป็นวิธีการใช้กันอยู่ทั่วไปมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ อันเนื่องจากใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและราคาประหยัด พบว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงว่าเมื่อเติมปูนขาวให้แก่ดินเหนียวที่มีน้ำอยู่ เกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนแคตไอออน การจับกันเป็นก้อน (flocculation) และปฏิกิริยาปอซโซลาน

United States Air force (1966) ได้เสนอวิธีการปรับปรุงดิน โดยแบ่งตามขนาดและค่าดัชนีพลาสติก (plastic index) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 วิธีการปรับปรุงดินที่ต่างชนิดกัน

ชนิดดิน	วิธีการปรับปรุงส่วนมากมีประสิทธิภาพ
ดินเม็ดหยาบ (Coarse Granular)	การผสมเชิงกล (Mechanical Blending) ดิน-ยางมะตอย (Soil – Asphalt) ดิน-ปูนซีเมนต์ (Soil – Cement) ปูนขาว-เถ้าลอย (Lime - Fly Ash)
ดินเม็ดละเอียด (Fine Granular Soils)	การผสมเชิงกล การปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดิน-ยางมะตอย ปูนขาว-เถ้าลอย คลอไรด์ (Chloride)
ดินเหนียวพลาสติกต่ำ (Clays of Low Plasticity)	การบดอัด (Compaction) การปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตัวกั้นน้ำซึมทางเคมี (Chemical Water Proofers) การตัดแปรด้วยปูนขาว (Lime Modification)
ดินเหนียวพลาสติกสูง (Clays of High Plasticity)	การปรับปรุงด้วยปูนขาว (Lime Stabilization)

ดัดแปลงจาก United States Air Force (1966)

ในเบื้องต้นการปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวด้วยปูนขาวในปริมาณเพียงเล็กน้อยได้รับการยอมรับ จากรายงานผลการศึกษาในอดีต แสดงให้เห็นว่าเมื่อผสมปูนขาวลงในดินจะทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (optimum moisture content-OMC) พิกัดหดตัว (shrinkage limit) และความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้แนวโน้มการบวมตัว (swelling potential) พิกัดเหลว (liquid limit) ดัชนีพลาสติก (plasticity index) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry density) ของดิน ลดลง (Guney et al., 2007) ซึ่ง Bell (1996) พบว่าปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงดินอยู่ระหว่างร้อยละ 1 และ 3 ในขณะที่นักวิจัยอื่นๆ เสนอว่าปริมาณปูนขาวควรอยู่ระหว่างร้อยละ 2 กับ 3 โดยน้ำหนัก

ปูนขาวมีผลทำให้ดินเหนียวมีสภาพความเป็นพลาสติกลดลง (เนื่องจากลดพิกัดเหลวเพิ่มพิกัดพลาสติก) ดินที่ผสมปูนขาวในปริมาณน้อยทำให้กำลังสูงสุดน้อยกว่าดินที่ผสมปูน

ขาวในปริมาณมากกว่า (Bell, 1993) ซึ่งกำลังไม่ได้เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นกับปริมาณปูนขาว และในข้อเท็จจริงการเติมปูนขาวมากเกินไปกลับทำให้กำลังลดลง การลดลงของกำลังเพราะปูนขาวเองเป็นตัวลดการเสียดทานและการยึดเกาะ ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4.5 ถึง 8 แต่หากดินมีความเหนียวมากปริมาณปูนขาวก็เพิ่มมากขึ้นตาม เวลาการบ่มก็เป็นอีกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนขาว (Bell, 1993) ดินทุกชนิดมีความต้องการปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมต่างกัน จำนวนความต้องการปริมาณปูนขาวขึ้นอยู่กับระยะเวลาการบ่มปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมต่างกันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่าง ๆ กัน ดังนั้น ระยะเวลาบ่มแบบแช่น้ำที่ 7 วัน ใช้ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมร้อยละ 5 ดินชนิดเดียวกันหากบ่มในอากาศใช้เวลาบ่ม 28 วัน ใช้ปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมร้อยละ 8 (Atanur, 1973) การปรับปรุงด้วยปูนขาวหากใช้มากจะช่วยลดการบวมตัวและการขยายตัวในดินเหนียวลง (Dunn et al., 1980) สารปรับปรุงการขยายตัวของดินชนิดอื่นคือปูนซีเมนต์ ซึ่งประกอบด้วยออกไซด์ของแคลเซียม ซิลิกา อะลูมินาและเหล็ก การปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ก็คล้ายกับการปรับปรุงด้วยปูนขาวและให้ผลคล้ายกัน การเติมปูนซีเมนต์ลดการบวมตัวดัชนีพลาสติก และพิกัดเหลว การปรับปรุงเพื่อต้องการเชื่อมประสานระหว่างแคลเซียมซิลิเกตและอะลูมิเนตไฮดรอกไซด์และเม็ดดิน (Guney, 2007) การปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มกำลังดึง กำลังตัด สภาพความคงทน (durability) และสมบัติความแข็งแรง อาทิเช่น โมดูลัสและซีบีอาร์ การเติมปูนซีเมนต์ช่วยลดการซึมผ่านได้ของทรายและกรวดลงอย่างมาก ในขณะที่ทรายแป้ง ดินเหนียวปนทรายแป้ง (silty clays) และดินเหนียวล้วนแสดงการไหลซึมผ่านได้เพิ่มขึ้น (Lee et al., 1983) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ถือเป็นสารผสมเพิ่มทั่วไป ส่วนวัสดุผสมเพิ่มชนิดอื่นมีเป้าหมายเพื่อเป็นตัวประสานทำให้กำลังสูงขึ้น การอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านของน้ำลดลง (hydraulic conductivity) และยังลดการขยายตัวในดินเหนียว ปูนซีเมนต์สามารถผสมกับดินได้เกือบทุกชนิด ผลที่ได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตคุณภาพต่ำและมีราคาถูก ให้กำลังได้สูง โดยทั่วไปใช้ปูนซีเมนต์แปรผันระหว่างร้อยละ 8 ถึง 12 โดยปริมาตร (Karol, 1960) ส่วนดินมาจากหินแกรนิต (granitic soil) ปรับปรุงด้วยปูนขาว (Nishida et al., 1990) ดินเหนียวปนทรายใช้ผสมปูนซีเมนต์หรือปูนขาวในรูปแบบการบดอัดและการบ่ม ดังนั้นทำให้กำลังอัดและกำลังดึงสูงขึ้นด้วยการยึดเกาะและการที่บีบน้ำดี ดังนั้นจึงเหมาะกับการแก้ไขเสถียรภาพของดินตามธรรมชาติ (Bahar et al., 2004)

ปูนซีเมนต์ช่วยลดสภาพพลาสติกและเพิ่มความแข็งแรงแก่ดินคล้ายกับปูนขาวโดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุงดินปนทรายอยู่ในช่วง 6 – 10 โดยปริมาตร สำหรับดินเหนียวและทรายแป้งมีสภาพพลาสติกต่ำคือ 8-12 และดินเหนียวมีพลาสติกสูงอยู่ประมาณ 10-14 (Raj, 1995)

การปรับปรุงให้ประสบความสำเร็จสิ่งสำคัญคือการบดอัด และการบดอัดให้ความหนาแน่นสูงสุดลดลง เวลาในการผสมที่ยาวนานทำให้เกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งเป็นผลทำให้สูญเสียกำลัง ถ้าการบดอัดล่าช้าปูนซีเมนต์เริ่มเกิดปฏิกิริยาทำให้ดินผสมซีเมนต์ (soil-cement) เริ่มแข็งตัวทำให้ยากต่อการบดอัดวัสดุ การบดอัดจะต้องให้เสร็จสมบูรณ์ภายใน 2 ชม. กำลังของดินผสมซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้รับกำลังได้เร็วขึ้น หากส่วนผสมแห้งเกินไปทำให้กำลังเพิ่มขึ้นแต่อาจจะเกิดรอยร้าวขึ้นในดินผสมซีเมนต์ (Bell, 1993)

การปรับปรุงดินด้วยวิธีทางเคมี จึงเป็นการปรับปรุงที่เหมาะสมกับดินเหนียวอ่อน เนื่องจากวัสดุประสานสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่มากในดินได้ดี ซึ่งเมื่อผสมสารเคมีในปริมาณและชนิดที่เหมาะสมกับจุดมุ่งหมายของการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ดินเหนียวจะมีสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น เช่น มีกำลังอัดสูงขึ้น อัตราการทรุดตัวลดลง (อรุณ, 2552) สารประสานที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงดินเหนียว ได้แก่ ปูนซีเมนต์ (สมมาตร, 2550) ปูนขาว (Wild et al., 1998; Khattab, 2007; Yong and Ouhadi, 2007) ของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เถ้า ได้แก่ เถ้าลอย (Temimi et al., 1998; Kaniraj and Havanagi, 1999; Nalbantoglu, 2004; Koliass et al., 2005; Senol et al., 2006) เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา (ดิษฐ์พร, 2551) เถ้าไพลมะกอก (Attom and Al-Sharif, 1998) ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Poh et al., 2006) ของเสียจากแร่ ได้แก่ กากหินน้ำมัน (Turner, 1994) และฝุ่นจากโรงโม่หินปูน (Brooks et al., 2011) หินคลุกแกรนิต (Osumade, 2002) เป็นต้น

2.2 การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีทางเคมี

Hogentogler (1938) กล่าวว่า การปรับปรุงดินเป็นการทำให้ดินธรรมชาติมีความสามารถในการรับแรงแบกทานได้ดีขึ้นและทนทานต่อการสึกหรอ วิธีการปรับปรุงอาจเป็นการบดอัดให้แน่นหรือการใช้สารผสมเพิ่มลงในดิน ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือเป็นผงก็ได้

Circeo et al. (1962) กล่าวว่า การใส่ปูนซีเมนต์ลงในดินจะเปลี่ยนแปลงสมบัติและโครงสร้างของดิน ดินเกือบทุกชนิดสามารถปรับปรุงคุณภาพได้ แต่จะให้ผลที่แตกต่างกันถึงแม้ว่าดินจะมีสมบัติทางกายภาพที่เหมือนกันก็ตาม ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน แต่แตกต่างกันที่สมบัติทางเคมี ทำให้เกิดผลกระทบต่อกำลังอัดของดินต่างชนิดกันด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบทางเคมีจะมีผลต่อกำลังอัดของดินผสมซีเมนต์

Mitchell (1981) กล่าวว่า เป้าหมายในการนำสารเคมีผสมลงในดินก็เพื่อปรับปรุงดิน ได้แก่ ควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตร การปรับปรุงคุณภาพในการรับน้ำหนักหรือพฤติกรรม

ของหน่วยแรง (stress) และความเครียด (strain) ปรับปรุงการไหลซึมของน้ำที่ผ่านดิน และความคงทนต่อการกัดกร่อนของหิน

Bahar et al. (2004) ได้แสดงผลการทดลองพบว่าวิธีการที่ดีที่สุดของการปรับปรุงดินที่ศึกษานั้นซึ่งให้กำลังอัดดีและความคงทนดีขึ้นที่ค่าใช้จ่ายพอควร สามารถรวมกันระหว่างการบดอัดเชิงกลกับการปรับปรุงทางเคมีด้วยปูนซีเมนต์หรือทรายและปูนซีเมนต์เติมได้จนถึงระดับหนึ่ง

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน ได้แก่ การบวมหรือหดตัวของดินเมื่อความชื้นในดินมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสภาพของภูมิอากาศ อันมีผลต่อการรับแรงแบกทานของดิน การควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินสามารถทำได้โดยการผสมสารที่มีแคตไอออนไฮเดรชัน (hydration cation) ต่างๆ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และอะลูมิเนียมเข้าไปแทนที่ดินที่มีสารประกอบประเภทโซเดียม หรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้การเชื่อมประสานเม็ดดิน (cementitious) เกิดขึ้น รวมทั้งอาจทำได้โดยการใส่สารเคมีช่วยป้องกันการซึมผ่านของน้ำ

การที่จะทำให้ความสามารถในการรับแรงแบกทานของดินเพิ่มขึ้นหรือทำให้ดินแข็งแรงขึ้นก็อาจทำได้โดยการลดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน การทำให้เม็ดดินเชื่อมประสานติดกันหรือการทำให้เกิดการจับกันเป็นก้อน รวมทั้งการป้องกันไม่ให้เกิดการบวมของดินล้วนมีส่วนช่วยให้ดินมีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้การลดการซึมผ่านได้ของดินก็กระทำได้ โดยการปรับปรุงช่องว่างในตัวเม็ดดิน หรือการทำให้ขนาดผลของมวลดินดีขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการปรับปรุงดินระหว่างสารอินทรีย์ (organic matter) โดยทั่วไปจะแตกต่างกันมาก ซึ่งสารอินทรีย์จะให้กำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะหยุดหรือสิ้นสุดการเพิ่มกำลังรับแรงแบกทานขึ้นเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง

เมื่อผสมปูนซีเมนต์ลงไปดินจะเกิดปฏิกิริยาและได้สารสุดท้ายแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate -CSH) ซึ่งในปูนซีเมนต์จะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่แล้วเป็นจำนวนมาก ปฏิกิริยาช่วงสั้นๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อผสมปูนซีเมนต์ลงไปในดิน ประกอบด้วยการแทนที่โดยวิธีการดูดซับแคตไอออน (cation) ของแคลเซียม และเม็ดดินจะดูดซับเอาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) เข้าไว้ ก่อขึ้นเป็นสารประกอบที่ทำให้เกิดการยึดประสานติดกันของเม็ดดิน และเกิดการเพิ่มสภาพความเป็นด่างขึ้นให้กับสถานะแวดล้อม ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องในระยะยาวนั้น เนื่องจากสภาพความเป็นด่างจะทำให้เกิดการแยกตัวของเม็ดดินเหนียว และการผลิตสารประกอบที่ช่วยในการยึดประสานเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานหลายปี (Mitchell and Soga, 2005)

2.3 การปรับปรุงดินโดยเติมสารเคมี

Gordon (1984) กล่าวว่า สารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุในงานทางมีหลายชนิด ดังนั้นในการเลือกใช้สารผสมเพิ่ม จึงต้องพิจารณาสมบัติตามธรรมชาติของวัสดุที่จะทำการปรับปรุง วัตถุประสงค์หรือเป้าหมายของการปรับปรุง สมบัติที่ต้องการของวัสดุภายหลังจากการปรับปรุง สมรรถนะของเครื่องมือที่ใช้ และราคาที่เหมาะสมที่สุด และยังได้รายงานว่าดินในรัฐควีนส์แลนด์ (Queensland) ควรใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มจะดีที่สุด แต่ในบางครั้งอาจใช้ปูนขาวเป็นสารผสมร่วมเพื่อให้เกิดการปรับปรุงเบื้องต้น โดยเฉพาะดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูงเป็นพิเศษ โดยทั่วไปในออสเตรเลียนิยมใช้ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ปูนขาวกับเถ้าลอย และปูนขาวกับปูนซีเมนต์กับสารบิทูเมน (Bitumen)

Metcalf (1977) ได้เสนอการเลือกวิธีการปรับปรุงดิน ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งจะต้องเลือกให้เหมาะสมที่สุดในแต่ละชนิดของดิน โดยคำนึงถึงอิทธิพลของขนาดเม็ดดินเป็นหลัก

ตารางที่ 2.2 วิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินที่แปรผันตามขนาดของเม็ดดิน

Designation	Fine clays	Coarse clays	Fine silts	Coarse silts	Fine sands	Coarse sands
Soil Particle size (mm.)	<.0006	.0006-.002	.002-.01	.01-.06	.06-.4	.4-2.0
Soil Volume Stability	Very poor	Fair	Fair	Good	Very good	Very good
Type of Stabilisation Application						
LIME	■					
CEMENT	■					
BITUMENS					■	
POLYMERIC-ORGANIC	■		■			
MECHANICAL	■					
THERMAL	■					

■ Range of maximum efficiency ■ Effective, but quality control may be difficult

* i.e. improvement of soil grading by mixing-in gravels, sands or clays as appropriate

ที่มา : Metcalf (1977)

Wilmot (1995) กล่าวว่า การปรับปรุง ดิน ที่เดิม (in situ stabilization) ใช้ได้กับงานสร้างทางและนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) ในประเทศออสเตรเลีย ตั้งแต่ปี 1950 ซึ่งใช้สารผสมเพิ่มคือ ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์กับเถ้าลอย สารบิทูเมน และปูนสุก (hydrate lime) ซึ่งใช้แต่เฉพาะงานนำกลับมาใช้สำหรับผิวทาง ต่อมาในปี 1980 ก็มีการนำปูนซีเมนต์ผสมมาใช้กันอย่างแพร่หลาย

เพราะเพิ่มอายุการใช้งานให้นานขึ้น โดยในระยะยาวให้ความแข็งแรงเท่ากัน ปูนซีเมนต์ผสมดังกล่าว ได้แก่ ปูนซีเมนต์กับตะกรัน (cement – slage) ปูนซีเมนต์กับเถ้าลอย และปูนซีเมนต์กับปูนขาว ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในรัฐนิวเซาท์เวลส์ (New South Wales) เซาท์ออสเตรเลีย (South Australia) และควีนสแลนด์ ซึ่งได้มีการเสนอแนวทางเลือกใช้สารผสมเพิ่ม ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แนวทางการเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิด

สารผสมเพิ่ม	หินยอย	กรวดได้ ส่วนขนาด คละ	กรวดปน ทรายแป้ง ดินเหนียว	* ทราย	ดินเหนียวปน ทรายและ ทรายแป้ง	ดินเหนียว ส่วนใหญ่
ปูนซีเมนต์	A	A	A	B	B	N
วัสดุประสาน	A	A	A	A	A	N
ปูนขาว (Hydrate Lime)	B	B	A	N	B	A
ปูนขาว + ปูนซีเมนต์	N	N	B	N	B	A
สารพอลิเมอร์ (Polymeric)	B	A	A	B	A	B
สารบิโทเมน (ยางมะตอย)	A	A	B	B	B	N

หมายเหตุ: A = ปกติเหมาะสมมาก; B = พอใช้; N = ปกติไม่เหมาะสม

* ขึ้นกับขนาดคละ (ทรายขนาดเดียวกำหนดมีสารผสมเพิ่มมากขึ้น)

คัดแปร: Wilmot (1995)

ปัจจุบันสารเคมีที่ใช้เป็นสารผสมเพิ่มที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายดังต่อไปนี้

2.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาเชื่อมประสานที่สำคัญของปูนซีเมนต์ คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (cement hydration) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำและเกิดเป็นสารเชื่อมประสาน เรียกว่า วุ้นปูนซีเมนต์ (cement gel) ซึ่งจะจับตัวแข็งเมื่อมีอายุเพิ่มขึ้นและปูนซีเมนต์แต่ละชนิดจะประกอบด้วย สารแคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate) ชนิดต่างๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีความแตกต่างในสมบัติการแข็งตัวทั้งด้านระยะเวลาและความแข็งแรง

Basha et al. (2005) ได้ศึกษาการปรับปรุงดินค้ำด้วยปูนซีเมนต์และเถ้ากลบ การทดสอบประกอบด้วย การประเมินสมบัติของดินเช่น การบดอัด กำลัง และการเลี้ยงเบนรังสี

เอกซ์ (X-ray Diffraction -XRD) ผลการทดสอบพบว่าทั้งปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบลดสภาพพลาสติกของดินลง ในประเด็นความสามารถอัดตัวได้ การเติมเถ้าแกลบและปูนซีเมนต์ลดความหนาแน่นแห้งสูงสุดและเพิ่มปริมาณความชื้นที่เหมาะสม จากลักษณะสภาพพลาสติก การบดอัดและกำลัง และเศรษฐศาสตร์ ได้เสนอแนะว่าปริมาณที่เหมาะสมเติมปูนซีเมนต์คือร้อยละ 6-8 และเถ้าแกลบร้อยละ 10-15

สมมาตรและคณะ (2551) ศึกษาการปรับปรุงดินคันทาง 8 แห่ง ในจังหวัดสงขลา และสตูล ด้วยการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 และ 20 ของน้ำหนักดินแห้ง ทำการบดอัดตัวอย่างโดยใช้พลังงานเท่ากับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยยึดปริมาณน้ำที่พิกัดเหลว (LL) ความชื้นตามธรรมชาติ (NWC) และ OMC บ่มที่อายุ 1 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ จากนั้นศึกษากำลังของดินที่ปรับปรุงด้วยการทดสอบแรงอัดแกนเดียว และการทรุดตัวของดินที่ปรับปรุงด้วยวิธีการอัดตัวคายน้ำ ตรวจโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope -SEM) ตรวจองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence -XRF) และตรวจชนิดแร่ด้วยวิธี XRD ผลการศึกษาพบว่าดินที่ปรับปรุงด้วยการผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 อายุบ่ม 28 วัน ที่ปริมาณน้ำ LL, NWC และ OMC มีค่ากำลังอัดแกนเดียวในช่วง 1.71 – 35.37 กก./ซม.² 6.24 – 39.62 กก./ซม.² และ 21.72 – 65.35 กก./ซม.² ตามลำดับ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 106.93 – 3,843.88 กก./ซม.², 618.05– 4,436.66 กก./ซม.² และ 1,826.51 – 12,752.40 กก./ซม.² ตามลำดับ ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่ปริมาณน้ำ NWC พบว่าค่าดัชนีอัดตัวมีค่าลดลงคือ มีค่าเท่ากับ 0.03 – 0.55 แสดงว่าค่าการทรุดตัวของดินที่ปรับปรุงคุณภาพมีค่าลดลงเช่นกัน และผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างดินหลังปรับปรุงดังกล่าว พบว่ามีวัฏภาคแร่เปลี่ยนแปลงไปเป็นแร่เคโอลิไนต์ พอร์ตแลนด์ ไอตริงไกต์ และมีปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งมีส่วนทำให้ดินปรับปรุงคุณภาพมีการพัฒนากำลังและเนื้อเหนียวแน่นขึ้น เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่มเพิ่มมากขึ้น ดินคันทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังและลดการทรุดตัวได้

Rahman (1987a) ได้ใช้วัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์ ปูนขาวและดินลูกรังเพื่อใช้ในการก่อสร้างทางหลวง

2.3.2 ปูนขาว (Lime)

Hausmann (1990) กล่าวว่า ปฏิกิริยาทางเคมีขั้นพื้นฐานของดินเมื่อถูกปรับปรุงด้วยปูนขาวมี 4 ลักษณะคือ

- 1) ไฮเดรชันปูนขาวชนิด ปูนสุก (Quicklime) จะทำปฏิกิริยากับน้ำในดินทันทีเมื่อ

ผสมและทำให้เกิดความร้อนขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำในดินลดลง ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาในลักษณะเช่นนี้จะมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงดินที่มีความชื้นสูง เนื่องจากจะช่วยลดน้ำในดินลง

2) การจับตัวเป็นก้อน เป็นการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เมื่อปูนขาวผสมกับดินเหนียวที่มีความชื้นจะทำให้ดินเหนียวร่วนขึ้น สามารถแยกเป็นเม็ดได้ง่าย เนื่องจากเกิดการแทนที่หรือแลกเปลี่ยนกันของแคตไอออนต่างๆ ที่มีอยู่ในดินกับ Ca^{2+} จากปูนขาว โดย Ca^{2+} จะเข้าไปแทนที่ของธาตุโลหะในดิน เช่น Na^+ , H^+ ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่ผิวของดินเหนียว

Ruenkrairergsa (1982) กล่าวว่า การเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับดิน ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอาจจะเพิ่มขึ้นได้ไม่เต็มที่ ถ้ามีสารประกอบชนิดอื่นอยู่ในดินด้วย เช่น ปริมาณสารอินทรีย์และซัลเฟต (sulphate) ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง โดยจะแบ่ง Ca^{2+} มาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้อัตราการเพิ่มความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง สารประกอบของเหล็ก เช่น Fe_2O_3 ที่เคลือบอยู่ในโครงสร้างของดินก็สามารถหน่วงการเกิดปฏิกิริยาให้ช้าลงได้เช่นกัน

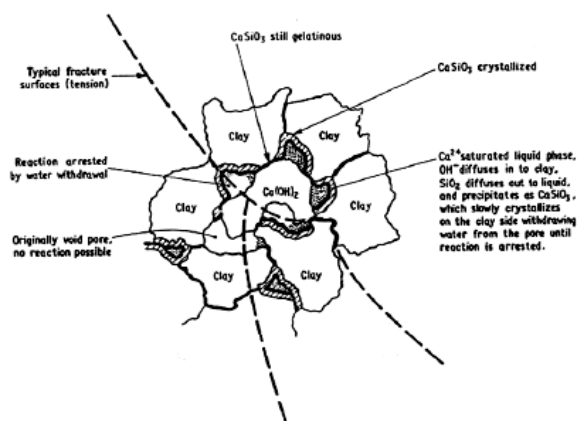
Pedarla et al. (2010) พบว่าการปรับปรุงดินเหนียวที่มีแรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยปูนขาวมีประสิทธิภาพเด่น Singh et al. (2010) ได้ประเมินพฤติกรรมในห้วงปฏิบัติการของดินที่มีซัลเฟตด้วยการปรับปรุงด้วยปูนขาวและเถ้าลอยชนิด C

3) การประสาน (Cementation) หรือปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับซิลิกาดินหรืออะลูมินาดิน (soil alumina) ซึ่งก่อให้เกิดสารที่มีสมบัติการประสานตัวซึ่งกันและกัน โดยเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้กำลังของดินเหนียวผสมปูนขาวเพิ่มมากขึ้น สารที่เกิดปฏิกิริยากับปูนขาวแล้วจะได้สารประกอบชนิดใหม่ที่มีสมบัติในการยึดเหนี่ยวเม็ดดินนี้รู้จักกันในชื่อ สารปอซโซลาน (Pozzolans) ดังนั้นชนิดและปริมาณของสารปอซโซลานจะเป็นตัวควบคุมปฏิกิริยาดังกล่าว สารปอซโซลานที่พบ ได้แก่ เถ้าลอยและเถ้าภูเขาไฟ เป็นต้น

Prabakar et al. (2004) ได้กล่าวว่าโครงการก่อสร้างใดๆ ก็ตาม หากว่าดินบริเวณใต้ฐานรากเป็นดินอ่อนมาก กำลังรับแรงแบกทานต่ำ การเลือกใช้ชนิดของฐานรากขึ้นอยู่กับดินบริเวณใต้ฐานรากซึ่งชนิดของฐานรากมีผลต่อค่าใช้จ่ายด้วย บางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องก่อสร้างอาคารสูงบนชั้นดินอ่อนการปรับปรุงการรับแรงแบกทานของดินมีความสำคัญมาก การปรับปรุงดินด้วยการใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินให้สามารถรับกำลังได้ โดยทั่วไปการเพิ่มประสิทธิภาพการรับกำลังของดินโดยเทคนิคการเติมสาร ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกและมีผู้วิจัยหลายคนได้ทำการศึกษาการรับแรงแบกทานของดินโดยใช้เถ้าลอยปรับปรุงดิน พิจารณาดินสามชนิดต่างกันใช้เถ้าลอยจำนวนร้อยละในช่วงจากร้อยละ 9 ถึง 46 โดยนำน้ำหนักของดิน ผลการปรับปรุงสมบัติทาง

วิศวกรรมของดินทำให้ดินสามารถรับน้ำหนักกดของโครงสร้างฐานรากได้มากขึ้น ยังได้หาปริมาณการใช้เถ้าลอยที่ให้กำลังอัดสูงสุดและราคาที่ใช้ในการแก้ไขสมบัติดิน

Ingles (1970) กล่าวว่า สารละลายแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (Calcium Aluminate Hydrate - CSH) จะทำหน้าที่ห่อหุ้มเม็ดดินและประสานเม็ดดินให้เกาะกัน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเกาะตัวของสาร CSH ในโครงสร้างดินเหนียวผสมปูนขาว

ที่มา: Ingles (1970)

สารแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) ที่เกิดขึ้นจากดินผสมปูนขาวเป็นสารชนิดเดียวกันกับสารที่เกิดในดินผสมปูนซีเมนต์ แต่ต่างกันที่สาร CSH ในดินผสมปูนขาวเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง CaO กับซิลิกาดิน (soil silica) ส่วนสาร CSH ในดินผสมปูนซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) ของปูนซีเมนต์กับน้ำ

ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสารแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) โดยชั้นพื้นทางแล้วจะเกิดขึ้นทันที โดยจะเกิดที่รอยต่อระหว่างขอบและผิวหน้าของดินเดิม สำหรับสารประกอบ CSH จะเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่า แรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นจากสารประกอบ CAH จะไม่แข็งแรงเหมือนกับแรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ของสารประกอบ CSH (Sherwood, 1971)

Cuisinier et al. (2011) ได้ทบทวนข้อมูลในวรรณกรรม สมมุติฐานได้ว่า สารประกอบทางเคมีสามารถลดผลกระทบที่มีต่อการปรับปรุงดินด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์ (อาทิเช่น ไนเตรต ฟอสเฟต และคลอไรด์) จึงได้ศึกษาเน้นประเมินอิทธิพลต่อการปรับปรุงดินเชิงปริมาณ โดยเลือกดินผสมกับสารประกอบมีศักยภาพทำให้ลดลงที่ความเข้มข้นเท่ากันได้ ในภาคสนาม แล้วประเมินพฤติกรรมของส่วนผสมต่างกันในการปรับปรุงดิน โดยทดสอบเชิงกลแก่ตัวอย่างที่อายุบ่มแตกต่างกัน (อุณหภูมิและความชื้น) ผลทดสอบพบว่าสารประกอบที่ทดสอบ แนวโน้มแปรเปลี่ยนกระบวนการปรับปรุงดิน ดังนั้นสมบัติเชิงกลของดินที่ปรับปรุงลดลง

ผลทดสอบยังแสดงว่าไม่สามารถที่จะหาค่าเกณฑ์กำหนดเดียวสำหรับสารประกอบที่พิจารณา เพราะว่าอิทธิพลของสารประกอบที่มีต่อการปรับปรุงดินยังขึ้นกับสมบัติพื้นฐานของดิน (ทรายแป้ง หรือทรายละเอียด) ชนิดของปูนซีเมนต์ และสภาวะบ่ม

Mitchell (1976) พบว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้เกิดกำลังอัดแก่ดินเหนียวผสมปูนขาวเพิ่มขึ้น แต่จากปริมาณของซิลิกาที่มีอยู่จำกัดปริมาณหนึ่ง ถ้ามีการเพิ่มปูนขาวจนมากเกินไปเกินความต้องการทำปฏิกิริยากับซิลิกาใน ปูนขาวที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลเสียให้กำลังลดลงด้วย ซึ่งต่างจากดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์

คุณพลและคณะ (2554) ศึกษาประเมินประสิทธิผลของปริมาณฝุ่นเม็ดปูนบด (cement kiln dust) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 เป็นตัวปรับสภาพดินลูกรังคอกหงส์ในห้องปฏิบัติการ เตรียมตัวอย่างทดสอบที่บดอัดรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 38.5 มม. สูง 85 มม. แล้วบ่มภายในอุณหภูมิห้องที่คงที่และควบคุมความชื้นเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน ตัวอย่างดินที่บ่มนำไปทดสอบความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ความแข็งกระดอน (rebound hardness) และกำลังอัด ผลการศึกษาพบว่าค่าความหนาแน่น ความแข็งกระดอน และกำลังอัดของดินเติมเม็ดปูนบดเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงฝุ่นเม็ดปูน ผลจากตัวอย่างปฏิกิริยาเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีสังเกตได้ชัดจากแร่และโพรงดินจากวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามลำดับ สิ่งเหล่านี้เป็นต้นเหตุให้โมลคูลัสยึดหยุ่นและกำลังอัดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ตัวอย่างที่ปรับปรุงได้แสดงความคงทนในการชะละลายของน้ำอีกด้วย

4) การเกิดคาร์บอเนตจากปูนขาว (Lime Carbonation) ปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอเนตจากปูนขาว เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในปูนขาวทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แล้วเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) กับน้ำ

แคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานลดลง ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซ้ำลง อันเป็นผลให้การพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวผสมปูนขาวช้าลงกว่าปกติได้ นอกจากนี้ยังพบว่าในตัวอย่างของดินที่ป้องกันไม่ให้ปูนขาวเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนตกับอากาศนั้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มนานๆ จะให้กำลังสูงกว่าตัวอย่างดินที่บ่มแล้วปล่อยให้ปูนขาวทำปฏิกิริยากับอากาศได้ ดังนั้นจึงไม่เป็นที่พึงประสงค์ให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนตขึ้นในกระบวนการปรับปรุงของดินด้วยปูนขาว โดยต้องเก็บปูนขาวอย่างมิดชิดไม่ให้สัมผัสกับอากาศก่อนการนำไปใช้งาน

2.3.3 เถ้า (Ash)

เป็นวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน เช่น หินเถ้าภูเขาไฟ (volcanic tuff) หินพัมมิชละเอียด หินดินดาน (shale) หรือการเผาวัตถุคิบที่ได้จากธรรมชาติ มีสมบัติเป็นสารปอซโซลานที่สามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวและเกิดเป็นสารเชื่อมประสานได้

คุณค่าในการอัดตัวคายน้ำ (consolidation) ของดินเหนียวได้ประโยชน์สองเท่าคือ ประการแรกเป็นการคลี่คลายแรงเสียดทานแก่การอัดตัวคายน้ำแก่ดิน และทำให้ลดที่ฝังกลบขยะและปัญหาทางสิ่งแวดล้อม ปรากฏว่าการผสมด้วยเถ้าลอยในวัสดุดินเหนียวได้ก่อให้เกิดมีคุณสมบัติต่อสมบัติเชิงกลของดินเหนียว ในทำนองเดียวกันความสามารถอัดตัวคายน้ำ (Temimi et al., 1998)

Kolias et al. (2005) ได้แสดงถึงศักยภาพประโยชน์ของการปรับปรุงดินปนดินเหนียวด้วยเถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูงแต่ก็ขึ้นกับชนิดของดิน ปริมาณสารใช้ปรับปรุงและอายุบ่มด้วย

Rahman (1986) ได้วิจัยพบว่าศักยภาพของการปรับปรุงดินลูกรังด้วยเถ้าแกลบเปรียบเทียบกับปูนขาวและปูนซีเมนต์ สำหรับการสร้างถนนได้แนะนำว่าให้ใส่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 สำหรับวัสดุพื้นทาง (base materials) ปูนขาวร้อยละ 5 สำหรับวัสดุรองพื้นทาง (sub-base materials) และเถ้าแกลบร้อยละ 18 สำหรับวัสดุรองพื้นทาง

Raman (1987b) ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าแกลบมีผลต่อสมบัติธรณีเทคนิคต่างๆ ของดินเหนียว (กลุ่ม A-7-6) และทราย (กลุ่ม A-1-b) และเปรียบเทียบค่าพิกัดแอดเทอร์เบอร์ก ความหนาแน่นแห้ง ปริมาณความชื้นเหมาะสม กำลังอัดแกนเดี่ยว อัตราส่วน การรับแรงเบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย การยึดเกาะและมุมเสียดทานภายในของดินที่ศึกษากลุ่ม A-1-b และ A-7-6 ด้วยเถ้าแกลบจำนวนร้อยละต่างกัน (0 4 8 12 16 20 และ 24) ปริมาณความชื้นเหมาะสม กำลังอัดแกนเดี่ยว อัตราส่วนการรับแรงเบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย และการยึดเกาะของดินเพิ่มขึ้นพร้อมกับเพิ่มเถ้าแกลบ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงเมื่อมีปริมาณเถ้าแกลบ มุมเสียดทานภายในของดิน A-7-6 เพิ่มขึ้นในขณะที่ดิน A-1-b ลดลงด้วยปริมาณเถ้าแกลบ จากมุมมองเศรษฐศาสตร์และค่าซีพีอาร์ ดิน A-1-b แนะนำว่าเถ้าแกลบร้อยละ 16 สำหรับวัสดุพื้นทางในภาคสนาม ขณะที่ดิน A-7-6 อาจแนะนำว่าใส่เถ้าแกลบเพียงร้อยละ 17 สำหรับวัสดุรองพื้นทาง

Thomas (2002) ได้ประเมินการเติมเถ้าลอยแก่ดินในการทดสอบดินทั่วไป เมื่อเถ้าลอยและดินผสมกันแล้วบดอัดทันที เถ้าลอยเป็นสาเหตุให้ส่วนผสมมีหน่วยน้ำหนักแห้งสูงขึ้น จากการศึกษาที่อนุภาคเถ้าอุดรูพรุน หากส่วนผสมดินกับเถ้าลอยไม่บดอัด เกิดการจับตัวเป็นก้อนและการพอกตัวของอนุภาคดินเมื่อเถ้าลอยก่อตัว เวลาชะลอในการบดอัดนี้เป็นสาเหตุให้หน่วยน้ำหนักที่บดอัดและกำลังที่ได้ลดลง โดยเฉพาะหลังจากเถ้าลอยก่อตัว การเติมเถ้าลอยยังสามารถเพิ่มความคงทนของดินต่อการผุจากความชื้นและละลาย กำลังที่ได้รับของส่วนผสมดินกับเถ้าลอยยังมีผลกระทบ

จากอุณหภูมิที่ต่ำ หากต่ำกว่าเยือกแข็ง 32°F (0°C) ส่วนผสมที่ได้ไม่มีกำลัง ขณะที่กำลังที่ได้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เถ้าลอยที่มีปริมาณกำมะถันสูงทำปฏิกิริยากับแร่และน้ำในดิน ซึ่งทำให้ดินเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดการแตกร้าวในส่วนผสมขึ้น ส่งผลให้ในระยะยาวรับกำลังไม่ได้ แต่เถ้าที่มีกำมะถันน้อยพบว่ารับกำลังได้มากในระยะบ่มเกินกว่าสองปี ซึ่งเถ้าลอยยังสามารถเติมได้ในดินเปียกและจนถึงแห้งสนิท และมีส่วนเพิ่มกำลังให้แก่ดิน สมบัติทางวิศวกรรมของเถ้าลอยที่ได้ปรับปรุงดินซึ่งพิสูจน์ได้ว่าเถ้าลอยสามารถมีประโยชน์เป็นตัวปรับปรุงดินได้

Cristelo et al. (2012) ได้ศึกษาบทบาทของปริมาณแคลเซียมในเถ้าลอยที่ใช้ปรับปรุงดินอ่อนโดยผ่านการก่อกัมมันต์แอลคาไลน์กับตัวก่อกัมมันต์แอลคาไลน์เน้นใช้โซเดียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมแลล ใช้ในการก่อกัมมันต์เถ้าลอยที่อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าเท่ากับ 2:1 และ 4:1 และที่อัตราส่วนสารละลายต่อดินผสมเถ้า 0.4 ได้ใช้เถ้าลอยชนิด C มีปริมาณแคลเซียมสูง (FAC) และชนิด F ที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ (FAF) แยกกัน และยังได้ทดสอบดินผสมปูนซีเมนต์ (SC) และดินผสมปูนขาว (SL) ด้วย เปรียบเทียบกำลังของส่วนผสมดินกับเถ้าลอยชนิด C และ F พบว่ากำลังอัดช่วงสั้นสำหรับดินผสมเถ้าลอยชนิด C สูงกว่า อย่างไรก็ตามภายหลังส่วนผสมดินกับเถ้าลอย F เมื่อบ่มนานขึ้นได้กำลังสูงกว่าดินผสมปูนซีเมนต์ หรือดินผสมปูนขาว ซึ่งมีแนวโน้มค่อนข้างเหมือนกันพบว่าเมื่อกำลัง FAF เปรียบเทียบกับส่วนผสมดินกับปูนซีเมนต์และดินกับปูนขาวชุดเก่าในช่วงอายุสั้นต่ำกว่า แต่ในคาบบ่มนานขึ้นกำลัง FAF สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และสเปกโทรสโกปีกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy -EDS) แสดงว่าการดัดแปลงวัสดุสามารถเกี่ยวข้องกับผลกำลัง สรุปคือ เถ้าลอยมีแคลเซียมต่ำเป็นวัสดุตั้งต้นดีกว่าสำหรับการปรับปรุงดินอ่อนในช่วงนานมีการก่อกัมมันต์แอลคาไลน์มากกว่าเถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูง

Tastan et al. (2011) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเถ้าลอยที่ใช้ในการปรับปรุงดินอินทรีย์และปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุง โดยทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสการคืนตัว (resilient modulus) ของดินอินทรีย์ผสมกับเถ้าลอยและตัวอย่างดินที่ไม่ปรับปรุง กำลังอัดของดินอินทรีย์สามารถเพิ่มขึ้นโดยใช้เถ้าลอย แต่ปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของดินและคุณลักษณะของเถ้าลอย การเพิ่มขึ้นของกำลังและความแข็งแกร่งในช่วงแรก เกิดจากการเชื่อมประสานจากปฏิกิริยาปอซโซลาน การเติมเถ้าลอยเป็นผลทำให้ปริมาณลดลงและส่งผลต่อการรับกำลัง เช่น ปริมาณน้ำลดลงมีผลทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสการคืนตัวเพิ่มขึ้น ยังขึ้นกับปริมาณ CaO และอัตราส่วน CaO/SiO_2 (หรืออัตราส่วน $\text{CaO}/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$) ปริมาณอินทรีย์ในดินเป็นผลทางลบในการปรับปรุง ปริมาณสารอินทรีย์ของดินสูงพบว่ากำลังของวัสดุผสมดินกับเถ้าลอยลดลงแบบรูป

โคง สำหรับวัสดุผสมดินกับเถ้าลอยที่ทดสอบ ส่วนมากกำลังอัดแกนเดียวและโมดูลัสการคืนตัวเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนร้อยละเถ้าลอยเพิ่มขึ้น

Edil et al. (2006). ได้ประเมินประสิทธิผลของเถ้าลอย ที่ได้จากการเผาไหม้ของ ถ่านหินชนิดกึ่งบิทูมินัส (subbituminous coal) ของโรงผลิตไฟฟ้า เพื่อปรับปรุงดินเม็ดละเอียดอ่อน ดำเนินการทดสอบแคลิฟอร์เนียเบริงเรโซ (CBR) และโมดูลัสการคืนตัว ส่วนผสมซึ่งเตรียมจากดิน เม็ดละเอียดอ่อน ได้แก่ ดินอินทรีห์กชนิดและดินอินทรีห์หนึ่งชนิดและเถ้าลอยสี่แหล่ง เลือกดิน ที่เป็นตัวแทนช่วงของสภาพพลาสติก มีดัชนีพลาสติกอยู่ระหว่าง 15 กับ 38 เถ้าลอยชนิดที่สองเป็น เถ้าชนิด C คุณภาพสูง ตาม ASTM C 618 ปกติใช้ในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนเถ้าอื่น เป็นเถ้านอกเกณฑ์กำหนด ไม่ได้อยู่ในเกณฑ์ ASTM C 618 ชนิด C หรือชนิด F ได้ทำการทดสอบ ดินและวัสดุผสมเถ้าลอยกับดินที่เตรียมไว้ ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม ที่ภาวะมาตรฐานเปียกร้อย ละ 7 ของปริมาณความชื้นเหมาะสม เป็นดินในรัฐวิสคอนซิน (Wisconsin) และเปียกร้อยละ 9-18 ของปริมาณความชื้นเหมาะสม การเติมเถ้าลอยส่งผลต่อการเพิ่มค่าซีบีอาร์มากพอควร โมดูลัสการ คืนตัวของดินอินทรีห์ สำหรับปริมาณน้ำร้อยละ 7 ของน้ำเหมาะสม ค่าซีบีอาร์ของดินล้วนอยู่ ในช่วงระหว่าง 1 และ 5 การเติมเถ้าลอยร้อยละ 10 ยังผลให้ค่าซีบีอาร์อยู่ในช่วงระหว่าง 8 และ 17 และเถ้าลอยร้อยละ 18 ส่งผลให้ค่าซีบีอาร์อยู่ระหว่าง 15 และ 31 ในทำนองเดียวกันโมดูลัสการคืน ตัวของดินล้วนอยู่ในช่วงระหว่าง 3 และ 15 เมกะพาสคัล ที่เปียกร้อยละ 7 ของน้ำเหมาะสม ในขณะที่ การเติมเถ้าลอยร้อยละ 10 ยังผลให้โมดูลัสการคืนตัวอยู่ในระหว่าง 12 และ 60 เมกะพาสคัล และ เถ้าลอยร้อยละ 18 ให้ผลค่าโมดูลัสการคืนตัวอยู่ระหว่าง 51 และ 106 เมกะพาสคัล ในแง่กลับกัน ยกเว้นเถ้าลอยชนิดหนึ่ง การเติมเถ้าลอยโดยทั่วไปมีผลกระทบเล็กน้อยต่อค่าซีบีอาร์หรือโมดูลัส การคืนตัวของดินอินทรีห์

Nalbantog lu (2004) ได้กล่าวว่าการแลกเปลี่ยนแคตไอออนเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญ ประการหนึ่งที่ใช้ในการแก้ไขคุณลักษณะดิน ค่าความสามารถแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity) ใช้ระบุการเปลี่ยนแปลงในวิทยาแร่ของดินที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยและอธิบายถึง สภาพพลาสติกและค่าการดูดซึมน้ำลดลง

Hossain (2011) ได้พัฒนาและประเมินดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยการใช้ฝุ่นเม็ดปูน เถ้าแกลบ และการผสมทั้งสองเป็นตัวปรับปรุงในจำนวนร้อยละต่างกัน (สูงสุดร้อยละ 20) อิทธิพล ของวัสดุทั้งสองชนิดเป็นวัสดุตัวปรับปรุงและปริมาณมีต่อสมบัติเบื้องต้นและสมบัติเชิงกลได้ทำ การทดสอบพิกัดแอดเทอร์เบิร์ก การบดอัดแบบมาตรฐาน กำลังอัดแกนเดียว กำลังดึงแบบผ่าซีก (splitting tensile strength) โมดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (CBR) และยัง ได้ทดสอบคุณลักษณะความคงทนของวัสดุผสมดินที่ปรับปรุงทั้ง 19 ชุดด้วย โดยการศึกษาอิทธิพล

ของน้ำที่ดูดซึมเข้าไปมีผลต่อกำลัง การดูดซับและการหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) ยังได้จัดสร้างสหสัมพันธ์ระหว่างกำลัง โมดูลัสยืดหยุ่น และซีปียาร์ วัสดุผสมดินที่ปรับปรุงพัฒนาแสดงกำลังและคุณลักษณะความคงทนเป็นที่น่าพอใจ และสามารถนำดินในท้องถิ่น เถ้าแกลบและฝุ่นเม็ดปูน (ของเสียจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์) มาประยุกต์ใช้ปรับปรุงดินให้สามารถใช้สำหรับการก่อสร้างและโครงสร้างถนน ทำให้ประหยัดค่าก่อสร้างและสามารถเพิ่มมูลค่าของเสียจากอุตสาหกรรมได้

2.3.4 ยางมะตอย (Bitumen)

เป็นสารที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ ซึ่งมีความหนืดที่ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำยาง การใช้ยางมะตอยในการปรับปรุงคุณภาพของดินจะช่วยป้องกันหรือลดการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน ทั้งนี้เป็นเพราะยางมะตอยมีสมบัติทึบน้ำ เมื่อไปเคลือบรอบเม็ดดินก็จะทำให้ความชื้นเข้าไปไม่ได้ แต่มีข้อเสียคือยางมีความแข็งแรงต่ำ ถ้าใช้ในปริมาณมากอาจเกิดผลเสียด้านกำลังได้

2.4 สารปอซโซลาน

ตามมาตรฐาน ASTM ได้ให้คำจำกัดความของคำว่า ปอซโซลานา (Pozzolona) ไว้ดังนี้ สารปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก

ชัยและไกรวุฒิ (2549) กล่าวว่า โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่เลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่พอเพียงจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน

การนำสารปอซโซลานมาใช้เป็นวัสดุปูนซีเมนต์ได้มีมาตั้งแต่สมัยโบราณ โดยเป็นที่ยอมรับกันว่า เมื่อนำวัสดุที่ได้จากการระเบิดของภูเขาไฟมาใช้ร่วมกับหินปูนซึ่งมีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบแล้วสามารถที่จะใช้ปรับปรุงคุณภาพของมอร์ตาร์ให้ดีขึ้น โดยทำให้มอร์ตาร์นั้นสามารถแข็งตัวได้ในน้ำ นอกจากนี้ยังได้มีการนำเอาวัสดุที่มีสมบัติในการปรับปรุงคุณภาพของมอร์ตาร์มาใช้ เช่น หินเถ้าภูเขาไฟ โรโอไลต์ (rhyolite tuff) จากเมืองซานโตริน (Santorin) และหินเถ้าภูเขาไฟโฟโนไลต์ (phonolitic tuff) จากเมืองวิซุเวียส (Vesuvius) ในประเทศอิตาลี เป็นต้น และเมื่อมีการพบวัสดุซึ่งเกิดจากการตกตะกอนทับถมของดินในตำบลใกล้เคียงกับเมืองปอซซุโอลิ (Pozzuoli) สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงมอร์ตาร์ได้ ดังนั้นในยุคต่อมาจึงเรียกวัดุนำมาปรับปรุงนี้ว่า ปอซโซลาน (Pozzolonas) นอกจากนี้ยังพบว่าได้มีการใช้สารปอซโซลานมา

ผสมกับปูนซีเมนต์และใช้งานจริงในงานก่อสร้างต่างๆ ทั้งในประเทศรัสเซียและประเทศญี่ปุ่นเป็นเวลานานแล้ว ในปัจจุบันสารปอซโซลานที่เห็นโดยทั่วไปและใช้กันมากที่สุด คือ เถ้าลอย

ในอเมริกา เถ้าลอยเป็นสารปอซโซลานตัวแรกที่ใช้ในงานก่อสร้างคอนกรีตมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เถ้าลอยคือผลผลิตที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเตาเผาจากโรงงานผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการเผาไหม้ในเตา ในงานการก่อสร้างคอนกรีตที่ประสบความสำเร็จในการใช้เถ้าลอย เป็นส่วนผสมทำคอนกรีตก็คือ การสร้างเขื่อน Hungry Horse ในประเทศอเมริกา โดยเริ่มก่อสร้างในปี ค.ศ. 1948 โดยการใช้เถ้าลอยประมาณร้อยละ 30 แทนปูนซีเมนต์หลังจากนั้นมาเถ้าลอยจึงเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างเขื่อนคอนกรีต

สารปอซโซลานอาจแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ตามลักษณะการนำมาใช้งาน คือ

1) สารปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzlanas) โดยทั่วไปคือ วัสดุซึ่งเกิดจากการประทุของภูเขาไฟ เช่น หินเถ้าภูเขาไฟ และหินพัมมิช (pumicite) เป็นต้น

2) สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzlanas) ส่วนใหญ่คือ วัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว หินดินดาน (shale) หินซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เถ้าลอย และเถ้าจากการเกษตรกรรม เป็นต้น

Saltan and Findik (2008) ได้ตรวจสอบการใช้หินพัมมิชของแหล่ง Isparta-Karakaya ซึ่งจัดเป็นมวลรวมเบาในการปรับปรุงวัสดุรองพื้นทางพิจารณาหน่วยน้ำหนักเชิงปริมาตร เริ่มต้นวิเคราะห์เบื้องต้นถึงสมบัติทางกายภาพของวัสดุมวลรวมเบา (lightweight aggregate material) ยังได้วิจัยต่อถึงความเป็นไปได้นำมาใช้ในชั้นรองพื้นทางได้หรือไม่ ดำเนินการทดสอบ CBR สังเกตการเปลี่ยนแปลงของกำลังและได้ว่าหินพัมมิชสามารถใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางของทางหลวงและวัสดุปรับปรุงเมื่อสร้างทางหลวงและถนนทุกชนิดและยังสังเกตและหาค่ากำลังเพิ่มขึ้นของวัสดุผสมนั้น

สมชัย (2535) กล่าวว่า ประเทศไทยมีการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ชั้นพื้นทาง เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเมื่อผสมกับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะแล้วบ่มทิ้งไว้จะเริ่มแข็งตัวภายใน 1 วัน เนื่องจากมีสมบัติที่แข็งตัวได้ด้วยตัวเอง ทั้งนี้เป็นเพราะเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะส่วนใหญ่จะมีปริมาณ CaO อิสระปนอยู่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำจนกลายเป็น Ca(OH)_2 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไปกับซิลิกาและอะลูมินา ซึ่งอยู่ในรูปของแก้วไร้เนื้อผลึก (Non – Crystalline Glass) จนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งตัวขึ้นได้ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมินตไฮดรต (CAH) การนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานดินส่วนใหญ่กระทำใน 2 ลักษณะ คือเถ้าลอยผสมน้ำเทเหลวและเถ้าลอยบดอัด

Arora and Aydilek (2005) กล่าวว่า การประยุกต์ใช้เถ้าลอยชนิด F ไม่สามารถใช้ได้ โดยลำพัง เป็นเพราะเถ้าไม่เชื่อมประสานด้วยตัวเอง ตัวก่อกัมมันต์ อาทิเช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือปูนขาวต้องเติมให้จึงเกิดผลิตผลเชื่อมประสาน มักเรียกว่า วัสดุผสมที่ปรับปรุงปอซโซลาน (pozzolan stabilized mixtures) วัสดุผสมที่พัฒนาต้องได้กำลังและความคงทนเพียงพอ ช่วยให้การบดอัดง่ายขึ้น และควรเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ทางจรรยาบรรณมีศักยภาพสูงสำหรับใช้ดินที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยปริมาณมาก จึงได้ศึกษาใช้เถ้าลอยชนิด F คลุกกับดินผสมซีเมนต์หรือดินผสมปูนขาวเป็นชั้นพื้นทางในทางหลวง ปฏิบัติการทดสอบต่อวัสดุผสมดินกับเถ้าลอยด้วยการจัดปูนซีเมนต์และปูนขาวเป็นตัวก่อกัมมันต์ ได้ทำการทดสอบการอัดแกนเดี่ยว แคลิฟอร์เนียเบรจโรโซและโมดูลัสการคืนตัว กำหนดความหนาของชั้นพื้นทางโดยใช้ปัจจัยกำลังแน่นจากห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาแสดงว่ากำลังของวัสดุผสมค่าสูงขึ้นกับอายุการบ่ม พลังงานบดอัด ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณน้ำที่การบดอัด การปรับปรุงด้วยปูนขาวไม่สามารถใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้ การทดลองที่อุณหภูมิเยือกแข็งและละลาย (freeze-thaw cycles) ไม่มีผลแตกต่างกับวัสดุที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์

อรุณและคณะ (2552) ศึกษาการปรับสภาพดินเหนียวสงขลาทางเคมีด้วยการใช้เถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพาราแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก และบ่มที่อายุ 1 7 14 28 และ 56 วัน ทดสอบประเมินสมบัติทั้งของดินบ่าบดและไม่บ่าบด ได้แก่ การทดสอบพิกัดแอดเทอร์เบิร์ก การบดอัดแบบมาตรฐาน กำลังอัดแกนเดี่ยว อัตราส่วนรับแรงเบกทาน การอัดตัวคายน้ำ และวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลทดลองแสดงว่าทั้งเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารา ลดสภาพพลาสติกดินลง ในแง่ความสามารถอัดตัวได้ การเติมเถ้าทั้งสองได้ลดความหนาแน่นแห้งสูงสุดลงและเพิ่มปริมาณน้ำที่เหมาะสมขึ้น จากมุมมองแง่สภาพพลาสติก คุณลักษณะการบดอัดและพฤติกรรมสำหรับวัสดุกันทางเสนอแนะว่าปริมาณเหมาะสมในการเติมเถ้าแกลบร้อยละ 20 และเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 30

Seco et al. (2011) กล่าวว่า การขยายตัวของดินเหนียวเป็นต้นเหตุทำให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างพื้นฐานและอาคาร ดินเหล่านี้เป็นสาเหตุต้องเสียค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงและเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายต่ออาคาร จึงได้ทดลองปรับปรุงดินขยายตัว อันประกอบด้วย การลดการบวมตัวและปรับปรุงโดยวิธีเชิงกลของดิน โดยการเติมวัสดุพลอยได้และวัสดุของเสียจากอุตสาหกรรม เพื่อวัตถุประสงค์สองประการคือ การลดปัญหาของดินชนิดนี้ โดยนำวัสดุของเสียจากอุตสาหกรรมมาปรับปรุงใช้ประโยชน์ เป็นการลดค่าใช้จ่ายและการจัดการสิ่งแวดล้อม จากสภาพการขยายตัวของดินลดลงต่ำกว่าข้อกำหนดของประเทศสเปน ดังนั้น การปรับปรุงเชิงกลของดินโดยการทดสอบปรับปรุงดินให้กำลังอัดเป็นสองและสี่เท่าของดินที่ไม่ได้ปรับปรุง สำหรับวัสดุ

ของเสียนั้นที่เหมาะสมที่สุดคือ เถ้าลอยแกลบ (rice husk fly ash) มีประสิทธิภาพสูงในการปรับปรุงดินจากประเด็นพิจารณาทั้งสองในการทดลองนี้

Brooks et al. (2011) ประเมินศักยภาพของฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยมาปรับปรุงดินมี ปัญหาทางตะวันออกเฉียงใต้ในรัฐเพนซิลวาเนีย ได้ศึกษาคุณลักษณะทางธรณีเทคนิคของดินอัน ประกอบด้วย พิกัดแอตเทอร์เบิร์ก การบดอัด อัตราส่วนแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (ซีบีอาร์) การบวม และกำลังอัดแกนเดี่ยว ทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยวิเคราะห์ทางเดียวกระทำต่อ ข้อมูลเกิดขึ้นมา ยืนยันว่าปริมาณฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยมีอิทธิพลอย่างนัยสำคัญแก่คุณลักษณะการบดอัดและกำลังของดินฟิลาเดลเฟีย (Philadelphia) ที่ปรับปรุงด้วยสารผสมเพิ่ม (additives) เหล่านั้น ผลศึกษาครั้งนี้แสดงว่าสภาพพลาสติกและการบวมของดินลดลงร้อยละ 40 และระหว่างร้อยละ 40 และ 70 ตามลำดับ พบว่าค่าการรับกำลังแรงแบกทานของดินแบบแคลิฟอร์เนียและกำลังอัดเพิ่มเป็นสองเท่าจากการปรับปรุงด้วยสารผสมเพิ่ม

2.4.1 เถ้าไยปาล์มน้ำมัน

เถ้าไยปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ที่ได้จากกากเส้นใยของผลปาล์มเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิในการเผาไหม้ประมาณ 800 – 1000°C เถ้าไยปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา และเป็นการสูญเสียพื้นที่ในการฝังกลบโดยสูญเปล่า นอกจากนั้นยังทำให้เกิดมลภาวะเนื่องจากการฟุ้งกระจายของเถ้าไยปาล์มน้ำมันอีกด้วย

ในปี ค.ศ. 1990 เริ่มมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต (Tay and Show, 1995) ด้วยการนำเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุพอซโซลานต่ำและคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีความหนาแน่นน้อยกว่าและการดูดซึมน้ำมีมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม

Hussin and Awal (1997) ได้ศึกษานำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุพอซโซลาน โดยบดเถ้าให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์และแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน โดยกำลังอัดในช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่ากำลังอัดที่ต่ำแต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์ม

น้ำมันเป็นส่วนผสม นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากการละลายกรดไฮดรอกลอลริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

ดิษฐพรและคณะ (2551) ได้ศึกษาสัณฐานภาพของเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราปรับปรุงดินเหนียวปากพั้งผสมในอัตราส่วนผสมของปริมาณเถ้าทั้งสองแปรผันจากร้อยละ 0 5 10 และ 15 โดยทำการบ่มเป็นเวลา 0 7 14 28 และ 56 วัน สมบัติทางธรณีเทคนิคของตัวอย่างดินเหนียวปากพั้งที่ได้ปรับปรุงดีขึ้นอย่างมาก ได้แก่ ค่าดัชนีพลาสติก ความหนาแน่นแห้งสูงสุด และสัมประสิทธิ์การอัดตัวซึ่ลดลงเป็นร้อยละ 33.93 3.88 และ 107 ตามลำดับ และกำลังอัดโมดูลัสยืดหยุ่น กำลังรับแรงแบกทานเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 207 1,424 และ 110-770 ตามลำดับ เช่นกัน ค่ากำลังอัดสูงสุดของดินที่ปรับปรุงอยู่ที่ส่วนผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 และเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 10 ผลทดสอบยังแสดงถึงการบ่มมีอิทธิพลทำให้กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังแรงแบกทานดีขึ้น

2.4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

Tay (1995) ใช้เถ้าจากการเผาของเสียบปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีพบว่าปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 21.3, 36.2 และ 4.9 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากงานศึกษาที่ผ่านมาของ Hussin and Awal (1997) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเถ้าเชื้อเพลิงน้ำมันปาล์มในการป้องกันการขยายตัว อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ด้วยเถ้าปาล์มที่มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 43.6 11.4 และ 4.7 ตามลำดับ ดนุพลและธนภัทร์ (2551) ได้ใช้เถ้าไยปาล์มน้ำมันในการทดลองเช่นกัน พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 33.99 มีปริมาณ Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ ร้อยละ 2.24 และ 1.65 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.4

อภิรักษ์และดนุพล (2551) ศึกษาอิทธิพลของการแทนทรายด้วยหินฝุ่นแกรนิตที่ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีต่อกำลังอัดและกำลังดึงของมอร์ต้าร์ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ มีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 50.52 มี Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 1.82 และร้อยละ 4.27 ตามลำดับ นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้ว ยังมีงานวิจัยอีกหลายคณะที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน เช่น Tonnayopas and Laopreechakul (2006), Tonnayopas et al. (2006), พรนราชนันและดนุพล (2551), ดนุพลและสุรเดช (2551) และ Tonnayopas et al. (2009) จะเห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันของแต่ละคณะวิจัยมีองค์ประกอบทางเคมีแปรปรวนสูง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิและ

กรรมวิธีการหีบน้ำมันปาล์มที่ใช้วัตถุดิบชนิดที่ต่างกัน ก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการหมัก
ต้มไอน้ำ ดังนั้นเนื้อหาของเสียได้ออกมาจึงมีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันจากหลายคณะวิจัย

องค์ประกอบ (%)	Tay (1995)	Awal and Hussin (1997)	دنۇقلەئەرن ڤاتۇر (2551)	دېئۇقلەرنە دنۇقلە (2551)	اڤرېكشە ۋە دنۇقلە (2551)
SiO ₂	21.3	43.60	33.99	58.14	50.52
Al ₂ O ₃	36.2	11.40	2.24	1.54	1.82
Fe ₂ O ₃	4.90	4.70	1.65	3.16	4.27
CaO	16.43	8.40	16.43	12.04	10.84
P ₂ O ₅	1.23	-	3.88	3.32	5.19
K ₂ O	24.7	3.50	11.30	11.49	5.93
Na ₂ O	2.0	0.39	-	-	0.42
MgO	5.90	4.80	7.50	3.22	3.42
TiO ₂	-	-	-	0.26	0.22
SO ₃	-	2.80	1.23	1.86	0.42
LOI	13.59	18.0	1.02	3.73	0.72
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ม ² /กรัม)	-	520	110.50	-	72.48
ความพรุน (ม ² /กรัม)	-	-	48.38	-	36.62

2.4.3 ปฏิริยาทางเคมีของปอชโซลานในดิน

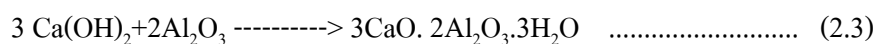
อภิลิทธิ (2547) กล่าวว่า ปฏิริยาเคมีของสารปอชโซลานที่ทำให้เกิดการเชื่อมประสานเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินสามารถแบ่งออกเป็น 3 ปฏิริยาดังนี้

1) ปฏิริยาการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (Ion Exchange) เป็นปฏิริยาการแทนที่ของแคตไอออนซึ่งมีวาเลนซ์สูงกว่าหรือมีขนาดใหญ่กว่าแคตไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่าหรือมีขนาดเล็กกว่า เช่น Ca²⁺ แทนที่ Na⁺ ที่มีอยู่ในดิน ทำให้อุณหภูมิของเม็ดดินสามารถจับตัวกันดีขึ้นเป็นผล

ให้ดินมีเสถียรภาพดีขึ้น โดยมากมักเกิดจาก CaO ในสารปอซโซลานทำให้มี Ca^{2+} ไปแทนที่ไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่าได้

2) ปฏิกริยาการจับตัวของเม็ดดิน (Flocculation Agglomeration) เป็นปฏิกิริยาซึ่งทำให้อนุภาคดินเหนียวเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยแคลเซียมไอออนจากเกลือที่เข้าไปในมวลดินจะเข้าไปจับตัวบนผิวอนุภาคของดินเหนียว และเมื่อความเข้มข้นของไอออนสูงขึ้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ดิน ซึ่งจะทำให้ชั้นคู่ (Double Layer) หดตัวแคบเข้า ทำให้อนุภาคดินเหนียวจะเคลื่อนตัวเข้าหากันและเกิดการดึงดูดอนุภาคของเม็ดดินรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้โครงสร้างของดินมั่นคงขึ้น

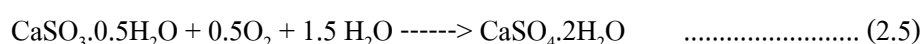
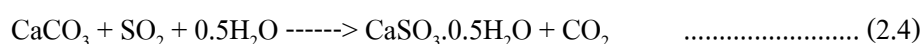
3) ปฏิกริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากสาร SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดเชื่อมประสานขึ้น เรียกว่า ปฏิกริยาปอซโซลาน (Pozzolanic) ดังสมการที่ 2.1 – 2.3 (Tastan et al., 2011)



จากสมการทางเคมีข้างต้นจะทำให้ได้สารประสานที่ดี จะต้องมี CaO ปริมาณหนึ่งทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

2.5 ยิปซัมเทียม

ยิปซัมเทียมเป็นยิปซัมที่เกิดจากการสังเคราะห์ ได้จากกระบวนการดักจับก๊าซไอเสียซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกมาจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้ น้ำหินปูนเป็นวัตถุดิบตั้งต้นทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจน (Flue Gas Desulphurization-FGD) ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5 ของ Li and Sadakata (1999)



ยิปซัมเทียมมีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็ก มีสีขาวปนเทาซึ่งเกิดจากเขม่าที่เผาไหม้น้ำมันเตาเป็นมลทินเกาะอยู่ที่ผิวยิปซัมเทียม ค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.24 หากนำยิปซัมเทียมมาเผาที่อุณหภูมิ 150 องศา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนทำให้โมเลกุลของน้ำแยกตัวออก เกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) ยิปซัมเทียมในถังเก็บยิปซัมจะมีความชื้นอยู่เพราะ

สายพานกรอง (belt filter) ไม่สามารถแยกน้ำออกจากยิปซัมได้หมด ยิปซัมเทียมจากโรงไฟฟ้า กระบี่จะขายให้ในราคาถูกแก่โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ทุ่งสง เพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ แต่เนื่องจากจังหวัดกระบี่ไม่มีโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ยิปซัมเป็นวัตถุดิบในการผลิต จึงทำให้ต้องขนส่งไปยังจังหวัดอื่น ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเนื่องจากค่าขนส่งเพิ่มขึ้น

แต่การนำยิปซัมมาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่จะใช้ยิปซัมธรรมชาติเป็นหลักเพราะมีความบริสุทธิ์สูง ในอุตสาหกรรมก่อสร้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตปูนซีเมนต์ ยิปซัมจะถูกเติมลงไปปูนเม็ดประมาณร้อยละ 3-5 ของน้ำหนักปูน ก่อนจะนำไปบดและบรรจุถุง น้ำหนักของยิปซัม คือ เป็นตัวหน่วงเพื่อชะลอการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ และทำให้ปูนจับตัวกับวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ ได้ดี เช่น กรวด ทำให้มีกำลังอัดสูง ใช้เป็นตัวเพิ่มออกซิเจน (oxidizing agent) ในอุตสาหกรรมเครื่องแก้ว เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตซอล์ก กระเบื้องยิปซัม ดินสอสี และหัวไม้ขีดไฟ นอกจากนี้ยิปซัมที่มีความบริสุทธิ์สูง สามารถนำไปใช้ในการทำรูปแกะสลัก และการตกแต่งภายใน

สุวีณาและคณพล (2552) ได้ศึกษาคุณลักษณะของสมบัติบางประการของวัสดุยิปซัมเทียมจากการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ผสมเกลือลอยไม่ยางพารา ทำการวัดวัสดุผสมที่ใส่เกลือลอยไม่ยางพาราแทนที่ยิปซัมเทียมบางส่วนที่อัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 ของน้ำหนักยิปซัมเทียม ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อยิปซัมเทียม 1.0 0.9 0.8 และ 0.7 และผึ่งลมเป็นเวลา 7 และ 28 วัน ก้อนตัวอย่างมีขนาด 50×50×50 มม. หากค่าสมบัติอื่น ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัว ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ กำลังอัด และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ผลทดลองพบว่าการเติมเกลือลอยไม่ยางพาราทำให้วัสดุมีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาการก่อตัว ความหนาแน่นรวม และกำลังอัดลดลง การเป็นฉนวนความร้อนมีผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อยิปซัมเทียมอย่างมากและบ่งว่ามีศักยภาพสูงและสื่อค่าสำหรับการพัฒนาวัสดุก่อสร้างมวลเบา

คณพลและคณะ (2554) ได้ประเมินอิทธิพลของสูตรเนื้อและความยาวของเส้นปอกระจุตต่างกันต่อสมบัติทางกายภาพและพฤติกรรมเชิงกลของเพสต์ยิปซัมเทียม ใช้ถ้ำไยปาล์ม น้ำมันเป็นสารปอชโซลานเติมในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 ของน้ำหนักยิปซัมเทียม เตรียมก้อนตัวอย่างรูปทรงกระเบื้องขนาด 100×100×10 มม. ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7 ตลอดการศึกษา และนำไปผึ่งอากาศเป็นเวลา 7 วัน ในบรรยากาศห้อง เส้นกระจุตน้ำหนักประมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนักแผ่น และเส้นยาว 3 5 และ 7 ซม. ได้วัดเวลาก่อตัว ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ ความแข็งกระดอนและกำลังอัด ผลทดสอบแสดงว่าถ้ำไยปาล์มน้ำมันอยู่ในทุกอัตราส่วนทำให้กระเบื้องยิปซัมเทียมดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นรวม ความแข็งกระดอนและกำลังอัดลดลง ผล

การทดสอบบ่งถึงความเป็นไปได้ในการผลิตกระเบื้องกระเบื้องมวลเบาโดยใช้ยิปซัมเทียบกับเถ้ายิปซัมนำมันและเส้นปอกระจุจธรรมชาติ

ภาณุวัฒน์และสำราญ (2547) ได้ทำการปรับปรุงสมบัติของดินเหนียวอ่อนบางกอก จากการก่อสร้างทางโครงการที่ สป.4100 สายบ้านคลองสวนถึงบ้านคลองกระออม จังหวัดสมุทรปราการ โดยใช้แรยิปซัมจากอำเภอดงเจริญ จังหวัดพิจิตร ซึ่งใช้ยิปซัมแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก นำมาทดสอบหาค่าแคลิฟอร์เนียเบริงเรโซ พบว่าหากแทนที่ยิปซัมเกินร้อยละ 10 ขึ้นไป ค่าแคลิฟอร์เนียเบริงเรโซจะสูงขึ้นตามอัตราส่วนยิปซัมที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การบวม กำลังเหนียว และกำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงตามยิปซัมที่เพิ่มขึ้น

Yilmaz and Civelekoglu (2009) กล่าวว่าอาคารชั้นเดียวเกิดความเสียหายได้จากการเคลื่อนตัวของพื้นสาเหตุมาจากการบวมพองและหดตัวของดินเหนียวขยายตัว นักวิศวกรรมเทคนิครู้จักการบวมของดินเหนียวขยายตัวมานาน สาเหตุมาจากการแปรปรวนของความชื้น อาจยังผลให้โครงสร้างวางอยู่ข้างบนเสียหายได้ และวิศวกรควรตระหนักอยู่เสมอ ในวรรณกรรมประกอบด้วยเทคนิคการปรับปรุงจำนวนมาก อาทิเช่น ปูนขาว ปูนซีเมนต์ และเถ้ายิปซัมสำหรับบำบัดดินเหนียวขยายตัว อย่างไรก็ตามการใช้ยิปซัมเป็นสารปรับปรุงนั้น ในปัจจุบันยังไม่กระจ่าง จึงได้ทดสอบยิปซัมเป็นสารเติมสำหรับบำบัดดินเหนียวขยายตัวด้วย ศักยภาพการบวมและกำลัง อันดับแรกหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดดีที่สุดของเบนโทไนต์โดยการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐาน เติมปริมาณยิปซัมต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 2.5 5 7.5 และ 10 แทนที่เบนโทไนต์และบดอัดได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ดำเนินการทดสอบพิกัดแอดเทอร์เบิร์ก การบวมอิสระและกำลังอัดแกนเดียวแก่ตัวอย่างที่บำบัดและไม่บำบัด หลังจากบ่มไว้เป็นเวลา 7 วัน ได้การเปลี่ยนแปลงสภาพพลาสติก จำนวนร้อยละการบวมและปัจจัยกำลังของตัวอย่างที่บำบัดและไม่บำบัดบ่งว่ายิปซัมสามารถใช้เป็นสารปรับปรุงสำหรับดินเหนียวขยายตัวอย่างประสิทธิผล

Degirmenci et al. (2007) ได้อธิบายการประยุกต์ฟอสโฟยิปซัม (phosphogypsum) ด้วยปูนซีเมนต์และเถ้ายิปซัมสำหรับการปรับปรุงดิน ได้ดำเนินการทดสอบพิกัดแอดเทอร์เบิร์ก การบดอัดแบบมาตรฐาน และกำลังอัดแกนเดียวแก่ตัวอย่างดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ เถ้ายิปซัม และฟอสโฟยิปซัม การบำบัดด้วยปูนซีเมนต์ เถ้ายิปซัมและฟอสโฟยิปซัมโดยทั่วไปลดดัชนีพลาสติก หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์และฟอสโฟยิปซัมเพิ่ม โดยทั่วไปปริมาณน้ำเหมาะสมที่สุดของตัวอย่างดินที่ปรับปรุงลดลงเมื่อเพิ่มปูนซีเมนต์ เถ้ายิปซัม และฟอสโฟยิปซัม ส่วนกำลังอัดของดินไม่บำบัดในทุกกรณีต่ำกว่าดินที่บำบัด ปริมาณของปูนซีเมนต์มีอิทธิพลอย่างนัยสำคัญสูงกว่าปริมาณเถ้ายิปซัม การใช้ของเสียผลพลอยได้ทั้งสองฟอสโฟยิปซัมและเถ้ายิปซัมได้ให้ผลการก่อสร้างราคาถูกลงและได้ประโยชน์

คุณพลและคณะ (2554) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำยิปซัมจากการกำจัด ซัลเฟอร์และฝุ่นเตาเผาปูนผสมกับดินลูกรังและหางแร่ดินขาวมาผลิตอิฐดินประสาน มีด้วยกัน 2 สูตร คือยิปซัมเทียมแทนที่ร้อยละ 11 26 36 และ 46 โดยนำหนักดินลูกรัง และฝุ่นเตาเผาปูนแทนที่ดินลูกรังด้วยอัตราส่วนร้อยละ 15 25 และ 35 ในทุกอัตราส่วนมีหางแร่ดินขาวร้อยละ 15 และ ยิปซัมเทียมร้อยละ 11 ผลสมการที่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปอิฐหาโดยวิธีบดอัดแบบ มาตรฐาน ก้อนอิฐมีขนาด 149×69×80 มิลลิเมตร และผึ่งลมเป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำอิฐตัวอย่างมา ทดสอบ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ และกำลังอัด พบว่าอิฐดินประสานชนิดผสม ยิปซัมเทียมต่ำกว่าเกณฑ์ มอก. ในทางกลับกันอิฐดินประสานชนิดผสมฝุ่นเตาเผาปูนมีค่ากำลังอัด 17.48 เมกะพาสคัล ที่ผสมฝุ่นเตาเผาปูนร้อยละ 35 ซึ่งผ่านเกณฑ์คอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 57-2545

2.6 กระบวนการเกิดยิปซัมเทียมของโรงไฟฟ้ากระบี่

โรงไฟฟ้ากระบี่เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน ซึ่งใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงใน การผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจะมีก๊าซของเสียเกิดขึ้นส่วนหนึ่งคือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ซึ่งเกิดจากสารกำมะถันที่เจือปนอยู่ในน้ำมันเตารวมตัวกับก๊าซ ออกซิเจนระหว่างการเผาไหม้ ทางโรงไฟฟ้ากระบี่ได้ใช้กระบวนการยิปซัมจากหินปูน (limestone gypsum process) ในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นระบบการกำจัดก๊าซแบบเปียก (wet type fuel gas) เพราะมีต้นทุนต่ำและใช้พื้นที่น้อย อีกทั้งยังใช้หินปูนที่มีอยู่ในบริเวณใกล้เคียงมาใช้ ในกระบวนการ ซึ่งขั้นตอนในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ระบบเตรียมน้ำหินปูน (slurry preparation system) จะใช้หินปูนจากเหมืองแร่ หินปูนเขาหัวปลัด อำเภอเขาพนม จังหวัดกระบี่ โดยหินปูนดังกล่าวจะถูกขังน้ำหนักและลำเลียงไป เก็บไว้ในอาคารเก็บหินปูน (limestone unloading) หลังจากนั้นนำหินปูนมาบดและผสมกับน้ำใน อัตราส่วนที่เหมาะสมเก็บไว้ในถังพัก (slurry tank) น้ำหินปูนจะถูกปั๊มจากถังพักไปยังเครื่องแยก ขนาด (hydro cyclone) เพื่อแยกหินปูนขนาดใหญ่กลับไปบดซ้ำอีกครั้ง ส่วนหินปูนที่ผ่านเครื่องแยก ขนาดจะนำไปเก็บไว้ที่ถังป้อนน้ำหินปูน (limestone slurry storage tank) เพื่อป้อนน้ำหินปูนไปใช้ใน ระบบต่อไป ระบบดังกล่าวได้ถูกออกแบบให้มีการไหลวนของน้ำหินปูน เพื่อป้องกันหินปูน ตกตะกอนและอุดตันภายในท่อ

2. ระบบจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (absorber system) อุปกรณ์ที่ใช้ในการดักจับ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีลักษณะคล้ายหอคอย โดยภายในจะฉาบด้วยสารทนกรดเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ด้านล่างจะเป็นอ่างบรรจุน้ำหินปูน ส่วนด้านบนจะมีชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ติดตั้งอยู่บริเวณทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ภายในเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้มีลักษณะเป็นรวงผึ้ง ดังนั้นเมื่อก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงผ่านเข้ามา จะถ่ายเทความร้อนให้น้ำภายในท่อที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนก๊าซไอเสียที่ออกมาจะมีอุณหภูมิลดลง น้ำร้อนภายในท่อจะไหลไปยังอุปกรณ์แรก เปลี่ยนความร้อนอีกชุดหนึ่งที่ติดตั้งบริเวณทางออกของอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อถ่ายเทความร้อนให้ก๊าซไอเสียร้อนขึ้น ที่ส่วนกลางของอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีหัวฉีดสเปรย์น้ำหिनปูนให้กระจายเป็นละอองเล็กๆ เพื่อให้ น้ำหिनปูนผสมกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น

การทำงานของระบบดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเริ่มต้นจากก๊าซไอเสียจากหม้อไอน้ำผ่านพัดลมดูดอากาศ (induce draft fan) ก๊าซไอเสียจะมีอุณหภูมิประมาณ 160 องศาเซลเซียส ไหลผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ามาในอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อุณหภูมิของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะลดลงเหลือ 117 องศาเซลเซียส ก๊าซไอเสียดังกล่าวจะเข้าผสมกับละอองน้ำหिनปูน น้ำส่วนหนึ่งจะระเหยกลายเป็นไอน้ำกับก๊าซไอเสีย อุณหภูมิก๊าซไอเสียจะเย็นลงจนถึงจุดอิ่มตัวประมาณ 75 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากปริมาณน้ำที่พ่นออกจากหัวฉีดได้ถูกออกแบบไว้ให้มีปริมาณสูงกว่าอัตราการระเหยมาก จึงทำให้มีน้ำผสมหिनปูนบางส่วนตกลงมาข้างล่างของอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และน้ำหिनปูนเหล่านี้จะละลายเอาก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากก๊าซไอเสียโดยอัดอากาศเข้าไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นจนได้ผลึกยิปซัมออกมาดังสมการที่ 2.6



จากปฏิกิริยาดังกล่าวก๊าซไอเสียที่ไหลออกจากอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะมีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปนอยู่น้อยมาก ก๊าซไอเสียจะผ่านตะแกรงขนาดเล็กเพื่อดักละอองน้ำที่ออกและเพิ่มอุณหภูมิก๊าซไอเสียเป็น 89 องศาเซลเซียส ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ

3. ระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม (gypsum dewatering system) ยิปซัมเหลวจากอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะถูกดูดโดยปั๊มตัวดูดซับเป่าลงล่าง (Absorber blow down pump) ไปยังเครื่องแยกยิปซัม โดยส่วนที่เป็นน้ำจะไหลไปยังถังกรอง (filtrate tank) ส่วนที่เป็นผลึกจะถูกลำเลียงไปกรองที่สายพานกรอง (belt filter) ซึ่งมีลักษณะเป็นสายพานที่มีรูพรุน (รูปที่ 2.3 ก) ที่ส่วนใต้ของสายพานจะติดอยู่กับระบบปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) เพื่อดูดน้ำออกจาก ยิปซัม น้ำที่แยกออกมาจะนำไปเก็บไว้ในถังผ้าใบ (cloth wash tank) เพื่อนำกลับไปใช้ซ้ำ ส่วนผลึกยิปซัม

ได้ลำเลียงไปตามสายพานเพื่อนำไปเก็บไว้ในถังเก็บยิปซัมดังรูปที่ 2.3 ข) โดยเฉลี่ยแล้วจะมีปริมาณยิปซัมเทียมเกิดขึ้น 12 ตันต่อชั่วโมง



ก)



ข)

รูปที่ 2.2 ระบบในโรงไฟฟ้าช่วงกำจัดยิปซัมเทียม (ก) สายพานกรอง และ (ข) ถังเก็บยิปซัมเทียม

2.7 สมบัติดัชนีและการจำแนกดิน

2.7.1 สมบัติดัชนี

ดินในแต่ละสถานที่ที่มีสมบัติเฉพาะตัวและเป็นเอกลักษณ์ของตัวเอง โดยจะแตกต่างกันไปตามลักษณะการกำเนิดของดิน ซึ่งสมบัติของมวลดินมีผลต่องานทางด้านวิศวกรรม ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างที่ใช้ดินเป็นวัสดุรองรับฐานราก จึงจำเป็นต้องทราบถึงลักษณะของสมบัติของดินชนิดนั้นๆ ซึ่งสมบัติของมวลดินสามารถแบ่งได้ดังนี้

ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content) คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำในดินกับน้ำหนักของมวลดินแห้ง (คิดเป็นร้อยละ)

พิกัดแอตเทอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits) เป็นวิธีการบ่งบอกถึงสถานะของดินเหนียวตามปริมาณความชื้นในมวลดินนั้น ประกอบด้วยหลายสถานะคือ

พิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) คือ ปริมาณความชื้นที่ทำให้ดินเปลี่ยนจากสถานะยึดหยุ่นเป็นของเหลว โดยสามารถหาค่า LL โดยใช้วิธีทดสอบตาม ASTM D-4318

พิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) คือ ปริมาณความชื้นที่ทำให้ดินเปลี่ยนสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid) เป็นสถานะพลาสติก ซึ่งค่า PL นั้นหาโดยตามวิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D - 4318

ดัชนีพลาสติก (Plastic Index, PI) คือ ผลต่างระหว่างพิกัดเหลวกับพิกัดพลาสติก ($PI = LL - PL$) ซึ่งค่า PI แสดงถึงปริมาณความชื้นในมวลดินที่ยังทำให้ดินคงสภาพพลาสติกอยู่และ

แสดงถึงปริมาณของอนุภาคของมวลดินเหนียวในดินนั้น เช่น ถ้าค่า PI สูงแสดงว่ามีอนุภาคของดินเหนียวอยู่มาก

หน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight) คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักทั้งหมดของมวลดินกับปริมาตรทั้งหมดของมวลดิน

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) คือ อัตราส่วนระหว่างหน่วยน้ำหนักของดินในอากาศกับหน่วยน้ำหนักของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยสามารถหาค่า G_s โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D - 854
















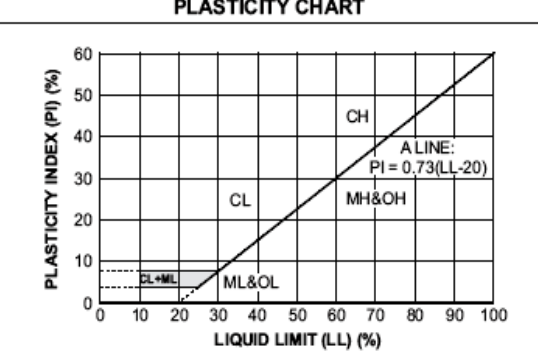
ตารางที่ 2.5 ค่าความถ่วงจำเพาะของดินประเภทต่างๆ

ชนิดของดิน	ความถ่วงจำเพาะ
กรวด (Gravel)	2.65 – 2.68
ทราย (Sand)	2.65 – 2.68
ทรายแป้ง (Silt) พวกอินทรีย์ (Inorganic)	2.62 – 2.68
ดินเหนียว (Clay) พวกอินทรีย์ (Inorganic)	2.68 – 2.75
ดินเหนียว (Clay) พวกอินทรีย์ (Organic)	2.58 – 2.65

ที่มา: สถาพร (2542)

2.7.2 การจำแนกดิน

การจำแนกดิน (soil classification) ออกเป็นกลุ่มย่อยๆ โดยอาศัยสมบัติของ พิกัดของแอตเทอร์เบิร์ก (Atterberg's limits) และขนาดอนุภาค (เม็ดดิน) ซึ่งการจำแนกที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 2 ระบบ คือ ระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified soil classification system) และ AASHTO ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะ ระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ โดยที่การจำแนกจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ดินเม็ดหยาบ (coarse grained soil) และดินเม็ดละเอียด (fine grained soil) ซึ่งหลักในการจัดแบ่งดินระบบนี้ดูได้จากรูปที่ 2.4 โดยที่จะใช้สัญลักษณ์เป็นอักษรภาษาอังกฤษแทนชื่อกลุ่มของดินแต่ละกลุ่มซึ่งจะมีอักษรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปตัวหน้าเป็นกลุ่มหลักและตัวที่สองจะเป็นกลุ่มย่อยลงไปตัวอักษรแต่ละตัวจะมีความหมายในตัวเองดังนี้

UNIFIED SOIL CLASSIFICATION AND SYMBOL CHART		LABORATORY CLASSIFICATION CRITERIA	
COARSE-GRAINED SOILS (more than 50% of material is larger than No. 200 sieve size.)			
GRAVELS More than 50% of coarse fraction larger than No. 4 sieve size	Clean Gravels (Less than 5% fines)		
		GW	Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines
		GP	Poorly-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines
	Gravels with fines (More than 12% fines)		
		GM	Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures
		GC	Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures
SANDS 50% or more of coarse fraction smaller than No. 4 sieve size	Clean Sands (Less than 5% fines)		
		SW	Well-graded sands, gravelly sands, little or no fines
		SP	Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines
	Sands with fines (More than 12% fines)		
		SM	Silty sands, sand-silt mixtures
		SC	Clayey sands, sand-clay mixtures
FINE-GRAINED SOILS (50% or more of material is smaller than No. 200 sieve size.)			
SILTS AND CLAYS Liquid limit less than 50%		ML	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty of clayey fine sands or clayey silts with slight plasticity
		CL	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays
		OL	Organic silts and organic silty clays of low plasticity
SILTS AND CLAYS Liquid limit 50% or greater		MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts
		CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays
		OH	Organic clays of medium to high plasticity, organic silts
HIGHLY ORGANIC SOILS		PT	Peat and other highly organic soils
		Determine percentages of sand and gravel from grain-size curve. Depending on percentage of fines (fraction smaller than No. 200 sieve size), coarse-grained soils are classified as follows: Less than 5 percent GW, GP, SW, SP More than 12 percent GM, GC, SM, SC 5 to 12 percent Borderline cases requiring dual symbols	
		PLASTICITY CHART 	

รูปที่ 2.3 แผนภาพระบบการจำแนกดินเอกภาพ

ที่มา: <http://matrix.vtrc.virginia.edu/DATA/GINT/vdotusc.PDF>

ดินมวลหยาบแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ G หมายถึงพวกกรวด (ย่อมาจาก gravel) และ S หมายถึงพวกทราย (ย่อมาจาก sand) นอกจากนี้ยังแบ่งเป็นกลุ่มย่อย (อักษรตัวที่ 2) ได้ 4 กลุ่มย่อย คือ W หมายถึง ดินละเอียดดี (ย่อมาจาก well graded) P หมายถึง ดินละเอียดเลว (ย่อมาจาก poorly graded) M หมายถึง ทรายแป้ง (ย่อมาจาก Mjale = Silt) C หมายถึง ดินเหนียว(ย่อมาจาก Clay) ดังนั้นจึงเขียนสัญลักษณ์ชื่อของดินเม็ดหยาบได้ดังนี้คือ GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM และ SC

ค่ากำลังเฉือนและมุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน เป็นค่าต่างๆ ที่ได้มาจากการทดสอบทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบเฉือนแบบแวน (field Vane shear test - FV-Test) การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (unconfined compression test) การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง (direct shear test) และการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression test)

การทดสอบแรงอัดแบบแกนเดียว และการทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรงเป็นการทดสอบที่ยังไม่ได้ควบคุมสถานะความดันตามความเป็นจริงในธรรมชาติ ที่มีค่าหน่วยแรงแนวนอน (horizontal stress, σ_h) เป็นสัดส่วนกับค่าหน่วยแรงในแนวตั้ง (vertical stress, σ_v) ตามค่าน้ำหนักแช่น้ำต่อหน่วยปริมาตร (submerged unit weight) ของดินที่กดทับอยู่เหนือขึ้นไป ตามค่าสัมประสิทธิ์ความดันของดิน (earth pressure coefficient, K)

การทดสอบแรงเฉือนของดินที่ทำการทดลองมาแล้ว ยังไม่ได้คำนึงถึงความแตกต่างของค่าความดันในแนวตั้ง 2 ดังกล่าว และไม่สามารถอัดความดันน้ำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturate) เพื่อวัดความดันน้ำในโพรง (pore water pressure measurement) ได้ ส่วนการทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง สามารถอัดตัวอย่างดิน (consolidate) ได้ ส่วนการทดสอบแรงอัดแบบแกนเดียวไม่สามารถอัดตัวอย่างดินได้ และวิธีการทดสอบทั้ง 2 วิธี ไม่สามารถวัดความดันน้ำในโพรงได้ จึงไม่สามารถหาค่าปัจจัยความเค้นประสิทธิผล (effective stress parameters) ได้ ยกเว้นการทดสอบกระทำแรงเฉือนแบบระบายน้ำ (drained) ด้วยการเดินเครื่องทดสอบแรงเฉือนช้ามาก ๆ ที่ค่าความดันน้ำในโพรงระบายได้ทัน จึงไม่มีความดันน้ำกลองเนื่องโดยตรง การทดสอบกำลังเฉือนของดินดังกล่าวทั้งหมดจึงยังไม่สมบูรณ์ เพียงแต่สามารถใช้ผลการทดสอบในงานออกแบบพื้นฐานเท่านั้น



รูปที่ 2.5 เครื่องมือทดสอบแรงอัดแกนเดียว

ที่มา: <http://www.thaipilingrig.co.th/unconfined.html>

การทดสอบซีบีอาร์ใช้การวัดความต้านทานการเลื่อนไถลของดินที่มีปริมาณน้ำสามารถควบคุมได้และความหนาแน่น ภายหลังจากทดสอบได้ตัวเลขระบุอัตราการรับแรงแบกทาน (ซีบีอาร์) ค่าซีบีอาร์เป็นตัวเลขไม่คงที่และแปรผันตามความชื้นและความหนาแน่นของดิน ภายหลังจากหาค่าของตัวเลขซีบีอาร์ของดินนำไปใช้เป็นชั้นพื้นทางหรือต่ำกว่าชั้นพื้นฐานในงานถนนหรือสนามบิน ซึ่งชั้นพื้นทาง ต่ำกว่าชั้นพื้นทางและแม้กระทั่งการโก่งของความหนาคลุมผิวทางสามารถหาโดยการใส่กราฟตามมืออยู่ในการถ่ายโอนคลุมถึงถนนมืออยู่มากมาย กราฟถ่ายโอนโยงไปถึงคำอธิบายและการใช้ดินตามตัวเลขซีบีอาร์ได้ให้ไว้ในตารางที่ 2.6 (Aytekin, 2004)

ตารางที่ 2.6 การจำแนกดินและการใช้ตามซีบีอาร์

CBR	นิยามดิน	การใช้ในถนน	การจำแนกดิน	
			USCS	ASSHO
0–3	Very bad	Subgrade	OH,CH,MH,OL	A5, A6, A7
3–7	Bad-middle	Subgrade	OH,CH,MH,OL	A4, A5, A6, A7
7–20	Middle	Subbase	OL,CL,ML,SC,SM,SP	A2, A4, A6, A7
20–50	Well	Base and subbase	GM,GC,SW,SM,SP,GP	A1b, A2–5, A3, A2–6
>50	Very well	Base	GW,GM	A1a, A2–4, A3

ที่มา Aytekin (2004)

2.9 ระเบียบวิธีทางสถิติที่ใช้

ระเบียบวิธีทางสถิติ คือ กระบวนการในการเก็บรวบรวม จัดระเบียบ วิเคราะห์ แปลความหมายและนำเสนอข้อมูลในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่าย เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ในการตัดสินใจโดยอาศัยข้อมูลนั้นเป็นพื้นฐาน ระเบียบวิธีทางสถิติประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การวางแผนและเก็บรวบรวมข้อมูล หมายถึง กระบวนการและเทคนิคที่ใช้ในการแสวงหาข้อมูลที่ต้องการเพื่อจะนำไปดำเนินการตามหลักการของวิชาสถิติ

2. การจัดระเบียบข้อมูล หมายถึง การนำข้อมูลที่รวบรวมได้นั้นมาจัดระเบียบใหม่ให้เป็นกลุ่มเพื่อสะดวกแก่การวิเคราะห์หรือการนำเสนอข้อมูลนั้น และให้ผู้ที่สนใจสามารถเข้าใจ สมบัติและความหมายของข้อมูลนั้นๆ ได้อย่างสะดวก

3. การวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นนี้ ข้อมูลที่ได้รับการจัดระเบียบแล้วจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติต่างๆ เพื่อสรุปหรือหาค่าของสมบัติต่างๆ ของข้อมูลนั้นตามต้องการ
4. การแปลความหมายข้อมูล เป็นการนำข้อมูลที่วิเคราะห์หาค่าสมบัติของสิ่งนั้นๆ แล้วนำมาแปลความหมายซึ่งจะทำให้เข้าใจยิ่งขึ้น

2.9.1 สถิติพื้นฐาน

ค่าสถิติพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ค่ากลางของข้อมูล (Measure of central tendency) และค่าการวัดการกระจายของข้อมูล (Measure of dispersion) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การหาค่ากลางของข้อมูล เป็นการหาตัวแทนของข้อมูลทั้งหมด ตัวสถิติที่นิยมใช้วัดค่ากลางของข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Mean, \bar{x}) สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.7

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots (2.7)$$

โดยที่ \bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

x_i คือ ค่าของข้อมูลตัวที่ i

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

การวัดการกระจายของข้อมูล เป็นค่าที่แสดงการกระจายหรือความแปรปรวนของข้อมูล ถ้าเป็นการวัดการกระจายข้อมูลเพียงชุดเดียว ได้แก่ ความแปรปรวน (Variance, SD^2) หรือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กัน ดังแสดงในสมการที่ 2.8 และ 2.9

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$SD^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \dots\dots\dots (2.9)$$

โดยที่ SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

SD^2 คือ ความแปรปรวน

$X - X_i$ คือ ส่วนเบี่ยงเบน

n คือ จำนวนข้อมูล

2.9.2 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

คือการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลตั้งแต่สองชุดขึ้นไป โดยข้อมูลชุดหนึ่งเรียกว่า ตัวแปรตาม (Dependent variable) นิยมเขียนแทนด้วย Y และข้อมูลอีกชุดหนึ่งเรียกว่า ตัวแปรอิสระ (Independent variable) นิยมเขียนแทนด้วย X มีวัตถุประสงค์ที่จะประมาณหรือพยากรณ์ค่าตัวแปรตามซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มจากตัวแปรอิสระ โดยการวิเคราะห์การถดถอยสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. การถดถอยอย่างง่าย (Simple regression) เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว โดยตัวแปรหนึ่งคือ ตัวแปรตาม (Y) อีกตัวแปรหนึ่งคือ ตัวแปรอิสระ (X) หรือกล่าวง่ายๆ คือเป็นการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่พิจารณาให้มีตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวเท่านั้น เขียนในรูปฟังก์ชันได้ดังสมการที่ 2.10

$$Y = f(X) \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

โดยที่ X คือ ตัวแปรอิสระ (Independent variables)

Y คือ ตัวแปรตาม (Dependent variables)

2. การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 3 ตัวขึ้นไป โดยที่ตัวแปรหนึ่งคือตัวแปรตาม ตัวแปรอื่นๆ เป็นตัวแปรอิสระ ซึ่งมีจำนวนตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป เขียนในรูปฟังก์ชันทั่วไปของการถดถอยพหุคูณกรณีมีตัวแปรอิสระ k ตัว แสดงได้ดังสมการที่ 2.11

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

โดยที่ X_1, X_2, X_3 คือ ตัวแปรอิสระตัวที่ 1, 2, 3 ตามลำดับ

X_k คือ ตัวแปรอิสระตัวที่ k

Y คือ ตัวแปรตาม

3. การถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear regression) ในการศึกษาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรไม่ว่าจะเป็นแบบการถดถอยอย่างง่ายหรือการถดถอยพหุคูณ ลักษณะของความสัมพันธ์เป็นได้ทั้งเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในกรณีที่สมการถดถอยที่ประมาณได้มีกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัวแปรเป็นเส้นตรง เรียกว่า การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear Regression) และในกรณีที่ตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเป็นเส้นตรง เรียกว่า การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression) แต่ลักษณะของข้อมูลบางประเภทอาจไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งเรียกว่า การถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการศึกษากการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นจึงมีการศึกษาทั้งที่เป็นแบบการถดถอยอย่างง่ายและการถดถอยพหุคูณ

4. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปร สิ่งที่น่ามาใช้เป็นหลักในการศึกษาคือ ข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์เกี่ยวกับตัวแปรนั้นนั่นเอง เมื่อได้ข้อมูลแล้วต้องนำข้อมูลมาพิจารณาว่าตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันหรือไม่ และสัมพันธ์กันในรูปแบบเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น ในการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรอย่างง่ายนิยมนำข้อมูลมาพล็อตกราฟ โดยแกนตั้งแทนค่าด้วยตัวแปรตาม Y แกนนอนแทนค่าด้วยตัวแปรอิสระ X เรียกว่า แผนภาพการกระจาย (Scatter diagram) ซึ่งแผนภาพการกระจายทำให้มองเห็นลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างจุดที่พล็อตถ้าลากเส้นผ่านจุดเหล่านี้ จะได้เส้นซึ่งถือว่าเป็นตัวแทนที่แสดงลักษณะหรือแนวโน้มของความสัมพันธ์ เส้นนี้เรียกว่า เส้นการถดถอย (Regression line) เส้นการถดถอยจะเป็นเส้นตรงหรือไม่เป็นเส้นตรงขึ้นอยู่กับลักษณะของจุดที่พล็อตบนแผนภาพการกระจาย ซึ่งวิธีที่นิยมในการหาเส้นแทนลักษณะของความสัมพันธ์คือ วิธีกำลังสองน้อยที่สุดอย่างธรรมดา (Ordinary least square method)

5. การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Ordinary least square : OLS) เป็นวิธีหาค่าประมาณพารามิเตอร์ของสมการถดถอยที่ให้สมบัติ 3 ประการ คือ มีความเป็นเชิงเส้น (Linear) เป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอน (Unbiased estimator) และมีความแปรปรวนต่ำที่สุด (Minimum variance)

2.9.3 ค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์งานดิน

เส้นสมการถดถอยที่จะมีความน่าเชื่อถือจะต้องมีการใช้ค่าทางสถิติที่ทำการวิเคราะห์ถึงความถูกต้องและเหมาะสมของสมการ โดยมีค่าสถิติที่จำเป็นดังนี้

1. สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of determination, r^2) เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างผลบวกกำลังสองที่อธิบายได้ โดยสมการถดถอยกับผลบวกกำลังสองทั้งหมด ดังสมการที่ 2.12 และสมการที่ 2.13

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$r^2 = \frac{b \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \quad \text{หรือ} \quad r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \dots\dots\dots (2.13)$$

โดยที่ $(Y_i - \bar{Y})^2$ คือ ผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Sum of square total)

$(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$ คือ ผลรวมกำลังสองที่อธิบายโดยการถดถอย (Sum- of Square explained by regression)

$(Y_i - \hat{Y}_i)^2$ คือ ผลรวมกำลังสองเนื่องจากความคลาดเคลื่อน (Sum of square due to error)

e_i คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Error term)

สมบัติของค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด คือ r^2 มีค่าเป็นบวกเสมอและ r^2 มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 หรือมีค่าตั้งแต่ 0% ถึง 100% นั่นคือ $0 \leq r^2 \leq 1$ หรือ $0\% \leq r^2 \leq 100\%$ โดยที่ ความหมายของสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด คือเป็นตัววัดความใกล้ชิดระหว่างเส้นถดถอยกับค่า Y บน แผนภาพการกระจายดังนี้คือ

r^2 เท่ากับ 1 ค่า Y จะอยู่บนเส้นถดถอยทุกจุด

r^2 มีค่ามาก ค่า Y จะอยู่ใกล้กับเส้นถดถอย

r^2 มีค่าน้อย ค่า Y จะอยู่ห่างจากเส้นถดถอย

r^2 เท่ากับ 0 ค่า Y จะกระจายห่างกันกับเส้นถดถอยมากไม่พบแนวโน้มที่ควรเป็น

ค่า r^2 เป็นตัวแสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ X ที่มีต่อตัวแปรตาม Y เนื่องจากค่า r^2 ที่คำนวณได้บอกให้ทราบว่า การกระจายทั้งหมดของค่า Y นั้นสามารถอธิบายได้จากเส้นการถดถอย ก็เปอร์เซ็นต์ หรือกล่าวได้ว่า X มีอิทธิพลต่อ Y ก็เปอร์เซ็นต์ เช่น ถ้า r^2 เท่ากับ 0.7958 หมายความว่า สมการถดถอยนี้สามารถอธิบายการกระจายของ Y ได้ 79.58% หรือค่า X ที่กำลัง พิจารณาอยู่มีอิทธิพลต่อ Y เท่ากับ 79.58% ส่วนตัวแปรอิสระอื่นๆ นอกเหนือไปจาก X รวมแล้วจะ มีอิทธิพลต่อ Y เท่ากับ $100 - 79.58$ เท่ากับ 20.42%

2. การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Multi Correlation analysis) เป็นการศึกษาถึงระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปว่ามีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อย ในการวิเคราะห์จะพิจารณาเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation) สำหรับข้อมูลตัวอย่างใช้สัญลักษณ์ r ซึ่งหาได้จากสมการ 2.14

$$r = \pm \sqrt{\frac{b_1 \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad \text{หรือ} \quad r = \pm \sqrt{\frac{b_1^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

โดยที่ b_1 คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของข้อมูลตัวอย่าง

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นการวัดทิศทางและระดับความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรคู่สองตัว โดย r (มีเครื่องหมายเหมือนกับค่า b_1) มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง $+1$ ซึ่งมีความหมายดังนี้

ถ้า r มีค่าเท่ากับ -1 แสดงว่าข้อมูลทั้งหมดไม่มีความเบี่ยงเบน สามารถลากเส้นตรงผ่านได้ ยิ่งถ้าค่า r มีค่าใกล้เคียงกับ 1 มากเท่าใดแสดงว่าข้อมูลนั้นมีความสัมพันธ์กันมาก

ถ้า r เท่ากับ 0 แสดงว่าตัวแปรคู่คู่นั้นไม่มีความสัมพันธ์กัน

ถ้า r มีค่าใกล้เคียงศูนย์ แสดงว่ามีความสัมพันธ์น้อยมาก เครื่องหมายบวกลบแสดงถึงลักษณะของความสัมพันธ์ ถ้ามีเครื่องหมายบวกแสดงว่าลักษณะความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกันแต่ถ้าเครื่องหมายลบแสดงว่ามีลักษณะความสัมพันธ์แบบผกผัน โดยความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์แสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.7 ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์

การถดถอย	สหสัมพันธ์
เป็นการกำหนดความสัมพันธ์ของตัวแปร (X,Y) ว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร	เป็นการศึกษาถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปร (X,Y) ว่าสัมพันธ์กันมากน้อยแค่ไหน
ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งลักษณะของความสัมพันธ์จะเป็นเชิงเส้นหรือไม่ใช่เชิงเส้นก็ได้	ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกรณีที่เป็นเชิงเส้น (Linear relation)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ดินจากบ่อดินยืมในตำบลทุ่งกง อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างเป็นจำนวนมากเห็นจากแหล่งบ่อดินแต่ละบ่อมีการขุดดินเป็นพื้นที่บริเวณกว้างและลึกมาก ดังรูปที่ 3.1 ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำดินทุ่งกงมาใช้ในการก่อสร้างถนนในชั้นดินถม แต่เมื่อทำการทดสอบสมบัติเบื้องต้นปรากฏว่าการรับแรงแบกทาน (CBR) แบบแช่น้ำไม่ได้ตามข้อกำหนดในงานถนน จึงมีแนวคิดในการที่จะปรับปรุงดินทุ่งกงเพื่อมาใช้ก่อสร้างถนนได้

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยเก็บจากบ่อดินยืมแหล่งหนึ่งในตำบลทุ่งกงโดยเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ(Disturbed Sample) ที่ความลึกจากระดับผิวดิน 2-3 เมตร นำมาอบแห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200



รูปที่ 3.1 บ่อดินยืมแห่งหนึ่งในตำบลทุ่งกง

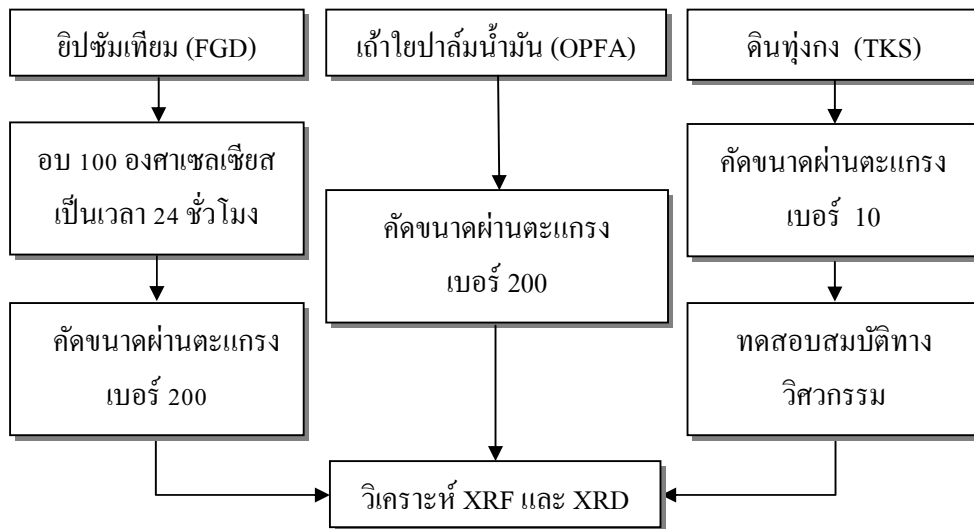
ยิปซัมเทียมได้รับการสนับสนุนจากการไฟฟ้าผลิต โรงไฟฟ้ากระบี่ โดยนำมาอบที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (งานวิจัยนี้เรียกว่า FGD)

เถ้าไพล่าม่น้ำมัน ได้รับการสนับสนุนจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มจากโรงงาน
ทักษิณปาล์มน้ำมัน นำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ในงานวิจัยนี้เรียกว่า OPFA) ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 (ก) ลักษณะขี้ปซัมเทียม (FGD) (ข) ลักษณะเถ้าไพล่าม่น้ำมัน (PPFA)

3.2 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ



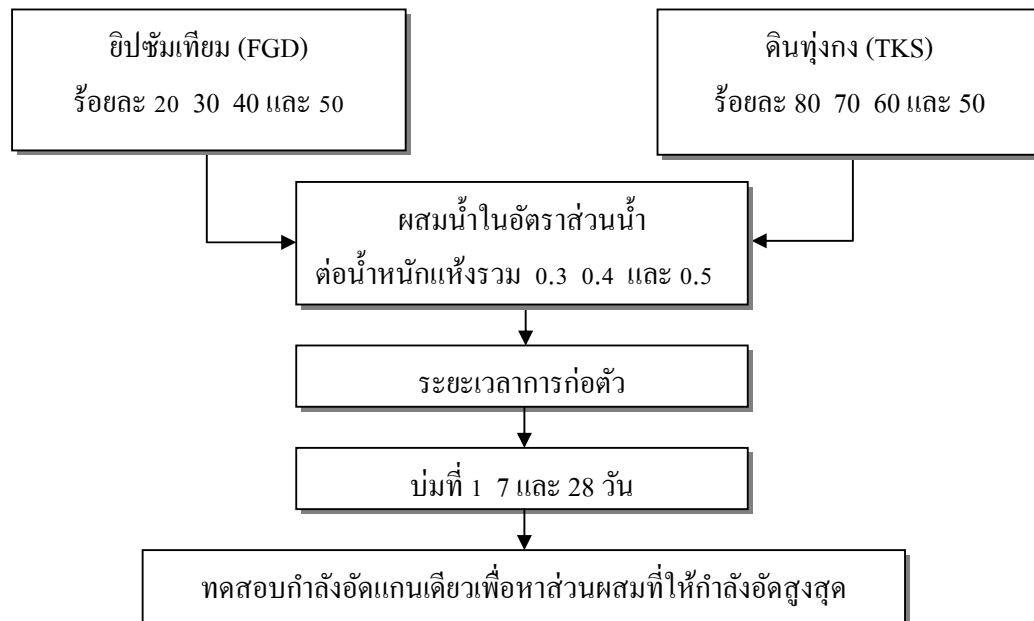
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ

การเตรียมตัวอย่างมีการออกแบบส่วนผสมระหว่างดินทุ่งกง ขี้ปซัมเทียมและเถ้า
ปาล์มน้ำมันซึ่งจะแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะทดสอบเพื่อหาการรับกำลังสูงสุดของดิน
ทุ่งกงที่แทนที่ด้วยขี้ปซัมเทียมร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยใช้อัตราส่วนน้ำที่ 0.3 0.4 และ 0.5

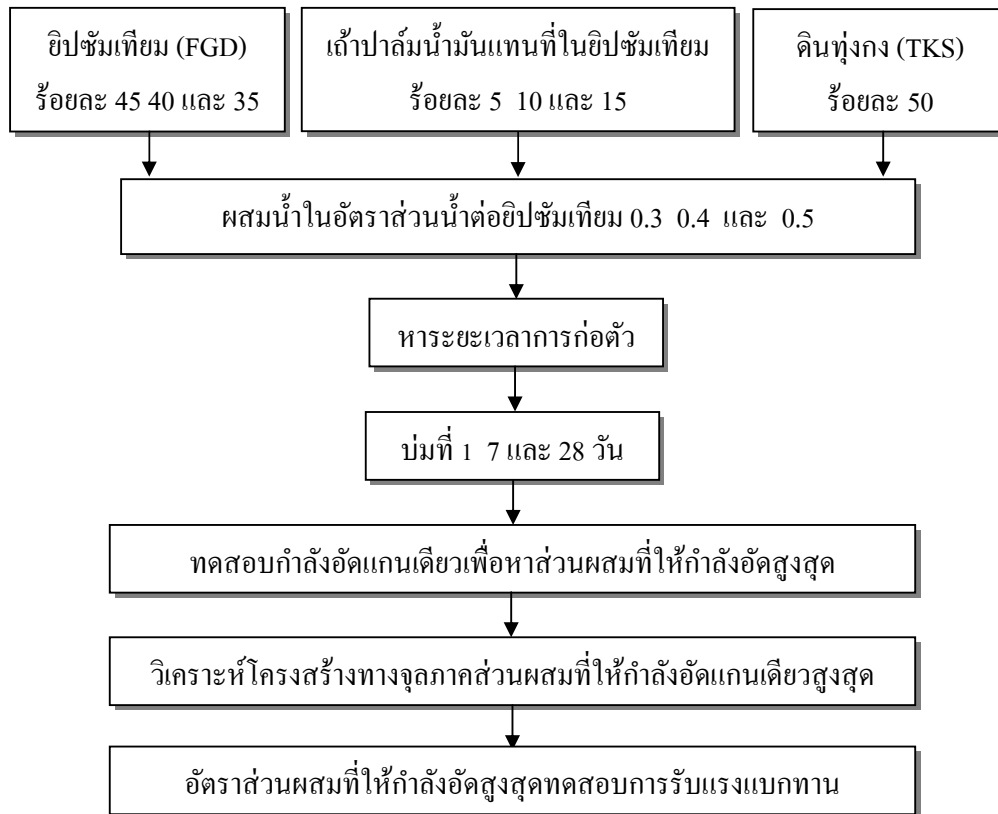
ของน้ำหนักแห้งรวม เพื่อนำมาทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) สูงสุด ตามรูปที่ 3.4 หลังจากได้อัตราส่วนผสมที่ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุดขั้นที่สองก็จะใช้เถ้า ปาล์มน้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียมบางส่วนที่ร้อยละ 5 10 และ 15 โดยใช้อัตราส่วนน้ำที่ 0.3 0.4 และ 0.5 ของน้ำหนักแห้งรวมตามรูปที่ 3.5 โดยใช้สัญลักษณ์ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษาโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักแห้งรวม 0.3 0.4 และ 0.5 ของทุกอัตราส่วน

อัตราส่วนผสม (โดยน้ำหนักแห้งรวม)		สัญลักษณ์
OPFA	FGD	
0	20	OPFA 0 FGD 20
0	30	OPFA 0 FGD 30
0	40	OPFA 0 FGD 40
0	50	OPFA 0 FGD 50
5	45	OPFA 5 FGD 45
10	40	OPFA 10 FGD 40
15	35	OPFA 15 FGD 35



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการหาส่วนผสมยิปซัมเทียมแทนที่ดินทุ้งกงที่ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุด



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยเถ้าไยปลาล้มน้ำมัน

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดแกนเดียวในอัตราส่วนต่างๆ โดยนำไปหล่อในแบบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.9 cm. สูง 7.8 cm. ตามแบบมาตรฐาน (ASTM D2166) โดยใช้เครื่องเขย่าคอนกรีตเพื่อไล่ฟองอากาศ แล้วทิ้งไว้ให้แข็งตัวถอดออกจากแบบห่อด้วยแผ่นพลาสติกชนิดบางและห่อหุ้มแผ่นอลูมิเนียมอีกชั้นหนึ่งนำไปบรรจุลงในถุงพลาสติกเก็บไว้ในภาชนะปิดฝาอย่างมิดชิดเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นใต้น้ำในภาชนะ โดยรอบของก้อนตัวอย่างเพื่อควบคุมความชื้นในอากาศ แล้วบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 0 7 และ 28 วัน ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.6 (ก) แบบหล่อตัวอย่าง (ข) ตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว
(ค) ตัวอย่างที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก แผ่นอลูมิเนียมและบรรจุถุงพลาสติก (ง) การเก็บตัวอย่างบ่ม
ในภาชนะที่อุณหภูมิห้อง

3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบทางกายภาพของดินทุ้งก

1) การทดสอบค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) และค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318

2) การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ตามมาตรฐาน ASTM D 854

3) การวิเคราะห์การกระจายขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution) เทคนิคการทดสอบการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ เครื่องมือทดสอบ Laser Particle Size Analyzer (COULTER LS 230), Dry Powder Module วิธีการทดสอบอ้างอิง WI - RES - LSPA - 001 สภาวะการทดสอบการวัดการกระจายของอนุภาคตัวอย่างด้วยของเหลว

(น้ำ) Run Speed 60 % Model Garnet.rfd PIDS included ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

4) การจำแนกดินแบบ Unified Soil Classification System ตามมาตรฐาน ASTM D 2487

5) การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166

3.3.2 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของดินทุ่งกง

การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีเพื่อศึกษาเบื้องต้น ซึ่งเป็นการประเมินถึงความเหมาะสมของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี เทคนิคการทดสอบ X - Ray fluorescence spectrometer เครื่องมือทดสอบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรมิเตอร์ (PHILIPS PW2400) วิธีการทดสอบอ้างอิง WI - RES - XRF - 001 และ WI - RES - XRF - 002 ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.4 การทดสอบดินทุ่งกงกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยยิปซัมเทียมและเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

3.4.1 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ของดินทุ่งกงกรณีปรับปรุงคุณภาพ

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบเป็นการเตรียมตัวอย่างจากการเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample) นำมาผสมยิปซัมเทียมและเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ทำให้แน่นโดยใช้เครื่องเขย่าไล่ฟองอากาศ ในการเตรียมตัวอย่างจะใช้ปริมาณน้ำที่ร้อยละ 0.3 0.4 และ 0.5 ของน้ำหนักแห้งรวม บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 0 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ในทุกอัตราส่วนการผสม แต่ละกรณีทดสอบ 3 ตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์ค่ากำลังอัด (Unconfined Compressive Strength), ค่า Modulus of Elasticity และ ค่า Strain at Failure ของดินทุ่งกงที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยิปซัมเทียมและเถ้าไยปาล์มน้ำมัน แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ

3.4.2 การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) ของดินทุ่งกงกรณีปรับปรุงคุณภาพ

การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) ตามมาตรฐาน ASTM D 1883 แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบเป็นการเตรียมตัวอย่างจากการเก็บ

ตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample) นำมาผสมยิปซัมเทียมและเถ้าไพล่าลัมน้ำมัน ทำให้น้ำหนักแห้งรวม บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 0 7 และ 28 วัน ตามลำดับ เฉพาะดินทุ้งกง ที่ปรับปรุง อัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่านั้น แต่ละกรณีทดสอบ 3 ตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์ในการใช้เป็นวัสดุงานทาง

3.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินทุ้งกงกรณีปรับปรุงคุณภาพ

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่เฉพาะตัวอย่างที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด เทคนิคการทดสอบเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรกชัน เครื่องมือทดสอบเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (PHILIPS X'Pert MPD) วิธีการทดสอบตามรายละเอียดในการปฏิบัติงานการใช้เครื่อง XRD (WI - RES - XRD - 001) ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของดินทุ้งกงกรณีปรับปรุงคุณภาพ

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค เฉพาะอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเพื่อเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและการเกิดแร่ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) เทคนิคการทดสอบถ่ายภาพอิเล็กตรอนไมโครกราฟ เครื่องมือทดสอบถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM - 5800LV, JEOL) วิธีการทดสอบอ้างอิง WI - RES - SEM5800 - 001 และ WI - RES - SEM - 001 สภาวะการทดสอบ High Vacuum mode ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทที่ 4

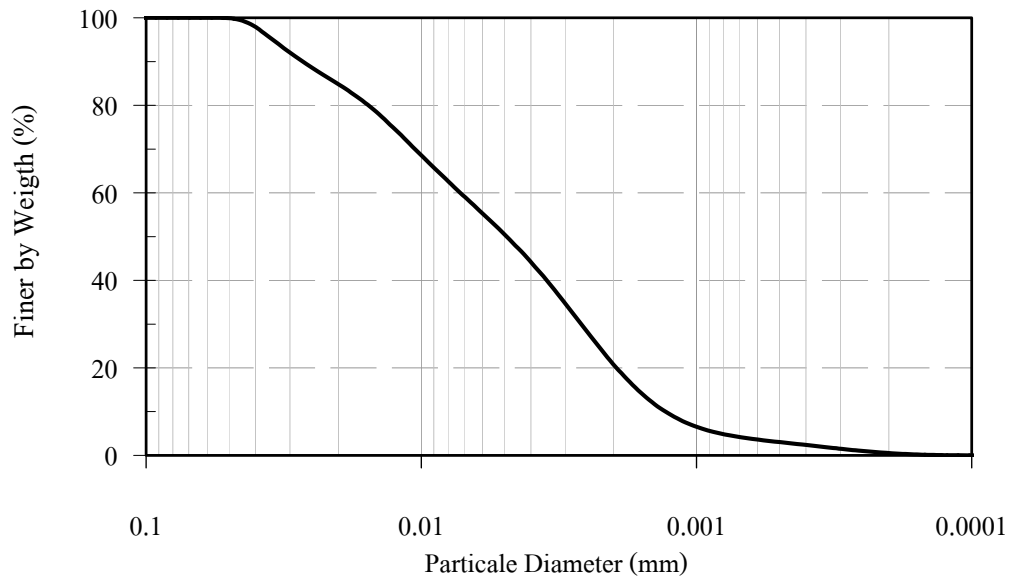
ผลทดสอบและอภิปรายผล

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินจากบ่อดินยืม ในตำบลทุ่งกง อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาดเม็ดดิน พิกัดแอดเทอร์เบอร์ก ส่วนสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ กำลังอัดแกนเดียวทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ การรับแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรสมบัติต่างๆ ของดินทุ่งกงที่ปรับปรุง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 สมบัติของดินทุ่งกงกรณีที่ยังมิได้ปรับปรุงคุณภาพ

4.1.1 สมบัติทางกายภาพของดินทุ่งกง

ดินที่ใช้ในการทดลองเก็บตัวอย่างบริเวณบ่อดินยืมที่มีความลึก 1–2 เมตร จากผิวดิน โดยเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ เพื่อนำมาทดสอบสมบัติของดินเบื้องต้น ลักษณะของดินทุ่งกงจะมีสีน้ำตาลแดง เม็ดดินมีความละเอียด ที่เป็นเช่นนั้นเพราะดินทุ่งกงเกิดจากการสลายตัวของแร่ธาตุในดินเป็นเวลานาน ส่วนมากประกอบไปด้วย ซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ซึ่งเหล็กออกไซด์นี้เป็นสาเหตุทำให้ดินทุ่งกงมีสีน้ำตาลแดง มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.69 เมื่อจำแนกดินทุ่งกงตามขนาดของเม็ดดินตามระบบ MIT ตรวจสอบขนาดด้วยวิธีวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (Laser particle size analysis) พบว่าทรายแป้ง (Silt) ขนาด 0.002 – 0.06 มม. เท่ากับร้อยละ 79.10 ปริมาณดินเหนียว (Clay) ขนาด < 0.002 มม. เท่ากับร้อยละ 20.90 ดังรูปที่ 4.1 และจากการวิเคราะห์คัดขนาด (Sieve analysis) พบว่าดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 คิดเป็นร้อยละ 80.1 ซึ่งจัดว่าเป็นดินเม็ดละเอียด ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) ค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) และค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index) เท่ากับร้อยละ 23.1 15.4 และ 7.7 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากแผนภูมิสภาพความเหนียว (Plasticity chart) พิกัดที่ได้จะอยู่เหนือเส้น A-line ในบริเวณแรงแงาโดยจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification ได้เป็นชนิด ML - CL จัดเป็นตะกอนปนดินเหนียวมีพลาสติกต่ำ



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของเม็ดดินทุ้งกงด้วยวิธี Laser particle size analysis

4.1.2 สมบัติทางวิศวกรรมของดินทุ้งกง

จากผลทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินทุ้งกงพบว่า ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินทุ้งกงมีค่ากำลังอัดแบบไม่แช่น้ำเท่ากับ 8.32 ksc. ส่วนการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวแบบแช่น้ำไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากก้อนตัวอย่างสลายในน้ำ สำหรับผลการทดสอบค่าอัตราส่วนรับแรงแบกทานแบบแคลิฟอร์เนีย (California Bearing Ratio Test) เมื่ออัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ความชื้นเหมาะสม OMC แบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำมีค่าเท่ากับร้อยละ 116.9 และ 2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าดินทุ้งกงมีแรงแบกทานได้ดีในสถานะที่มีความชื้นน้อย ในทางกลับกันเมื่อมีความชื้นสูงทำให้กำลังลดลงเป็นอย่างมาก ดังตารางที่ 4.1

4.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินทุ้งกง

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของดินทุ้งกงโดยวิธี (X-Ray Fluorescence XRF) พบว่ามี Al_2O_3 และ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก มีค่ารวมกันได้สูงถึงร้อยละ 84.46 ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่าดินทุ้งกงมีแนวโน้มความเหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี เนื่องจากวัสดุประสานยิปซัมเมื่ออบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีองค์ประกอบทางเคมี CaO มีค่าสูงถึงร้อยละ 70.43 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ CaO ในปูนซีเมนต์สามารถทำปฏิกิริยาทาง

เคมีกับซิลิกาและอะลูมินาที่มีอยู่มากในดินได้ดี ส่วนองค์ประกอบรองของดินทุ่งกงเช่น Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 6.72

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางวิศวกรรม ของดินทุ่งกง

สมบัติทางกายภาพ	ผลทดสอบ
พิกัดเหลว (Liquid Limit -L.L.)	23.1%
พิกัดพลาสติก (Plastic Limit -P.L.)	15.4%
ดัชนีพลาสติก (Plastic Index -P.I.)	7.7%
ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	80.12%
การกระจายขนาด (ตามระบบ MIT)	
ทราย (Sand) ขนาด 0.06 – 2 มม.	-
ดินตะกอน (Silt) ขนาด 0.002-0.06 มม.	79.10%
ดินเหนียว (Clay) ขนาด < 0.002 มม.	20.90%
ประเภทของดินตามระบบ Unified Soil Classification	ML-CL
ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (OMC)	7.03%
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density)	2.10 g/cm ³
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	2.69
สมบัติทางวิศวกรรม	
กำลังอัดแกนเดียว ไม่แช่น้ำ Unsoak (ความชื้นที่ OMC)	8.32 ksc
กำลังอัดแกนเดียว แช่น้ำ Soak (ความชื้นที่ OMC)	ไม่สามารถทดสอบได้
CBR แบบเกินมาตรฐาน ไม่แช่น้ำ	116.9%
CBR แบบเกินมาตรฐาน แช่น้ำ	2.0%

K_2O เท่ากับ 1.99%, TiO_2 เท่ากับ 0.98 %, P_2O_5 เท่ากับ 0.51 %, CaO เท่ากับ 0.41 % , ZrO_2 เท่ากับ 0.08% และ ZnO เท่ากับ 0.99 % สำหรับค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการเผา (LOD) เท่ากับ 4.37% ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินทุ้งกง ยิปซัมเทียม และเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

องค์ประกอบทางเคมี	ดินทุ้งกง (%)	FGD (%)	OPFA (%)
SiO ₂	70.12	14.41	59.01
Al ₂ O ₃	14.34	2.66	1.16
CaO	0.41	70.43	11.08
P ₂ O ₅	0.51	-	5.45
SO ₃	-	3.78	-
Cl	-	-	2.97
K ₂ O	1.99	0.97	5.37
MgO	-	1.38	3.56
TiO ₂	0.98	0.22	0.10
MnO ₂	-	-	-
Fe ₂ O ₃	6.72	3.63	7.44
SrO	-	0.08	0.05
CuO	-	-	0.09
Na ₂ O	-	-	0.06
ZnO	0.99	-	0.04
ZrO ₂	0.08	-	0.01
LOI	4.37	2.44	3.61

4.2 สมบัติของยิปซัมเทียมและเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

การพิจารณาคัดเลือกสารปอซโซลานที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ได้พิจารณาจากงานวิจัยในอดีตทางด้านสมบัติทางวิศวกรรมและองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลัก โดยสารปอซโซลานที่ใช้ในการศึกษานี้ได้คัดเลือกจากวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม และยิปซัมเทียมของโรงไฟฟ้ากระบี่ ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นในท้องถิ่นภาคใต้ การนำไปประยุกต์เพื่อใช้ในการก่อสร้างให้เกิดประโยชน์พัฒนาประเทศและยังเป็นการจัดการปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย วัสดุที่เลือกใช้ในการปรับปรุงดินได้นำมาเตรียมดังนี้

1) ยิปซัมเทียม ได้จากโรงผลิตไฟฟ้า จ.กระบี่ มีลักษณะเป็นผงสีเทาดำ โดยนำมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร้อนคั่วขนาดด้วยตะแกรงเบอร์ 200 (74 ไมครอน)

2) เถ้าไยปาล์มน้ำมัน จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มทักษิณปาล์ม จ.สุราษฎร์ธานี มีลักษณะเป็นผงละเอียดมีสีเทาปนดำเข้ม อบและนำมาร้อนคั่วขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของยิปซัมเทียมและเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

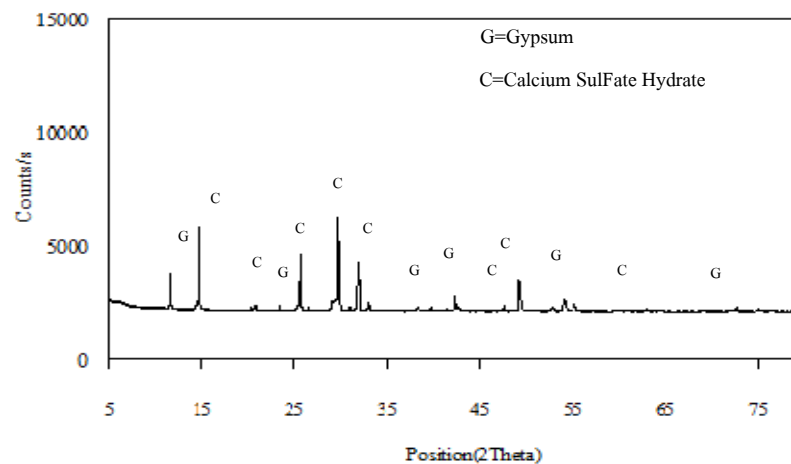
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของยิปซัมเทียมโดยวิธี X - Ray Fluorescence ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์แร่ในดิน พบว่ามีองค์ประกอบของ CaO เท่ากับ 70.43 %, SiO₂ เท่ากับ 14.41 %, Fe₂O₃ เท่ากับ 3.63 %, MgO เท่ากับ 1.38 %, SO₃ เท่ากับ 3.78 %, Al₂O₃ เท่ากับ 2.66 %, SrO เท่ากับ 0.08 %, TiO₂ เท่ากับ 0.22%, และK₂O เท่ากับ 0.97%, สำหรับการทดสอบ Loss On Ignition (LOI) พบว่ามีค่าสูญเสียจากการเผาไหม้เท่ากับ 2.44 % ดังตารางที่ 4.2

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของเถ้าไยปาล์มน้ำมันโดยวิธี X - Ray Fluorescence พบว่ามีองค์ประกอบของ SiO₂ เท่ากับ 59.01 %, CaO เท่ากับ 11.08 %, K₂O เท่ากับ 5.37 %, P₂O₅ เท่ากับ 5.45 %, MgO เท่ากับ 3.56 %, Fe₂O₃ เท่ากับ 7.44 %, SrO เท่ากับ 0.05 %, Al₂O₃ เท่ากับ 1.16 %, Cl เท่ากับ 2.97 %, TiO₂ เท่ากับ 0.10 %, นอกนั้นสารประกอบอื่น ซึ่งมีปริมาณน้อยไม่ค่อยมีผลต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานและอาจเป็นการปนเปื้อนมาจากภาชนะที่บรรจุตัวอย่างในการทดสอบ (MoO₃ เท่ากับ 0.05 % , CuO เท่ากับ 0.09%, Na₂O เท่ากับ 0.06%, ZnO เท่ากับ 0.04%, ZrO₂ เท่ากับ 0.01%,) สำหรับน้ำหนักสูญหายหลังเผา (LOI) พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 3.61 ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับ

ดิษฐพรและคณะ (2551) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของเถ้าไยปลาล์มน้ำมันพบว่า มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 58.14 รองลงมาคือ CaO เท่ากับร้อยละ 12.04 และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของคณพลและธนภัทร์ (2551) ซึ่งองค์ประกอบหลักในเถ้าไยปลาล์มน้ำมัน มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 33.99 รองลงมาคือ CaO เท่ากับร้อยละ 16.43 และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีสอดคล้องกับชัยและไกรวุฒิ (2549) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของเถ้าปลาล์มน้ำมันมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 65.30 % รองลงมาคือ CaO เท่ากับ 6.42 %

4.2.2 การบำบัดยิปซัมเทียมใช้ทดลอง

ผลวิเคราะห์ยิปซัมเทียมด้วย X-Ray Diffraction พบว่าได้เปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีจาก $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เป็น $\text{CaSO}_4 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ เกือบทั้งหมดหลังจากทำการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แต่ยังมีบางส่วนยังคงสภาพเป็นยิปซัมเทียมอยู่ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งด้วยการเกิดวัฏภาคไปสู่สถานะอะสัณฐาน จึงทำให้ $\text{CaSO}_4 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ รวมตัวกับน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันย้อนกลับ ขณะเดียวกันก็คายความร้อนออกมา โดยอนุภาค $\text{CaSO}_4 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งจะรวมตัวกลับไปเป็นผลึกรูปแท่งแบนสี่เหลี่ยมของ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ อีกครั้ง ซึ่งผลึกดังกล่าวช่วยปรับสภาพความเป็นกรดให้แก่อินที่ปรับปรุงและในขณะที่บางส่วนรวมกับดิน มีโอกาสเกิด CSH ได้



รูปที่ 4.2 ลายเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของยิปซัมเทียมหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.2.3 การจำแนกยิปซัมเทียมและเถ้าไยปาล์มน้ำมันตามประเภทสารปอซโซลาน

มาตรฐาน ASTM C 618 ได้แบ่งประเภทของสารปอซโซลานออกเป็น 2 ประเภทคือ Class F และ Class C

ยิปซัมเทียมมีองค์ประกอบของ CaO, SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ สูงถึง 91.13 % เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 พบว่าไม่สามารถจัดเป็นสารปอซโซลานได้ แต่ มีองค์ประกอบหลักทางเคมีใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวขึ้น เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำจะก่อให้เกิดการคายความร้อนไฮเดรชัน และมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ส่วนเถ้าไยปาล์มน้ำมันองค์ประกอบของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับ 67.61% มีปริมาณ Na₂O เท่ากับ 0.06%, MgO เท่ากับ 3.50% โดยไม่พบ SO₃ และค่าน้ำหนักสูญเสียหลังเผา (LOI) เท่ากับ 2.79% เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 พบว่าสามารถจัดเป็นสารปอซโซลาน Class C ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การจำแนกยิปซัมเทียมและเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ตามประเภทสารปอซโซลานของเกณฑ์ ASTM C 618

องค์ประกอบ	Class F	Class C	FGD	OPFA	ปูนซีเมนต์
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ ไม่น้อยกว่า (%)	70	50	20.70	67.61	27.05
SO ₃ ไม่เกิน (%)	5.0	5.0	3.78	-	2.0
MgO ไม่เกิน (%)	5.0	5.0	1.38	3.50	2.8
Na ₂ O ไม่เกิน (%)	1.5	1.5	-	0.06	0.8
LOI ไม่เกิน (%)	12	6	2.44	3.61	2

4.2.4 โครงสร้างจุลภาคของดินทุ้งกง ยิปซัมเทียมและเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

ดิษฐพรและคณะ (2551) ได้ถ่ายภาพจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าอนุภาคของเถ้าไยปาล์มน้ำมันมีลักษณะส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมผิวเรียบ แต่บางส่วนพบว่ามีรูปร่างภายนอกไม่แน่นอนหรือเป็นรูปเหลี่ยม ด้วยลักษณะส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมผิวเรียบจะช่วยหล่อลื่นทำให้การบดอัดง่ายขึ้น ดนุพลและธนภัทร์ (2551) กล่าวว่า โครงสร้าง

จุลภาคของเถาไยปลาล์มน้ำมันเป็นเม็ดกลมมีลักษณะผิวค่อนข้างเรียบ ภายในมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ทุกทิศทาง

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างดินแทนที่ด้วยยิปซัมเทียมที่อัตราส่วนร้อยละ 50 พบว่าในเนื้อดินที่ปรับปรุงเต็มไปด้วยผลึกของยิปซัม (G) ส่วนใหญ่เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนแท่งยาว ส่วนแอดตริงโกต์ (E) รูปเข็มเล็กน้อยปนกับเม็ดดิน (S) รูปก้อนไม่สม่ำเสมอ (รูปที่ 4.4 ก) และเมื่อแทนที่ยิปซัมเทียมบางส่วนด้วยเถาไยปลาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 5 พบว่ามีผลึกยิปซัมบางส่วน และมีอนุภาคซิลิกอน (Si) ลักษณะกลมจากเถาไยปลาล์มน้ำมันฝังตัวอยู่ในเนื้อดินปรับปรุง (รูปที่ 4.4 ข) จากการเติมเถาไยปลาล์มเข้าไปทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้นได้ แต่เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวต้องอาศัยเวลาในการเกิด ซึ่งสอดคล้องกับ ดนุพลและคณะ (2547) จึงยังตรวจไม่พบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) นอกจากนี้ปริมาณน้ำผสมในดินที่ปรับปรุงได้ให้วัสดุประสานแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (calcium sulfate hemi hydrate) กลับคืนสู่สภาพผลึกยิปซัมเป็นส่วนใหญ่ รวมถึงมีรูเล็ก ๆ อยู่ทั่วไปหมดจากการระเหยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับยิปซัมเทียม

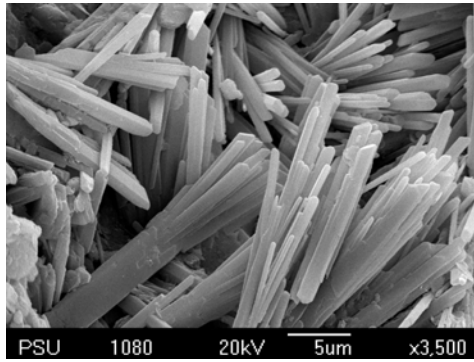
4.3 ระยะเวลาการก่อตัว

4.3.1 ระยะเวลาการก่อตัวของดินทุ่งแทนที่ด้วยยิปซัมเทียม

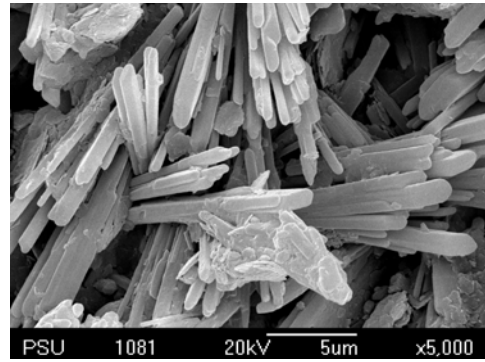
จากการทดลองระยะเวลาการก่อตัวของดินทุ่งแทนที่ด้วยยิปซัมเทียมโดยวิธีไวแคต พบว่าเมื่อแทนที่ยิปซัมเทียมร้อยละ 50 และอัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักแห้งรวม $0.3w$ ดินจะสามารถเริ่มรับกำลังได้หลังจากเวลาผ่านไป 4.42 นาติ และเมื่อเวลาผ่านไป 6 นาติ เครื่องกดไวแคตไม่สามารถจมลงในเนื้อดิน ในทางกลับกันหากลดปริมาณการแทนที่ด้วยยิปซัมเทียมลดลง เป็นร้อยละ 40, 30 และ 20 ดินสามารถเริ่มก่อตัวขึ้นได้หลังจากเวลาผ่านไป 7.11, 9.66 และ 15 นาติ ตามลำดับ และเมื่อเวลาผ่านไป 9, 11 และ 20 นาติ ดังรูปที่ 4.5 -4.8 เข็มของอุปกรณ์ไวแคต ก็ไม่สามารถจมลงในเนื้อดินได้ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของยิปซัมเทียมที่ทำให้ดินแข็งตัว ขึ้นอยู่กับปริมาณยิปซัมเทียมที่แทนที่ในดิน

เมื่อพิจารณาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีค่าอยู่ระหว่าง 4.42 – 37.50 นาติ ดังรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นจะลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยยิปซัมเทียมในดินทุ่งที่เพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราส่วนผสมเดียวกันระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนน้ำที่ลดลง และเป็นที่น่าสังเกตว่าจากการแทนที่ด้วยยิปซัมเทียมร้อยละ 50 และอัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักแห้ง 0.3 มีค่า

ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นน้อยที่สุดที่ 4.42 นาที และการแทนที่ชิปซัมเทียมในดินทุ่งงร้อยละ 20 และอัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักแห้ง 0.5 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมากที่สุดที่ 37.5 นาที

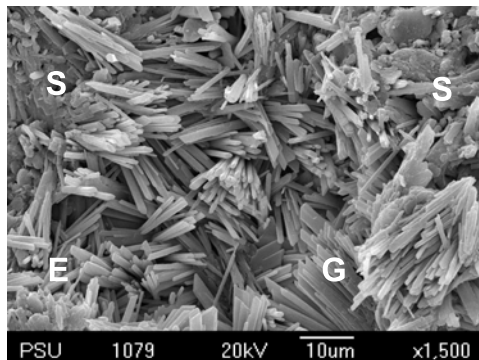


(ก)

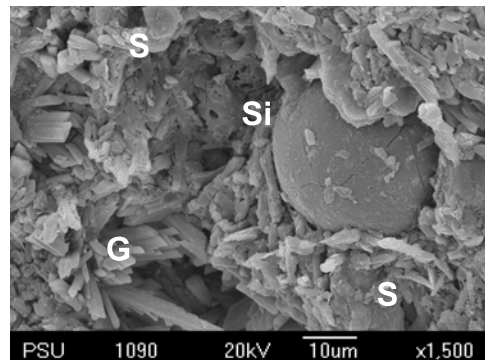


(ข)

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจุลภาคอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโครงสร้างผลึกชิปซัมเทียมกำลังขยาย (ก) 3,500 เท่า และ (ข) 5,000 เท่า



(ก)

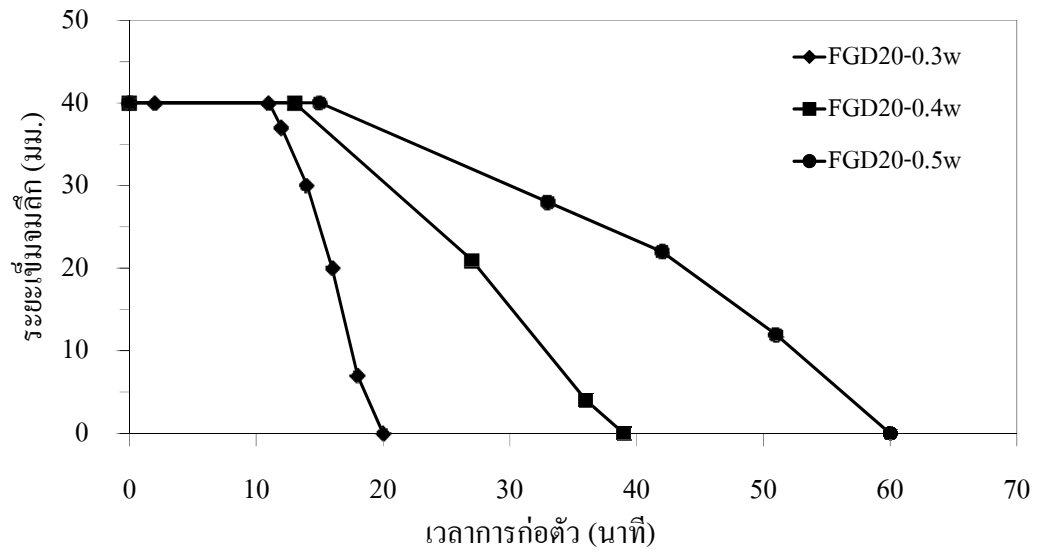


(ข)

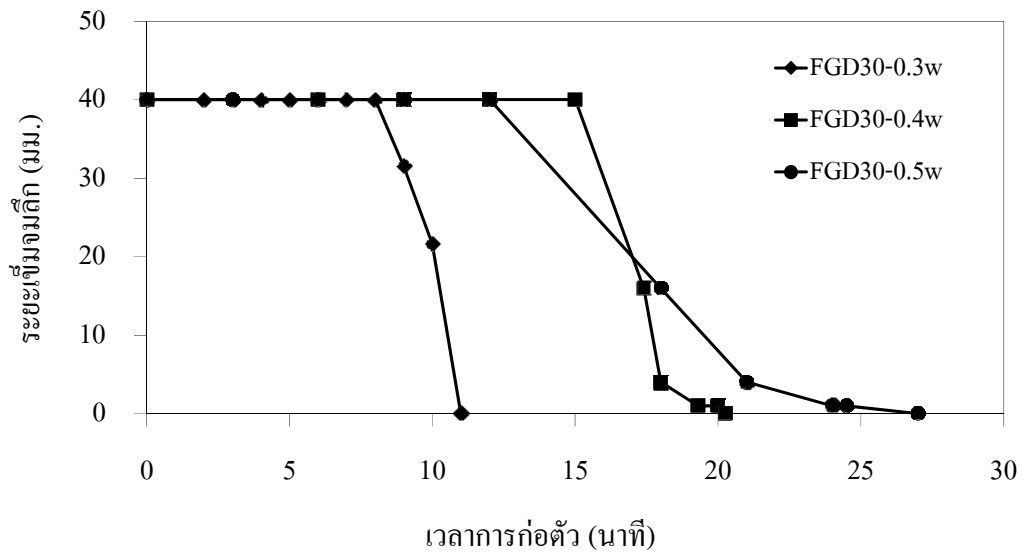
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างทดสอบ (ก) เดิมชิปซัมเทียมร้อยละ 50 และ (ข) เถ้าเิปาล์มน้ำมันแทนที่ชิปซัมเทียมร้อยละ 5

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาการก่อตัวของดินทุ้งงที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมและเถ้าไพล่าลัมน้ำมันที่
อัตราส่วนน้ำต่างกัน

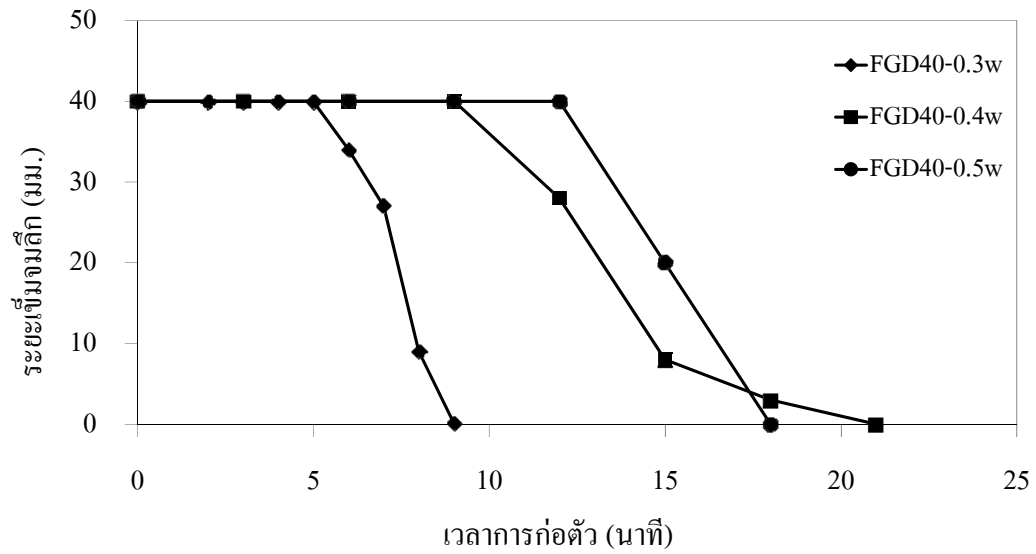
สัญลักษณ์	อัตราส่วนน้ำ (%)	ระยะเวลาเริ่มก่อตัว(นาทีก)	ระยะเวลาก่อตัวสิ้นสุด(นาทีก)	ผลต่างระยะเวลาการก่อตัว(นาทีก)
FGD20OPFA0	30	15	20	5
	40	24.05	39	14.95
	50	37.5	60	22.50
FGD30OPFA0	30	9.66	11	1.34
	40	16.50	20.25	3.75
	50	17.75	27	11.25
FGD40OPFA0	30	7.11	9	1.89
	40	12.45	21	8.55
	50	14.25	18	3.75
FGD50OPFA0	30	4.42	6	1.58
	40	13.43	15	1.57
	50	14.40	16	3.14
FGD45OPFA5	30	2.57	4	1.43
	40	6.91	10	3.09
	50	9.76	14	4.24
FGD40OPFA10	30	3.07	4	0.93
	40	4.5	6	1.50
	50	7.83	11	3.17
FGD35OPFA15	30	2.51	4	1.49
	40	5.42	7	1.58
	50	7.33	12	4.69



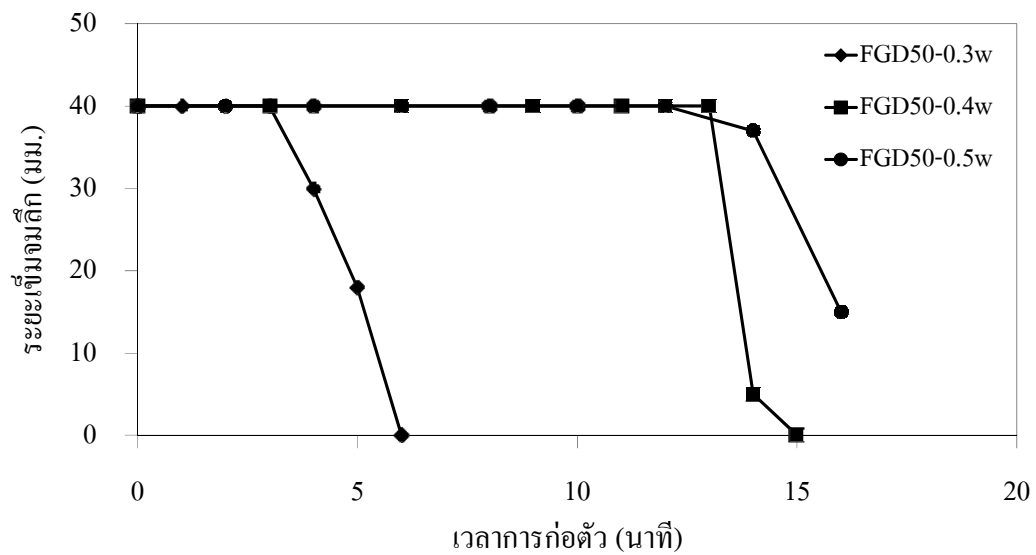
รูปที่ 4.5 พฤติกรรมการก่อตัวของดินหุงกงแทนที่บางส่วนด้วยขี้ปซัมเทียมร้อยละ 20



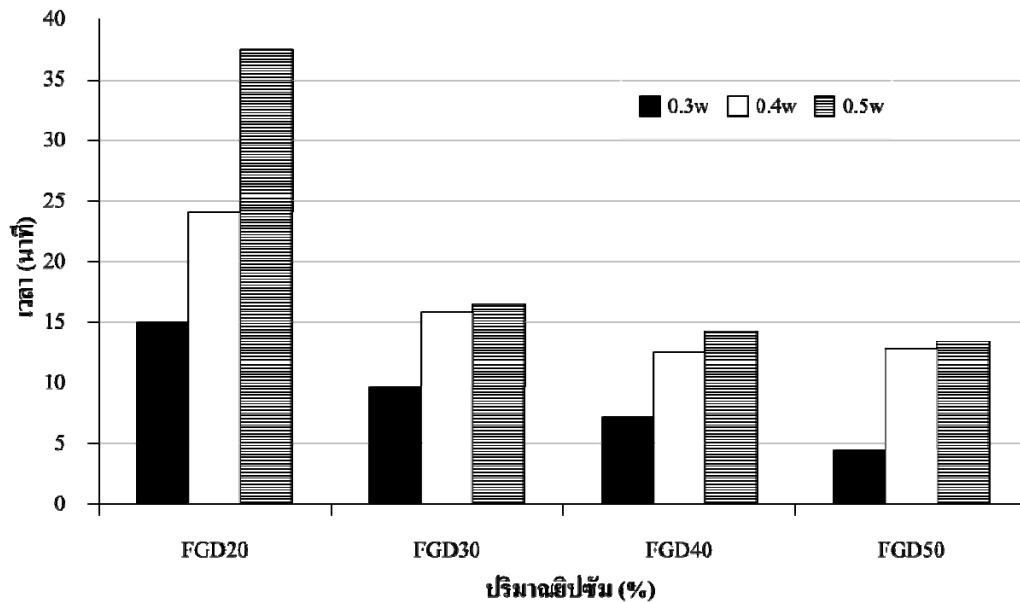
รูปที่ 4.6 พฤติกรรมการก่อตัวของดินหุงกงแทนที่บางส่วนด้วยขี้ปซัมเทียมร้อยละ 30



รูปทื 4.7 พฤตลกรรมการก่อดั้วของคลนทุงงแทนทืบางส่วนคั้วยลปซ้มเทลยมร้อยลละ 40



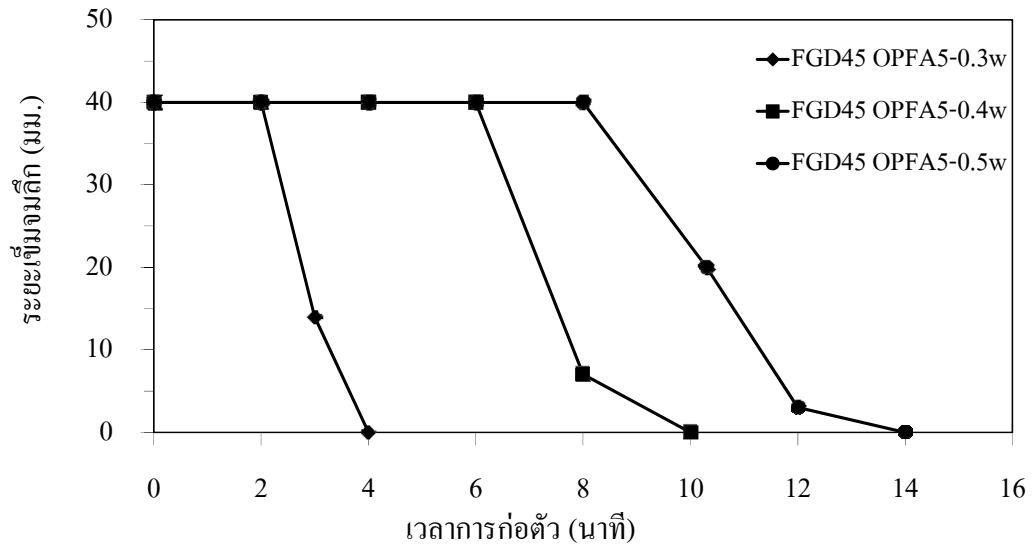
รูปทื 4.8 พฤตลกรรมการก่อดั้วของคลนทุงงแทนทืบางส่วนคั้วยลปซ้มเทลยมร้อยลละ 50



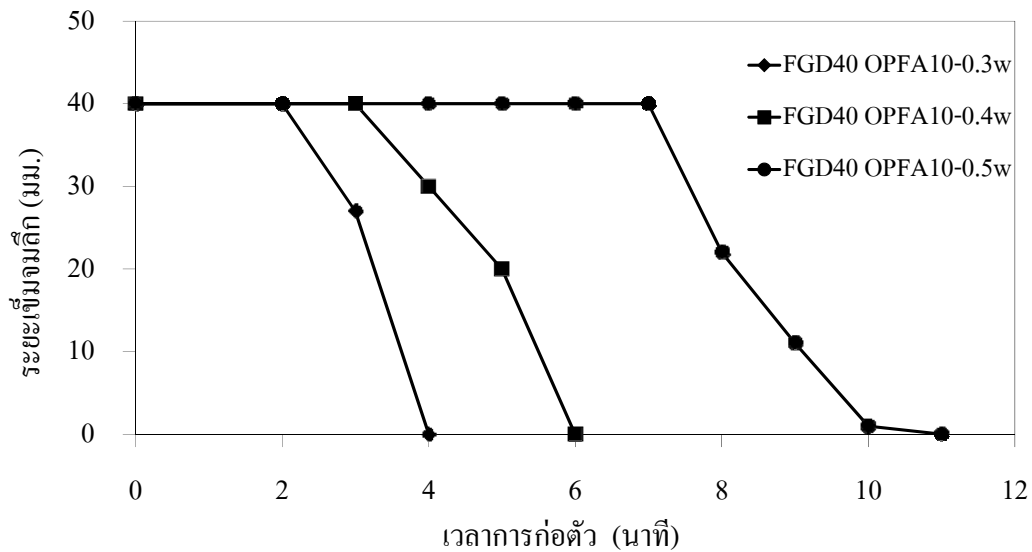
รูปที่ 4.9 อิทธิพลของยิปซัมเทียมและอัตราส่วนน้ำผสมส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อดำเริ่มต้นของดินทุ่งกง

4.3.2 ระยะเวลาการก่อดำของดินทุ่งกงที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมและถ้าโยปาล์มน้ำมัน

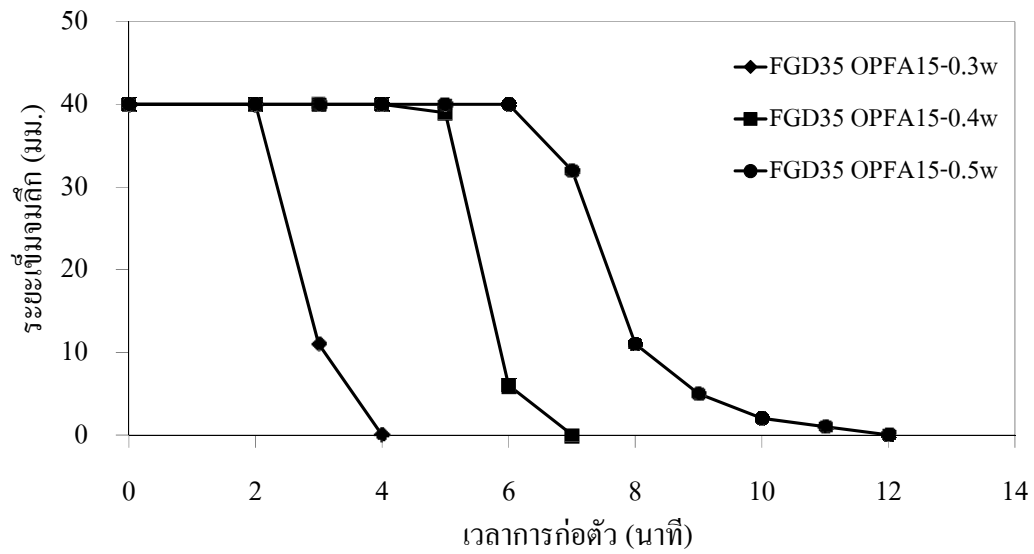
จากการทดลองระยะเวลาการก่อดำของดินทุ่งกงกรณีปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมและถ้าโยปาล์มน้ำมัน พบว่าถ้าโยปาล์มน้ำมันแปรผกผันกับระยะเวลาการก่อดำ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณถ้าโยปาล์มน้ำมันมีผลทำให้ระยะเวลาการก่อดำเริ่มต้นลดลง ดังรูปที่ 4.13 ที่ปริมาณยิปซัมต่อถ้าโยปาล์มน้ำมัน 50:0 45:5 40:10 และ 35:15 ที่ปริมาณน้ำร้อยละ 30 ของน้ำหนักแห้งรวม ระยะก่อดำเริ่มต้นเท่ากับ 4.42 2.57 3.07 และ 2.51 นาที ตามลำดับ และที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน แต่ลดอัตราส่วนน้ำก็จะเห็นได้ว่าระยะเวลาการก่อดำมีแนวโน้มลดลง และนอกจากนี้ปริมาณถ้าโยปาล์มน้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียมยังมีอิทธิพลต่อระยะเวลาการก่อดำสิ้นสุด จากรูป 4.10 – 4.12 ดินสามารถเริ่มก่อดำขึ้นหลังจากเวลาผ่านไป 4 นาที เข็มของเครื่องกดไวแคท ก็ไม่สามารถจมลงในเนื้อดินได้ แสดงให้เห็นว่า ถ้าโยปาล์มน้ำมันมีส่วนช่วยเสริมยิปซัมเทียมในพฤติกรรมของระยะการก่อดำเบื้องต้นและระยะการก่อดำสุดท้าย



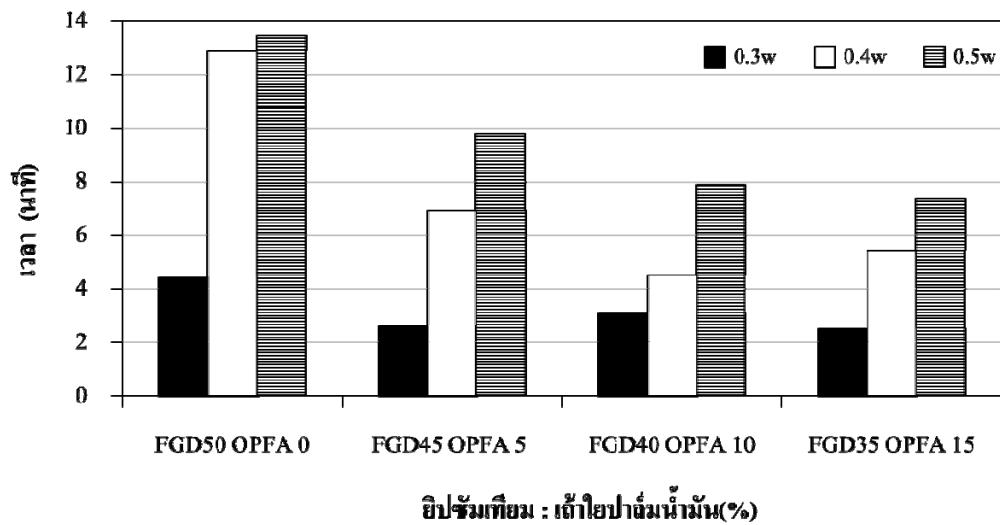
รูปที่ 4.10 พฤติกรรมการก่อตัวของดินทุ่งกงแทนที่ด้วยยิปซัมเทียมร้อยละ 45 และเถ้าไยปาล์ม น้ำมันร้อยละ 5



รูปที่ 4.11 พฤติกรรมการก่อตัวของดินทุ่งกงแทนที่ด้วยยิปซัมเทียมร้อยละ 40 และเถ้าไยปาล์ม น้ำมันร้อยละ 10



รูปที่ 4.12 พฤติกรรมการก่อดัวของดินหุงกงแทนที่ด้วยยิปซัมเทียมร้อยละ 35 และเถ้าไยปาล์ม น้ำมันร้อยละ 15

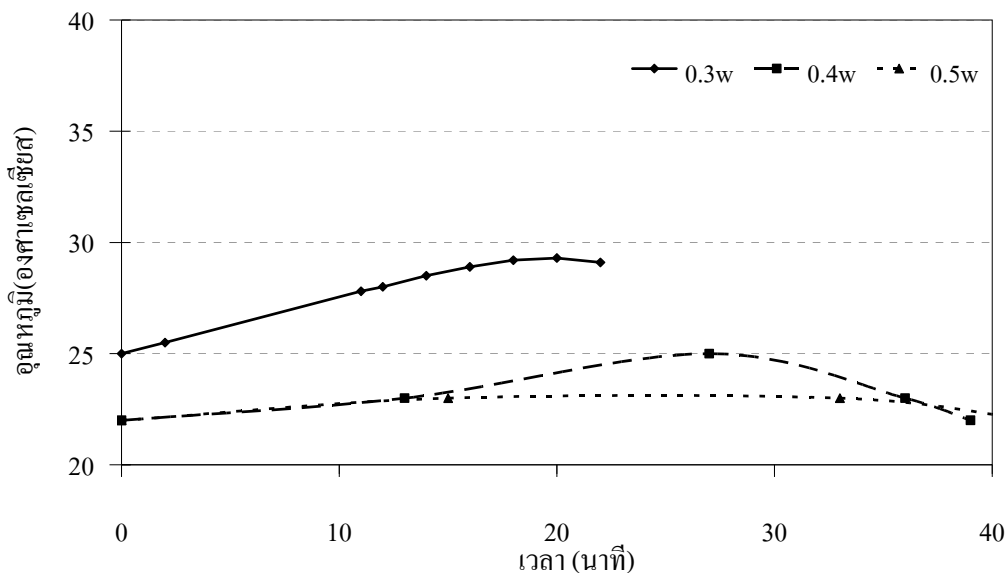


รูปที่ 4.13 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำมันต่อการก่อดัวของดินหุงกงปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมและเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

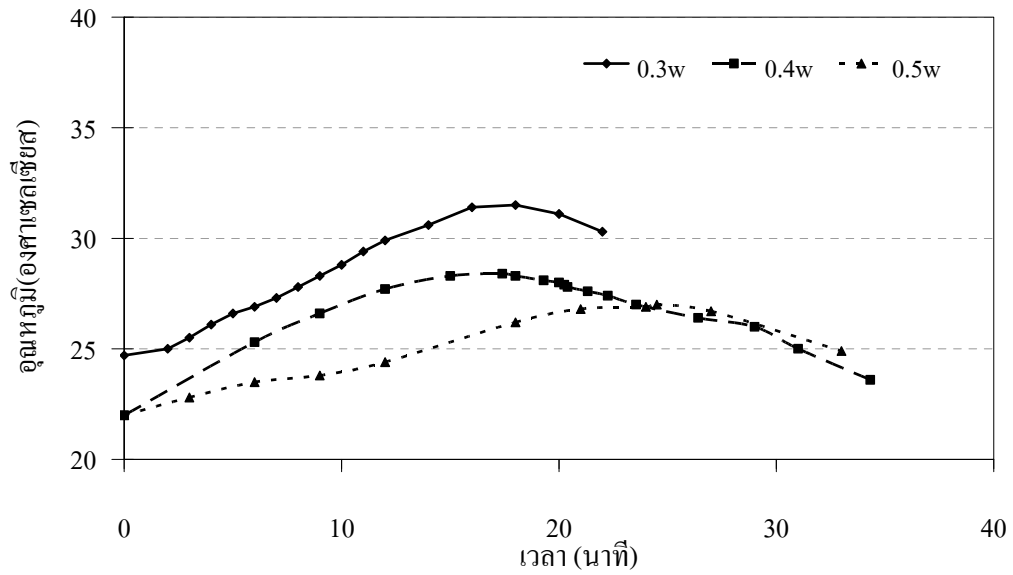
4.3.3 อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งกวมยิปซัมเทียม

อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินที่แทนที่ด้วยยิปซัมเทียมหลังจากทำการผสมน้ำ (รูปที่ 4.14 – 4.17) พบว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยสังเกตจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทันทีภายหลังจากผสมน้ำ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละส่วนผสมของดินทุ่งกวมที่ด้วยยิปซัมเทียม ดังรูปที่ 4.18 ปริมาณยิปซัมเทียมที่แทนที่ในดินทุ่งกวมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นขณะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากตาราง 4.5 พบว่าการแทนที่ยิปซัมเทียมที่ร้อยละ 50 จะทำให้เกิดอุณหภูมิสูงสุดที่ 38.5 องศาเซลเซียส แต่ถ้าทำการลดปริมาณยิปซัมเทียมลงเป็นร้อยละ 40 30 และ 20 ตามลำดับ แล้วอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงเป็น 34.9 31.5 และ 29.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

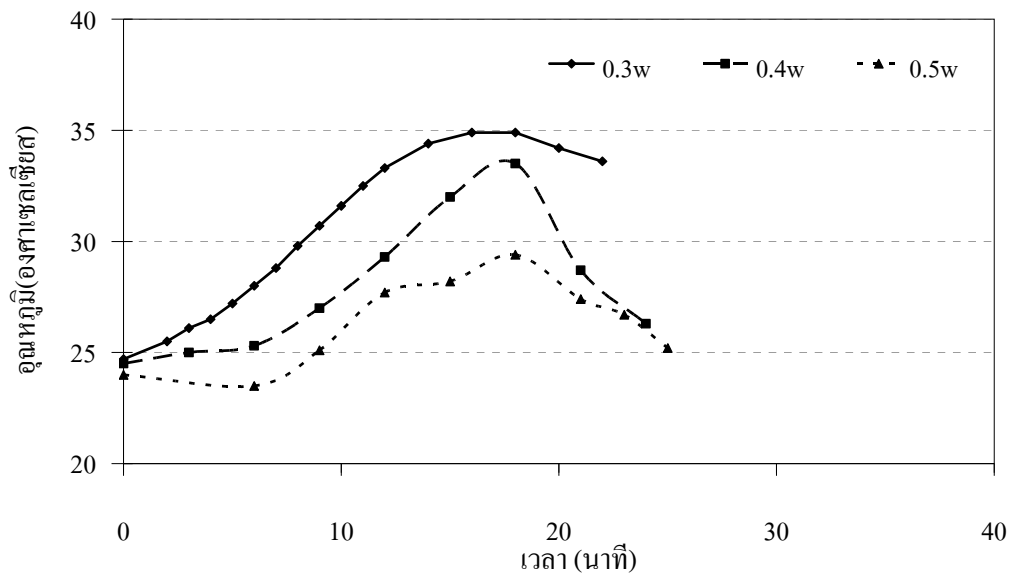
นอกจากนี้ปริมาณไยปาล์มน้ำมันที่แทนที่ยิปซัมเทียมในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีแนวโน้มลดลงดังตารางที่ 4.5 ทั้งนี้เนื่องจากไยปาล์มน้ำมันจัดเป็นวัสดุพอลิไซโคลาน ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันค่อนข้างช้า จึงทำให้ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยามีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของไยปาล์มน้ำมัน ทำให้รูพรุนในเนื้อตัวอย่างดินปรับปรุงลดลงไปด้วย



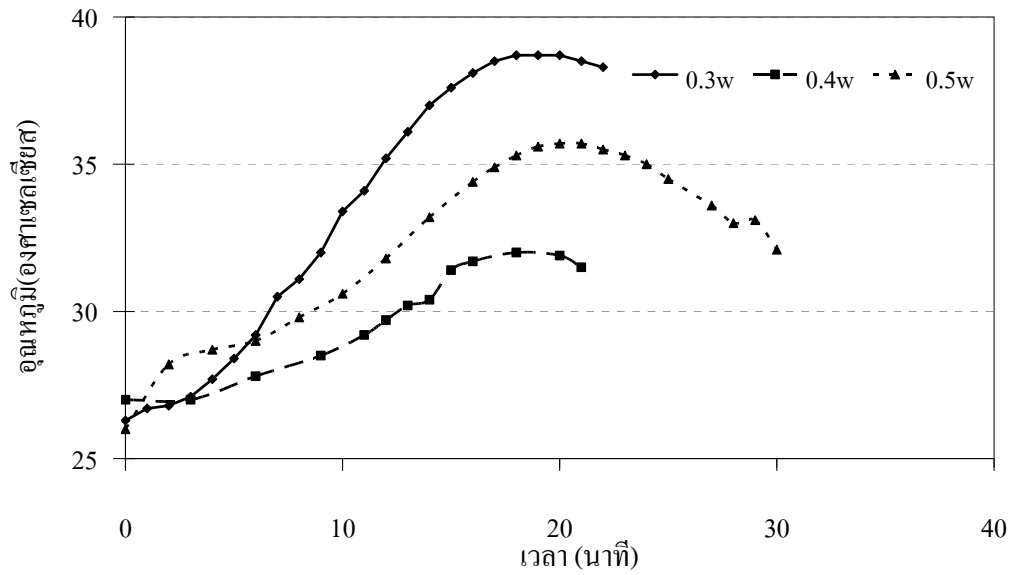
รูปที่ 4.14 อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งกวมแทนที่บางส่วนด้วยยิปซัมเทียมร้อยละ 20



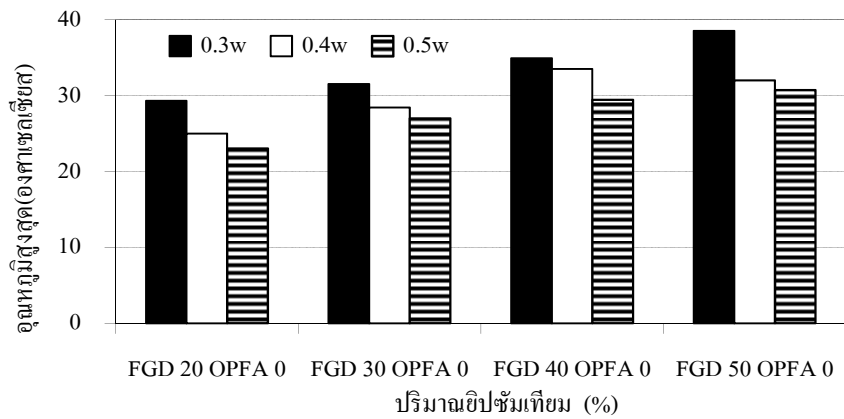
รูปที่ 4.15 อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยยิปซัมเทียมร้อยละ 30



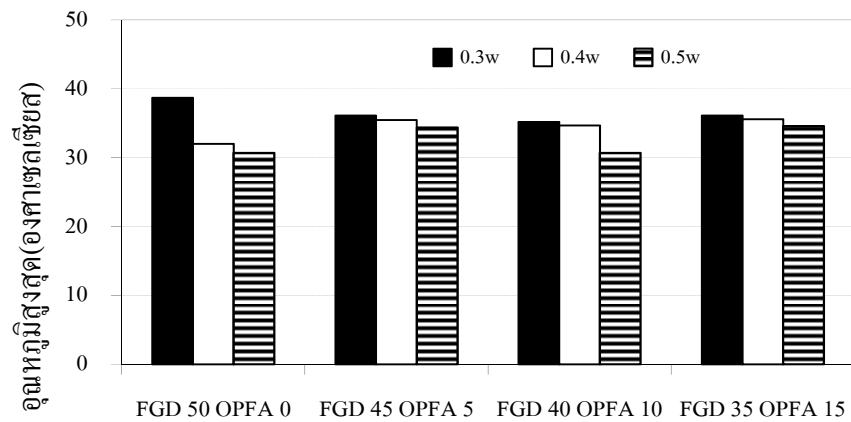
รูปที่ 4.16 อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยยิปซัมเทียมร้อยละ 40



รูปที่ 4.17 อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยขี้ปซัมเทียมร้อยละ 50



รูปที่ 4.18 อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ่งกงแทนที่บางส่วนด้วยขี้ปซัมเทียม



ปริมาณไอลิปาล์มน้ำมันแทนที่ (%)

รูปที่ 4.19 อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินทุ้งงแทนที่ด้วยยิปซัมเทียมและไอลิปาล์มน้ำมัน

แต่หากเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักแห้งแล้ว ก็พบว่าอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินทุ้งงในแต่ละสูตรนั้นได้แปรผันตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุดินที่ผสมที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยอุณหภูมิเกิดปฏิกิริยาสูงสุดแตกต่างกัน (6.3 องศาเซลเซียส) ในยิปซัมเทียมเติมปริมาณน้อย (20%) ในขณะที่ปริมาณยิปซัมเทียมมาก (50%) อุณหภูมิสูงสุดต่างกัน (7.8 องศาเซลเซียส) แสดงว่าอิทธิพลของปริมาณยิปซัมเทียมมากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมดินกับยิปซัม

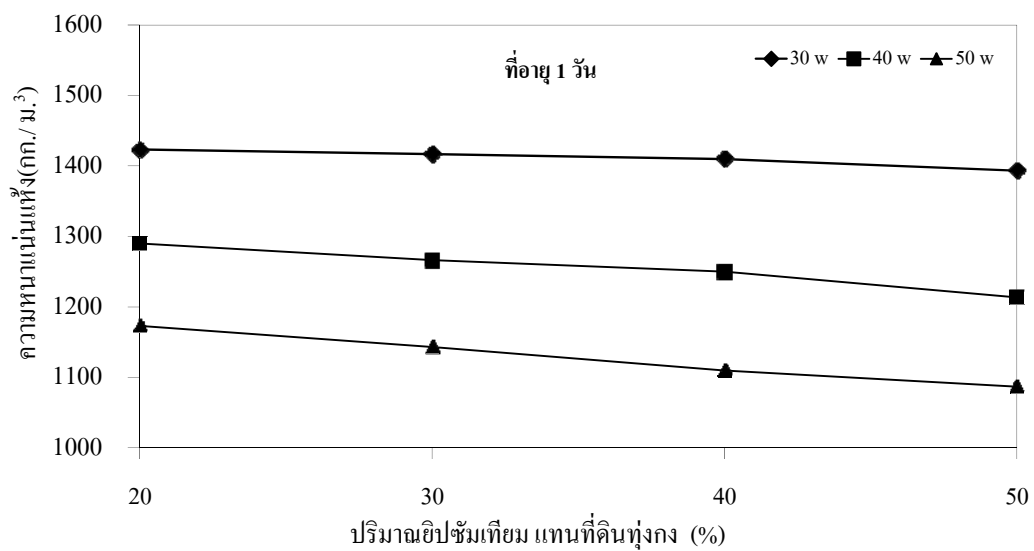
ผลกระทบดังกล่าวจากการชะลอการแข็งตัวของเล็กน้อย อาจกล่าวได้ว่าเป็นผลดีต่อการทำงานก่อสร้างพื้นถนน โดยเฉพาะการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมเสถียรขึ้น เช่น การบดอัดและการรับแรงแบกทาน

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิสูงสุดในขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินหุ่่งงกรณีปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมและเต้าไยปาล์มน้ำมันที่อัตราส่วนน้ำต่างๆ

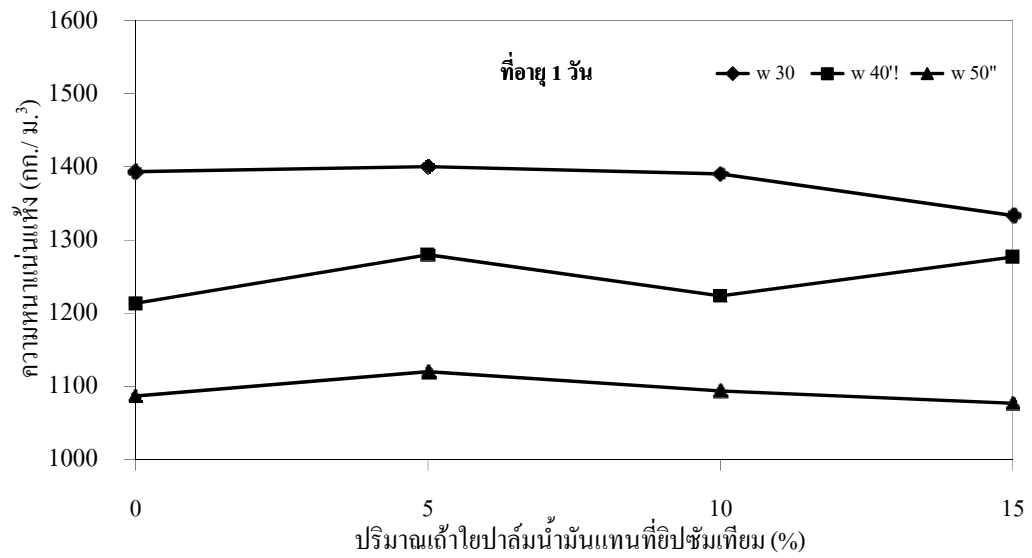
สัญลักษณ์ของตัวอย่าง	อัตราส่วนน้ำ (%)	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)
FGD20 OPFA0	30	29.3
	40	25.0
	50	23.0
FGD30 OPFA0	30	31.5
	40	28.4
	50	27.0
FGD40 OPFA0	30	34.9
	40	33.5
	50	29.4
FGD50 OPFA0	30	38.5
	40	32.0
	50	30.7
FGD45 OPFA5	30	36.1
	40	35.5
	50	34.4
FGD40 OPFA10	30	35.2
	40	34.7
	50	30.7
FGD35 OPFA15	30	36.1
	40	35.6
	50	34.6

4.4 ความหนาแน่นแห้งของดินทุ้งกงที่ปรับปรุง

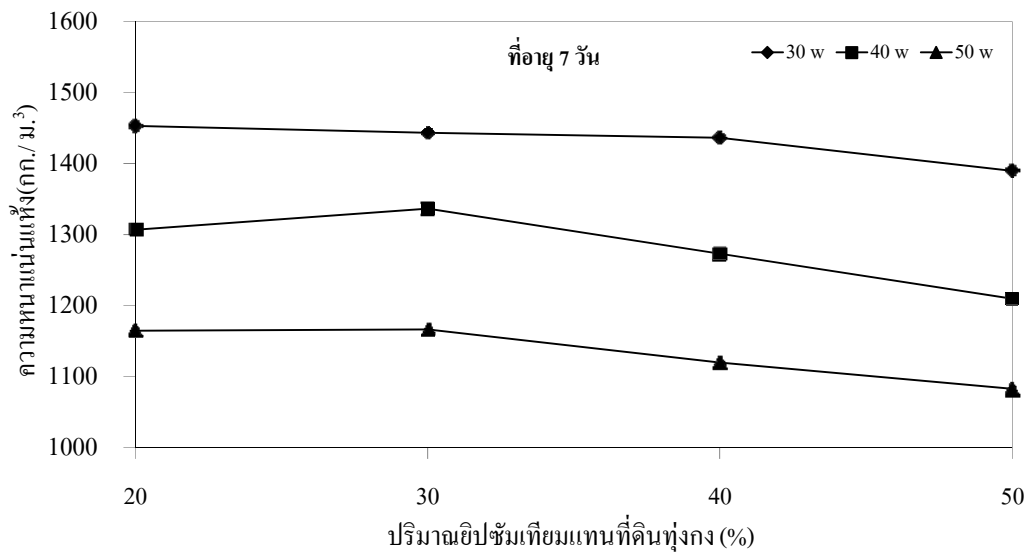
ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งของดินทุ้งกงที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมที่อัตราส่วนร้อยละ 20 30 40 และ 50 พบว่าความหนาแน่นแห้งมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของยิปซัมเทียมที่เพิ่มขึ้น ส่วนดินทุ้งกงปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียมในสัดส่วน 0:50 5:45 10:40 และ 15:35 ความหนาแน่นแห้งมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ในส่วนระยะเวลาการบ่มมีผลน้อยมากดังรูปที่ 4.20 - 4.25.



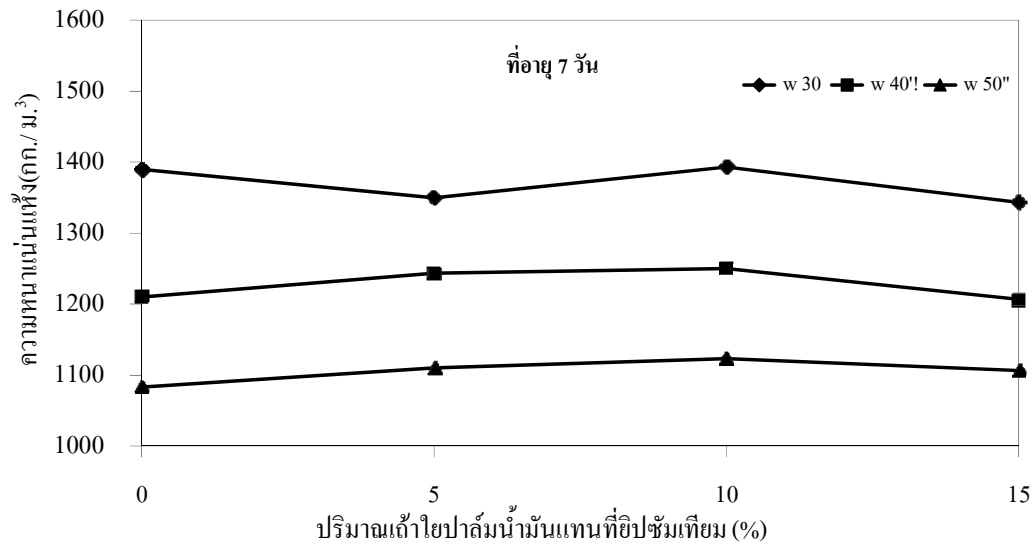
รูปที่ 4.20 ผลกระทบของอัตราส่วนยิปซัมเทียมปรับปรุงดินที่มีต่อความหนาแน่นแห้งไม่แช่น้ำที่อายุบ่ม 1 วัน



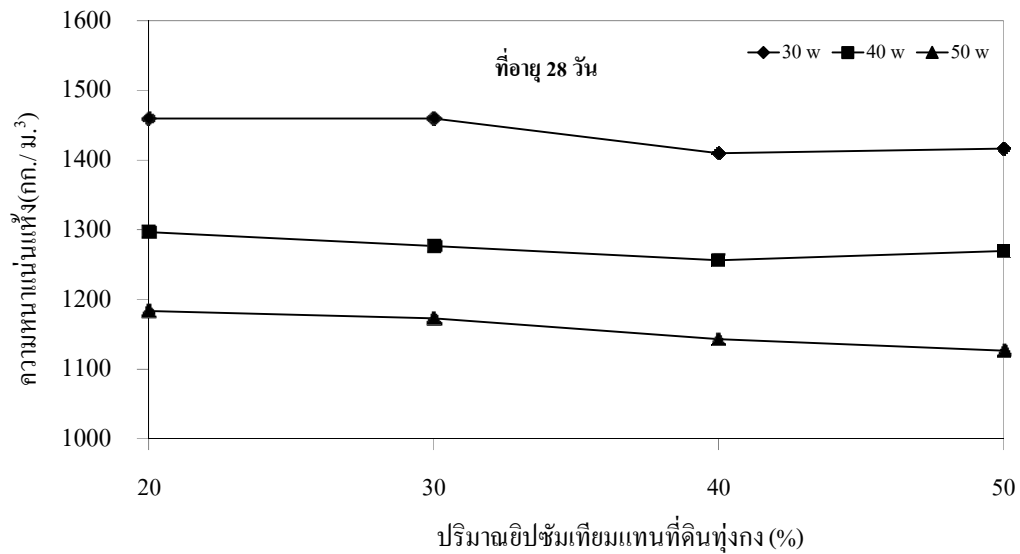
รูปที่ 4.21 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำปาล์มที่เติมแทนที่ที่ปรับดินที่มีต่อความหนาแน่นแห้งไม่แช่น้ำ ที่อายุบ่ม 1 วัน



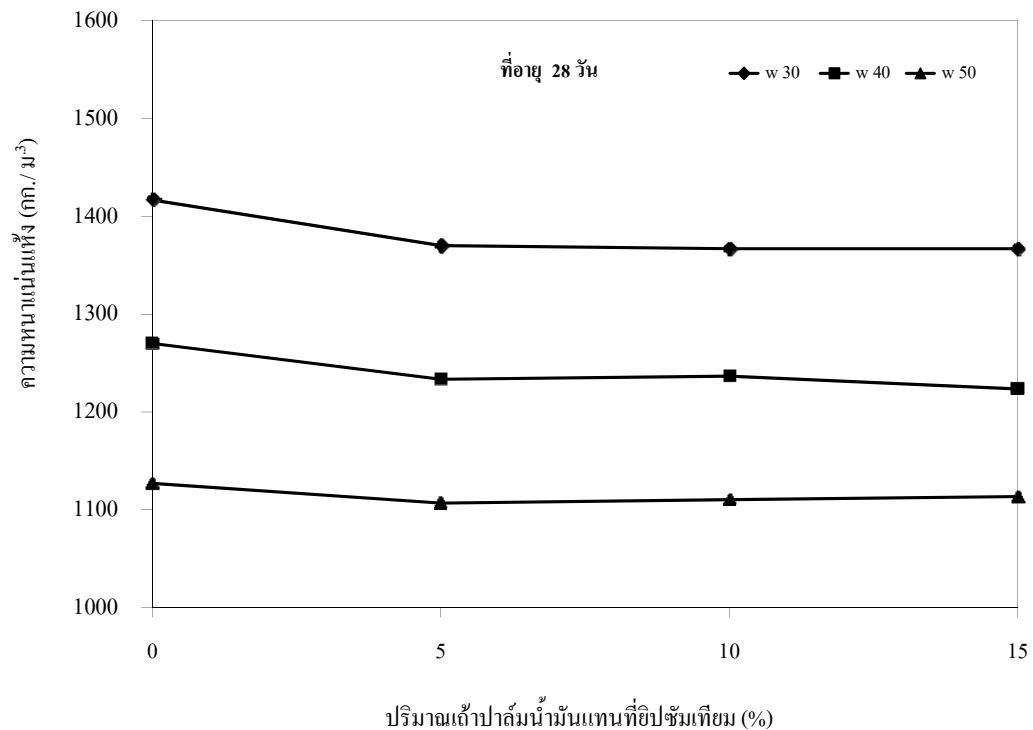
รูปที่ 4.22 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำปาล์มที่เติมแทนที่ที่ปรับดินที่มีต่อความหนาแน่นแห้งไม่แช่น้ำที่อายุบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4.23 ผลกระทบของอัตราส่วนเข้าไปปาล์มน้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียมปรับปรุงดินที่มีต่อความหนาแน่นแห้งไม่แช่น้ำ ที่อายุบ่ม 7 วัน



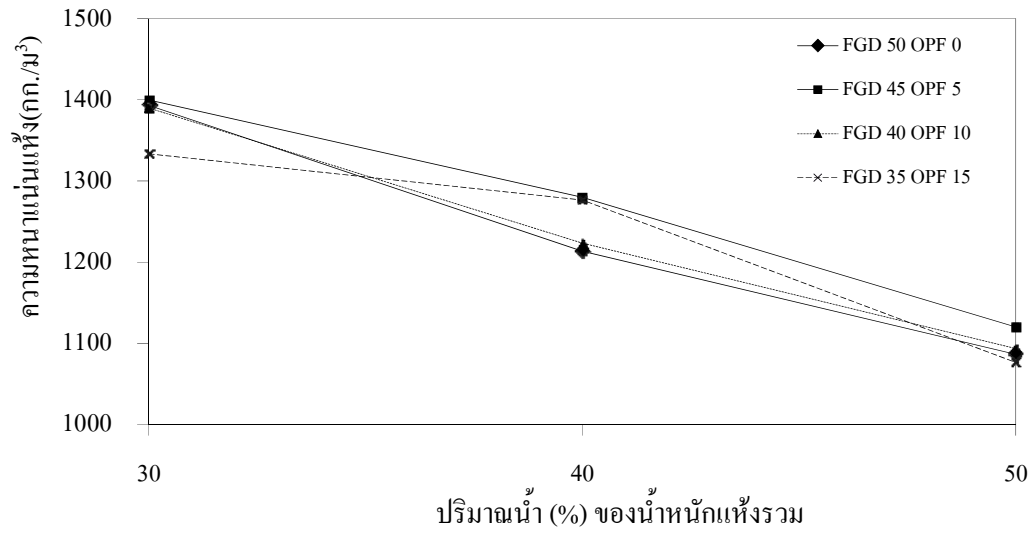
รูปที่ 4.24 ผลกระทบของอัตราส่วนยิปซัมเทียมปรับปรุงดินที่มีต่อความหนาแน่นแห้งไม่แช่น้ำที่อายุบ่ม 28 วัน



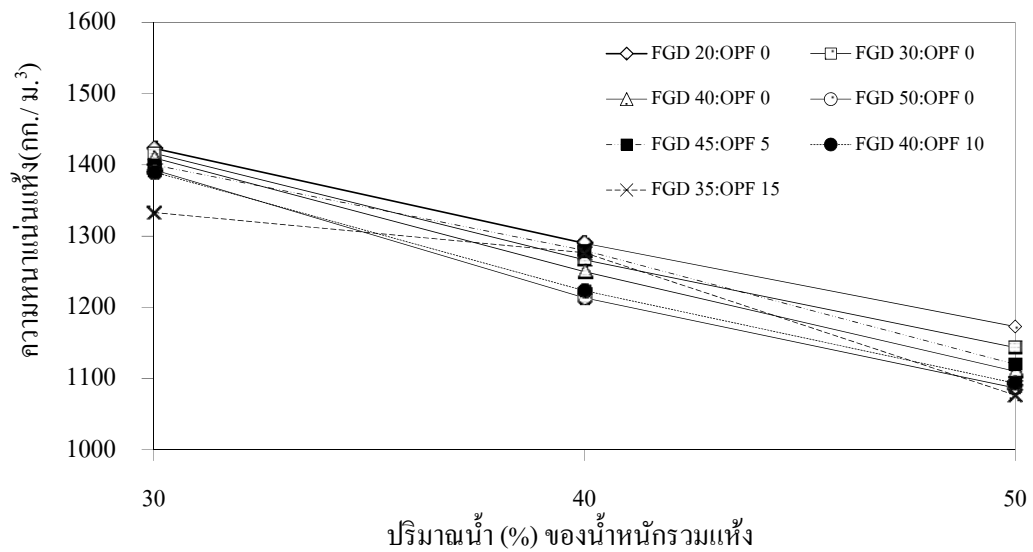
รูปที่ 4.25 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าไยปาล์มน้ำมันแทนที่อิมพัชเมียมปรับปรุงดินที่มีต่อความหนาแน่นแห้ง ไม่แช่น้ำ ที่อายุบ่ม 28 วัน

4.4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำมีต่อความหนาแน่นแห้ง

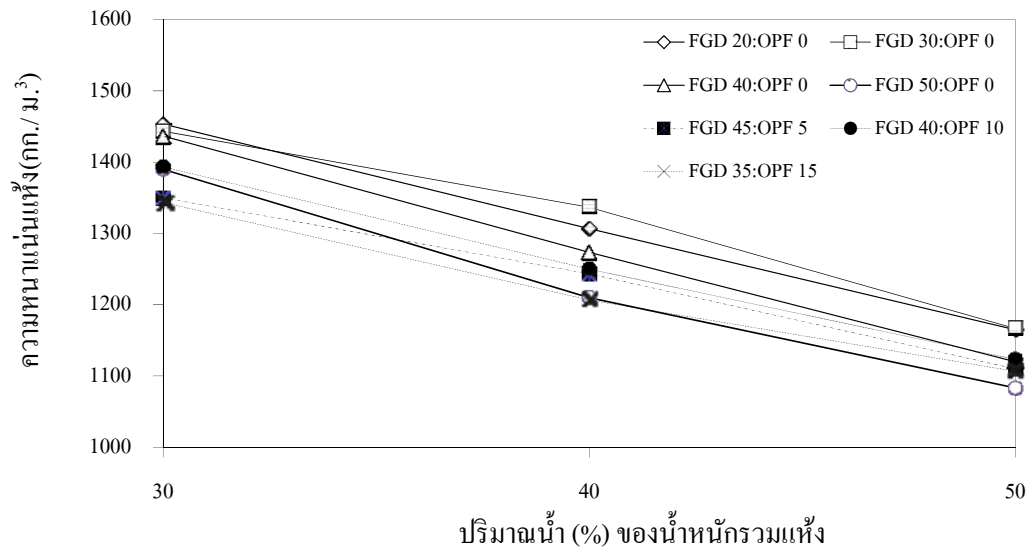
ความหนาแน่นแห้งของดินทุ่กที่ปรับปรุงด้วยอิมพัชเมียมและเถ้าไยปาล์มน้ำมันที่อัตราส่วนน้ำร้อยละ 30 40 และ 50 ของน้ำหนักแห้ง ความหนาแน่นแห้งทุกอัตราส่วนของปริมาณน้ำมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังรูปที่(4.26 – 4.29) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันยังคงเหลือในอัตราส่วนผสมเมื่อปริมาณน้ำระเหยออกจากส่วนผสมทำให้เกิดช่องว่าง จึงเป็นผลทำให้น้ำหนักลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสุวัฒนาและคุณพล (2552) นำอิมพัชเมียม เถ้าไยยางพาราและดินขาวแปรนำมาทำคอนกรีตพรุน ปริมาณน้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นกับอายุการบ่มมีผลค่อนข้างน้อย เนื่องจากการบ่มมีการควบคุมการสูญน้ำ ดังรูปที่ (4.30 – 4.32)



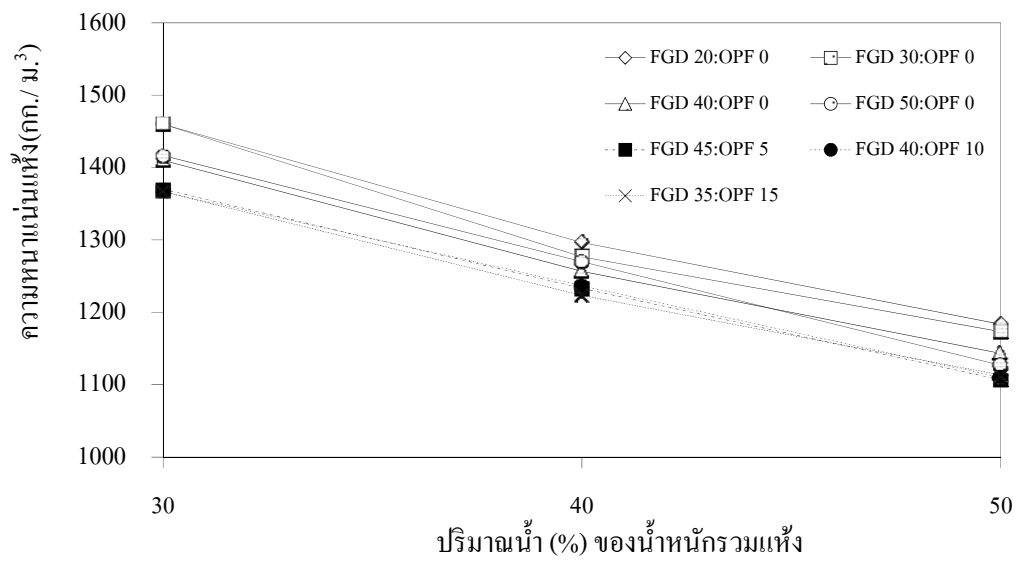
รูปที่ 4.26 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินปรับปรุงไม่แช่น้ำ



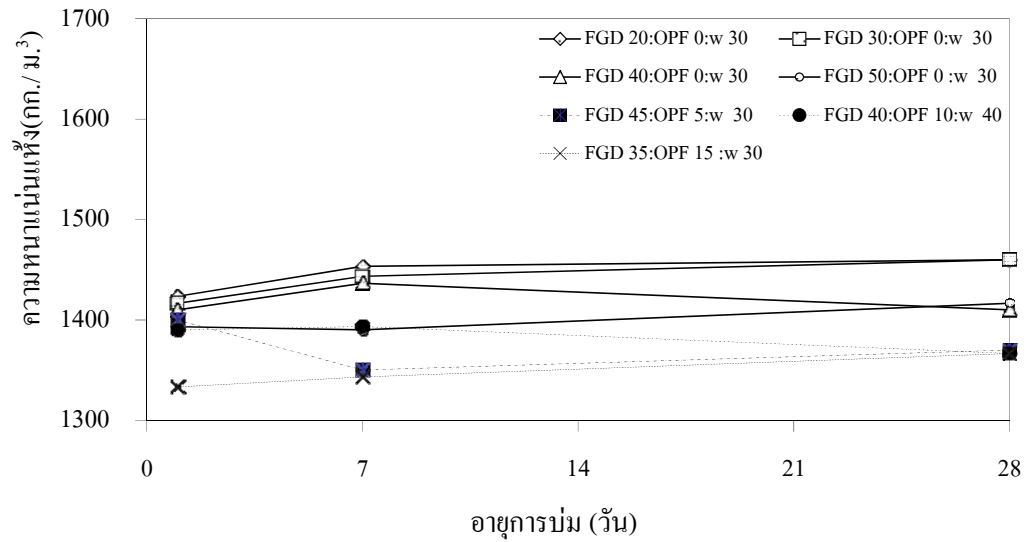
รูปที่ 4.27 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินปรับปรุง อายุบ่ม 1 วัน



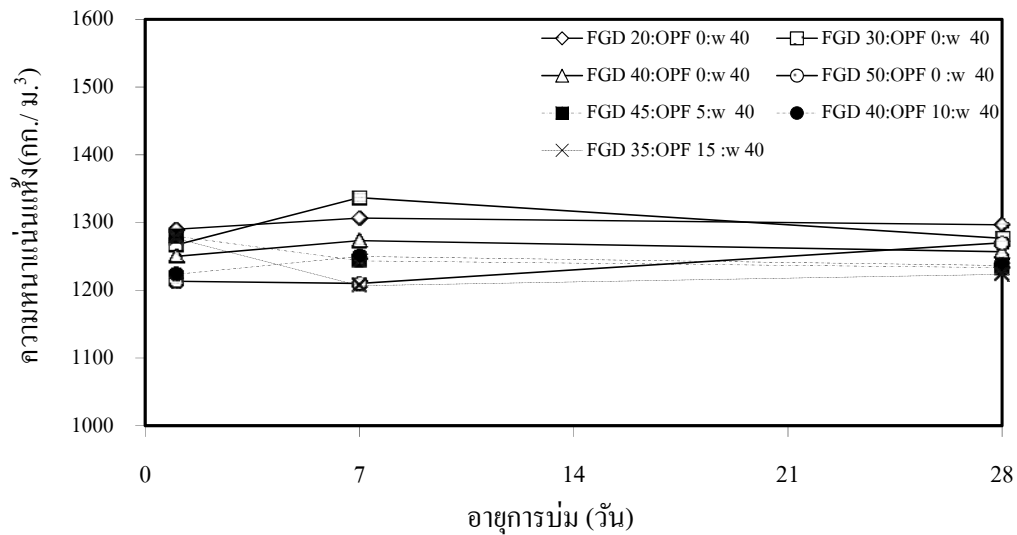
รูปที่ 4.28 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินปรับปรุง อายุบ่ม 7 วัน



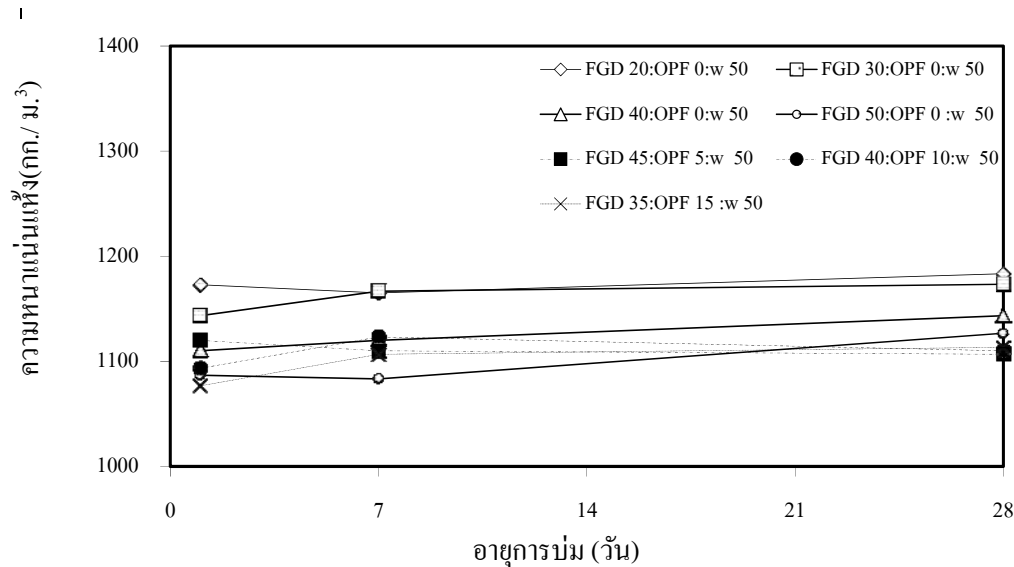
รูปที่ 4.29 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินปรับปรุง อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 4.30 ผลกระทบของอายุบ่มที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินที่ปรับปรุงด้วยปริมาณน้ำ 30% ของน้ำหนักทั้งหมด



รูปที่ 4.31 ผลกระทบของอายุบ่มที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินที่ปรับปรุงด้วยปริมาณน้ำ 40% ของน้ำหนักทั้งหมด



รูปที่ 4.32 ผลกระทบของอายุบ่มที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของดินที่ปรับปรุงด้วยปริมาณน้ำ 50% ของน้ำหนักทั้งหมด

4.5 กำลังอัดแกนเดียวของดินทุ่่งกที่ปรับปรุง

ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวด้วยวิธีพลังงานในการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Procter) โดยใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) พบว่าค่ากำลังอัดแบบไม่แช่น้ำ (Unsoak) ได้ค่ากำลังอัด 8.32 กิโลกรัม/ตารางนิ้ว ส่วนแบบแช่น้ำ (Soak) ก่อนทำการทดสอบ 2 ชั่วโมง ปรากฏว่าภายใน 10 นาที ก้อนตัวอย่างละลายน้ำหมดไม่สามารถดำเนินการทดสอบได้ เนื่องจากก้อนตัวอย่าง ดึงดูดน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาแล้วมีลักษณะเหมือนน้ำเดือดจากนั้นจะมีการแตกตัวและละลายน้ำไปอย่างรวดเร็ว จากปัญหาดังกล่าวได้ปรับเปลี่ยนการเตรียมตัวอย่างใหม่ โดยการเพิ่มปริมาณน้ำที่ร้อยละ 30 40 และ 50 ของน้ำหนักแห้งรวม แล้วทดสอบกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 1 14 และ 28 วัน พบว่าปริมาณยิปซัมเทียมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นตามปริมาณยิปซัมเทียม ในทางกลับกันกำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งยังพบว่าอายุการบ่มในช่วงแรก 0 - 1 วัน กำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนในช่วงที่สอง จาก 7 - 28 วัน กำลังอัดมีแนวโน้มกระเตื้องเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ตัวอย่างแช่น้ำก็ไม่เกิดการแตกสลายตัวลงเหมือนกับการเตรียมตัวอย่างแบบบดอัด

4.5.1 ผลกระทบของยิปซัมเทียมและปริมาณความชื้นมีต่อกำลังอัดแกนเดียว

ค่ากำลังอัดแกนเดียวกรณีของดินทุ้งกงเมื่อปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมพิจารณาถึงปริมาณของยิปซัมเทียมกรณีปรับปรุงโดยแทนที่ดินทุ้งกงในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 40 และ 50 ของน้ำหนักแห้งรวม ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนน้ำร้อยละ 30 ของน้ำแห้งรวมที่อายุบ่ม 1 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak) มีค่า 4.70 11.17 18.30 และ 21.22 ksc. ตามลำดับ และ ค่ากำลังอัดแกนเดียวแบบแช่น้ำ (Soak) ก่อนทดสอบ 2 ชั่วโมง ได้ค่า 1.95 7.20 14.7 และ 19.48 ksc. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.33 (ก) จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวแปรผันตามกับปริมาณยิปซัมเทียม เมื่อเพิ่มปริมาณยิปซัมเทียมในทุกอัตราส่วนผสม ค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ายิปซัมเทียมสามารถยึดประสานเม็ดดินให้เชื่อมเข้าไว้ด้วยกันได้ ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของยิปซัมเทียมใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะแคลเซียมออกไซด์ ทำให้มีศักยภาพในการเกิดกระบวนการปฏิกิริยาไฮเดรชัน ก่อให้เกิดการประสานแน่นระหว่างเม็ดดินส่งผลให้สมบัติกำลังอัดแกนเดียวได้ดี จากผลการทดลองกำลังอัดแกนเดียวแบบไม่แช่น้ำ กำลังอัดได้ดีกว่าแช่น้ำ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่ตัวอย่างมีน้ำดูดซึมเข้าไปตามรูเล็ก (capillary water) ทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดลดลง ในขณะที่เดียวกันก็ไปก่อให้เกิดความดันในรูโพรงดิน (pore water pressure) บีบอัดที่ส่งผลต่อกำลังแกนเดียวที่เด่นชัดอีกประการหนึ่งคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสม สังเกตเห็นว่าทุกอัตราส่วนเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมดินลดลง ค่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด ที่เป็นเช่นนี้เพราะน้ำส่วนเหลือเกินจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะทำให้เกิดโพรงอากาศในรูเล็กๆ โพรงอากาศรูเล็กๆ เหล่านี้ทำให้เกิดความดันในรูเล็ก (capillary pressure) ระหว่างเม็ดดินในทุกระดับของก้อนตัวอย่าง จึงเกิดความดันไปต้านแรงยึดเกาะกัน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง ดังตารางที่ 4.6 – 4.8

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของดินทุ้งกงที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมและเถ้าใย
ปาล์มน้ำมันที่อายุบ่ม 1 วัน

สัญลักษณ์	อัตราส่วน น้ำต่อ น้ำหนัก แห้งรวม (%)	ความหนาแน่น ทั้งหมด (kg/m ³)		กำลังอัดแกน เดียว (ksc)		โมดูลัสยืดหยุ่น, E ₅₀ (ksc)		ความเครียดที่จุด พิบัติ, ε _r (%)	
		แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ	แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ	แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ	แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ
FGD20:OPFA0	30	1853	1893	1.95	4.7	99.66	293	2.27	2.27
	40	1803	1797	1.52	1.92	90.96	127.67	1.94	1.94
	50	1667	1690	0.85	0.96	48.57	45.73	1.29	1.29
FGD30:OPFA0	30	1853	1837	7.20	11.17	437.53	464.33	1.71	2.05
	40	1783	1757	4.71	5.99	211.65	235.5	1.52	1.85
	50	1697	1700	2.77	3.1	151.08	127.09	1.28	1.61
FGD40:OPFA0	30	1853	1810	14.7	18.3	542.27	915.4	1.58	1.87
	40	1773	1750	9.87	11.44	442.25	436.41	1.36	1.66
	50	1677	1633	5.75	9.00	265.11	288.54	1.26	1.46
FGD50:OPFA0	30	1837	1817	19.48	21.22	942.64	1344.4	1.60	1.65
	40	1730	1717	12.68	14.15	779.15	898.24	1.40	1.50
	50	1647	1633	7.70	8.42	401.88	564	1.40	1.34
FGD45:OPFA5	30	1813	1800	20.1	22.02	1245.6	1677.04	2.58	1.92
	40	1773	1740	15.3	17.87	914.11	1158.00	2.81	1.25
	50	1663	1637	10.3	11.08	569.6	740.51	3.25	3.25
FGD40:OPFA10	30	1813	1783	14.61	19.23	670.75	923.78	2.26	2.26
	40	1720	1677	8.62	10.72	470.46	732.38	2.26	1.93
	50	1638	1623	5.37	6.23	210.36	378.45	2.26	2.26
FGD35:OPFA 15	30	1754	1740	10.52	10.44	630.98	736.09	1.94	2.93
	40	1802	1698	6.63	7.07	308.14	553.87	1.94	1.94
	50	1625	1604	2.90	3.38	200.53	203.85	1.67	2.27

หมายเหตุ ดินทุ้งกงกรณีไม่ปรับปรุงกำลังอัดแกนเดียว 8.32 ksc.

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของดินทุ้งกงที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมเต็มล้วนที่อายุ ปุ่ม 7 วัน

สัญลักษณ์	อัตราส่วน ของน้ำ แห้งรวม (%)	หน่วยน้ำหนัก ทั้งหมด (kg/m ³)		กำลังอัดแกน เดียว (ksc)		โมดูลัสยืดหยุ่น, E ₅₀ (ksc)		ความเครียดที่ จุดพิบัติ, ε _r (%)	
		แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ	แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ	แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ	แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ
FGD20:OPFA0	30	1880	1880	2.58	5.91	128.47	268.78	1.29	2.62
	40	1807	1800	1.51	2.36	89.6	161.09	1.95	1.95
	50	1603	1723	0.68	0.86	31.55	67.51	1.29	1.95
FGD30:OPFA0	30	1853	1870	9.74	14.68	301.14	382.55	1.62	1.62
	40	1793	1713	4.88	6.70	218.34	283.55	1.62	1.62
	50	1717	1783	2.9	3.91	116.61	220.48	1.95	1.62
FGD40:OPFA0	30	1853	1830	16.62	19.58	815.98	1089.12	1.27	1.60
	40	1767	1777	8.67	10.95	470.35	554.81	1.60	1.60
	50	1680	1660	4.87	5.16	210.36	270.63	1.60	1.27
FGD50:OPFA0	30	1837	1813	20.76	21.50	879.87	1140.4	1.6	1.93
	40	1727	1710	14.1	15.77	482.352	773.5	1.6	1.6
	50	1640	1637	8.03	9.06	342.95	499.33	1.6	1.6
FGD45:OPFA5	30	1757	1737	22.5	25.26	934.21	1383.32	1.28	1.61
	40	1730	1707	18.2	20.96	513.47	880.51	1.61	1.61
	50	1653	1640	12	11.07	496.46	495.25	1.61	1.61
FGD40:OPFA10	30	1790	1773	16.05	20.23	592.89	837.18	1.61	2.27
	40	1723	1697	11.18	11.39	455.43	573.84	1.94	1.94
	50	1667	1587	6.09	7.35	338.86	414.83	1.61	1.94
FGD35:OPFA15	30	1760	1750	11.96	15.23	504.69	359.70	1.94	1.61
	40	1710	1710	7.72	8.62	328.05	258.48	1.61	1.94
	50	1670	1650	3.49	3.68	129.52	152.78	1.94	1.94

หมายเหตุ ดินทุ้งกงกรณีไม่ปรับปรุงกำลังอัดแกนเดียว 8.32 ksc.

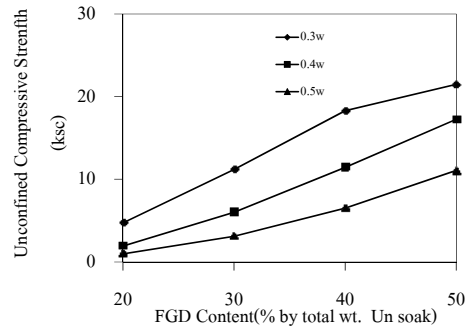
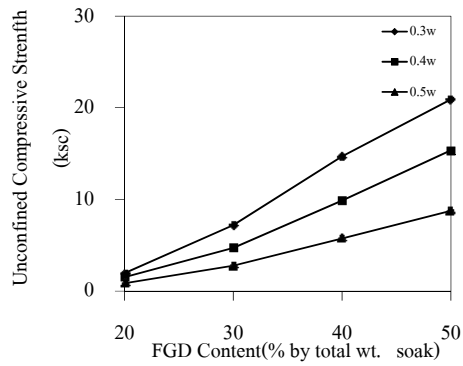
ตารางที่ 4.8 สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของดินทุ้งกงที่ปรับปรุงด้วยขี้ปซัมเทียมล้วนที่อายุบ่ม 28 วัน

สัญลักษณ์	อัตราส่วน ของ น้ำแห้ง รวม (%)	หน่วยน้ำหนัก ทั้งหมด (kg/m ³)		กำลังอัดแกน เดียว (ksc)		โมดูลัสยืดหยุ่น, E ₅₀ (ksc)		ความเครียดที่ จุดพีบีที, ε _r (%)	
		แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ	แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ	แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ	แช่น้ำ	ไม่แช่น้ำ
FGD20:OPFA0	30	1877	1867	2.56	3.99	124.49	207.73	2.29	2.29
	40	1783	1783	1.27	1.79	62.96	97.59	1.95	1.95
	50	1747	1703	0.44	0.64	24.80	37.08	1.29	1.29
FGD30:OPFA0	30	1880	1860	8.25	13.19	372.27	525.02	1.94	2.27
	40	1767	1707	3.60	4.25	202.37	284.76	1.94	1.94
	50	1707	1667	2.19	2.32	134.84	132.59	1.61	2.32
FGD40:OPFA0	30	1813	1797	16.13	16.14	497.33	846.26	1.28	1.94
	40	1740	1733	9.46	7.61	243.18	396.98	1.61	1.61
	50	1667	1633	4.60	4.79	197.35	169.15	1.94	1.94
FGD50:OPFA0	30	1833	1823	20.9	23.85	743.82	872.54	1.59	1.92
	40	1753	1757	15.35	17.26	599.80	705.99	1.27	1.29
	50	1667	1647	8.76	9.93	518.47	508.04	1.27	1.27
FGD45:OPFA5	30	1790	1763	24.9	29.86	1253.12	1274.94	0.96	1.28
	40	1720	1710	18.87	22.58	911.71	1065.41	1.28	1.28
	50	1647	1607	12.01	15.86	551.51	853.3	1.93	1.60
FGD40:OPFA10	30	1780	1750	17.8	21.5	985.47	842.76	1.61	1.61
	40	1723	1710	12.62	15.06	735.62	704.13	1.28	1.28
	50	1657	1650	8.96	12.29	489.77	490.88	1.28	1.28
FGD35:OPFA15	30	1767	1743	15.68	17.82	819.56	804.42	1.93	1.93
	40	1707	1690	13.00	13.92	650.06	592.33	1.93	2.26
	50	1660	1633	7.00	6.98	507.39	434.05	1.28	1.61

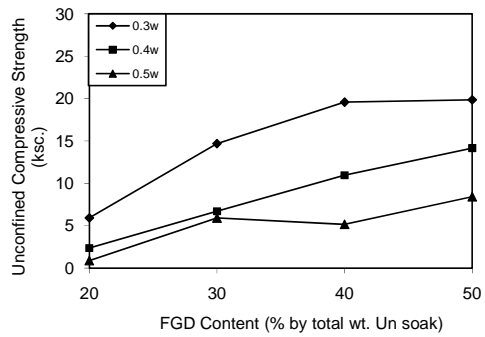
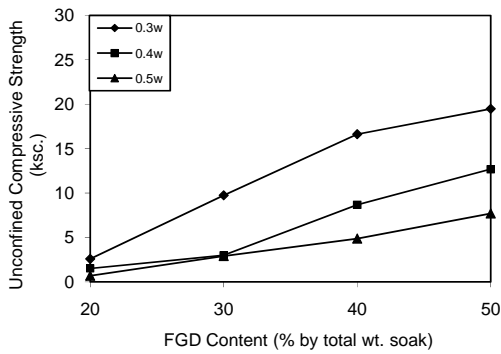
หมายเหตุ ดินทุ้งกงกรณีไม่ปรับปรุงกำลังอัดแกนเดียว 8.32 ksc.

4.5.2 ผลกระทบของยิปซัมเทียมและเถ้าไพล์น้ำมันต่อค่ากำลังอัดแกนเดียว

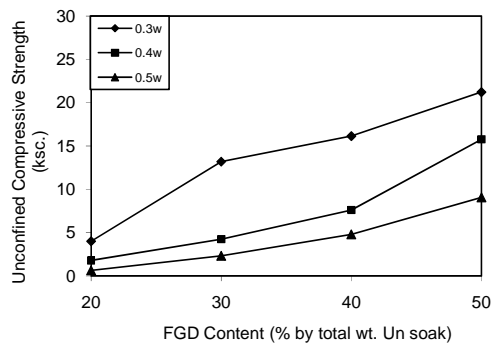
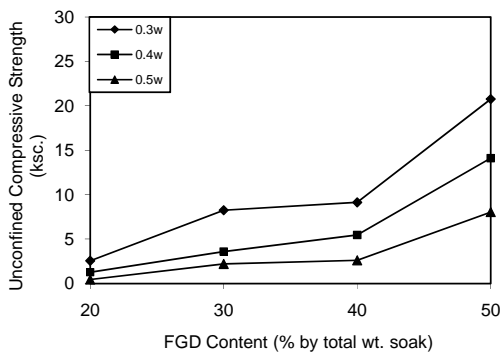
จากผลการวิเคราะห์ค่ากำลังอัดแกนเดียวกรณีของดินทุ้งกงเมื่อปรับปรุงด้วยเถ้าไพล์น้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียมที่อัตราส่วน 0:50 5:45 10:40 และ 15:35 อัตราส่วนน้ำร้อยละ 30 40 และ 50 ของน้ำหนักแห้งรวม พบว่าปริมาณของเถ้าไพล์น้ำมันที่ร้อยละ 5 ของทุกอัตราส่วนน้ำส่งผลให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุด และค่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงไปเรื่อยเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าไพล์น้ำมันเป็นร้อยละ 10 และ 15 ตามลำดับ สาเหตุที่ค่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเถ้าไพล์น้ำมัน อาจเนื่องมาจากในเถ้าไพล์น้ำมันมี CaO อยู่น้อย แต่มี SiO₂ เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งในดินทุ้งกงก็ประกอบด้วย SiO₂ มากอยู่ทุนเดิม ในขณะที่การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันปูนซีเมนต์ องค์ประกอบหลักที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีคือ CaO เป็นปัจจัยทำให้มีสมบัติกำลังอัดได้ดี เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าไพล์น้ำมันทำให้ปริมาณ SiO₂ มีมากเกินไปจนจำเป็น จึงเป็นผลทำให้กำลังลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าไพล์เกินร้อยละ 5 ดังรูปที่ 4.34 ซึ่งสอดคล้องกับคิษฐพรและคณะ (2551) ได้วิเคราะห์ค่ากำลังอัดกรณีของดินเหนียวปากพน้ำกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไพล์น้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา พบว่า การผสมเถ้าไพล์น้ำมันส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นว่าปริมาณการผสมเถ้าไพล์น้ำมัน 5% ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ปริมาณผสมเถ้าไพล์น้ำมันที่ 10% แต่เมื่อปริมาณการผสมเถ้าไพล์น้ำมัน 15% ค่ากำลังอัดลดลง



(ก)

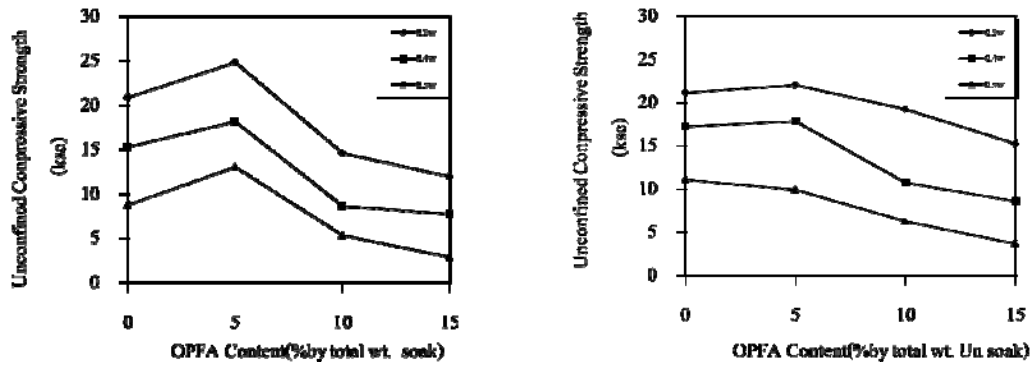


(ข)

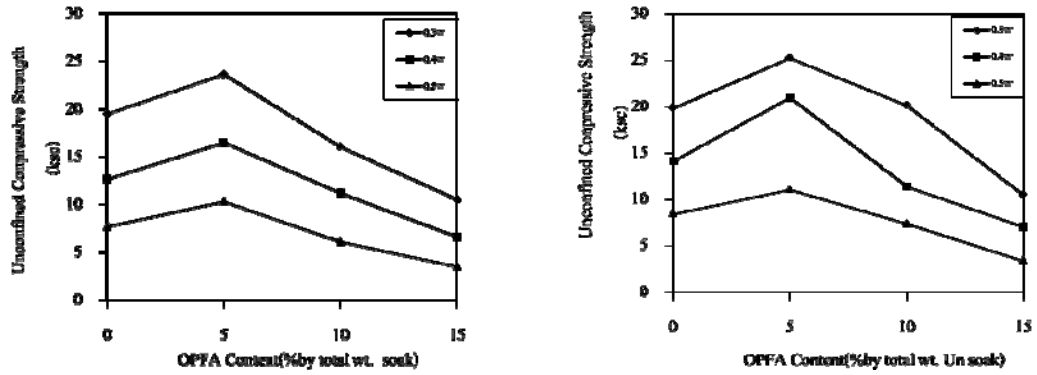


(ค)

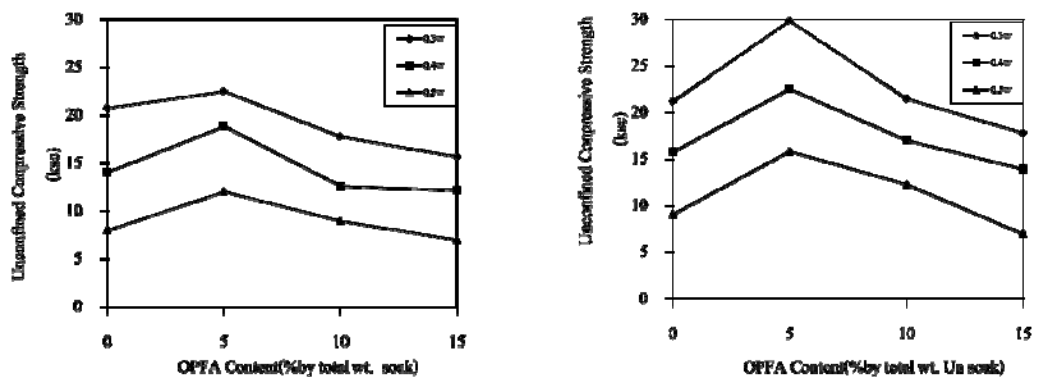
รูปที่ 4.33 การพัฒนากำลังอัดของดินทุ่กบปรับปรุงด้วยขี้ปซัมเทียมที่อายุบ่ม (ก) 1 วัน (ข) 7 วัน และ (ค) 28 วัน



(ก)



(ข)



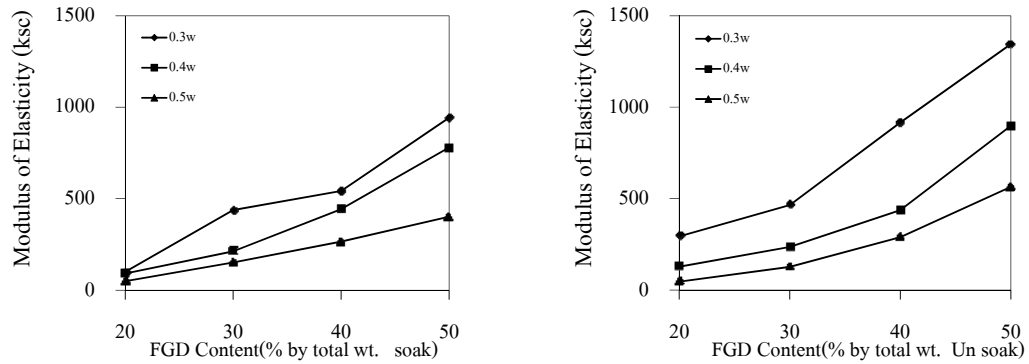
(ค)

รูปที่ 4.34 การพัฒนากำลังอัดของดินทุ่งกงปรับปรุงด้วยเถ้าเียงปาล์มน้ำมันแทนที่ขี้ปซัมเทียม อัตราส่วนต่างกัน โดยน้ำหนักแห้งรวมที่อายุบ่ม (ก) 1 วัน (ข) 7 วัน และ (ค) 28 วัน

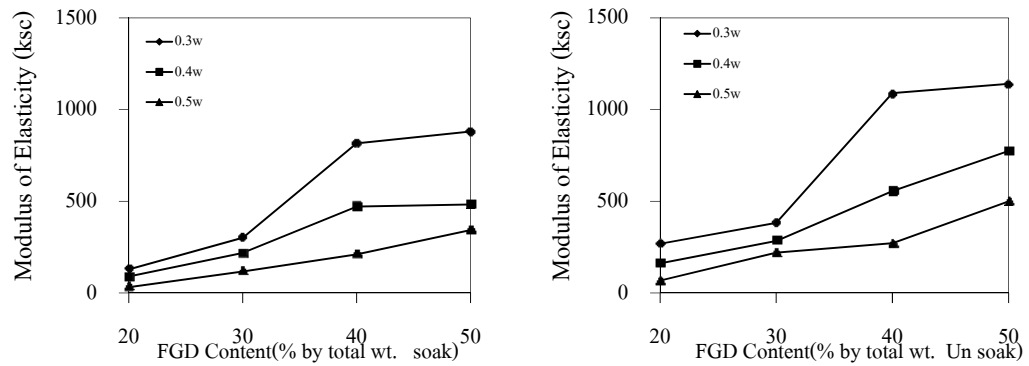
4.5.3 ผลกระทบของปริมาณยิปซัมเทียมและเถ้าไยปาล์มน้ำมันต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

ผลจากการทดสอบการอัดแกนเดียนำมาคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) พบว่าดินทุ้งกเมื่อปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมล้วนในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 40 และ 50 ของน้ำหนักแห้งรวม โดยใช้อัตราส่วนน้ำร้อยละ 30 ของน้ำแห้งรวมที่อายุบ่ม 1 วัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำก่อนทดสอบ 2 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.35 (ก) จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแปรผันตามปริมาณยิปซัมเทียม โดยเมื่อเพิ่มปริมาณยิปซัมเทียมในทุกอัตราส่วนผสม ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) เพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ายิปซัมเทียมสามารถเชื่อมประสานเม็ดดินให้ยึดเข้าไว้ด้วยกันทำนองเดียวกับปูนซีเมนต์ (สมมาตร, 2550) และเถ้าไยยางพารา (อรุณและคณะ 2552) ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีหลัก (CaO) ของยิปซัมเทียมใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะแคลเซียมออกไซด์ การเกิดกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้มีสมบัติกำลังได้ดีดังรูปที่ 4.35

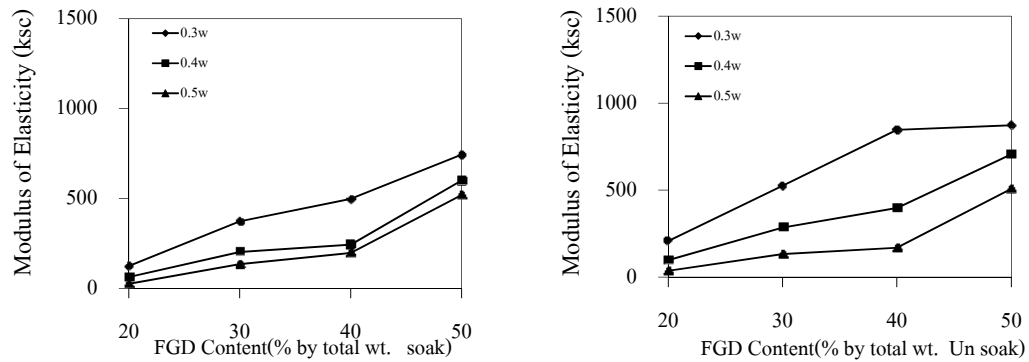
จากการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น กรณีของดินทุ้งกกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันแทนที่บางส่วนในยิปซัมเทียม เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของเถ้าไยปาล์มน้ำมัน พบว่าการผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ปริมาณการผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 10 และ 15 ส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกอัตราส่วนผสมและอายุการบ่ม ดังรูปที่ 4.36 การเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น แสดงถึงความแข็งแรง (stiffness) ของส่วนผสมดินทุ้งกที่ปรับปรุงการผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันส่งผลให้ดินทุ้งกมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่หากผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 5 จะส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง ซึ่งค่อนข้างสอดคล้องกับผลงานของศิษุพรและคณะ (2551)



(ก)

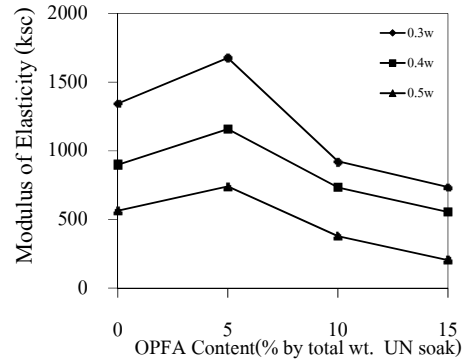
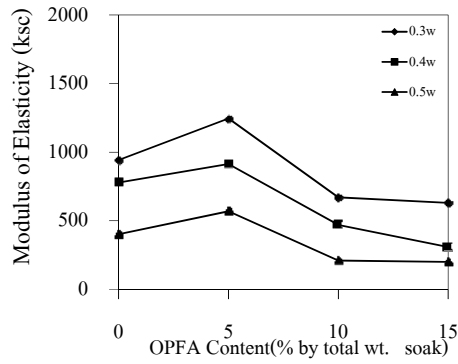


(ข)

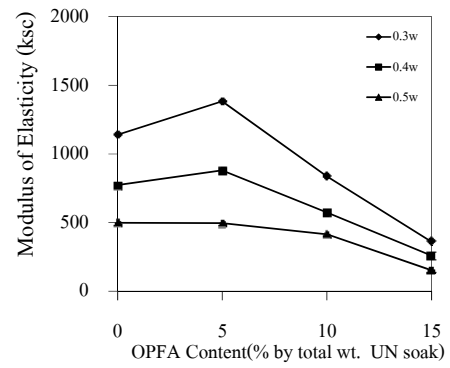
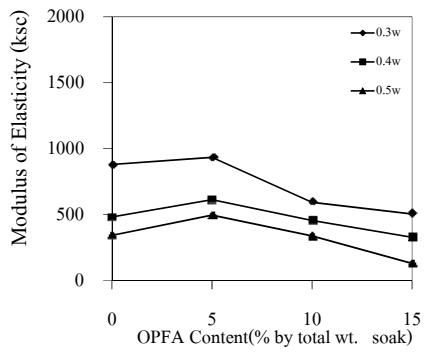


(ค)

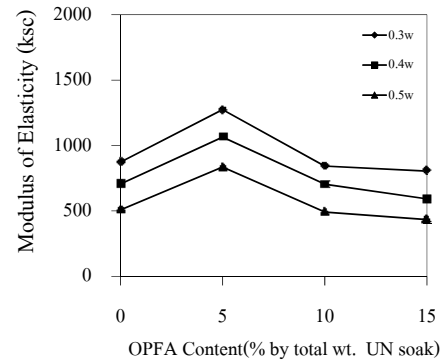
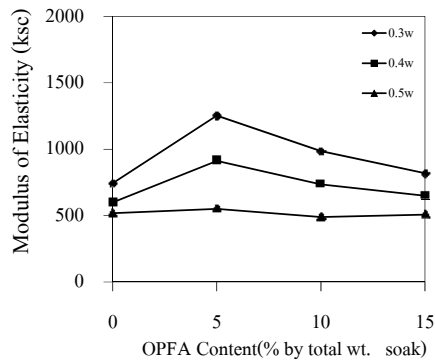
รูปที่ 4.35 พฤติกรรมโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทุ้งงที่ปรับปรุงด้วยขี้ขี้หมแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำที่อายุบ่ม (ก) 1 วัน (ข) 7 วัน และ (ค) 28 วัน



(ก)



(ข)



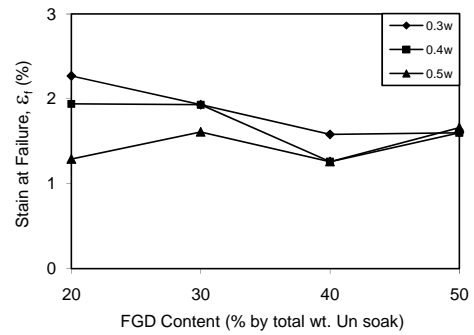
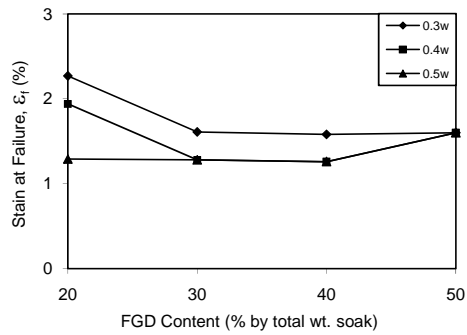
(ค)

รูปที่ 4.36 พฤติกรรมโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทุ้งกงที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำ ที่อายุบ่ม (ก) 1 วัน (ข) 7 วัน และ (ค) 28 วัน

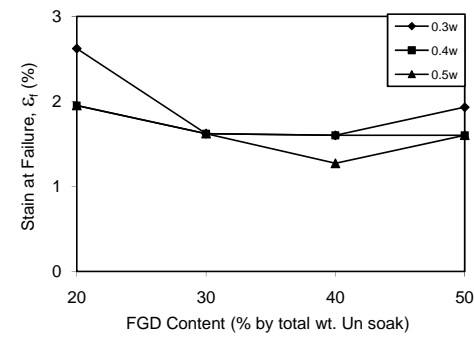
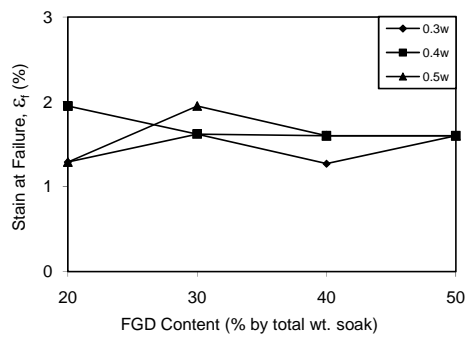
4. 5.4 ผลกระทบของปริมาณยิปซัมเทียมและเถ้าไพล์น้ำมันต่อค่าความเครียดที่จุดพิบัติ

จากผลการทดสอบการอัดแกนเดียว พบว่ากรณีเมื่อปรับปรุงดินทุ้งกงด้วยยิปซัมเทียมในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 40 และ 50 ของน้ำหนักแห้งทั้งหมด ที่อัตราส่วนน้ำร้อยละ 30 ของน้ำแห้งรวม ที่อายุบ่ม 1 วัน มีค่าความเครียดที่จุดพิบัติ (Strain at Failure) มีแนวโน้มลดลง ทั้งแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำก่อนทดสอบ 2 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.37 (ก) จะเห็นได้ว่าค่าความเครียดที่จุดพิบัติ แปรผกผันกับปริมาณยิปซัมเทียมเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณยิปซัมเทียมในทุกอัตราส่วนผสม ค่าความเครียดที่จุดพิบัติลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 4.37 การลดลงของความเครียดที่จุดพิบัติ มีความหมายเป็นนัยว่าดินทุ้งกงเมื่อปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุประสาน ซึ่งเป็นผลทำให้กำลังสูงขึ้นตามวัสดุประสาน ทำนองเดียวกับการเติมเถ้าไพล์ยางพารา (อรุณและคณะ, 2552)

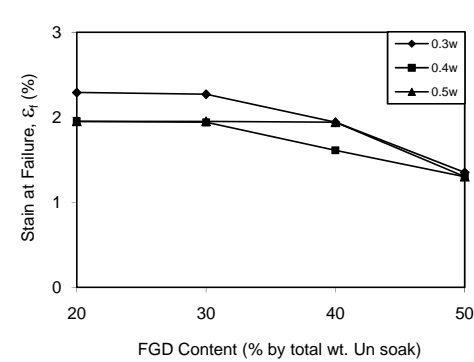
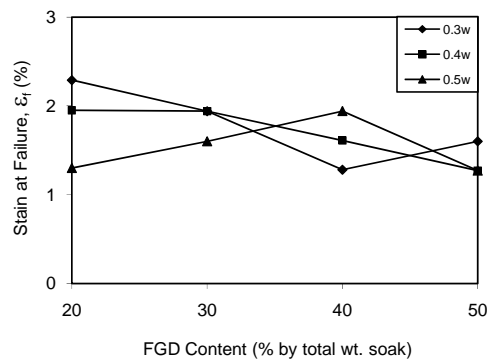
จากการวิเคราะห์ความเครียดที่จุดพิบัติ ถึงกรณีของดินทุ้งกงกรณีปรับปรุงด้วยเถ้าไพล์น้ำมันแทนที่บางส่วนในยิปซัมเทียม เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไพล์น้ำมัน พบว่าการผสมเถ้าไพล์น้ำมันส่งผลให้ค่าความเครียดที่จุดพิบัติ มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ปริมาณการผสมเถ้าไพล์น้ำมันไม่ค่อยมีผลต่อความเครียดที่จุดพิบัติ ทั้งแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำก่อนทดสอบ 2 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.38 จึงสรุปได้ว่าเถ้าไพล์น้ำมันมีผลกระทบค่อนข้างน้อยต่อค่าความเครียดที่จุดพิบัติ



(ก)

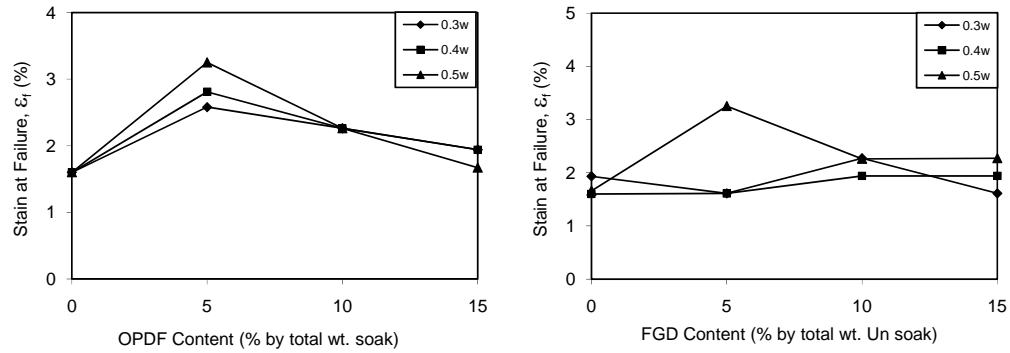


(ข)

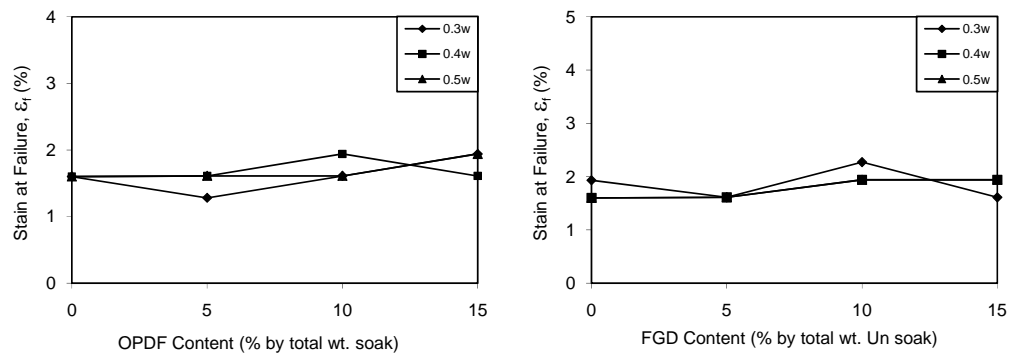


(ค)

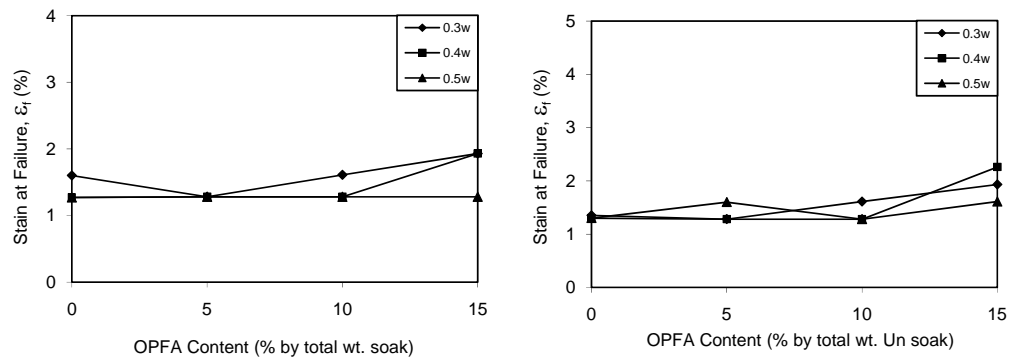
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่จุดพิบัติ กับอัตราส่วนยิปซัมเติม แบบแช่น้ำ และแบบไม่แช่น้ำที่อายุบ่ม (ก) 1 วัน (ข) 7 วัน และ (ค) 28 วัน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่จุดพิบัติกับดินทุ้งผสมเถ้าไผ่ปล้มน้ำมันแทนที่ ยิปซัมเทียม ในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 และ 15 แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำที่อายุบ่ม (ก) 1 วัน (ข) 7 วัน และ (ค) 28 วัน

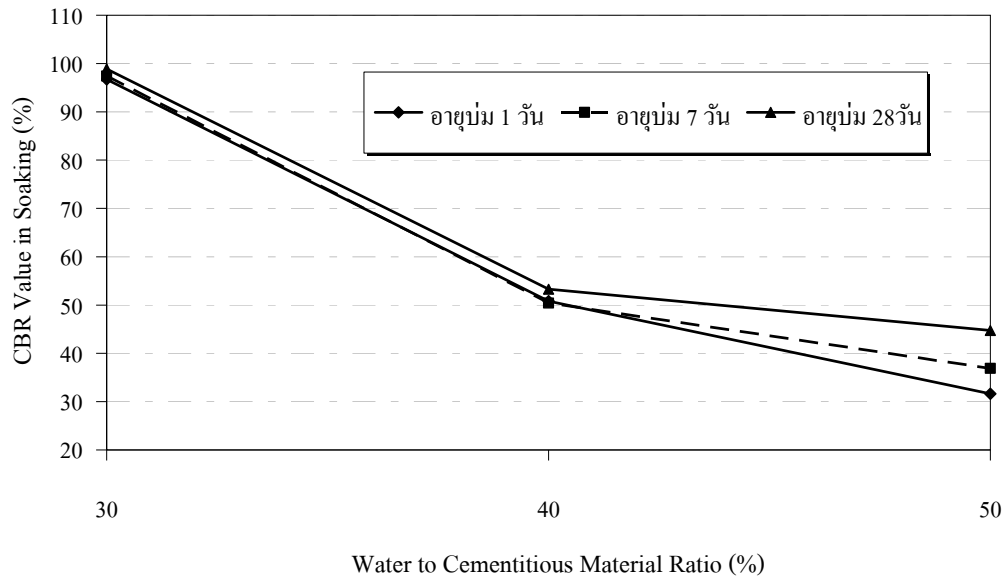
4.6 แคลิฟอร์เนีย แบร์ริง เรโซของดินทุ้งงกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพ

จากการทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบร์ริง เรโซ ของตัวอย่างที่อัตราส่วนเถ้าใยปาล์ม น้ำมันแทนที่บางส่วนของยิปซัมเทียมเป็น 5:45 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ทำให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุด จากอัตราส่วนดังกล่าวเมื่อนำมาขึ้นรูปโดยหล่อในแบบ ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 1883 ใช้เครื่องเขย่าคอนกรีตได้ฟองอากาศ พบว่ากรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักแห้งทั้งหมด และที่ระยะเวลาการบ่ม 1 7 และ 28 วัน ได้ค่าการรับแรงแบกทานสูงสุดเท่ากับร้อยละ 98.87 ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งอัตราการพัฒนารับแรงแบกทานในช่วงแรกที่อายุ 1 วัน สามารถรับกำลังได้อย่างชัดเจน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.39 และเมื่อสังเกตจากกราฟระยะเวลาการบ่ม พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นค่ากำลังแบกทานมีแนวโน้มขึ้นเล็กน้อยไป ค่ากำลังรับแรงแบกทานเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักของการเพิ่มกำลังที่ต้องอาศัยเวลาในการเกิด ดังรูปที่ 4.40

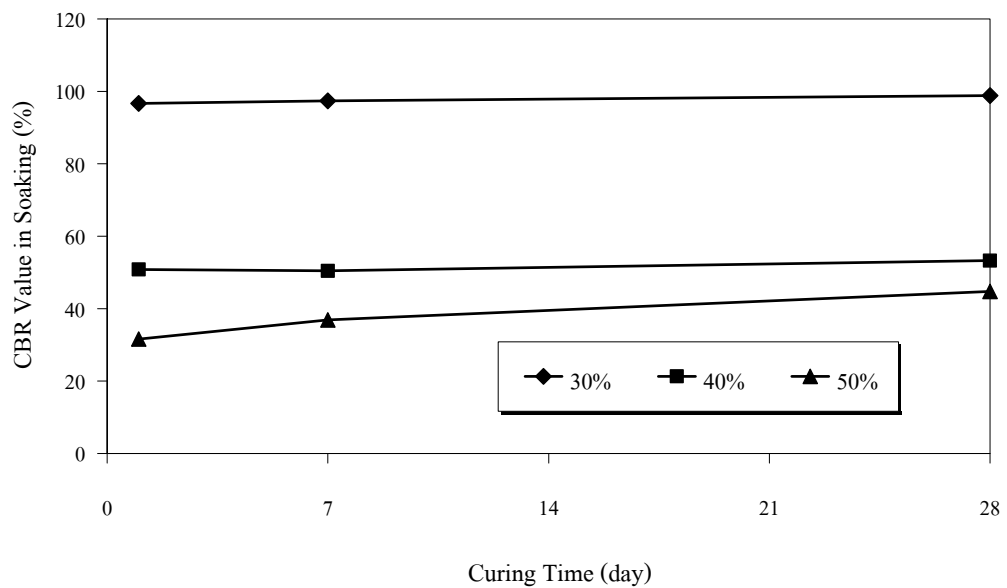
จากการพิจารณาค่า CBR ของดินที่ได้ปรับปรุง (ตารางที่ 4.9) พบว่าทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุดินผสม (รูปที่ 4.39) และทุกอายุบ่ม (รูปที่ 4.40) มีค่าเกินกว่าร้อยละ 30 ดังนั้นจึงสามารถที่ใช้ในงานทางเป็น วัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ชั้นพื้นทาง (Base) นอกจากนี้การบวมมีค่าน้อยมาก จึงมีประโยชน์หลายประการเนื่องจากวัสดุที่นำมาปรับปรุงเป็นวัสดุในท้องถิ่น ช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย และการพัฒนารับแรงแบกทานในช่วงสั้นหรืออายุบ่มน้อย (รูปที่ 4.40) ดังนั้นสามารถผสมทำงานในสนามมีสถานะฝนตกชุกได้สะดวก

ตารางที่ 4.9 ค่า CBR และการบวมตัวของดินทุ้งงที่ปรับปรุง

อัตราส่วนน้ำ (%)	ระยะเวลาการบ่ม	CBR (%)	Swelling (%)
30	1 day	96.71	0.07
	7 days	97.41	0.01-
	28 days	98.87	0.01-
40	1 day	50.80	0.01-
	7 days	50.42	0.01-
	28 days	53.27	0.01-
50	1 day	31.62	0.01-
	7 days	36.89	0.01-
	28 days	44.72	0.01-



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของดินทุ้งกงปรับปรุงด้วยเถ้าเียงปาล์มน้ำมันแทนที่อัตรา 5:45

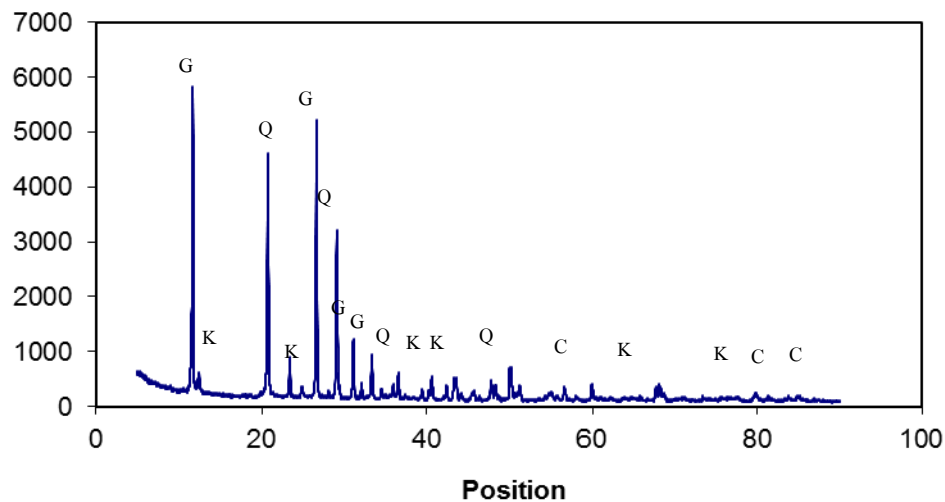


รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุดินทุ้งกงปรับปรุงด้วยเถ้าเียงปาล์มน้ำมันแทนที่อัตรา 5 ร้อยละ 5

วัสดุใช้เป็นชั้นรองพื้นทางต้องถูกเลือกเป็นรับแรงกดของขบวนการจราจรขนส่งและน้ำหนักของชั้นบน ค่าคุณลักษณะความคงทน การสึกหรอ พิกัดความเหนียวชั้น และซีบีอาร์ เป็นขีดจำกัดต่ำของมวลรวมรองพื้นทาง จากผลทดสอบสมบัติดินก่อนปรับปรุง (ตารางที่ 4.2) พบว่าค่าความคงทนแช่น้ำ กำลังอัดและซีบีอาร์อยู่นอกขอบเขตจำกัด ดังนั้นด้วยตัวดินทุ่งงเดิมนี้จึงไม่เหมาะแก่การทำเป็นชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง แต่สามารถใช้ขี้ปซัมเทียมที่นำกลับมาใช้ใหม่และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปรับปรุงทำเป็นชั้นรองพื้นทางได้

4.7 แร่ประกอบขึ้นในดินทุ่งงที่ปรับปรุง

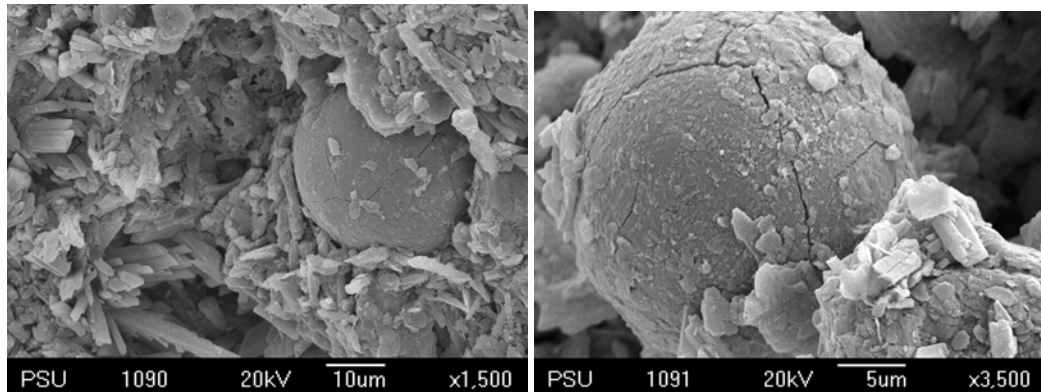
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) แก่ดินทุ่งงที่ปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 และขี้ปซัมเทียมร้อยละ 45 ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าแร่ Calcium Silicate Hydrate (CSH) เกิดขึ้นดินที่ปรับปรุงมีปริมาณค่อนข้างน้อยหรือไม่พบ CSH เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์น้อยมาก หากปริมาณ CSH มีปริมาณน้อยอาจวิเคราะห์ไม่ได้ ในการวิเคราะห์ XRD นี้ทำให้เฝ้าติดตามถึงความเป็นไปได้ที่เกิดการพิบัติแก่ตัวอย่างดิน ทำนองเดียวกับที่ Yong R.N. and Ouhadi (2007) ได้กล่าวว่าการตรวจด้วย XRD ช่วยเพิ่มเติมในการวิเคราะห์ให้มีแนวทางปฏิบัติถึงสภาพการพิบัติที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.41 ลายเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของดินทุ่งงปรับปรุงขี้ปซัมเทียม 45% และเถ้าปาล์มน้ำมัน 5% ที่อายุบ่ม 28 วัน

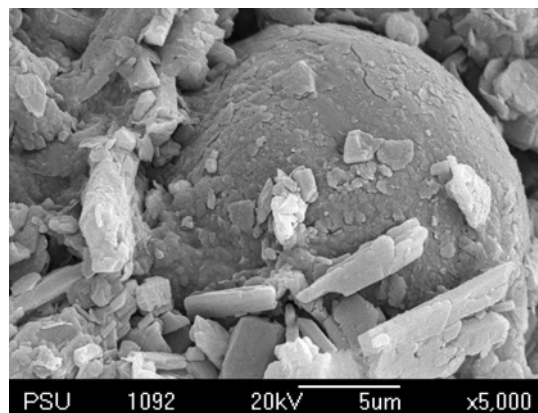
4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของดินหุ่่งกงที่ปรับปรุง

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของดินหุ่่งกงที่ปรับปรุงด้วยเถ้าไพลาล์มน้ำมันร้อยละ 5 และยิปซัมเทียมร้อยละ 45 ที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยภาพถ่ายจุลทรรศน์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าดินมีโครงสร้างที่ยึดแน่นและช่วยเพิ่มกำลังอัด ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังรูปที่ 4.42 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดินมีโครงสร้างที่ยึดติดกันแน่นกับยิปซัมเทียมและเถ้าไพลาล์มน้ำมัน และทำให้สามารถสนับสนุนว่าบรรดาเกลือได้ลดลง ช่วยให้ความกระจ่างถึงกระบวนการทางเคมีที่ได้เกิดขึ้นในดินหุ่่งกงที่ปรับปรุง



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 4.42 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าไพลาล์มน้ำมันแทนที่ยิปซัมเทียมในร้อยละ 5 กำลังขยาย (ก) 1,500 เท่า (ข) 3,500 เท่า และ (ค) 5,000 เท่า

4.9 การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยสหสัมพันธ์ของตัวแปร

การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสมบัติทางวิศวกรรมจากผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว และ แคลิฟอเนียร์ แบริง เรโซ ด้วยสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Variable Regression) เพื่อสร้างสมการการถดถอย (Regression Equation) ที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปร การวิเคราะห์ใช้โปรแกรม SPSS รุ่น 16.0 (Statistical Package for Social Science) ซึ่งค่าความน่าเชื่อถือของสมการถดถอยแสดงในรูปของค่า Multiple Coefficient of Determination (R^2) ในทำนองเดียวกับงานวิจัยของ Kaniraj and Havanagi (1999)

ซึ่งค่าของตัวแปรนำมาพิจารณาประกอบด้วย

- 1) กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, ksc), UCS
- 2) โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, ksc.), E_{50}
- 3) ความเครียดที่จุดพิบัติ (Strain at Failure, %), ϵ_f
- 4) หน่วยน้ำหนัก (Total Unit Weight (kg/m^3), t
- 5) ปริมาณน้ำ (Water Content, %), W
- 6) อายุบ่ม (Age of Curing, days), T
- 7) ปริมาณของเถ้าใยปาล์มน้ำมัน (% by wt.), OPFA
- 8) ปริมาณของยิปซัมเทียม (% by wt.), FGD

สำหรับการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรทำการจำแนกค่า R^2 แนะนำ

โดย Draper and Smith (1966)

$R^2 < 0.25$ มีความสัมพันธ์กันน้อย

$R^2 = 0.25 - 0.55$ มีความสัมพันธ์กันปานกลาง

$R^2 = 0.55 - 0.80$ มีความสัมพันธ์กันดี

$R^2 > 0.80$ มีความสัมพันธ์กันดีมาก

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าสถิติ สามารถแสดงค่ากำลังอัดแกนเดียว ค่า Modulus of Elasticity และค่า Strain at Failure โดยเปรียบเทียบกับค่าต่างๆ ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของค่าหน่วยน้ำหนักแบบแช่น้ำกับค่าปัจจัยต่างๆ

Equation Model	สมการการถดถอย	R ²
Liner	1811.505 – 1.730FGD	0.048
Liner	1762.484 – 1.557OPFA	0.076
Liner	1748.146 – 0.076Day	0.010
Liner	2056.762 – 7.738W	0.761
Liner	1818.285 – 1.531FGD – 3.310OPFA	0.114
Liner	1819.193 – 1.531FGD – 3.310OPFA – 0.076Day	0.114
Liner	2128.717 – 1.531FGD – 3.310OPFA – 0.076Day – 7.738W	0.875

ตารางที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าหน่วยน้ำหนักแบบไม่แช่น้ำกับค่าต่างๆ

Equation Model	สมการการถดถอย	R ²
Liner	1828.083 – 2.630FGD	0.103
Liner	1751.351 – 4.886OPFA	0.133
Liner	1733.544 – 0.261Day	0.002
Liner	2034.794 – 7.610W	0.679
Liner	1837.311 – 2.358FGD – 4.505OPFA	0.215
Liner	1840.442 – 2.358FGD – 4.505OPFA – 0.261Day	0.216
Liner	2144.823 – 2.358FGD – 4.505OPFA – 0.261Day – 7.610W	0.896

จากตารางที่ 4.10 และ 4.11 เมื่อทำการพิจารณาค่าของตัวแปรที่นำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) แบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำ พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าหน่วยน้ำหนักมากที่สุดคือค่า W (อัตราส่วนน้ำ) ซึ่งมีค่า R² เท่ากับ 0.761 และ 0.679 และตัวแปรที่มีความสำคัญน้อยที่สุดคือ ค่าเวลาในการบ่ม ซึ่งทำให้สรุปได้ว่า ตัวแปร W มีความสำคัญมากที่สุดต่อค่าหน่วยน้ำหนัก โดยที่เวลาในการบ่มมีความสำคัญน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่า UCS แบบแช่น้ำกับค่าปัจจัยต่างๆ

Equation Model	สมการการถดถอย	R ²
Liner	0.486FGD – 8.739	0.523
Liner	0.204OPFA + 8.446	0.034
Liner	0.014Day + 9.152	0.011
Liner	24.918 – 0.39W	0.265
Liner	0.479FGD + 0.127OPFA – 8.998	0.536
Liner	0.479FGD + 0.127OPFA + 0.014Day – 9.165	0.537
Liner	0.479FGD + 0.127OPFA + 0.014Day – 0.39W + 6.433	0.801

ตารางที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่า UCS แบบไม่แช่น้ำกับค่าปัจจัยต่างๆ

Equation Model	สมการการถดถอย	R ²
Liner	0.506FGD - 7.445	0.448
Liner	0.189OPFA + 10.546	0.023
Liner	0.60Day + 10.643	0.010
Liner	31.549 – 0.505W	0.339
Liner	0.50FGD + 0.109OPFA – 7.668	0.455
Liner	0.50FGD + 0.109OPFA + 0.06Day – 8.383	0.465
Liner	0.50FGD + 0.109OPFA + 0.06Day – 0.505W – 11.809	0.815

จากตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรที่มีผลต่อความสัมพันธ์ ของค่ากำลังอัดแกนเดียว พบว่าตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อค่า USC คือค่า FGD และค่าที่มีผลน้อยที่สุดคือค่า ค่า Day และเมื่อนำค่าทั้งหมดมาวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ สามารถทำให้ค่า R² มีค่ามากที่สุด และตัวแปรอีกตัวที่มีค่าความสำคัญรองลงมาก็คือ อัตราส่วนน้ำ ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญในการพัฒนากำลัง โดยตัวแปรเวลาหรือจำนวนวันที่ใช้บ่มมีความสำคัญน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบแช่น้ำ กับค่าปัจจัยต่างๆ

Equation Model	สมการการถดถอย	R ²
Liner	20.656FGD – 337.029	0.466
Liner	11.595OPFA + 380.159	0.055
Liner	4.336Day + 378.174	0.032
Liner	1014.795 – 14.615W	0.184
Liner	20.154FGD + 8.344OPFA – 354.119	0.494
Liner	20.154FGD + 8.344OPFA + 4.336Day – 406.156	0.527
Liner	20.154FGD + 8.344OPFA + 4.336Day – 14.615W + 178.428	0.711

ตารางที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบ ไม่แช่น้ำ กับค่าปัจจัยต่างๆ

Equation Model	สมการการถดถอย	R ²
Liner	26.076FGD – 416.601	0.455
Liner	7.828OPFA + 518.404	0.015
Liner	0.008Day + 551.837	0.011
Liner	1452.945 – 22.525W	0.267
Liner	25.865FGD + 3.652OPFA – 424.082	0.458
Liner	25.865FGD + 3.652OPFA + 0.008Day – 424.175	0.458
Liner	25.865FGD + 3.652OPFA + 0.008Day – 22.525W + 476.893	0.852

ตารางที่ 4.14 และ 4.15 เมื่อทำการพิจารณาค่าของตัวแปรที่นำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น แบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำ พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากที่สุดคือ ค่า FGD ซึ่งมีค่า R² เท่ากับ 0.466 และ 0.455 และตัวแปรที่มีความสำคัญน้อยที่สุดคือ ค่าเวลาในการบ่ม ซึ่งทำให้สรุปได้ว่า ค่าตัวแปร FGD มีความสำคัญมากที่สุดต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยที่ค่าอัตราส่วนน้ำมีค่าที่มีความสำคัญรองลงมา โดยที่เวลาในการบ่มมีความสำคัญน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่าความเครียดแบบแช่น้ำ กับค่าปัจจัยต่างๆ

Equation Model	สมการการถดถอย	R ²
Liner	$1.775 - 0.002FGD$	0.002
Liner	$0.016OPFA + 1.634$	0.046
Liner	$1.801 - 0.008Day$	0.055
Liner	$1.819 - 0.003W$	0.003
Liner	$1.742 - 0.003FGD + 0.016OPFA$	0.050
Liner	$1.842 - 0.003FGD + 0.016OPFA - 0.008Day$	0.105
Liner	$1.960 - 0.003FGD + 0.016OPFA - 0.008Day - 0.003W$	0.119

ตารางที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของค่าความเครียดแบบ Unsoak กับค่าปัจจัยต่างๆ

Equation Model	สมการการถดถอย	R ²
Liner	$2.259 - 0.012FGD$	0.077
Liner	$1.728 + 0.017OPFA$	0.057
Liner	$1.871 - 0.006Day$	0.026
Liner	$2.198 - 0.010W$	0.039
Liner	$2.219 - 0.013FGD + 0.020OPFA$	0.149
Liner	$2.287 - 0.013FGD + 0.020OPFA - 0.006Day$	0.175
Liner	$2.682 - 0.013FGD + 0.020OPFA - 0.006Day - 0.010W$	0.214

จากตารางที่ 4.16 และ 4.17 เมื่อทำการพิจารณาค่าของตัวแปรที่นำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำ พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเครียดมากที่สุดคือ ค่า OPFA ซึ่งมีค่า R² เท่ากับ 0.046 และ 0.057 และตัวแปรที่มีความสำคัญน้อยที่สุดคือ ค่าเวลาในการบ่ม ซึ่งทำให้สรุปได้ว่า ตัวแปร OPFA มีความสำคัญมากที่สุดต่อค่า Modulus of Elasticity โดยที่ค่า OPFA มีความสำคัญที่สุด และค่า FGD ที่มีความสำคัญรองลงมา โดยที่เวลาในการบ่มมีความสำคัญน้อยที่สุด

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ พบว่าตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างคินที่นำมาทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวทั้งตัวอย่างที่แช่น้ำและตัวอย่างที่ไม่ได้แช่น้ำ พบว่าค่า USC และ Modulus of Elasticity ของตัวอย่างทั้งสองสภาวะค่าตัวแปรที่มีผลต่อการพัฒนาของกำลังอัด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตัวของตัวอย่างคือตัวแปร ค่า FGD (ปริมาณยิปซัมเทียม) และค่า W (อัตราส่วนของน้ำ) ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์และนำมาเป็นตัวแปรในการสร้างสมการพบว่า ค่า R^2 ที่ได้จะมีค่าเข้าใกล้ 1.000 มากกว่าตัวแปรอื่นๆ และตัวแปรที่มีผลต่อความสัมพันธ์น้อยที่สุดคือ ตัวแปร T (ระยะเวลาในการบ่ม) ซึ่งจะสามารถสังเกตได้จากค่า R^2 ของสมการ ซึ่งจะมีค่าน้อยมาก

จากสมการทั้งหมดที่ได้ทำการวิเคราะห์ทางสถิติ จึงทำให้สามารถสรุปถึงความสำคัญของตัวแปรเมื่อเปรียบเทียบกับข้อเสนอแนะของ Draper and Smith (1966) พบว่าตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันดี คือ FGD และ W เพราะฉะนั้นจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ตัวแปรอื่นๆ มีความสัมพันธ์กันด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาดินทุ่งกงที่นำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยยิปซัมเทียมและเถ้าไยปาล์ม น้ำมันในห้องทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ดินทุ่งกงมีความเหมาะสมในการปรับปรุงโดยวิธีทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบหลักประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) และเนื้อดินละเอียดง่ายต่อการทำปฏิกิริยาเคมีกับวัสดุประสานได้ดี

2) ยิปซัมเทียมเมื่อนำไปอบ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีองค์ประกอบหลักทางเคมี (CaO) ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำเกิดการก่อตัวและแข็งตัว เกิดปฏิกิริยากับ น้ำ ซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) จะก่อให้เกิดความร้อน Hydration ทำให้โครงสร้างดินยึดแน่นขึ้นและช่วยเพิ่มกำลังอัดได้ดี

3) เถ้าไยปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบทางเคมีจัดเป็นสารปอซโซลาน Class C ตามมาตรฐาน ASTM C 618 สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน Pozzolanic Reaction

4) การปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 40 และ 50 ทำให้ดินรับกำลังได้เพิ่มตามปริมาณยิปซัมเทียมและกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกที่อายุบ่ม 1 วัน หลังจากนั้นกำลังจะค่อยๆเพิ่มขึ้นทั้งแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำ

5) การปรับปรุงด้วยเถ้าไยปาล์มแทนที่ยิปซัมเทียมในอัตราส่วน 5 : 45 เมื่อนำไปแช่น้ำก่อนทดสอบพบว่าก้อนตัวอย่างยังคงสภาพอยู่ได้และยังรับกำลังอัด (UCS) และ รับแรงเบกทาน (CBR) สามารถใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง(Subbase)และชั้นพื้นทาง (Base) ตามมาตรฐานงานทางได้

6) ปริมาณน้ำในส่วนผสมพบว่ามีผลต่อการปรับปรุงดินทุกอัตราส่วน ปริมาณน้ำที่ OMC. ส่งผลให้การรับกำลังอัดแบบไม่แช่น้ำได้ดีมาก แต่เมื่อนำไปแช่น้ำก่อนก้อนตัวอย่างละลายน้ำหมดและอัตราส่วนน้ำร้อยละ 30 40 และ 50 การรับกำลังอัดแปรผกผันกับปริมาณน้ำ

7) ระยะเวลาการบ่มพบว่าส่งผลต่อการรับกำลังอัดของดินที่ปรับปรุงให้สูงขึ้นมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การศึกษาวิจัยดินทุ่งกงปรับปรุงคุณภาพด้วยยิปซัมเทียมเถ้าไยเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นการศึกษาในระดับในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการพิจารณาเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินจากบ่อขี้ม ซึ่งหากนำไปใช้งานจริงจะต้องพิจารณาถึงวิธีการดำเนินงาน การบดอัด สภาพหน้างาน ดังนั้นอาจจะต้องสร้างแปลงทดลองในสนามจริง เพื่อทำการศึกษาโดยอาศัยข้อมูลการทำงานจริงในสนามเป็นตัวเปรียบเทียบกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการ แล้วหาค่าปรับแก้เพื่อให้ค่าในห้องปฏิบัติการสอดคล้องกับค่างานจริงในสนาม

2) การศึกษานี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างจากบ่อขี้มในตำบลทุ่งกง อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารณนำไปใช้ได้กับดินตัวอย่างอื่นๆ จึงควรมีการทดสอบการนำยิปซัมเทียมไปใช้ในการปรับปรุง ดินจากแหล่งอื่นๆ เช่น ดินเหนียวอ่อนปากพั้ง ดินเหนียวอ่อนระโนด ดินเหนียวอ่อนปัตตานี เป็นต้น

3) สมการสหสัมพันธ์พหุคูณ ของค่าต่างๆของคุณสมบัติวิศวกรรมกับค่าต่างๆของคุณสมบัติดัชนีที่ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นสมการของดินทุ่งกง จังหวัดสุราษฎร์ธานีเท่านั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่หลากหลายและมากยิ่งขึ้น ควรศึกษาบริเวณดินของจังหวัดอื่นๆ เช่น จังหวัดสงขลา จังหวัดสตูล จังหวัดพัทลุง จังหวัดปัตตานี เป็นต้น

4) ค่ากำลังอัดของการปรับปรุงคุณภาพดินทุ่งกงด้วยยิปซัมเทียมและเถ้าไยปาล์มน้ำมัน หากต้องการให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นกว่าเดิมควรหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมที่ให้กำลังอัดที่สูงสุดแบบแห้งน้ำโดยเพิ่มปริมาณน้ำระหว่าง OMC. ถึง 30% ของน้ำหนักแห้งรวม

5.2.5 ควรมีการทำกรปรับปรุงสมบัติของดินทุ่งกงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ควบคู่กันไปด้วย เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังที่พัฒนาขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับยิปซัมเทียม ในด้านต่างๆ ด้วย

- ดิษฐพร แก้วมณีโชค ดนุพล ตันนโยภาส และพิพัฒน์ ทองนิม. (2551). คุณลักษณะพฤติกรรมของดินเหนียวปากพั้งที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราบดอัด การประชุมใหญ่สามัญประจำปี 2550 สมาคมทางหลวงแห่งประเทศไทย กรมทางหลวง 1 เมษายน 2551 7 หน้า (ได้รับรางวัลรองชนะเลิศ อันดับ 1)
- ทรงพล บุญมาดี (2529). ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength and Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมซีเมนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร. หน้า 100 - 128
- พรนราญ์ บุญราศรี และดนุพล ตันนโยภาส. 2551. อิทธิพลปอซโซลานของเถ้าไยปาล์มน้ำมันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมกะลาปาล์มน้ำมัน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13 รร.จอมเทียน ปาล์มบีช พัทยา จ.ชลบุรี 14-16 พฤษภาคม 2551 หน้า (MAT) Page 7 – (MAT) Page 12. (CD-ROM)
- ภาณุวัฒน์ สุริยฉัตร และสำราญ มีล่อง (2547). คุณสมบัติธรณีเทคนิคของดินเหนียวบางกอกผสมแร่ยิปซัม. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 27 ฉบับที่ 1. หน้า 3-16
- วิจิตรอัจฉรา สรรพกิจจานง, ธนศักดิ์ ไร่กระโทก และบุญเลิศ พัดฉวี (2536). เถ้าลอยในงานทาง. รายงานฉบับที่ วพ. 131 ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
- สถาพร ภูวิจิตรจารุ (2542). ปฏิพิภคศาสตร์ ไลบรารี นาย พับลิชซิ่ง, กรุงเทพฯ, 592 หน้า
- สมชัย กกกำแหง (2535). การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน. การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2535. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร
- สมมาตร สวัสดิ์ (2550). การปรับปรุงดินคันทางด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในจังหวัดสงขลาและสตูล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- สมมาตร สวัสดิ์ สราวุธ จริตงาม ดนุพล ตันนโยภาส และพิพัฒน์ ทองนิม. 2551. การปรับปรุงดินคันทางด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในจังหวัดสงขลาและสตูล การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 8-9 พฤษภาคม 2551 หน้า 74-79.
- สุวัฒนา นิคม และดนุพล ตันนโยภาส (2552). คุณลักษณะของสมบัติบางประการของวัสดุยิปซัมเทียมผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 สุรสัมมนาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 13-15 พฤษภาคม 2552 เล่มที่ 5 หน้า 1793-1799.

- สุรพันธ์ สุคันปรีย์, ชรินทร์ นมรัทธ์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2545). การใช้กากแกลเชื่อมคาร์ไบด์ และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต. การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรม ประจำปี 2545. 20-23 มิถุนายน. กรุงเทพฯ. หน้า 191-199
- อภิรักษ์ นพรัตน์ และคุณพล ตันนโยภาส (2551). ผลกระทบของหินฝุ่นแกรนิตและเถ้าปาล์ม น้ำมันที่มีต่อกำลังอัดและความคงทนต่อกรดของมอร์ตาร์ การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13 รร.จอมเทียนปาล์มบีช พัทยา จ.ชลบุรี 14-16 พฤษภาคม 2551 หน้า (MAT) Page 19-(MAT) Page 24. (CD-ROM)
- อภิสิทธิ์ กล้าเหม็ง (2547). พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินแกรนิตที่ปรับเสถียรภาพด้วย เถ้าลอยผสมซีเมนต์สำหรับเป็นวัสดุก่อสร้างทาง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- อรุณ สุวรรณสุนทร คุณพล ตันนโยภาส และพิพัฒน์ ทองฉิม (2552). ผลกระทบของการผสมตัว ปรับสภาพเถ้าแกลบและเถ้าไม้ยางพารามีต่อดินเหนียวสงขลาสำหรับวัสดุกันทาง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 21-22 พฤษภาคม 2552 หน้า 21- 26. (CD-ROM)
- Arora, S. and Aydilek, A.H. (2005). Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 17, No. 6, pp. 640-649.
- ASTM D3282 (2004). Standard practice for classification of soils and soil aggregate mixtures for highway construction purposes,
- Atanur, A. (1973). Lime Stabilization and its Application in Road Construction. Ege University Library of the Faculty of Civil Engineering, Ankara.
- Attom, M.F. and Al-Sharif, M.M. (1998). Soil Stabilization with Burned Olive Waste. Applied Clay Science, Vol. 13, pp. 219-230.
- Awal, A.S.M.A. and Hussin, M.W. (2009). Strength, Modulus of Elasticity and Shrinkage Behaviour of POFA Concrete. Malaysian Journal of Civil Engineering. Vol. 21, No. 2, pp. 125-134.
- Aytekin, M. (2004). Experimental Soil Mechanics. Teknik Publishing Company, Ankara, Expanded 2nd ed., 634 pages.
- Basha, E.A., Hashim, R., Mahmud, H.B. and Muntohar, A.S. (2005). Stabilization of Residual Soil with Rice Husk Ash and Cement. Construction and Building Materials, Vol. 19, Issue 6, pp. 448-453.

- Bahar, R., Benazzoug, M. and Kenai, S. (2004). Performance of Compacted Cement-Stabilised Soil. Cement & Concrete Composites, Vol. 26, Issue 7, pp. 811–820.
- Bell, F.G. (1996). Lime stabilization of Clay Minerals and Soils. Engineering Geology, Vol. 42, Issue 4, pp. 223–37.
- Bell, F.G. (1993). Engineering Treatment of Soils. 1st ed., E. & F.N. Spon, London.
- Bowles, J.E. (1984). Physical and Geotechnical Properties of Soils. McGraw-Hill Book Company;
- Brooks, R., Udoeyo, F.F. and Takkalapelli, K.V. (2011). Geotechnical Properties of Problem Soils Stabilized with Fly Ash and Limestone Dust in Philadelphia, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 23, No. 5, pp.711-716.
- Cernica, J.N. (1995). Geotechnical Engineering Soil Mechanics, John Wiley & Sons, USA.
- Circeo, L.T., Davidson, D.T. and David, H.T. (1962). Strength Naturity Relation of Soil-Cement Mixture. Iowa State University for 41th Annual Meeting of the Highway Research Board. pp. 35-45.
- Collins, R.J. and Ciesielski, S.K. (1994). Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction. Synthesis of Highway Practice 199, National Cooperative Research Program (NCHRP), Transportation Research Board, Washington, DC.
- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L. and Pinto, A.T. (2012). Effect of Calcium Content on Soil Stabilisation with Alkaline Activation. Construction and Building Materials, Vol. 29, pp. 167-174.
- Cuisinier, O., Le Borgne, T., Deneele, D. and Masrouri, F. (2011). Quantification of the Effects of Nitrates, Phosphates and Chlorides on Soil Stabilization with Lime and Cement. Engineering Geology, Vol. 117, Issues 3-4, pp. 229-235.
- Degirmenci, N., Okucu, A. and Turabi, A. (2007). Application of Phosphogypsum in Soil Stabilization. Building and Environment, Vol. 42, Issue 9, pp. 3393-3398.
- Dunn, I.S., Anderson, L.R. and Kiefer, F.W. (1980). Fundamentals of Geotechnical Analysis. John Wiley & Sons, USA.
- Edil, T.B., Acosta, H.A. and Benson, C.H. (2006). Stabilizing Soft Fine-Grained Soils with Fly Ash. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 283-294.

- Gordon, R.G. (1984). Recent Experiences and Developments in Design and Construction of Cement Stabilized Pavement. Australian Road Research Board Symposium. 12 p.
- Guney, Y, Sari, D, Cetin, M. and Tuncan, M. (2007). Impact of Cyclic Wetting–Drying on Swelling Behavior of Lime-Stabilized Soil. Building and Environment. Vol. 42, Issue 2, pp. 681–688.
- Hausmann, M.R. (1990). Engineering Principles of Ground Modification. Mcgraw-Hill College, Sydney. 632 p.
- Hogentogler, C.A. (1938). Engineering Properties of the Soils. New York. pp. 1-24.
- Hossain, K.M.A. 2011. Stabilized Soils Incorporating Combinations of Rice Husk Ash and Cement Kiln Dust. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 23, No. 9, pp. 1320-1327.
- Hussin, MW and Awal, A.S.M.A. (1997). Palm Oil Fuel Ash - a Potential Pozzolanic Material in Concrete Construction, Journal of Ferrocement. 27(4), pp.321-327.
- Ingles, O.G. (1970). Mechanism of Clay Stabilization with Inorganic Acids and Alkalis. Butterworth. Sydney. Australia. 374 p.
- Ishida, T., Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A. (1999). A Study on Shrinkage of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash. Proceedings of the Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Vol. 2. 27-29 August 1999. Kochi. Japan. pp. 1378-1383
- Kaniraj, S.R. and Havanagi, V.G. (1999). Compressive Strength of Cement Stabilized Fly Ash-Soil Mixtures. Cement and Concrete Research, Vol. 29, Issue 5, pp. 673–677.
- Karol, R.H. (1960). Soils and Soil Engineering. New Jersey.
- Khattab, S.A.A., Al-Mukhtar, M. and Fleureau, J.-M. (2007). Long-Term Stability Characteristics of a Lime-Treated Plastic Soil. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 358-366.
- Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V. and Karahalios, A. (2005). Stabilisation of Clayey Soils with High Calcium Fly Ash and Cement. Cement & Concrete Composites, Vol. 27, Issue 2, pp. 301–313.
- Lee, K.I., White, W. and Ingles, O.G. (1983). Geotechnical Engineering. The University of New South Wales, Australia.

- Li, Y. and Sadakata, M. (1999). Study of Gypsum Formation for Appropriate Dry Desulfurization Process of Flue Gas. Fuel, Vol. 78, Issue 9, pp. 1089-1095.
- Lovering, W.R. (1951). Uniformity of Class C Cement Treated Base Subject of Tests. California Highways and Public Works. pp. 43-45
- Maner, A.W. (1952). Curing Soil-Cement Base. Highway Research Board Proceeding. Vol. 31. pp. 540-558
- Metcalf, J.B. (1977). Principle and Application of Cement and Lime Stabilization. Australian Road Research Board. ARR No. 49. 20 p
- Mitchell, J.K. (1976). The Properties of Cement-Stabilized Soils. Sydney. 632 p
- Mitchell, J.K. and Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons Inc.,
- Mitchell, J.K. (1981). Soil Improvement: State-of-the-Art Report, Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (XICSMFE), Stockholm, Vol. 4. , Sweden, pp. 509-565.
- Mousa, F., Attom, M. and Al-Sharif, M. (1998). Soil Stabilization with Burned Olive Waste, Applied Clay Science, Vol. 13, Issue 3, pp. 219-230.
- Nalbantog ĩ lu, Z. (2004). Effectiveness of Class C Fly Ash as an Expansive Soil Stabilizer. Construction and Building Materials, Vol. 18, Issue 6, pp. 377–381.
- Nishida, K., Sasaki, S. and Kuboi, Y. (1987). Amorphous Materials of Decomposed Granite Soil and their Influence on Lime Stabilization : Proc Ninth Southeast Asian Geotechnical Conference, Bangkok, 7–11 December 1987 V2, P8.47–8.56. Publ Bangkok: Southeast Asian Geotechnical Society, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Volume 27, Issue 3, June 1990, Page A145
- Osunade, J.A. (2002). Effect of Replacement of Lateritic Soils with Granite Fines on the Compressive and Tensile Strengths of Laterized Concrete. Building and Environment, Vol. 37, Issue 5, Ppp. 491-496.
- Pedarla, A., Chittoori, S., Puppala, A.J., Hoyos, L.R. and Saride, S. (2010). Influence of Lime Dosage on Stabilization Effectiveness of Montmorillonite Dominant Clays. Proceedings of the Conference GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling, & Design.
- Poh, H.Y., Ghataora, G.S. and Ghazireh, N. 2006. Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 229-240.

- Prabakara, J., Dendorkarb, N. and Morchhalec, R.K. (2004). Influence of Fly Ash on Strength Behavior of Typical Soils. Construction and Building Materials, Vol. 18, pp. 263–267.
- Raj, P.P. (1995). Geotechnical Engineering. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Rahman, M.A. (1987a). Effects of Cement-Lime Mixes on Lateritic Soils for Use in Highway Construction. Building and Environment, Vol. 22, Issue 2, pp. 141-145.
- Rahman, M.A. (1987b). A Comparative Study of the Potentials of Rice Husk Ash on Cohesive and Cohesionless Soils. Building and Environment, Vol. 22, Issue 4, pp. 331-337.
- Rahman, M.D.A. (1986). The Potentials of Some Stabilizers for the Use of Lateritic Soil in Construction. Building and Environment, Vol. 21, Issue 1, pp. 57-61.
- Rodriguez, A.R., Castillo, H. and Sowers, G.F. (1988). Soil Mechanics in Highway Engineering. Germany: Trans Tech Publications.
- Ruenkraitersa, T. (1982). Principle of Soil Stabilization. Department of Highways. Bangkok. Thailand. 132 p
- Saltan, M. And Findik, F.S. (2008). Stabilization of Subbase Layer Materials with Waste Pumice in Flexible Pavement. Building and Environment, Vol. 43, Issue , pp. 415–421.
- Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L. and Garcia, B. (2011). Stabilization of Expansive Soils for Use in Construction. Applied Clay Science, Vol. 51, Issue 3, pp. 348-352.
- Senol, A., Edil, T.B., Bin-Shafique, Md.S., Acosta, H.A. and Benson, C.H. (2006). Soft Subgrades' Stabilization by Using Various Fly Ashes. Resources, Conservation and Recycling. Vol. 46, Issue 4, pp. 365–376.
- Sherwood, P.T. (1971). The Properties of Cement Stabilized Materials, Report LR 205, Road Research Laboratory, UK
- Singh, D., Ghabchi, R., Laguros, J.G. and Zaman, M. (2010). Laboratory Performance Evaluation of Stabilized Sulfate Containing Soil with Lime and Class C Fly Ash. Proceedings of the Conference GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling, & Design.
- Tastan, E.O., Edil, T.B., Benson, C.H. and Aydilek, A.H. (2011). Stabilization of Organic Soils with Fly Ash. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 137, No. 9, pp. 819-833.

- Tay, J.H. and Show, K.Y. (1995). Use of ash Derived from Oil-Palm Waste Incineration as a Cement Replacement Material. Resources, Conservation and Recycling. Vol. 13, Issue 1, pp. 27-36.
- Temimi, M., Rahal, M.A., Yahiaoui, M. and Jauberthie R. (1998). Recycling of Fly Ash in the Consolidation of Clay Soils. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 24, Issue 1, pp. 1-6.
- Thomas, Z.G. (2002). Engineering Properties of Soil-Fly Ash Subgrade Mixtures.
- Tonnayopas D. and Laopreechakul S., 2006. Utilization of Oil Palm Shell Ash as Mineral Admixture in Portland Cement Mortar, Proc. 1st Inter. Conf. Hazardous Waste Management for a Sustainable Future, Century Park Hotel, Bangkok, 10-12 Jan 2006, 7p.
- Tonnayopas D., Nilrat F., Putto K. and Tantiwitayawanich J., 2006. Effect of Oil Palm Fiber Fuel Ash on Compressive Strength of Hardening Concrete, Proc. 4th Thailand Materials Science and Technology Conf., Thailand Science Park Convention Center, Pathumthani, March 31 –April 1, 2006, pp. 64-66.
- Tonnayopas, D., Kooptarnond, K. and Masae, M. 2008. Use of Oil Palm Fiber Fuel Ash as Addictive in Quarry Granite Waste for Floor Tiles Body. 2nd International Workshop and Conference on Earth Resources Technology: Stepping towards Sustainable Mining, Metallurgical, and Petroleum Technology Development. April 3-4, 2008, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, pp. 25-30.
- Tonnayopas, D. and Phoodburi, T. 2008. Effects of Areca Nut Solution on Mortar Blended Quarry Carbonate Dust and Oil Palm Fiber Fuel Ash. 2nd International Workshop and Conference on Earth Resources Technology: Stepping towards Sustainable Mining, Metallurgical, and Petroleum Technology Development. April 3-4, 2008, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, pp. 151-155.
- Tonnayopas, D., Kooptarnond, K. and Masae, M. 2009. Novel Ecological Tiles Made with Granite Fine Quarry Waste and Oil Palm Fiber Ash, Thammasat International Journal of Science and Technology (TIJSAT), Vol. 14, No. 1, Jan.-Mar 2009, pp. 10-20.
- TS 9581. (1991). Making Specification of Base and Subbase Layers of Flexible Pavement, Turkey,

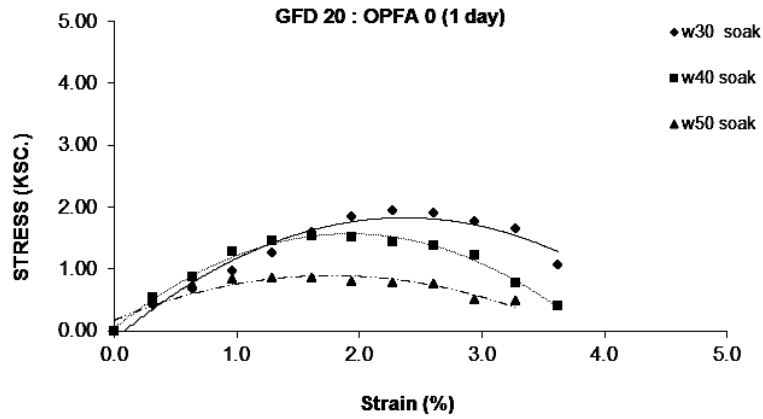
- Turner, J.P. (1994). Soil Stabilization Using Oil-Shale Solid Waste. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 4, pp. 646-660.
- United States Air Force (1966). Manual AFM 88-51 Materials Testing. Department of the Air Force. New York. 185 p.
- Weiping, M. and Brown, P.W. (1997). Hydrothermal Reaction of Fly Ash with Ca (OH)₂ and CaSO₄.2H₂O. Cement and Concrete Research. Vol. 27, Issue 8, pp. 1237-1248.
- Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I. and Higgins, D.D. (1998). Effects of Partial Substitution of Lime with Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) on the Strength Properties of Lime-Stabilised Sulphate-Bearing Clay Soils. Engineering Geology, Vol. 51, Issue 4, pp. 37-53.
- Wilmot, T.D. (1995). Selection of Additive for Stabilization and Recycling of Road Pavement. Pavement Rehabilitation Workshop. 24-25 August 1995. Queensland. pp. 1-14.
- Winterkorn, H.F. (1955). The Science of Soil Stabilization. Highway Research Board. Bulletin 108. pp. 1-24
- Yilmaz, S. and Civelekoglu, B. (2009). Gypsum: An Additive for Stabilization of Swelling Clay Soils, Applied Clay Science, Vol. 44, Issues 1-2, pp. 166-172.
- Yong, R.N. and Ouhadi, V.R. (2007). Experimental Study on Instability of Bases on Natural and Lime/Cement-Stabilized Clayey Soils. Applied Clay Science, Vol. 35. Issue 3-4, pp. 238-249.

<http://www.cement.org/pavements/> สืบค้นเมื่อ 27 ธ.ค. 2554

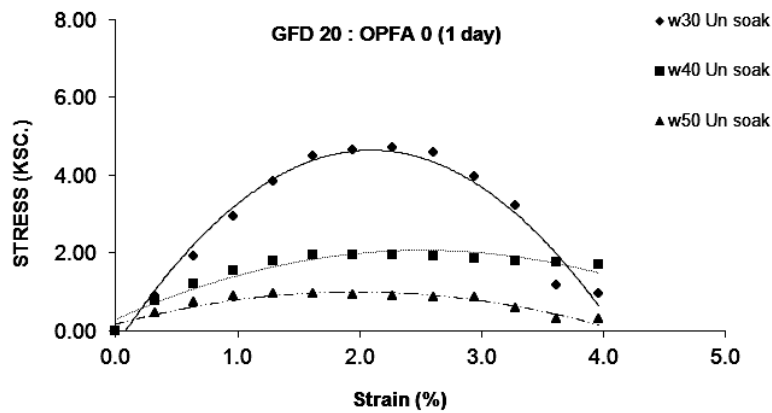
<http://matrix.vtrc.virginia.edu/DATA/GINT/vdotusc.PDF> สืบค้นเมื่อ 28 ธ.ค. 2554

ภาคผนวก

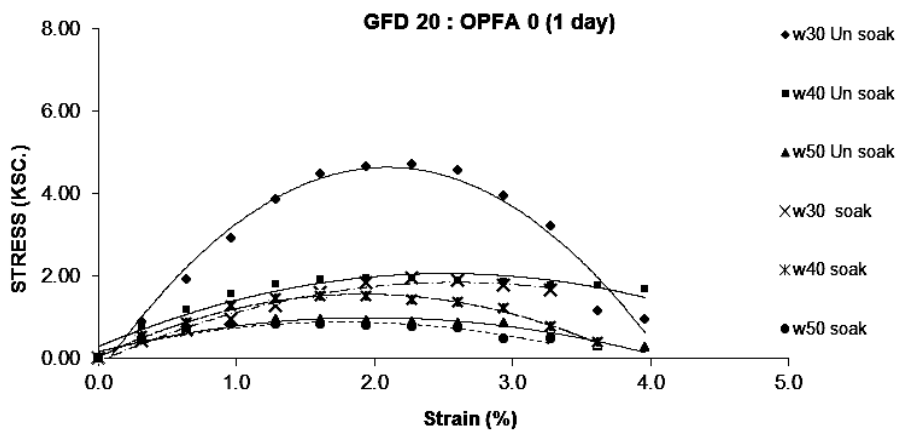
กราฟ Axial Stress กับ Axial Strain



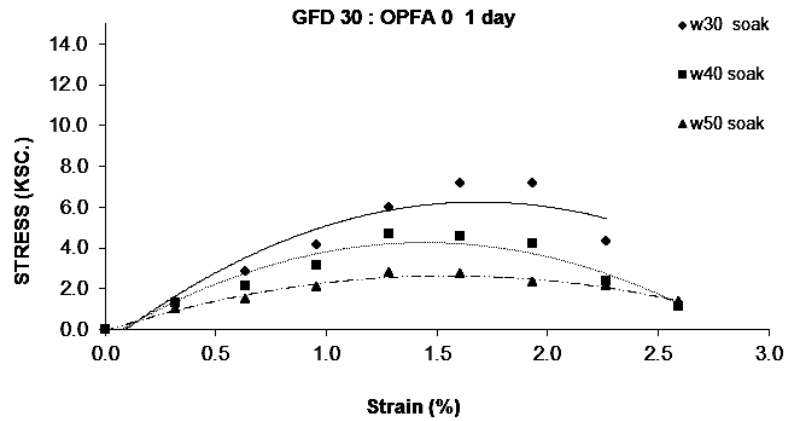
รูปที่ ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak



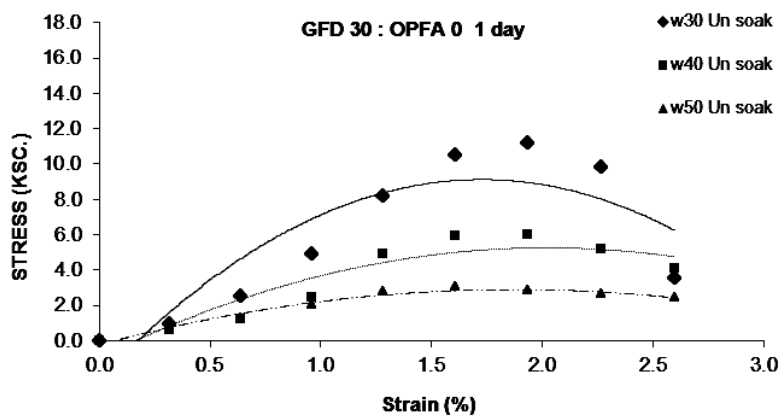
รูปที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Unsoak



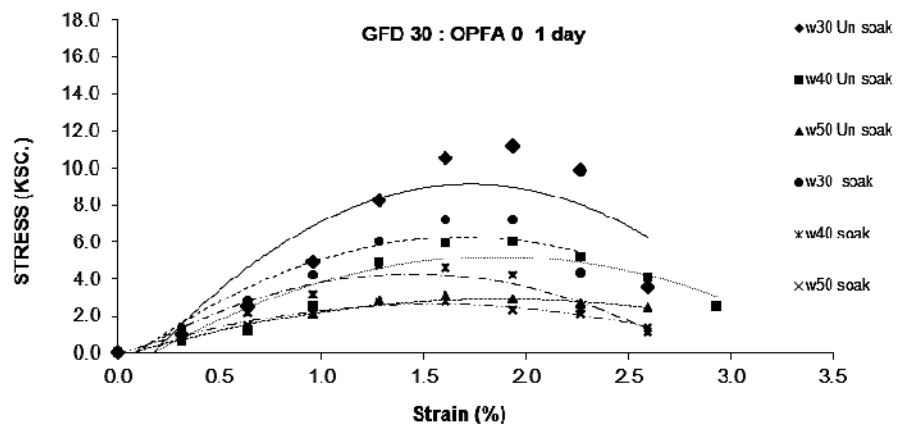
รูปที่ ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุบ่ม 1 วัน แบบ Soak และ Unsoak



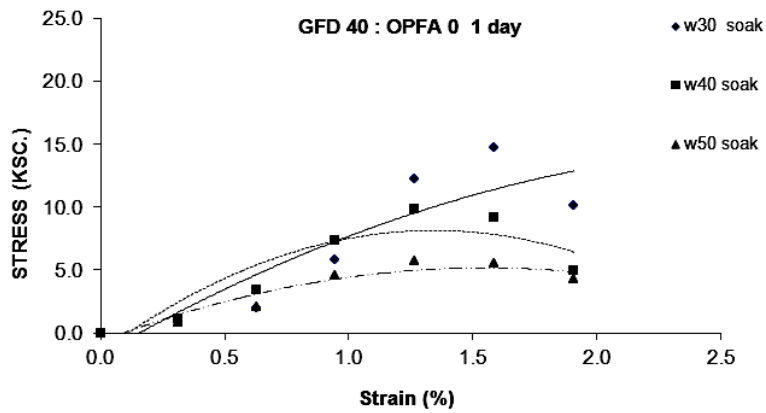
รูปที่ ก - 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak



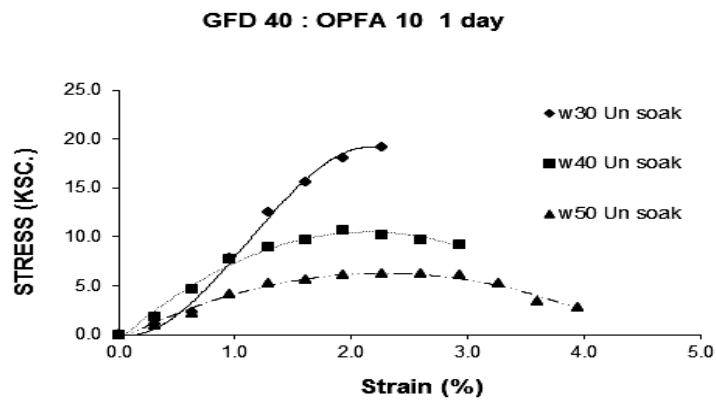
รูปที่ ก - 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Unsoak



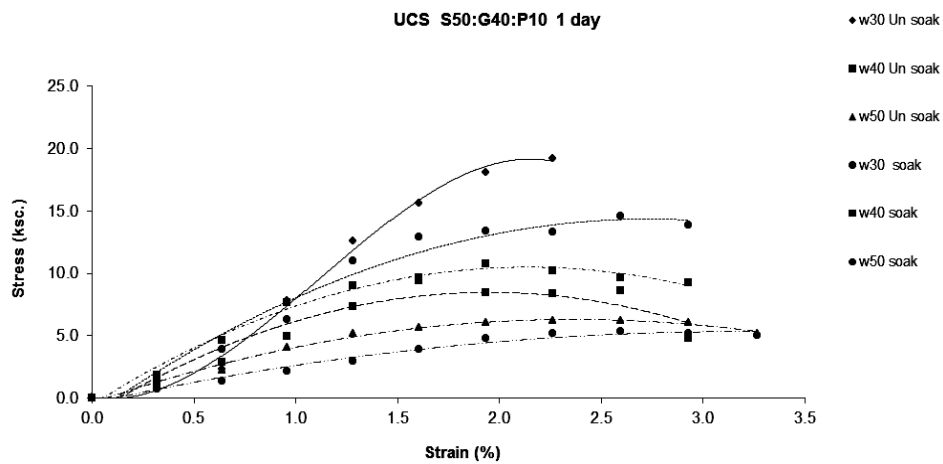
รูปที่ ก - 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak และ Unsoak



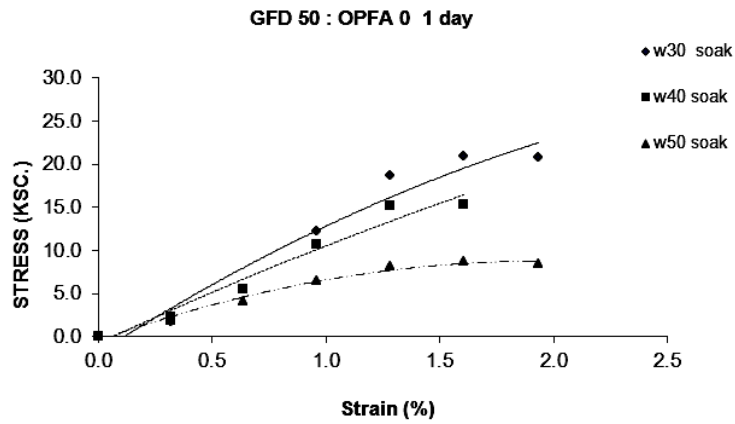
รูปที่ ก-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak



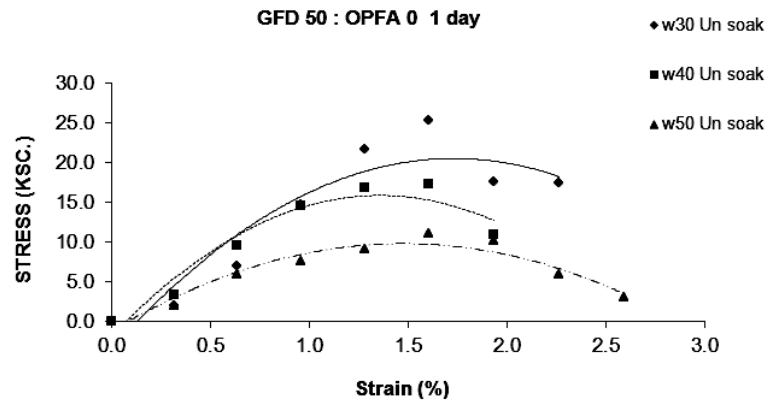
รูปที่ ก-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Unsoak



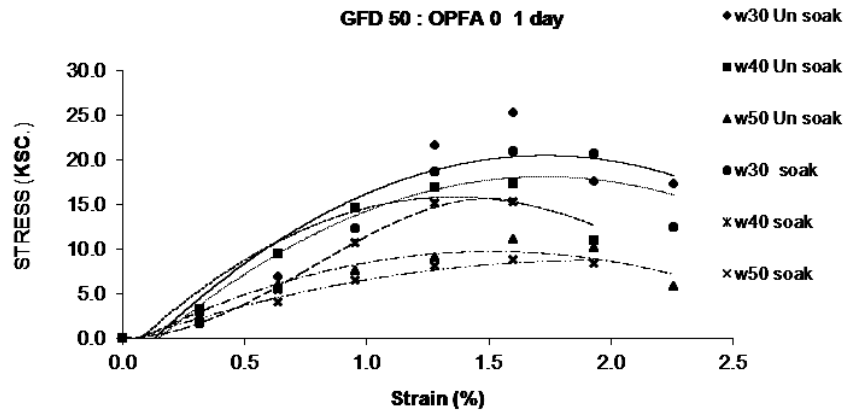
รูปที่ ก - 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak และ Unsoak



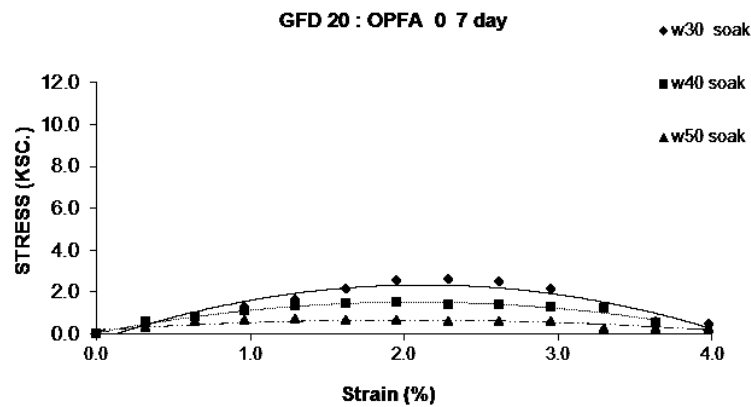
รูปที่ ก -10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak



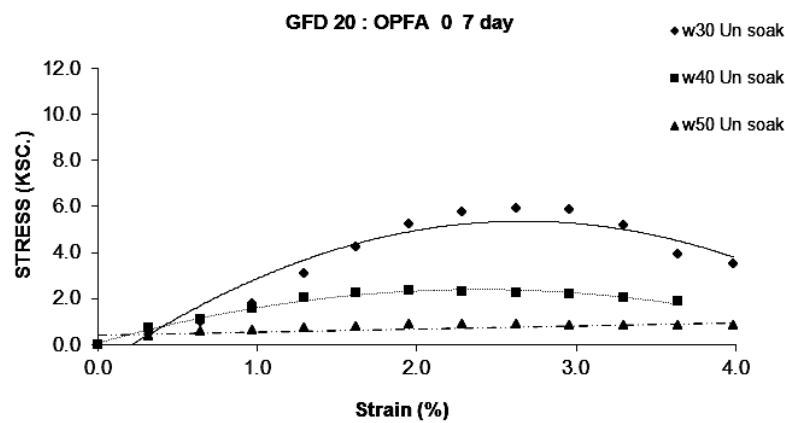
รูปที่ ก -11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Unsoak



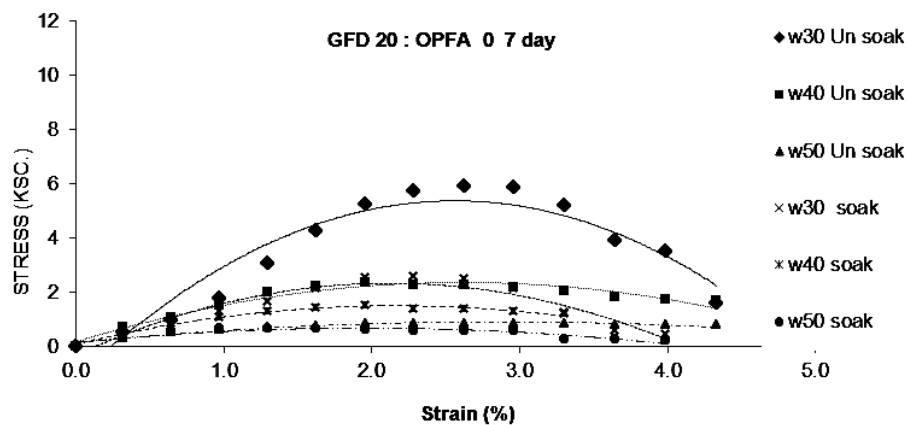
รูปที่ ก -12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak และ Unsoak



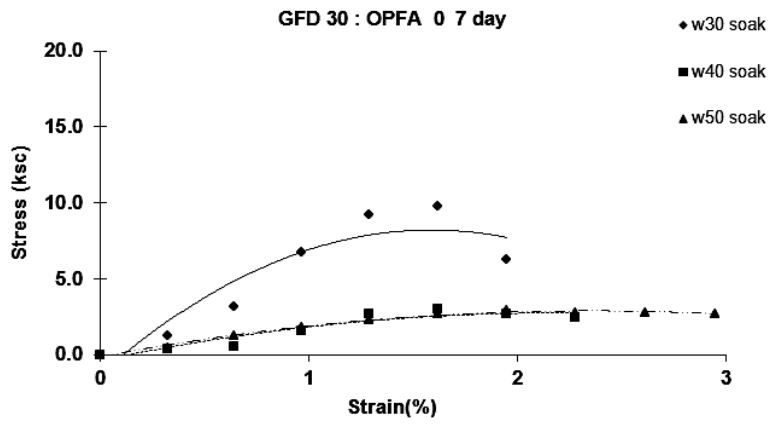
รูปที่ ก - 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak



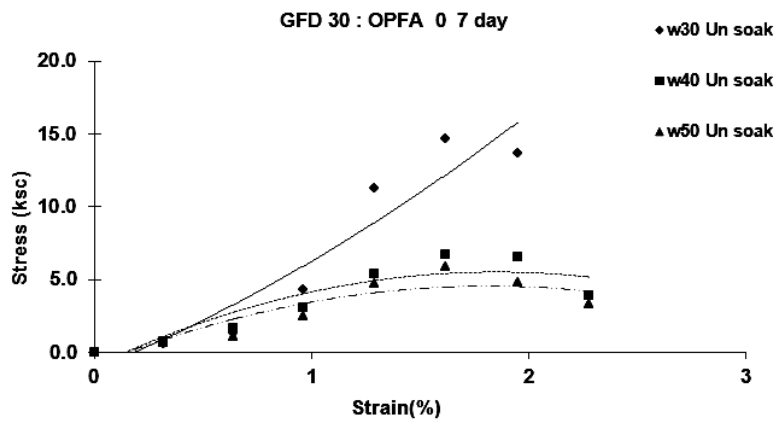
รูปที่ ก - 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Unsoak



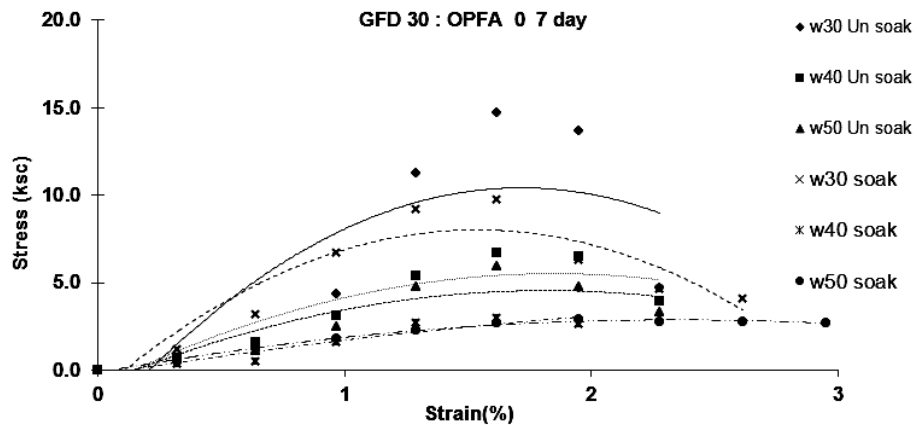
รูปที่ ก - 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak และ Unsoak



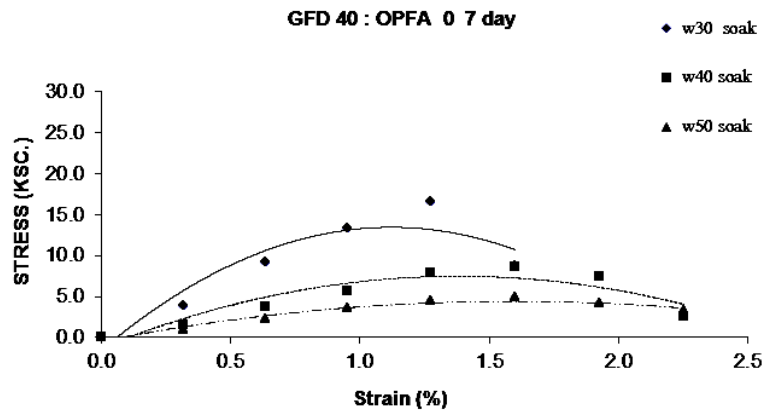
รูปที่ ก - 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak



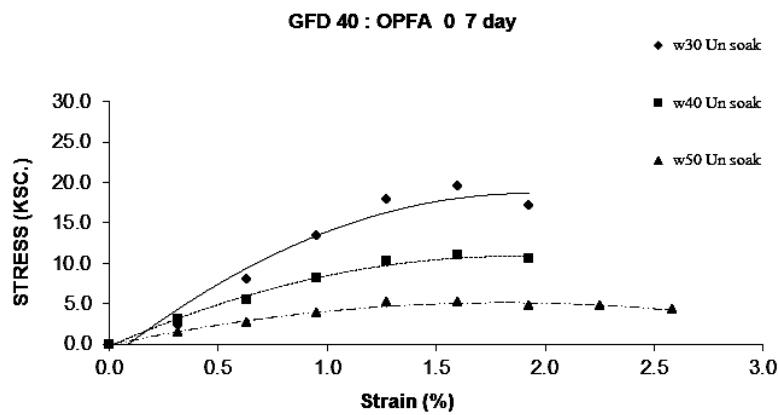
รูปที่ ก - 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Unsoak



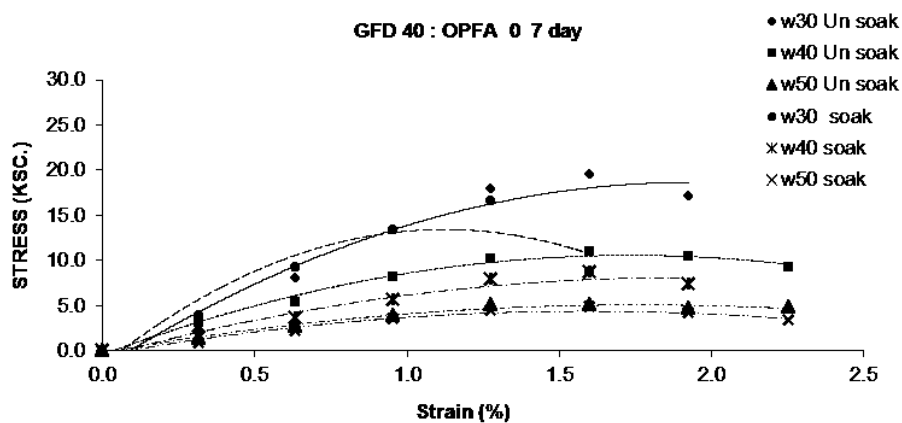
รูปที่ ก - 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak และ Unsoak



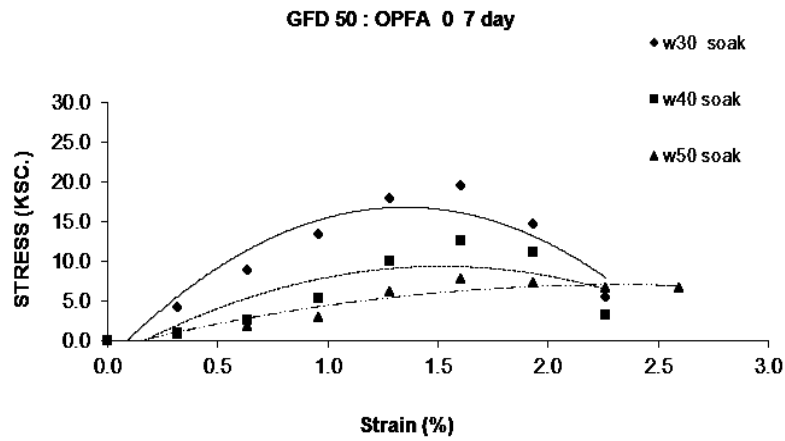
รูปที่ ก - 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak



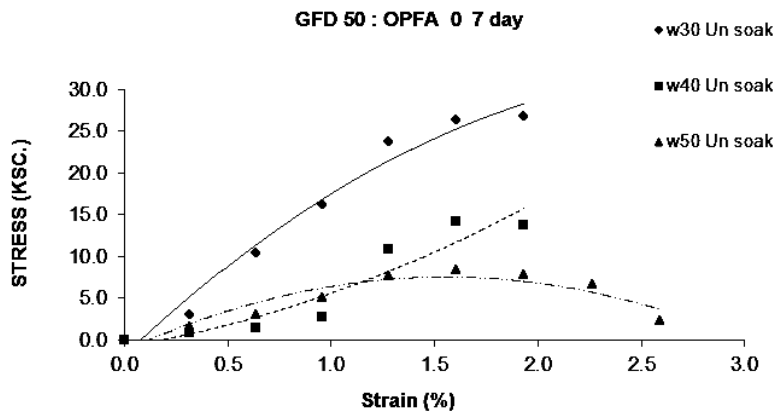
รูปที่ ก - 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Unsoak



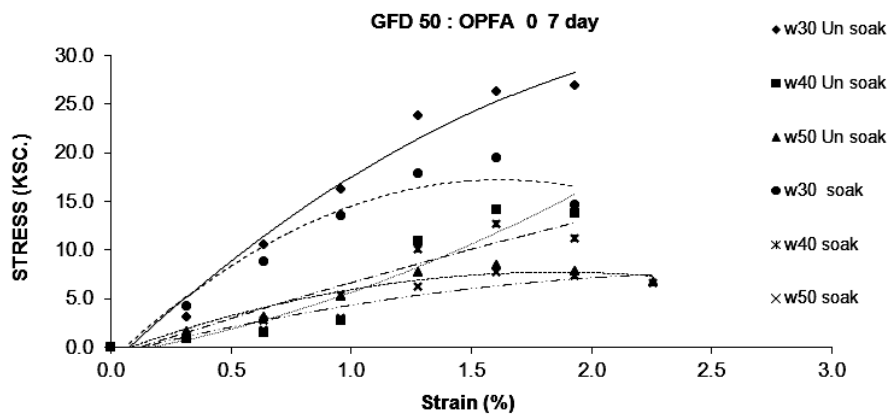
รูปที่ ก - 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak และ Unsoak



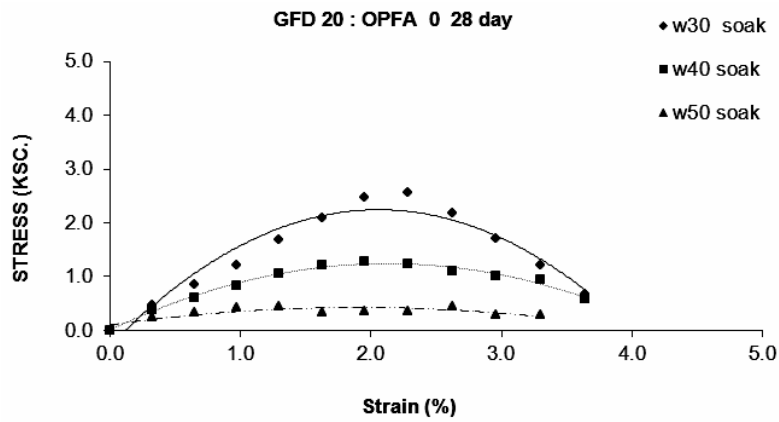
รูปที่ ก - 22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak



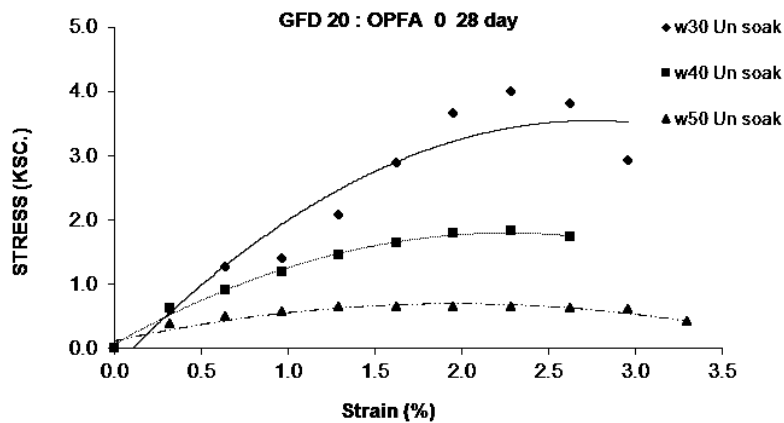
รูปที่ ก - 23 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Unsoak



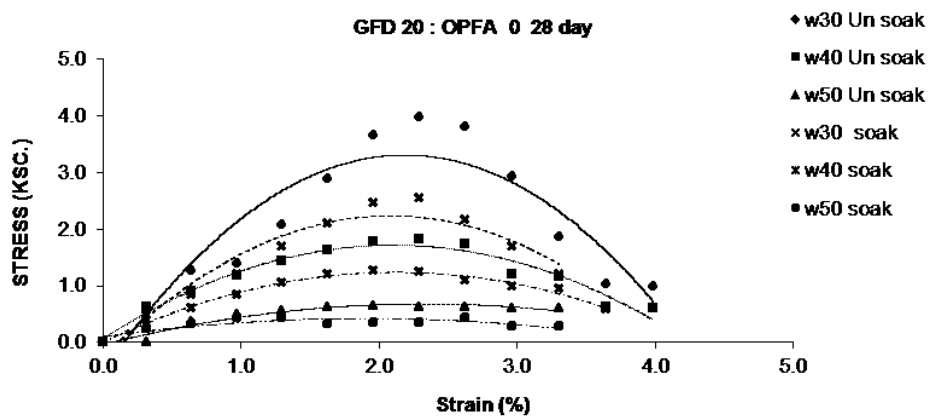
รูปที่ ก - 24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการป่ม 7 วัน แบบ Soak และ Unsoak



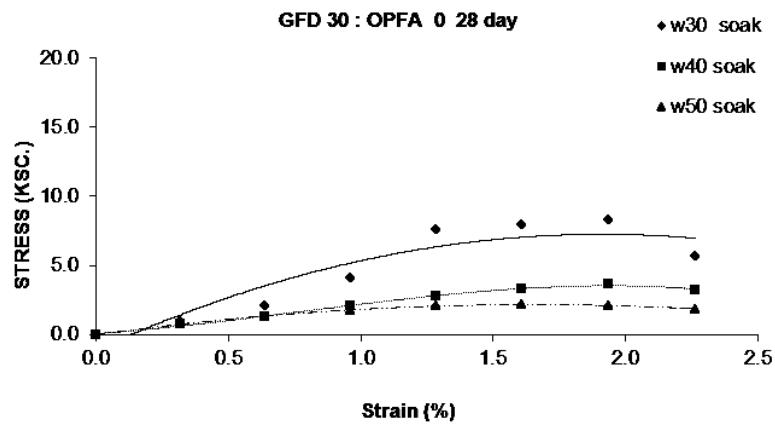
รูปที่ ก - 25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการป่ม 28 วัน แบบ Soak



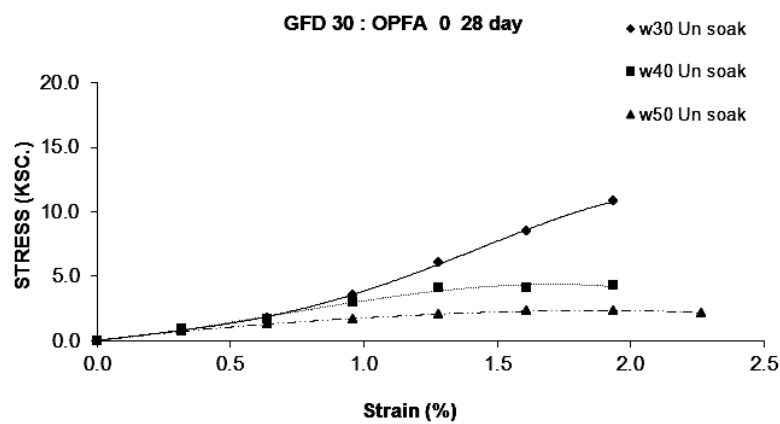
รูปที่ ก - 26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการป่ม 28 วัน แบบ Unsoak



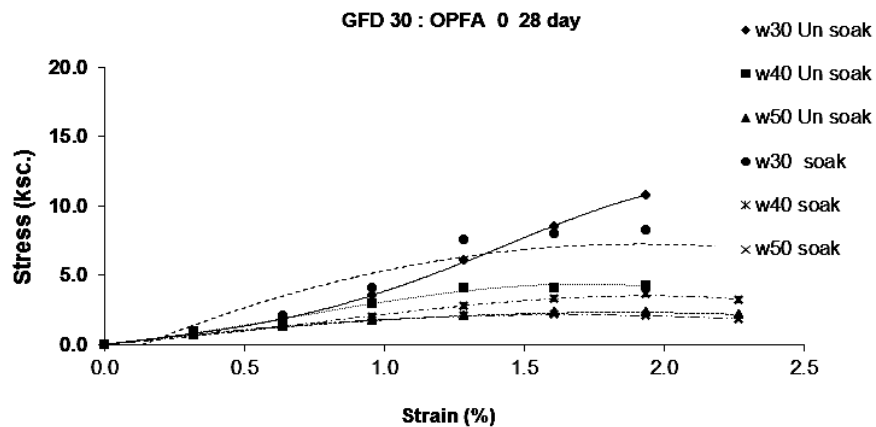
รูปที่ ก - 27 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Soak และ Unsoak



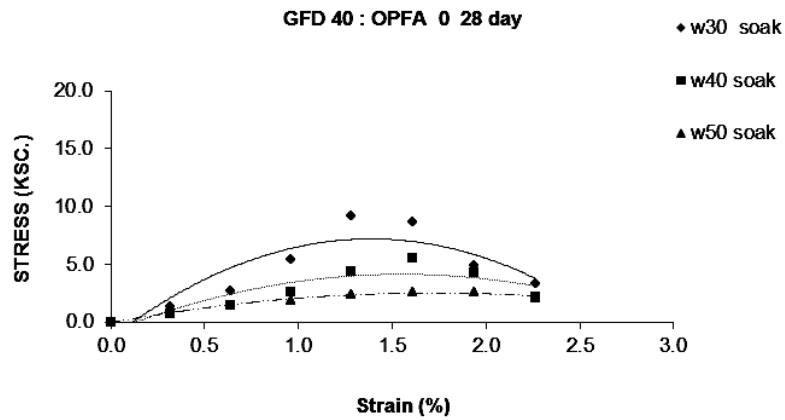
รูปที่ ก - 28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Soak



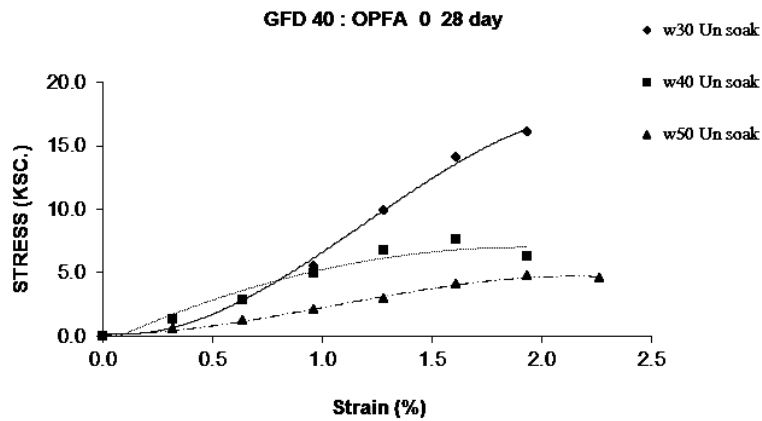
รูปที่ ก - 29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Unsoak



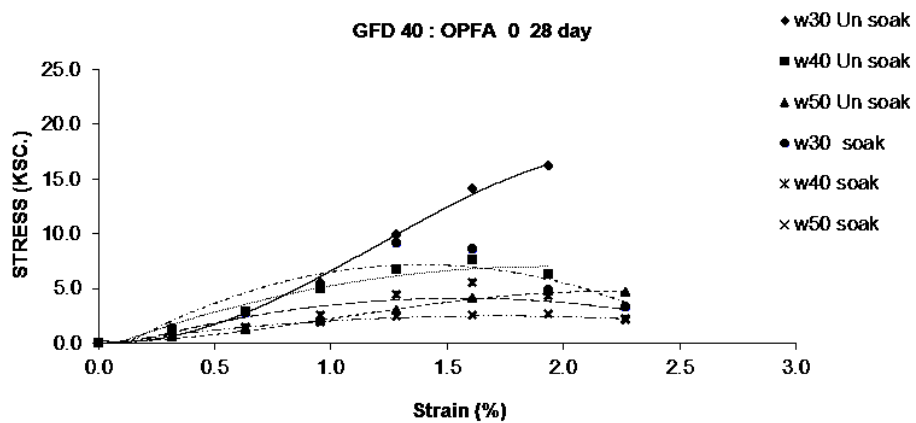
รูปที่ ก - 30 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Soak และ Unsoak



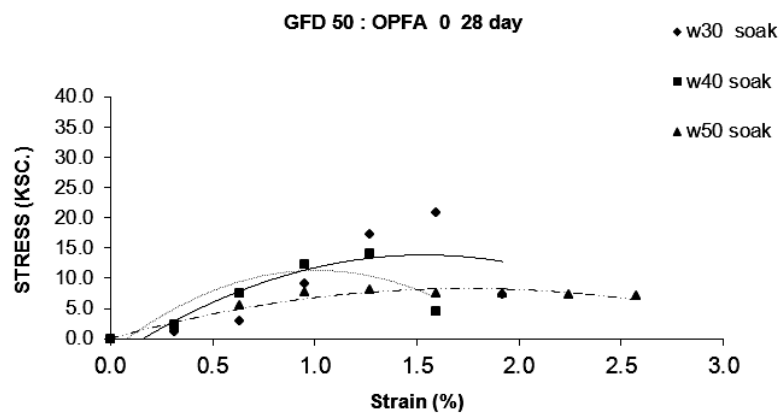
รูปที่ ก - 31 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Soak



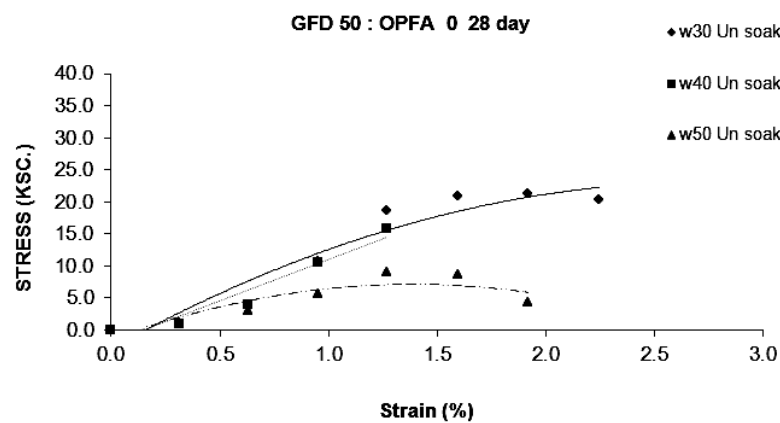
รูปที่ ก - 32 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Unsoak



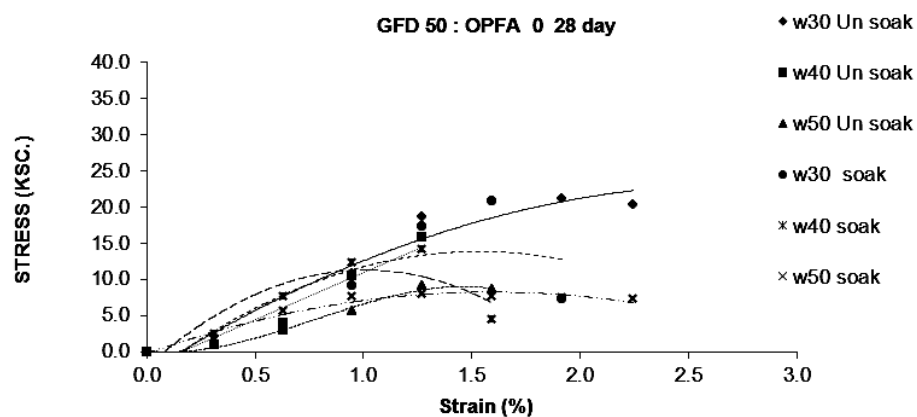
รูปที่ ก - 33 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Soak และ Unsoak



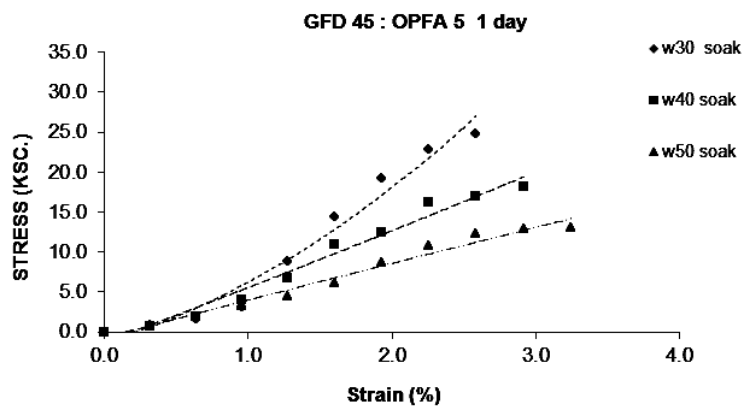
รูปที่ ก - 34 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Soak



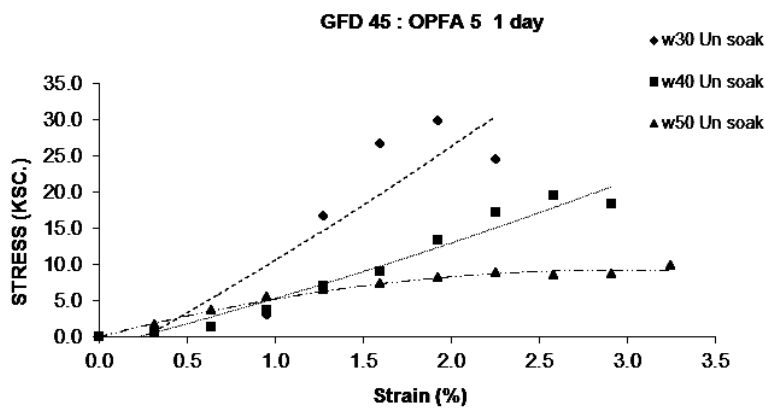
รูปที่ ก - 35 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Unsoak



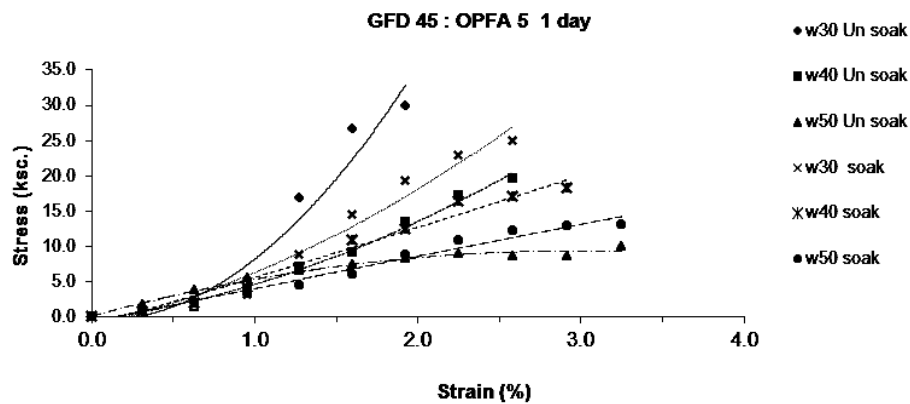
รูปที่ ก - 36 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Soak และ Unsoak



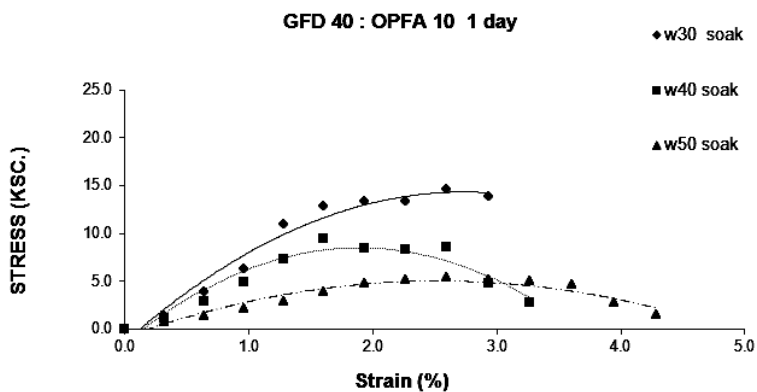
รูปที่ ก - 37 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak



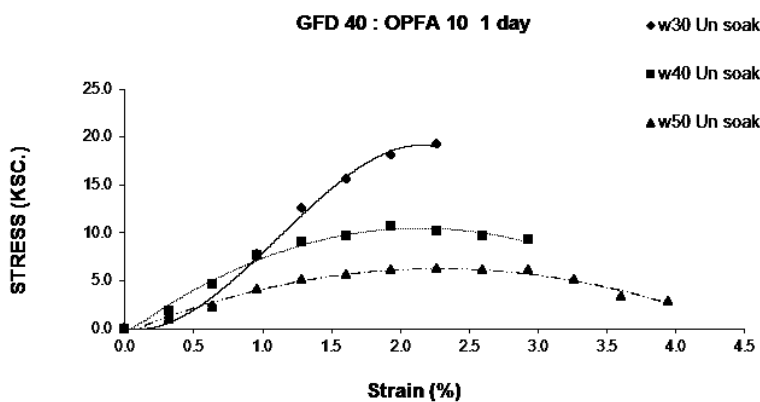
รูปที่ ก - 38 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Unsoak



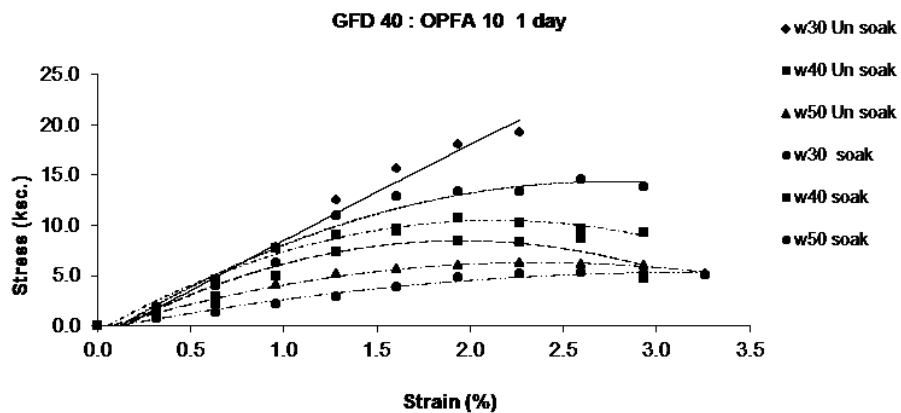
รูปที่ ก - 39 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak และ Unsoak



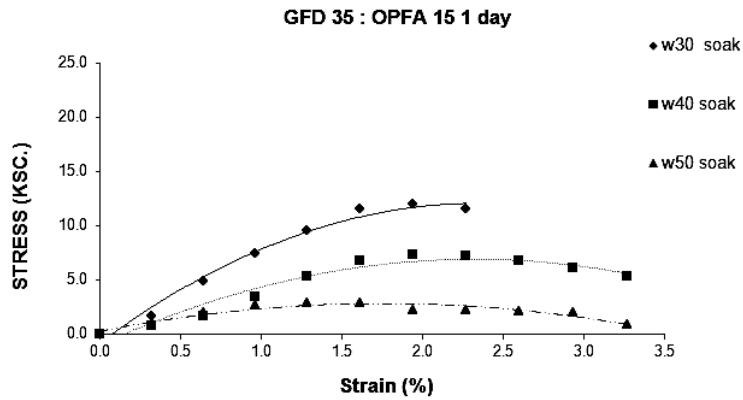
รูปที่ ก - 40 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak



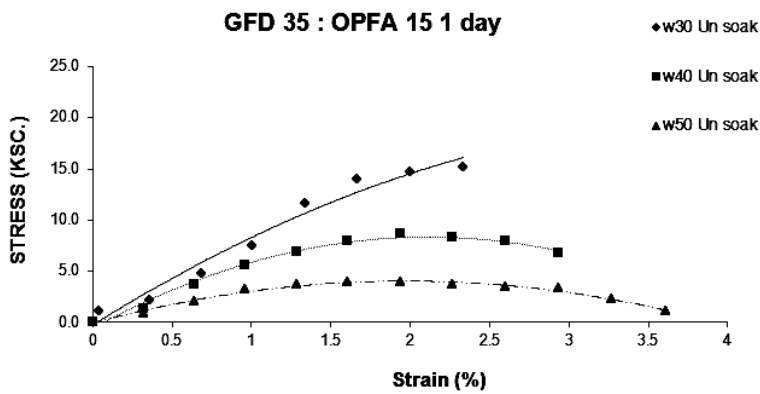
รูปที่ ก - 41 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Unsoak



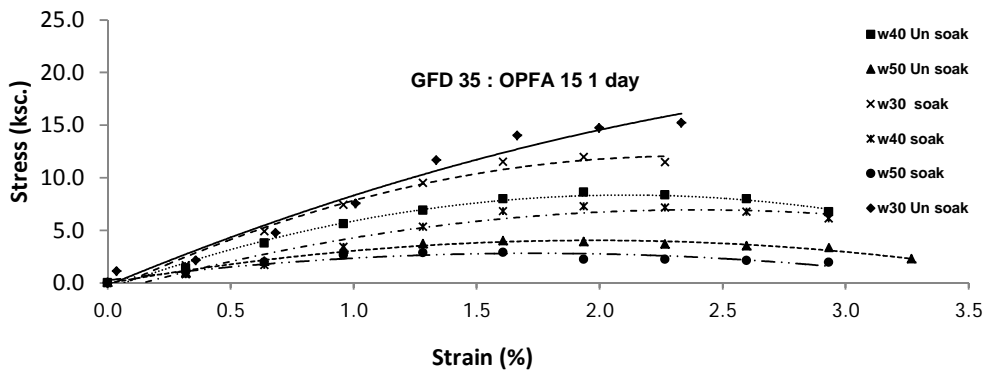
รูปที่ ก - 42 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak และ Unsoak



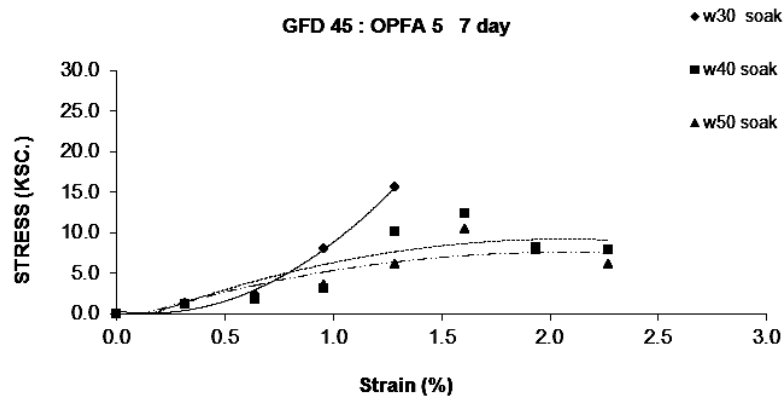
รูปที่ ก - 43 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak



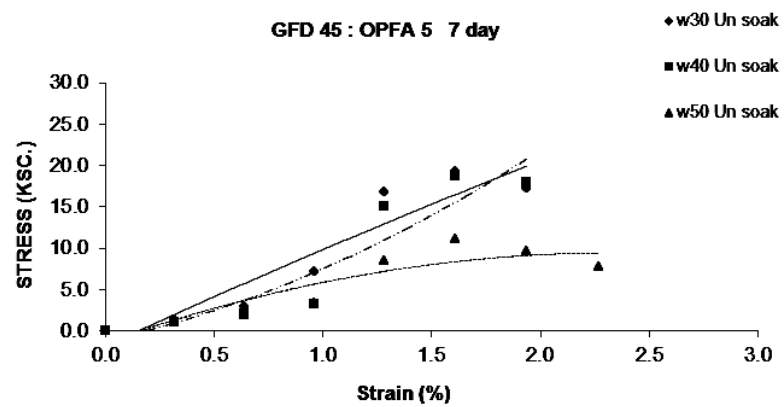
รูปที่ ก - 44 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Unsoak



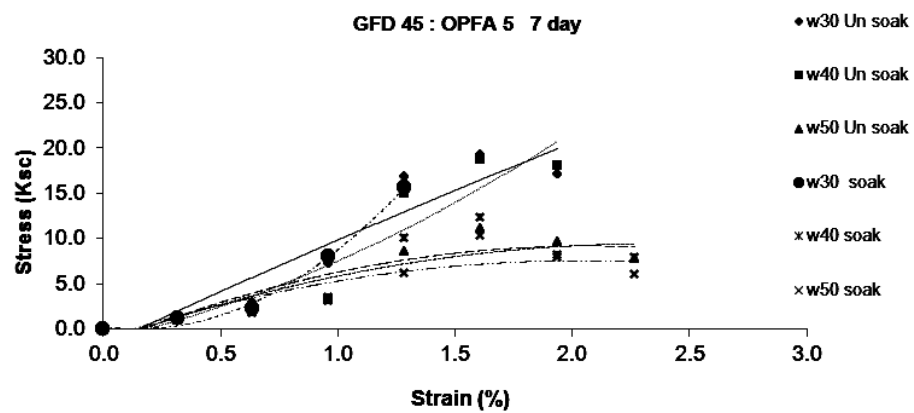
รูปที่ ก - 45 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 1 วัน แบบ Soak และ Unsoak



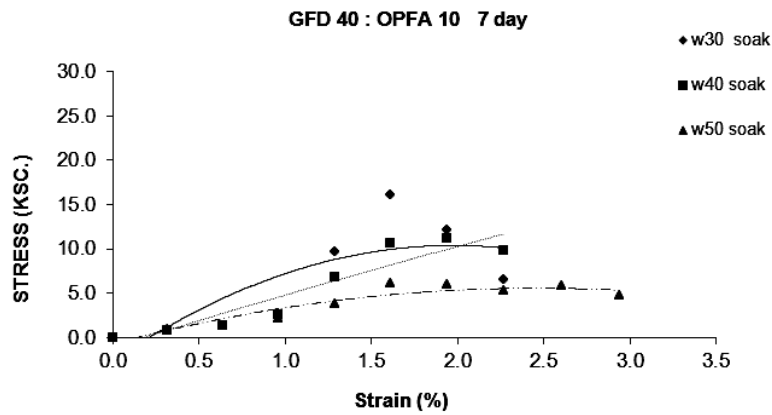
รูปที่ ก - 46 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak



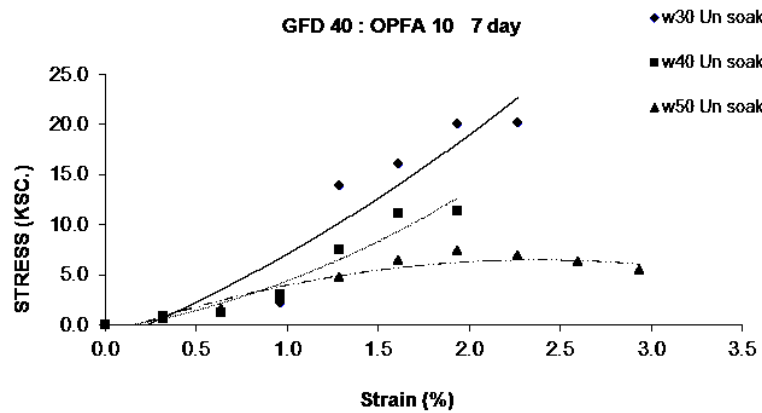
รูปที่ ก - 47 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Unsoak



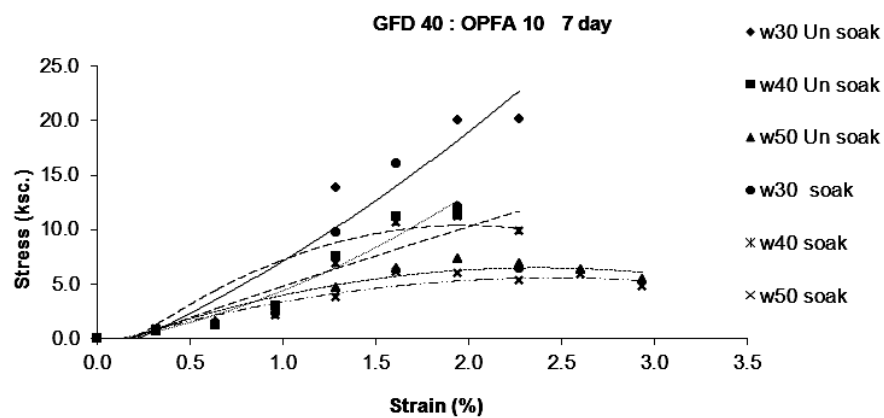
รูปที่ ก - 48 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak และ Unsoak



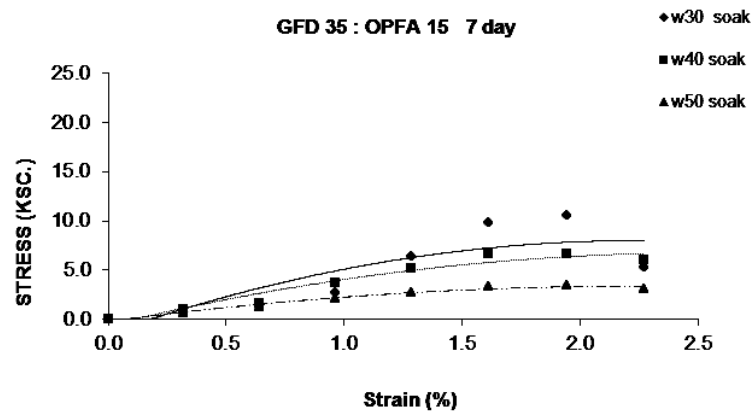
รูปที่ ก - 49 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak



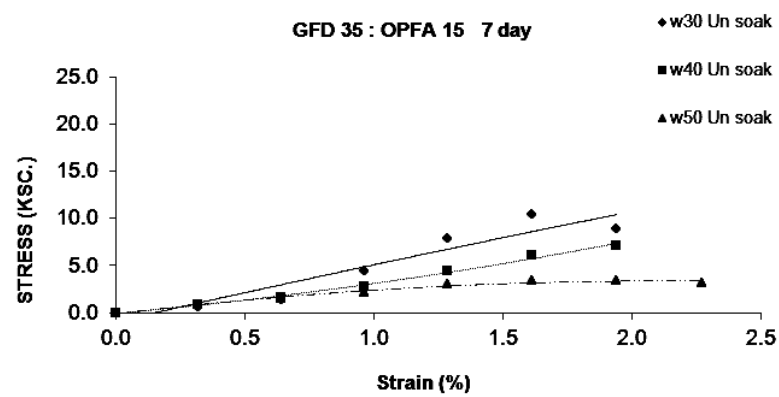
รูปที่ ก - 50 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Unsoak



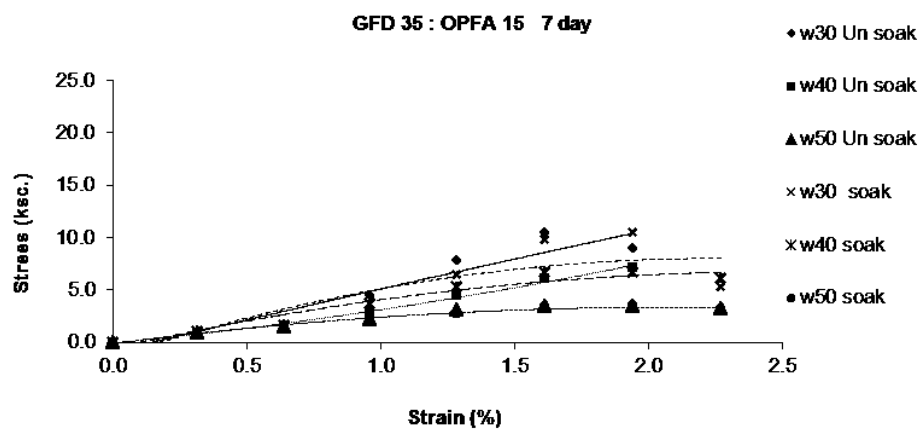
รูปที่ ก - 51 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak และ Unsoak



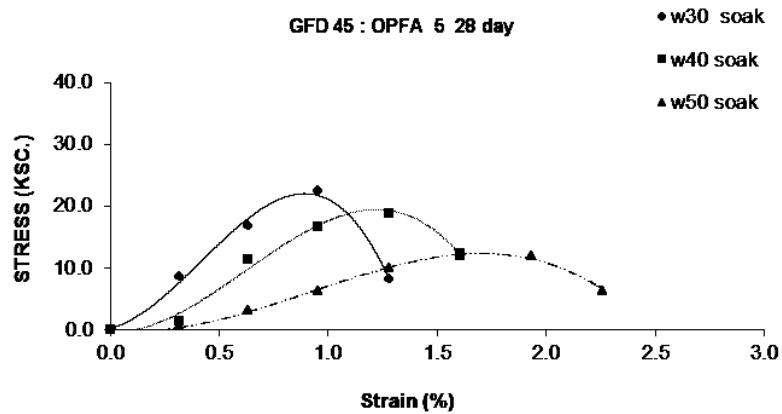
รูปที่ ก - 52 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak



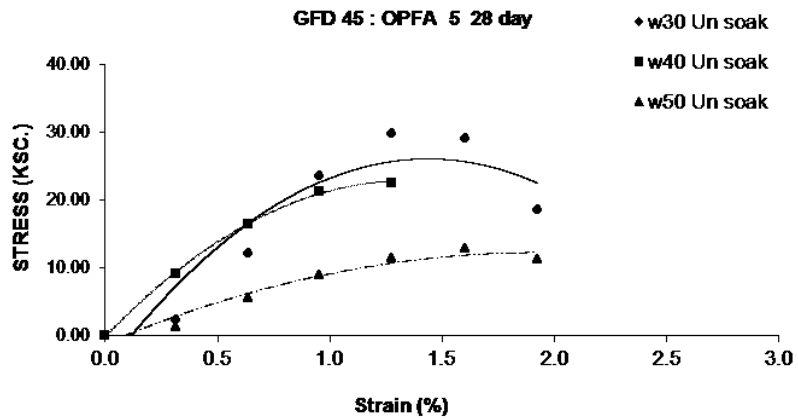
รูปที่ ก - 53 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Unsoak



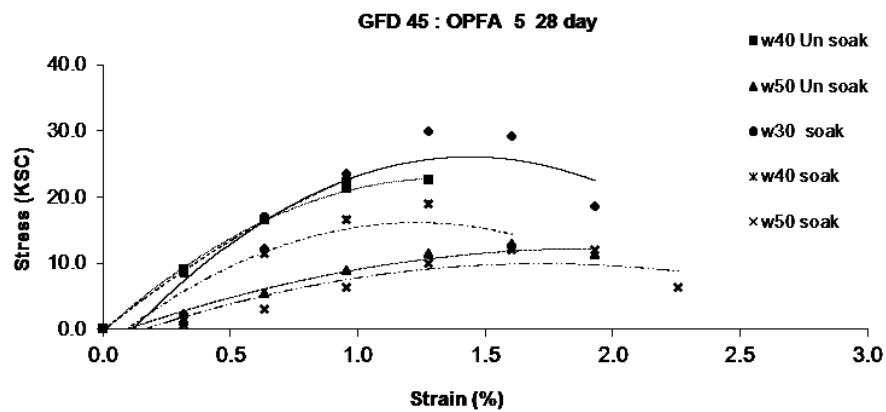
รูปที่ ก - 54 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 7 วัน แบบ Soak และ Unsoak



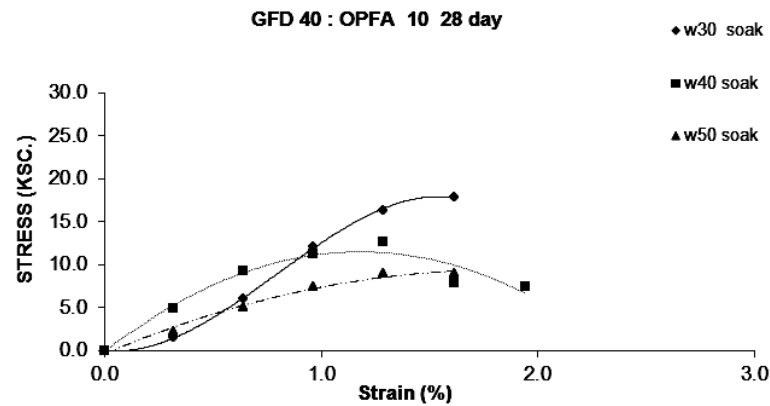
รูปที่ ก - 55 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการป่ม 28 วัน แบบ Soak



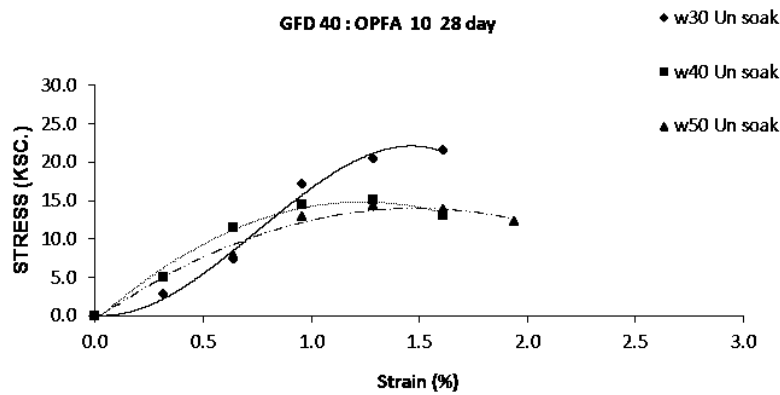
รูปที่ ก - 56 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการป่ม 28 วัน แบบ Unsoak



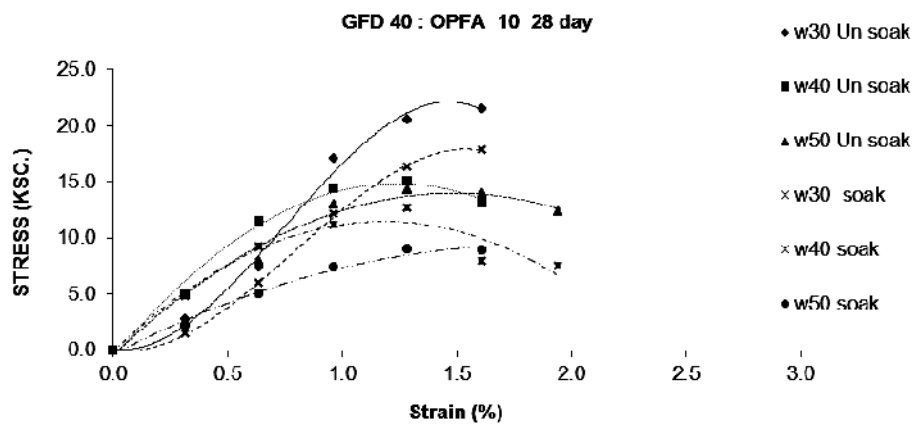
รูปที่ ก - 57 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการป่ม 28 วัน แบบ Soak และ Unsoak



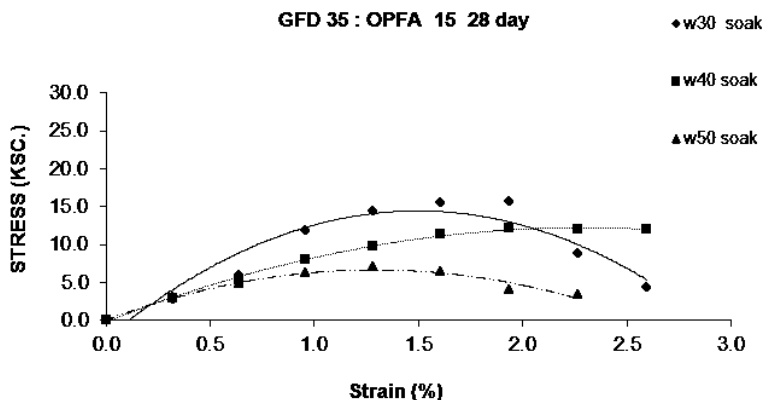
รูปที่ ก - 58 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Soak



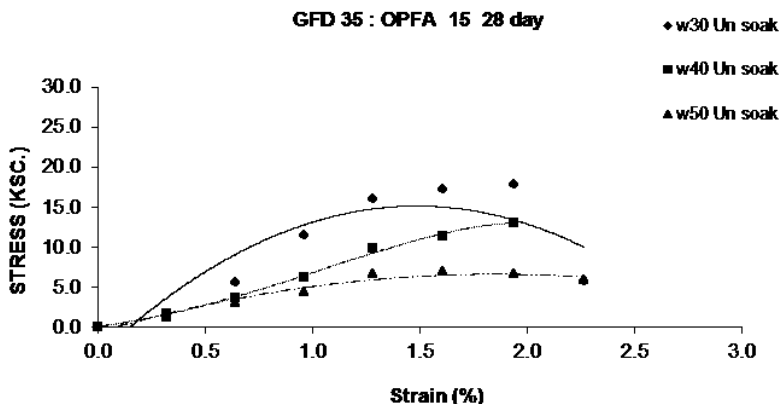
รูปที่ ก - 59 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Unsoak



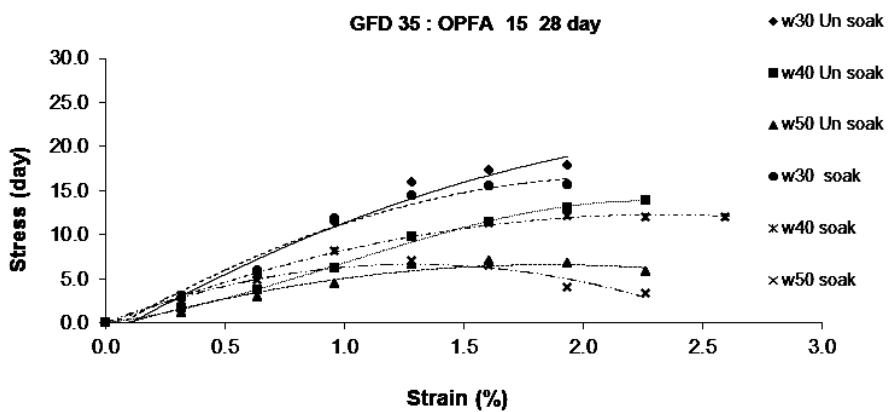
รูปที่ ก - 60 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Soak และ Unsoak



รูปที่ ก - 61 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Soak



รูปที่ ก - 62 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Unsoak



รูปที่ ก - 63 ความสัมพันธ์ระหว่าง Axial Stress กับ Axial Strain ที่อายุการบ่ม 28 วัน แบบ Soak และ Unsoak

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์ ก

การประชุมวิชาการการจัดการของเสียและพลังงานทางเลือกในสภาวะโลกร้อน โอกาสและความท้าทาย

11 – 12 กุมภาพันธ์ 2553 โรงแรมเจ บี อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

การปรับปรุงดินคันทวยตะกอนจากดักจับก๊าซซัลเฟอร์ผสม เถ้าปาล์มน้ำมันปาล์ม

Flue Gas Desulphurization Sludge and Oil Palm Ash Improved Subgrade

ภักดี บัวจันทร์^{1,2} ดนุพล ตันนโยภาส^{1,2*} พิปัท ทงฉิม²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

²หน่วยวิจัยธรณีเทคนิคและวัสดุก่อสร้างนวัตกรรม

E-mail: danupon.t@psu.ac.th

Pakdee Bourjan^{1,2} Danupon Tonnayopas^{1,2*} Pipat Tongchim²

¹Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

²Geotechnical and Innovative Construction Materials Unit Research (GICMRU)

E-mail: danupon.t@psu.ac.th

บทคัดย่อ

ศึกษาทดสอบคุณลักษณะของดินปนทรายแข็งที่มียิปซัมเทียมเป็นตัวปรับปรุงในประเด็น อัตราส่วนผสม ความหนาแน่นรวมและกำลังอัด ได้ดำเนินการวัดต่อดินที่แทนดินปนทรายแข็งบางส่วนด้วยยิปซัมเทียมในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักแห้ง นอกจากนี้ที่ยิปซัมเทียมอัตราส่วนร้อยละ 50 ได้แทนบางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 10 และ 15 ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกันตั้งแต่ 0.30, 0.40 และ 0.50 ก่อนตัวอย่างยังได้บ่มในบรรยากาศห้องเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน เตรียมก่อนตัวอย่างดินผสมยิปซัมเทียม รูปทรงกระบอกขนาด 39×78 มม. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของก้อนตัวอย่างด้วยเทคนิครังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ และ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดสอบบ่งว่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างดินปนทรายแข็งผสมยิปซัมเทียมเพิ่มขึ้นกับอัตราส่วนผสมโดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ทำให้การก่อตัวการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นรวมลดลง จากมุมมองพฤติกรรมเชิงกลการเติมยิปซัมเทียมร้อยละ 45 และเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ในดินทรายแข็งบ่มที่ 28 วัน ให้กำลังอัดสูงสุดทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำคือ 22.53 และ 29.86 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

1. บทนำ

ในงานก่อสร้างถนนซึ่งประกอบด้วยชั้นโครงสร้างต่างๆ เช่น ผิวทาง พื้นทาง รองพื้นทาง วัสดุคัดเลือก งานถม ทั้งนี้เพื่อให้ถนนมีความมั่นคงแข็งแรงสามารถรับกำลังได้ตามที่ออกแบบ ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้ต้องมีสมบัติทางวิศวกรรมที่ดี มีคุณภาพตามมาตรฐานกำหนด แต่ในข้อเท็จจริงนั้นวัสดุตามธรรมชาติที่มีสมบัติตามมาตรฐานกำหนดในงานโครงสร้างถนนหาได้ไม่ค่อยมี หรือมีแต่อยู่ห่างไกลจากการทำการโครงการ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูงมากหรืออยู่ในเขตป่าสงวน จึงเป็นข้อจำกัดที่ไม่สามารถนำวัสดุเหล่านั้นมาใช้ก่อสร้างได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าวได้เกิดขึ้นกับ

หลายพื้นที่ในจังหวัดสุราษฎร์ธานี และจังหวัดใกล้เคียงและนับวันทวีความรุนแรงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นปรับปรุงดินท้องถิ่นที่มีอยู่ด้วยวิธีทางเคมี ได้นำดินในตำบลทุ่งกงอำเภอกาญจนาดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ซึ่งเป็นดินทรายแข็งที่กำลังอัดไม่สูงในกรณีมีความชื้นน้อย และยังมีค่าความชื้นสูงแทบไม่มีกำลังอัดเพียงพอแก่ งานทางโครงสร้างวิศวกรรมธรณีเทคนิค ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุที่เหลือจากอุตสาหกรรมต่างๆ นำมาใช้เป็นแรมผสมเพิ่มปรับปรุงดินในงานทางธรณีเทคนิค เช่น เถ้าปาล์มน้ำมัน (ดิษฐพรและคณะ, 2551) เถ้าแกลบ (อรุณและคณะ, 2552) พบว่าหากผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในดินเหนียวอ่อนสามารถเพิ่มค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่ารับแรงแบกทานแคลิฟอร์เนีย (CBR) ให้สูงขึ้น นอกจากนี้ยิปซัมธรรมชาติก็นำมาปรับปรุงดินเหนียวบางกอกได้ (ภาณุวัฒน์และสำราญ, 2547) ซึ่งพบว่ายิปซัมเทียมที่เป็นของเสียจากกระบวนการดักจับก๊าซซัลเฟอร์จากการเผาไหม้ถ่านหินเตาเมื่อนำมาบ่มที่ 100 องศา เกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตหากผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อแข็งตัวสามารถรับกำลังอัดได้เช่นกัน (สุวรรณและดนุพล, 2552) ในตำบลทุ่งกงมีบ่อดินยิปซัมอยู่หลายแห่ง เพื่อเป็นแนวทางที่จะปรับปรุงสมบัตินำมาใช้ในชั้นรองพื้นทาง จึงได้นำเถ้าปาล์มน้ำมันและยิปซัมเทียมมาใช้ปรับปรุงสมบัติในแง่กำลังอัด และให้ดินที่ปรับปรุงยังคงมีกำลังเหลืออยู่อีกหากอยู่ในสภาวะแช่น้ำเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมงตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุที่เหลือจากอุตสาหกรรมมาปรับปรุงดินเพื่อในงานสร้างถนน (Degirmenci et al., 2007; Hossan et al., 2005; Sing and Tripathy, 2007) โดยเฉพาะเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าหากผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในดินเหนียวสามารถเพิ่มค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่า CBR ให้สูงขึ้น (ดิษฐพรและคณะ, 2551) จากที่กล่าวมาข้างต้นคณะวิจัยจึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการใช้ยิปซัมเทียมโดยแทนที่ดินทุ่งกงจำนวนร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยใช้ยิปซัมเทียมเป็นวัสดุประสานระหว่างอนุภาคเม็ด

ดิน รวมถึงเติมเข้าไปปาล์มน้ำมันที่มีคุณลักษณะเป็นสารปอซโซลาน (อนุพลและคณะ, 2547) แทนที่ยิปซัมที่ยิมบางส่วนที่ร้อยละ 5 10 และ 15 เพื่อประเมินพฤติกรรมกำลังอัดของดินทุ้งกึ่งที่ปรับปรุง

2. วัสดุและวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ดินทุ้งกึ่ง สีเหลืองแดง เก็บตัวอย่างบริเวณบ่อดินที่มีความลึก 1-2 เมตร จากผิวดิน โดยเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample)

ยิปซัมที่ยิมนำมาจากโรงไฟฟ้ากระบี่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย นำมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศา แล้วคัดขนาดละเอียดกว่า 75 ไมครอน ด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 (เรียกว่า FGD)

แก้วปาล์มน้ำมัน จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม จังหวัดสุราษฎร์ธานี นำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 (เรียกว่า OPFA)

2.2 การออกแบบส่วนผสมและเตรียมตัวอย่าง

การออกแบบจะแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะทดสอบเพื่อหาค่ากำลังสูงสุด โดยแทนที่ดินทุ้งกึ่งด้วยยิปซัมที่ยิมร้อยละ 20 30 40 และ 50 ด้วยอัตราส่วนน้ำที่ 0.3 0.4 และ 0.5 ของน้ำหนักแห้งรวม ดังตารางที่ 1 หลังจากได้อัตราส่วนผสมที่ให้กำลังอัดสูงสุดแล้ว ขั้นตอนถัดมาก็เติมแก้วปาล์มน้ำมันแทนที่บางส่วนของยิปซัมที่ยิมที่อัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 ลงไปตามอัตราส่วนที่กำหนด ผสมให้เข้ากันเทลงในแบบหล่อพลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.9 ซม. และสูง 7.8 ซม. ใช้เครื่องจักรคอนกรีตส่งพลังงานบริเวณข้างแบบหล่อในการอัด ตัวอย่างที่เตรียมได้มาทำการห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกในชั้นแรก ส่วนชั้นที่สองหุ้มด้วยแผ่นตะกั่วบางป้องกันความชื้นไม่ให้ระเหยออกและเก็บไว้ในภาชนะที่มีฝาปิดและควบคุมอุณหภูมิ ป่มเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน

ตารางที่ 1. สัญลักษณ์ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

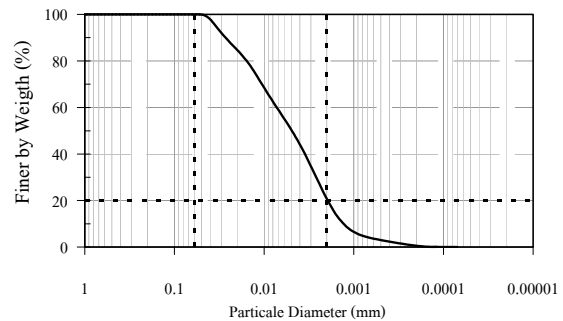
อัตราส่วนผสม (โดยน้ำหนัก)		สัญลักษณ์
OPFA	FGD	
0	20	OPF0FGD20
0	30	OPF0FGD30
0	40	OPF0FGD40
0	50	OPF0FGD50
5	45	OPF5FGD45
10	40	OPF10FGD40
15	35	OPF15FGD35

ตามลำดับ เมื่อครบกำหนดตัวอย่างชุดหนึ่งนำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ส่วนอีกชุดแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชม. ก่อนทดสอบกำลังอัดเช่นกัน การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยวิเคราะห์ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) และองค์ประกอบแร่ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction -XRD) เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแก่ดินภายหลังการผสม

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 สมบัติเบื้องต้นและการจำแนกชนิดของดิน

เมื่อพิจารณาค่าการกระจายตัวของดิน (รูปที่ 1) จัดเป็นดินจำพวกตะกอนทรายเม็ดละเอียด ซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่าร้อยละ 35 นอกจากนี้มีค่า L.L. และ P.I. ที่ 23.1 และ 7.7 ตามลำดับ เมื่อจำแนกดินโดยระบบ AASHTO จัดเป็นประเภท A - 4 (0) เมื่อปรับอัดแบบปรับปรุง (Modified) ที่ OMC ดินมีค่า CBR แบบไม่แช่น้ำ (unsoaked) และค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงถึงร้อยละ 116.9 และ 8.32 ksc แต่เมื่อนำดินบดอัดแบบปรับปรุงที่ OMC ไปแช่น้ำ (soak) พบว่าค่า CBR ไม่เหลือกำลังมีการสลายแยกตัวออก



รูปที่ 1 การกระจายขนาดของดินทุ้งกึ่ง

ตารางที่ 2. สมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินทุ้งกึ่ง

สมบัติทางกายภาพของดินทุ้งกึ่ง	ค่าได้
พิกัดเหลว (Liquid Limit -L.L., %)	23.1
พิกัดพลาสติก (Plastic Limit -P.L., %)	15.4
ดัชนีพลาสติก (Plastic Index -P.I.) %	7.7
ละเอียดกว่าตะแกรงเบอร์ 200 %	80.12
ปริมาณน้ำเหมาะสมที่สุด (OMC, %)	7.03
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลบ.ซม.)	2.10
133 ามถ่วงจำเพาะแห้ง	2.69
กำลังอัดแกนเดียวไม่แช่น้ำ (OMC), กก./ตร.ซม.	8.32
กำลังอัดแกนเดียวแช่น้ำ (OMC), กก./ตร.ซม.	0
CBR แบบปรับปรุง ไม่แช่น้ำ (%)	116.9
CBR (ปรับปรุง) แช่น้ำ (%)	2.0

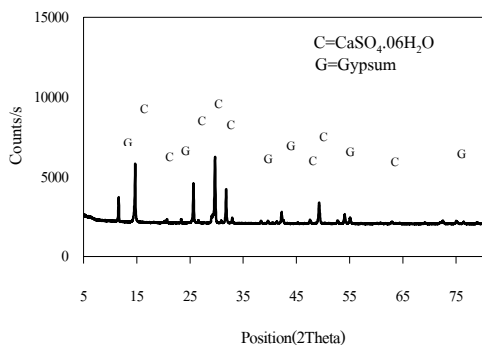
3.2 องค์ประกอบของแร่

จากตารางที่ 3 พบว่าดินทุ้งก้งมีสารประกอบของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ รวมกันสูงถึงร้อยละ 91.2% เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีความเหมาะสมกับการปรับปรุงสมบัติทางเคมี ในส่วนของเถ้าไยปาล์มน้ำมันมีแนวโน้มจะเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดีเพราะผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ รวมกันร้อยละ 67.6 และปริมาณ SO₃ น้อยกว่าร้อยละ 5 จัดเป็นสารปอซโซลาน Class C

ถึงแม้ว่ายิปซัมเทียมจากโรงไฟฟ้ากระบี่ไม่จัดเป็นสารปอซโซลาน แต่ปริมาณ CaO ที่สูงถึงร้อยละ 70.43 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่ายิปซัมนำมาใช้เป็นวัตถุติบเพื่อเชื่อมประสานอนุภาคเม็ดดินทำนองเดียวกับปูนซีเมนต์ได้ ผลวิเคราะห์องค์ประกอบยิปซัมเทียมด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่ายิปซัมเทียมได้เปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีจาก CaSO₄·2H₂O เป็น CaSO₄·0.6H₂O เกือบทั้งหมดหลังจากทำการอบที่อุณหภูมิ 100°C. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แต่ยังมีบางส่วนคงสภาพเป็นยิปซัมเทียมอยู่ (รูปที่ 2)

ตารางที่ 3. องค์ประกอบทางเคมี

สารประกอบ	ดินทุ้งก้ง	ยิปซัมเทียม	เถ้าปาล์มน้ำมัน
CaO	0.41	70.43	11.08
SiO ₂	70.12	14.41	59.01
Al ₂ O ₃	14.34	2.66	1.15
Fe ₂ O ₃	6.72	3.63	7.44
MgO	0	1.38	3.55
TiO ₂	0.98	0.22	0.1
SO ₃	0	3.78	2.59
LOI	3.94	2.44	0.89



รูปที่ 2 ลายเส้นผลวิเคราะห์การเบี่ยงเบนรังสีเอกซ์ของยิปซัมเทียม

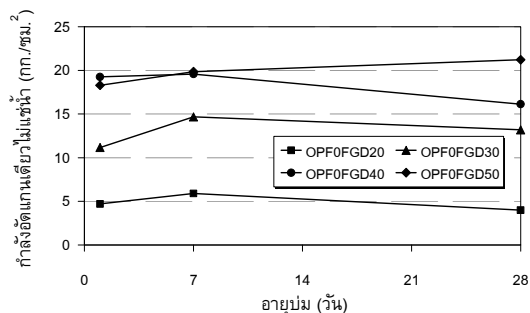
3.3 กำลังอัดแกนเดียวของดินผสมยิปซัมเทียม

ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดแกนเดียวของการแทนที่ดินทุ้งก้งที่ร้อยละ 20 30 40 และ 50 พบว่าที่ร้อยละ 50 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด (รูปที่ 3) ซึ่งให้เห็นว่าปริมาณยิปซัมเทียมที่

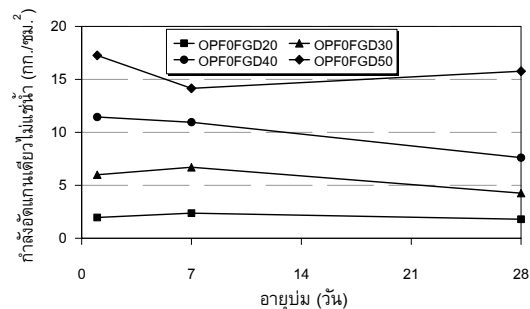
เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่ายิปซัมเทียมสามารถเชื่อมประสานอนุภาคเม็ดดินเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้ดินเกิดความแข็งแรงและพัฒนากำลังอัดได้ดี

อีกปัจจัยที่สำคัญที่มีผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นคือ ปริมาณน้ำ เพราะที่อัตราส่วนผสมเดียวกันหากลดอัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักแห้งรวมลง ค่ากำลังอัดแกนเดียวได้สูงขึ้นในทุกอัตราส่วนผสม (รูปที่ 3 4 และ 5) ที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่าหากมีน้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอยู่มาก น้ำส่วนเกินนี้จะไปก่อให้เกิดโพรงขึ้นภายใน และส่งผลให้เกิดการแยกส่วนระหว่างดินและยิปซัมเทียม นอกจากนี้ขณะยิปซัมเทียมยังก่อตัวไม่แข็ง น้ำส่วนเกินนี้จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดันตัวขึ้นสู่ด้านบนเกิดเป็นโพรงรูเล็ก (Capillary pores) บริเวณผิวหน้าก่อนตัวอย่าง

ดินที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมเมื่ออายุบ่มมากขึ้น ค่ากำลังอัดแกนเดียวโดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลงและมีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งต่างจากพฤติกรรมของการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์ (แสงทองและคณะ 2552) เมื่ออายุบ่มมากขึ้นกำลังของดินก็สูงขึ้นตามไปด้วย



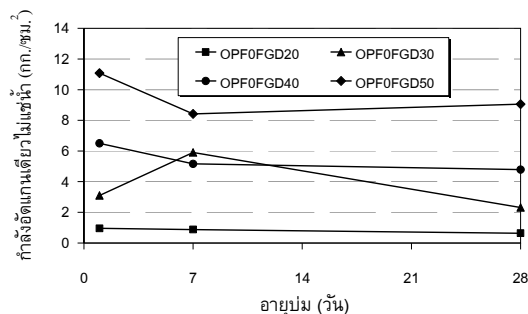
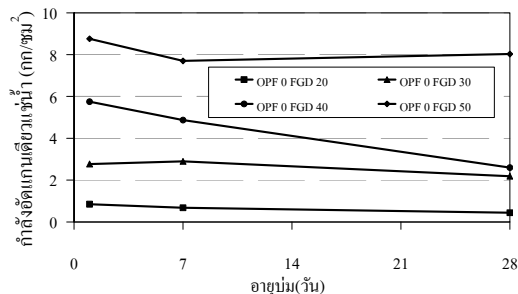
รูปที่ 3 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีผลต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง 0.3



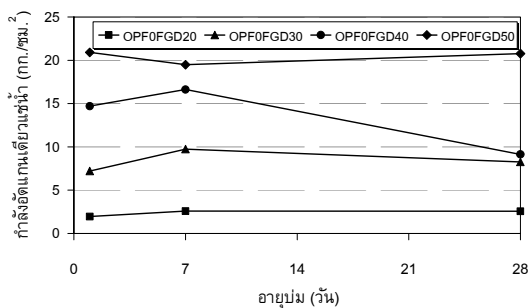
รูปที่ 4 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง 0.4

เมื่อพิจารณากำลังอัดแกนเดียวระหว่างตัวอย่างดินที่ไม่ได้แช่น้ำกับตัวอย่างดินที่แช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนทดสอบ พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวลดลงที่เป็นเช่นนั้น

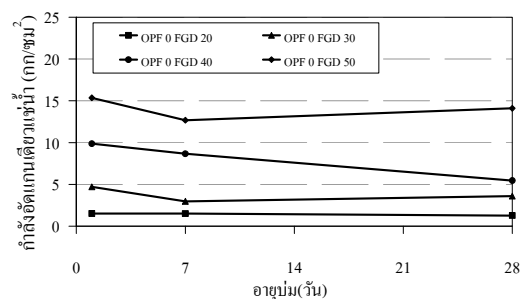
เพราะว่าน้ำบางส่วนดูดซึมเข้าอยู่ภายในก้อนตัวอย่างด้วยแรงรูเล็ก โดยเข้าไปบนพื้นทอนแรงยึดประสานระหว่างอนุภาคเม็ดดิน ซึ่งตามปกติแล้วดินชนิดทรายแป้ง หากมีน้ำอิมตัวอยู่มากจะไม่คงกำลังไว้ จากรูปที่ 6-8 บ่งให้เห็นว่าการแทนที่ยิปซัมเทียมในดินก่อให้เกิดพัฒนาการกำลังอัดขึ้นในดิน แม้ว่าดินอยู่ในสภาวะอิมตัวของน้ำอยู่ตลอดเวลา แต่ดินที่ปรับปรุงนี้ยังคงมีกำลังอัดอยู่ในเกณฑ์วัสดุคั้นทาง



รูปที่ 5 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีผลต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง 0.5



รูปที่ 6 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีผลต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง 0.3 หลังแช่น้ำ 2 ชั่วโมงก่อนทดสอบ



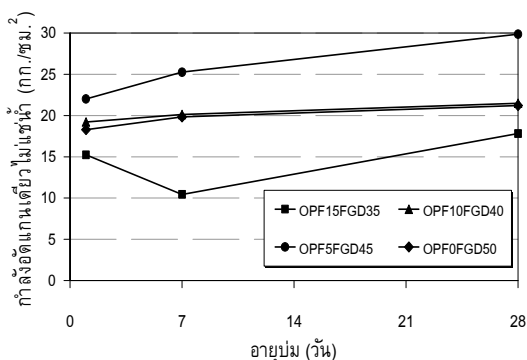
รูปที่ 7 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง 0.4 หลังแช่น้ำ 2 ชั่วโมงก่อนทดสอบ

รูปที่ 8 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีผลต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง 0.5 หลังแช่น้ำ 2 ชั่วโมง ก่อนทดสอบ

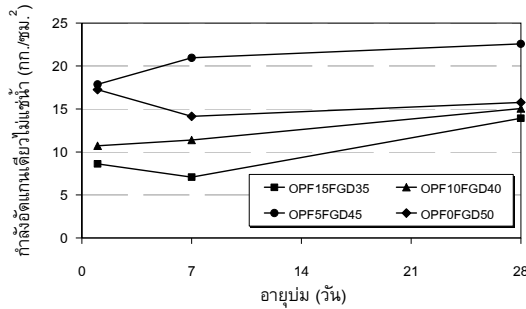
3.4 กำลังอัดของดินผสมยิปซัมเทียมและเถ้าเฝ้ายาล์มน้ำมัน

เมื่อแทนที่ยิปซัมเทียมบางส่วนด้วยเถ้าเฝ้ายาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 5 10 และ 15 ที่สามอัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง (รูปที่ 8 9 และ 10) พบว่ามีแนวโน้มกำลังอัดสูงขึ้นตามอายุบ่ม นอกจากนี้พบว่าที่บ่ม 28 วัน กำลังอัดแกนเดียวของดินมีค่าสูงสุด

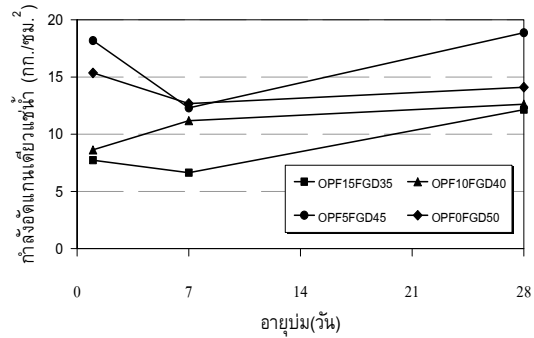
หากพิจารณาการแทนที่ยิปซัมเทียมบางส่วนด้วยเถ้าเฝ้ายาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 5 10 และ 15 พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าเฝ้ายาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 5 ทำให้ดินพัฒนากำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้นกว่าดินที่ไม่ได้แทนที่ด้วยเถ้าเฝ้ายาล์มน้ำมัน (รูปที่ 8 9 และ 10) ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากในยิปซัมเทียมมี CaO อยู่มาก เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็น Ca(OH)₂ ซึ่งเข้าไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อกับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าเฝ้ายาล์มน้ำมันและดินจนเกิดการเชื่อมประสานที่สมบูรณ์ขึ้น สอดคล้องกับที่ดิษฐพรและคณะ (2551) ได้กล่าวไว้ว่าเถ้าเฝ้ายาล์มน้ำมันบางส่วนมีปริมาณซิลิกาอิสระในรูปแก้วไร้เนื้อผลึก (Non - Crystalline Glass) ปนอยู่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับซิลิกาและอะลูมินาของดินปากพั้ง เกิดเป็นวัสดุประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH)



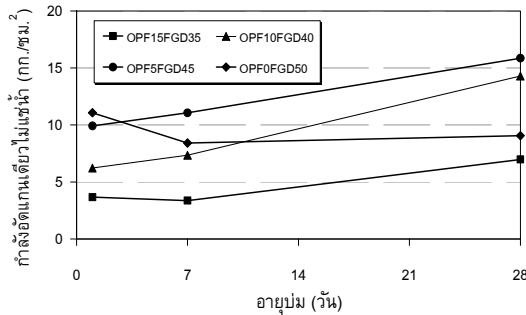
รูปที่ 9 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีผลต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง 0.3



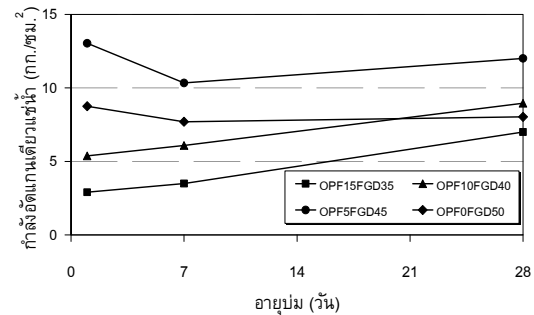
รูปที่ 10 อิทธิพลของอายุปุ๋ยที่มีต่อผลค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว ที่อัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง 0.4



รูปที่ 13 อิทธิพลของอายุปุ๋ยที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดแกนเดี่ยวโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง 0.4 ภายหลังแช่น้ำ 2 ชั่วโมง ก่อนทดสอบ

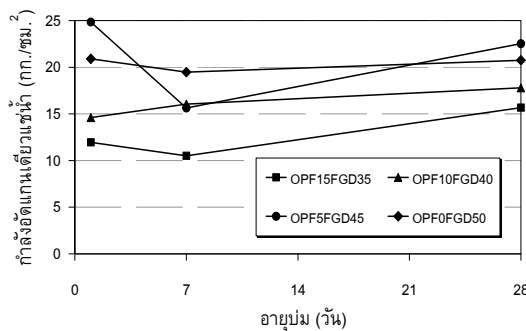


รูปที่ 11 อิทธิพลของอายุปุ๋ยที่มีผลต่อค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว ที่อัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง 0.5



รูปที่ 14 อิทธิพลของอายุปุ๋ยที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว ที่อัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง 0.5 ภายหลังแช่น้ำ 2 ชั่วโมงก่อนทดสอบ

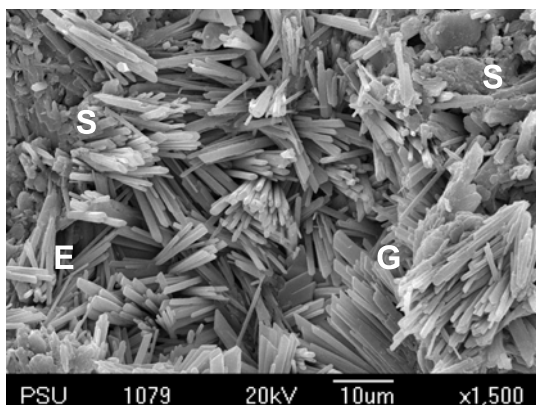
เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดี่ยวที่ 28 วัน อัตราส่วนน้ำ 0.3 ระหว่างดินที่ปรับปรุงด้วยยิปซัมเทียมผสมเก่าปาล์มน้ำมันที่แช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนทดสอบมีค่า 22.53 กก./ชม.² กับดินที่ไม่แช่น้ำมีค่า 29.86 กก./ชม.² พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดี่ยวลดลงร้อยละ 25 แต่ดินยังมีกำลังได้ดี นอกจากนี้การแทนที่ยิปซัมเทียมบางส่วนด้วยเก่าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 5 ทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดี่ยวสูงสุดเช่นเดียวกับดินที่ไม่ได้แช่น้ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง (กำลังอัดไม่น้อย 6 กก./ชม.²) และวัสดุหินคลุก (ไม่น้อยกว่า 17.5 กก./ชม.²) ตามเกณฑ์ที่กำหนดของกรมทางหลวง



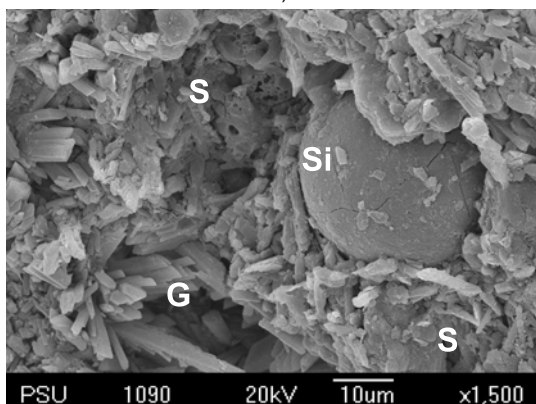
รูปที่ 12 อิทธิพลของอายุปุ๋ยที่มีผลต่อค่ากำลังอัดแกนเดี่ยวโดยอัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุง 0.3 หลังแช่น้ำ 2 ชั่วโมง ก่อนทดสอบ

3.5 โครงสร้างจุลภาค

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างดินแทนที่ด้วยยิปซัมเทียมที่อัตราส่วนร้อยละ 50 พบว่าในเนื้อดินที่ปรับปรุงเต็มไปด้วยผลึกของยิปซัม (G) ส่วนใหญ่เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนแยงยาว ส่วนแอดตริงโกต์ (E) รูปเข็มเล็กน้อยปนกับเม็ดดิน (S) รูปก้อนไม่สม่ำเสมอ (รูปที่ 14 ก) และเมื่อแทนที่ยิปซัมเทียมบางส่วนด้วยเก่าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 5 พบว่ามีผลึกยิปซัมบางส่วน และมีอนุภาคซิลิกอน (Si) ลักษณะกลมจากเก่าปาล์มน้ำมันฝังตัวอยู่ในเนื้อดินปรับปรุง (รูปที่ 15 ข) จากการเติมเก่าปาล์มเข้าไปทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้นได้ แต่เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวต้องอาศัยเวลาในการเกิด (ตนุพลและคณะ, 2547) จึงยังตรวจไม่พบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) นอกจากนี้ปริมาณน้ำผสมในดินที่ปรับปรุงได้ให้วัสดุประสานแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (calcium sulfate hemi hydrate) กลับคืนสู่สภาพผลึกยิปซัมเป็นส่วนใหญ่ รวมถึงมีรูเล็กทั่วไปหมดจากการระเหยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากปฏิกิริยาวัสดุประสานกับน้ำ คล้ายกับการหลอมด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์



ก)



ข)

รูปที่ 15 ภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบส่องกราดของตัวอย่างดิน ก) เดิม ยิปซัมเทียมร้อยละ 50 และ ข) เดิมยิปซัมเทียมร้อยละ 45 และถ้ำไยปาล์มน้ำมันร้อยละ 5

4. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองครั้งนี้ พอสามารถสรุปแนวทางได้ดังนี้ คือ

1. ของเสียยิปซัมเทียมจากโรงไฟฟ้ากระบี่และถ้ำปาล์ม น้ำมันจากโรงงานน้ำมันปาล์มสามารถนำมาใช้ปรับปรุงดินทุ่งงที่มีลักษณะเป็นดินตะกอนทรายให้พัฒนาใกล้เคียงได้ อันเหมาะสมกับสภาพหน้างานดินในภาคใต้

2. ปริมาณยิปซัมเทียมที่เพิ่มขึ้นในดินทุ่งงส่งผลให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น ในแง่กลับกันอัตราส่วนน้ำต่อดินปรับปรุงลดลง มีผลให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น

3. การแทนที่ยิปซัมเทียมบางส่วนด้วยถ้ำไยปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ทำให้ดินทุ่งงพัฒนาใกล้เคียงที่สุด

การปรับปรุงด้วยวัสดุของเสียจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนและอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มสามารถนำมาปรับปรุงดินร่วนที่อ่อนกำลังได้ดี ถึงขั้นระดับนำมาใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางและหินคลุกในงานการทางได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและหน่วยวิจัยธรณีเทคนิคและวัสดุก่อสร้างนวัตกรรม ที่ได้ให้การสนับสนุน

รวมทั้งโรงไฟฟ้ากระบี่และโรงงานปาล์มน้ำมันทักษิณสุราษฎร์ธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบ

เอกสารอ้างอิง

دنوفل دننئوگاس منوؤو ماكنئم ولسؤوئوؤى هلساؤرئوؤاؤل.

2547. อธิพิลของถ้ำเชื้อเพลิงกะลาปาล์มที่มีผลต่อกำลังและความคงทนของมอร์ตาร์ การประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์ มอ ครั้งที่ 3 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 8-9 ธันวาคม 2547 หน้า MN1-MN6. CD-ROM

ดิษฐุพร แก้วมูณีโซค دنوفล دنนئوگاس และพิพัฒนา ทองจิม.

2551. พฤติกรรมทางกายภาพ – เชิงกลของส่วนผสมดินเหนียวปากพั้งกับถ้ำไยปาล์มน้ำมันและถ้ำไยยางพาราที่ยึดประสานด้วยตนเอง การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13 รร.จอมเทียนปาล์มบีช พัทยา จ.ชลบุรี 14-16 พฤษภาคม 2551 6 หน้า หน้า (MAT) Page 387- (MAT) Page 392. (CD-ROM)

ภาณุวัฒน์ สุริยฉัตร และสำราญ มีล่อง 2547. คุณสมบัติธรณีเทคนิคของดินเหนียวบางกอกผสมเรยิปซัม วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 27 ฉบับที่ 1 หน้า 3-16.

แสงทอง อินธิแสง, สมชาย อินทะตา, เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และอลงกรณ์ ละม่อม. 2552. ผลกระทบของการใช้เอฟีซีดี ยิปซัมในปูนซีเมนต์ต่อการก่อตัวและกำลังอัด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14

สุวิวัฒนา นิคม และدنوفล دننئوگاس. 2552. คุณสมบัติบางประการของวัสดุยิปซัมเทียมผสมถ้ำล่อยไยยางพารา การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 13-15 พฤษภาคม 2552 เล่มที่ 5 หน้า 1793-1799.

อรุณ สุวรรณสุนทร دنوفล دنนئوگاس และพิพัฒนา ทองจิม. 2552. การปรับปรุงสมบัติทางธรณีเทคนิคของดินเหนียวสงขลาด้วยถ้ำจากของเสียอุตสาหกรรมเกษตร การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 13-15 พฤษภาคม 2552 เล่มที่ 1 หน้า 273-279.

Degirmenci, N., Okucu, A. and Turabi, A. 2007. Application of phosphogypsum in soil stabilization, Building and Environment. Sept. 42(9): 3393 – 3398.

Hossan, H.F., Taha, R., Rawas, A.A.I., Shandoudi, B.A.I., Ghaithi, K.A.I. and Barami, A.M.A.I. 2005. Potential uses of petroleum – contaminated soil in highway construction, Construction and Building Materials. 19(8): 646-652.

Sing, S.P., Tripathy, D.P. and Ranjit, P.G. 2008. Performance evaluation of cement stabilized fly ash – GBFS mixes as a highway construction material, Waste Management, 28(8): 1331-1337.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15

12 – 14 พฤษภาคม 2553 โรงแรมสุนิษฐ์แกรนด์เอนด์คอนเวนชั่นเซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี



IMPROVEMENT OF SUB-BASE MATERIAL PROPERTIES WITH FLNE GAS

DESULPHURIZATION SLUDGE AND OIL PALM ASH

การปรับปรุงสมบัติของวัสดุรองพื้นทางด้วยยิปซัมเทียมและเถ้าไพล์มน้ำมัน

ภักดี บัวจันทร์ (Pakdee Bourjan)¹

ณัฐพล ตันนโยภาส (Danupon Tonnayopas)²

พิพัฒน์ ทองฉิม (Pipat Tongchim)³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ pakdee_2550@hotmail.com

²รศ.ดร.หน่วยวิจัยธรณีเทคนิคและวัสดุก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ danupon.t@psu.ac.th

³ดร.หน่วยวิจัยธรณีเทคนิคและวัสดุก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ pipat_tongchim.@yahoo.com

บทคัดย่อ : ศึกษาทดสอบคุณลักษณะของดินปนทรายแป้งทุ่งกงที่มียิปซัมเทียมเป็นตัวปรับปรุงในประเด็น อัตราส่วนผสม ความหนาแน่นรวม กำลังอัด และอัตราส่วนรับแรงแบกทาน แบบแช่น้ำบางอัตราส่วน ได้ดำเนินการวัดตัวอย่างดินทุ่งกงที่แทนบางส่วนด้วยยิปซัมเทียมในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักแห้ง นอกจากนี้ที่ยิปซัมเทียมอัตราส่วนร้อยละ 50 ได้แทนบางส่วนด้วยเถ้าไพล์มน้ำมันร้อยละ 5 10 และ 15 ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกันตั้งแต่ 0.30, 0.40 และ 0.50 ก้อนตัวอย่างยังได้บ่มในบรรยากาศห้องเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน เตรียมก้อนตัวอย่างดินผสมยิปซัมเทียมรูปทรงกระบอกขนาด 135×35 มม. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของก้อนตัวอย่างด้วยเทคนิครังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์และโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดสอบบ่งว่ากำลังอัด การรับแรงแบกทานแบบแช่น้ำของก้อนตัวอย่างดินปนทรายแป้งผสมยิปซัมเทียมเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมโดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ทำให้ความหนาแน่นรวมลดลง จากมุมมองพฤติกรรมเชิงกลการเติมยิปซัมเทียมร้อยละ 45 และเถ้าไพล์มน้ำมันร้อยละ 5 ในดินทรายแป้งบ่มที่ 28 วัน ให้กำลังอัดสูงสุดทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำคือ 22.53 และ 29.86 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าอัตราส่วนรับแรงแบกทานแบบแช่น้ำได้สูงสุด 98.88% ซึ่งบ่งว่าการผสมวัสดุขี้เถ้าเหล่านี้เหมาะสมสำหรับใช้ในงานโครงสร้างถนนชั้นรองพื้นทางและพื้นทางได้

ABSTRACT :

An experimental characteristic of Tung Kong silty soil (TKSS) with flue gas desulphurization composite (FGDC) as the stabilizer were investigated in terms of mix proportions, bulk density unconfined compressive strength (UCS) and California bearing ratio (CBR). Measurements were carried out in a TKSS-FGDC ratios of 20%, 30%, 40% and 50% by dry weight were replaced partially TKSS. Moreover, at 50% FGDC was replaced partially of 5, 10 and 15% OPA with different water-binder ratios (w/b) of 0.30, 0.40, and 0.50. The specimens were also cured in ambient temperature for 1, 7 and 28 days. To prepare soil-FGDC cylindrical specimens in size of 135×35 mm. Chemical analysis of the specimens using X-Ray Florescence (XRF) technique and microstructure through Scanning Electron Microscope (SEM) was determined. Based on the test result revealed that the UCS of TKSS-FGDC specimens were increased depend upon the mix proportions of FGDC, especially w/b ratio, that bulk density has been decreased. From the point of view in mechanical performance, adding 45% FGDS and 5% OPA in TKSS cured at 28-d was given highest UCS

in soaked and unsoaked conditions of 29.86 and 22.53 ksc, respectively. The maximum CBR value of compacted OPA-FGDC-TKSS in soaked was obtained 98.88%, indicating its suitability for use in base and sub-base course in highway pavement with proper combination of raw materials.

Keywords: Flue gas desulphurization composite, Oil palm ash, Highway construction material, Tung Kong silty soil, Unconfined compressive strength

1. บทนำ

ในงานก่อสร้างถนนซึ่งประกอบด้วยชั้นโครงสร้างต่างๆ เช่น ผิวทาง พื้นทาง รองพื้นทาง วัสดุคัดเลือก งานดินถม ทั้งนี้ เพื่อให้ถนนมีความมั่นคงแข็งแรงสามารถรับกำลังได้ตามที่ออกแบบ ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้ต้องมีสมบัติทางวิศวกรรมที่ดี มีคุณภาพตามมาตรฐานกำหนด แต่ในข้อเท็จจริงนั้นวัสดุตามธรรมชาติที่มีสมบัติตามมาตรฐานกำหนดในงานโครงสร้างถนนค่อนข้างจำกัดหรือมีแต่อยู่ห่างไกลจากทำการโครงการ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูงมากหรืออยู่ในเขตป่าสงวน จึงเป็นข้อจำกัดที่ไม่สามารถนำวัสดุเหล่านั้นมาใช้ก่อสร้างได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าวได้เกิดขึ้นกับหลายพื้นที่ในจังหวัดสุราษฎร์ธานี และจังหวัดใกล้เคียงและนับวันทวีความรุนแรงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นปรับปรุงดินท้องถิ่นที่มีอยู่ด้วยวิธีทางเคมีได้นำดินในตำบลทุ่งกงอำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี ซึ่งเป็นดินทรายแป้งที่มีกำลังอัดไม่สูงและหากมีความชื้นสูงแทบไม่มีกำลังอัดเพียงพอแก่งานทางโครงสร้างวิศวกรรมธรณีเทคนิค [1] ที่ผ่านมามีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุที่เหลือจากอุตสาหกรรมต่างๆ นำมาใช้เป็นแรมผสมเพิ่มปรับปรุงดินในงานทางธรณีเทคนิค เช่น เถ้าลอย [2] ฟอสโฟยิปซัม [3] เถ้าปาล์ม น้ำมัน [4] เถ้าแกลบ [5] พบว่าหากผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในดินเหนียวอ่อนสามารถเพิ่มค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่ารับแรงเบกทานแคลิฟอร์เนีย (CBR) ให้สูงขึ้น นอกจากนี้ยิปซัมธรรมชาติก็นำมาปรับปรุงดินเหนียวบางกอกได้ [4] ซึ่งพบว่ายิปซัมเทียมที่เป็นของเสียจากกระบวนการดักจับก๊าซซัลเฟอร์จากการเผาไหม้ น้ำมันเตาเมื่อนำมาอบที่ 100 องศา เกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต หากผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อแข็งตัวพัฒนา กำลังอัดได้เช่นกัน [6] ในตำบลทุ่งกงมีบ่อดินยืมอยู่หลายแห่ง เพื่อเป็นแนวทางที่จะปรับปรุงสมบัตินำมาใช้ในชั้นรองพื้นทาง จึงได้นำยิปซัมเทียมและเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ในปรับปรุงสมบัติในแง่กำลังอัดและให้ดินที่ปรับปรุงยังคงมีกำลังเหลืออยู่อีกหากอยู่ในสถานะแช่น้ำเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมงตามมาตรฐาน

ของกรมทางหลวง

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุที่เหลือจากอุตสาหกรรมหรือของเสียมาปรับปรุงดินเพื่อใช้ในการงานสร้างถนน [7, 8, 9] โดยเฉพาะเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าหากผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในดินเหนียวสามารถเพิ่มกำลังอัดแกนเดียวและค่า CBR ให้สูงขึ้นมาก [4] ดังนั้นคณะวิจัยจึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการใช้ยิปซัมเทียมโดยแทนที่ดินทุ่งกงจำนวนร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยใช้ยิปซัมเทียมเป็นวัสดุประสานระหว่างอนุภาคเม็ดดิน รวมถึงเติมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีคุณลักษณะเป็นสารปอซโซลาน [10] แทนที่ยิปซัมเทียมบางส่วนที่ร้อยละ 5 10 และ 15 เพื่อประเมินพฤติกรรมกำลังอัดของดินทุ่งกงที่ปรับปรุง

2. วัสดุและวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ดินทุ่งกง สีเหลืองแดง เก็บตัวอย่างบริเวณบ่อดินที่ความลึก 1–2 เมตร จากผิวดิน โดยเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนแปลงสภาพ (Disturbed Sample) ยิปซัมเทียมนำมาจากโรงไฟฟ้ากระบี่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย นำมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศา แล้วคัดขนาดละเอียดกว่า 75 ไมครอน (เรียกว่า FGD) เถ้าปาล์มน้ำมันนำมาจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม จังหวัดสุราษฎร์ธานี นำมาคัดขนาด 75 ไมครอน (เรียกว่า OPFA) เช่นกัน

2.2 การออกแบบส่วนผสมและเตรียมตัวอย่าง

การออกแบบจะแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะทดสอบเพื่อหาค่ากำลังสูงสุด โดยแทนที่ดินทุ่งกงด้วยยิปซัมเทียม ร้อย 20 30 40 และ 50 ด้วยอัตราส่วนน้ำที่ 0.3 0.4 และ 0.5 ของน้ำหนักแห้งรวม ดังตารางที่ 1 หลังจากได้อัตราส่วนผสมที่ให้กำลังอัดสูงสุดแล้ว ขั้นตอนถัดมาก็เติมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่บางส่วนของยิปซัมเทียมที่อัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 ลงไปตามที่กำหนดไว้ ผสมให้เข้ากันลงในแบบหล่อพลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.9 ซม. และสูง 7.8 ซม. ใช้เครื่องจี

คอนกรีตส่งพลังงานบริเวณข้างแบบหล่อในการอัด ตัวอย่างที่เตรียมไว้มาทำการห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกในชั้นแรก ส่วนชั้นที่สองหุ้มด้วยแผ่นตะกั่วบางป้องกันความชื้นไม่ให้ระเหยออกและเก็บไว้ในภาชนะที่มีฝาปิดและควบคุมอุณหภูมิ บ่มเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

อัตราส่วนผสม (โดยน้ำหนัก)		สัญลักษณ์	ความหนาแน่นรวม ที่ 28 วัน (T/m^3)		
OPFA	FGD		w30%	w40%	w50%
0	20	OPF0FGD20	1.46	1.30	1.18
0	30	OPF0FGD30	1.46	1.28	1.17
0	40	OPF0FGD40	1.41	1.26	1.14
0	50	OPF0FGD50	1.42	1.27	1.13
5	45	OPF5FGD45	1.37	1.23	1.11
10	40	OPF10FGD40	1.37	1.23	1.11
15	35	OPF15FGD35	1.37	1.22	1.11

2.3 วิธีการทดสอบ

ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วย การตรวจสอบสารประกอบทางเคมีด้วยวิธี X – Ray Fluorescence (XRF) และตรวจหาองค์ประกอบของแร่ด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อศึกษาโอกาสการเกิดปฏิกิริยาจากองค์ประกอบทางเคมี

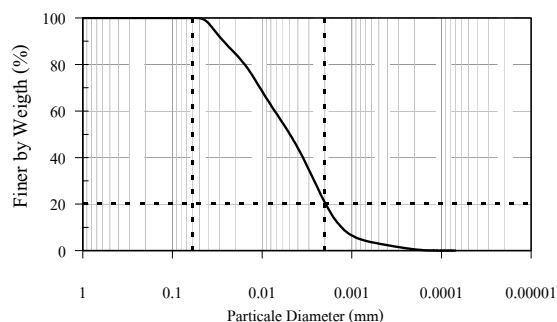
การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCS) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 กับทุกอัตราส่วนการผสม เมื่อครบกำหนดตัวอย่างชุดหนึ่งนำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ส่วนอีกชุดแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชม. ก่อนทดสอบกำลังอัดเช่นกัน นำตัวอย่างสูตรผสมดีที่สุดไปทดสอบการรับแรงแบกทานและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 สมบัติเบื้องต้นและการจำแนกชนิดของดิน

เมื่อพิจารณาค่าการกระจายตัวของดินจากภาพที่ 1 จัดเป็นดินจำพวกตะกอนทรายเม็ดละเอียดซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่าร้อยละ 35 นอกจากนี้ค่า L.L. และ P.I. ได้ 23.1 และ 7.7 เมื่อจำแนกดิน โดยระบบ AASHTO จัดเป็นประเภท A-4 (0) เมื่อบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified) ที่ OMC ดินมีค่า CBR แบบไม่แช่น้ำ 116.9% และค่ากำลังอัดแกนเดียว 8.32 ksc แต่เมื่อ

นำดินบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ OMC ไปแช่น้ำพบว่าค่า CBR แทบจะไม่สามารถรับกำลังได้



ภาพที่ 1 ค่าการกระจายตัวของดินทุ้งกง

ตารางที่ 2 สมบัติทางวิศวกรรมดินทุ้งกง

สมบัติทางกายภาพของดินทุ้งกง	ค่าแสดง
Liquid Limit (L.L.)	23.1 %
Plastic Limit (P.L.)	15.4 %
Plastic Index (P.I.)	7.7 %
PASSING # No 200	80.12 %
Grain Size Distribution(ตามระบบ MIT)	
ทราย(Sand)ขนาด 0.06 – 2 mm	-
ดินตะกอน (Silt)ขนาด 0.002-0.06mm	79.10 %
ดินเหนียว(Clay) ขนาด <0.002 mm	20.90 %
ประเภทของดินตามระบบ AASHTO	A - 4 (0)
OMC	7.03 %
Maximum dry density	2.10 g/cm ³
Specfic Gravity	2.69 Gs
Unconfined Compressive Strength, Un soak (Water Content at OMC)	8.32 ksc
Unconfined Compressive Strength, soak (Water Content at OMC)	0 ksc

3.2 สารประกอบทางเคมี

จากตารางที่ 3 พบว่าดินทุ้งกงมีสารประกอบของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันสูงถึงร้อยละ 91.2% เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีความเหมาะสมกับการปรับปรุงสมบัติทางเคมี ในส่วนของเถ้าไยปาล์ม น้ำมันมีแวนอไน้มจะเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดี

เพราะผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันร้อยละ 67.6 และปริมาณ SO_3 น้อยกว่าร้อยละ 5 จัดเป็นสารปอซโซลาน Class C ถึงแม้ว่ายิปซัมเทียมจากโรงไฟฟ้ากระบี่ไม่จัดเป็นสารปอซโซลาน แต่ปริมาณ CaO ที่สูงถึงร้อยละ 70.43 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่า ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุคิบที่ใช้ศึกษา

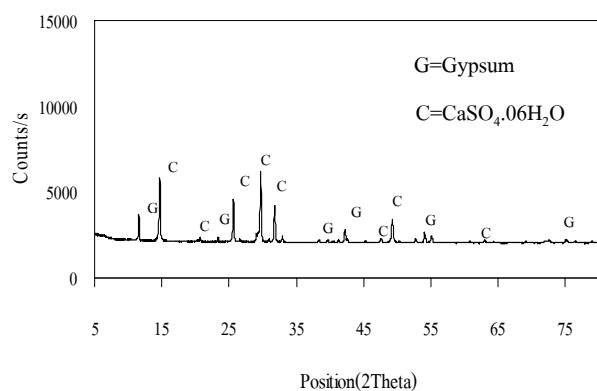
สารประกอบ	ดินทุ่งกง	ยิปซัมเทียม	เถ้าปาล์มน้ำมัน
CaO	0.41	70.43	11.08
SiO_2	70.12	14.41	59.01
Al_2O_3	14.34	2.66	1.15
Fe_2O_3	6.72	3.63	7.44
MgO	0	1.38	3.55
TiO_2	0.98	0.22	0.1
SO_3	0	3.78	2.59
LOI	3.94	2.44	0.89

ยิปซัมเทียมสามารถใช้เป็นวัสดุคิบหลักเพื่อเชื่อมประสานอนุภาคเม็ดดินคล้ายกับปูนซีเมนต์

3.3 องค์ประกอบของแร่

ผลวิเคราะห์ยิปซัมเทียมด้วย X-Ray Diffraction พบว่าได้เปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีจาก $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เป็น $\text{CaSO}_4 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ เกือบทั้งหมดหลังจากทำการอบที่อุณหภูมิ $100 \text{ }^\circ\text{C}$. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แต่ยังมีบางส่วนยังคงสภาพเป็นยิปซัมเทียมอยู่ดังภาพที่ 2

การเชื่อมประสานเกิดขึ้นเมื่อ $\text{CaSO}_4 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ รวมตัวกับน้ำ เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันย้อนกลับ ขณะเดียวกันก็คายความร้อนออกมา โดยอนุภาค $\text{CaSO}_4 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ จะรวมตัวกลับไปเป็นผลึกรูปเข็ม $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ อีกครั้ง ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะกลายเป็นก้อนแข็งมีความสามารถในการเชื่อมประสานที่ดี



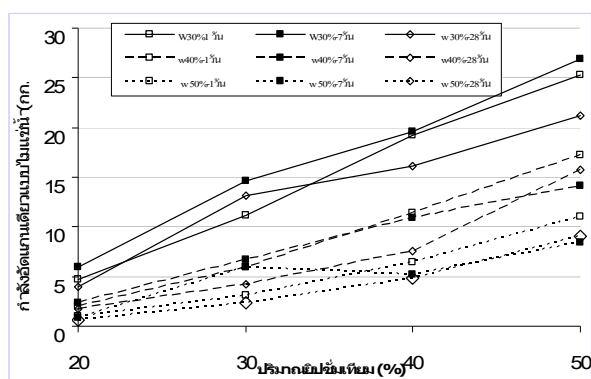
ภาพที่ 2 ผลตรวจการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของยิปซัมเทียม

3.4 กำลังอัดแกนเดียวของดินผสมยิปซัมเทียม

ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินทุ่งกงแทนด้วยยิปซัมเทียมที่ร้อยละ 20 30 40 และ 50 พบว่าที่ร้อยละ 50 ให้ค่ากำลังสูงสุดทุกอัตราส่วนดังภาพที่ 3 โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักแห้งรวม 0.3 0.4 และ 0.5 มีค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 21.2, 17.3 และ 11.1 ksc ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่าปริมาณยิปซัมเทียมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่ายิปซัมเทียมสามารถเชื่อมประสานอนุภาคเม็ดดินยึดเข้าไว้ด้วยกันส่งผลให้ดินเกิดความแข็งแรงและให้กำลังได้ดี

อีกปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นคือปริมาณน้ำต่อน้ำหนักแห้งรวม เพราะที่อัตราส่วนผสมเดียวกันหากลดอัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักแห้งรวมลง กำลังอัดแกนเดียวจะสูงขึ้นทุกอัตราส่วนผสม ที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่าหากมีน้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอยู่มาก น้ำส่วนเกินนี้จะไปทำให้เกิดโพรงขึ้นภายใน และส่งผลให้เกิดการแยกส่วนระหว่างดินและยิปซัมเทียม นอกจากนี้ในขณะที่ยิปซัมเทียมกำลังก่อตัว น้ำส่วนเกินนี้จะดันฟองอากาศขึ้นสู่ผิวด้านบนเกิดเป็นโพรงรูเล็ก (Capillary pores) บริเวณผิวหน้าก่อนตัวอย่างดิน

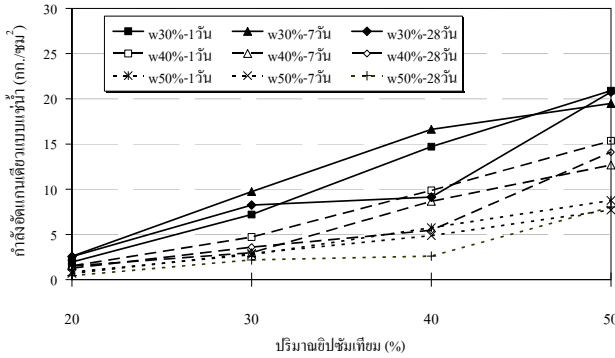
การแทนที่ดินด้วยยิปซัมเทียมเมื่ออายุบ่มมากขึ้นค่ากำลังอัดแกนเดียวโดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลงและมีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดที่อายุบ่ม 7 วัน ต่างกับพฤติกรรมของการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์ เมื่ออายุบ่มมากขึ้นค่ากำลังของดินก็สูงขึ้น [11]



ภาพที่ 3 อิทธิพลของยิปซัมเทียมที่มีต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ไม่แช่น้ำ

เมื่อพิจารณากำลังอัดแกนเดียวระหว่างดินที่แช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนทดสอบกับดินที่ไม่ได้แช่น้ำพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวลดลง ที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่าน้ำบางส่วนจะซึมเข้าภายในก้อนตัวอย่าง โดยเข้าไปทำลายแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคเม็ด

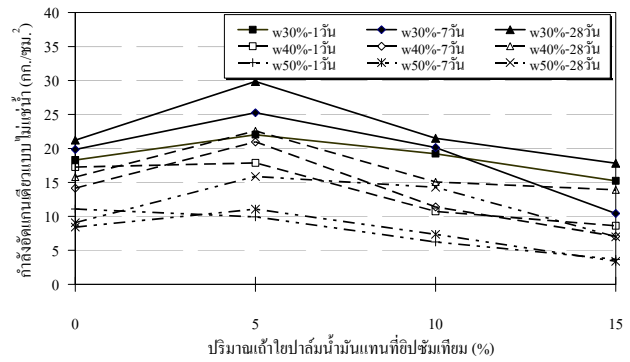
ดิน ซึ่งตามปกติแล้วดินประเภททรายแป้งหากมีน้ำอิมตัวอยู่มาก จะให้กำลังเล็กน้อย จากภาพที่ 4 ซึ่งให้เห็นว่าการแทนที่ที่อิมซึม เทียมในดินช่วยเพิ่มกำลังอัดแก่ดิน แม้ว่าจะอยู่ในสภาวะอิมตัวของน้ำอยู่ตลอดเวลา ดินที่ปรับปรุงนี้ยังมีกำลังพอ



ภาพที่ 4 อิทธิพลของอิมซึมที่ขมที่มีต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่แช่น้ำ

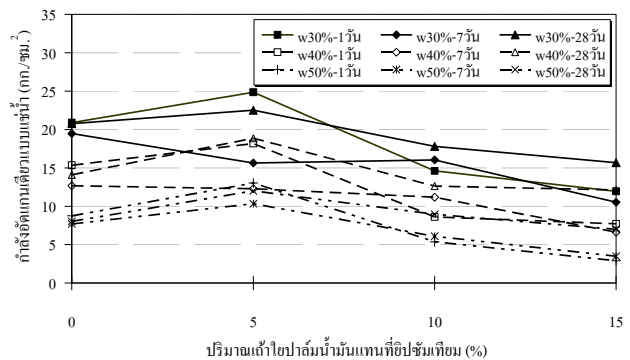
3.5 กำลังอัดแกนเดียวของดินที่ผสมเถ้าไพล่าส้มน้ำมัน

พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยอิมซึมเทียมร้อยละ 50 ทำให้ดินมีกำลังอัดสูงสุด จึงนำมาแทนที่อิมซึมเทียมบางส่วนด้วยเถ้าไพล่าส้มน้ำมันที่ร้อยละ 5 10 และ 15 พบว่าการแทนที่อิมซึมเทียมบางส่วนด้วยเถ้าไพล่าส้มน้ำมัน มีแนวโน้มทำให้กำลังอัดสูงขึ้นตามอายุบ่ม พบว่าที่ 28 วัน กำลังอัดแกนเดียวของดินมีค่าสูงสุด ต่างกับดินที่ผสมด้วยอิมซึมเทียมล้วนกำลังอัดแกนเดียวจะสูงสุดที่ 7 วัน และกำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มตกลงที่อายุบ่ม 28 วัน ในการแทนที่อิมซึมเทียมบางส่วนด้วยเถ้าไพล่าส้มน้ำมัน พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าไพล่าส้มน้ำมันที่ร้อยละ 5 ทำให้ดินมีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้นกว่าอัตราส่วนอื่น โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักแห้งรวม 0.3 0.4 และ 0.5 มีค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 29.9, 22.6 และ 15.7 ksc ตามลำดับดังภาพที่ 5 ที่เป็นเช่นนี้เพราะในอิมซึมเทียมมี CaO ปนอยู่เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็น Ca(OH)₂ ซึ่งจะเข้าไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อกับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าไพล่าส้มน้ำมันจนเกิดการเชื่อมประสานที่สมบูรณ์ขึ้นสอดคล้องกับ สมชัย[3] ได้กล่าวไว้ว่าถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะส่วนใหญ่จะมีปริมาณ CaO อิสระปนอยู่มากจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่อกับซิลิกาและอะลูมินาซึ่งอยู่ในรูปของ Non - Crystalline Glass จนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งตัวขึ้นได้ เช่น Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH)



ภาพที่ 5 อิทธิพลของเถ้าไพล่าส้มน้ำมันที่มีต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ไม่แช่น้ำ

เมื่อพิจารณากำลังอัดแกนเดียวระหว่างดินที่ปรับปรุงด้วยอิมซึมเทียมผสมเถ้าไพล่าส้มน้ำมันที่แช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนทดสอบกับดินที่ไม่ได้แช่น้ำ พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวลดลงเล็กน้อยและดินยังมีกำลังได้ดี นอกจากนี้การแทนที่อิมซึมเทียมบางส่วนด้วยเถ้าไพล่าส้มน้ำมันที่ร้อยละ 5 ดังภาพที่ 6 ทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดเช่นเดียวกับของดินที่ไม่แช่น้ำ



ภาพที่ 6 อิทธิพลของเถ้าไพล่าส้มน้ำมันที่มีต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่แช่น้ำ

3.6 ค่า California Baring Ratio (CBR)

อัตราส่วน FGD45:OPF5 มีค่าCBR แบบแช่น้ำ สูงถึง 98.75% ที่ 28 วัน ซึ่งมากกว่าดินก่อนปรับปรุงที่มีค่าแค่ 2% ซึ่งสอดคล้องกับดิฐพรและคณะ [4] และจากผลการทดสอบพบว่าเมื่ออายุการบ่มให้ค่า CBR ใกล้เคียงกันดังภาพที่ 7 แต่อัตราส่วนน้ำที่ใช้ในการผสมจะมีผลแปรผกผันกับค่า CBR ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักแห้งรวม 0.30 0.40 และ 0.50 ได้ค่า CBR เท่ากับ 98.88 53.27 และ 44.72% ตามลำดับ(ภาพที่ 8)

- [11] คณูปถัมภ์ โยภาส มนูญ มาศนิยม และสุทธิชัย เหล่าปรีชากุล. 2547. อิทธิพลของเส้นใยพอลิเอทิลีนที่ผสมต่อกำลังและความคงทนของมอร์ตาร์ การประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์ มอ ครั้งที่ 3 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 8-9 ธันวาคม 2547 หน้า MN1-MN6. CD-ROM
- [12] Shihata S.A. and Baghdadi Z.A. 2001. Long-term strength and durability of soil cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 13, Issue 3, 161-165.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายภักดี บัวจันทร์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5010120109	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล	2542

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

วิศวกรโยธาชำนาญการ ผู้อำนวยการส่วนบูรณะ สำนักทางหลวงชนบทที่ 11 (สุราษฎร์ธานี)

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ภักดี บัวจันทร์, ดนุพล ตันนโยภาส และ พิพัฒน์ ทองฉิม (2553). การปรับปรุงดินคันทางด้วยตะกอนจากดักจับก๊าซซัลเฟอร์ผสมเกลือปาล์มน้ำมันปาล์ม. การประชุมวิชาการการจัดการของเสียและพลังงานทางเลือกในสภาวะโลกร้อน: โอกาสและความท้าทาย 11 - 12 กุมภาพันธ์ 2553 โรงแรม เจ บี อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา.

ภักดี บัวจันทร์, ดนุพล ตันนโยภาส และ พิพัฒน์ ทองฉิม (2553). การปรับปรุงสมบัติของดินทุ่งงด้วยยิปซัมเทียมผสมเกลือปาล์มน้ำมัน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 12 - 14 พฤษภาคม 2553 โรงแรมสุโขทัยแกรนด์ แอนด์ คอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี